

# 目 录

## 上 册

### 前言

第一章 基础知识 .....	1
第一节 电工数学基础 .....	1
一、正弦量、复数及矢量 .....	1
二、对称分量法及其应用 .....	6
三、对称分量法计算举例 .....	14
第二节 电工基础知识及基本公式 .....	15
一、正弦交流电基本量及计算 .....	15
二、电阻、电感和电容在电路中的计算 .....	18
三、电工学常用公式 .....	21
四、网络变换的基本方式和计算 .....	25
五、电路的串联谐振和并联谐振计算 .....	31
六、三相交流电路中的高次谐波 .....	31
七、非正弦交流电计算 .....	35
八、含电容电感电路的瞬变现象 .....	56
九、媒质处于交变磁场中的损耗计算 .....	60
十、电磁屏蔽透入深度计算 .....	62
第三节 电感和电容的计算 .....	63
一、电感计算 .....	63
二、电容计算 .....	68
第二章 输配电 .....	73
第一节 电路参数计算 .....	73

---

一、导线、电缆的电阻、电抗和电容的计算 .....	73
二、常用导线、电缆的电阻和电抗 .....	81
第二节 线损和电压降计算 .....	87
一、直流线路计算 .....	87
二、配电线路损耗计算 .....	89
三、技术经济比较确定配电网络方案 .....	104
四、配电方式和电源位置对线损的影响 .....	106
五、并联线路中负荷经济分配的原则 .....	106
六、开环运行线路负荷经济分配的原则 .....	109
七、配电线路电压损失允许值及电压波动对设备的影响 .....	112
八、线路电压损失计算 .....	116
九、380/220V 系统中零线电位升高的计算 .....	132
十、相序对线路电流的影响计算 .....	135
十一、电网谐波的影响及计算 .....	139
十二、民用住宅电气负荷的计算 .....	143
第三节 工厂用电量计算 .....	145
一、用电设备、车间和全厂计算负荷的确定 .....	145
二、工厂年电能需要量的计算 .....	162
第四节 导线、电缆的选择及计算 .....	166
一、经济电流密度及计算 .....	166
二、导线截面的选择 .....	170
三、电力电缆的选择 .....	177
四、电缆在短时过载和短路状态下的允许电流 .....	192
五、控制电缆的选择 .....	194
六、直流电流表连接电缆截面的选择 .....	200
第五节 线路施工计算 .....	201
一、线路安装要求和规定 .....	201
二、导线力学及弛度计算 .....	204
三、电杆坑、拉线坑、拉线、拉线盘及电杆埋深计算 .....	209
四、人字抱杆强度计算 .....	224

---

五、绞磨计算 .....	227
六、地锚计算 .....	229
七、锚桩计算 .....	232
第六节 有关导线和电缆的一些计算 .....	237
一、导线、避雷线振动频率和运行应力的计算 .....	237
二、电杆、导线上的风压计算 .....	237
三、导线安全系数计算 .....	238
四、架空导线拉断力计算 .....	239
五、导线连接的计算 .....	241
六、输电线路瞬时电流容量的计算 .....	242
七、架空线路绝缘子数的确定 .....	243
八、超高压送电的电晕计算 .....	245
九、不同中性点接地方式下内部过电压的极限值 .....	246
十、电力电缆绝缘电阻的换算 .....	247
十一、电缆散热计算 .....	248
十二、电缆电容量的简单测算 .....	248
十三、单芯电缆金属护层感应电压的计算 .....	248
十四、电缆故障点的测算 .....	256
十五、常用电工线材重量的快速计算 .....	260
第三章 变压器 .....	262
第一节 基本原理计算 .....	262
一、变压器原理及基本参数 .....	262
二、变压器电压变动率及效率计算 .....	264
三、自耦变压器基本计算 .....	265
四、V/V 联结的变压器功率和利用率计算 .....	272
五、变压器负载率计算 .....	274
六、变压器损耗计算 .....	275
七、变压器损耗及效率测算 .....	276
八、变压器空载试验和短路试验计算 .....	277
九、变压器无功经济当量的计算 .....	283

---

第二节 变压器经济运行计算 .....	285
一、变压器并联运行计算 .....	285
二、变压器年电能损耗计算 .....	291
三、判定负荷过轻的临界条件 .....	292
四、变压器经济运行节电效益的计算 .....	293
五、变压器是否需要更新的计算 .....	294
六、变压器过负荷计算 .....	297
七、干式变压器使用条件及温升限值 .....	303
八、10kV 变压器进风口有效面积查算表 .....	304
九、几种用电场合的变压器容量计算 .....	305
第三节 变压器计算 .....	308
一、油浸式电力变压器的基本计算 .....	308
二、干式电力变压器的基本计算 .....	318
三、整流变压器计算 .....	324
四、高压试验变压器的计算及选型 .....	333
五、调压器计算 .....	341
六、小型变压器设计 .....	348
七、电动机起动用自耦变压器的设计 .....	382
八、铁磁谐振稳压器设计 .....	385
九、脉冲变压器及音频变压器设计 .....	395
第四节 电抗器计算 .....	410
一、滤波电抗器计算 .....	410
二、交流电抗器计算 .....	413
三、均流电抗器计算 .....	415
四、空芯电抗器计算 .....	417
五、平衡电抗器计算 .....	419
第五节 变压器干燥计算 .....	420
一、涡流法干燥变压器 .....	420
二、利用发电机零起升压干燥变压器 .....	423
三、电炉加热干燥变压器计算 .....	424



---

第四章 电容器及无功补偿 .....	425
第一节 电容器和无功补偿容量的计算 .....	425
一、电容器运行规定和技术性能 .....	425
二、电容测算和保护元件计算 .....	430
三、功率因数和无功补偿容量的计算 .....	438
四、采用电容补偿调压的计算 .....	452
五、电网电压对移相电容器影响的计算 .....	453
第二节 设备的无功补偿计算 .....	457
一、企业内无功经济当量的计算 .....	457
二、几种设备的无功补偿容量的确定 .....	460
三、无功补偿方式的选择 .....	468
四、采用同步电动机补偿的计算 .....	470
第三节 提高功率因数与降损及改善电压的计算 .....	472
一、提高功率因数与降损关系的计算 .....	472
二、提高功率因数与改善电压关系的计算 .....	478
三、提高功率因数与增加设备容量的计算 .....	480
第五章 电动机 .....	483
第一节 基本原理计算 .....	483
一、异步电动机的基本公式及等值电路图 .....	483
二、异步电动机的工作特性 .....	489
三、绕线型异步电动机转子电阻的计算 .....	490
四、直流电机的基本公式 .....	492
五、直流电机电枢回路电感、电阻的计算 .....	498
六、无铭牌直流发电机额定电流的估算 .....	499
七、滑差电动机的基本计算 .....	500
第二节 电动机损耗计算及节电计算 .....	502
一、异步电动机空载电流计算 .....	502
二、异步电动机功率因数的计算 .....	504
三、异步电动机转差率和工作特性的测算 .....	504
四、异步电动机损耗及功率平衡计算 .....	512

---

五、高速异步电动机损耗的计算 .....	519
六、电动机输入功率、输出功率和效率的测算 .....	520
七、异步电动机无功功率的计算 .....	524
八、异步电动机最佳负载率的计算 .....	525
九、异步电动机等效功率和等效损耗的计算 .....	525
十、同步电动机损耗、输出功率和效率的测算 .....	530
十一、电动机通风风扇功耗及通风噪声的计算 .....	531
十二、直流电动机损耗及效率的计算 .....	533
十三、电风扇风叶的功率消耗计算 .....	535
十四、电动机节电计算 .....	536
十五、“大马拉小车”节电计算 .....	544
十六、星—三角变换的节电计算 .....	545
第三节 传动电动机的选择 .....	548
一、传动电动机的选择程序 .....	548
二、电动机过载能力及平均起动转矩计算 .....	548
三、飞轮力矩计算 .....	554
四、根据打滑条件允许的最大加速度计算 .....	555
五、电动机功率的校验 .....	556
第四节 电动机功率的选定 .....	565
一、采用寿命期费用分析法选定电动机 .....	565
二、在不同环境温度时电动机功率的计算 .....	566
三、各种设备的电动机功率的选择 .....	568
第五节 有关电动机运行方面的计算 .....	576
一、异步电动机一般工作条件的规定和要求 .....	576
二、电机用电刷的电流密度与电刷牌号的选择 .....	577
三、绕组温升和绝缘电阻的计算 .....	578
四、电压变动对电动机性能的影响 .....	585
五、电动机寿命的预测 .....	591
六、电动机断相运行时各绕组电流的计算 .....	593
七、三相异步电动机改为单相使用时电容器的计算 .....	594

---

八、改变电动机绕组接法的简易计算 .....	595
九、单相电容电动机的电容量的简易估算 .....	596
第六节 电动机起动、制动和调速的计算 .....	597
一、异步电动机直接起动功率的确定 .....	597
二、异步电动机降压起动方式的选择 .....	598
三、磁力起动器的选择 .....	602
四、星—三角起动器的选择 .....	603
五、自耦减压起动器的选择与计算 .....	606
六、延边三角起动法的计算 .....	611
七、三相鼠笼型异步电动机起动电阻的计算 .....	613
八、绕线型异步电动机起动电阻的计算 .....	613
九、异步电动机反接制动计算 .....	618
十、异步电动机能耗制动计算 .....	621
十一、异步电动机电容—电磁制动的电容计算 .....	625
十二、直流他励电动机反接制动计算 .....	626
十三、直流他励电动机能耗制动计算 .....	628
十四、绕线型异步电动机转子附加电阻调速的计算 .....	629
十五、绕线型异步电动机机械回馈式串级调速的计算 .....	630
十六、直流电动机不同调速方法比较 .....	632
十七、电阻器和频敏变阻器的计算 .....	634
第七节 电动机干燥计算 .....	646
一、定子铁芯涡流干燥法的计算 .....	646
二、电机外壳涡流干燥法的计算 .....	649
三、热风干燥法的计算 .....	651
四、干燥温度和其它参数的检测 .....	652
第八节 电动机绕组计算 .....	652
一、绕组的基本概念及展开图 .....	652
二、三相异步电动机定子绕组的计算 .....	657
三、单层交叉式绕组线模的计算 .....	671
四、单层链式绕组线模的计算 .....	678

---

五、单层同心式绕组线模尺寸计算 .....	679
六、单层交叉式、单层链式和单层同心式绕组线模的简易计算 .....	682
七、双层迭绕式绕组线模的简易计算 .....	684
八、单相异步电动机绕组重绕计算 .....	686
九、三相异步电动机绕组重绕的简易计算 .....	694
十、罩极式电动机绕组重绕估算 .....	699
十一、电容运转电动机绕组重绕计算 .....	702
十二、分相电动机和电容运转电动机的电容器计算 .....	703
十三、电钻绕组重绕计算 .....	705
十四、电扇绕组重绕计算 .....	709
十五、钻石牌电钟绕线计算 .....	713
十六、导线代用、改压、改频、变更极数的计算 .....	714
十七、电机转子扎线修理的计算 .....	736
第九节 磁放大器性能参数计算公式 .....	737
一、磁放大器线路的类型 .....	737
二、各种磁放大器的性能及计算公式 .....	738
第十节 电动按摩器的设计 .....	742
第六章 短路电流计算 .....	747
第一节 标么值及其计算 .....	747
一、标么值的基本概念 .....	747
二、电抗在不同基准值下的换算 .....	748
三、电抗标么值和有名值的变换 .....	748
四、各类元件的电抗平均值 .....	748
第二节 短路电流计算 .....	753
一、短路电流的暂态过程 .....	753
二、短路电流的计算方法和步骤 .....	755
三、三相短路冲击电流、全电流最大有效值和三相 短路容量的计算 .....	757
四、无限容量系统中高压网络短路电流的计算 .....	757

五、有限容量系统中高压网络短路电流的计算 .....	761
六、变压器低压侧短路时折算到高压侧穿越电流的计算 .....	767
七、异步电动机反馈电流计算 .....	767
八、1kV 及以下低压配电网络短路电流的计算 .....	773
九、高压电网不对称短路电流的计算 .....	781
十、1kV 以下低压电网不对称短路电流的计算 .....	788
十一、中性点不接地系统接地电流的计算 .....	801
<b>第七章 高、低压电器</b> .....	<b>803</b>
<b>第一节 电气设备的选用</b> .....	<b>803</b>
一、高海拔地区电气设备的选用 .....	803
二、有火灾和爆炸危险场所电气设备的选用 .....	805
三、电气设备发热计算 .....	813
四、电气设备动稳定和热稳定校验 .....	827
五、电器接触头压力及接触电阻的计算 .....	828
六、电气设备电流密度的选择 .....	830
七、电气设备的绝缘、绝缘材料及有关计算 .....	834
八、母线选择及计算 .....	845
九、电流互感器的选用 .....	861
十、电压互感器的选用 .....	869
<b>第二节 高压电器的选用</b> .....	<b>882</b>
一、高压电器规范的选择条件 .....	882
二、高压绝缘子及穿墙套管的选用 .....	882
三、高压断路器的选用 .....	894
四、高压隔离开关的选用 .....	897
五、高压负荷开关的选择 .....	898
六、高压熔断器的选用 .....	899
<b>第三节 低压电器的选用</b> .....	<b>903</b>
一、低压电器规范的选择条件 .....	903
二、自动开关的选用及计算 .....	905
三、刀开关和转换开关的选用 .....	921

---

四、熔断器的选用 .....	922
五、熔断器的级间配合 .....	930
六、热继电器的选用及计算 .....	935
七、接触器的选用及计算 .....	942
八、交、直流接触器线圈重绕计算 .....	951
九、交、直流接触器改压计算 .....	957
十、交流接触器短路环计算 .....	958
十一、交流接触器和电磁铁直流无声运行元件的选择 .....	959
十二、电磁铁的基本公式及计算 .....	964
十三、电磁铁的选用及计算 .....	976
十四、交、直流电磁铁线圈的简单计算 .....	983
十五、直流线圈的简捷设计 .....	992
十六、交流线圈的简捷设计 .....	995
十七、操作机构合闸电磁铁的计算 .....	998
十八、保护继电器和时间继电器的选用 .....	1000
十九、继电器加速与延缓电路 .....	1002
二十、继电器熄火花电路 .....	1011
二十一、交流接触器用于远距离控制的导线长度计算 .....	1019
二十二、60Hz 的低压电器用于 50Hz 电源上的影响分析 .....	1021



---

---

# 目 录

## 下 册

第八章 继电保护 .....	1025
第一节 基础知识 .....	1025
一、电流互感器与电流继电器的接线方式及计算 .....	1025
二、继电保护灵敏度要求 .....	1043
第二节 线路继电保护计算 .....	1043
一、电力线路继电保护计算 .....	1043
二、小接地电流系统的接地保护计算 .....	1049
三、直流绝缘监视装置中的电流继电器起动值的计算 .....	1050
第三节 变压器及母线断路器继电保护计算 .....	1052
一、工厂电力变压器继电保护计算 .....	1052
二、小型电力变压器保护计算 .....	1056
三、母线分段断路器及联络断路器的继电保护计算 .....	1059
四、自动重合闸继电保护计算 .....	1062
第四节 电动机继电保护计算 .....	1063
一、异步电动机继电保护计算 .....	1063
二、同步电动机继电保护计算 .....	1067
第五节 发电机继电保护计算 .....	1071
一、小型发电机继电保护计算 .....	1071
二、多台发电机并列运行继电保护计算 .....	1072
第六节 移相电容器继电保护计算 .....	1074
一、移相电容器保护和接线方式 .....	1074
二、6~10kV 移相电容器继电保护计算 .....	1078
第七节 工厂配电用低压自动开关保护计算 .....	1081

---

一、非选择型配电用自动开关的保护计算 .....	1081
二、选择型配电用自动开关的保护计算 .....	1083
<b>第九章 电焊机 .....</b>	<b>1085</b>
<b>第一节 基础知识及计算 .....</b>	<b>1085</b>
一、弧焊机的基本计算 .....	1085
二、电焊机熔敷金属量、有效能及效率计算 .....	1089
三、电焊机耗电量计算 .....	1093
<b>第二节 电焊机选择 .....</b>	<b>1095</b>
一、弧焊机的性能、特点 .....	1095
二、电焊机电源容量计算 .....	1101
三、阻焊变压器的设计程序及参数确定 .....	1101
<b>第三节 电焊机运行 .....</b>	<b>1103</b>
一、电焊机电源干线计算工作电流及熔断器与电缆的选择 .....	1103
二、交流弧焊机加装节电器后的节电效果计算 .....	1106
<b>第十章 风机、空压机 .....</b>	<b>1109</b>
<b>第一节 风机基础知识及计算 .....</b>	<b>1109</b>
一、风机基本参数及特性曲线 .....	1109
二、风量和风压的测算 .....	1111
三、风机轴功率、电动机功率及风机效率计算 .....	1113
四、风机耗电量计算 .....	1114
五、风机参数的换算 .....	1116
六、变速风机的电动机功率的选择 .....	1118
七、空调设备用风机轴功率和送风量计算 .....	1119
八、锅炉送、引风机风量、全压和电动机功率的计算 .....	1120
<b>第二节 空压机计算 .....</b>	<b>1122</b>
一、空压机效率计算 .....	1122
二、空压机管网漏气损失电能的测算 .....	1124
<b>第十一章 水泵 .....</b>	<b>1126</b>
<b>第一节 基础知识及计算 .....</b>	<b>1126</b>
一、水泵基本参数及特性曲线 .....	1126

---

二、流量和扬程及损失扬程的计算 .....	1128
三、水泵轴功率、电动机功率及水泵效率的计算 .....	1137
四、水泵参数的换算 .....	1138
五、空调设备用水泵轴功率和送水量的计算 .....	1138
第二节 水泵的选择 .....	1140
一、水泵选择的步骤和方法 .....	1140
二、深井泵选择的步骤和方法 .....	1140
三、如何根据电动机的功率选配水泵 .....	1144
四、如何判断无铭牌离心泵的性能 .....	1144
第十二章 起重机运输设备 .....	1146
第一节 起重机、提升机的简易计算 .....	1146
一、电动机功率初选 .....	1146
二、电动机功率的校正 .....	1148
第二节 输送机的计算 .....	1150
一、皮带输送机的计算 .....	1150
二、其它输送设备电动机功率的计算 .....	1153
第三节 桥式起重机电缆、干线、滑线及保护设备的选择 .....	1155
一、桥式起重机工作电流的计算 .....	1155
二、干线和滑线的选择 .....	1156
三、保护设备及电源线的选择 .....	1170
四、电力拖动系统负载转矩和飞轮质量的折算 .....	1170
第四节 吊装用具计算 .....	1175
一、麻绳、钢丝绳计算 .....	1175
二、轮鼓、滑轮计算 .....	1180
三、抱杆式起重杆的选择 .....	1187
第十三章 电加热 .....	1189
第一节 电热计算 .....	1189
一、电热元件的计算 .....	1189
二、电热干燥室功率计算 .....	1210

---

三、按炉膛容积估算炉子功率 .....	1212
第二节 盐浴炉计算 .....	1213
一、炉膛尺寸和功率的计算 .....	1213
二、埋入式盐浴炉电源变压器的要求 .....	1214
三、电阻炉、盐浴炉电能利用率的计算 .....	1214
第三节 感应加热炉计算 .....	1224
一、电流透入深度计算 .....	1224
二、电源频率和感应器尺寸的计算 .....	1224
三、输电线路计算 .....	1231
四、中频感应炉补偿电容的计算 .....	1236
五、工频感应加热器的计算 .....	1237
六、无芯工频电炉的计算 .....	1245
第四节 远红外加热计算 .....	1247
一、红外区的划分及远红外加热机理 .....	1247
二、黑体辐射基本定律 .....	1248
三、远红外辐射元件 .....	1250
四、远红外辐射涂料及辐射光谱 .....	1254
五、辐射元件表面温度和受热物最佳加热干燥温度的选择 .....	1259
六、远红外加热炉的设计 .....	1262
第十四章 可控硅及电子电路 .....	1269
第一节 可控硅电路及其计算 .....	1269
一、可控硅基本参数 .....	1269
二、可控硅整流电路参数及基本电量关系 .....	1271
三、可控硅起动器的型式及其特点 .....	1293
四、硅及可控硅整流元件的选择 .....	1293
五、可控硅元件串、并联计算 .....	1295
六、可控硅保护计算 .....	1296
第二节 整流电路及其计算 .....	1306
一、各种整流电路参数及比较 .....	1306
二、多级倍压整流电路的计算 .....	1309

---

三、整流元件串、并联计算 .....	1311
四、整流元件的保护计算 .....	1313
第三节 滤波电路及其计算 .....	1313
一、常用小功率滤波电路的比较 .....	1313
二、滤波电路计算 .....	1315
三、电动机和变压器电感量的估算 .....	1320
第四节 晶体管基础知识 .....	1321
一、常用晶体管的基本参数 .....	1321
二、晶体管计算 .....	1326
三、晶体管散热计算 .....	1331
第五节 晶体管电路及其计算 .....	1334
一、稳压电路的计算 .....	1334
二、交流放大电路静态工作点的选择和直流负载线的确定 .....	1339
三、放大器的输入、输出电阻,负载电阻及放大倍数的计算 .....	1341
四、阻容耦合放大器的计算 .....	1344
五、射极输出器的计算 .....	1347
六、负反馈电路的计算 .....	1349
七、单管交流放大器的设计要点 .....	1352
八、工作点稳定的典型电路设计要点 .....	1354
九、各类交流放大器的特点及比较 .....	1355
十、晶体管直流放大器的计算 .....	1355
十一、差动放大器的计算 .....	1360
十二、场效应管放大电路的计算 .....	1361
十三、运算放大器的计算 .....	1361
十四、晶体管电子继电器元件参数的选择 .....	1372
十五、功率放大器保护元件的计算 .....	1374
十六、发光二极管回路限流电阻的计算 .....	1377
第六节 触发电路、振荡器和变流器等计算 .....	1378
一、单结晶体管触发电路的计算 .....	1378
二、射极耦合单稳态触发器的设计 .....	1381

---

三、双稳态触发器的设计 .....	1383
四、多谐振荡器的计算 .....	1385
五、LC 振荡器的比较 .....	1388
六、晶体管直流变换器的设计 .....	1388
第七节 晶体管延时电路及计算 .....	1396
一、三种基本的晶体管延时电路延时时间的计算 .....	1396
二、几种晶体管延时电路和记忆电路的延时时间的计算 .....	1398
三、可控硅延时电路 .....	1404
第十五章 仪器仪表 .....	1413
第一节 基础知识及计算 .....	1413
一、电测量仪表的基本计算 .....	1413
二、热电阻的电阻与温度的关系 .....	1421
三、热电偶的热电势与温度的关系 .....	1422
第二节 仪表正确接法的分析 .....	1425
一、两表法测量三相有功功率的分析 .....	1425
二、三表法测量三相有功功率的分析 .....	1428
三、一表法测量三相无功功率的分析 .....	1428
四、两表法测量三相无功功率的分析 .....	1428
五、三表法测量三相无功功率的分析 .....	1429
六、具有人工中点的两表法测量三相无功功率的分析 .....	1430
七、具有 $90^\circ$ 相角差的无功电度表的接线和分析 .....	1431
八、具有 $60^\circ$ 相角差的无功电度表的接线和分析 .....	1434
九、功率因数的测算 .....	1435
十、两相 380V 交流电焊机电度量接线和分析 .....	1440
十一、用单相电度表测量两相 380V 负荷的方法 .....	1445
十二、校验及更换表刻度 .....	1447
第三节 仪表错误接线的分析 .....	1454
一、电度表错误接线的分析与更正 .....	1454
二、三相电度表电压线圈断路时计量分析与更正 .....	1461
三、电流互感器二次公用线断开时计量分析与更正 .....	1472



---

四、三相四线有功电度表错接线时计量分析与更正 .....	1473
第四节  有关仪表的其它计算 .....	1474
一、电度表与互感器的合成倍率计算 .....	1474
二、电度表所测电量的计算 .....	1475
三、直流电流表分流电阻的计算 .....	1476
四、直流电压表附加电阻的计算 .....	1477
五、电气测量仪表的功率损耗估计 .....	1477
第十六章  照明 .....	1480
第一节  基础知识 .....	1480
一、照明术语、单位及计算 .....	1480
二、关于照明质量的一些要求 .....	1484
三、常用电光源特性比较及对电源的要求 .....	1487
四、灯具的选择 .....	1489
五、灯具的分类、配光曲线和效率 .....	1490
六、常用材料的反射、透射和吸收率 .....	1494
第二节  照度标准及灯具布置计算 .....	1496
一、照度标准 .....	1496
二、灯具布置计算 .....	1503
第三节  照度计算 .....	1508
一、各类光源的照度计算 .....	1508
二、逐点法计算照度 .....	1520
三、利用系数法计算照度 .....	1531
四、单位容量法计算照度 .....	1553
第四节  生产厂房及室外照明的设计 .....	1561
一、生产厂房照明的设计 .....	1561
二、道路照明的设计 .....	1561
三、投光灯照明计算 .....	1570
第五节  照明线路、设备及其它 .....	1571
一、照明导线截面的选择 .....	1571
二、电感式镇流器的计算 .....	1575

---

三、荧光灯和附件的技术参数及计算 .....	1583
四、感容式镇流器和自耦漏抗变压镇流器的设计 .....	1586
第十七章 小型发电 .....	1591
第一节 小水电站计算 .....	1591
一、水力发电的一般公式 .....	1591
二、小型水电站流量水头和发电量的计算 .....	1595
第二节 余热发电计算 .....	1605
一、工厂余热能量的估算 .....	1605
二、余热发电装机容量的计算 .....	1614
三、汽轮机基本参数及其计算 .....	1617
四、余热发电燃料节约量的计算 .....	1620
五、背压式汽轮发电机组的技术参数 .....	1624
六、同步发电机的特性及基本参数计算 .....	1632
第三节 电动机改成发电机和柴油发电机的计算 .....	1639
一、异步电动机改作发电机的计算 .....	1640
二、绕线式电动机改作发电机的计算 .....	1645
三、柴油发电机计算 .....	1650
第四节 励磁机及直流系统计算 .....	1656
一、自动调整励磁装置参数的选择 .....	1656
二、发电机和励磁机灭磁电阻的计算 .....	1657
三、备用励磁机的选择 .....	1658
四、蓄电池组的选择 .....	1660
五、硅整流充电及浮充电设备的选择 .....	1662
六、控制信号馈线电缆和断路器合闸电流的选择 .....	1663
第十八章 接地接零 .....	1667
第一节 基础知识及计算 .....	1667
一、接地与接零的种类 .....	1667
二、保护接地与保护接零的范围 .....	1669
三、接触电压、跨步电压和对地电压等计算 .....	1671
四、等化对地电压的计算 .....	1680

---

五、屏蔽的种类和要求 .....	1683
六、接地电阻允许值的规定 .....	1683
七、土壤和水的电阻率 .....	1689
第二节 接地体接地电阻的计算 .....	1691
一、人工接地体的接地电阻计算 .....	1691
二、人工接地坑和接地沟的流散电阻的计算 .....	1699
三、岩石地区接地装置的处理方法 .....	1701
四、自然接地体的接地电阻的计算 .....	1706
五、防雷保护接地电阻的计算 .....	1710
六、接地装置截面的要求 .....	1718
七、保护接零计算 .....	1720
第十九章 防雷保护 .....	1722
第一节 基础知识及防雷要求 .....	1722
一、基础知识 .....	1722
二、各种防雷设施的要求和规定 .....	1725
三、关于避雷装置的一些要求 .....	1730
第二节 避雷装置及其计算 .....	1738
一、避雷针保护范围计算 .....	1738
二、避雷线保护范围计算 .....	1741
三、部分特殊建筑物和构筑物的防雷要求 .....	1743
第二十章 逻辑电路 .....	1746
第一节 基础知识及基本运算 .....	1746
一、逻辑代数及其基本运算 .....	1746
二、逻辑控制与电器控制、矩阵控制的对应关系 .....	1758
三、逻辑元件与有触点电路的功能对应关系 .....	1763
第二节 逻辑电路的简化和设计 .....	1764
一、逻辑关系式的简化 .....	1764
二、逻辑电路的设计 .....	1775
第二十一章 其它 .....	1781
第一节 节电工程经济效益计算 .....	1781

---

一、节电工程投资效果计算 .....	1781
二、产品用电单耗及节电量的计算 .....	1790
三、机电产品节能效益计算 .....	1793
第二节 传动装置计算 .....	1797
一、平皮带传动计算 .....	1797
二、三角皮带传动计算 .....	1804
三、直齿圆柱齿轮传动计算 .....	1807
四、传动轴直径的计算 .....	1812
五、摩擦力计算及传动效率 .....	1812
第三节 蓄电池等计算 .....	1822
一、蓄电池有关知识及计算 .....	1822
二、电解中物质析出量的计算 .....	1828
三、直流母线限流电阻和逆止阀的计算 .....	1829
第四节 安全用电知识及计算 .....	1831
一、安全用电的基本知识 .....	1831
二、静电安全知识及计算 .....	1836
三、用万用表应急测量绝缘电阻的方法及计算 .....	1841
第五节 广播与电视等 .....	1843
一、有线广播喇叭的匹配 .....	1843
二、分频器设计 .....	1849
三、电视天线最远接收距离和天线架空高度的计算 .....	1853
四、用少数电阻得到多种电阻值的方法 .....	1854
五、能输出多种电压的变压器 .....	1854
六、列表法接转换开关 .....	1855
七、空调器容量的计算 .....	1861
八、负荷曲线的绘制 .....	1863
九、工业用户电费的计算 .....	1866
附录 1 380/220V 三相架空线路每米阻抗值 .....	1868
附录 2 380/220V 三相线路绝缘子布线每米阻抗值 .....	1869

---

附录 3	500V 聚氯乙烯绝缘和橡皮绝缘四芯电力 电缆每米阻抗值 .....	1871
附录 4	1000V 油浸绝缘四芯电力电缆每米阻抗值 .....	1872
附录 5	1000V 以下三芯电力电缆每米阻抗值 .....	1873
附录 6	三相三线穿钢管布线(钢管作为零线)的 每米阻抗值.....	1874
附录 7	三相母线每米阻抗值 .....	1875
附录 8	裸绞线安全载流量 .....	1877
附录 9	BVR 型和 BLVR 型聚氯乙烯铜芯软线及 铝芯线的参考载流量 .....	1878
附录 10	BVV 型和 BLVV 型聚氯乙烯绝缘、聚氯 乙烯护套铜芯及铝芯导线参考载流量.....	1880
附录 11	RVZ 型聚氯乙烯绝缘、聚氯乙烯护套 连接软线的参考载流量.....	1881
附录 12	塑料绝缘铜、铝电线安全载流量 .....	1882
附录 13	橡皮绝缘铜、铝电线安全载流量 .....	1884
附录 14	直接敷设在地下的低压绝缘电缆(铜、铝) 安全载流量 .....	1886
附录 15	1 千伏 VV、VLV 型无铠装聚氯乙烯聚乙烯 绝缘电缆安全载流量 .....	1888
附录 16	1 千伏 VV 29、VLV 29、VV 30、VLV 30、VV 50 VLV 50、VV 59、VLV 59 型铠装聚乙烯 电缆安全载流量 .....	1889
附录 17	金属圆梗(铜、铝)载流量 .....	1890
附录 18	架空导线弛度表 .....	1891
附录 19	两端加粗碳化硅棒电热元件尺寸 .....	1900

附录 20 硅碳元件在不同元件温度和炉温下的 表面负荷值 .....	1903
附录 21 常用耐火材料的主要性能 .....	1904
主要参考文献 .....	1906



---

---

# 第一章 基础知识

## 第一节 电工数学基础

### 一、正弦量、复数及矢量

#### 1. 复数的表示形式及其互换

一个正弦交流量可以用以下几种方法表示：三角函数表示法，波形表示法，旋转矢量表示法和矢量表示法。最常用的是矢量表示法，即复数符号法，简称符号法。

矢量表示法是利用复数来代替正弦量，用以进行稳态电路性能运算的方法。

正弦量用矢量表示如下：

$$\text{电流正弦量为 } i = \sqrt{2} I \sin(\omega t + \phi)$$

$$\text{矢量表示为 } \dot{I} = I \angle \phi$$

$$\text{电压正弦量为 } u = \sqrt{2} U \sin(\omega t + \psi + \varphi)$$

$$\text{矢量表示为 } \dot{U} = U \angle (\psi + \varphi)$$

复数的表示形式有直角坐标形式和极坐标形式，两种形式的互换见表 1—1。

#### 2. 复数的四则运算

复数的加、减法采用直角坐标形式较方便，复数的乘、除法采用极坐标形式较方便(表 1—2)。复数的幅角范围见表 1—3。

#### 3. 正弦量的矢量图

在正弦交流电路中，各电源电动势、各支路电流和电压都是同频率的正弦量，表示它们的旋转矢量都以相同的角速度  $\omega$  旋转，它们的相对位置、矢量的大小均与时间无关。因此，可把一个

电路中表示各个正弦量的矢量的起始位置,即  $t = 0$  时刻的位置,画在一个直角平面坐标上,这样的图称为正弦量的矢量图。例如,已知正弦量

表 1—1 复数的表示形式及其互换

座标制	直角座标形式	极座标形式
表示法	$a + jb$	$r \angle \theta$ 或 $re^{j\theta}$
图形表示法		
两种座标式的互换	$a + jb = r \cos \theta + j r \sin \theta$	$r \angle \theta = \sqrt{a^2 + b^2} \angle \operatorname{tg}^{-1} \frac{b}{a}$ 或 $re^{j\theta} = \sqrt{a^2 + b^2} e^{j(\operatorname{tg}^{-1} \frac{b}{a})}$

表 1—2 复数的四则运算

运算方式	希望采用的座标	运算方法
加	直角座标	$(a_1 + jb_1) + (a_2 + jb_2) = (a_1 + a_2) + j(b_1 + b_2)$
减	直角座标	$(a_1 + jb_1) - (a_2 + jb_2) = (a_1 - a_2) + j(b_1 - b_2)$
乘	极座标	$r_1 \angle \theta_1 r_2 \angle \theta_2 = r_1 r_2 \angle (\theta_1 + \theta_2)$
除	极座标	$r_1 \angle \theta_1 / r_2 \angle \theta_2 = \frac{r_1}{r_2} \angle (\theta_1 - \theta_2)$

表 1—3 复数的幅角范围

实部 $a$ 的符号	虚部 $b$ 的符号	所对应矢量所在象限	幅角 $\psi$ 的范围
+	+	I	$0^\circ < \psi \leq 90^\circ$
-	+	II	$90^\circ < \psi < 180^\circ$
-	-	III	$-180^\circ < \psi < -90^\circ$
+	-	IV	$-90^\circ < \psi < 0^\circ$

$$i = I_m \sin(\omega t + 40^\circ)$$

$$u = U_m \sin(\omega t + 80^\circ)$$

$$e = E_m \sin(\omega t - 45^\circ)$$

表示它们的矢量图如图 1—1 所示。

矢量是既有大小又有方向的量；正弦量的矢量长度通常代表正弦量的有效值；只有频率相同的正弦量才能用矢量进行加减；用多边形法则能简化矢量加减的运算。

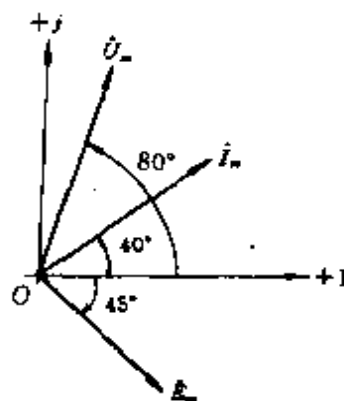


图 1—1 矢量图

直角坐标中所用的虚单位  $j, j^2, j^3, j^4, 1/j, -j$  的实部、虚部、模、幅角、代数形式、指数形式表示如下：

$$j = 0 + j1 = 1 \angle 90^\circ = \angle 90^\circ$$

$$j^2 = (\sqrt{-1})^2 = -1 = -1 + j0 = \angle 180^\circ$$

$$j^3 = j \times j^2 = j \times (-1) = -j = 0 - j1 = \angle -90^\circ$$

$$j^4 = j^2 \times j^2 = -1 \times (-1) = 1 = 1 + j0 = \angle 0^\circ$$

$$1/j = j/j^2 = j/-1 = -j = j^3 = 0 - j1 = \angle -90^\circ$$

各虚单位的相应矢量如图 1—2 所示。

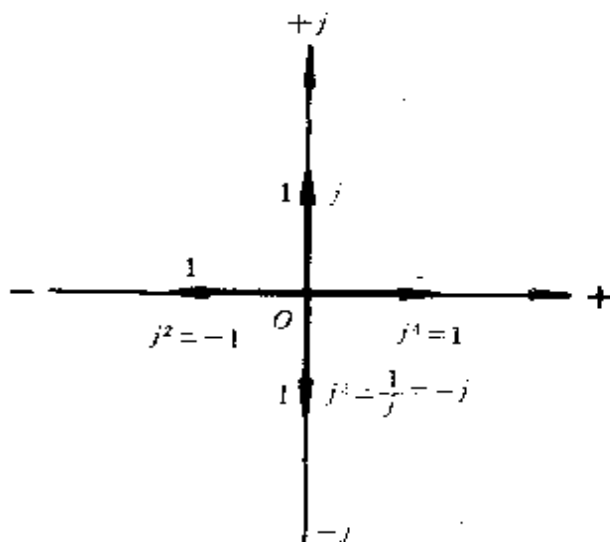


图 1—2 各虚单位的相应矢量

**例 1—1** 试用复数的指数形式和代数形式表示正弦电压  $u = \sqrt{2} 220 \sin(314t + 60^\circ)$ 。

**解** 用复数的指数形式表示时,其模就是所表示的正弦交流电的有效值,即  $r = 220$ ;其幅角就是所表示的正弦交流电的初相角,即  $\psi = 60^\circ$ 。因此,该正弦交流电压的复数电压的指数形式为

$$\dot{U} = r \angle \psi = 220 \angle 60^\circ$$

其代数形式为

$$\begin{aligned} \dot{U} &= 220 \angle 60^\circ = 220 \cos 60^\circ + j 220 \sin 60^\circ \\ &= 220 \times \frac{1}{2} + j 220 \times \frac{\sqrt{3}}{2} = 110 + j 110 \sqrt{3} \end{aligned}$$

**例 1—2** 已知  $i_1 = \sqrt{2} 5 \sin \omega t \text{ A}$ ,  $i_2 = \sqrt{2} 5 \sin(\omega t + \frac{\pi}{2}) \text{ A}$ , 试用矢量法求  $i = i_1 + i_2$ 。

**解** 作  $i_1$  和  $i_2$  的有效值矢量, 并作出其合成矢量  $\dot{I}$ , 如图 1—3 所示,

合成矢量的长度, 即电流有效值

$$I = \sqrt{I_1^2 + I_2^2} = \sqrt{5^2 + 5^2} = \sqrt{50} = 7.07(\text{A})$$

合成矢量与  $x$  轴正向的夹角  $\varphi$ , 即电流  $i$  的初相角

$$\varphi = \text{tg}^{-1} \frac{U_2}{U_1} = \text{tg}^{-1} \frac{5}{5} = 45^\circ$$

所以  $i = i_1 + i_2 = \sqrt{2} 7.07 \sin(\omega t + 45^\circ)(\text{A})$

**例 1—3** 由电感  $L$ 、电阻  $R$  和可变电容  $C$  组成的串联电路如图 1—4 所示。已知电源电压为交流 100V, 试求:

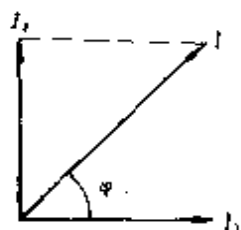


图 1—3 例 1—2 图

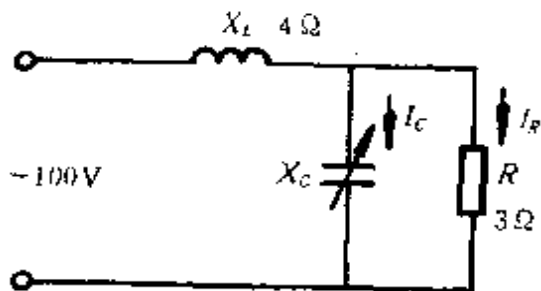


图 1—4 例 1—3 图

- (1) 流过电阻的电流;
- (2) 该回路所消耗的最大功率;
- (3) 在该回路所消耗最大功率的场合, 求流过电阻的电流和电源电压的相位差。

**解**

(1) 设流过电容的电流为  $\dot{I}_C$ , 则有

$$(\dot{I}_C + \dot{I}_R)j4 + 3\dot{I}_R = 100 \quad (1)$$

$$-jX_C \dot{I}_C = 3\dot{I}_R \quad (2)$$

由(1)(2)式可得流过电阻的电流为

$$\dot{I}_R = \frac{100}{3\left(1 - \frac{4}{X_C}\right) + j4} \quad (3)$$

(2) 设该回路所消耗的功率为  $P$ , 则

$$P = |\dot{I}_R|^2 \times 3 \quad (4)$$

将(3)式代入(4)式, 得

$$P = \frac{30000}{9\left(1 - \frac{4}{X_C}\right)^2 + 16} \quad (5)$$

因此, 所消耗的功率, 当  $X_C = 4\Omega$  时为最大, 将  $X_C = 4\Omega$  代入(5)式, 得

$$P = 30000/16 = 1875(\text{W})$$

(3) 将  $X_C = 4\Omega$  代入(3)式, 得

$$\dot{I}_R = 100/j4 = -j25(\text{A})$$

可见, 流过电阻的电流  $I_R$  滞后  $100\text{V}$  电源电压  $90^\circ$ 。

## 二、对称分量法及其应用

对称分量法是分析计算不对称三相电路的重要方法。不对称三相正弦量, 可以看成是三组同频率的对称三相正弦量的叠加; 这三组同频率的对称三相正弦量, 分别叫做不对称三相正弦量的正序分量、负序分量和零序分量。

### 1. 对称分量及其求法

任何一组不对称三相矢量  $\dot{A}$ 、 $\dot{B}$ 、 $\dot{C}$ , 都可以分解成相序各不相同的三组对称的三相矢量(图 1—5):

$$\text{正序分量} \quad \dot{A}_+, \dot{B}_+ = a^2 \dot{A}_+, \dot{C}_+ = a \dot{A}_+$$

$$\text{负序分量} \quad \dot{A}_-, \dot{B}_- = a \dot{A}_-, \dot{C}_- = a^2 \dot{A}_-$$

$$\text{零序分量} \quad \dot{A}_0, \dot{B}_0 = \dot{A}_0, \dot{C}_0 = \dot{A}_0$$



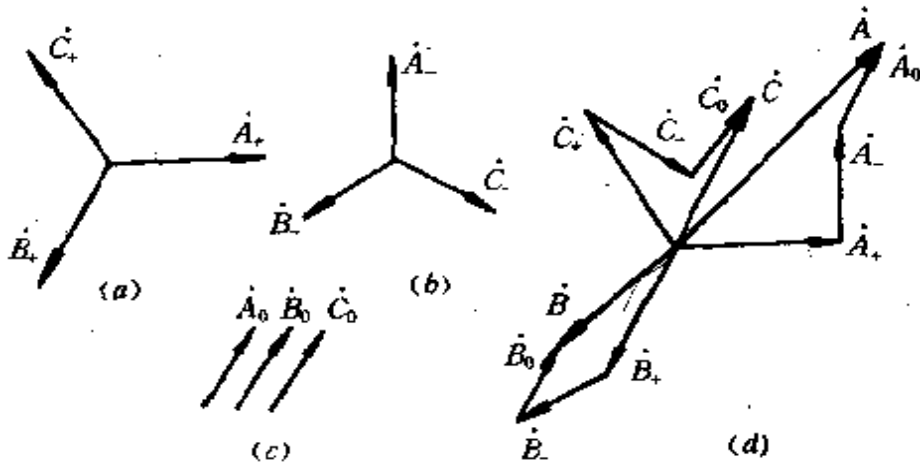


图 1—5 对称分量及其合成

(a) 正序分量 (b) 负序分量 (c) 零序分量 (d) 各对称分量合成

由上式可得

$$\begin{cases} \dot{A} = \dot{A}_+ + \dot{A}_- + \dot{A}_0 \\ \dot{B} = \dot{B}_+ + \dot{B}_- + \dot{B}_0 = a^2 \dot{A}_+ + a \dot{A}_- + \dot{A}_0 \\ \dot{C} = \dot{C}_+ + \dot{C}_- + \dot{C}_0 = a \dot{A}_+ + a^2 \dot{A}_- + \dot{A}_0 \end{cases}$$

式中符号  $a$  表示复数  $1 \angle 120^\circ$ 。

$$a = 1 \angle 120^\circ = \cos 120^\circ + j \sin 120^\circ = -\frac{1}{2} + j \frac{\sqrt{3}}{2}$$

$$a^2 = 1 \angle -120^\circ = \cos(-120^\circ) + j \sin(-120^\circ)$$

$$= -\frac{1}{2} - j \frac{\sqrt{3}}{2}$$

可见，以  $a$  乘某一矢量，等于将该矢量逆时针方向旋转  $120^\circ$ ；以  $a^2$  乘某一矢量，等于将该矢量逆时针方向旋转  $240^\circ$ ，也就是顺时针方向旋转  $120^\circ$ 。

如果已知一组不对称三相矢量  $\dot{A}$ 、 $\dot{B}$ 、 $\dot{C}$  后，也可由上述诸式解出矢量  $\dot{A}$  的对称分量(如以矢量  $\dot{A}$  为例)：

$$\begin{cases} \dot{A}_- = \frac{1}{3}(\dot{A} + a\dot{B} + a^2\dot{C}) \\ \dot{A}_+ = \frac{1}{3}(\dot{A} + a^2\dot{B} + a\dot{C}) \\ \dot{A}_0 = \frac{1}{3}(\dot{A} + \dot{B} + \dot{C}) \end{cases}$$

此外,矢量  $\dot{A}$  的对称分量还可根据上式用图解法求得,如图 1-6 所示。

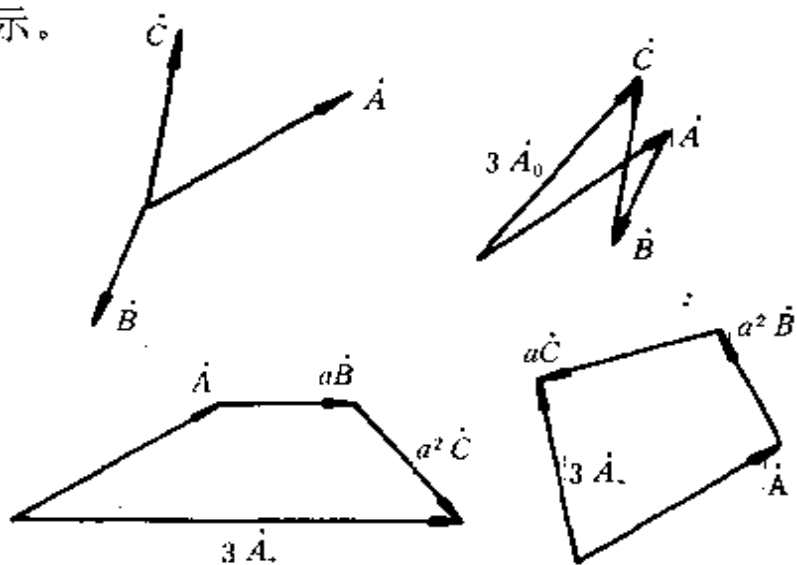


图 1-6 对称分量图解法

## 2. 三相制电压和电流对称分量的性质

### (1) 三相制电压对称分量的性质:

① 线电压矢量和为零,不含零序分量。

② 三相 Y 接法负载相电压对称分量有如下性质:负载对称时,不含零序分量;负载不对称时,含零序分量。

以上两种情况,在同一相正、负序分量各各相同。

可见,在同一线电压下,Y 接法负载的相电压彼此不同是因为零序分量不同。

若电源 Y 接或  $\Delta$  接(设无环流),负载为 Y 接,当线电压不对称时,负载线电压分量和对称负载相电压分量均为正序 + 负

序,而不对称负载相电压分量为正序 + 负序 + 零序;当线电压对称时,负载线电压分量和对称负载相电压分量均为正序,而不对称负载相电压分量为正序 + 零序。

③ 三相  $\Delta$  接法负载相电压对称分量即为线电压分量。

(2) 三相制电流对称分量的性质:

① Y 接法负载相电流或线电流总和为零,即无零序分量。

② Y 接法且有中线,则有零序分量。中线电流为  $\dot{I}_N = 3\dot{I}_0 = \dot{I}_A + \dot{I}_B + \dot{I}_C$ 。

③ 如果发电机绕组为  $\Delta$  接法,且有环流,负载也为  $\Delta$  接法,则线电压有零序分量。

3. 各种类型供电方式的对称分量的性质

(1) 电源 Y 接法且线电压对称(即只有正序分量):

① 当负载 Y 接法且对称时:如图 1-7 所示。

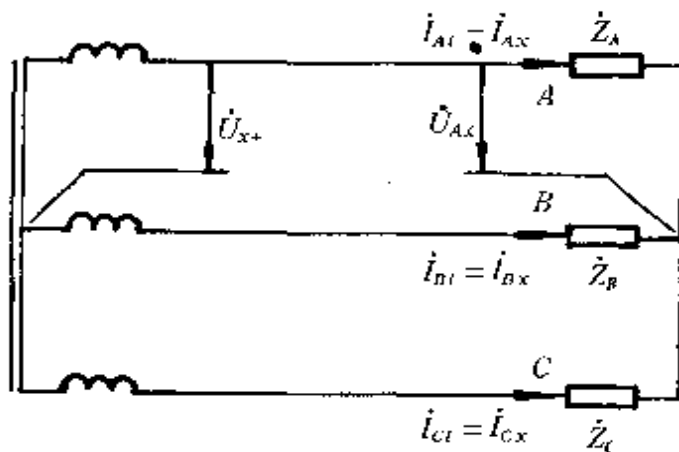


图 1-7 负载 Y 接法

负载上相电压  $\dot{U}_x = \dot{U}_{x+}$  (即只含正序分量)

负载上相电流  $\dot{I}_x = \dot{I}_l = \dot{I}$  (即只含正序分量),其中  $\dot{I}_l$  为线电流。

② 当负载 Y 接法且不对称时;则负载上

$$\dot{U}_x = \dot{U}_{x+} + \dot{U}_{x0}; \dot{I}_x = \dot{I}_l = \dot{I}_+ + \dot{I}_-$$

③ 如果有中线时;若负载对称,则负载上

$$\dot{U}_x = \dot{U}_{x+}; \dot{I}_x = \dot{I}_l = \dot{I}_+; \text{而中线电流为 } \dot{I}_N = 3\dot{I}_0 = 0$$

若负载不对称,则负载上

$$\dot{U}_x = \dot{U}_{x+} + \dot{U}_{x-} + \dot{U}_{x0}; \dot{I}_x = \dot{I}_{x+} + \dot{I}_{x-} + \dot{I}_{x0}$$

$$\text{而 } \dot{I}_N = 3\dot{I}_0 = \dot{I}_A + \dot{I}_B + \dot{I}_C$$

④ 当负载  $\Delta$  接法且对称时;负载上

$$\dot{U}_x = \dot{U}_{x+}; \dot{I}_l = \sqrt{3}\dot{I}_x = \sqrt{3}\dot{I}_{x+}$$

⑤ 当负载  $\Delta$  接法且不对称时;负载上

$$\dot{U}_x = \dot{U}_{x+} \neq \dot{U}'_{x+}, \text{但 } \dot{U}_x = \dot{U}'_{x+} + \dot{U}'_{x-} + \dot{U}'_{x0}$$

$$\dot{I}_x = \dot{I}_{x+} + \dot{I}_{x-} + \dot{I}_{x0}$$

式中  $\dot{U}'_{x+}$ 、 $\dot{U}'_{x-}$  和  $\dot{U}'_{x0}$  分别为某相的正序电流、负序电流和零序电流在该相负载上的电压降。

证明如下:

负载  $\Delta$  接法,电源电压对称(即只含正序分量  $\dot{U}_{x+}$ (图 1—8))。

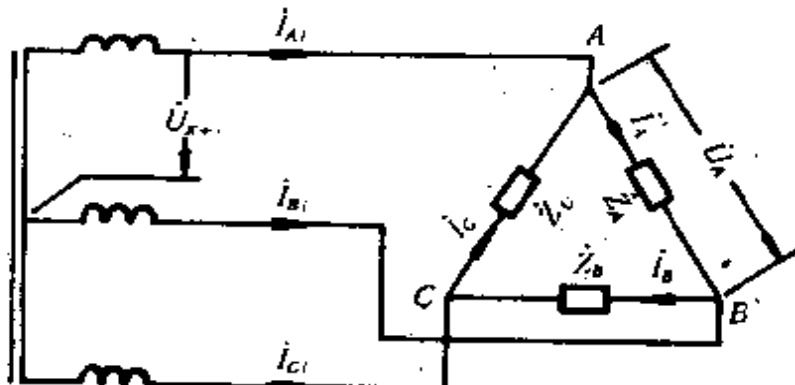


图 1—8 负载  $\Delta$  接法且不对称

设负载阻抗为  $\dot{Z}_A, \dot{Z}_B, \dot{Z}_C$ , 则相电流为  $\dot{I}_A = \dot{U}_{A+} / \dot{Z}_A, \dot{I}_B = \dot{U}_{B+} / \dot{Z}_B, \dot{I}_C = \dot{U}_{C+} / \dot{Z}_C$

$$\begin{aligned} \dot{I}_{A+} &= \frac{1}{3}(\dot{I}_A + a\dot{I}_B + a^2\dot{I}_C) = \frac{1}{3}\left(\frac{\dot{U}_{A+}}{\dot{Z}_A} + \frac{a^3\dot{U}_{A+}}{\dot{Z}_B} + \frac{a^3\dot{U}_{A+}}{\dot{Z}_C}\right) \\ &= \frac{1}{3}\dot{U}_{A+}\left(\frac{1}{\dot{Z}_A} + \frac{1}{\dot{Z}_B} + \frac{1}{\dot{Z}_C}\right) \end{aligned}$$

同样可求得

$$\dot{I}_{A-} = \frac{1}{3}(\dot{I}_A + a^2\dot{I}_B + a\dot{I}_C) = \frac{1}{3}\left(\frac{\dot{U}_{A+}}{\dot{Z}_A} + \frac{a\dot{U}_{A+}}{\dot{Z}_B} + \frac{a^2\dot{U}_{A+}}{\dot{Z}_C}\right)$$

$$\begin{aligned} \dot{I}_{A0} &= \frac{1}{3}(\dot{I}_A + \dot{I}_B + \dot{I}_C) \\ &= \frac{1}{3}\left(\frac{\dot{U}_{A+}}{\dot{Z}_A} + \frac{a^2\dot{U}_{A+}}{\dot{Z}_B} + \frac{a\dot{U}_{A+}}{\dot{Z}_C}\right) \end{aligned}$$

因此可得

$$\dot{I}_A \dot{Z}_A = \dot{I}_{A+} \dot{Z}_A + \dot{I}_{A-} \dot{Z}_A + \dot{I}_{A0} \dot{Z}_A = \dot{U}_{A+} \quad (\text{即外加相电压})$$

其中  $\dot{I}_{A+} \dot{Z}_A = \dot{U}'_{A+}; \dot{I}_{A-} \dot{Z}_A = \dot{U}'_{A-}; \dot{I}_{A0} \dot{Z}_A = \dot{U}'_{A0}$

同样有  $\dot{U}_{B+} = \dot{I}_B \dot{Z}_B$  和  $\dot{U}_{C-} = \dot{I}_C \dot{Z}_C$

可见  $\dot{U}'_{A+} \neq \dot{U}_{A+}, \dot{U}'_{A-} \neq \dot{U}_{A-} = 0, \dot{U}'_{A0} \neq \dot{U}_{A0} = 0$

结论: 外加的相电压  $\dot{U}_{x+}$  也可分解为  $\dot{U}'_{x+} + \dot{U}'_{x-} + \dot{U}'_{x0}$ ; 负载相电流含正序、负序和零序分量; 线电流无零序分量。

(2) 电源 Y 接法且线电压不对称(即只有正序和负序分量):

① 负载 Y 接法且对称时: 则负载上

$$\dot{U}_x = \dot{U}_{x+} + \dot{U}_{x-}; \dot{I}_x = \dot{I}_{x+} + \dot{I}_{x-} = \dot{I}_{l+} + \dot{I}_{l-}$$

② 负载 Y 接法且不对称时: 则负载上

$$\dot{U}_x = \dot{U}_{x+} + \dot{U}_{x-} + \dot{U}_{x0}; \dot{I}_x = \dot{I}_l = \dot{I}_{x+} + \dot{I}_{x-} = \dot{I}_{l+} + \dot{I}_{l-}$$

③ 如果有中线时:不论负载是否对称,负载上

$$\dot{U}_x = \dot{U}_{x+} - \dot{U}_{x-} + \dot{U}_{x0}; \dot{I}_x = \dot{I}_{x+} + \dot{I}_{x-} + \dot{I}_{x0}; \text{中线电流为}$$

$$\dot{I}_N = \dot{I}_A + \dot{I}_B + \dot{I}_C = 3\dot{I}_0$$

④ 负载  $\Delta$  接法且不对称时:负载上

$$\dot{U}_x = \dot{U}_{x+} + \dot{U}_{x-} \neq \dot{U}'_{x+} + \dot{U}'_{x-}; \text{而}$$

$$\dot{U}_{x+} + \dot{U}_{x-} = \dot{U}'_{x+} + \dot{U}'_{x-} + \dot{U}'_{x0}; \dot{I}_x = \dot{I}_{x+} + \dot{I}_{x-} + \dot{I}_{x0}$$

$$\dot{I}_l = \dot{I}_{l+} + \dot{I}_{l-} = \sqrt{3}\dot{I}_{x+} \angle -30^\circ + \sqrt{3}\dot{I}_{x-} \angle 30^\circ$$

式中符号意义同前。

⑤ 负载  $\Delta$  接法且对称时:负载上

$$\dot{U}_x = \dot{U}_{x+} + \dot{U}_{x-}; \dot{I}_x = \dot{I}_{x+} + \dot{I}_{x-}$$

$$\dot{I}_l = \sqrt{3}\dot{I}_{x+} \angle -30^\circ + \sqrt{3}\dot{I}_{x-} \angle 30^\circ$$

(3) 电源  $\Delta$  接法且线电压对称(即只有正序分量):

① 负载 Y 接法且对称时:则负载上

$$\dot{U}_x = \dot{U}_{x+}; \dot{I}_x = \dot{I}_l = \dot{I}_+$$

② 负载 Y 接法且不对称时:则负载上

$$\dot{U}_x = \dot{U}_{x+} + \dot{U}_{x0}; \dot{I}_x = \dot{I}_l = \dot{I}_+ + \dot{I}_0$$

③ 负载  $\Delta$  接法且对称时:则负载上

$$\dot{U}_x = \dot{U}_l = \dot{U}_{x+}; \dot{I}_x = \dot{I}_l / \sqrt{3} = \dot{I}_{x+}$$

④ 负载  $\Delta$  接法且不对称时:则负载上

$$\dot{U}_x = \dot{U}_l = \dot{U}_{x+} \neq \dot{U}'_{x+}, \text{但 } \dot{U}_{x+} = \dot{U}'_{x+} + \dot{U}'_{x-} + \dot{U}'_{x0}$$

$$\dot{I}_x = \dot{I}_{x+} + \dot{I}_{x-} + \dot{I}_{x0}; \dot{I}_l = \dot{I}_{l+} + \dot{I}_{l-}$$

(4) 电源  $\Delta$  接法且线电压不对称(设只有正序和负序分量):

① 负载 Y 接法且对称时:则负载上

$$\dot{U}_x = \dot{U}_{x+} + \dot{U}_{x-}; \dot{I}_x = \dot{I}_l = \dot{I}_+ + \dot{I}_-$$

② 负载 Y 接法且不对称时:则负载上

$$\dot{U}_x = \dot{U}_{x+} + \dot{U}_{x-} + \dot{U}_{x0}; \dot{I}_x = \dot{I}_l = \dot{I}_+ + \dot{I}_-$$

③ 负载  $\Delta$  接法且对称时: 则负载上

$$\dot{U}_x = \dot{U}_{x-} + \dot{U}_{x-}; \dot{I}_x = \dot{I}_{x-} + \dot{I}_{x-}$$

$$\dot{I}_l = \sqrt{3} \dot{I}_{x-} \angle -30^\circ + \sqrt{3} \dot{I}_{x-} \angle 30^\circ$$

④ 负载  $\Delta$  接法且不对称时: 则负载上

$$\dot{U}_x = \dot{U}_{x+} + \dot{U}_x \neq \dot{U}'_{x+} + \dot{U}'_{x-},$$

$$\text{而 } \dot{U}_{x+} + \dot{U}_{x-} = \dot{U}'_{x+} + \dot{U}'_{x-} + \dot{U}'_{x0}; \dot{I}_x = \dot{I}_{x+} + \dot{I}_{x-} + \dot{I}_{x0}$$

(5) 不同相序负载下对称分量法的应用: 实际上负载阻抗在不同相序的电动势时可能出现不同的数值: 如果是没有互感的静止对称负载时,  $\dot{Z}_+ = \dot{Z}_- = \dot{Z}_0$ ; 如果是有互感的静止对称负载时,  $\dot{Z}_+ = \dot{Z}_- \neq \dot{Z}_0$ ; 如果是动负载(旋转电机)时,  $\dot{Z}_+ \neq \dot{Z}_- \neq \dot{Z}_0$ 。现以不对称电压作用于对称负载为例, 说明对称分量法的应用:

经过上述处理的电路如图 1—9 所示。对它仍可按一相进行计算, 以 A 相为例:

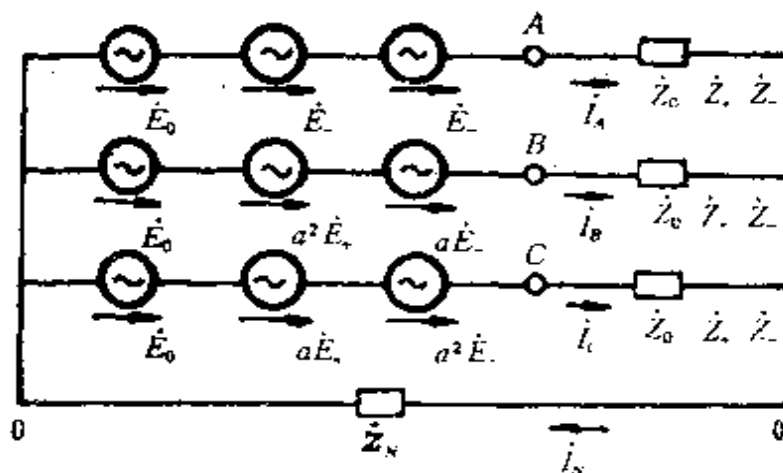


图 1—9 用对称分量法计算负载对称的三相电路  
正序电流  $\dot{I}_{A+} = \dot{E}_+ / \dot{Z}_+$



负序电流  $\dot{I}_{A-} = \dot{E}_- / \dot{Z}_-$

零序电流按下式计算

$$\dot{E}_0 = \dot{I}_0 \dot{Z}_0 + \dot{I}_N \dot{Z}_N = \dot{I}_0 \dot{Z}_0 + 3\dot{I}_0 \dot{Z}_N$$

$$\dot{I}_0 = \frac{\dot{E}_0}{\dot{Z}_0 + 3\dot{Z}_N}$$

各相及中线中的实际电流为

$$\dot{I}_A = \dot{I}_+ + \dot{I}_- + \dot{I}_0 = \frac{\dot{E}_+}{\dot{Z}_+} + \frac{\dot{E}_-}{\dot{Z}_-} + \frac{\dot{E}_0}{\dot{Z}_0 + 3\dot{Z}_N}$$

$$\dot{I}_B = a^2 \dot{I}_+ + a \dot{I}_- + \dot{I}_0 = \frac{a^2 \dot{E}_+}{\dot{Z}_+} + \frac{a \dot{E}_-}{\dot{Z}_-} + \frac{\dot{E}_0}{\dot{Z}_0 + 3\dot{Z}_N}$$

$$\dot{I}_C = a \dot{I}_+ + a^2 \dot{I}_- + \dot{I}_0 = \frac{a \dot{E}_+}{\dot{Z}_+} + \frac{a^2 \dot{E}_-}{\dot{Z}_-} + \frac{\dot{E}_0}{\dot{Z}_0 + 3\dot{Z}_N}$$

$$\dot{I}_N = \frac{3\dot{E}_0}{\dot{Z}_0 + 3\dot{Z}_N}$$

### 三、对称分量法计算举例

用对称分量法计算三相交流电单相和两相接地短路,见表1—4。由此表可得出第六章表6—10的结果。

表 1—4 单相接地短路和两相接地短路的计算公式

短路类型	示意图	计算公式
单相短路		$\dot{I}_A = \dot{I}_d = \frac{3\dot{E}_A}{\dot{Z}_1 + \dot{Z}_2 + \dot{Z}_0}$ $\dot{U}_B = \frac{(a^2 - a)\dot{Z}_2 + (a^2 - 1)\dot{Z}_0}{\dot{Z}_1 + \dot{Z}_2 + \dot{Z}_0} \dot{E}_A$ $\dot{U}_C = \frac{(a - a^2)\dot{Z}_2 + (a - 1)\dot{Z}_0}{\dot{Z}_1 + \dot{Z}_2 + \dot{Z}_0} \dot{E}_A$

(续表)

短路类型	示意图	计算公式
二相短路接地		$i'_B = \frac{(a^2 - 1)\dot{Z}_2 + (a^2 - a)\dot{Z}_0}{\dot{Z}_1(\dot{Z}_2 + \dot{Z}_0) + \dot{Z}_2\dot{Z}_0} \dot{E}_A$ $i_C = \frac{(a - 1)\dot{Z}_2 + (a - a^2)\dot{Z}_0}{\dot{Z}_1(\dot{Z}_2 + \dot{Z}_0) + \dot{Z}_2\dot{Z}_0} \dot{E}_A$ $\dot{U}_A = \frac{3\dot{Z}_2\dot{Z}_0}{\dot{Z}_1(\dot{Z}_2 + \dot{Z}_0) + \dot{Z}_2\dot{Z}_0} \dot{E}_A$
二相短路		$i_B = -i_C = \frac{a^2 - a}{\dot{Z}_1 + \dot{Z}_2} \dot{E}_A = \frac{\dot{E}_{BC}}{\dot{Z}_1 + \dot{Z}_2}$ $\dot{U}_A = \frac{2\dot{Z}_2}{\dot{Z}_1 + \dot{Z}_2} \dot{E}_A$ $\dot{U}_B = \dot{U}_C = \frac{-\dot{Z}_2}{\dot{Z}_1 + \dot{Z}_2} \dot{E}_A$

注:  $a, a^2$  为算符, 见本节二项。

$\dot{E}_A$  为故障前故障点的相电压。

$\dot{E}_{BC}$  为故障前 BC 间的线电压。

## 第二节 电工基础知识及基本公式

### 一、正弦交流电基本量及计算

#### 1. 正弦交流电基本量

正弦交流电的波形如图 1—10 所示。电流瞬时值  $i$  的表达式为

$$i = I_m \sin(\omega t + \phi)$$

式中:  $i$ —— 电流瞬时值(A);

$I_m$ —— 电流的最大值(A);

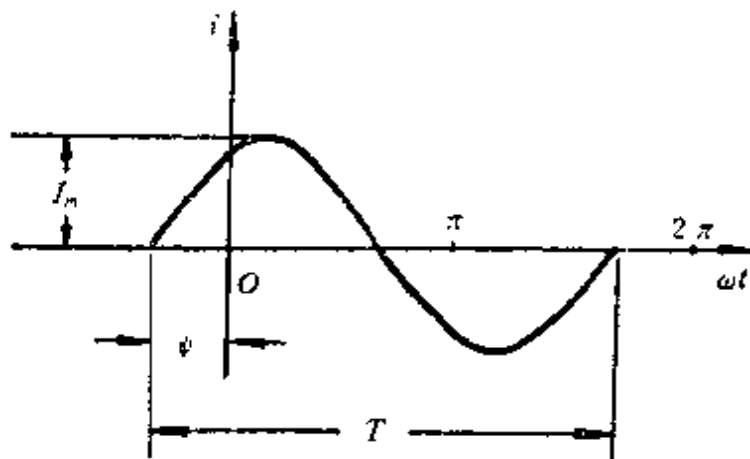


图 1-10 正弦交流电流

- $\omega$ ——角频率(rad/s),  $\omega = 2\pi f$ , 频率  $f = 1/T$ ;
- $T$  为周期(s);
- $\phi$ ——初相角(rad);
- $t$ ——时间(s)。

## 2. 交流电的有效值和平均值

### (1) 有效值(又称均方根值):

$$I = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T i^2 d\omega t}$$

图 1—10 中电流的有效值为

$$\begin{aligned} I &= \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T I_m^2 \sin^2(\omega t + \phi) d\omega t} \\ &= I_m / \sqrt{2} = 0.707I_m \end{aligned}$$

正弦交流电动势和电压的有效值  $E$  和  $U$  分别为

$$E = E_m / \sqrt{2} = 0.707E_m, U = U_m / \sqrt{2} = 0.707U$$

### (2) 平均值:

$$I_a = \frac{2}{T} \int_{\phi}^{-\phi + \frac{T}{2}} I_m \sin(\omega t + \phi) d\omega t$$

$$= \frac{2}{\pi} I_m = 0.637 I_m$$

正弦电动势和电压的平均值  $E_a$  和  $U_a$  分别为

$$E_a = \frac{2}{\pi} E_m = 0.637 E_m; U_a = \frac{2}{\pi} U_m = 0.637 U_m$$

(3) 波形因数与波顶因数(见表 1-5);

表 1-5 波形因数与波顶因数

名称	定义式	正弦交流中的值
波形因数 $k_f$	$k_f = \frac{\text{有效值}}{\text{平均值}}$	$k_f = \frac{\frac{1}{\sqrt{2}} I_m}{\frac{2}{\pi} I_m} = 1.11$
波顶因数 $k_c$	$k_c = \frac{\text{最大值}}{\text{有效值}}$	$k_c = \frac{I_m}{\frac{1}{\sqrt{2}} I_m} = 1.414$

### 3. 三相正弦交流电的表示法

三相正弦交流电压的波形图和矢量图,如图 1-11 所示。

如把 A 相电压定为参考量,则对称三相电压的瞬时值可写为

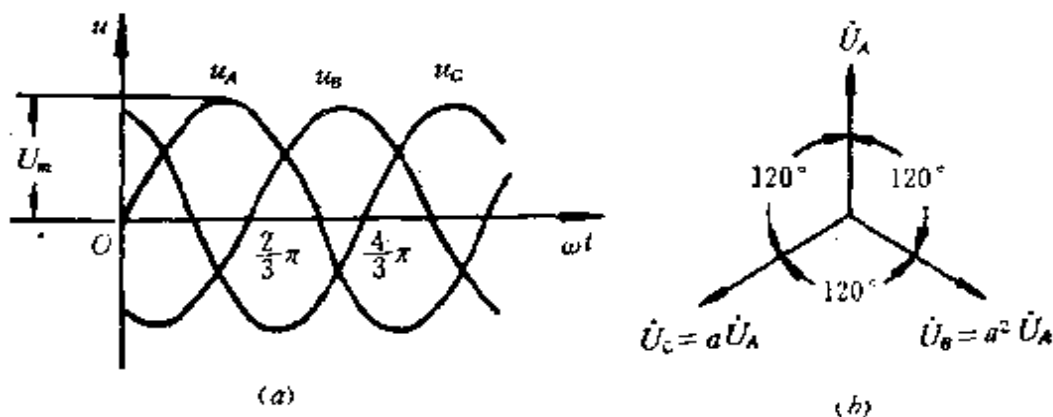


图 1-11 对称三相正弦电压的波形图和矢量图

(a) 波形图 (b) 矢量图

$$\begin{cases} u_A = \sqrt{2}U\sin\omega t \\ u_B = \sqrt{2}U\sin(\omega t - \frac{2}{3}\pi) \\ u_C = \sqrt{2}U\sin(\omega t + \frac{2}{3}\pi) \end{cases}$$

若用矢量表示,则

$$\begin{cases} \dot{U}_A = U\angle 0^\circ \\ \dot{U}_B = U\angle -120^\circ = a^2\dot{U} = a^2\dot{U}_A \\ \dot{U}_C = U\angle 120^\circ = a\dot{U} = a\dot{U}_A \end{cases}$$

## 二、电阻、电感和电容在电路中的计算

### 1. 电阻、电感和电容电路的计算

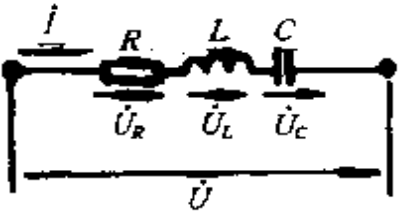
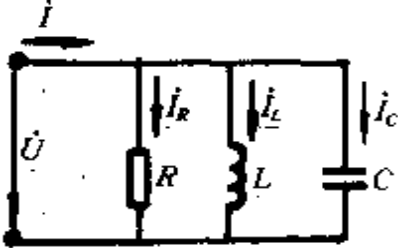
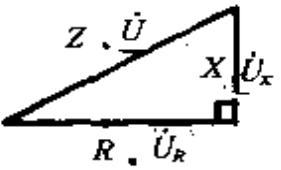
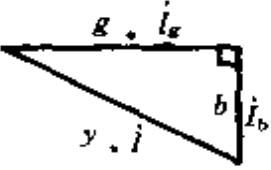
纯电阻、纯电感和纯电容电路的计算,见表 1—6。

表 1—6 单一参数电路的计算

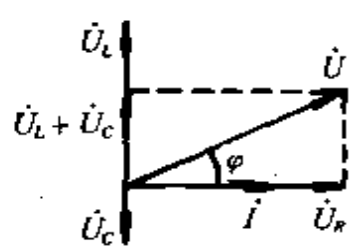
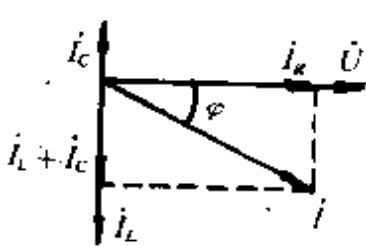
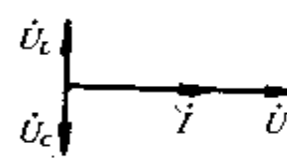
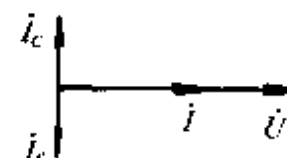
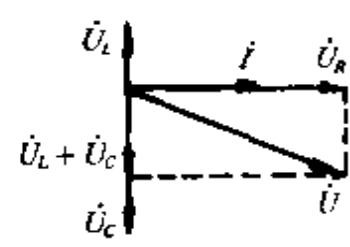
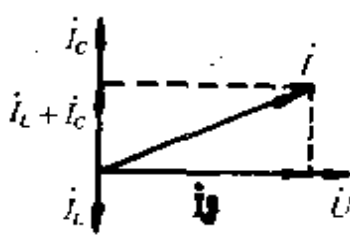
原参数	电阻 $R(\Omega)$	电感 $L(H)$	电容 $C(F)$
电路图			
性能方程	$u_R = iR$ $i = \frac{u_R}{R}$ $\dot{U} = \dot{I}R$	$u_L = L \frac{di}{dt}$ $i = \frac{1}{L} \int u_L dt$ $\dot{U}_L = j\omega L \dot{I} = jX_L \dot{I}$	$u_C = \frac{1}{C} \int i dt$ $i = C \frac{du_C}{dt}$ $\dot{U}_C = -j \frac{1}{\omega C} \dot{I}$ $= -jX_C \dot{I}$
矢量图			
平均功率 (W)	$P = U_R I$	$P_L = 0$	$P_C = 0$
无功功率 (Var)	$Q = 0$	$Q_L = U_L I$	$Q_C = U_C I$

2. 电阻、电感和电容的串联和并联计算(表 1—7)

表 1—7 电阻、电感和电容的串联和并联计算

联接方式	串 联	并 联
<p>电路图</p>		
<p>性能方程</p>	$\dot{U} = (R + j\omega L - j\frac{1}{\omega C})\dot{I} = \dot{Z}\dot{I}$ $\dot{I} = \frac{\dot{U}}{R + j\omega L - j\frac{1}{\omega C}} = \frac{\dot{U}}{\dot{Z}}$	$\dot{I} = (\frac{1}{R} - j\frac{1}{\omega L} + j\omega C)\dot{U} = \dot{Y}\dot{U}$ $\dot{U} = \frac{\dot{I}}{\frac{1}{R} - j\frac{1}{\omega L} + j\omega C} = \frac{\dot{I}}{\dot{Y}}$
<p>复阻抗 <math>\dot{Z}</math> 或复导纳 <math>\dot{Y}</math></p>	$\dot{Z} = R + jX = Z\angle\varphi$ <p>阻抗 <math>Z = \sqrt{R^2 + X^2}</math></p> <p>阻抗角 <math>\varphi = \text{tg}^{-1} \frac{X}{R}</math></p> <p>其中 电抗 <math>X = X_L - X_C</math></p> <p>感抗 <math>X_L = \omega L</math></p> <p>容抗 <math>X_C = \frac{1}{\omega C}</math></p>	$\dot{Y} = g - jb = y\angle -\varphi$ <p>导纳 <math>y = \sqrt{g^2 - b^2}</math></p> <p>导纳角 <math>-\varphi = \text{tg}^{-1} \frac{b}{g}</math></p> <p>其中 电导 <math>g = \frac{1}{R}</math></p> <p>电纳 <math>b = b_L - b_C</math></p> <p>感纳 <math>b_L = \frac{1}{\omega L}</math></p> <p>容纳 <math>b_C = \omega C</math></p>
<p>阻抗、电压三角形或导纳、电流三角形</p>	<p>阻抗三角形、电压三角形</p> 	<p>导纳三角形、电流三角形</p> 

(续表)

联接方式	串 联	并 联
	$X_L > X_C I$ 滞后于 $\dot{U}$ , 电路呈感性 	$b_L > b_C I$ 滞后于 $\dot{U}$ , 电路呈感性 
矢量图	$X_L = X_C I$ 与 $\dot{U}$ 同相 	$b_L = b_C I$ 与 $\dot{U}$ 同相 
	$X_L < X_C I$ 超前于 $\dot{U}$ , 电路呈容性 	$b_L < b_C I$ 超前于 $\dot{U}$ , 电路呈容性 
	以电流矢量为参考	以电压矢量为参考

### 3. 电容器在交流电路中无功功率和有功功率的计算

电容器在交流电路中的无功功率  $Q$  即为被电容器所输送的功率,按下式计算:



$$Q = UI\cos\delta = U^2\omega C$$

式中： $Q$ ——电容器在交流电路中的无功功率(Var)；

$U$ ——交流电压有效值(V)；

$\omega$ ——角频率(rad/s)；

$C$ ——电容器的电容量(F)。

电容器本身所消耗的有功功率  $P$ ，按下式计算：

$$P = UI\sin\delta = U^2\omega C\text{tg}\delta$$

式中： $P$ ——电容器本身所消耗的有功功率(W)；

$\text{tg}\delta$ ——电容器介质损失角的正切值  $\text{tg}\delta = P/Q$ ；

其它符号同前。

### 三、电工学常用公式

电工学常用公式，见表 1—8。

表 1—8 电工学常用公式

欧姆定律	直流 $I = \frac{U}{R}$ 交流 $\dot{I} = \frac{\dot{U}}{\dot{Z}}$	$I$ —电路电流(A) $U$ —电路端电压(V) $R$ —电阻( $\Omega$ ) $Z$ —阻抗( $\Omega$ )
电 阻	$R = \rho \frac{l}{S}$ $R_t = R_{20}[1 + \alpha(t - 20)]$	$R_{20}$ —20°C 时的电阻( $\Omega$ ) $\rho$ —电阻率( $\Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$ ) $l$ —导体的长度(m) $S$ —导体截面积( $\text{mm}^2$ ) $R_t$ — $t^\circ\text{C}$ 时的电阻( $\Omega$ ) $\alpha$ —导体的温度系数( $1/^\circ\text{C}$ )
电阻的联接	串联 $R = R_1 + R_2 + \dots + R_n$ 并联 $R = \frac{1}{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \dots + \frac{1}{R_n}}$	$R$ —电路总电阻( $\Omega$ ) $R_1, R_2, \dots, R_n$ —电路各组成部分的电阻( $\Omega$ )

(续表)

电感的联接	当电感器之间距离远,不考虑互感作用时,计算公式与电阻的联接相同,只是把 $R$ 改为 $L$ (单位 H);考虑互感时,见表 1—16	
电容的联接	串联 $C = \frac{1}{\frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \dots + \frac{1}{C_n}}$ 并联 $C = C_1 + C_2 + \dots + C_n$	$C$ — 电路总电容(F) $C_1, C_2, \dots, C_n$ — 电路各组成部分的电容(F)
电流的热效应	$Q = I^2 R t$	$Q$ — 产生的热量(J) $I$ — 通过电阻的电流(A) $R$ — 电阻( $\Omega$ ) $t$ — 时间(s)
电功率	直流 $P = UI = I^2 R = \frac{U^2}{R}$ 单相交流 $P = UI \cos \varphi$ $Q = UI \sin \varphi$ $S = UI = \sqrt{P^2 + Q^2}$ 三相交流 $P = \sqrt{3} UI \cos \varphi$ $Q = \sqrt{3} UI \sin \varphi$ $S = \sqrt{3} UI = \sqrt{P^2 + Q^2}$	$P$ — 有功功率(W) $Q$ — 无功功率(Var) $S$ — 视在功率(VA) $\varphi$ — 电流与电压间的相位角 $U$ — 电压(V) $I$ — 电流(A) $R$ — 电阻( $\Omega$ )
三相交流电路的主要关系	各相星形联接时 $I_l = I_p; U_l = \sqrt{3} U_p$ 各相三角形联接时 $I_l = \sqrt{3} I_p; U_l = U_p$	$I_l, I_p$ — 线电流和相电流(A) $U_l, U_p$ — 线电压和相电压(V)

(续表)

<p>直流电磁铁吸引力</p>	$F = 39.2B^2S$	<p><math>F</math>—吸引力(N)  <math>B</math>—磁通密度(T)  <math>S</math>—磁路的截面积(<math>\text{cm}^2</math>)</p>
<p>电动机额定转矩</p>	$M = 9555 \frac{P}{n}$	<p><math>M</math>—电动机额定转矩(<math>\text{N} \cdot \text{m}</math>)  <math>P</math>—电动机额定功率(kW)  <math>n</math>—电动机转速(r/min)</p>
<p>平行导线电流间的作用力</p>	$F = F_1 = F_2 = \frac{\mu I_1 I_2}{2\pi D}$	<p><math>F_1, F_2</math>—1导线和2导线所受力(N)  <math>I_1, I_2</math>—1导线和2导线内的电流(A)  <math>D</math>—两导线间的距离(m)  <math>\mu</math>—导体外介质的磁导率(H/m)          注:电流同向时为吸力,反向时为斥力</p>
<p>同轴圆形导线电流间的作用力</p>	$F = \frac{\mu r}{D} I_1 I_2$	<p><math>F</math>—两圆形导线所受力(N)  <math>r</math>—圆形线圈的半径(m)  <math>I_1, I_2</math>—1线圈和2线圈内的电流(A)  <math>D</math>—线圈间的距离(m)  <math>\mu</math>—同前</p>

电阻率是以长 1m,横截面  $1\text{mm}^2$  的导体材料,在温度  $+20^\circ\text{C}$  时的电阻值。常用材料的电阻率和温度系数,见表 1—9。

表 1—9 常用金属材料的电阻率和温度系数

材 料	电阻率 $\rho(\Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m})$	温度系数 $\alpha(1/^\circ\text{C})$
银	0.015	0.0036
铜	0.0175	0.0040
铝	0.029	0.0038
钨	0.053	0.0051
铁	0.10 ~ 0.30	0.0062
钢	0.13 ~ 0.25	0.006
锡	0.113	0.0042
镍	0.070	0.0062
锌	0.061	0.0037
黄 铜	0.07 ~ 0.08	0.002
青 铜	0.021 ~ 0.4	0.0037
锰 铜	0.42	0.000006
康 铜	0.4 ~ 0.51	0.000005
镍 铬	1.1	0.00015
铁铬铝	1.4	0.00005

电线与电缆的电阻率与上表有所不同，见第二章第一节。

**例 1—4** 三相不对称电阻负载，外加三相 380V 对称电压，如图 1—12 所示。试求：

- (1) 线电流  $I_A, I_B, I_C$ ；
- (2) 负载所消耗的功率。

**解**

(1) 以  $\dot{U}_{AB} = 380\text{V}$  作为基准，则

$$\dot{U}_{BC} = 380 \times \left(-\frac{1}{2} - j\frac{\sqrt{3}}{2}\right) = -190 - j329.1(\text{V})$$

$$\dot{U}_{CA} = 380 \times \left(-\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2}\right) = -190 + j329.1(\text{V})$$

所以各相电流为

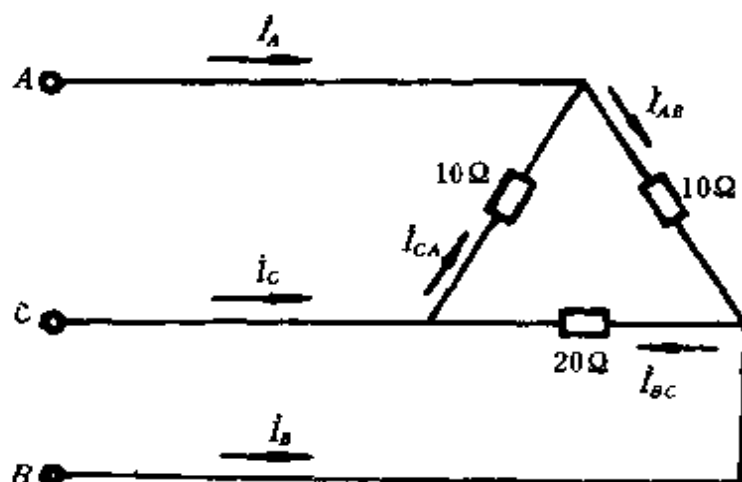


图 1-12 例 1-4 图

$$\dot{I}_{AB} = \frac{\dot{U}_{AB}}{\dot{R}_{AB}} = \frac{380}{10} = 38(\text{A})$$

$$\dot{I}_{BC} = \frac{\dot{U}_{BC}}{\dot{R}_{BC}} = \frac{-190 - j329.1}{20} = -9.5 - j16.46(\text{A})$$

$$\dot{I}_{CA} = \frac{\dot{U}_{CA}}{\dot{R}_{CA}} = \frac{-190 + j329.1}{10} = -19 + j32.9(\text{A})$$

各线电流为

$$\dot{I}_A = \dot{I}_{AB} - \dot{I}_{CA} = 38 - (-19 + j32.9) = 57 - j32.9(\text{A})$$

$$I_A = |\dot{I}_A| = \sqrt{57^2 + 32.9^2} = 56.8(\text{A})$$

$$\begin{aligned} \dot{I}_B &= \dot{I}_{BC} - \dot{I}_{AB} = -9.5 - j16.46 - 38 \\ &= -47.5 - j16.46(\text{A}) \end{aligned}$$

$$I_B = \sqrt{47.5^2 + 16.46^2} = 171.3(\text{A})$$

$$\begin{aligned} \dot{I}_C &= \dot{I}_{CA} - \dot{I}_{BC} = -19 + j32.9 - (-9.5 - j16.46) \\ &= -9.5 + j49.36 \end{aligned}$$

$$I_C = \sqrt{9.5^2 + 49.36^2} = 50.27(\text{A})$$

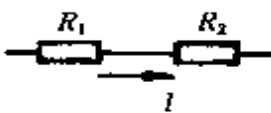
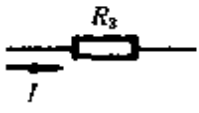
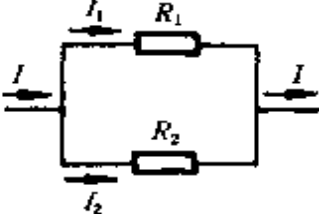
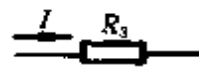
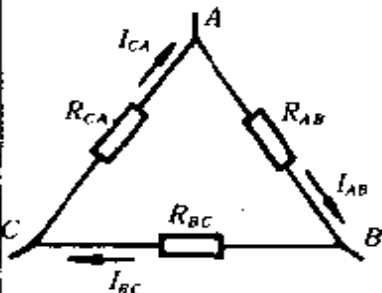
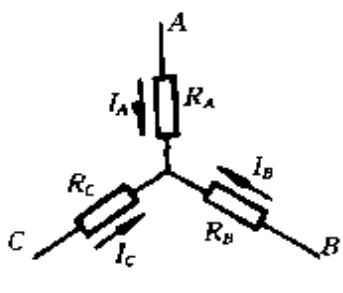
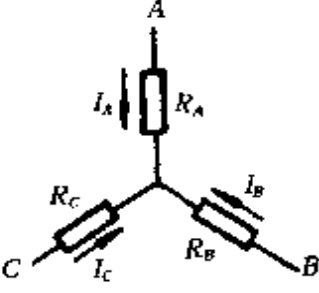
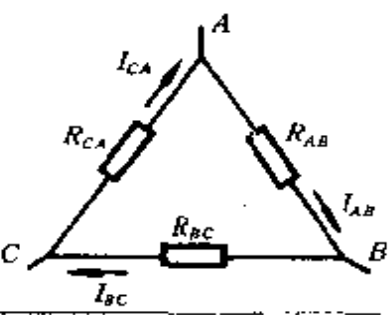
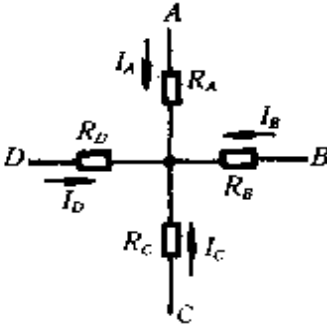
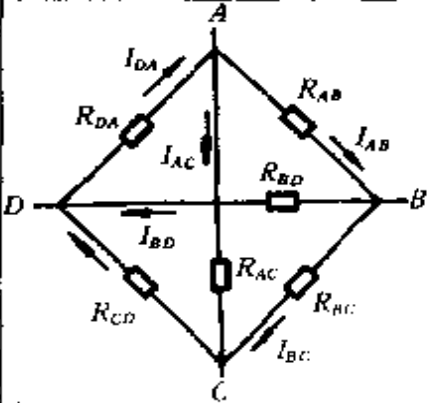
(2) 负载所消耗的功率为每相电阻消耗功率之和,即

$$\begin{aligned} P &= P_{AB} + P_{BC} + P_{CA} = \frac{380^2}{10} + \frac{380^2}{20} + \frac{380^2}{10} \\ &= 36100(\text{W}) \end{aligned}$$

#### 四、网络变换的基本方式和计算

网络变换的基本方式和计算见表 1—10。

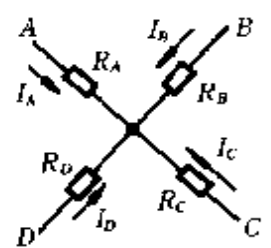
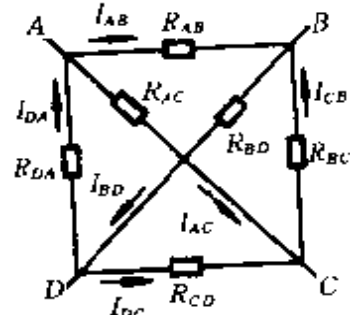
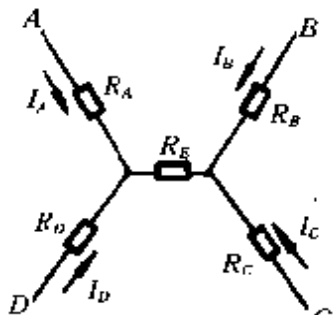
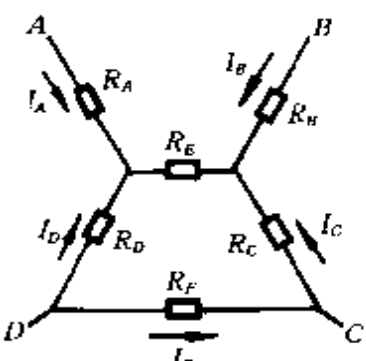
表 1—10 网络变换的基本方式和计算公式

序号	变换名称	变换符号	变换前的网络	变换后的网络
1	串联	+		
2	并联			
3	三角形变成等值星形	$\Delta/Y$		
4	星形变成等值三角形	$Y/\Delta$		
5	四角形变成有对角线的四边形	$+/\oplus$		

(表中电阻  $R$  也可换成阻抗  $Z$ )

变换后网络元件的电阻	变换前网络中的电流分布
$R = R_1 + R_2 + \dots + R_n$	$I_1 = I_2 = \dots = I_n = I$
$R = \frac{1}{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \dots + \frac{1}{R_n}}$ 当只有两支时 $R = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}$	$I_n = I \frac{R}{R_n}$
$R_A = \frac{R_{AB} \cdot R_{CA}}{R_{AB} + R_{BC} + R_{CA}}$ $R_B = \frac{R_{BC} \cdot R_{AB}}{R_{AB} + R_{BC} + R_{CA}}$ $R_C = \frac{R_{CA} \cdot R_{BC}}{R_{AB} + R_{BC} + R_{CA}}$	$I_{AB} = \frac{I_A R_A - I_B R_B}{R_{AB}}$ $I_{BC} = \frac{I_B R_B - I_C R_C}{R_{BC}}$ $I_{CA} = \frac{I_C R_C - I_A R_A}{R_{CA}}$
$R_{AB} = R_A + R_B + \frac{R_A R_B}{R_C}$ $R_{BC} = R_B + R_C + \frac{R_B R_C}{R_A}$ $R_{CA} = R_C + R_A + \frac{R_C R_A}{R_B}$	$I_A = I_{AB} - I_{CA}$ $I_B = I_{BC} - I_{AB}$ $I_C = I_{CA} - I_{BC}$
$R_{AB} = R_A \cdot R_B \cdot \sum g$ $R_{BC} = R_B \cdot R_C \cdot \sum g$ $R_{AC} = R_A \cdot R_C \cdot \sum g$ <p style="text-align: center;">.....</p> 式中 $\sum g = \frac{1}{R_A} + \frac{1}{R_B} + \frac{1}{R_C} + \frac{1}{R_D}$	$I_A = I_{AB} + I_{AC} - I_{DA}$ $I_B = I_{BD} + I_{BC} - I_{AB}$ <p style="text-align: center;">.....</p>



序号	变换名称	变换前的网络	变换后的网络
6	有对角的四边形变换为四角形		
7	有对角的四边形变换为等值网络		
8			

(续表)

变换后网络元件的电阻	变换前网络中的电流分布
$R_A = \frac{1}{\frac{1}{R_{AB}} + \frac{1}{R_{AC}} + \frac{1}{R_{DA}} + \frac{R_{BD}}{R_{AB} \cdot R_{DA}}}$ $R_B = \frac{1}{\frac{1}{R_{AB}} + \frac{1}{R_{BC}} + \frac{1}{R_{BD}} + \frac{R_{AC}}{R_{AB} \cdot R_{BC}}}$ $R_C = \frac{1}{1 + \frac{R_{AB}}{R_{BC}} + \frac{R_{AB}}{R_{BD}} + \frac{R_{AC}}{R_{BC}}}$ $R_D = \frac{1}{1 + \frac{R_{AB}}{R_{AC}} + \frac{R_{AB}}{R_{AD}} + \frac{R_{BD}}{R_{AD}}}$	$I_{AB} = \frac{I_A R_A - I_B R_B}{R_{AB}}$ $I_{CB} = \frac{I_C R_C - I_B R_B}{R_{BC}}$ <p style="text-align: center;">.....</p>
<p>计算 <math>R_A, R_B, R_C, R_D</math> 的公式同上</p> $R_E = \left( \frac{R_{AC} \cdot R_{BD}}{R_{AD} + R_{BC}} - 1 \right)$ $\times \frac{R_{AB}}{\left( 1 + \frac{R_{AB}}{R_{BC}} + \frac{R_{AB}}{R_{BD}} - \frac{R_{AC}}{R_{BC}} \right)}$ $\times \frac{1}{\left( 1 + \frac{R_{AB}}{R_{AC}} + \frac{R_{AB}}{R_{AD}} + \frac{R_{BD}}{R_{AD}} \right)}$	$I_{AB} = \frac{I_A(R_A + R_E) - I_B R_B + I_D R_E}{R_{AB}}$ $I_{DC} = \frac{I_D(R_D + R_E) + I_A R_E - I_C R_C}{R_{DC}}$ $I_{CB} = \frac{I_C R_C - I_B R_B}{R_{BC}}$ $I_{DA} = \frac{I_D R_D - I_A R_A}{R_{DA}}$ $I_{AC} = \frac{I_A(R_A + R_E) - I_C R_C + I_D R_E}{R_{AC}}$ $I_{BD} = \frac{I_B R_B - I_A R_E - I_D(R_D + R_E)}{R_{BD}}$
<p>计算 <math>R_A, R_B, R_C, R_D</math> 及 <math>R_E</math> 的公式同上</p> $R_F = \frac{1}{\frac{1}{R_{CE}} - \frac{R_{AB}}{R_{AC} \cdot R_{BD}}}$	<p>计算 <math>I_{AB}, I_{CB}, I_{DA}, I_{CA}</math> 及 <math>I_{BD}</math> 的公式同上</p> $I_{DC} = \frac{I_F R_F}{R_{DC}}$

**例 1—5** 已知一电桥电路如图 1—13(a) 所示,试求各支路中的电流。

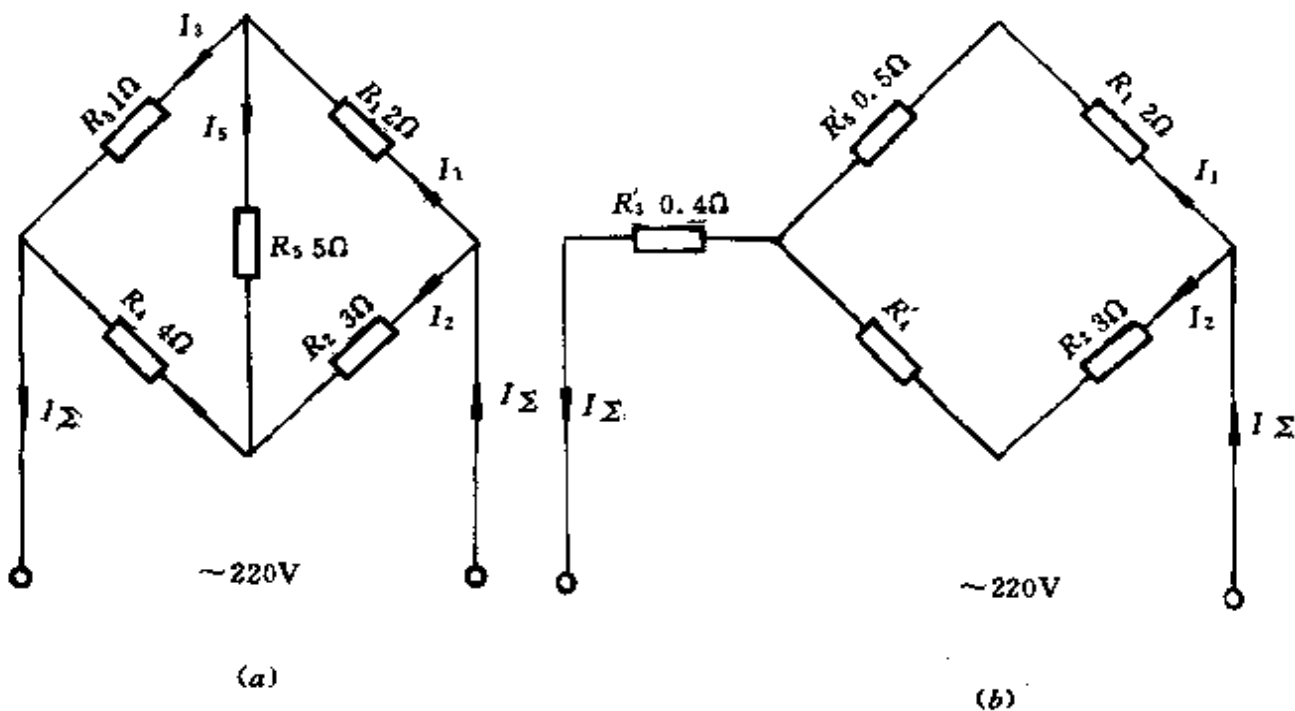


图 1—13 某电桥电路及经  $\Delta$ -Y 变换的电路

**解** 将图 1—13(a) 中的左边  $\Delta$  变换成 Y 电路,如图 1—13(b) 所示。

$$R'_3 = \frac{R_3 R_4}{R_5 + R_4 + R_3} = \frac{1 \times 4}{1 + 4 + 5} = 0.4(\Omega)$$

$$R'_4 = \frac{R_4 R_5}{R_5 + R_4 + R_3} = \frac{4 \times 5}{10} = 0.2(\Omega)$$

$$R'_5 = \frac{R_3 R_5}{R_5 + R_4 + R_3} = \frac{1 \times 5}{10} = 0.5(\Omega)$$

总电阻为

$$R_\Sigma = R'_3 + \frac{(R_1 + R'_5)(R_2 + R'_4)}{R_1 + R'_5 + R_2 + R'_4}$$

$$= 0.4 + \frac{(2 + 0.5) \times (3 + 0.2)}{2 + 0.5 + 3 + 0.2} = 1.8(\Omega)$$

总电流为

$$I_2 = U/R_\Sigma = 220/1.8 = 122.2(\text{A})$$

由图 1—13(b) 得

$$I_1 = I_2 \frac{R_2 + R'_4}{R_1 + R'_5 + R_2 + R'_4}$$

$$= 122.2 \times \frac{3 \times 0.2}{2 + 0.5 + 3 + 0.2} = 68.4(\text{A})$$

$$I_2 = I_2 - I_1 = 122.2 - 68.4 = 53.8(\text{A})$$

$$I_5 = \frac{I_2 R_2 - I_1 R_1}{R_5} = \frac{53.8 \times 3 - 68.4 \times 2}{5} = 24.6(\text{A})$$

$$I_3 = I_1 - I_5 = 68.4 - 24.6 = 43.8(\text{A})$$

$$I_4 = I_2 + I_5 = 53.8 + 24.6 = 78.4(\text{A})$$

### 五、电路的串联谐振和并联谐振计算

在含有电感和电容的无源二端网络上接入电源后,当电源频率与电路的参数符合一定条件时,电路的电抗或电纳等于零,呈电阻性,即电流与外加电压同相。这时电路处于谐振状态。谐振时的情况见表 1—11。

### 六、三相交流电路中的高次谐波

三相交流电路中有可能出现的高次谐波,见表 1—12。表中略去发电机的内阻抗和线路阻抗,并假设负载对称。

需注意:对称三相制非正弦量的谐波分量的相序系统与不对称三相制的对称分量的相序系统在本质上是有所差别的。第一,三相不对称正弦量的对称分量各组相序系统都是同频率的,因此可以用复数形式或矢量形式相加;第二,三相对称非正弦量的谐波分量,各组相序系统都不是同频率的谐波,因此不能将不同系统的分量以复数形式或矢量形式相加,而只能用瞬时值相加。

表 1—1 电路的串联谐振和并联谐振

谐振情况	R、L、C 串联谐振	R、L、C 并联谐振	电感器与电容器并联谐振
电路图			
谐振条件	$X = \omega L - \frac{1}{\omega C} = 0$ 或 $\omega L = \frac{1}{\omega C}$	$b = \frac{1}{\omega L} - \omega C = 0$ 或 $\omega L = \frac{1}{\omega C}$	$b = \frac{\omega L}{R_1^2 + \omega^2 L^2} - \frac{1/\omega C}{R_2^2 + \frac{1}{\omega^2 C^2}}$ $= 0$ 或 $\frac{\omega L}{R_1^2 + \omega^2 L^2} = \frac{1/\omega C}{R_2^2 + \frac{1}{\omega^2 C^2}}$
谐振角频率 $\omega_0$	$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}$	$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}$	$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}} \sqrt{\frac{\frac{L}{C} - R_1^2}{\frac{L}{C} - R_2^2}}$
谐振频率 $f_0$	$f_0 = \frac{1}{2\pi \sqrt{LC}}$	$f_0 = \frac{1}{2\pi \sqrt{LC}}$	$f_0 = \frac{1}{2\pi \sqrt{LC}} \sqrt{\frac{\frac{L}{C} - R_1^2}{\frac{L}{C} - R_2^2}}$

(续表)

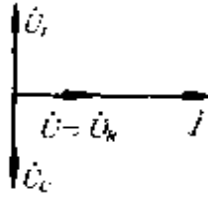
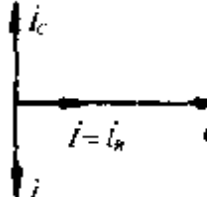
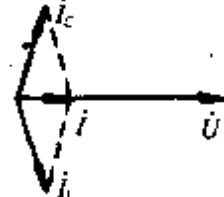
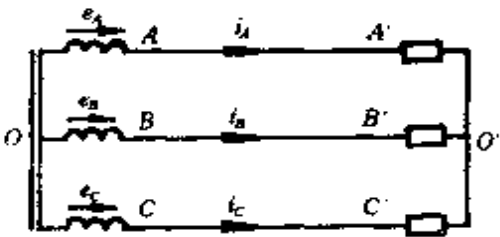
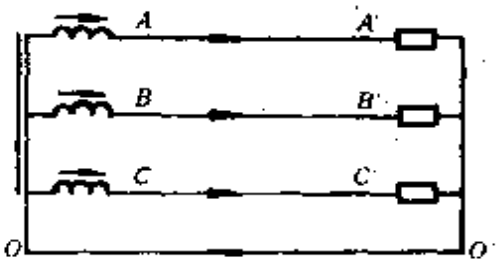
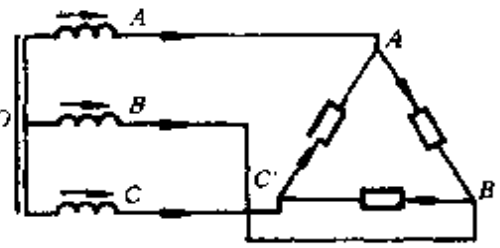
<p>谐振阻抗或谐振导纳</p>	$Z = R + jX = R$	$Y = g - jb = g = \frac{1}{R}$	$Y = g - jb = g = \frac{R_1}{R_1^2 + \omega_0^2 L^2} + \frac{R_2}{R_2^2 + \frac{1}{\omega_0^2 C^2}}$
<p>矢量图</p>			
<p>说明</p>	<p>1. 谐振时 <math>\dot{U}_L = -\dot{U}_C</math>, 故又称电压谐振</p> <p>2. 谐振时阻抗达最小值 <math>Z = R</math>, 电流达最大值(或总电压为最小)</p> <p>3. 谐振电路的品质因数</p> $Q = \frac{U_L}{U} = \frac{\omega_0 L}{R} = \sqrt{\frac{L}{C}} / R$ <p>当 <math>Q \gg 1</math> 或 <math>\sqrt{\frac{L}{C}} \gg 1</math> 时</p> $U_L = U_C \gg U$ <p>4. 谐振角频率的大小仅决定于电路的参数, 故 <math>\omega_0</math> 又称为电路的固有角频率</p>	<p>1. 谐振时 <math>\dot{I}_L = -\dot{I}_C</math>, 故又称电流谐振</p> <p>2. 谐振时导纳达最小值 <math>Y = g</math>, 总电流达最小值(或电压为最大)</p> <p>3. 谐振电路的品质因数,</p> $Q = \frac{I_C}{I} = \frac{\omega_0 C}{g} = \sqrt{\frac{L}{C}} / g$ <p>当 <math>Q \gg 1</math> 或 <math>\sqrt{\frac{C}{L}} \gg 1</math> 时</p> $I_L = I_C \gg I$ <p>4. 谐振角频率的大小仅决定于电路的参数, 故 <math>\omega_0</math> 又称为电路的固有角频率</p>	<p>1. 谐振时二支路电流无功分量相等相反, 故亦属电流谐振, 并与 <math>R, L, C</math> 并联谐振有类似特性</p> <p>2. <math>R_1 &gt; \sqrt{\frac{L}{C}} &gt; R_2</math> 或 <math>R_1 &lt; \sqrt{\frac{L}{C}} &lt; R_2</math> 时不出现谐振</p> <p>3. <math>R_1 = R_2 = \sqrt{\frac{L}{C}}</math> 时, 任何频率都谐振</p> <p>4. 当 <math>R_1 = R_2 \neq \sqrt{\frac{L}{C}}</math> 时, <math>\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}</math></p> <p>5. 当 <math>\sqrt{\frac{L}{C}} \gg R_1, R_2</math> 时, <math>\omega_0 \approx \frac{1}{\sqrt{LC}}</math></p> <p>这时 <math>Q = \frac{\omega_0 L}{R_1 + R_2}</math></p>

表 1—12 三相交流电路中的高次谐波

发电机与负载的连接方式	发电机和负载的电压、电流
	$E_x = \sqrt{E_1^2 + E_3^2 + E_5^2 + \dots}$ $U_l = \sqrt{3} \sqrt{E_1^2 + E_3^2 + E_5^2 + \dots}$ $< \sqrt{3} E_x$ $U_x = U_l / \sqrt{3}$ $I_l = I_x = \sqrt{I_1^2 + I_3^2 + I_5^2 + \dots}$ $U_{\omega'} = \sqrt{E_3^2 + E_5^2 + \dots}$
	$U_x = E_x = \sqrt{E_1^2 + E_3^2 + E_5^2 + \dots}$ $U_l = \sqrt{3} U_x$ $I_l = I_x = \sqrt{I_1^2 + I_3^2 + I_5^2 + \dots}$ $U_{\omega'} = 0$ $I_N = 3 \sqrt{I_3^2 + I_5^2 + \dots}$
	$E_x = \sqrt{E_1^2 + E_3^2 + E_5^2 + \dots}$ $U_l = U_x = \sqrt{3} \sqrt{E_1^2 + E_3^2 + E_5^2 + \dots}$ $I_l = \sqrt{I_1^2 + I_3^2 + I_5^2 + \dots}$ $I_x = I_l / \sqrt{3}$



(续表)

	$E_x = \sqrt{E_1^2 + E_2^2 + E_3^2 + \dots}$ $I_{xf} = \sqrt{I_1^2 + I_2^2 + I_3^2 + \dots}$ $U_l = \sqrt{E_1^2 + E_2^2 + E_3^2 + \dots} < E_x$ $I_l = \sqrt{3} I_x = \sqrt{3} \sqrt{I_1^2 + I_2^2 + I_3^2 + \dots} < \sqrt{3} I_{xf}$ $U_x = U_l / \sqrt{3}$
	$E_x, I_{xf}, I_l, U_l \text{ 同上}$ $U_x = U_l = \sqrt{E_1^2 + E_2^2 + E_3^2 + \dots} \neq E_x$ $I_x = I_l / \sqrt{3}$

注： $E_x$  为发电机电势， $U_l$  为线电压， $U_x$  为相电压， $I_l$  为线电流， $I_x$  为相电流， $U_{N}$  为中性点间电压， $I_N$  为中线电流， $I_{xf}$  为发电机相电流。

### 七、非正弦交流电计算

#### 1. 计算法(展开为傅里叶级数)

任一非正弦周期性的电量总能分解为不同频率的正弦分量与直流分量。当要分解的非正弦的周期量为给定数学表达式  $f(t)$  时，可用计算法计算

$$f(t) = F_0 + \sum_{k=1}^{\infty} (B_{mk} \sin k\omega t + C_{mk} \cos k\omega t)$$

或写成

$$f(t) = F_0 + \sum_{k=1}^{\infty} F_{mk} \sin(k\omega t + \phi_k)$$

$$= F_0 + F_{m1} \sin(\omega t + \phi_1) + F_{m2} \sin(2\omega t + \phi_2) + \dots + F_{mk} \sin(k\omega t + \phi_k) + \dots$$

式中： $F_0$ ——直流分量；

$F_{m1} \sin(\omega t + \phi_1)$ ——基波分量；

$F_{m1} \sin(\omega t + \psi_1)$ ——基波分量；

$F_{m2} \sin(2\omega t + \psi_2)$ ——二次谐波分量；

余类推。

上述各量之间的关系如下：

$$\begin{cases} F_{mk} = \sqrt{B_{mk}^2 + C_{mk}^2} \\ \psi_k = \operatorname{tg}^{-1} \frac{C_{mk}}{B_{mk}} \end{cases}$$

$$\begin{cases} F_0 = \frac{1}{T} \int_0^T f(t) dt \\ B_{mk} = \frac{2}{T} \int_0^T f(t) \sin k\omega t dt \\ C_{mk} = \frac{2}{T} \int_0^T f(t) \cos k\omega t dt \end{cases}$$

式中： $f(t)$ ——给定的、欲进行分解的那个非正弦量；

$T$ —— $f(t)$ 的周期；

$\omega$ ——周期为 $T$ 的正弦量的角频率，即 $f(t)$ 的基波角频率。

(1) 非正弦周期量的有效值：

$$\begin{aligned} F &= \sqrt{F_0^2 + \left(\frac{F_{m1}}{2}\right)^2 + \left(\frac{F_{m2}}{2}\right)^2 + \dots} \\ &= \sqrt{F_0^2 + F_1^2 + F_2^2 + \dots} \end{aligned}$$

式中： $F_1, F_2, \dots$ ——基波、二次谐波...等有效值。

(2) 非正弦周期量的平均值(均绝值)：

$$F_a = \frac{1}{T} \int_0^T |f(t)| dt$$

(3) 非正弦电流 $i$ 在电路中所消耗的有功功率：

$$P = \sum_{k=0}^{\infty} P_k = U_0 I_0 + \sum_{k=1}^{\infty} U_k I_k \cos \psi_k$$

(4) 非正弦电流 $i$ 在电路中所消耗的无功功率：

$$Q = \sum_{k=1}^{\infty} Q_k = \sum_{k=1}^{\infty} U_k I_k \sin \phi_k$$

(5) 非正弦电流  $i$  在电路中所消耗的视在功率:

$$S = UI = \sqrt{\sum_{k=0}^{\infty} U_k \cdot \sum_{k=0}^{\infty} I_k}$$

(6) 波形因数:

$$k_f = F/F_a$$

(7) 波顶因数:

$$k_c = F_m/F$$

(8) 畸变因数:

$$k_d = F_1/F$$

式中:  $P_k, Q_k$ —— $k$ 次谐波所消耗的有功功率和无功功率(W、Var);

$V_0, I_0$ ——电压、电流的直流分量(V、A);

$U_k, I_k$ —— $k$ 次谐波电压和电流(V、A);

$\cos \phi_k$ —— $k$ 次谐波的功率因数;

$F_m, F, F_a$ ——非正弦周期量的最大值、有效值和均绝值。

**例 1—6** 有一半波整流波如表 1—14 中所示。试求其最大值、直流分量、有效值、均绝值及波形因数和波顶因数。

**解** 写出该波形的傅里叶级数展开式(计算从略)如下:

$$f(t) = A \left( \frac{1}{\pi} + \frac{1}{2} \sin \omega t - \frac{2}{\pi} \frac{1}{1 \times 3} \cos 2\omega t - \frac{2}{\pi} \frac{1}{3 \times 5} \cos 4\omega t - \dots \right)$$

(1) 最大值  $F_m$ :

由表 1—14 中图可知  $F_m = A$

(2) 直流分量  $F_0$ :

由展开式可知  $F_0 = A/\pi$

(3) 有效值  $F$ :

$$\begin{aligned}
 F &= \sqrt{\sum_{k=0}^{\infty} F_k^2} = \sqrt{F_0^2 + F_1^2 + F_2^2 + \dots} \\
 &= A \sqrt{\left(\frac{1}{\pi}\right)^2 + \left(\frac{1}{2}\right)^2 + \left(\frac{2}{3\pi}\right)^2 + \left(\frac{2}{15\pi}\right)^2 + \dots} \\
 &= A/2
 \end{aligned}$$

(4) 绝对值:

$$\begin{aligned}
 Fa &= \frac{1}{T} \int_0^T |f(t)| dt = \\
 &= \frac{A}{2\pi} \int_0^{\pi} \left( \frac{1}{\pi} + \frac{1}{2} \sin \omega t - \frac{2}{3\pi} \cos 2\omega t - \frac{2}{15\pi} \cos 4\omega t + \dots \right) d\omega t \\
 &= \frac{A}{2\pi} \left[ \frac{\omega t}{\pi} - \frac{1}{2} \cos \omega t - \frac{2}{3\pi \times 2} \sin 2\omega t - \frac{2}{15\pi \times 4} \sin 4\omega t + \dots \right]_0^{\pi} \\
 &= \frac{A}{\pi}
 \end{aligned}$$

(5) 波形因数  $k_f$ :

$$k_f = F/Fa = (A/2)(A/\pi) = \pi/2 = 1.571$$

(6) 波顶因数  $k_c$ :

$$k_c = F_m/F = A/(A/2) = 2$$

以上所得的数据与表 1-14 一致。

**例 1-7** 如图 1-14 所示,在电阻  $4\Omega$  和电感  $2.5\text{H}$  串联回路中,当外加电压为  $u = 74\cos(t + \pi/6) + 26\cos(3t + \pi/4)\text{V}$  时,试求该回路所消耗的功率和总合功率因数。

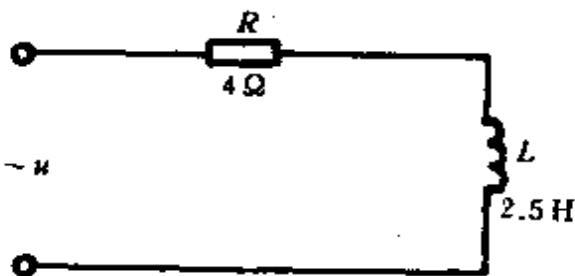


图 1-14 例 1-7 图

**解** 在一般的非正弦交流电路中,设电压、电流的直流分

量为  $U_0, I_0$ , 基波及各谐波的电压、电流有效值及相位差分别为  $U_1, I_1, \varphi_1, U_2, I_2, \varphi_2 \dots$ , 则消耗功率  $P$  可由下式计算:

$$P = U_0 I_0 + U_1 I_1 \cos \varphi_1 + U_2 I_2 \cos \varphi_2 + \dots \quad (1)$$

设回路电阻为  $R$ , 则

$$P = I_0^2 R + I_1^2 R + I_2^2 R + \dots \quad (2)$$

$$\text{按题意 } P = I_1^2 R + I_3^2 R \quad (3)$$

将  $I_1 = U_1/Z_1, I_3 = U_3/Z_3$  代入(3)式, 得

$$P = (U_1/Z_1)^2 R + (U_3/Z_3)^2 R \quad (4)$$

其中  $U_1 = 74/\sqrt{2} \text{ (V)}, U_3 = 26/\sqrt{2} \text{ (V)}$

$$\begin{aligned} Z_1 &= \sqrt{R^2 + (\omega_1 L)^2} = \sqrt{4^2 + (1 \times 2.5)^2} \\ &= \sqrt{22.25} \text{ (}\Omega\text{)} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} Z_3 &= \sqrt{R^2 + (\omega_3 L)^2} = \sqrt{4^2 + (3 \times 2.5)^2} \\ &= \sqrt{72.25} \text{ (}\Omega\text{)} \end{aligned}$$

将以上数值代入(4)式, 得

$$\begin{aligned} P &= [(74/\sqrt{2})^2/22.25 + (26/\sqrt{2})^2/72.25] \times 4 \\ &= 511.2 \text{ (W)} \end{aligned}$$

由于回路的外加电压及电流的有效值分别为

$$\begin{aligned} U &= \sqrt{U_1^2 + U_3^2} = \sqrt{(74/\sqrt{2})^2 + (26/\sqrt{2})^2} \\ &= 55.5 \text{ (V)} \end{aligned}$$

$$I = \sqrt{I_1^2 + I_3^2}$$

$$\begin{aligned} &= \sqrt{(74/\sqrt{2})^2/22.25 + (26/\sqrt{2})^2/72.25} \\ &= 11.3 \text{ (A)} \end{aligned}$$

因此, 总合功率因数为

$$\cos \varphi = P/UI = 511.2/55.5 \times 11.3 = 0.815$$

## 2. 图解法(矢量合成法)

待分解的非正弦的周期量为给定数据表或一周期性曲线

时,可用图解法计算。

利用作图的办法求出待分解的非正弦周期量的各谐波的最大值  $F_{mk}$  和初相角  $\psi_k$ 。如以矢量  $F_{mk} \angle (90^\circ - \psi_k)$  中的  $F_{mk}$  与  $\psi_k$  分别表示非正弦函数  $f(t)$  的第  $k$  次谐波的最大值与初相角,则

$$\begin{aligned} F_{mk} \angle (90^\circ - \psi_k) &= C_{mk} + jB_{mk} \\ &= \frac{2}{T} \int_0^T [f(t) \cos k\omega t + jf(t) \sin k\omega t] dt \\ &= \frac{2}{T} \int_0^T f(t) [\cos k\omega t + j \sin k\omega t] dt \end{aligned}$$

式中:  $C_{mk}$  和  $B_{mk}$  意义同前。

上述积分如在一个周期内取有限的  $n$  等分进行近似计算,则

$$\begin{aligned} F_{mk} \angle (90^\circ - \psi_k) &= \frac{2\Delta T}{T} \sum_{p=1}^n f(t_p) \times (\cos k\omega t_p + j \sin k\omega t_p) \\ &= \frac{2}{n} \sum_{p=1}^n f(t_p) \angle k\omega t_p \\ &= \frac{2}{n} \sum_{p=1}^n y_p \end{aligned}$$

式中:  $t_p$  —— 第  $p$  个等分点的时间。

当  $p$  由 1 至  $n$  的  $n$  个矢量合成后再乘以  $2/n$  就是待求的  $F_{mk} \angle (90^\circ - \psi_k)$  矢量。从而可以求出  $f(t)$  的第  $k$  次谐波的振幅  $F_{mk}$  与初相角  $\psi_k$ 。据此,可求出各次谐波的最大值与初相角。

### 3. 高频及非正弦交流电功率与功率因数的测算

普通功率表不能用来测量高频或非正弦交流电的功率,因为普通功率表是按工频正弦交流电设计的。若用它来测量高频或非正弦交流电的功率,将会产生很大的误差,结果是错误的。同样道理,普通功率因数表也不能用来测量高频或非正弦交流电的功率因数。可利用双迹示波器进行测算。因为示波器没有惰性且可以高速响应,是测瞬变电压的唯一仪器。

(1) 高频正弦交流电的功率及功率因数的测算: 高频正弦交流电是指电压和电流均为高频的正弦交流电。测算步骤如下:

① 对双迹示波器进行电压校准: 双迹示波器内部有 1kHz 的标准方波发生器, 利用它, 调节垂直输入  $y_1$  和  $y_2$  的校准旋钮, 使方波幅值正好等于 1cm。校准好后, 在以后的测试调节中不许再转动校准旋钮。

② 将电压和电流信号分别接入  $y_1$  和  $y_2$  插口; 电流信号实际上是通过一只串联在电流回路中的无感电阻取样所得的电压信号。测试示意图, 如图 1-15 所示。

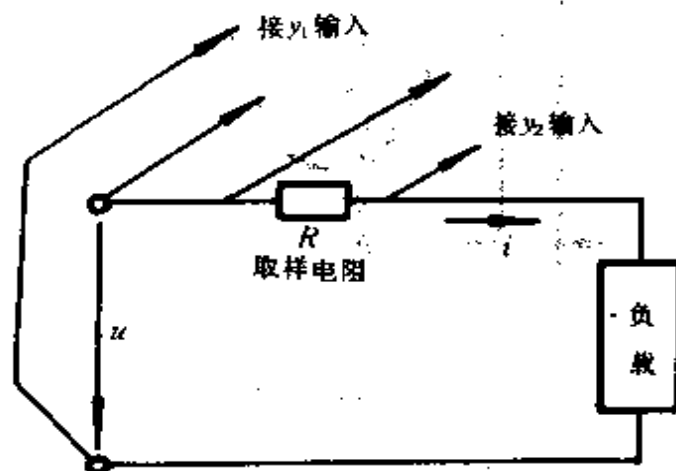


图 1-15 测试示意图

③ 调节有关旋钮, 使电压和电流波清楚地显示在屏面上; 摄下电压和电流波形。如为图 1-16 所示的波形。记录下垂直偏转灵敏度, 如  $u$  为 10V/cm;  $i$  为 0.05V/cm。

④ 根据测得的波形进行计算: 电压和电流的瞬时值由下列公式表示:

$$u = \sqrt{2} U \sin \omega t$$

$$i = \sqrt{2} I \sin(\omega t - \varphi)$$

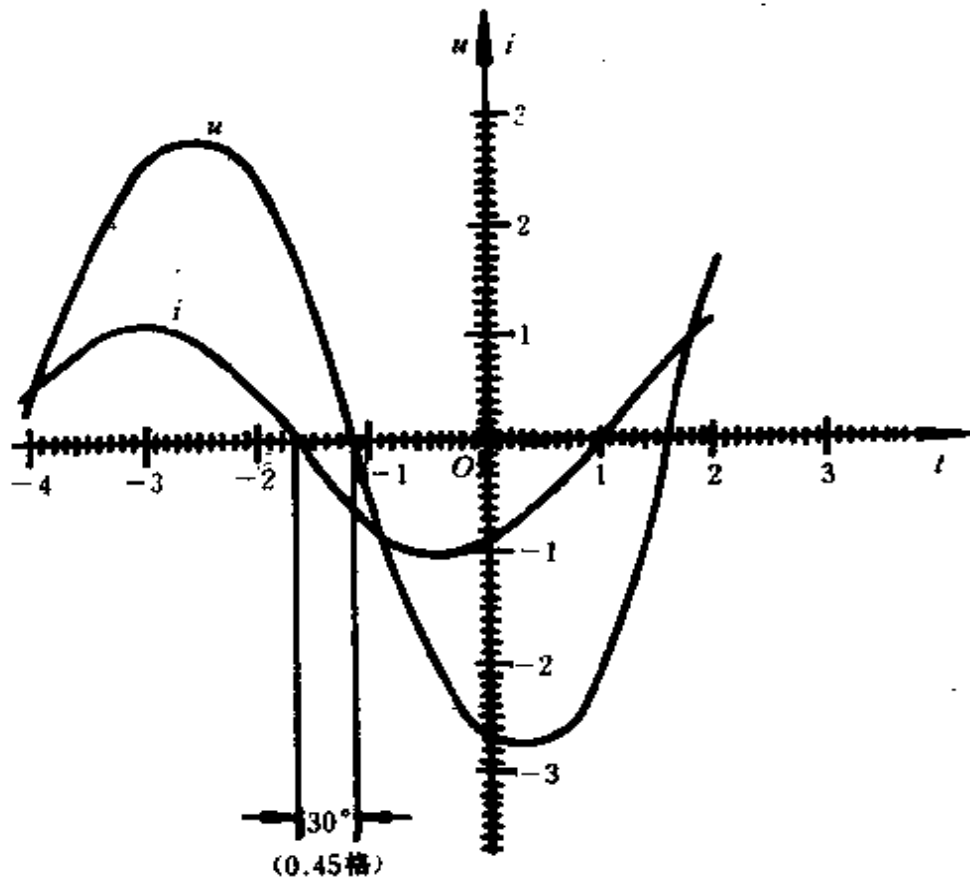


图 1—16 电压和电流波形(一)

其中 
$$U = \frac{U_{m-m}}{2\sqrt{2}} \cdot K_u K$$

峰—峰电压  $U_{m-m}$  可以从图 1—16 中量得, 为 5.6 格;  $K_u$  为  $y_1$  的垂直偏转灵敏度, 等于 10V/cm,  $K$  为  $y_1$  探头衰减系数, 等于 10。因此

$$U = \frac{5.6}{2\sqrt{2}} \times 10 \times 10 = 198(\text{V})$$

而 
$$I = \frac{I_{m-m}}{2\sqrt{2}R} \cdot K_i K'$$

峰—峰电流  $I_{m-m}$  可以从图 1—16 中量得, 为 2.1 格;  $K_i$  为  $y_2$  的垂直偏转灵敏度, 等于 0.05V/cm;  $K'$  为  $y_2$  探头衰减系数,



等于 10;  $R$  为取样电阻(见图 1—15), 该电阻一般取  $1 \sim 2\Omega$ , 实测(用电桥测出)为  $2.07\Omega$ 。因此

$$I = \frac{2.1}{2\sqrt{2} \times 2.07} \times 0.05 \times 10 = 0.173(\text{A})$$

又,  $\varphi$  为电流滞后电压的相角, 由图 1—16 可得

$$\varphi = \frac{180^\circ}{2.7 \text{ 格}} \times 0.45 \text{ 格} = 30^\circ$$

因此  $u = \sqrt{2} 198 \sin \omega t (\text{V})$

$$i = \sqrt{2} 0.173 \sin(\omega t - 30^\circ) (\text{A})$$

⑤ 算出功率因数和有功功率:

功率因数:  $\cos \varphi = \cos 30^\circ = 0.866$

有功功率: 即为瞬时功率在一个周期内的平均值

$$\begin{aligned} P &= \frac{1}{T} \int_0^T P dt = \frac{1}{T} \int_0^T u i dt \\ &= UI \cos \varphi = 198 \times 0.173 \times 0.866 = 29.66 (\text{W}) \end{aligned}$$

(2) 非正弦交流电的功率和功率因数的测算: 所测试的非正弦交流电是指工频或高频的非正弦交流电。测算步骤如下:

① 测量方法: 与高频正弦交流电的测量方法相同。假设摄录下的波形如图 1—17 所示。

② 计算方法: 先将波形分解为各种不同频率的正弦谐波分量与直流分量(若有直流分量的话), 然后利用叠加原理进行分频计算与合成。用矢量合成法计算非正弦交流电, 步骤如下:

先将一个周期分为 12 或 24 等分(注意, 在曲线变化剧烈处希望有等分点, 分割越细, 准确度越高)。这里分为 24 等分。

然后列出基波、三、五、七次谐波的各时间矢量数据, 见表 1—13(由于电流波的前后半波波形相同符号相反, 所以谐波中无偶次谐波分量和直流分量)。

由图 1—17 量得  $y_1 = 1.7$  格,  $y_2 = 1.9$  格,  $y_3 = 1.7$  格,  $y_{13} = 1.7$  格,  $y_{14} = 1.9$  格,  $y_{15} = 1.7$  格, 其余为零。

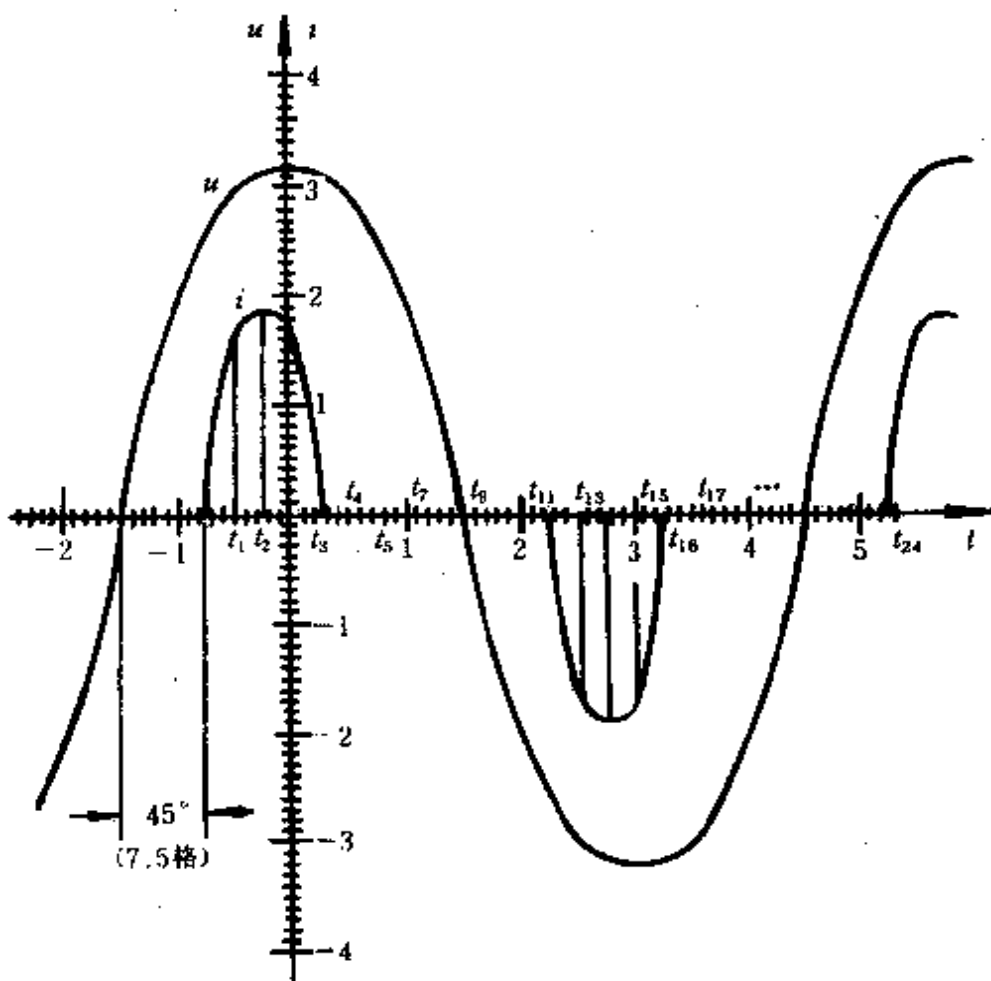


图 1—17 电压和电流波形(二)

再按表 1—13 作出基波,三 ~ 七次谐波的幅值  $F_{mk}$  和相角  $\varphi_k$ ,如图 1—18 ~ 图 1—21 所示。

表 1—13 基波及谐波的各时间矢量数据

第 $p$ 个等分点的时间 $t_p$	$t_1$	$t_2$	$t_3 \cdots \cdots t_{13}$	$t_{14}$	$t_{15}$	
对应 $t_p$ 的矢量模 $y_p$	$y_1$	$y_2$	$y_3 \cdots \cdots$	$ y_{13} $	$ y_{14} $	$ y_{15}  \cdots \cdots$
基波 $y_p$ 矢量幅角 $\omega t_p$	$15^\circ$	$30^\circ$	$45^\circ \cdots \cdots 195^\circ$	$210^\circ$	$225^\circ \cdots$	
三次谐波 $y_p$ 矢量幅角 $3\omega t_p$	$45^\circ$	$90^\circ$	$135^\circ \cdots \cdots 225^\circ$	$270^\circ$	$315^\circ \cdots \cdots$	
五次谐波 $y_p$ 矢量幅角 $5\omega t_p$	$75^\circ$	$150^\circ$	$225^\circ \cdots \cdots 225^\circ$	$330^\circ$	$45^\circ \cdots$	
七次谐波 $y_p$ 矢量幅角 $7\omega t_p$	$105^\circ$	$210^\circ$	$315^\circ \cdots \cdots 285^\circ$	$30^\circ$	$135^\circ \cdots$	

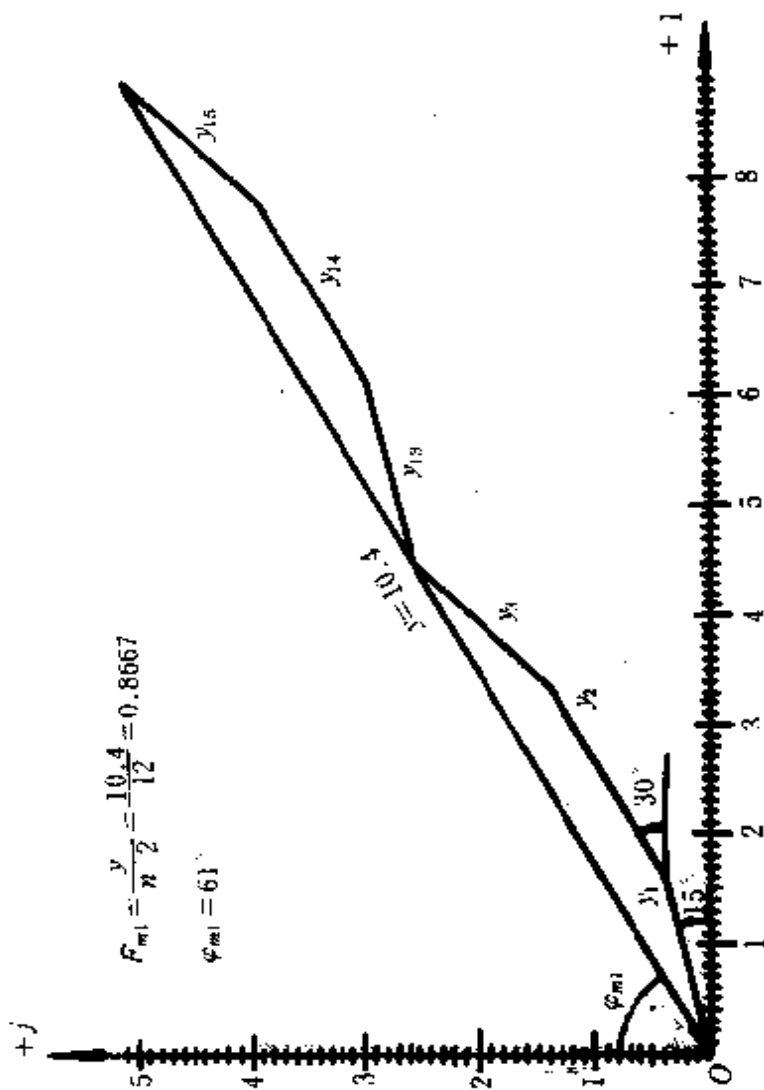


图 1-18 基波

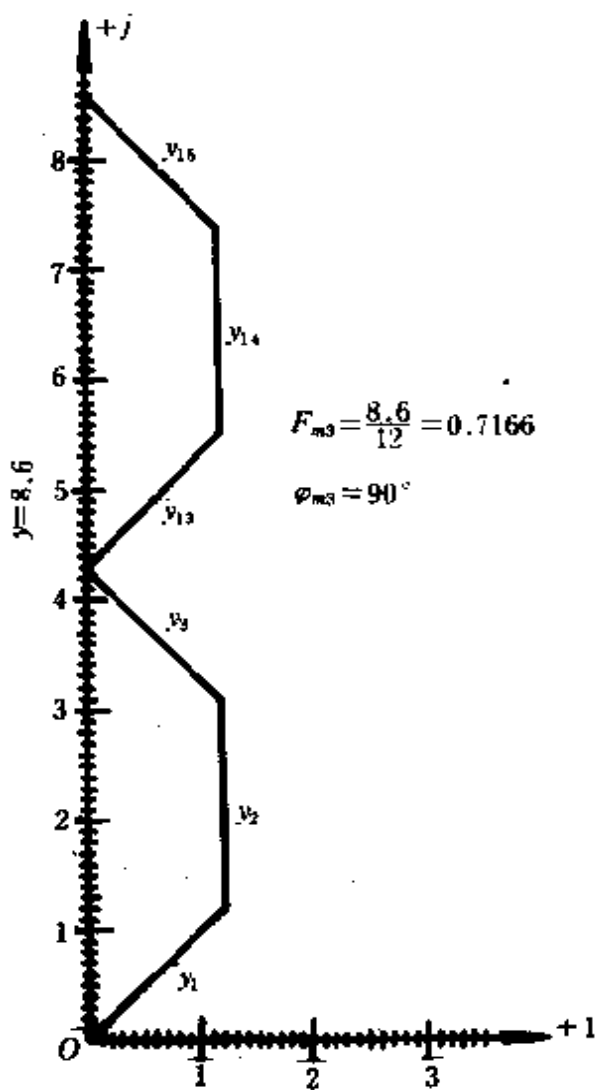


图 1-19 三次谐波

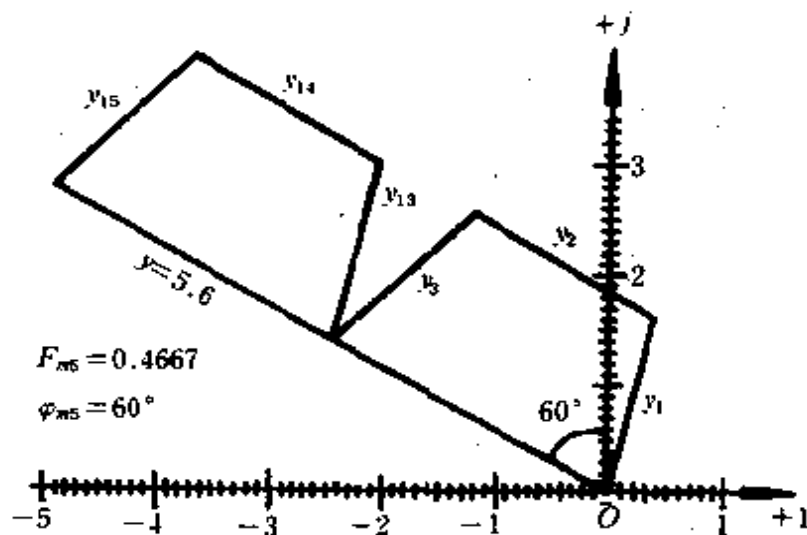


图 1—20 五次谐波

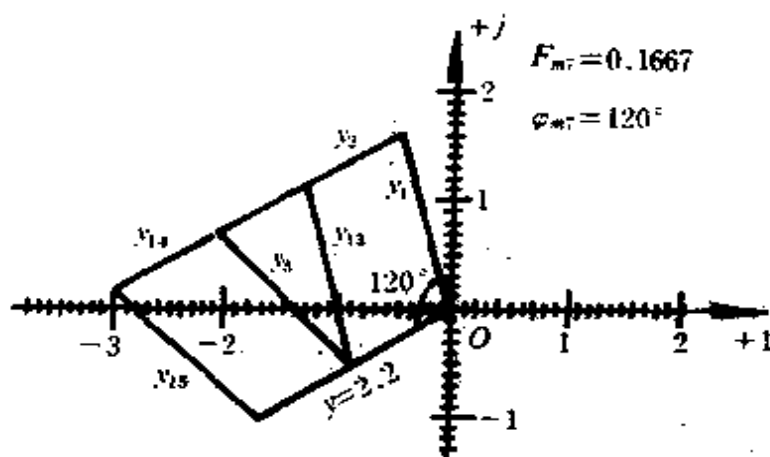


图 1—21 七次谐波

由此得基波电流和各谐波电流如下：

$$i = \sqrt{2} \left( \frac{0.8667 \times 0.05}{\sqrt{2} \times 2.07} \times 10 \right) \sin(\omega t + 61^\circ)$$

$$= \sqrt{2} 0.1489 \sin(\omega t + 61^\circ) (\text{A})$$

$$i_3 = \sqrt{2} 0.1224 \sin 3\omega t (\text{A})$$

$$i_5 = \sqrt{2} 0.0797 \sin(5\omega t - 60^\circ) (\text{A})$$

$$i_7 = \sqrt{2} 0.0285 \sin(7\omega t - 120^\circ) (\text{A})$$

功率及功率因数计算:

电压有效值

$$U = \frac{U_m}{2\sqrt{2}} \cdot K_u K = \frac{6.3}{2\sqrt{2}} \times 10 \times 10 = 223 (\text{V})$$

视在功率

$$S = UI = 223 \times$$

$$\sqrt{0.1489^2 + 0.1224^2 + 0.0797^2 + 0.0285^2}$$

$$= 46.9 (\text{VA})$$

基波功率因数

$$\cos\varphi_1 = \cos(61^\circ - 45^\circ) = \cos 16^\circ = 0.96 (\text{超前})$$

有功功率(只有相同频率的电压与电流才产生有功功率)

$$P = UI_1 \cos\varphi_1 = 223 \times 0.1489 \times 0.961 = 31.9 (\text{W})$$

全功率因数

$$\cos\varphi = P/S = 31.9/46.9 = 0.68$$

#### 4. 用万用表测算非正弦交流电

用万用表测量正弦波电压时,测得的是正弦波电压的有效值。非正弦波电压有效值,只有用有效值电压表才能测得。但有效值电压表价格昂贵,一般工厂没有。这时也可用万用表测量,并通过一定的计算,得到非正弦电压值。该方法的测量精度决定于波形因数和波顶因数值的准确度。现介绍如下:

将万用表置于交流电压档,测出非正弦波电压的读数  $U_x$ , 则非正弦波电压的平均值为  $U_p = U_x/1.11$ ; 有效值为  $U_{yr} = k_f \cdot U_x/1.11$ ; 峰值为  $U_m = k_c U_{yr} = k_c k_f U_x/1.11$ 。其中  $k_f$ 、 $k_c$  分别是被测量电压的波形因数和波顶因。几种常用波形的  $k_f$  和  $k_c$  见表 1-14。

表 1--14 几种常见波形的分析

名称	矩形波	全波整流波	半波整流波
波形图			
傅里叶级数展开式	$f(t) = A\left(\frac{4}{\pi}\sin\omega t + \frac{4}{3\pi}\sin 3\omega t + \frac{4}{5\pi}\sin 5\omega t + \dots\right)$	$f(t) = A\left(\frac{2}{\pi} - \frac{4}{\pi} \frac{1}{1 \times 3} \cos 2\omega t - \frac{4}{\pi} \frac{1}{3 \times 5} \cos 4\omega t - \frac{4}{\pi} \frac{1}{5 \times 7} \cos 6\omega t - \dots\right)$	$f(t) = A\left(\frac{1}{\pi} + \frac{1}{2} \sin \omega t - \frac{2}{\pi} \frac{1}{1 \times 3} \cos 2\omega t - \frac{2}{\pi} \frac{1}{3 \times 5} \cos 4\omega t - \dots\right)$
最大值 $F_m$	$A$	$A$	$A$
直流分量 $F_0$	$0$	$2A/\pi$	$A/\pi$
有效值 $F$	$A$	$A/\sqrt{2}$	$A/2$
均绝值 $F_a$	$A$	$2A/\pi$	$A/\pi$
波形因数 $k_f$	$1$	$1.110$	$1.571$
波顶因数 $k_c$	$1$	$1.414$	$2$

(续表)

名称	三相半波	锯齿波
波形图		
傅里叶级数展开式	$f(t) = \frac{3\sqrt{3}A}{\pi}$ $\left( \frac{1}{2} + \frac{1}{2 \times 4} \cos 3\omega t \right.$ $- \frac{1}{5 \times 7} \cos 6\omega t$ $+ \frac{1}{8 \times 10} \cos 9\omega t$ $- \dots \left. \right)$	$f(t) = A \left[ \frac{1}{2} - \frac{1}{\pi} \times (\sin \omega t \right.$ $+ \frac{1}{2} \sin 2\omega t + \frac{1}{3} \sin 3\omega t$ $+ \dots) \left. \right]$
最大值 $F_m$	A	A
直流分量 $F_0$	$3\sqrt{3}A/2\pi$	A/2
有效值 F	$A\sqrt{\frac{1}{2} + \frac{3\sqrt{3}}{8\pi}}$	$A/\sqrt{3}$
均绝值 $F_a$	$3\sqrt{3}A/2\pi$	A/2
波形因数 $k_f$	1.017	1.155
波顶因数 $k_c$	1.190	1.732



(续表)

名称	三角波	梯形波
波形图		
傅里叶级数展开式	$f(t) = \frac{8A}{\pi^2} \times (\sin\omega t - \frac{1}{9}\sin3\omega t + \frac{1}{25}\sin5\omega t - \dots + \frac{(-1)^{\frac{k-1}{2}}}{k^2} \times \sin k\omega t + \dots)$ <p>(k 为奇数)</p>	$f(t) = \frac{4A}{\pi} \times (\sin\omega t \sin a\omega t + \frac{1}{9}\sin3\omega t \sin3a\omega t + \frac{1}{25}\sin5\omega t \sin5a\omega t + \dots + \frac{1}{k^2}\sin k\omega t \sin ka\omega t + \dots)$ <p>(k 为奇数)</p>
最大值 $F_m$	A	A
直流分量 $F_0$	0	0
有效值 F	$A/\sqrt{3}$	$A\sqrt{1 - \frac{4a}{3\pi}}$
均绝值 $F_a$	A/2	$A(1 - \frac{a}{\pi})$
波形因数 $k_f$	1.155	$\sqrt{1 - \frac{4a}{3\pi}} / (1 - \frac{a}{\pi})$
波顶因数 $k_c$	1.732	$1/\sqrt{1 - \frac{4a}{3\pi}}$

(续表)

名称	半周期方形脉冲波	方形脉冲波
波形图		
傅里叶级数展开式	$f(t) = \frac{A}{2} + \frac{2A}{\pi} \left( \sin \omega t + \frac{1}{3} \sin 3\omega t + \frac{1}{5} \sin 5\omega t + \dots \right)$	$f(t) = \frac{A}{n} + \frac{2A}{\pi} \left[ \sin \frac{\pi}{n} \cos \left( \omega t + \frac{\pi}{n} \right) + \frac{1}{2} \sin \frac{2\pi}{n} \cos 2 \left( \omega t + \frac{\pi}{n} \right) + \frac{1}{3} \sin \frac{3\pi}{n} \cos 3 \left( \omega t + \frac{\pi}{n} \right) + \dots \right]$
最大值 $F_m$	A	A
直流分量 $F_0$	$A/2$	$A/n$
有效值 $F$	$A/\sqrt{2}$	$A/\sqrt{n}$
均绝值 $F_a$	$A/2$	$A/n$
波形因数 $k_f$	$\sqrt{2}$	$\sqrt{n}$
波顶因数 $k_c$	$\sqrt{2}$	$\sqrt{n}$

(续表)

名称	三角脉冲	锯齿波
波形图		
傅里叶级数展开式	$f(t) = A\left(\frac{1}{2} - \frac{4}{\pi^2}\cos\omega t + \frac{1}{9\pi^2}\cos 3\omega t + \dots + \frac{1}{k^2\pi^2}\cos k\omega t + \dots\right)$ <p>(k 为奇数)</p>	$f(t) = \frac{2A}{\pi}\left(\sin\omega t - \frac{1}{2}\sin 2\omega t + \frac{1}{3}\sin 3\omega t + \dots + \frac{1}{k}\left(-1\right)^{k+1}\sin k\omega t + \dots\right)$
最大值 $F_m$	A	A
直流分量 $F_0$	A/2	0
有效值 F	0.644A	1.8A/π
均绝值 $F_a$	A/2	A/2
波形因数 $k_f$	1.288	1.146
波顶因数 $k_c$	1.553	1.745

(续表)

名称	正弦半波	六相半波
波形图		
傅里叶级数展开式	$f(t) = \frac{2A}{\pi} \left( \frac{1}{2} + \frac{\pi}{4} \cos \omega t + \frac{1}{1 \times 3} \cos 2\omega t - \frac{1}{3 \times 5} \cos 4\omega t + \frac{1}{5 \times 7} \cos 6\omega t + \dots \right)$	$f(t) = \frac{6A}{\pi} \left( 1 + \frac{1}{5 \times 7} \cos 6\omega t - \frac{1}{11 \times 13} \cos 12\omega t + \frac{1}{17 \times 19} \cos 18\omega t - \dots \right)$
最大值 $F_m$	$A$	$A$
直流分量 $F_0$	$A/\pi$	$6A/\pi$
有效值 $F$	$\pi A/5$	$6A/\pi$
均绝值 $F_a$	$A/\pi$	$6A/\pi$
波形因数 $k_f$	1.974	1
波顶因数 $k_c$	1.592	1

**例 1—8** 用万用表测得某锯齿波  $U_x = 10V$ , 求该锯齿波电压的平均值、有效值和峰值。

**解** 由表 1—14 查得锯齿波电压的  $k_f = 1.155, k_r = 1.732$ , 因此

$$U_p = U_x / 1.11 = 10 / 1.11 = 9(V)$$


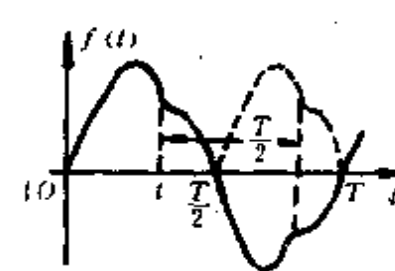
$$U_{yx} = k_f U_x / 1.11 = 1.155 \times 9 = 10.4(V)$$

$$U_m = k_r U_{yx} = 1.732 \times 10.4 = 18(V)$$

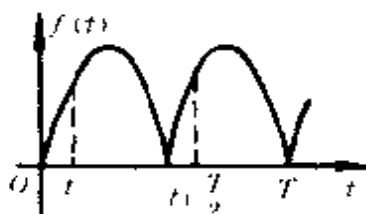
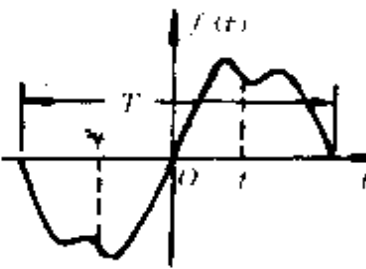
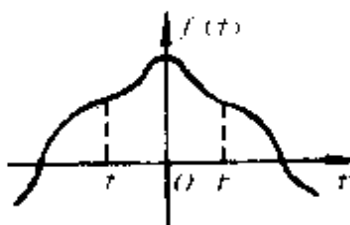
### 5. 几种波形的特点和波形分析

几种常见波形的分析, 见表 1—14; 几种特定波形的谐波特点, 见表 1—15。

表 1—15 几种特定波形的谐波特点

波形及特点	谐波特点	说明
 <p>正负部分面积相等</p>	$f(t) = F_{m1} \sin(\omega t + \phi_1) + F_{m2} \sin(2\omega t + \phi_2) + \dots + F_{mk} \sin(k\omega t + \phi_k) + \dots$	
 <p>前后半波波形相同符号相反: <math>f(t) = -f(t + \frac{T}{2})</math></p>	$f(t) = F_{m1} \sin(\omega t + \phi_1) + F_{m3} \sin(3\omega t + \phi_3) + \dots + F_{mk} \sin(k\omega t + \phi_k) + \dots$ <p>(k 为奇数) 谐波中无偶次谐波分量和直流分量</p>	<p>交流发电机由于结构的对称, 电动势波形都属此类</p>

(续表)

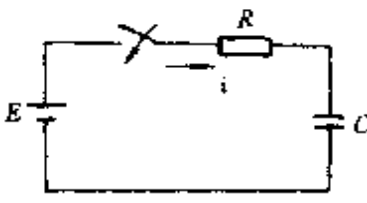
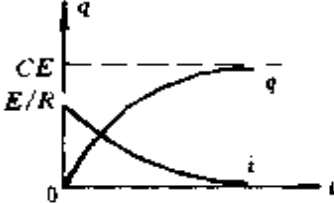
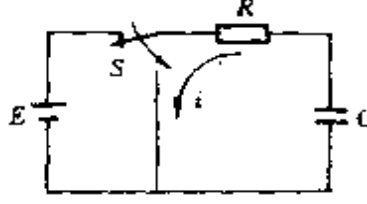
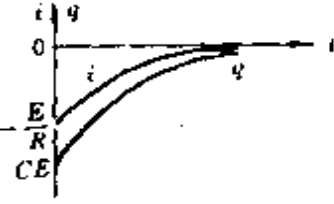
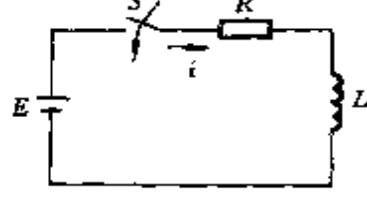
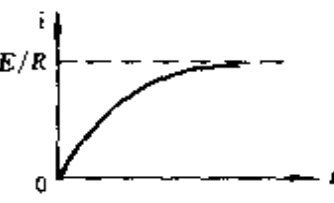
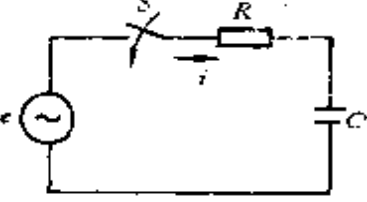
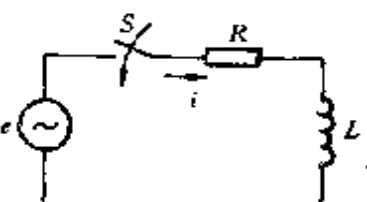
波形及特点	谐波特点	说 明
 <p>前后半波波形相同：  <math>f(t) = f(t + \frac{T}{2})</math></p>	$f(t) = F_0 + F_{m2}\sin(2\omega t + \psi_2) + F_{m3}\sin(4\omega t + \psi_4) + \dots + F_{mk}\sin(k\omega t + \psi_k) + \dots$ <p>(k 为偶数)                      谐波中无奇次谐波分量</p>	<p>整流电路中常出现此类波形</p>
 <p>波形对原点对称 <math>f(t) = -f(-t)</math></p>	$f(t) = B_{m1}\sin\omega t + B_{m2}\sin 2\omega t + \dots + B_{mk}\sin k\omega t + \dots$ <p>谐波中仅含正弦项, 不含余弦项和直流分量</p>	<p>在倍频电路中常出现, 波形性质与时间起点有关</p>
 <p>波形对纵轴对称 <math>f(t) = f(-t)</math></p>	$f(t) = C_{m1}\cos\omega t + C_{m2}\cos 2\omega t + \dots + C_{mk}\cos k\omega t + \dots$ <p>谐波仅含余弦项, 不含正弦项和直流分量</p>	<p>波形性质与时间起点有关</p>

### 八、含电容电感电路的瞬变现象

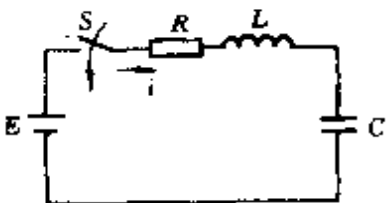
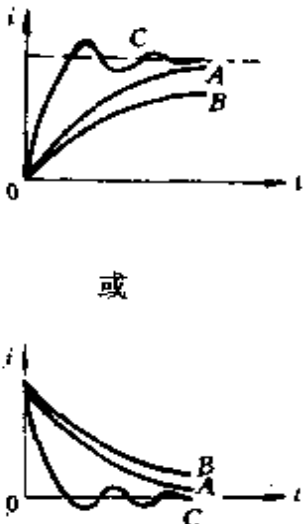
电感和电容是具有储能作用的元件, 当合断闸带电感或电容的电路时, 会出现瞬变现象。

1. 五种最常见的电容、电感电路的瞬变现象见表 1--16。

表 1—16 电容、电感电路的瞬变现象

电路图	方程式	解	图
	$R \frac{dq}{dt} + \frac{q}{C} = E$	$q = CE(1 - e^{-\frac{t}{RC}})$ $i = \frac{E}{R} e^{-\frac{t}{RC}}$	
	$R \frac{dq}{dt} + \frac{q}{C} = 0$	$q = CE e^{-\frac{t}{RC}}$ $i = -\frac{E}{R} e^{-\frac{t}{RC}}$	
	$L \frac{di}{dt} + Ri = E$	$i = \frac{E}{R} (1 - e^{-\frac{t}{L/R}})$	
	$R \frac{dq}{dt} + \frac{q}{C} = E_m \sin(\omega t + \varphi)$	$i = \frac{E_m}{\sqrt{R^2 + \frac{1}{\omega^2 C^2}}} [\sin(\omega t + \varphi - \theta) - \text{tg} \theta \cos(\varphi + \theta) e^{-\frac{t}{RC}}]$ $\theta = \text{tg}^{-1} \frac{1}{\omega CR}$	
	$L \frac{di}{dt} + Ri = E_m \sin(\omega t + \varphi)$	$i = \frac{E_m}{\sqrt{R^2 + \omega^2 L^2}} [\sin(\omega t + \varphi - \theta) - \sin(\varphi - \theta) e^{-\frac{R}{L}t}]$ $\theta = \text{tg}^{-1} \frac{\omega L}{R}$	

(续表)

电路图	方程式	解	图
	$L \frac{di}{dt} + Ri + \int \frac{idt}{C} = E$	<p>临界状态 (<math>R = 2\sqrt{\frac{L}{C}}</math>)  <math>i = a^2 C E t e^{-at}</math>                      非振荡状态                      (<math>R &gt; 2\sqrt{\frac{L}{C}}</math>)  <math>i = \frac{2E}{\sqrt{R^2 - \frac{4L}{C}}} e^{-\alpha t} \sin \beta t</math>                      振荡状态                      (<math>R &lt; 2\sqrt{\frac{L}{C}}</math>)  <math>i = \frac{2E}{\sqrt{\frac{4L}{C} - R^2}} e^{-\alpha t} \sin \beta t</math></p>	 <p>或</p> <p>A) 临界状态                      B) 非振荡状态                      C) 振荡状态</p>

## 2. RC 充放电计算

### (1) 充电过程

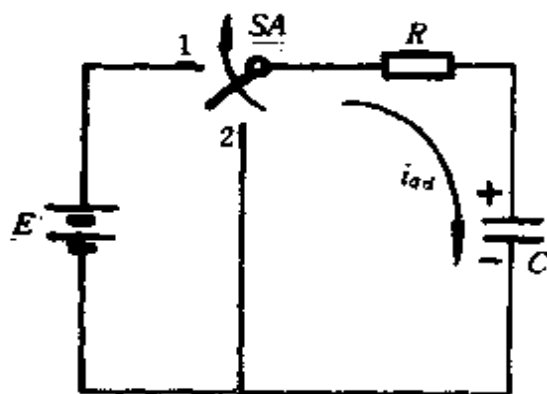
如图 1—22 所示,在开关 SA 未接通之前,电容 C 不带电。当 SA 合向 1 点时,电源就通过电阻 R 向电容 C 充电。这时充电电流  $i_{qd}$  按下式变化  $i_{qd} = \frac{E}{R} e^{-t/RC}$

电容两端的电压  $u_c$  按下式变化

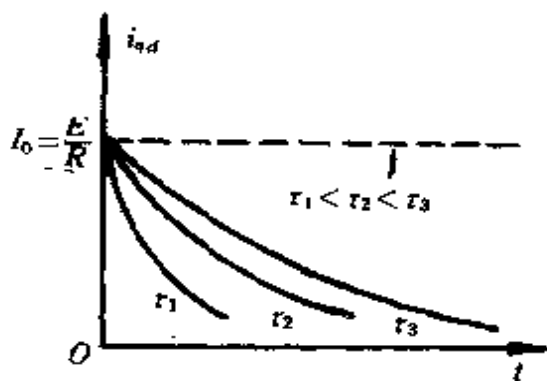
$$u_c = E(1 - e^{-t/RC})$$

RC 乘积称为时间常数,用  $\tau$  表示,即  $\tau = RC$ 。一般认为  $t = (3 \sim 5)RC$  时,充电过程基本结束。

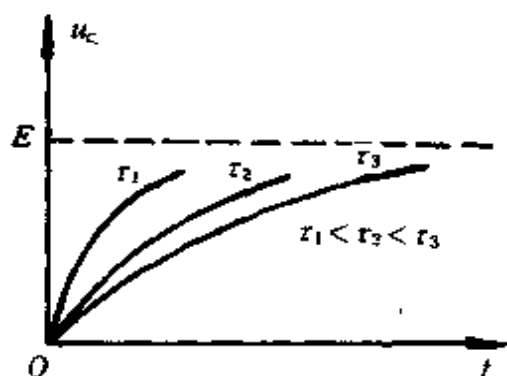




(a)



(b)



(c)

图 1-22 电容充电

(a) 充电电路 (b) 充电电流 (c) 电容两端电压

## (2) 放电过程

如图 1-23 所示,如果把  $SA$  合向 2 点时,则电容  $C$  将通过电阻  $R$  放电。放电电流方向与充电电流的方向相反。

放电电流  $i_{fd}$  和电容两端电压  $u_c$  为

$$i_{fd} = -\frac{E}{R}e^{-t/RC}$$

$$u_c = Ee^{-t/RC}$$

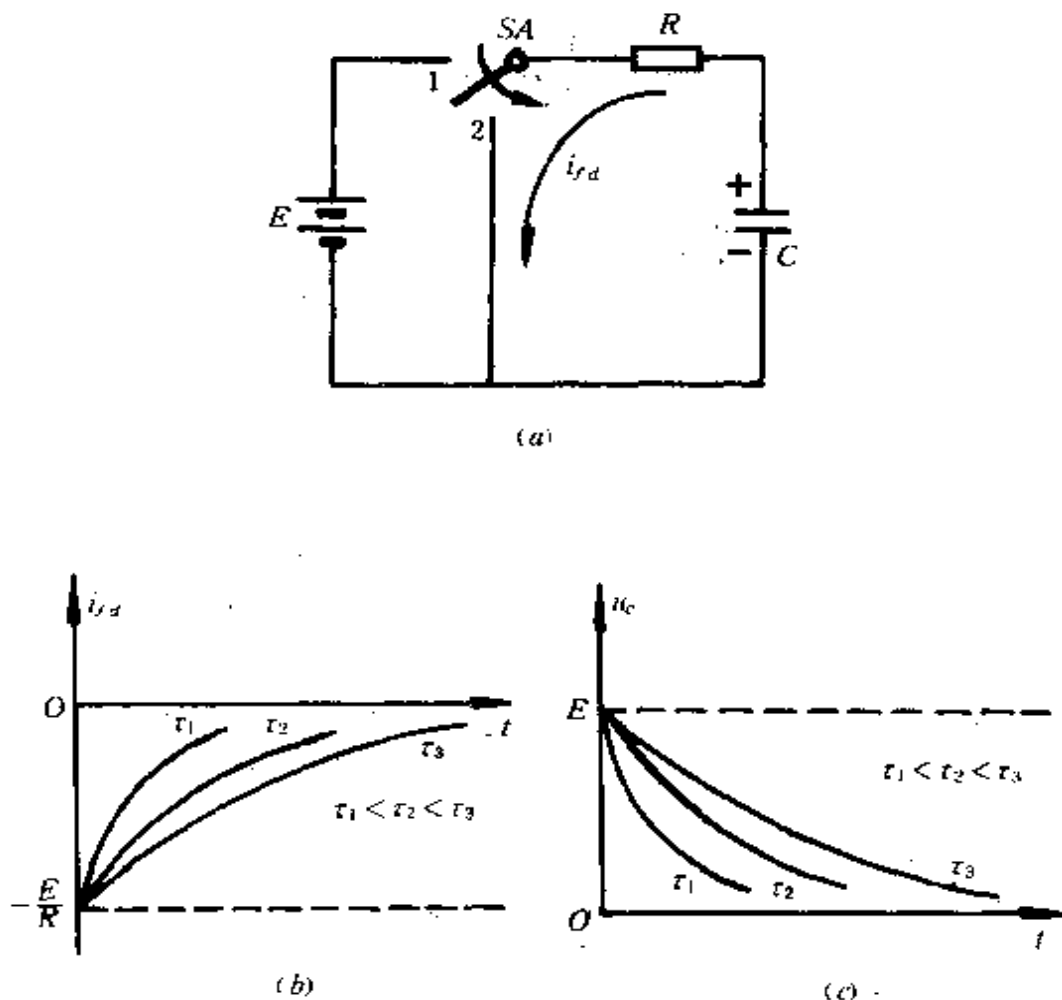


图 1-23 电容放电

(a) 放电电路 (b) 放电电流 (c) 电容两端电压

## 九、媒质处于交变磁场中的损耗计算

### 1. 磁滞损耗

在交变磁场中,铁磁物质因反复磁化由磁滞现象产生的能量损耗称为磁滞损耗。磁滞损耗  $P_h$  可由下面的经验公式计算:

$$P_h = k_h f B_m^{1.6} V$$

式中:  $P_h$  —— 磁滞损耗(W);

$f$ ——频率(Hz);

$B_m$ ——磁滞回线上磁通密度最大值(T);

$V$ ——铁磁物质的体积( $m^3$ );

1.6——史坦梅茨常数;

$k_h$ ——磁滞系数,与铁磁物质性质有关,由实验确定,可参见表 1—17。

表 1—17 磁滞系数举例

材 料	$k_h$ ( $J/T^{1.6} \cdot m^3$ )	材 料	$k_h$ ( $J/T^{1.6} \cdot m^3$ )
硅钢	$2.5 \sim 1.5 \times 10^2$	铸铁	$28 \sim 40 \times 10^2$
变压器用 优质铁皮	$2.8 \times 10^2$	镍	$33 \sim 95 \times 10^2$
发电机铸钢	$6.5 \times 10^2$	钴	$30 \times 10^2$

### 2. 涡流损耗

交变磁场中的导电物质(包括铁磁物质),在垂直于磁力线方向的截面上感应出闭合的环行电流,称为涡流。由涡流产生的电阻损耗称为涡流损耗。涡流损耗  $P_e$  可由下面的经验公式计算:

$$P_e = k_e f^2 B_m^2 V$$

式中: $P_e$ ——涡流损耗(W);

$k_e$ ——涡流系数,与材料的电阻率、截面的大小及形状有关的系数,由实验确定;

$V$ ——导电物质(或铁磁物质)的体积( $m^3$ );

其它符号同前。

### 3. 电介质损耗

在交变电场中,电介质中的一部分电能转换成热能,这部分能量称为电介质损耗。

对于电工产品,常用介质损耗角 $\delta$ 的正切 $\text{tg}\delta$ 来作为其绝缘性能的一个指标。计算公式如下:

$$\text{tg}\delta = \frac{1}{r\omega C}$$

式中: $\text{tg}\delta$ ——介质损耗因数;

$r$ ——电阻,是等效电介质损耗的参数( $\Omega$ );

$\omega$ ——交流电流的角频率( $\text{rad/s}$ );

$C$ ——等效电介质的电容量( $\text{F}$ )。

绝缘材料的 $\text{tg}\delta$ 值一般很小,约在 $10^{-4} \sim 10^{-1}$ 之间,所以 $\text{tg}\delta \approx \delta$ 。 $\delta$ 越大,电介质损耗越大,越容易引起绝缘老化。

#### 十、电磁屏蔽透入深度计算

所谓电磁波在导电媒质中的透入深度是这样规定的:波的振幅衰减到原值的 $1/e = 1/2.718 \approx 36.8\%$ 时所穿行的距离,用符号 $\delta$ 表示:

$$\delta = \sqrt{\frac{2}{\omega\mu\gamma}} = \frac{1}{\sqrt{\pi f\mu\gamma}}$$

式中: $\delta$ ——透入深度( $\text{m}$ );

$f$ ——频率( $\text{Hz}$ );

$\mu$ ——磁导率,真空磁导率为 $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{H/m}$ ;

$\gamma$ ——电导率( $1/\Omega \cdot \text{m}$ )。

以铁为例,当 $f = 50\text{Hz}$ 、 $\mu \approx 1000\mu_0$ 、 $\gamma = 0.1 \times 10^8 1/\Omega \cdot \text{m}$ 时,平面电磁波在铁内的波速和透入深度分别为

$$\begin{aligned} v &= \sqrt{\frac{2\omega}{\mu\gamma}} = \sqrt{\frac{2 \times 2\pi \times 50}{1000 \times 4\pi \times 10^{-7} \times 0.1 \times 10^8}} \\ &= 0.224(\text{m/s}) \end{aligned}$$

$$\delta = \frac{1}{\sqrt{\pi f\mu\gamma}}$$

$$= \frac{1}{\sqrt{\pi \times 50 \times 1000 \times 4\pi \times 10^{-7} \times 0.1 \times 10^8}}$$

$$= 0.00072(\text{m}) = 0.72(\text{mm})$$

不同导电媒质在不同频率时的透入深度,见表 1—18 及图 13—5。

只要被保护设备的金属材料外壳有足够的厚度,就能起到电磁屏蔽作用。

表 1—18 铜、铝、铁内不同频率时的透入深度(mm)

$f(\text{Hz})$		50	$10^4$
铜	$\gamma = 0.58 \times 10^8 \text{ 1}/\Omega \cdot \text{m}$ $\mu = \mu_0$	9.35	0.067
铝	$\gamma = 0.1 \times 10^8 \text{ 1}/\Omega \cdot \text{m}$ $\mu = \mu_0$	11.7	0.083
铁	$\gamma = 0.1 \times 10^8 \text{ 1}/\Omega \cdot \text{m}$ $\mu \approx 1000\mu_0$	0.72	0.0051

### 第三节 电感和电容的计算

#### 一、电感计算

介质的磁导率

$$\mu = \mu_0 \mu_r$$

式中： $\mu$ ——介质的磁导率(H/m)；

$\mu_0$ ——真空的磁导率， $\mu_0 = 0.4\pi \times 10^{-6}\text{H/m}$ ；

$\mu_r$ ——介质的相对磁导率，是个纯数，见表 1—19。

表 1—19 几种物质的相对磁导率  $\mu_r$

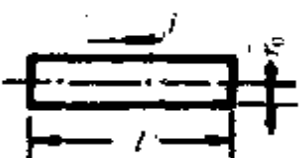

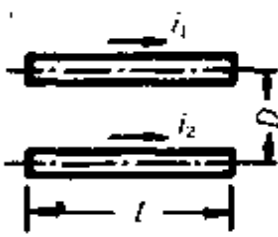
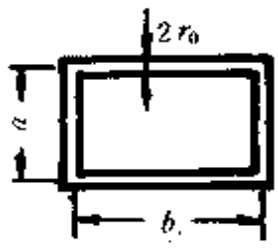
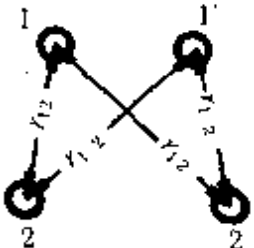
种类	名称	$\mu_r$	种类	名称	$\mu_r$
抗磁质	铋	0.99983	顺磁质	铝	1.00002
	银	0.99998		白金	1.00026
	锌	0.999987	铁磁质 (因不是常数,故以最大值表示)	钴	250
	铜	0.999991		镍	500
顺磁质	空气	1.0000004	纯铁	20000	

线图串联或并联及几种典型电感的计算,见表 1—20 和表 1—21。

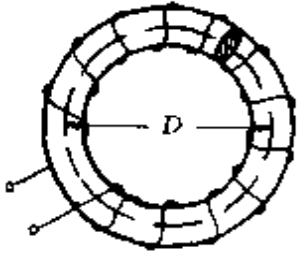
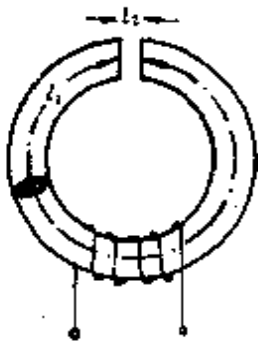


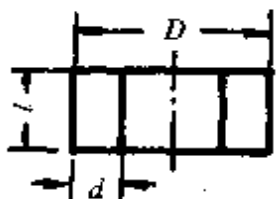
表 1—20 两个线圈串联或并联时的总电感

联接	接线图	总电感	说明
串联		$L = L_1 + L_2 + 2M$ $L_1, L_2 \text{— 两线圈自感}$ $M \text{— 两线圈的互感}$	图(a)时 $M$ 取“+”; 图(b)时 $M$ 取“-”
并联		$L = \frac{L_1 L_2 - M^2}{L_1 + L_2 - 2M}$ $L_1, L_2, M \text{ 同上}$	

表 1—21 几种典型电感的计算公式

结构形式	电感量(H)
<p>圆截面直导线段的自感</p> 	$L = \frac{\mu_0 l}{2\pi} (\ln \frac{2l}{r_0} - 0.75)$ <p><math>l</math>— 直导线段的长度(m)  <math>r_0</math>— 导线的半径(m)                      条件: <math>r_0 \ll l</math></p>
<p>同轴电缆的电感 (电缆外层导体厚度忽略不计)</p> 	$L = \frac{\mu_0 l}{2\pi} (\frac{1}{4} + \ln \frac{r_2}{r_1})$ <p><math>l</math>— 电缆长度(m)</p>
<p>两平行直导线段间的互感</p> 	$M = \frac{\mu_0 l}{2\pi} (\ln \frac{2l}{D} - 1)$ <p><math>l</math>— 直导线段的长度(m)                      条件: 导线半径 <math>\ll D</math>  <math>D \ll l</math></p>
<p>矩形线圈的自感</p> 	$L = \frac{\mu_0}{\pi} [a \ln \frac{2ab}{r_0(a+b)} + b \ln \frac{2ab}{r_0(b+d)} - 2(a+b-d)] + \frac{\mu_0}{\pi} (\frac{a+b}{4})$ <p><math>r_0</math>— 圆形导线半径 <math>d = \sqrt{a^2 + b^2}</math>                      条件: <math>r_0 \ll a</math> <math>r_0 \ll b</math></p>
<p>两对输电线间的互感</p> 	$M = \frac{\mu_0 l}{2\pi} \ln \frac{r_{12} r_{12}}{r_{12} r_{12}}$ <p><math>l</math>— 输电线长度(m)                      条件: 导线半径 <math>\ll</math> 线间距离                      线间距离 <math>\ll l</math></p>

(续表)

结构形式	电感量(H)
环状圆筒 线圈的电感 	$L = \frac{\mu_0 W^2}{2} (D - \sqrt{D^2 - 4R^2})$ W—匝数 R—圆环截面的半径(m) D 单位为 m
有气隙环形铁心 的电感(也适用 铁心式电抗器) 	$L = \frac{\mu_0 \mu_r S W^2}{l_1 + \mu_r l_2}$ S—环状圆筒截面积(m <sup>2</sup> ) l <sub>1</sub> —平均长度(m) l <sub>2</sub> —气隙长度(m) W—线圈匝数 μ <sub>r</sub> —铁心相对磁导率
圆环的电感 	$L = \mu_0 R (\ln \frac{8R}{a} - 1.75)$ a—圆环截面的半径(m) 条件: a ≪ R, R 单位为 m
长螺管 线圈的 自感 	$L = \frac{\mu_0 W^2 A}{l} (\sqrt{R^2 + l^2} - R)$ A—螺管线圈截面积(m <sup>2</sup> ) W—匝数 l, R 单位均为 m
短螺管 线圈的 自感 	$L \approx \frac{6.4 \mu_0 W^2 D^2}{3.5D + 8l} \cdot \frac{D - 2.25d}{D}$ W—匝数 l, D, r 单位均为 m

注: 设导体与导体外面空间都是非铁磁媒质, 故都取其磁导率为  $\mu_0 = 0.4\pi \times 10^{-6} \text{H/m}$ 。



空心电抗器电感的计算

矩形和圆形空心电抗器如图 1—24 所示。

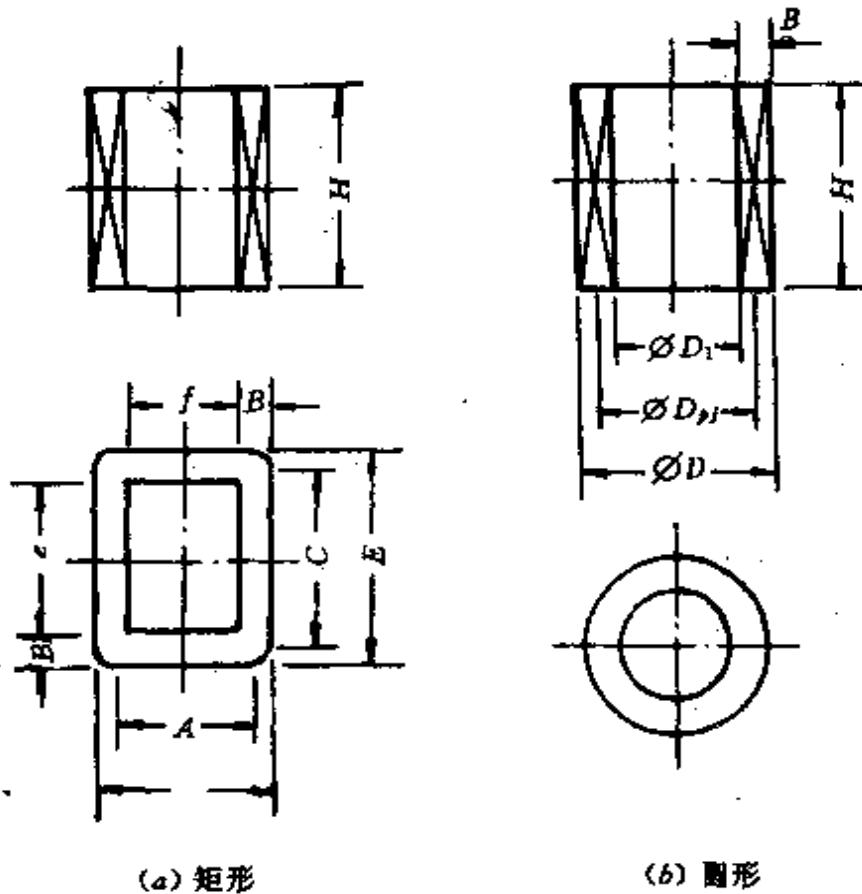


图 1—24 矩形和圆形空心电抗器

(1) 截面为矩形的矩形线圈电感：

$$L = 4W^2(A + C) \left[ \ln \frac{2AC}{H + B} - \frac{C}{A + C} \ln(C + \sqrt{A^2 + C^2}) \right. \\ \left. - \frac{A}{A + C} \ln(A + \sqrt{A^2 + C^2}) + \frac{2\sqrt{A^2 + C^2}}{A + C} - \frac{1}{2} \right. \\ \left. + 0.447 \frac{H + B}{A + C} \right] \times 10^{-4}$$

式中： $L$ —电感(mH)；

$A$ —线圈平均宽度(m)，

$$A = (W + f)/2;$$

$B$ —线圈厚度(m)，

$$B = (W - f)/2;$$

$C$ —线圈平均长度(m)，

$$C = (E + e)/2;$$

$H$ —线圈高(m)；

$M$ —线圈宽度(m)；

$E$ —线圈长度(m)；

$e$ —线圈内孔长(m)；

$f$ —线圈内孔宽(m)；

$W$ —线圈匝数(匝)。

(2) 截面为矩形的正方形线圈电感：

$$L = 8W^2C \left( \ln \frac{C}{H + B} + 0.2235 \frac{H + B}{C} + 0.726 \right) \times 10^{-4}$$

式中：符号同前。

(3) 截面为矩形的圆形线圈电感：

$$L = \frac{7.85W^2D_{pj}^2}{3D_{pj} + 9H + 10B} \times 10^{-3}$$

空心电抗器圆形线圈最佳尺寸比，在导线面积一定的条件下， $H/D_{pj} = 0.345$ ， $B/D_{pj} = 0.335$ 时重量最轻。

## 二、电容计算

介质的电介系数

$$\epsilon = \epsilon_0 \epsilon_r$$

式中： $\epsilon$ —介质的介电系数又称电容率(F/m)；

$\epsilon_0$ —真空的介电系数， $\epsilon_0 = 8.85 \times 10^{-12} \text{F/m}$ ；

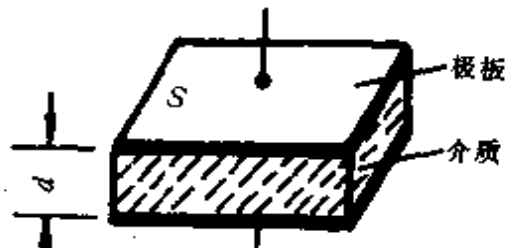
$\epsilon_r$ —相对介电系数，是个纯数，见 1—22。

表 1—22 几种材料的相对介电系数  $\epsilon_r$

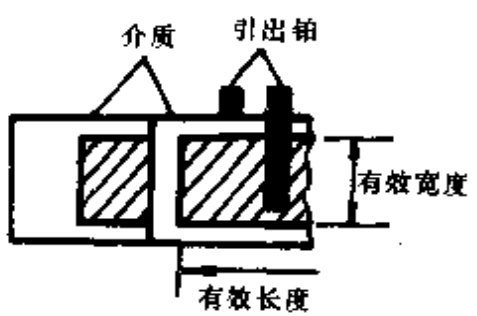
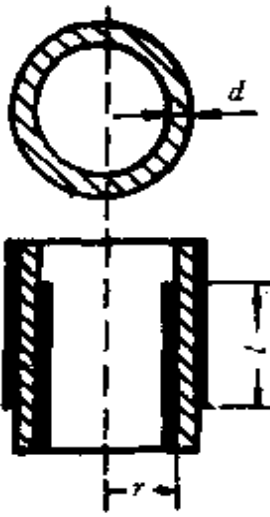
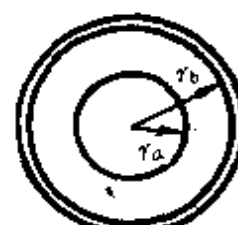
材料	空气	聚苯乙烯	改性聚苯乙烯 (204)	聚四氟乙烯	聚丙烯
$\epsilon_r$	约 1.0	2.5	3.12	2.1	2.2
材料	聚酯(涤纶)	聚碳酸酯	聚矾	聚酰亚胺	聚苯醚
$\epsilon_r$	3.1	3.0	3.1	3.4	2.58
材料	尼龙 66 (增强)	高频酚醛塑料 (塑 14—6)	酚醛玻璃 纤维塑料 (FQBD—12)	氧化铝	氧化钽
$\epsilon_r$	4.0 ~ 4.6	7	8	10	27

几种典型电容的计算见表 1—23。

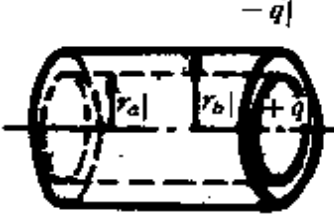

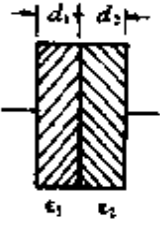
表 1—23 几种典型电容的计算公式

结构形式	电容量(F)
<p>平板电容(略去其边缘效应的影响)</p>  <p>The diagram shows a 3D perspective of a parallel plate capacitor. Two rectangular plates are shown, one on top and one on bottom, separated by a dielectric material. The top plate is labeled '极板' (electrode plate) and has an area 'S'. The dielectric is labeled '介质' (dielectric) and has a thickness 'd'. The bottom plate is also labeled '极板'.</p>	$C = \frac{\epsilon S}{d}$ <p><math>\epsilon</math>—介质的介电系数(H/m)，下同  <math>S</math>—电极有效面积(<math>\text{m}^2</math>)  <math>d</math>—介质厚度(m)</p>

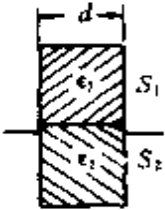
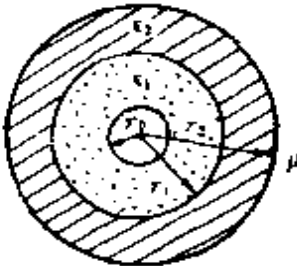
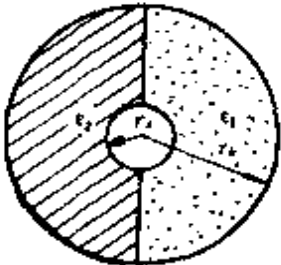
(续表)

结构形式	电容量(F)
<p style="text-align: center;">卷绕型电容</p> 	$C = \frac{2\epsilon S}{d}$ <p><math>S</math>— 电极(铝箔)有效面积(m<sup>2</sup>)  <math>d</math>— 元件极间介质厚度(m)</p>
<p style="text-align: center;">圆管型电容</p> 	$C = \frac{2\pi\epsilon l}{\ln(1 + \frac{d}{r})}$ <p><math>l</math>— 电极有效长度(m)  <math>d</math>— 介质厚度  <math>r</math>— 圆管内半径,与 <math>d</math> 同单位</p>
<p style="text-align: center;">球形电容</p> 	$C = \frac{4\pi\epsilon r_a r_b}{r_b - r_a}$ <p>若 <math>r_b \rightarrow \infty</math>, 则半径为 <math>r_a</math> 的孤立导体球的电容为</p> $C = 4\pi\epsilon r_a$ <p><math>r_a, r_b</math>— 内球外表面与外球内表面的半径(m)</p>

(续表)

结构形式	电容量(F)
<p>圆柱形电容(或单芯电缆电容)</p> 	$C = \frac{2\pi\epsilon l}{\ln \frac{r_b}{r_a}}$ <p><math>l</math>— 电容器(或电缆)长度(m)  <math>r_a, r_b</math>— 内柱外表面与外柱内表面的半径(或缆心半径与外甲(铅皮)半径),同单位</p>
<p>二平行导线段的电容</p> 	$C = \frac{\pi\epsilon l}{\ln \frac{D}{r}}$ <p><math>\epsilon</math>— 导体周围的介电系数(H/m)  <math>l</math>— 导线长度(m)  <math>D</math>— 导线间距离(m)  <math>r</math>— 导线半径(m)                      条件: <math>r \ll D</math></p>
<p>平板电容器串联</p> 	$C = \frac{1}{\frac{d_1}{\epsilon_1 S} + \frac{d_2}{\epsilon_2 S}} = \frac{\epsilon_1 \epsilon_2 S}{\epsilon_2 d_1 + \epsilon_1 d_2}$ <p><math>d_1, d_2</math>— 介质1和介质2的厚度(m)  <math>\epsilon_1, \epsilon_2</math>— 介质1和介质2的介电系数(H/m)  <math>S</math>— 电极有效面积(m<sup>2</sup>)</p>

(续表)

结构形式	电容量(F)
<p>平板电容器并联</p> 	$C = \frac{\epsilon_1 S_1 + \epsilon_2 S_2}{d}$ <p><math>S_1, S_2</math>—介质 1 和介质 2 的电极有效面积(<math>m^2</math>)  <math>d</math>—介质厚度(m)</p>
<p>同轴圆柱电容器串联</p> 	$C = \frac{2\pi\epsilon_1\epsilon_2 l}{\epsilon_2 \ln \frac{r_1}{r_0} + \epsilon_1 \ln \frac{r_2}{r_1}}$ <p><math>l</math>—电容器长度(m)</p>
<p>同轴圆柱电容器并联</p> 	$C = \frac{\pi l(\epsilon_1 + \epsilon_2)}{\ln \frac{r_b}{r_a}}$ <p><math>l</math>—电容器长度(m)</p>

---

## 第二章 输 配 电

### 第一节 电路参数计算

#### 一、导线、电缆的电阻、电抗和电容的计算

##### 1. 导线(电缆)的电阻计算

每千米长导线(电缆)的交流电阻  $R_0$  按下式计算:

$$R_0 = \rho / S$$

式中:  $R_0$  —— 导线(电缆)的交流电阻( $\Omega/\text{km}$ );

$S$  —— 导线标称截面( $\text{mm}^2$ );

$\rho$  —— 导线材料的电阻率( $\Omega \cdot \text{mm}^2/\text{km}$ )。

##### 温度与电阻的关系

导线温度发生变化时,其电阻值也要变化,温度与电阻的关系如下:

$$R_t = R_{20} [1 + a_{20}(t - 20)]$$

式中:  $R_t$  —— 温度  $t^\circ\text{C}$  时的电阻( $\Omega/\text{km}$ );

$R_{20}$  —— 温度为  $20^\circ\text{C}$  时的电阻( $\Omega/\text{km}$ );

$a_{20}$  —— 电阻的温度系数( $1/^\circ\text{C}$ )。

常用导电金属线在  $20^\circ\text{C}$  时的电阻率、导电率和电阻温度系数,见表 2—1。

导电金属线电阻率、导电率  
和电阻温度系数

表 2-1

线 材	$\rho_{20} (\Omega \cdot \text{mm}^2/\text{km})$	$\gamma_{20} (\text{km}/\Omega \cdot \text{mm}^2)$	$\alpha_{20} (1/^\circ\text{C})$
硬铝线	29.0	0.034	0.00403
软铝线	28.3	0.035	0.00410
铝合金线	32.8	0.031	0.00422
硬铜线	17.9	0.056	0.00385
软铜线	17.6	0.057	0.00393

各类电缆的电阻率和导电率如下:铜芯  $\rho_{20} = 18.4 \Omega \cdot \text{mm}^2/\text{km}$ ,  $\gamma_{20} = 0.054 \text{ km}/\Omega \cdot \text{mm}^2$ ; 铝芯  $\rho_{20} = 31.0 \Omega \cdot \text{mm}^2/\text{km}$ ,  $\gamma_{20} = 0.032 \text{ km}/\Omega \cdot \text{mm}^2$ 。

实际运行的导线,其电阻值决定于环境温度和负荷电流的大小,若要较准确地求得实际运行导线的电阻值,可按下式计算:

$$R_t = R_{20} \left[ 1 + 0.04(t - 20) + 0.004(t_{ux} - 20) \left( \frac{I_j}{KI_{ux25}} \right)^2 \right]$$

$$K = \sqrt{\frac{t_{ux20}}{t_{ux25}}}, I_j = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n I_i^2}, I_i = \frac{I_{Ai} + I_{Ki} + I_{Ci}}{3}$$

$$n = \frac{I_m}{\Delta I}$$

- 式中:  $R_t$ ——任一温度下每千米长导线实际交流电阻 ( $\Omega/\text{km}$ );  
 $R_{20}$ ——环境温度为  $20^\circ\text{C}$  时,每千米长的电阻值 ( $\Omega/\text{km}$ );  
 $t$ —— $T_j$  时间内的平均环境温度 ( $^\circ\text{C}$ );  
 $t_{ux}$ ——导线最高允许温度 ( $^\circ\text{C}$ ),见表 2-2;



$K$ —— 温度换算系数，

$I_{\text{许}25}$ —— 环境温度为 25℃ 时，导线的允许载流量(A)，见附录 8 ~ 附录 17；

$I_j$ —— 配线电流在一个变化周期内的均方根值(A)；

$I_i$ —— 时间  $t_i$  时线路中电流有效值(A)，三相线路为三个线电流的平均值；

$n$ —— 测量次数；

$T_m$ —— 正常负荷下线路的实际运行时间(h)；

$\Delta t$ —— 二次测量时间间隔(h)，应根据线路所接负荷的工作性质特点来确定，一般  $\Delta t$  不应大于半小时。

表 2—2 导线最高允许温度

裸导线 $t_{\text{许}}$	+ 70℃		
绝缘导线 $t_{\text{许}}$	+ 65℃		
电 缆 $t_{\text{许}}$	1 ~ 3kV	6kV	10kV
	+ 80℃	+ 65℃	+ 60℃

## 2. 架空线路的电感计算

(1) 单相二线制及三相三线制：

$$L = 0.4605 \lg \frac{D_j}{r} + 0.05 \mu$$

$$D_j = \sqrt[3]{D_{AB} D_{BC} D_{CA}}$$

式中： $L$ —— 每根相线的电感(mH/km)；

$D_j$ —— 导线间的几何均距(cm)；

$r$ —— 导线的半径(cm)；

$\mu$ —— 导线的磁导率(H/m)；

$D_{AB}, D_{BC}, D_{CA}$ ——各相线间的中心距离(cm)。

(2) 三相四线制:

$$L = 0.4605 \lg \frac{D_j}{r} + 0.05 \mu$$

$$L_N = 0.4605 \lg \frac{D_N}{r_N}$$

$$D_N = \sqrt[3]{D_{AN} D_{BN} D_{CN}}$$

式中:  $L_N$ ——中性线的电感(mH/km);

$D_N$ ——三相四线制时相线与中性间的几何均距(cm);

$r_N$ ——中性线的半径(cm);

$D_{AN}, D_{BN}, D_{CN}$ ——各相线对中性线间的中心距离(cm);

其它符号同前。

(3) 分裂导线的电感: 分裂导线的电感比单根导线电感约小 20 ~ 30%, 可用下式计算:

$$L = 0.4605 \lg \frac{D_j}{r^{\frac{1}{n}} \cdot d^{\frac{n-1}{n}}} + 0.05 \frac{\mu}{n}$$

式中:  $D_j$ ——线间的几何均距(cm);

$n$ ——每相分裂导线的根数;

$d$ ——分裂导线的间距(cm);

其它符号同前。

### 3. 架空线路的电容计算

(1) 单相二线制及三相四线制:

$$C_N = \frac{0.02413}{\lg \frac{D_j}{r}}$$

式中:  $C_N$ ——每相导线对中性点的工作电容( $\mu\text{F}/\text{km}$ );

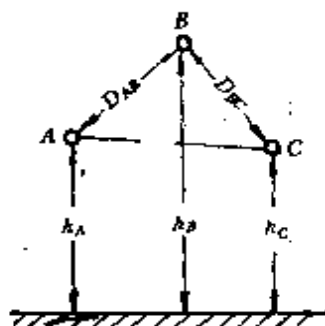
其它符号同前。

(2) 三相三线制如图 2—1 所示。

$$C = \frac{0.02413}{\lg \frac{D_j}{r}}, C_e = \frac{0.02413}{\lg \frac{8h_j^3}{rD_j^2}}$$

$$C_m = \frac{0.02413 \lg \frac{2h_j}{D_j}}{2 \lg \frac{D_j}{r} \cdot \lg \frac{8h_j^3}{rD_j^2}}$$

$$h_j = \sqrt[3]{h_A h_B h_C}$$



式中： $C$ 、 $C_e$ 、 $C_m$ ——工作电容、对地电容和线间电容(互电容)( $\mu\text{F}/\text{km}$ )；

图 2—1. 三相三线制

$h_j$ ——导线对地的几何均距(cm)；

$h_A$ 、 $h_B$ 、 $h_C$ ——各相导线距地高度(cm)。

其它符号同前。

(3) 分裂导线的工作电容：分裂导线的工作电容比单根导线的工作电容约增加 20 ~ 30%，可用下式计算：

$$C = \frac{0.02413}{\lg \frac{D_j}{r^{\frac{1}{n}} \cdot d^{\frac{n-1}{n}}}}$$

式中：符号同前。

在计算配电线路的电压降、功率损耗等值时，可以忽略电容的影响，但在分析地线事故时，必须考虑电容。

#### 4. 电缆电阻的精确计算

电缆的直流标准电阻可按下式计算：

$$R_{20} = \rho_{20} \frac{(1 + K_1)(1 + K_2)}{\frac{\pi}{4} d^2 \cdot n} \times 10^3$$

式中： $R_{20}$ ——电缆在 20℃ 时的直流标准电阻( $\Omega/\text{km}$ )；

$\rho_{20}$ ——导线的电阻率(20℃ 时)( $\Omega \cdot \text{mm}^2/\text{km}$ )；

$d$ ——每根芯线的直径(mm)；

$n$ ——芯线数。

$K_1$ ——芯线扭绞率,约 0.02 ~ 0.03;

$K_2$ ——多芯电缆时的扭绞率,约 0.01 ~ 0.02。

任一温度下每千米长电缆实际交流电阻为

$$R_t = R_{20}(1 + \alpha_t)(1 + K_3)$$

式中: $\alpha_t$ ——电阻在  $t^\circ\text{C}$  时的温度系数, $\alpha_t = \alpha_{20}(t - 20)$ ,

$\alpha_{20}$  为电阻温度系数( $20^\circ\text{C}$  时)( $1/^\circ\text{C}$ ),见表 2—1;

$K_3$ ——计及集肤效应及邻近效应的系数,截面为  $250\text{mm}^2$  以下时为 0.01;  $1000\text{mm}^2$  时为 0.23 ~ 0.26。

### 5. 电缆电感的计算

(1) 配电网地下电缆,当导体截面为圆形时,且忽略铠装及铅包损失时,每根缆芯的电感计算方法与架空导线相同。

(2) 导线截面为扇形或半圆形,则芯线间的距离应按下式计算:

$$D = 1.68r + b$$

式中: $D$ ——芯线间的距离(cm);

$r$ ——与扇形或半圆形芯线截面积相同的圆形芯线的半径(cm);

$b$ ——芯线间绝缘层厚度(cm)。

### 6. 电缆电容的计算

(1) 单芯铠装纸介电缆(地埋):

$$C = \frac{0.2413\epsilon_s}{\lg \frac{2D}{r}}$$

(2) 多芯铠装纸介电缆(地埋):

$$C = \frac{0.056N\epsilon_s}{G}$$

式中: $C$ ——电缆的电容( $\mu\text{F}/\text{km}$ );

$\epsilon_s$ ——相对介电系数(标准为 3.5 ~ 3.7);

$D$ ——绝缘体外径(cm)；

$N$ ——多芯电缆的芯数；

$r$ ——芯线外径(cm)；

$G$ ——形状系数。

形状系数  $G$  的求法：

① 对于圆形芯线，可直接从图 2—2 中求得。图中  $G_1$ 、 $G_2$  是表 2—3 所示芯线连接方式下的计算电容时的  $G$  值。

② 对于扇形芯线，可用等效半径  $r$  ( $r = \sqrt{\text{标称截面积}/\pi}$ )，由图 2—2 查出  $G_1$  或  $G_2$  值后，还须乘以扇形修正系数  $m$  见表 2—4。

表 2—3  $G$  的选取

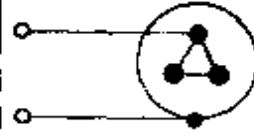

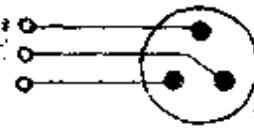
$G$	说 明	图
$G_1$	(三芯电缆) 三芯连在一起与铅包之间的形状系数	
$G_1$	(双芯电缆) 两芯连在一起与铅包之间的形状系数	
$G_2$	(三芯电缆) 施加三相电压时，其中一芯对中性点的形状系数	

表 2—4 扇形修正系数  $m$

$\frac{T+b}{2r}$	0.1	0.15	0.20	0.25	0.30	0.35	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8
$m$	0.72	0.77	0.81	0.84	0.85	0.86	0.87	0.88	0.88	0.88	0.88

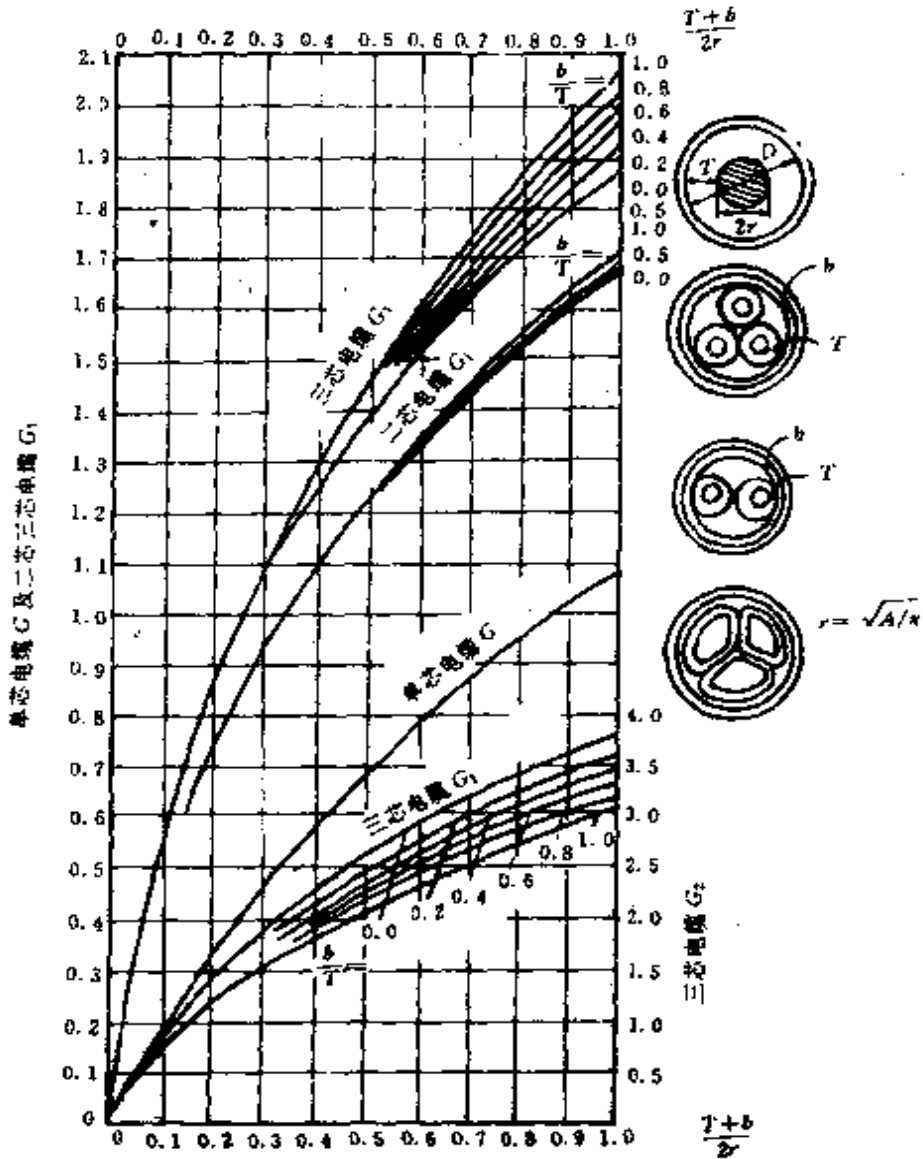


图 2—2 求形状系数 G 的曲线

$r$ ——芯线的半径(cm)  $D$ ——绝缘层外径(cm)  $T$ ——芯线绝缘层厚度(cm)  $b$ ——带绝缘层的厚度(cm)

电缆电容量的简单测算,见本章第六节十二项。

电缆电容的大致值如下:20kV 单芯为  $0.24 \sim 0.53 \mu\text{F}/\text{km}$ ;

60kV OF 电缆单芯为  $0.4 \sim 0.8\mu\text{F}/\text{km}$ ；三芯为  $0.24 \sim 0.4\mu\text{F}/\text{km}$ ；110kV 以上  $200\text{mm}^2$  级的为  $0.2\mu\text{F}/\text{km}$ ， $800\text{mm}^2$  级单芯为  $0.5\mu\text{F}/\text{km}$  左右。

### 7. 三相导线(电缆)的电抗计算

为了便于计算，根据导线间的几何均距，由表 2—5 ~ 表 2—8 可查得架空导线每千米的电抗值  $x_0$ 。

电缆的电抗值通常由制造厂提供，当缺乏该项技术数据时，可采用下列数据进行估计： $1\text{kV}$  电缆， $x_0 = 0.06\Omega/\text{km}$ ； $6 \sim 10\text{kV}$  电缆， $x_0 = 0.08\Omega/\text{km}$ ； $35\text{kV}$  电缆， $x_0 = 0.12\Omega/\text{km}$ 。

## 二、常用导线、电缆的电阻和电抗

常用导线、电缆的电阻( $20^\circ\text{C}$  时)和电抗见表 2—5 ~ 表 2—9。 $65 \sim 80^\circ\text{C}$  时的导线、电缆的电阻见附录 1 ~ 附录 6。

母线的电抗按下式计算(图 2—3)：

$$x_0 = 2\pi f \left( 4.6 \lg \frac{2\pi D_j + h}{\pi b + 2h} + 0.6 \right) \times 10^{-4}$$

当  $f = 50\text{Hz}$  时，可简化为

$$x_0 = 0.1445 \lg \frac{2\pi D_j + h}{\pi b + 2h} + 0.01884$$

式中： $x_0$ ——母线的电抗( $\Omega/\text{km}$ )；

$D_j$ ——几何均距(mm)， $D_j = \sqrt[3]{D_{AB}D_{BC}D_{CA}}$ ；

$h, b$ ——母线的宽和厚(mm)。

表 2—5 TJ 型裸铜导线的电阻和电抗

导线型号	TJ-10	TJ-16	TJ-25	TJ-35	TJ-50	TJ-70	TJ-95	TJ-120	TJ-150	TJ-185	TJ-240
电 阻 ( $\Omega/\text{km}$ )	1.84	1.20	0.74	0.54	0.39	0.28	0.20	0.158	0.123	0.103	0.078
线间几何均距 (m)	电 抗 ( $\Omega/\text{km}$ )										
0.4	0.355	0.334	0.318	0.308	0.298	0.287	0.274	—	—	—	—
0.6	0.381	0.360	0.345	0.335	0.324	0.321	0.303	0.295	0.287	0.281	—
0.8	0.399	0.378	0.363	0.352	0.341	0.330	0.321	0.313	0.305	0.299	—
1.0	0.413	0.392	0.377	0.366	0.356	0.345	0.335	0.327	0.319	0.313	0.305
1.25	0.427	0.406	0.391	0.380	0.370	0.359	0.349	0.341	0.333	0.327	0.319
1.5	0.438	0.417	0.402	0.392	0.381	0.370	0.360	0.353	0.345	0.339	0.330
2.0	0.457	0.435	0.421	0.410	0.399	0.389	0.378	0.371	0.363	0.356	0.349
2.5	—	0.449	0.435	0.424	0.413	0.402	0.392	0.385	0.377	0.371	0.363
3.0	—	0.460	0.446	0.435	0.424	0.414	0.403	0.396	0.388	0.382	0.374
3.5	—	0.470	0.456	0.445	0.434	0.423	0.413	0.406	0.398	0.392	0.384



表 2—6 LJ 型裸铝导线的电阻和电抗

导线型号	LJ-16	LJ-25	LJ-35	LJ-50	LJ-70	LJ-95	LJ-120	LJ-150	LJ-185	LJ-240
电 阻 ( $\Omega/\text{km}$ )	1.98	1.28	0.92	0.64	0.46	0.34	0.27	0.21	0.17	0.132
电 抗 ( $\Omega/\text{km}$ )										
线间几何均距 (m)										
0.6	0.358	0.344	0.334	0.323	0.312	0.303	0.295	0.287	0.281	0.273
0.8	0.377	0.362	0.352	0.341	0.330	0.321	0.313	0.305	0.299	0.291
1.0	0.390	0.376	0.366	0.355	0.344	0.335	0.327	0.319	0.313	0.305
1.25	0.404	0.390	0.380	0.369	0.358	0.349	0.341	0.333	0.327	0.319
1.5	0.416	0.402	0.392	0.380	0.369	0.360	0.353	0.345	0.339	0.330
2.0	0.434	0.420	0.410	0.398	0.387	0.378	0.371	0.363	0.356	0.348
2.5	0.448	0.434	0.424	0.412	0.401	0.392	0.385	0.377	0.371	0.362
3.0	0.459	0.445	0.435	0.424	0.413	0.403	0.396	0.388	0.382	0.374
3.5	—	—	0.445	0.433	0.423	0.413	0.406	0.398	0.392	0.383

表 2—7 LGJ 型铜芯铝绞线的电阻和电抗

导线型号	LGJ -16	LGJ -25	LGJ -35	LGJ -50	LGJ -70	LGJ -95	LGJ -120	LGJ -150	LGJ -185	LGJ -240	LGJ -300	LGJ -400
电 阻 ( $\Omega/\text{km}$ )	2.04	1.38	0.85	0.65	0.46	0.33	0.27	0.21	0.17	0.132	0.107	0.082
线间几何均距 (m)	电 抗 ( $\Omega/\text{km}$ )											
1.0	0.387	0.374	0.359	0.351	—	—	—	—	—	—	—	—
1.25	0.401	0.388	0.373	0.365	—	—	—	—	—	—	—	—
1.5	0.412	0.400	0.385	0.376	0.365	0.354	0.347	0.340	—	—	—	—
2.0	0.430	0.418	0.403	0.394	0.383	0.372	0.365	0.358	—	—	—	—
2.5	0.444	0.432	0.417	0.408	0.397	0.386	0.379	0.372	0.365	0.357	—	—
3.0	0.456	0.443	0.428	0.420	0.409	0.398	0.391	0.384	0.377	0.369	—	—
3.5	0.466	0.453	0.438	0.429	0.418	0.406	0.400	0.394	0.386	0.378	0.371	0.362

表 2—8 户内明敷及穿管的铝、铜心绝缘导线的电阻和电抗

标称截面 (mm <sup>2</sup> )	铝 (Ω/km)			铜 (Ω/km)		
	电阻 $R_0(20^\circ\text{C})$	电 抗 $x_0$		电阻 $R_0(20^\circ\text{C})$	电 抗 $x_0$	
		明线间距 150mm	穿 管		明线间距 150mm	穿 管
1.5	—	—	—	12.27	—	0.109
2.5	12.40	0.337	0.102	7.36	0.337	0.102
4	7.75	0.318	0.095	4.60	0.318	0.095
6	5.17	0.309	0.09	3.07	0.309	0.09
10	3.10	0.286	0.073	1.84	0.286	0.073
16	1.94	0.271	0.068	1.15	0.271	0.068
25	1.24	0.257	0.066	0.75	0.257	0.066
35	0.88	0.246	0.064	0.53	0.246	0.064
50	0.62	0.235	0.063	0.37	0.235	0.063
70	0.44	0.224	0.061	0.26	0.224	0.081
95	0.33	0.215	0.06	0.19	0.215	0.06
120	0.26	0.208	0.06	0.15	0.208	0.06
150	0.20	0.201	0.059	0.12	0.201	0.059
185	0.17	0.194	0.059	0.10	0.194	0.059

表 2—9 电缆芯线单位长度电阻(20°C 时) ( $\Omega/\text{km}$ )

线芯标称截面( $\text{mm}^2$ )	铜芯电缆	铝芯电缆
16	1.15	1.94
25	0.74	1.24
35	0.53	0.89
50	0.37	0.62
70	0.26	0.44
95	0.19	0.33
120	0.15	0.26
150	0.12	0.21
180	0.10	0.17
240	0.08	0.13

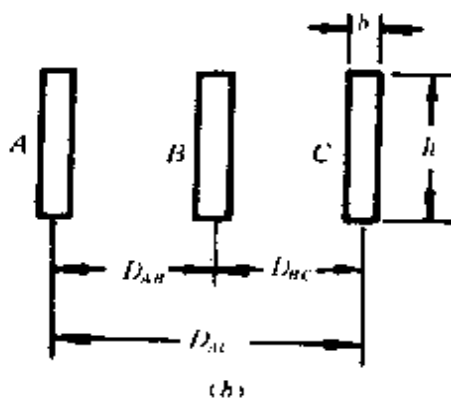
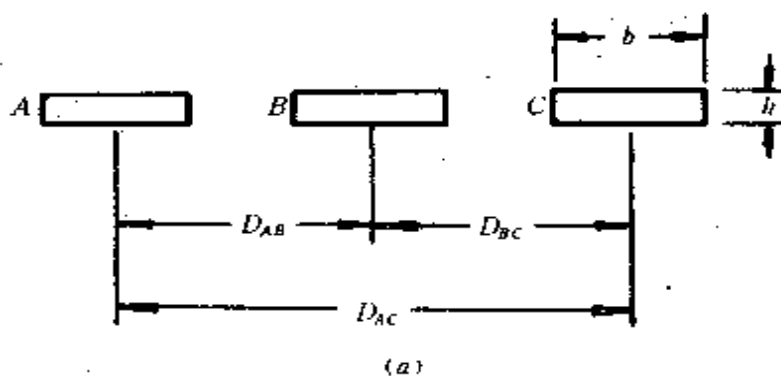


图 2—3 母线排列图

(a) 母线平放 (b) 母线竖放

母线阻抗的简易计算公式,见第六章第二节 1kV 及以下低压配电网中元件阻抗的计算。

## 第二节 线损和电压降计算

### 一、直流线路计算

#### 1. 集中负荷

(1) 电压损失:

$$\Delta U = \frac{2IL}{\gamma S}, \quad \Delta U\% = \frac{\Delta U}{U_e} \times 100.$$

式中: $\Delta U$ ——电压损失(V);

$\Delta U\%$ ——电压损失百分数;

$I$ ——线路末端负荷电流(A);

$L$ ——负荷至电源距离(km);

$\gamma$ ——导线电导率(km/ $\Omega \cdot \text{mm}^2$ );

$S$ ——导线截面( $\text{mm}^2$ );

$U_e$ ——线路额定电压(V)。

(2) 求导线截面公式:

$$S = \frac{2PL \times 10^5}{\gamma \Delta U\% \cdot U_e^2}$$

式中: $S$ ——导线截面积( $\text{mm}^2$ );

$P$ ——负荷功率(km);

其它符号同前。

例 2—1 已知直流额定电压为 110V,在距电源 50m 处有一个 4kW 的集中负荷,允许电压损失率为 5%,用铝导线敷设,求导线截面。

$$\begin{aligned} \text{解 } S &= \frac{2PL \times 10^5}{\gamma \Delta U\% \cdot U_e^2} = \frac{2 \times 4 \times 0.06 \times 10^5}{0.034 \times 5 \times 110^2} \\ &= 23.3(\text{mm}^2) \end{aligned}$$

因此,可选用标称截面为  $25\text{mm}^2$  的铝导线。

## 2. 分散负荷

设一分散负荷供电系统如图 2—4 所示,导线截面相同。

(1) 电压损失:

$$\begin{aligned} \Delta U &= \frac{2000}{\gamma S U_c} (P_1 L_1 + P_2 L_2 + P_3 L_3) \\ &= \frac{2}{\gamma S} (I_1 L_1 + I_2 L_2 + I_3 L_3) \end{aligned}$$

式中:  $\Delta U$ ——电压损失(V);

$P_1, P_2, P_3$ ——分别为各点负荷功率(kW);

$I_1, I_2, I_3$ ——分别为各点负荷电流(A);

$L_1, L_2, L_3$ ——分别为由线路始端至各负荷点的距离(km);

其它符号同前。

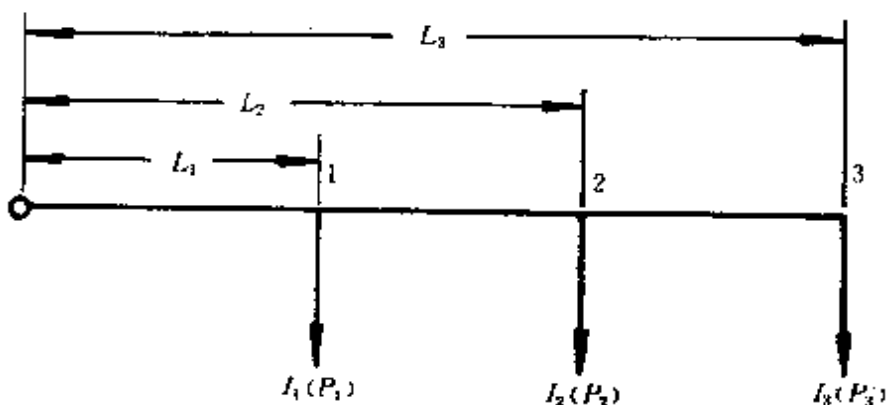


图 2—4 分散负荷供电系统

(2) 求导线截面公式:

$$\begin{aligned} S &= \frac{2 \times 10^5}{\gamma \Delta U \% \cdot U_c^2} (P_1 L_1 + P_2 L_2 + P_3 L_3) \\ &= \frac{200}{\gamma \Delta U \% \cdot U_c} (I_1 L_1 + I_2 L_2 + I_3 L_3) \end{aligned}$$

如果线路中导线的截面不同时,则须分开段落计算,每一段相同截面的导线计算一次。

## 二、配电线路损耗计算

配电线路损耗有功电量与输入有功电量之比,叫做配电线路损失率,简称线损率。一般大中型企业配电线路的线损率应在 1~3% 之间。

### 1. 负荷在末端的线路损耗计算

(1) 计算公式一:

$$\Delta P = m I_j^2 R \times 10^{-3}, \quad \Delta Q = m I_j^2 X \times 10^{-3}$$

式中:  $\Delta P$ ——有功功率损耗(kW);

$\Delta Q$ ——无功功率损耗(kVar);

$m$ ——线路相数;

$I_j$ ——线路中电流的均方根值(A),求法同本节集中负荷计算;

$R, X$ ——线路每相的电阻和电抗( $\Omega$ )。

(2) 计算公式二(三相交流电路):

$$\Delta P = \frac{P^2 + Q^2}{U_e^2} \cdot R \times 10^{-3} = \frac{P^2}{U_e^2 \cos^2 \varphi} \cdot R \times 10^{-3}$$

$$\Delta Q = \frac{P^2 + Q^2}{U_e^2} \cdot X \times 10^{-3} = \frac{P^2}{U_e^2 \cos^2 \varphi} \cdot X \times 10^{-3}$$

式中:  $P$ ——线路输送有功功率(kW);

$Q$ ——线路输送无功功率(kVar);

$U_e$ ——线路额定电压(kV);

$\cos \varphi$ ——负荷功率因数;

其它符号同前。

**例 2-2** 某 10kW 配电线路,采用 LJ—16 铝导线,长 200m,三相导线呈等边三角形排列,线间距离为 1m。在电平衡测试时间的 16h 内,线路电流均方根值为 20A,平均气温为 28°C,试求该线路损耗电量。

**解** 由表 2-6 查得,  $R_{20} = 1.98 \Omega/\text{km}$ ,  $x_0 = 0.39 \Omega/\text{km}$ 。由表 2-2 可知,  $t_{avr} = 70^\circ\text{C}$ 。故温度换算系数为

$$K = \sqrt{\frac{70 - 20}{70 - 25}} = 1.05$$

由附录 8 查得, LJ-16 导线允许载流量为  $I_{ur25} = 105\text{A}$ , 故电平衡测试时间内线路实际运行电阻为

$$\begin{aligned} R &= R_0 L = R_{20} L [1 + 0.004(t - 20) \\ &\quad + 0.004(t_{ur} - 20) \left( \frac{I_j}{KI_{ur25}} \right)^2] \\ &= 1.98 \times 0.2 \times [1 + 0.004 \times (28 - 20) \\ &\quad + 0.004 \times (70 - 20) \left( \frac{20}{1.05 \times 105} \right)^2] \\ &= 0.41(\Omega) \end{aligned}$$

损耗有功电量和无功电量为

$$\begin{aligned} \Delta A_p &= 3I_j^2 R \times 10^{-3} \cdot T_j = 3 \times 20^2 \times 0.41 \times 10^{-3} \times 16 \\ &= 7.9(\text{kWh}) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \Delta A_Q &= 3I_j^2 X \times 10^{-3} \cdot T_j \\ &= 3 \times 20^2 \times 0.39 \times 0.2 \times 10^{-3} \times 16 \\ &= 1.5(\text{kVar}) \end{aligned}$$

## 2. 具有分支线路线损的近似计算

具有分支线路线损的计算比较复杂, 工厂配电线路线损采用近似计算时, 可以近似地认为各支路负荷的功率因数相等。这样一来, 各支路电流就能简单地用代数相加来进行计算。

**例 2—3** 已知如图 2—5 所示的配电线路, 各段线路的电阻、电抗、各支路电流(均方根值)及负荷功率因数如下:

$$I_1 = 60\text{A}, I_2 = 80\text{A}, I_3 = 20\text{A}$$

$$\cos\varphi_1 = 0.7, \cos\varphi_2 = 0.8, \cos\varphi_3 = 0.5$$

$$R_1 = 0.5\Omega, R_2 = 0.3\Omega, R_3 = 0.2\Omega$$

$$X_1 = 0.3\Omega, X_2 = 0.2\Omega, X_3 = 0.1\Omega$$

求线路 03 的有功功率损耗和无功功率损耗。



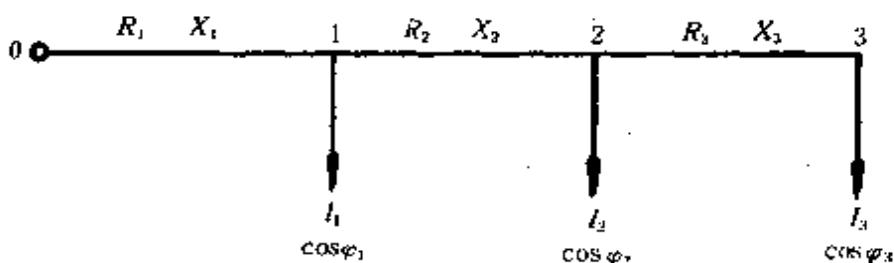


图 2—5 多支线路

解 近似计算时,可以为各支路负荷的功率因数相等。各段线路中的电流值为

$$I_{23} = I_3 = 20(\text{A})$$

$$I_{21} = I_2 + I_3 = 80 + 20 = 100(\text{A})$$

$$I_{01} = I_1 + I_2 + I_3 = 120(\text{A})$$

线路 23 的功率损耗为

$$\begin{aligned} \Delta P_{23} &= 3I_{23}^2 R_3 \times 10^{-3} = 3 \times 20^2 \times 0.2 \times 10^{-3} \\ &= 0.24(\text{kW}) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \Delta Q_{23} &= 3I_{23}^2 X_3 \times 10^{-3} = 3 \times 20^2 \times 0.1 \times 10^{-3} \\ &= 0.12(\text{kVar}) \end{aligned}$$

线路 12 的功率损耗为

$$\Delta P_{12} = 3 \times 100^2 \times 0.3 \times 10^{-3} = 9(\text{kW})$$

$$\Delta Q_{12} = 3 \times 100^2 \times 0.2 \times 10^{-3} = 6(\text{kVar})$$

线路 01 的功率损耗为

$$\Delta P_{01} = 3 \times 120^2 \times 0.5 \times 10^{-3} = 21.6(\text{kW})$$

$$\Delta Q_{01} = 3 \times 120^2 \times 0.3 \times 10^{-3} = 12.96(\text{kVar})$$

因此,线路 03 的功率损耗为

$$\begin{aligned} \Delta P_{03} &= \Delta P_{01} + \Delta P_{12} + \Delta P_{23} = 21.6 + 9 + 0.24 \\ &= 30.84(\text{kW}) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \Delta Q_{03} &= \Delta Q_{01} + \Delta Q_{12} + \Delta Q_{23} = 12.96 + 6 + 0.12 \\ &= 19.08(\text{kVar}) \end{aligned}$$

### 3. 电力电缆损耗计算

电力电缆损耗计算一般需考虑集肤效应和邻近效应的影响。

电缆有功损耗按下式计算：

$$\Delta P = 3I^2R(1 + K_{jf} + K_{ej}) \times 10^{-3}$$

式中： $I$ —— 电缆电流(A)；

$R$ —— 每条电缆芯线的电阻( $\Omega$ )；

$K_{jf}$ —— 集肤效应系数，架空线  $K_{jf} = 0$ ；

$K_{ej}$ —— 邻近效应系数，架空线  $K_{ej} = 0$ 。

电缆截面(mm <sup>2</sup> )	240	185	150	120	95
$1 + K_{jf} + K_{ej}$	1.028	1.019	1.013	1.009	1.006

### 4. 从负荷曲线上求线损

负荷曲线的制作，见第二十一章八项。

设有如图 2—6 所示的两种日负荷曲线(三相交流供电)，试求它们的线损。

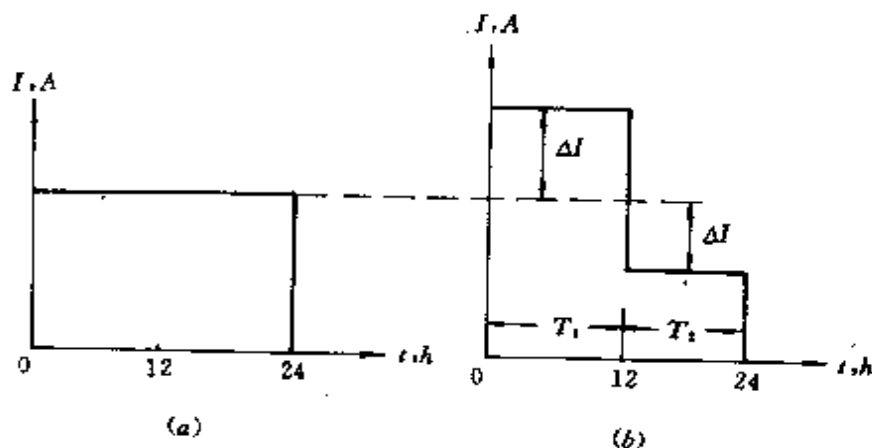


图 2—6 日负荷曲线

计算方法如下：

(1) 对于(a) 负荷曲线，由于负荷电流是不变的，故线路日电能损耗为

$$\Delta A = 3I^2R \times 24 \times 10^{-3}$$

(2) 对于(b) 负荷曲线,由于负荷电流是变化的,故线路日用能损耗为

$$\begin{aligned} \Delta A &= 3[(I + \Delta I)^2T_1 + (I - \Delta I)^2T_2]R \times 10^{-3} \\ &= 3(I^2 + \Delta I^2)R \times 24 \times 10^{-3} \end{aligned}$$

(3) 对于负荷电流变化的情况,线路年电能损耗可按下式计算:

$$\Delta A = 3I_j^2RT$$

式中: $T$ ——全年实际运行小时数,一般可取 8760h;

$I_j$ ——线路的年均方根电流(A),

$$I_j = I_j' \sqrt{\frac{\beta_1^2 T_1 + \beta_2^2 T_2 + \beta_3^2 T_3}{T}}$$

$I_j'$ ——最大负荷班次的均方根电流(A),实际计算时可用(1.05 ~ 1.1)倍的平均电流来代替;

$T_1$ 、 $T_2$ 、 $T_3$ ——分别为三班的年工作小时数;

$\beta_1$ 、 $\beta_2$ 、 $\beta_3$ ——分别为三班的平均负荷率, $\beta$ 值可由下列式确定: $\beta = P_{pj}/P_{pj}'$ ;  $P_{pj}$  为某班的平均负荷;  
 $P_{pj}'$  为最大负荷班次的平均负荷。

$P_{pj}$  和  $P_{pj}'$  可以从工厂用电的负荷曲线中求得。

### 5. 实测法测算线路损耗

上述方法为理论计算法,得到的配电线路损耗是理论值,而不是实际值。它只能对配电线路的布局、运行方式、载流量等因素的合理性提供参考,而对配电线路可能存在的接头松动、接触电阻过大等故障则不能反映。为此,产生了实测法。实测法通常有以下几种:

(1) 实测电压法:该方法较适用于电压损失较大,且中间无分支的低压配线路。在同一时刻  $t$  测出线路首端和末端的线电

压和功率因数,以及线路电流,则该线路的相电压降为

$$\begin{aligned} \Delta U &= \left( \frac{U_1}{\sqrt{3}} \cos \varphi_1 - \frac{U_2}{\sqrt{3}} \cos \varphi_2 \right) \times 10^3 \\ &\quad + j \left( \frac{U_1}{\sqrt{3}} \sin \varphi_1 - \frac{U_2}{\sqrt{3}} \sin \varphi_2 \right) \times 10^3 \\ &= \Delta U_R + j \Delta U_X \end{aligned}$$

式中: $\Delta U$ ——线路相电压降(V);

$U_1, U_2$ ——时间  $t$  时线路首端和末端线电压有效值(kV);

$\cos \varphi_1$ ——时间  $t$  时线路首端的功率因数;

$\cos \varphi_2$ ——时间  $t$  时线路末端的功率因数;

$\Delta U_R, \Delta U_X$ ——时间  $t$  时线路每相电阻压降和电抗压降(V)。

所以,线路每相电阻和电抗分别为

$$R = \Delta U_R / I, \quad X = \Delta U_X / I$$

式中: $R$ ——线路相电阻( $\Omega$ );

$X$ ——线路相电抗( $\Omega$ );

$I$ ——时间  $t$  时线路中电流有效值(A)。

设电平衡测试时间内线路运行了  $T_j$  小时,则

$$\Delta A_p = 3I_j^2 R \times 10^{-3} \cdot T_j = 3I_j^2 \frac{\Delta U_R}{I} \times 10^{-3} \cdot T_j$$

$$\Delta A_Q = 3I_j^2 X \times 10^{-3} \cdot T_j = 3I_j^2 \frac{\Delta U_X}{I} \times 10^{-3} \cdot T_j$$

式中: $\Delta A_p$ ——损耗有功电量(kWh);

$\Delta A_Q$ ——损耗无功电量(kVar);

$I_j$ ——线路中电流变化一个周期  $T_M$  时间内的均方根值(A)。

工厂配电线路,其电抗很小,对功率因数的影响很难通过线路首端和末端功率因数表读数之差反映出来,而且线路的电抗取决于导线材料和导线间的几何均距,其大小基本稳定。所以,

通常采用实测电压法时,只测量线路首端和末端的电压和线路中的电流,而不测功率因数。此时,每相线路电阻上的电压降为

$$\Delta U_R = \sqrt{\Delta U^2 - \Delta U_X^2} = \sqrt{[(U_1 - U_2) \times 10^3]^2 - I^2 X^2}$$

由于  $X = x_0 L$ ,  $x_0$  可采用查表法或计算法得到。于是可求得每相线路电阻为

$$R = \Delta U_R / I$$

**例 2—4** 一条负荷平衡的三相三线配电线路,已知线间几何均距为 0.6m,长度为 200m,导线采用 LJ—150mm<sup>2</sup>;某一时刻实测线路始末端的线电压分别为 400V 和 380V,在电平衡的 8h 内测算出线路的电流平均值为 100A,试求在电平衡时间内该线路损耗的电能。

**解** 查表 2—6 得  $x_0 = 0.287\Omega/\text{km}$

该线路每相线路电抗为

$$X = x_0 L = 0.287 \times 0.2 = 0.0574(\Omega)$$

每相线路电阻上的电压降为

$$\begin{aligned} \Delta U_R &= \sqrt{[(U_1 - U_2) \times 10^3]^2 - I^2 X^2} \\ &= \sqrt{[(0.4 - 0.38) \times 10^3]^2 - 100^2 \times 0.0574^2} \\ &= \sqrt{400 - 32.94} = 19.2(\text{V}) \end{aligned}$$

每相线路电阻为

$$R = \Delta U_R / I = 19.2 / 100 = 0.192(\Omega)$$

故有功损耗电量为

$$\begin{aligned} \Delta A_p &= 3I^2 R \times 10^{-3} T_j = 3 \times 100^2 \times 0.192 \times 10^{-3} \times 8 \\ &= 46.1(\text{kWh}) \end{aligned}$$

无功损耗电量为

$$\Delta A_Q = 3I^2 X \times 10^{-3} T_j = 3 \times 100^2 \times 0.0574 \times 10^{-3} \times 8$$

$$= 13.8(\text{kVarh})$$

说明：若直接查表 2—6 得  $R = R_3 L = 0.21 \times 0.2 = 0.042(\Omega)$ ，显然比用上法求得的电阻  $0.192\Omega$  小。这是由于查表 2—6 时是假定导线是无接头或接头电阻极小，而实际上线路可能有接头等，使连接处的接触电阻较大引起的。这也是用实测法计算线路损耗的优越性，从而也可判断出线路有无接触电阻过大的问题。

(2) 实测功率法：该方法适用于负荷较稳定，且中间无分支的低压线路。

利用 D53 多用表，在某一时刻  $t$  同时测得三相线路首端和末端的有功功率和线路中的电流，则

$$\Delta P = P_1 - P_2$$

式中： $\Delta P$ ——线路损耗有功功率(kW)；

$P_1, P_2$ ——时间  $t$  时线路首端和末端的有功功率(kW)。

线路每相电阻

$$R = \frac{\Delta P}{3I^2}(\Omega)$$

电平衡测试时间内，线路损耗有功电量

$$\Delta A_P = 3I_j^2 R \times 10^{-3} \cdot T_j = I_j^2 \frac{\Delta P}{I^2} \cdot T_j$$

式中： $\Delta A_P$ ——线路损耗有功电量(kWh)。

线路电抗可采用查表法或计算法得到；无功功率损耗采用计算法求得。

(3) 实测电量法：对于具有分支或负荷波动较大的线路，可以考虑采用电度表进行测量。在线路的首端和各支路末端分别装设有功电度表  $A_{P1}, A_{P2}, A_{P3}, A_{P4}$  和无功电度表  $A_{Q1}, A_{Q2}, A_{Q3}, A_{Q4}$  (图 2—7)。在一定时间间隔  $T_j$  内，记录下各电度表的读数，并计算出实际电量，则该部分线路损耗的有功电量和无功电量分别为



图 2—7 实测电量法

$$\Delta A_P = A_{P1} - (A_{P2} + A_{P3} + A_{P4})$$

$$\Delta A_Q = A_{Q1} - (A_{Q2} + A_{Q3} + A_{Q4})$$

该部分线路平均功率损耗为

$$\Delta P = \Delta A_P / T_j, \quad \Delta Q = \Delta A_Q / T_j$$

为提高测量精度,各电度表的误差特性应当一致,电度表精度也应尽量高。

如果在线路首端和各支路末端装设的是有功电度表和功率因数表,则线路损耗无功电量为

$$\Delta A_Q = A_{P1} \text{tg}\varphi_1 - (A_{P2} \text{tg}\varphi_2 + A_{P3} \text{tg}\varphi_3 + A_{P4} \text{tg}\varphi_4)$$

式中:  $\text{tg}\varphi_1 \sim \text{tg}\varphi_4$ ——为电平衡测试时间内的平均功率因数角的正切值。

(4) 实测电流法:先测出线路的电流,并求得(或查得)每相单位长度的电阻和电抗,再用下列公式进行计算:

$$\Delta P = 3I^2 R_0 L \times 10^{-3}$$

$$\Delta Q = 3I^2 x_0 L \times 10^{-3}$$

式中:  $\Delta P$ ——线路的有功损耗(kw);

$\Delta Q$ ——线路的无功损耗(kvar);

$R_0, x_0$ ——每相线路单位长度的电阻和电抗( $\Omega/\text{km}$ );

$L$ ——线路长度(km)。



(5) 用电流表、电压表和功率因数表测量：根据测试的电流、电压和功率因数，按下列公式进行计算：

$$\Delta P = 3U_1 I \cos \varphi_1 - 3U_2 I \cos \varphi_2$$

$$\Delta Q = 3U_1 I \sin \varphi_1 - 3U_2 I \sin \varphi_2$$

式中： $I$ —— 负荷电流(A)；

$U_1、U_2$ —— 线路始、末两端测得的相电压(kv)；

$\cos \varphi_1、\cos \varphi_2$ —— 线路始、末两端测得的功率因数；

$\sin \varphi_1、\sin \varphi_2$ —— 由  $\cos \varphi_1、\cos \varphi_2$  值从三角函数表中查出，或计算器算出。

其它符号同前。

(6) 替代测量法：如前所述的用双电度表测量线损，在理论上讲得通，但实际进行起来很困难。因为实际上由于一般电度表的准确度为 2 级或 2.5 级，加上互感器准确度 0.5 级，两套电度计量装置最大误差可达 5 级以上，一般线损也不过是 5% 左右，因而用一般电度表测线损几乎是很困难的。

利用替代测量法能比较好地测量出线损，方法简单而实用。

① 单支线路线损的测量：单根输电线路如图 2—8 所示。

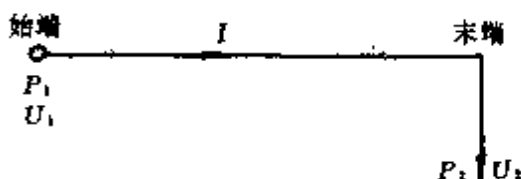


图 2—8 单根输电线路

设始端输入有功功率为  $P_1$ ，始端电压为  $U_1$  (对“零”而言)，线路电流为  $I$ ；末端有功功率为  $P_2$ ，电压为  $U_2$ ，则线损

$$\Delta P = P_1 - P_2 = 3U_1 I \cos \varphi_1 - 3U_2 I \cos \varphi_2$$

由于线路本身的电阻和电抗对负荷而言都是较小的，可以认为  $\varphi_1 = \varphi_2 = \varphi$ ，因此



$$\begin{aligned} \Delta P &= 3(U_1 - U_2)I\cos\varphi \\ \frac{\Delta P}{P_1} \times 100\% &= \frac{3(U_1 - U_2)I\cos\varphi}{3U_1I\cos\varphi} \\ &= \frac{U_1 - U_2}{U_1} = \frac{\Delta U}{U_1} \times 100\% \end{aligned} \quad (1)$$

上式说明,线路的有功损耗率可用电压损失百分率来代替,而高精度的电压表较易配备,从而使测量线损变得较简便可行。

如果在测量线路电压损失同时,一并记录当时全厂的总输入有功功率  $\Sigma P$ ,则某线路损耗占全厂总电耗的百分率为

$$\frac{\Delta P}{P_1} \cdot \frac{P_1}{\Sigma P} = \frac{\Delta P}{\Sigma P}$$

全部线路逐条测量后将各条线路的  $\Delta P/\Sigma P$  相加,就得全厂的总线损百分率。

测量注意事项:

A. 测量时应选择该线路在正常负荷或较大负荷时进行,并记录当时气温备查;

B. 测量时不能用普通电压表测量,否则得不到准确的结果;

C. 测量时间必须一致,差几秒可能就会没有对比价值。为保证测量的同时性,可用两只秒表定时同步测量。

② 多分支线路线损的测量:一条线路上往往有数个分支,理论上这条线路上的有功损耗可以在测得各段电流后,分别根据各段线路电阻予以计算后相加,或按以上介绍的方法求得。但这些方法在多分支线路的实际测量时较为麻烦和易发生误差。下面介绍的“等价负荷计算”法,可以较好地加以解决。多分支线路如图 2—9 所示。

先在线段 0—1 测得  $\Delta U_1\%$ (即  $\Delta P_1\%$ ),再测得 0—2 间的  $\Delta U_2\%$ ,0—3 间的  $\Delta U_3\%$ ,则 1—2 间有功损耗为

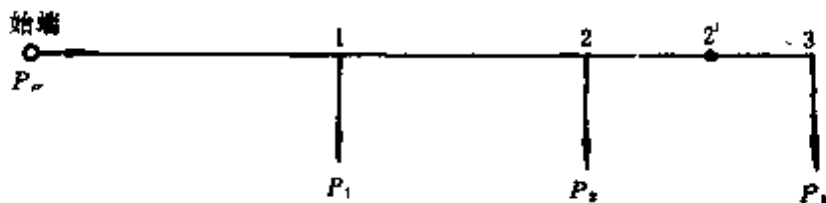


图 2—9 多分支线路

$(\Delta U_2 - \Delta U_1)\%$ , 2—3 间有功损耗为  $(\Delta U_3 - \Delta U_2)\%$ , 则记

$$(\Delta U_3 - \Delta U_2)\% \cdot \frac{P_3}{P_2 + P_3} + (\Delta U_2 - \Delta U_1)\% = \Delta U_{1,2'}\%$$

式中:  $\Delta U_{1,2'}\%$  代表 2、3 点合并的等效负荷点 2' 与 1 间的有功损耗。2' 点位置根据  $P_3/(P_2 + P_3)$  比值在 2—3 点滑动。于是上述电路可简化为图 2—10 等效电路。

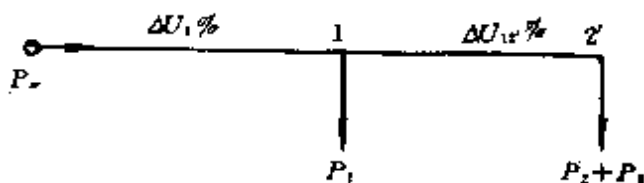


图 2—10 等效电路

于是这条线路的总线损为

$$\Delta U\% = \Delta U_1\% + \Delta U_{1,2'}\% \cdot \frac{P_2 + P_3}{P_1 + P_2 + P_3}$$

再多的多支线路只要按以上折算方法从后向前计算就能算出该线路的总线损。

③ 关于线损率的修正: 由于工厂生产是经常在变化的, 测试时往往会遇到测试对象不处于既定条件状况, 而测试又不能无限期地等待, 这时可以用下面介绍的方法进行修正。

三相线路线损率为

$$\frac{\Delta P}{P_{sr}} = \frac{3I^2 R}{\sqrt{3} UI \cos \varphi}$$

对于同一条线路,在不同的负荷功率下,其线损率是不同的。设负荷 1 时和负荷 2 时的线路电流、始端线电压、线路功率因数分别以 1 和 2 为下角的符号表示,则有如下关系:

$$\frac{\frac{\Delta P_1}{P_{sr1}}}{\frac{\Delta P_2}{P_{sr2}}} = \frac{\frac{3I_1^2 R}{\sqrt{3} U_1 I_1 \cos \varphi_1}}{\frac{3I_2^2 R}{\sqrt{3} U_2 I_2 \cos \varphi_2}} = \frac{U_2 I_1 \cos \varphi_2}{U_1 I_2 \cos \varphi_1}$$

$$\text{所以 } \frac{\Delta P_2}{P_{sr2}} \times 100\% = \left( \frac{I_2}{I_1} \cdot \frac{U_1}{U_2} \cdot \frac{\cos \varphi_1}{\cos \varphi_2} \right) \frac{\Delta P_1}{P_{sr1}} \times 100\% \quad (2)$$

式中:  $P_{sr}$ ——线路输入功率(W);

$R$ ——每相线路电阻( $\Omega$ );

$I$ ——线电流(A);

$U$ ——始端线电压(V);

$\frac{I_2}{I_1} \cdot \frac{U_1}{U_2} \cdot \frac{\cos \varphi_1}{\cos \varphi_2} = K_1 \cdot K_2 \cdot K_3$ ——修正系数。

如果我们测得某线路在某一负荷下的  $I_1$ 、 $U_1$ 、 $\cos \varphi_1$  和末端电压,并由式(1)得到的线损率  $\Delta P_1/P_{sr1} \times 100\%$ ,以及测得既定条件下的  $I_2$ 、 $U_2$ 、 $\cos \varphi_2$  (仅抄录该条件下的这几个参数,要比用秒表同时测出该条件下的始端电压和末端电压容易得多),便可利用式(2)方便地计算出既定条件下的线损。

## 6. 配电线路损耗的简易计算

(1) 单相交流 220V 线路的功率损耗:

$$\Delta P = K_j \left( \frac{P}{\cos \varphi} \right)^2 L$$

式中:  $\Delta P$ ——功率损耗(kW);

$K_j$ ——配线损耗计算系数,见表 2—8;

$P$ ——输入功率(kW);

$\cos \varphi$ ——负荷功率因数;

$L$ ——配线距离(km)。

(2) 三相交流 380V 线路功率损耗:

$$\Delta P = \frac{1}{6} K_j \left( \frac{P}{\cos\varphi} \right)^2 L$$

式中:符号同前。

**例 2—5** 某 380V 低压配电线路上接有一台 22kW,  $\cos\varphi = 0.8$ ,  $\eta = 0.9$  的三相异步电动机, 线路距变电所 200m, 采用 LJ—50 铝芯电缆, 求线路功率损耗。

**解** 电动机输入功率

$$P_1 = P_2 / \eta = 22 / 0.9 \approx 24.4 (\text{kW})$$

表 2—10 配线损耗功率计算系数  $K_j$

线芯标称截面 (mm <sup>2</sup> )	铜 芯 线		铝 芯 线	
	25°C	50°C	25°C	50°C
0.50	1.55	1.70		
0.75	1.03	1.13		
1.0	$7.79 \times 10^{-1}$	$8.52 \times 10^{-1}$	1.29	1.43
1.5	$5.19 \times 10^{-1}$	$5.68 \times 10^{-1}$	$8.60 \times 10^{-1}$	$9.56 \times 10^{-1}$
2.0	$3.85 \times 10^{-1}$	$4.26 \times 10^{-1}$	$6.45 \times 10^{-1}$	$7.17 \times 10^{-1}$
2.5	$3.11 \times 10^{-1}$	$3.40 \times 10^{-1}$	$5.16 \times 10^{-1}$	$5.73 \times 10^{-1}$
4	$1.94 \times 10^{-1}$	$2.13 \times 10^{-1}$	$3.22 \times 10^{-1}$	$3.58 \times 10^{-1}$
6	$1.29 \times 10^{-1}$	$1.42 \times 10^{-1}$	$2.15 \times 10^{-1}$	$2.39 \times 10^{-1}$
10	$7.79 \times 10^{-2}$	$8.52 \times 10^{-2}$	$1.29 \times 10^{-1}$	$1.43 \times 10^{-1}$
16	$4.87 \times 10^{-2}$	$5.32 \times 10^{-2}$	$8.07 \times 10^{-2}$	$8.96 \times 10^{-2}$

(续表)

线芯标称截面 (mm <sup>2</sup> )	铜 芯 线		铝 芯 线	
	25°C	50°C	25°C	50°C
25	$3.11 \times 10^{-2}$	$3.40 \times 10^{-2}$	$5.16 \times 10^{-2}$	$5.73 \times 10^{-2}$
35	$2.22 \times 10^{-2}$	$2.43 \times 10^{-2}$	$3.68 \times 10^{-2}$	$4.09 \times 10^{-2}$
50	$1.55 \times 10^{-2}$	$1.70 \times 10^{-2}$	$2.58 \times 10^{-2}$	$2.86 \times 10^{-2}$
70	$1.11 \times 10^{-2}$	$1.21 \times 10^{-2}$	$1.84 \times 10^{-2}$	$2.04 \times 10^{-2}$
95	$8.20 \times 10^{-3}$	$8.96 \times 10^{-3}$	$1.35 \times 10^{-2}$	$1.51 \times 10^{-2}$
120	$6.49 \times 10^{-3}$	$7.10 \times 10^{-3}$	$1.07 \times 10^{-2}$	$1.19 \times 10^{-2}$
150	$5.19 \times 10^{-3}$	$5.68 \times 10^{-3}$	$8.60 \times 10^{-3}$	$9.56 \times 10^{-3}$
185	$4.21 \times 10^{-3}$	$4.60 \times 10^{-3}$	$6.98 \times 10^{-3}$	$7.75 \times 10^{-3}$

按线芯温度 50°C, 查表 2—10 得  $K_1 = 2.86 \times 10^{-2}$ , 故线路功率损耗为

$$\begin{aligned} \Delta P &= \frac{1}{6} K_1 \left( \frac{P}{\cos \varphi} \right)^2 L \\ &= \frac{1}{6} \times 2.86 \times 10^{-2} \times \left( \frac{24.4}{0.8} \right)^2 \times 0.2 \\ &= 0.887 (\text{kW}) \end{aligned}$$

(3) 配线电能损失估算:

$$\Delta A = 3I_{\max}^2 R \tau$$

式中:  $\Delta A$ ——电能损失(kWh);

$I_{\max}$ ——最大负荷时的线路电流(A);

$R$ ——线路每相电阻( $\Omega$ );

$\tau$ ——损失时间(h), 由最大负荷利用小时数  $I_{\max}$  求得(图 2—11)。

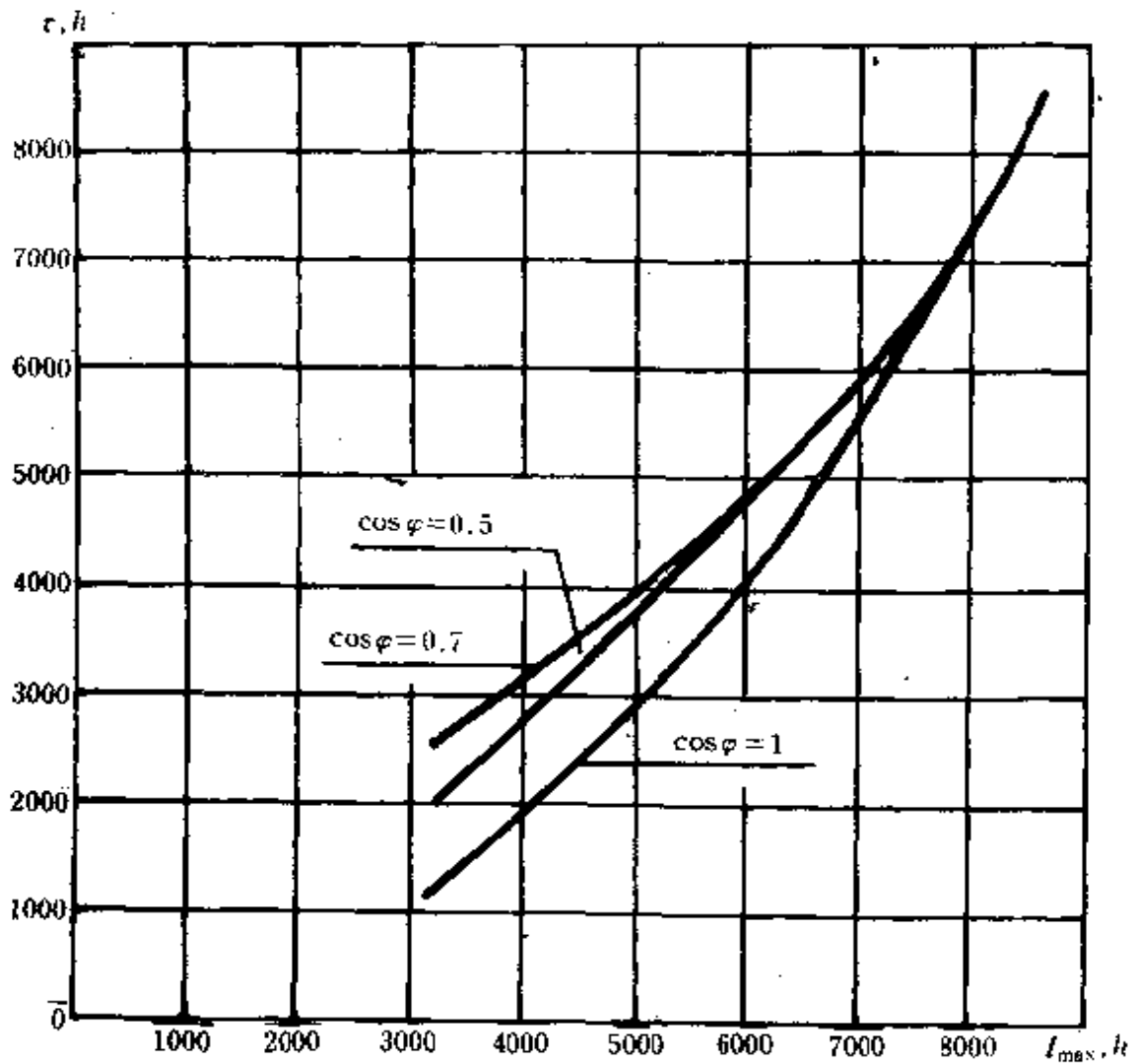


图 2 11  $\tau = f(I_{max})$  的关系曲线

### 三、技术经济比较确定配电网络方案

通常采用以折回年限为基准值的年运行费用比较法确定配电网络方案。

年运行费用可按下式计算

$$F = F_1 + F_2 + F_3 + F_4 + F_5$$

式中： $F$ ——年运行费用(万元/年)；

$F_1$ ——折旧费， $F_1 = \text{基建投资} \times \text{折旧率}$ (万元/年)；

$F_2$ ——维护费， $F_2 = \text{基建投资} \times \text{维护费率}$ (万元/年)；

$F_3$ ——工人工资， $F_3 = \text{人数} \times \text{平均月工资} \times 12 \times 1.1$ (万元/年)；

$F_4$ ——年基本电费， $F_4 = 12 \times \text{基本电价} \times \text{用电设备装机容量或总变电所主变压器总容量或最大需用量}$ (万元/年)；

$F_5$ ——年电能损耗费， $F_5 = \text{年电能损耗} \times \text{电度电价}$ (万元/年)。

年电能损耗包括变压器铜耗、铁耗、线路损耗等。

配电网中电能损耗的折价、电力工程的年折旧、维修费率，见表 2—11。

表 2—11 电力工程的年折旧、维修费率

序号	项 目	使用 年限	年基本折旧 (%)	年大修折旧 (%)	年折旧 (%)	年维护费 (%)
1	变电设备	25	3.8	2	5.8	按企 业规模、 设备新旧 等具体情 况，采用 年折旧费 的 50%~ 100% 不 等
2	配电设备	20	4.8	2	6.8	
3	电气及控制设备	25	3.8	2	5.8	
4	铁塔线路	50	1.8	0.8	2.6	
5	混凝土电杆线路	40	2.4	1	3.4	
6	电缆线路	40	2.4	1	3.4	
7	建筑物(砖石混合结构)	40	2.4	1	3.4	

通过比较，会出现投资少而年运行费用多或投资多而年运行费用少的情况。因此可引用“折回年限”来衡量。折回年限  $N$

为

$$N = \frac{Z_A - Z_B}{F_A - F_B}$$

式中： $Z_A$ 、 $Z_B$ ——方案 A 和方案 B 的基建投资；

$F_A$ 、 $F_B$ ——方案 A 和方案 B 的年运行费用。

折回年限基准值当未取得确切资料时，一般可取 3～5 年。当计算折回年限小于基准值时，应采用投资多的方案。当计算折回年限大于基准值时，应采用投资少的方案。

对于多个方案进行比较时，为了便于比较，可以根据折回年限的基准值计算各方案的计算费用  $F_{jA}$ 。当某方案的计算费用最小时，即为最经济的方案。

两种方案的计算费用如下：

$$F_{jA} = \frac{Z_A}{N} + F_A, \quad F_{jB} = \frac{Z_B}{N} + F_B$$

#### 四、配电方式和电源位置对线损的影响

##### 1. 配电方式对线损的影响

表 2—12 是在供给负荷相同的有功电量情况下，当相电压、输送距离及导线材料均相同时，各种配电方式的比较。由表可见，线损最小的是三相四线制配电方式。

##### 2. 电源位置对线损的影响

电源位置选择不同，配线损耗也会不同（见表 2—13）。当电源位置处于负荷中心附近时，线损最小。

#### 五、并联线路中负荷经济分配的原则

线路并联运行能降低线损。当几条线路并联运行时，如果各线按电阻反比分配负荷，总的损耗为最小。即



表 2—12 配电方式比较



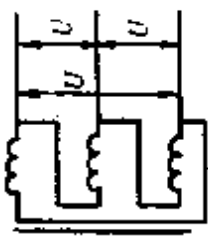
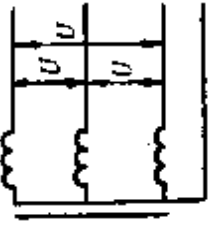
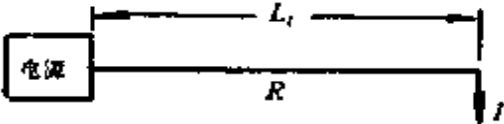
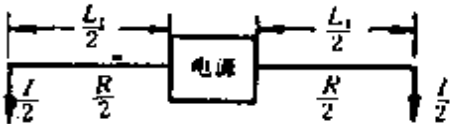
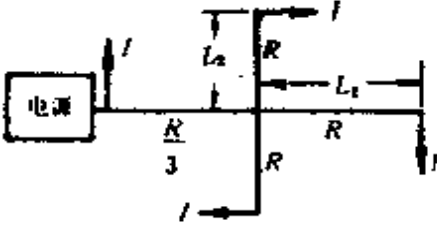
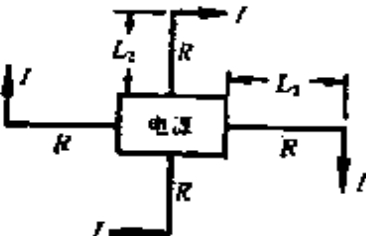
配电方式	单相二线制	单相三线制	三相三线制	三相四线制
接线图				
供电功率 (设 $\cos\varphi = 1$ )	$P = UI_1$	$P = 2UI_2$	$P = \sqrt{3}UI_3$	$P = 3UI_4$
线电流	$I_1$ 100%	$I_2 = \frac{I_1}{2}$ 50%	$I_3 = \frac{I_1}{\sqrt{3}}$ 57.3%	$I_4 = \frac{I_1}{3}$ 33.3%
导线截面	$S_1$ 100%	$S_2 = \frac{2}{3}S_1$ 66.7%	$S_3 = \frac{2}{3}S_1$ 66.7%	$S_4 = \frac{1}{2}S_1$ 50%
线损	$\Delta P_1 = 2I_1^2 R_1$ $= 2I_1^2 \frac{\rho l}{S_1}$ 100%	$\Delta P_2 = 2I_2^2 R_2$ $= \frac{3}{4} I_1^2 \frac{\rho l}{S_1}$ 37.5%	$\Delta P_3 = 3I_3^2 R_3$ $= \frac{2}{3} I_1^2 \frac{\rho l}{S_1}$ 75%	$\Delta P_4 = 3I_4^2 R_4$ $= \frac{2}{3} I_1^2 \frac{\rho l}{S_1}$ 33.3%

表 2-13 电源位置对线损的影响比较

厂区形状	电 源 位 置	功 率 损 耗
长方形		$\Delta P_1 = I^2 R$
正方形 (车间)		$\begin{aligned} \Delta P_2 &= \left(\frac{I}{2}\right)^2 \frac{R}{2} \cdot 2 \\ &= \frac{1}{4} I^2 R = \frac{1}{4} \Delta P_1 \end{aligned}$
正方形		$\begin{aligned} \Delta P_3 &= (3I)^2 \frac{R}{3} + 3I^2 R \\ &= 6I^2 R = 6\Delta P_1 \end{aligned}$
正方形 (车间)		$\Delta P_4 = 4I^2 R = 4\Delta P_1$

$$I_1 R_1 = I_2 R_2 = \dots = I_n R_n = IR$$

总的并联电阻

$$R = \frac{1}{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \dots + \frac{1}{R_n}}$$

各条线路应分配负荷为

$$I_1 = I \frac{R}{R_1}; I_2 = I \frac{R}{R_2}; I_n = I \frac{R}{R_n}$$

### 六、开环运行线路负荷经济分配的原则

环式线路需开环运行时，在环网回路何处断开，才使线损最小。可按下面方法进行。

图 2—12 为一环形线路。设原来开环点在 A 处，各负荷功率因数相等，两路供电线路记 a 线路和 b 线路的每相电压降分别为

$$\Delta U_a = \sum_1^{n_1} I_a R_a$$

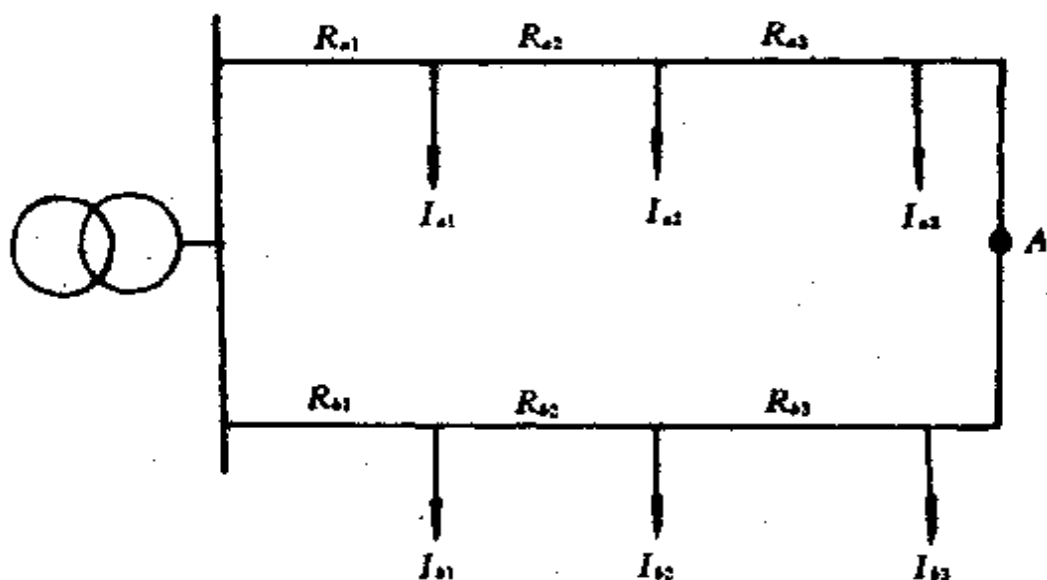


图 2—12 环形线路

$$\Delta U_b = \sum_1^{n_2} I_b R_b$$

现调整部分负荷  $\Delta I$ , 则调整后两路线电压降分别为

$$\Delta U'_a = \sum_1^{n_1} (I_a + \Delta I) R_a = \Delta U_a + \sum_1^{n_1} \Delta I R_a$$

$$\Delta U'_b = \sum_1^{n_2} (I_b - \Delta I) R_b = \Delta U_b - \sum_1^{n_2} \Delta I R_b$$

为了使线损最小, 两路线电阻电压降应相等。即

$$\Delta U'_a = \Delta U'_b$$

$$\Delta U_a + \sum_1^{n_1} \Delta I R_a = \Delta U_b - \sum_1^{n_2} \Delta I R_b$$

$$\Delta U_b - \Delta U_a = \Delta I \left( \sum_1^{n_1} R_a + \sum_1^{n_2} R_b \right) = \Delta I \sum_1^n R$$

式中:  $\sum_1^n R$ ——整个环网电阻( $\Omega$ )。

所以  $\Delta I = \frac{\Delta U_b - \Delta U_a}{\sum_1^n R}$  是最合理的调整电流(A)。

第一, 如果  $\Delta U_b > \Delta U_a$ ,  $\Delta I$  为正, 说明  $a$  线路电流应增加,  $b$  线路电流应减少;

第二, 如果  $\Delta U_b < \Delta U_a$ ,  $\Delta I$  为负, 说明  $a$  线路电流应减少,  $b$  线路电流应增加。

调整负荷前后, 线损减少量如下(如对于第 1 种情况):

$$\text{调整前} \quad \Delta P_a = 3 \sum_1^{n_1} (I_a^2 R_a) \times 10^{-3}$$

$$\Delta P_b = 3 \sum_1^{n_2} (I_b^2 R_b) \times 10^{-3}$$

$$\begin{aligned}
 \text{调整后 } \Delta P'_a &= 3 \sum_1^{n_1} (I_a - \Delta I)^2 R_a \times 10^{-3} \\
 &= \Delta P_a - (6\Delta I \cdot \Delta U_a - 3\Delta I^2 \sum_1^{n_1} R_a) \times 10^{-3} \\
 \Delta P'_b &= 3 \sum_1^{n_2} (I_b + \Delta I)^2 R_b \times 10^{-3} \\
 &= \Delta P_b + (6\Delta I \cdot \Delta U_b + 3\Delta I^2 \sum_1^{n_2} R_b) \times 10^{-3}
 \end{aligned}$$

调整后减少损失

$$\begin{aligned}
 \Delta P &= (\Delta P_a + \Delta P_b) - (\Delta P'_a + \Delta P'_b) \\
 &= [6\Delta I(\Delta U_a - \Delta U_b) - 3\Delta I^2(\sum_1^{n_1} R_a + \sum_1^{n_2} R_b)] \\
 &\quad \times 10^{-3} \\
 &= 3\Delta I(2\Delta U - \Delta I \sum_1^n R) \times 10^{-3}
 \end{aligned}$$

**例 2—6** 如图 2—6 所示,原开环点在 A 处,已知

$$R_{a1} = 0.2\Omega, R_{a2} = 0.1\Omega, R_{a3} = 0.3\Omega$$

$$R_{b1} = 0.3\Omega, R_{b2} = 0.2\Omega, R_{b3} = 0.1\Omega$$

$$I_{a1} = 30\text{A}, I_{a2} = 15\text{A}, I_{a3} = 8\text{A}$$

$$I_{b1} = 18\text{A}, I_{b2} = 7\text{A}, I_{b3} = 5\text{A}$$

问原开环点是否合理?如何调整才能使线路总损耗最小?

**解**  $\Delta U_a = 53 \times 0.2 + 23 \times 0.1 + 8 \times 0.3 = 15.3(\text{V})$

$$\Delta U_b = 30 \times 0.3 + 12 \times 0.2 + 5 \times 0.1 = 11.9(\text{V})$$

可见 a、b 两臂电压降不等,应进行调整。因

$$\sum_1^n R = 1.2(\Omega)$$

故应调整的电流为

$$\Delta I = (15.3 - 11.9)/1.2 = 3.4/1.2 = 2.83(\text{A})$$

即  $a$  线路应调整 2.83A 电流到  $b$  线路。

调整负荷前后,线损减少为

$$\begin{aligned} \Delta P &= \left[ 6\Delta I(\Delta U_a - \Delta U_b) - 3\Delta I^2 \left( \sum_1^n R \right) \right] \times 10^{-3} \\ &= [6 \times 2.83 \times (15.3 - 11.9) - 3 \times 2.83^2 \times 1.2] \times 10^{-3} \\ &= 0.0289(\text{kW}) \end{aligned}$$

### 七、配电线路电压损失允许值及电压波动对设备的影响

#### 1. 配电线路电压损失允许值(表 2—14、表 2—15)。

表 2—14 各种情况下网络电压损失允许值

序号	名称	允许电压损失 $\Delta U\%$	附注
1	内部低压配电线路	1 ~ 2.5	总计不得大于 60%
2	外部低压配电网	3.5 ~ 5	
3	工厂内部供给有照明负荷的低压网络	3 ~ 5	
4	正常情况下的 高压配电网	3 ~ 6	第 4、6 两项之和不得大于 10%
5	同上,但在事故情况下	6 ~ 12	
6	正常情况下地方性 高压供电网络	5 ~ 8	
7	同上,但在事故情况下	10 ~ 12	
8	正常情况下地方性 网络	10(有调压器时为 15)	
9	同上,但在事故情况下	15(有调压器时为 20)	

表 2—15 各种情况下设备端电压允许偏移值

名 称	允许电压偏移(%)
1. 电动机	
(1) 连续运转(正常计算值)	± 5
(2) 连续运转(个别特别远的电动机)	
① 正常条件下	- 8 ~ - 10
② 事故条件下	- 8 ~ - 12
(3) 短时运转(例如起动相邻大型电动机时)	- 20 ~ - 30 <sup>①</sup>
(4) 起动时	
① 频繁起动	- 10
② 不频繁起动	- 15 <sup>②</sup>
2. 白炽灯	
(1) 室内主要场所及厂区投光灯照明	- 2.5 ~ + 5
(2) 住宅照明、事故照明及厂区照明	- 6
(3) 36V 以下低压移动照明	- 10
(4) 短时电压波动(次数不多)	不 限
3. 荧光灯	
(1) 室内主要场所	- 2.5 ~ + 5
(2) 短时电压波动	- 10
4. 电阻炉	± 5
5. 感应电炉(用变频机组供电时)	同电动机
6. 电弧炉	
(1) 三相电弧炉	± 5
(2) 单相电弧炉	± 2.5
7. 吊车电动机(起动时校验)	- 15
8. 电焊设备(在正常尖峰焊接电流时持续工作)	- 8 ~ - 10

(续表)

名 称	允许电压偏移(%)
9. 静电电容器	
(1) 长期运行	+ 5
(2) 短时运行	+ 10
10. 正常情况下,在发电厂母线和变电所二次母线(3 ~ 10kV)上,由该母线对较远用户供电,用户负荷变动很大	电压调压 0 ~ + 5 <sup>③</sup>
11. 同上,但在事故情况下	电压调整达到 + 2.5 ~ + 7.5
12. 正常情况下,当调压设备切除时,在发电厂母线或变电所二次母线(3 ~ 10kV)上由该母线对较近的用户供电	小于 + 7
13. 同上,但在事故情况下	- 2.5
14. 同上,但在计划检修时	达到网络额定电压

注:

- ① 对于少数带有冲击负荷的传动装置,其电动机是根据转矩要求选择的,所以其电压降低值应根据计算来确定。
- ② 电压降低应满足起动转矩要求。
- ③ 在最大负荷时应将电压升高,在最小负荷时应将电压降低。

## 2. 电压波动对常用电气设备特性的影响

用电设备都有其额定电压,在额定电压下使用,用电设备通常能达到最佳运行状态。当用电设备的端电压偏离额定值超过允许值(一般为 ± 5%)时,则设备性能、生产效率、产品质量等都将受到影响。端电压偏移对常用电气设备特性的影响,见表 2-16。



表 2—16 端电压偏移对常用电气设备特性的影响

名 称	与电压 $U$ 的正比 函数关系	电压偏移的影响	
		90% 额定电压	110% 额定电压
1. 异步电动机			
起动转矩和最大转矩	$U^2$	- 19%	+ 21%
转差率	$1/U^2$	+ 23%	- 17%
满载转速	(同步转速 - 转差率)	- 1.5%	+ 1%
满载效率	-	- 2%	+ (0.5 ~ 1)%
满载功率因数	-	+ 1%	- 3%
满载电流	-	+ 11%	- 7%
起动电流	$U$	- (10 ~ 12)%	+ (10 ~ 12)%
满载温升	-	+ (6 ~ 7)%	- (1 ~ 2)%
最大过负荷能力	$U^2$	- 19%	+ 21%
2. 电热设备			
输出热能	$U^2$	- 19%	+ 21%
3. 白炽灯			
光通量	$\approx U^{3.6}$	- 32%	+ 39%
使用寿命	$\approx 1/U^{14}$	+ 330%	- 70%
4. 荧光灯			
光通量	$U$	- 10%	+ 10%
使用寿命	-	- 35%	- 20%
5. 静电电容器			
输出无功功率	$U^2$	- 19%	+ 21%

注：“+”号表示增加值；“-”号表示减少值。

### 八、线路电压损失计算

#### 1. 负荷在末端的线路电压损失计算

图 2—13 为负荷在末端的三相供电线路。

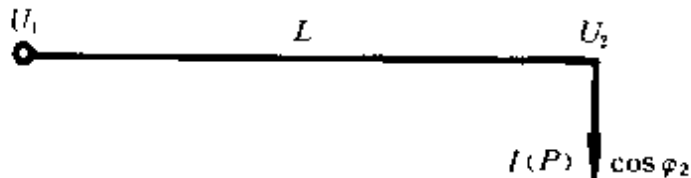


图 2—13 负荷在末端的线路

线路电压损失

$$\begin{aligned} \Delta U &= \sqrt{3} I (R \cos \varphi_2 + X \sin \varphi_2) \\ &= \frac{PR + QX}{U_2} \approx \frac{PR + QX}{U_e} \end{aligned}$$

式中： $\Delta U$ ——线电压损失(V)；

$I, P$ ——负荷电流和有功功率(A、kW)；

$Q$ ——负荷无功功率(kVar)； $Q = \text{tg} \varphi$ ；

$R, X$ ——线路电阻和电抗( $\Omega$ )；

$U_e$ ——线路额定电压(kV)。

#### 2. 沿线路有几个负荷时电压损失计算

图 2—14 为沿线有几个负荷的三相供电线路。

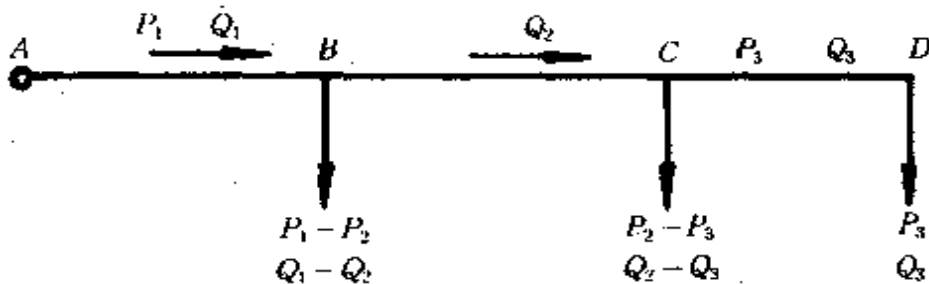


图 2—14 沿线有几个负荷的线路

线路电压损失

$$\Delta U = \sum_1^n \frac{PR + QX}{U_e} = \sum_1^n \frac{(PR_0 + Qx_0)L}{U_e}$$

式中： $\Delta U$ ——线路电压损失(V)；

$P, Q$ ——通过每段线路的有功功率(kW)和无功功率(kVar)；

$R_0, x_0$ ——每段线路每千米电阻和电抗( $\Omega$ )；

$L$ ——每段线路长度(km)；

其它符号同前。

(1) 如果沿线路  $R_0, x_0$  不变时, 则电压损失为

$$\Delta U = \sqrt{3} [R_0 \sum_1^n (I \cos \varphi \cdot L) + x_0 \sum_1^n (I \sin \varphi \cdot L)]$$

如果负荷的功率因数相同, 则

$$\Delta U = \sqrt{3} (R_0 \cos \varphi + x_0 \sin \varphi) \sum_1^n IL$$

(2) 如果  $\cos \varphi = 1$ , 则

$$\Delta U = \sqrt{3} \sum_1^n (IR_0 L)$$

例 2-7 计算如图 2-15 所示三相线路的全线电压损失。

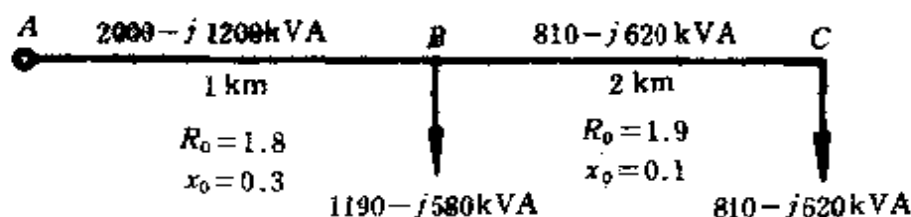


图 2-15 某 10kV 供电线路

解 BC 段电压损失

$$\Delta U_{BC} = \frac{(810 \times 1.9 + 620 \times 0.1) \times 2}{10} = 320.2 \text{ (V)}$$

AB 段电压损失

$$\Delta U = \frac{(2000 \times 1.8 + 1200 \times 0.3) \times 1}{10} = 396(\text{V})$$

AC 段电压损失

$$\Delta U_{AC} = \Delta U_{AB} + \Delta U_{BC} = 396 + 320.2 = 716.2(\text{V})$$

AC 段电压损失率

$$\Delta U_{AC} \% = \frac{716.2}{10000} \times 100 = 7.162$$

即电压损失率为 7.162%。

### 3. 具有分支线路的配线电压损失计算

**例 2—8** 某 380V 低配线路如图 2—16 所示, 采用 BLX—500 型铝芯绝缘导线穿管敷设。干线采用  $3 \times 95\text{mm}^2$  导线, 支线分别为  $3 \times 50$  和  $3 \times 25\text{mm}^2$  导线。各参数均注明在图中。试计算各段的电压损失。

**解** 由表 2—8 查得

$$\text{BLX—500—}3 \times 95\text{mm}^2 \quad R_0 = 0.33\Omega/\text{km},$$

$$x_0 = 0.06\Omega/\text{km}$$

$$\text{BLX—500—}3 \times 50\text{mm}^2 \quad R_0 = 0.62\Omega/\text{km},$$

$$x_0 = 0.063\Omega/\text{km}$$

$$\text{BLX—500—}3 \times 25\text{mm}^2 \quad R_0 = 1.24\Omega/\text{km},$$

$$x_0 = 0.066\Omega/\text{km}$$

$$\Delta U_{AB} = \frac{(180 \times 0.33 + 70 \times 0.06) \times 0.15}{0.38} = 25.11(\text{V})$$

$$\Delta U_{BC} = \frac{(140 \times 0.33 + 40 \times 0.06) \times 0.04}{0.38} = 5.12(\text{V})$$

$$\Delta U_{CD} = \frac{(80 \times 0.33 + 0) \times 0.06}{0.38} = 4.17(\text{V})$$

$$\Delta U_{BE} = \frac{(40 \times 1.24 + 30 \times 0.066) \times 0.06}{0.38} = 8.14(\text{V})$$

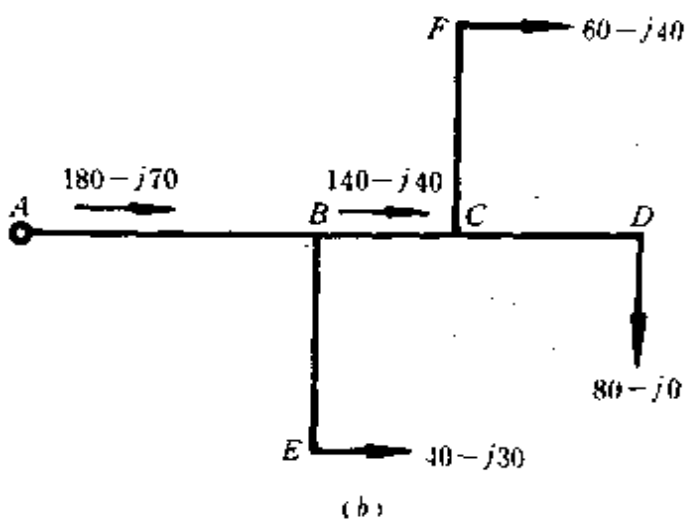
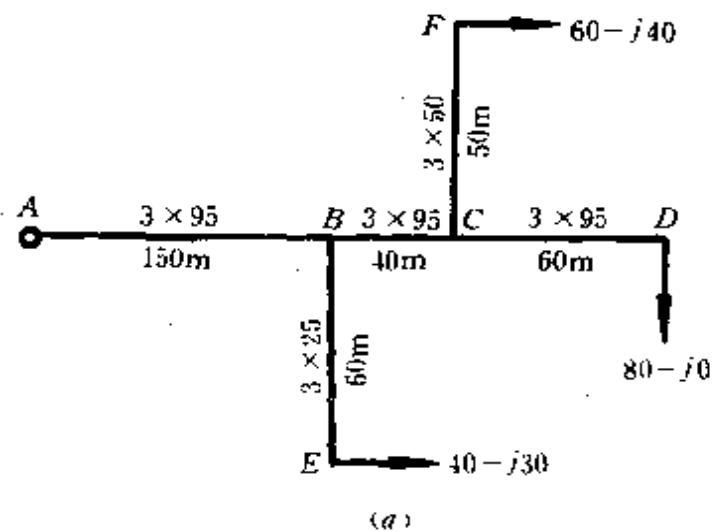


图 2—16 某 380V 低配线路

(a) 示意图 (b) 负荷分配图

$$\Delta U_{CF} = \frac{(60 \times 0.62 + 40 \times 0.063) \times 0.05}{0.38} = 5.23(\text{V})$$

$$\Delta U_{AB} = \Delta U_{AB} + \Delta U_{BE} = 25.11 + 8.14 = 33.25(\text{V})$$

$$\begin{aligned} \Delta U_{AF} &= \Delta U_{AB} + \Delta U_{BC} + \Delta U_{CF} = 25.11 + 5.12 + 5.23 \\ &= 35.46(\text{V}) \end{aligned}$$

#### 4. 两端供电线路配线电压损失计算

当线路由两个电源供电时(图 2—17), 线路中的电流及负荷分配有以下二种情况。

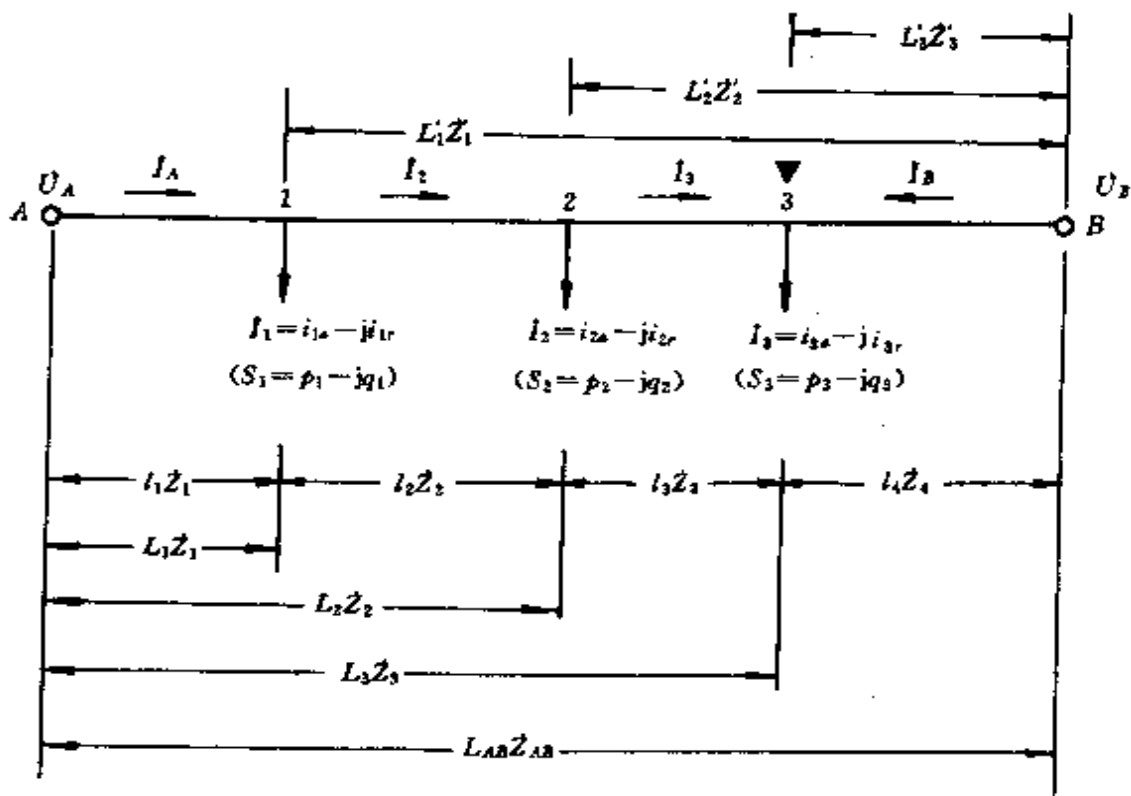


图 2-17 两端供电线路

(图中 ▼ 为假定的电流分点)

(1)  $U_A = U_B$  时:

$$I_A = \frac{\sum i Z'}{Z_{AB}}, I_B = \frac{\sum i Z}{Z_{AB}}$$

$$S_A = \frac{\sum S Z'}{Z_{AB}}, S_B = \frac{\sum S Z}{Z_{AB}}$$

式中： $I_A, I_B$ ——电流  $A$  和  $B$  输出的电流(A)；

$S_A, S_B$ ——电流  $A$  和  $B$  供给的功率(kvA)。

(2) 全线路使用同型号、同截面的导线，且敷设方式也相同时：

$$I_A = \frac{\sum i L'}{L_{AB}}, I_B = \frac{\sum i L}{L_{AB}}$$

$$S_A = \frac{\sum S L'}{L_{AB}}, S_B = \frac{\sum S L}{L_{AB}}$$

在上述公式中，将电流和功率都变换为复数形式，则

$$P_A - jQ_A = \frac{\sum (P - jq) L'}{L_{AB}}$$

$$P_A = \frac{P_1 L'_1 + P_2 L'_2 + P_3 L'_3 + \dots}{L_{AB}}$$

$$Q_A = \frac{q_1 L'_1 + q_2 L'_2 + q_3 L'_3 + \dots}{L_{AB}}$$

式中： $P_A, Q_A$ ——由电源  $A$  供给的有功和无功功率(kW、kVar)。

同样，可写出由电源  $B$  供给的有功和无功功率  $P_B$  和  $Q_B$ 。

**例 2—9** 某 10kV 三相架空线路环形电网如图 2—18 所示。求各段的电压损失。已知环形干线采用 LJ—50mm<sup>2</sup> 导线，支线采用 LJ—25mm<sup>2</sup> 导线。线间几何均距为 1m，负荷(kW)及功率因数(表示在符号  $\angle$  内)等均注明于图 2—18 中。

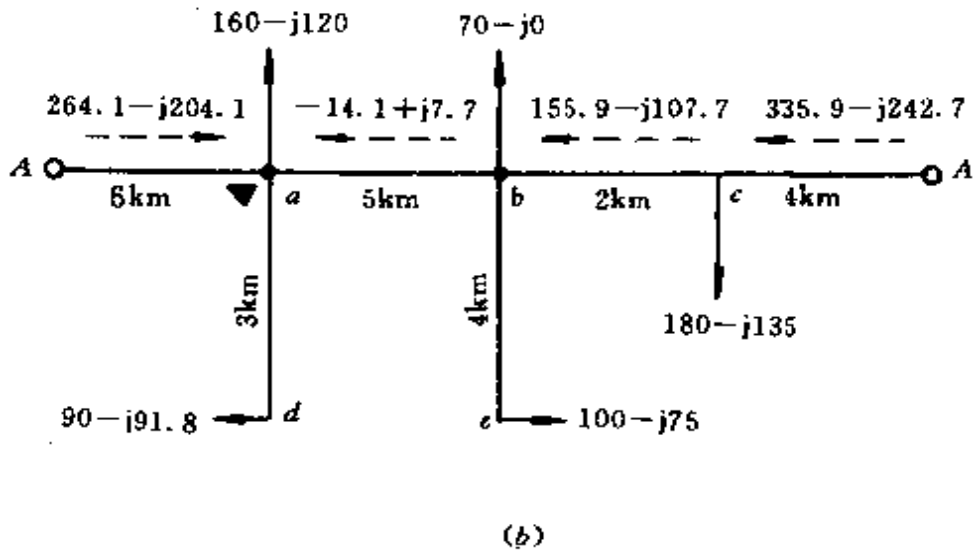
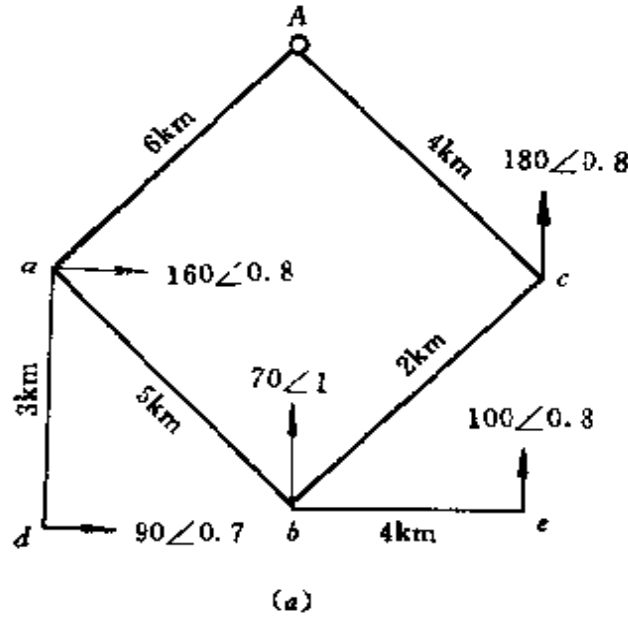


图 2—18 10kV 环形电网电压损失计算电路图

**解** 从 A 点将电网展开。假定电流分点在 a 处，如图 2—18(b) 所示。并将各点的负荷以复数形式标注在图中。



$$\begin{aligned}
 P_{Aa} &= \frac{\Sigma PL'}{L_{AA}} \\
 &= \frac{(160 + 90) \times 11 + (70 + 100) \times 6 + 180 \times 4}{17} \\
 &= 264.1(\text{kW})
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 Q_{Aa} &= \frac{\Sigma qL'}{L_{AA}} \\
 &= \frac{(120 + 91.8) \times 11 + 100 \times 6 + 135 \times 4}{17} \\
 &= 204.1(\text{kVar})
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 P_{Ac} &= \frac{\Sigma PL}{L_{AA}} \\
 &= \frac{(160 + 90) \times 6 + (70 + 100) \times 11 + 180 \times 13}{17} \\
 &= 335.9(\text{kW})
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 Q_{Ac} &= \frac{\Sigma qL}{L_{AA}} \\
 &= \frac{(120 + 91.8) \times 6 + 100 \times 11 + 135 \times 13}{17} \\
 &= 242.7(\text{kVar})
 \end{aligned}$$

将上述计算结果标注在图 2—19(b) 中(如虚线所示)。

查表 2—6 得

$$\text{LJ—50mm}^2 \quad R_0 = 0.64\Omega/\text{km}, \quad x_0 = 0.355\Omega/\text{km}$$

$$\text{LJ—25mm}^2 \quad R_0 = 1.28\Omega/\text{km}, \quad x_0 = 0.376\Omega/\text{km}$$

$$\begin{aligned}
 \Delta U_{Aa} &= \frac{(PR_c + Qx_0)L}{U_c} \\
 &= \frac{(264.1 \times 0.64 + 204.1 \times 0.355) \times 6}{10} \\
 &= 144.9(\text{V})
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\Delta U_{ab} &= \frac{(PR_0 - QX_0)L}{U_e} \\ &= \frac{(14.1 \times 0.64 - 7.7 \times 0.355) \times 5}{10} = 3.1(\text{V})\end{aligned}$$

$$\Delta U_{ad} = \frac{(90 \times 1.28 + 91.8 \times 0.376) \times 3}{10} = 44.9(\text{V})$$

$$\Delta U_{be} = \frac{(100 \times 1.28 + 75 \times 0.376) \times 4}{10} = 62.5(\text{V})$$

$$\Delta U_{Ad} = \Delta U_{Aa} + \Delta U_{ad} = 144.9 + 44.9 = 189.8(\text{V})$$

$$\begin{aligned}\Delta U_{Ae} &= \Delta U_{Aa} + \Delta U_{ab} + \Delta U_{be} = 144.9 + 3.1 + 62.5 \\ &= 210.5(\text{V})\end{aligned}$$

计算结果表明,在  $ab$  段上,有  $14.1\text{kW}$  有功功率由  $a$  向  $b$  流动,它汇集在  $b$  点,然后再流向负荷,“ $b$ ”点应为网络的有功功率分点。而有  $7.7\text{kVar}$  无功功率由  $b$  向  $a$  流动,它汇集在  $a$  点,然后再流向负荷,“ $a$ ”点应为网络的无功功率分点。

### 5. 查表法求电压损失

在工程计算中,常常应用系数法和负荷矩查表计算。

电压损失率

$$\Delta U\% = K_i \sum_1^n M_i = K_i \sum_1^n IL_i$$

式中: $K_i$ ——与负荷功率因数对应的每  $1\text{A} \cdot \text{km}$  电流负荷矩的电压损失百分数,可查表 2—17;

$M_i$ ——电流负荷矩( $\text{A} \cdot \text{km}$ ),

$$M_i = IL_i$$

当负荷的功率因数与表 2—17 中所列的功率因数不相符时, $K_i$  值可用表中相邻数值按插入法求得。

对于 380/220V 低压网络,若整条线路的导线截面、材料、敷设方式都相同,且  $\cos\varphi \approx 1$  时,则电压损失率还可用下式计算:

$$\Delta U\% = \frac{\Sigma M}{CS}$$

式中: $\Sigma M$ ——总负荷矩(kW·m),

$$\Sigma M = \Sigma pL;$$

S——导线截面(mm<sup>2</sup>);

C——系数,根据电压和导线材料而定,可查表 2—18。

表 2—18 系数 C 值

线路额定电压(V)	线路系统及电流种类	C 值	
		铜线	铝线
380/220	带中性线的三相线路	83	50
380/220	带中性线的二相线路	37	22
220	交流单相或直流线路	14	8.3
110	交流单相或直流线路	3.4	2.1
36	三相三线线路	0.73	0.44
36	交流或直流二线线路	0.37	0.22
24	交流或直流二线线路	0.165	0.1
12	交流或直流二线线路	0.041	0.025

注:导线的导电率,铜为 57.5;铝为 34.5m/mm<sup>2</sup>·Ω。

为了省略计算,将线路的负荷矩与电压损失率制成对照表,知道了负荷矩,便可查得电压损失率,见表 2—19 ~ 表 2—22。

表 2—17

三相四线制线路中每  $1A \cdot km$

导线截面 ( $mm^2$ )	铜芯绝缘导线(明设/穿管)						
	cosφ						
	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0
1	3.85	4.84	5.73	6.64	7.56	8.51	9.40
	3.76	4.70	5.64	6.58	7.52	8.46	
1.5	2.58	3.23	3.83	4.45	5.06	5.66	6.27
	2.51	3.14	3.76	4.39	5.01	5.63	
2.5	1.59	1.98	2.36	2.72	3.10	3.47	3.76
	1.53	1.92	2.30	2.68	3.06	3.44	
4	1.05	1.28	1.51	1.71	1.97	2.17	2.35
	0.99	1.23	1.46	1.70	1.93	2.14	
6	0.76	0.86	1.03	1.17	1.33	1.44	1.57
	0.68	0.82	0.98	1.13	1.29	1.41	
10	0.467	0.57	0.658	0.739	0.814	0.896	0.94
	0.412	0.52	0.596	0.699	0.779	0.871	
16	0.33	0.37	0.42	0.49	0.53	0.58	0.59
	0.27	0.32	0.38	0.45	0.50	0.53	
25	0.241	0.269	0.295	0.346	0.355	0.372	0.376
	0.189	0.221	0.252	0.305	0.323	0.355	
35	0.19	0.212	0.232	0.252	0.265	0.280	0.268
	0.14	0.165	0.189	0.215	0.234	0.255	
50	0.175	0.190	0.199	0.211	0.227	0.232	0.125
	0.123	0.143	0.161	0.181	0.196	0.211	
70	0.15	0.16	0.16	0.17	0.17	0.16	0.14
	0.08	0.09	0.10	0.11	0.13	0.13	
95	0.12	0.13	0.14	0.14	0.14	0.13	0.10
	0.06	0.07	0.08	0.09	0.10	0.10	

注:

- ① 导线的工作温度为  $50^{\circ}C$ 。
- ② 电压为单相 220V 时,表中数据乘以 2;三相三线时,应乘以 1.5。
- ③ 表中数值未计及气体放电灯奇次谐波电流在零线中引起的电压损失(对结果影响不大)。

的电压损失百分数  $K_1$

铝芯绝缘导线(明设 / 穿管)						
cosφ						
0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0
4.33 4.21	5.41 5.21	6.44 6.32	7.46 7.38	8.51 8.43	9.50 9.48	10.54
2.67 2.58	3.30 3.20	3.92 3.84	4.54 4.47	5.17 5.10	5.80 5.76	6.34
1.71 1.62	2.11 2.02	2.49 2.41	2.87 2.80	3.25 3.18	3.62 3.57	3.96
1.18 1.09	1.42 1.36	1.70 1.62	1.95 1.88	2.20 2.13	2.43 2.38	2.64
0.75 0.66	0.91 0.82	1.06 0.96	1.195 1.130	1.35 1.29	1.54 1.50	1.58
0.51 0.42	0.60 0.52	0.96 0.63	0.78 0.72	0.86 0.81	0.94 0.90	0.99
0.36 0.28	0.42 0.34	0.47 0.40	0.53 0.47	0.58 0.53	0.61 0.58	0.63
0.28 0.21	0.32 0.25	0.36 0.30	0.40 0.34	0.43 0.38	0.45 0.42	0.45
0.243 0.171	0.274 0.206	0.303 0.245	0.330 0.274	0.354 0.306	0.370 0.337	0.362
0.184 0.116	0.202 0.138	0.217 0.158	0.231 0.178	0.243 0.198	0.245 0.215	0.226
0.156 0.092	0.169 0.107	0.179 0.125	0.187 0.137	0.193 0.150	0.191 0.161	0.167

三相 380/220V 三线式或各相负荷均匀的四线制铝导线  
表 2—19 负荷矩(kW·m)与电压损失率对照表(cosp=1)

导线截面 (mm <sup>2</sup> )	负荷矩(kW·m)									
	2.5	4	6	10	16	25	35	50	70	95
0.2	23	37	55.6	92.6	146	232	324	463	648	878
0.4	46.3	74.2	111	186	296	463	650	926	1298	1761
0.6	69.5	111	167	276	445	695	975	1388	1947	2640
0.8	92.5	148	222	371	593	926	1300	1850	2595	3520
1.0	116	185	278	463	741	1158	1620	2315	3241	4390
1.2	138	222	333	556	890	1390	1945	2775	3890	5270
1.4	161	259	388	648	1036	1640	2270	3235	4540	6150
1.6	184	296	444	742	1185	1851	2592	3700	5180	7035
1.8	206	333	499	834	1333	2082	2918	4165	5840	7920
2.0	232	370	555	927	1481	2314	3240	4630	6480	8800
2.2	252	407	610	1018	1629	2548	3568	5008	7140	9675
2.4	276	444	666	1112	1778	2780	3890	5550	7780	10540
2.6	300	482	722	1205	1925	3008	4220	6002	8440	11430
2.8	324	518	778	1298	2075	3240	4540	6480	9080	12310
3.0	347	555	833	1391	2221	3475	4865	6950	9740	13200
3.2	370	593	889	1484	2370	3700	5190	7402	10380	14080
3.4	390	630	944	1576	2520	3938	5515	7865	11020	14950
3.6	416	667	998	1670	2668	4170	5840	8340	11680	15850
3.8	439	704	1055	1761	2812	4400	6165	8795	12320	16705
4.0	463	740	1110	1854	2962	4628	6480	9260	12960	17600
4.2	485	778	1160	1947	3110	4865	6810	9720	13610	18480
4.4	509	815	1221	2040	3258	5009	7140	10180	14260	19350
4.6	532	852	1278	2132	3408	5325	7460	10650	14920	20210
4.8	555	888	1334	2224	3557	5551	7780	11100	15600	21100
5.0	578	926	1388	2316	3702	5784	8100	11560	16230	21980

表 2-20 三相 380/220V 三线式或各相负荷均匀的四线制铜导线  
负荷矩(kW·m)与电压损失率对照表(cosφ=1)

电压损失率(%)	导线截面 (mm <sup>2</sup> )		负荷矩											
	1.5	2.5	4	6	10	16	25	35	50	70	95			
0.2	23	38.5	62	92.4	154	246	385	539	770	1078	1463			
0.4	46.2	77	123	185	308	492	770	1078	1540	2156	2926			
0.6	69.3	116	185	277	462	739	1150	1617	2310	3234	4389			
0.8	92.4	154	246	369	616	985	1540	2156	3080	4312	5852			
1.0	116	193	308	462	770	1232	1925	2695	3850	5390	7315			
1.2	139	231	370	554	924	1478	2310	3234	4620	6468	8778			
1.4	162	270	431	647	1078	1724	2695	3773	5390	7546	10241			
1.6	185	308	493	739	1232	1971	3080	4312	6160	8624	11704			
1.8	208	347	554	832	1386	2217	3465	4851	6930	9702	13167			
2.0	231	385	616	924	1540	2464	3850	5390	7700	10780	14630			
2.2	254	424	668	1016	1694	2710	4235	5929	8470	11858	16093			
2.4	277	462	729	1109	1848	2950	4620	6468	9240	12936	17556			
2.6	300	501	791	1201	2002	3204	5006	7007	10010	14014	19019			
2.8	323	539	851	1244	2156	3449	5390	7546	10780	15092	20482			
3.0	347	578	914	1386	2310	3696	5775	8085	11550	16170	21945			
3.2	366	616	976	1478	2464	3742	6160	8624	12320	17248	23408			
3.4	389	655	1037	1571	2618	4188	6545	9163	13090	18326	24871			
3.6	412	693	1099	1663	2772	4435	6930	9702	13860	19404	26334			
3.8	435	732	1160	1756	2826	4681	7315	10241	14630	20472	27797			
4.0	458	770	1222	1848	3080	4928	7700	10780	15400	21560	29260			
4.2	481	809	1294	1940	3234	5174	8085	11319	16170	22638	30723			
4.4	504	847	1345	2033	3388	5420	8470	11858	16940	23716	32186			
4.6	527	886	1407	2125	3542	5667	8855	12397	17710	24794	33694			
4.8	550	924	1468	2218	3696	5913	9240	12936	18480	25872	35112			
5.0	574	963	1530	2310	3850	6160	9625	13475	19250	26950	36575			

单相 220V 两线制铝导线负荷矩(kW·m)  
表 2—21 与电压损失率对照表

电压损失率(%)	导线截面 (mm <sup>2</sup> )	负荷矩					
		2.5	4	6	10	16	25
0.2		3.9	6.2	9.3	15.5	24.8	38.8
0.4		7.8	12.4	22.5	31	49.5	77.5
0.6		11.6	18.6	27.9	46.5	74.3	116
0.8		15.5	24.8	37.2	62	99	155
1.0		19.4	31	46.5	77.5	124	194
1.2		23.2	37.2	55.8	93	149	232
1.4		27.4	43.4	65.1	108	174	271
1.6		31	49.6	74.5	124	198	310
1.8		34.8	55.8	83.7	140	223	348
2.0		38.8	62	93	155	248	388
2.2		42.6	68.2	102	171	272	426
2.4		46.4	74.4	112	186	297	465
2.6		50.4	80.6	121	202	322	504
2.8		54.2	86.8	131	217	347	543
3.0		58.1	93	140	233	372	582
3.2		62	99.2	149	248	397	620
3.4		65.8	105	159	263	422	658
3.6		69.7	112	168	279	446	697
3.8		73.6	118	177	294	471	737
4.0		77.5	124	186	310	496	775
4.2		81.4	130	196	325	521	814
4.4		85.2	137	205	341	545	850
4.6		89	143	214	356	570	892
4.8		93	149	224	372	595	930
5.0		96.8	155	233	387	619	968



表 2—22 单相 220V 两线制铜导线负荷矩(kW·m)  
与电压损失率对照表( $\cos\varphi = 1$ )

电压损失率(%)	导线截面 (mm <sup>2</sup> )						
	1	1.5	2.5	4	6	10	16
0.2	2.6	3.8	6.4	10.3	15.4	25.6	41
0.4	5.1	7.7	12.9	20.5	30.7	51.3	82
0.6	7.7	11.5	19.3	30.8	46.1	76.9	123
0.8	10.4	15.4	25.3	41	61.4	103	164
1.0	12.8	19.2	32.2	51.3	76.8	128	205
1.2	15.4	23.1	38.6	61.6	92.1	154	246
1.4	17.9	26.9	45.1	71.8	108	180	287
1.6	20.5	30.8	51.5	82.1	123	205	328
1.8	23	34.6	58	92.3	138	231	369
2.0	25.6	38.4	64.4	103	154	256	410
2.2	28.2	42.3	70.8	113	169	282	451
2.4	30.7	46.1	77.3	123	184	308	492
2.6	33.3	50	83.7	133	200	334	533
2.8	35.8	53.8	90.2	144	215	360	574
3.0	38.4	57.7	96.6	154	230	386	615
3.2	41	61.5	103	164	246	411	656
3.4	43.5	65.4	109	174	261	437	697
3.6	46.1	69.2	116	185	276	463	738
3.8	48.6	73	122	195	292	488	779
4.0	51.2	76.9	129	205	307	514	820
4.2	53.8	80.7	135	215	323	540	861
4.4	56.3	84.6	142	226	338	565	902
4.6	58.9	88.4	148	236	353	591	943
4.8	61.4	92.3	155	246	369	616	984
5.0	64	96.1	161	257	384	642	1025

### 九、380/220V 系统中零线电位升高的计算

#### 1. 电流在零线阻抗上引起的电压降计算

(1) 单相供电:如图 2—19 所示。零线上负载端的  $O'$  的电位为

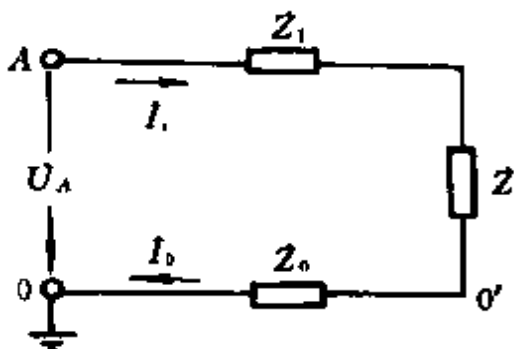


图 2—19 单相供电

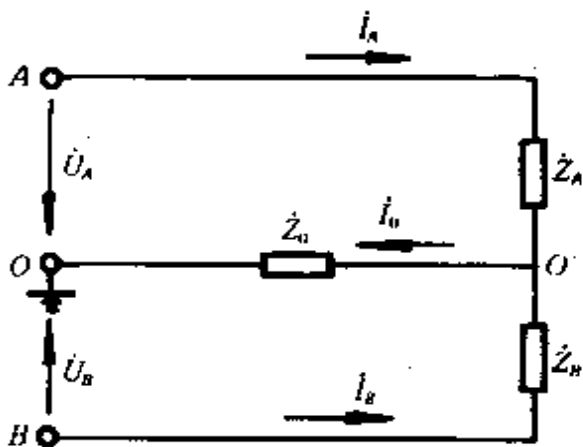
$$\varphi_{O'} = U_{O'O} = I_Z Z_0$$

式中:  $I_Z$ ——负载电流(A);

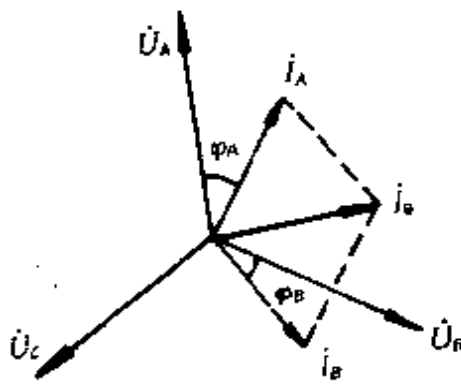
$Z_0$ ——零线阻抗( $\Omega$ )。

(2) 两相三线制供电:如图 2—20 所示。零线上的电流为

$$I_0 = I_A + I_B$$



(a)



(b)

图 2—20 两相三线制供电

(a) 电路图 (b) 矢量图

当电源对称,负载对称时,电流的矢量图如图 2—20(b) 所示。零线电流为

$$I_0 = I_A + I_B$$

(3) 三相四线供电:如图 2—21 所示。当电源对称,负载对称时, $I_0 = 0$ 。否则,零线上的电流为

$$I_0 = U_{O'O} \dot{Y}_0$$

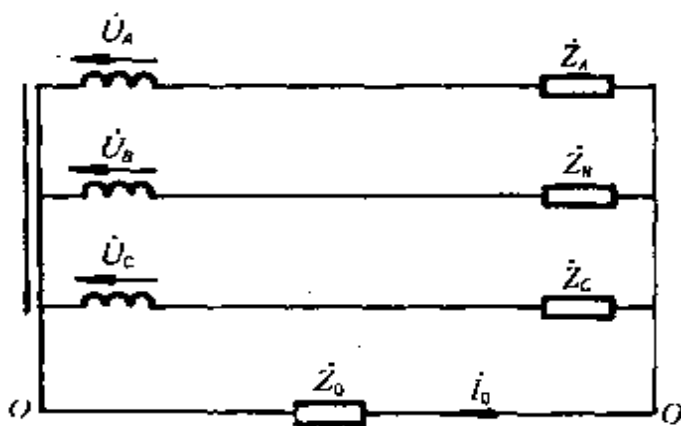


图 2—21 三相四线供电

零线上的电压降

$$U_{O'O} = \frac{U_A \dot{Y}_A + U_B \dot{Y}_B + U_C \dot{Y}_C}{\dot{Y}_A + \dot{Y}_B + \dot{Y}_C + \dot{Y}_0}$$

式中: $U_A, U_B, U_C$ ——分别为电源相电压(V);

$\dot{Y}_A, \dot{Y}_B, \dot{Y}_C$ ——分别为三相负载导纳(S);

$\dot{Y}_0$ ——零线导纳(S)。

## 2. 零线断线引起零线电位升高的计算

(1) 单相供电:如图 2—22 所示。显然,接通电源后,零线  $O'D$  上任何一点上的电位均与火线 A 的电位相同,即 220V。

(2) 两相三线制供电:如图 2—23 所示。零线  $O'O$  的电位升

高为

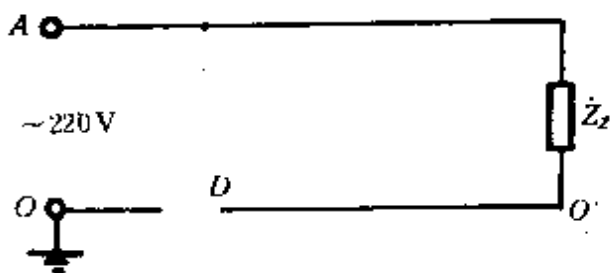


图 2—22 单相供电零线断路

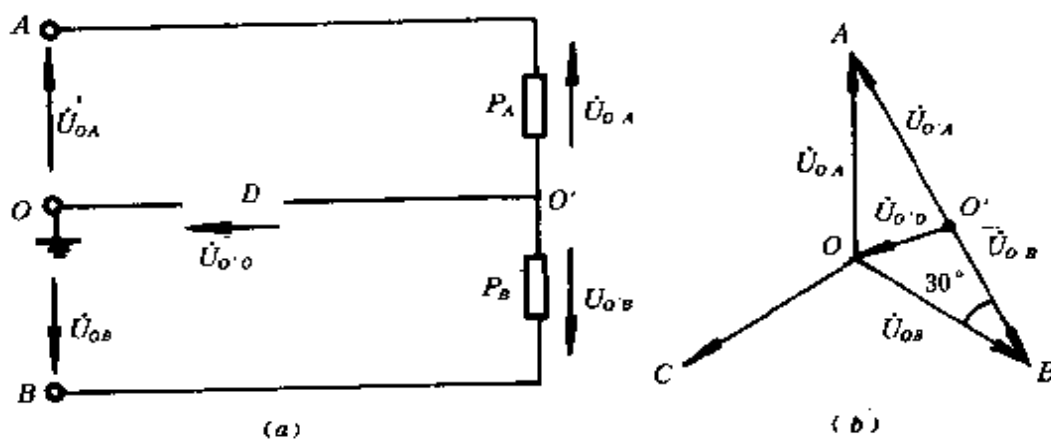


图 2—23 两相三线制供电零线断路

(a) 示意图; (b) 矢量图

$$U_{O'A} = \frac{P_B}{P_A + P_B} U_{AB} \quad U_{B'O'} = \frac{P_A}{P_A + P_B} U_{AB}$$

由图 2—23(b) 矢量图可得

$$U_{O'O} = \sqrt{U_{O'A}^2 + U_{O'B}^2 - 2U_{O'A}U_{O'B}\cos 30^\circ}$$

解以上三式可得

$$U_{OO} = \frac{\sqrt{(P_A/P_B)^2 - (P_A/P_B) + 1}}{1 + (P_A/P_B)} U_{OA}$$

上式表明,当两相负载  $P_A, P_B$  极不平衡时(如  $P_A \gg P_B$  或  $P_B \gg P_A$ ), 则  $U_{OO} = U_{OA}$ , 达到了相电压; 当  $P_A = P_B$  时, 则  $U_{OO} = 0.5U_{OA}$ 。

(3) 三相四线制供电, 当零线断路后, 断线处的电压  $U_{OO}$  为

$$U_{OO} = \frac{U_A \dot{Y}_A + U_B \dot{Y}_B + U_C \dot{Y}_C}{\dot{Y}_A + \dot{Y}_B + \dot{Y}_C}$$

若电源对称, 负载对称, 即  $\dot{Y}_A = \dot{Y}_B = \dot{Y}_C$ , 则

$$U_{OO} = \frac{1}{3}(U_A + U_B + U_C) = 0$$

若电源对称, 负载不对称, 则  $U_{OO} \neq 0$ , 不对称程度越大, 此电压越高。可以证明, 零线两端的电压在相电压  $U_A$  与  $0.5U_A$  之间变化。

### 十、相序对线路电流的影响计算

#### 1. 两相三线制供电

两相三线制供电给 220V 单相用电设备时, 负荷所接的方案不同, 零线中的电流也不同。

设有两台用电设备分别是  $S_1, \cos\varphi_1$  和  $S_2, \cos\varphi_2$ , 容量  $S_1 < S_2$  (即  $I_1 < I_2$ ),  $\cos\varphi_1 > \cos\varphi_2$  (即  $\varphi_1 < \varphi_2$ ), 则在下面两种不同接线方法下(图 2-24), 零线中的电流分别为

$$\text{方案一} \quad I_{0(I)} = [I_1^2 + I_2^2 - 2I_1I_2\cos(\varphi_1 - \varphi_2 + 60^\circ)]^{\frac{1}{2}}$$

$$\text{方案二} \quad I_{0(II)} = [I_1^2 + I_2^2 - 2I_1I_2\cos(\varphi_2 - \varphi_1 + 60^\circ)]^{\frac{1}{2}}$$

可见, 方案一接法较合理, 可保证零线的电流小于最大负荷相的电流。此时零线截面的选择必然是经济、合理的。

**例 2-10** 在 380/220V 两相三线照明线路上, 一相接 220V、2kW 电炉一只,  $\cos\varphi_1 = 1$ ; 另一相接 1.1kW 电动机一台,  $\cos\varphi_2 = 0.75, \eta = 0.8$ , 求零线电流。

解 电炉电流  $I_1 = \frac{2000}{200} = 9.09(\text{A})$

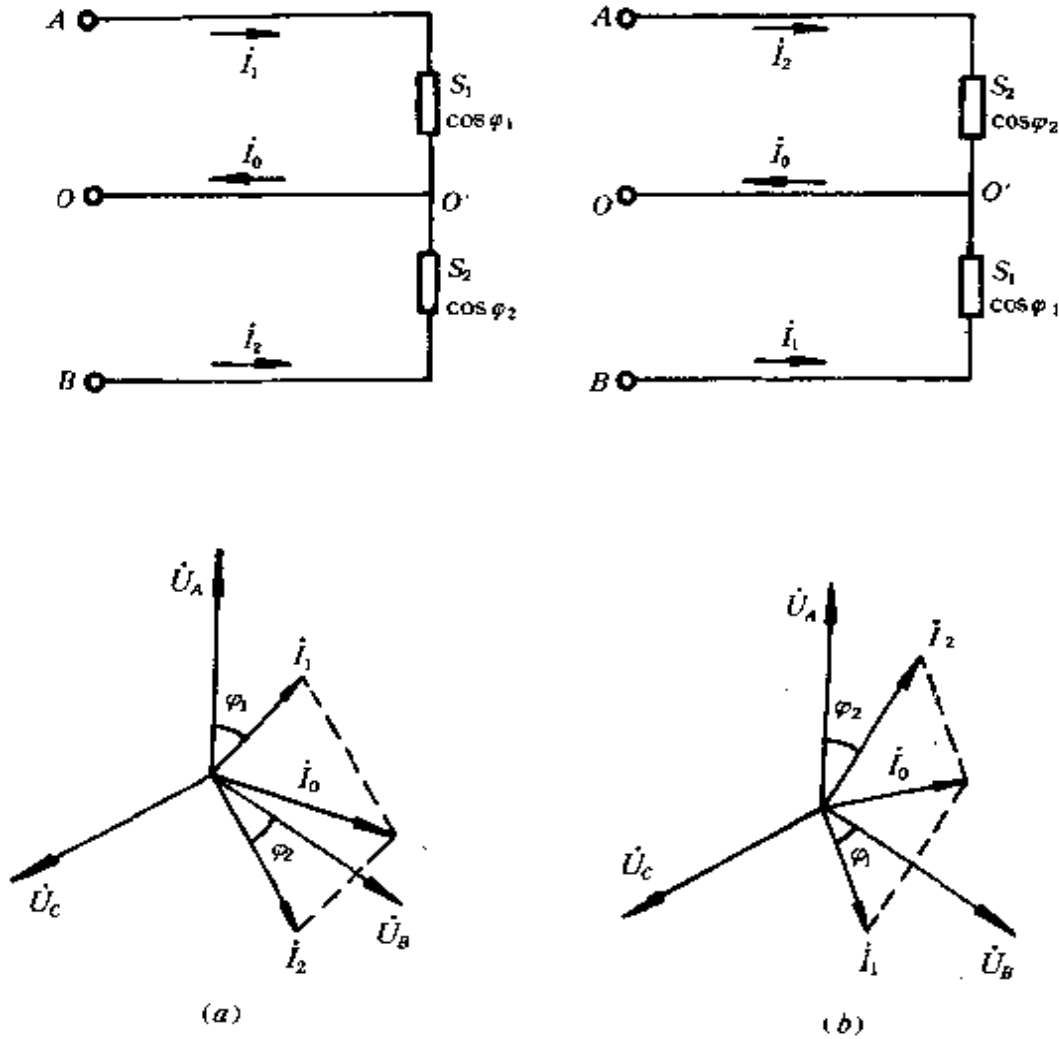


图 2—24 两相三线的两种接法  
(a) 方案一 (b) 方案二

$$\text{电动机电流 } I_2 = \frac{1100}{220 \times 0.75 \times 0.8} = 8.33(\text{A})$$

$$\cos \varphi_1 = 1 \quad \varphi_1 = 0, \quad \cos \varphi_2 = 0.75 \quad \varphi_2 = 41.4^\circ$$

当采用方案一时

$$I_{0(I)} = \left[ 9.09^2 + 8.33^2 - 2 \times 9.09 \times 8.33 \cos(-41.4^\circ + 60^\circ) \right]^{\frac{1}{2}}$$

$$= (152.02 - 151.44\cos 18.6^\circ)^{\frac{1}{2}} = 2.91(\text{A})$$

当采用方案二时

$$I_{0(II)} = \left[ \begin{array}{l} 9.09^2 + 8.33^2 - 2 \times 9.09 \\ \times 8.33\cos(41.4^\circ + 60^\circ) \end{array} \right]^{\frac{1}{2}}$$

$$= (152.02 - 151.44\cos 101.4^\circ)^{\frac{1}{2}} = 13.49(\text{A})$$

可见方案一的零线电流较小,仅 2.91A,故宜采用方案一,如图 2-25(a) 所示。

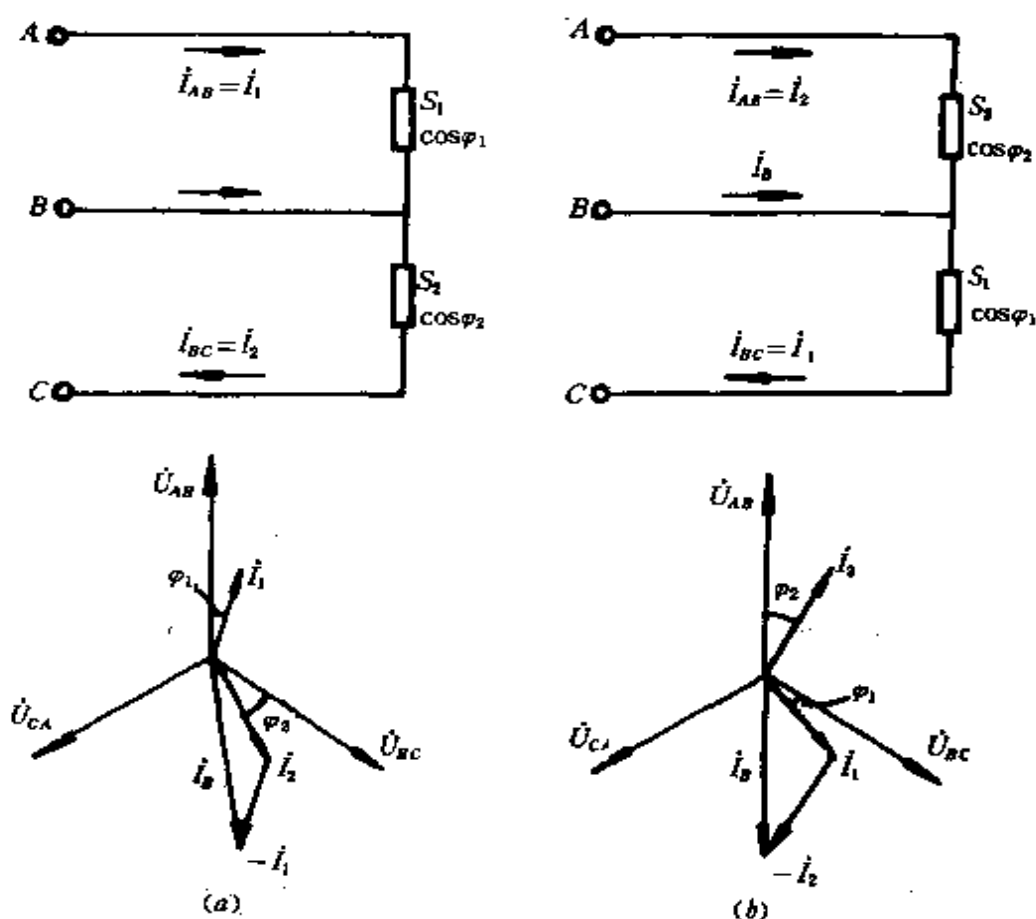


图 2-25 三相三线的两种接法

(a) 方案一 (b) 方案二

如果按规定取得相同的零线截面与相线截面,而相线导线载流量已接近最大负荷电流,则按第二方案接线,这时零线将会过载,因此,必须考虑负荷接线相序。

### 2. 三相三线制供电

三相三线制供电给 380V 单相用电设备时,与两相三线制供电给 220V 单相用电设备类似。

设有两台用电设备,  $S_1 < S_2$  (即  $I_1 < I_2$ ),  $\cos\varphi_1 > \cos\varphi_2$  (即  $\varphi_1 < \varphi_2$ ), 在下面两种不同接线方法下(图 2—25), 零线中的电流分别为

$$\text{方案一} \quad I_{B(1)} = [I_1^2 + I_2^2 + 2I_1I_2\cos(\varphi_2 - \varphi_1 - 60^\circ)]^{\frac{1}{2}}$$

$$\text{方案二} \quad I_{B(2)} = [I_1^2 + I_2^2 + 2I_1I_2\cos(\varphi_1 - \varphi_2 - 60^\circ)]^{\frac{1}{2}}$$

**例 2—11** 今有电热烘箱(10kW、380V、 $\cos\varphi_1 = 1$ ) 和电焊机(32kW、380V、 $\cos\varphi_2 = 0.52$ 、 $FZ\% = 65$ ) 各一台。试求最经济的三相三线制配电线路的截面。

**解**

(1) 将电焊机容量换算成负载持续率  $FZ\% = 100$  接通时间的容量:

$$S = \frac{S_e}{10} \sqrt{FZ\%} = \frac{32}{10} \times \sqrt{65} = 25.78(\text{kVA})$$

(2) 电热烘箱电流:

$$I_1 = P_e/U_e = 10/0.38 = 26.3(\text{A})$$

电焊机电流

$$I_2 = S/U_e = 25.78/0.38 = 67.8(\text{A})$$

(3) 采用方案二时,将电焊机接在 AB 相间,电热烘箱接在 BC 相间,则得 B 相电流为

$$I_B = [26.3^2 + 67.8^2 + 2 \times 26.3 \times 67.8 \times \cos(0^\circ - 58.67^\circ - 60^\circ)]^{\frac{1}{2}} = 59.9(\text{A})$$

若采用方案一,电焊机接在 BC 相间,电热烘箱接在 AB 相



间,则得 B 相电流为

$$I_B = [26.3^2 + 67.8^2 + 2 \times 26.3 \times 67.8 \times \cos(58.67^\circ - 0^\circ - 60^\circ)]^{\frac{1}{2}} = 94(\text{A})$$

可见,将电焊机接在 AB 相间,电热烘箱接在 BC 相间才是合理的,此时线路电流最大不超过 67.8A,可选用 BLV - 3 × 35 导线。

同样,对于三相四线制供电,其负荷连接也与相序有关,分析方法与计算可参照上述原则。

### 十一、电网谐波的影响及计算

电子整流装置、电弧炉、电解槽、电动机车等设备是电网的谐波源。这些谐波量对电网电压会造成坏的影响,致使供电质量下降,因此必须加以限制。

#### 1. 电压波形畸变率

$$\delta_n = \frac{U_n}{U_1} \times 100\%$$

$$\delta = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} U_n^2}}{U_1} \times 100\%$$

式中: $\delta_n$ ——第  $n$  次谐波电压正弦波形畸变率(%);

$\delta$ ——总电压正弦波形畸变率;

$U_n$ ——第  $n$  次谐波电压有效值(kV);

$U_1$ ——基波电压有效值(kV)。

电压波形畸变率也可按下式计算:

$$\delta_n = \frac{\sqrt{3}U_n n I_n}{10S_d}$$

式中: $U_n$ ——电网额定电压(kV);

$n$ ——谐波次数;

$I_n$ ——第  $n$  次谐波电流有效值(相电流)(A);

$S_d$ ——电网连接点的三相短路容量(MVA)。

对电压波形畸变率的要求如下:电网中任何一点的电压正弦波形畸变率不得超过表 2—23 所列的极限值(SD126—84 规定)。

表 2—23 电网电压正弦波形畸变率极限值(相电压)

用户供电电压(kV)	$\delta$ 极限值 (%)	各次谐波电压含量限制(%)	
		奇次	偶次
0.38	5	4	2
6 或 10	4	3	1.75
35 或 63	3	2	1
110	1.5	1	0.5

## 2. 谐波电流极限值

$$I_n = \frac{10S_d \delta_n}{\sqrt{3}U_n}$$

式中:符号同前。

当电网连接点的实际短路容量与表 2—24 所列数值不同时,可按下式修正:

$$I_{n1} = \frac{S_{d1}}{S_{d2}} I_{n \cdot uz}$$

式中: $I_{n1}$ ——对应于  $S_{d1}$  时第  $n$  次谐波的允许值(A);

$S_{d1}$ ——最小运行方式下电网连接点的实际短路容量(MVA);

$S_{d2}$ ——电网最小短路容量(MVA),见表 2—24;

$I_{n \cdot uz}$ ——第  $n$  次谐波电流允许值(A),见表 2—25。

表 2—24 计算谐波电流允许的电网最小短路容量

供电电压(kV)	短路容量(MVA)
0.38	10
6 或 10	100
35 或 63	260
110	750

表 2—25 用户注入电网谐波电流允许值(有效值)(A)

用户供电电压(kV)	谐 波 次 数																		
	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	
0.38	53	38	27	61	13	43	9.5	8.4	7.6	21	6.3	18	5.4	5.1	17	16	74	2	3
6 或 10	14	10	7.2	12	4.8	8.2	3.6	3.2	24	37	92	46	72	12	92	72	51	61	5
35 或 63	5.4	3.6	2.7	4.3	2.1	13	11	61	21	12	91	12	51	50	70	71	30	60	6
110 及以上	4.9	3.9	3	4	2	2.8	1.2	1.1	1	2.7	1	3	1.4	1.3	2.1	2.1	1.1	1	1

若新谐波源用户要接入电网,必须保证电网连接点原有谐波电压正弦波畸变率不超过表 2—23 规定值,且新注入各次谐波电流不超过表 2—25 的允许值。否则应采取措施。

3. 电压波动允许值

$$U_v = \frac{U_{max} - U_{min}}{U_e} \times 100\%$$

式中:  $U_v$ ——电压波动允许值(对冲击负荷)(%) ;

$U_{max}$ ——公共供电点电压均方根最大值(kV);

$U_{min}$ ——公共供电点电压均方根最小值(kV);

$U_e$ ——同前。

由冲击负荷产生的电压波动允许值见表 2—26(GB12326—90 规定)

表 2—26 冲击负荷产生的电压波动允许值  $U_v$

额定电压(kV)	$U_v$ (%)
10 及以下	2.5
35 ~ 110	2
220 及以上	1.6

#### 4. 电压闪变允许值

$$\Delta U_{10} = \sqrt{\sum (\alpha_f \cdot \Delta U_f)^2}$$

式中： $\Delta U_{10}$ ——等效频率为 10Hz 的电压波动幅度，其允许值见表 2—27；

$\alpha_f$ ——波动频率为  $f$  的闪变视感系数，见表 2—28；

$\Delta U_f$ ——电压波动中频率为  $f$  的分量。

表 2—27 《GB12326—90》规定的  $\Delta U_{10}$  允许值

应用场合	$\Delta U_{10}$ 允许值(%)
对照明要求较高的白炽灯负荷	0.4 (推荐值)
一般性照明负荷	0.6 (推荐值)

表 2—28  $\alpha_f$  与  $f$  的关系

$f$ (Hz)	0.01	0.05	0.10	0.50	2.00	3.00
$\alpha_f$	0.026	0.055	0.075	0.169	0.260	0.653
$f$ (Hz)	5.00	10.00	15.00	20.00	30.00	
$\alpha_f$	0.780	1.000	0.845	0.655	0.357	

#### 5. 不平衡电流允许值

不平衡电流产生的负序电流对发电机影响极大。

(1) 发电机允许的持续不平衡电流：发电机允许的持续不平衡电流与其容量、转子结构、冷却方式等有关。对于间接冷却（空冷、氢冷）式，一般  $I_2/I_e$  为 10% ( $I_2$ —负序电流)，直接冷却式一般为 3 ~ 8%。

(2) 发电机允许的短时不平衡电流：

$$I_2^2 \cdot t \leq A$$

式中： $I_2$ ——基波负序电流的标么值；

$t$ ——持续时间(s)；

$A$ ——允许值，为 5 ~ 30(发电机愈大， $A$  值愈小)。

### 十二、民用住宅电气负荷的计算

在改造或新建住宅时，用户可根据自己的用电需要提出要求，请设计单位或专业人员进行电气设计。然而，在统一设计的一般的民用住宅，设计单位通常采用以下三种简化的方法来计算设备容量。

#### 1. 单位建筑面积法

即按下面的标准进行单位面积耗电量估算：

(1) 具有电热水器的住宅：

$$P = p_1 S = 20S$$

(2) 具有电炊器具的住宅：

$$P = p_2 S = 30S$$

(3) 既有电炊器具，又有空调器的住宅：

$$P = p_3 S = 90S$$

式中： $P$ ——计算负荷(kW)；

$p_1、p_2、p_3$ ——单位面积耗电量(kW/m<sup>2</sup>)；

$S$ ——总建筑面积(m<sup>2</sup>)。

#### 2. 户为基准法

(1) 各户用电水准较接近的住宅：

$$P = p_i n_i$$

(2) 各户用电水准很不相同的住宅:

$$P = p_1 n_1 + p_2 n_2 + p_3 n_3$$

式中:  $p_i$ ——每户用电设备容量(kW),一般水平的住宅,取  $P_1 = 1\text{kW}$ ;用电作主要炊事能源的住宅,取  $P_2 = 3\text{kW}$ ;有电热淋浴和空调的住宅,取  $P_3 = 6\text{kW}$ ;  
 $n$ ——用户数;  
 $n_1、n_2、n_3$ ——对应于用电设备容量为  $P_1、P_2$  和  $P_3$  的用户数。

### 3. 设计标准法

(1) 住宅照明标准:

大居室:白炽灯为 60W 或荧光灯为 40W。

小居室、小客厅:白炽灯为 40W 或荧光灯为 20W。

厨房:白炽灯为 25W。

厕所、卫生间、廊道:白炽灯为 15W。

楼梯间:白炽灯为 25 ~ 40W。

门厅:白炽灯为 25 ~ 60W。

管理房、修理间:荧光灯为 40W。

电梯机房、水泵房:白炽灯为 60W。

若采用壁灯照明时,应将按上述要求的容量增大一个等级或增加盏数。

计算荧光灯及其它有镇流器的电光源的设备时,应按下式计算:

$$P_y = k P_e$$

式中:  $P_y$ ——荧光灯及其它有镇流器的电光源的设备容量(W);

$P_e$ ——电光源的额定功率(W);

$k$ ——系数,荧光灯为 1.2;汞、钠灯为 1.1。

(2) 住宅电源插座标准:

大居室:两组插座(一组为单相三极式,一组为二极式)。

小居室、小客厅:各一组插座。

厨房、卫生间:各一组插座。

每个电源插座按 50W 计算。

确定了每户的设备容量  $P_a$  后,即可进行计算负荷  $P_{js}$  的计算,计算方法如下:

① 用户分支线路的计算负荷:

$$P_{js} = P_a$$

② 用户主干线的计算负荷:

$$P_{js} = K_x P_a$$

③ 由三相电源供电,且负荷不均匀的民用住宅:

$$P_{js} = 3K_x P_{a-\max}$$

式中: $K_x$ ——设备需要系数,一般民用住宅,取 0.6 左右;对以电作炊事能源的住宅,取 0.8 ~ 0.9;

$P_{a-\max}$ ——三相负荷中功率最大一相的设备容量(kW)。

### 第三节 工厂用电量计算

#### 一、用电设备、车间和全厂计算负荷的确定

计算负荷是按发热条件选择供电系统元件而需要计算的负荷功率或负荷电流,是用来代替实际变动负荷的一种假想负荷。用电设备的计算负荷和车间、全厂计算负荷的确定,是设计工厂供电的重要依据,同时也是检验工厂供电是否经济合理的一种手段。

计算负荷的确定方法有“需要系数法”、“二项式法”、“ABC法”等,计算结果都较相近。这里只介绍“需要系数”法。

设某工厂的供电系统如图 2—26 所示。

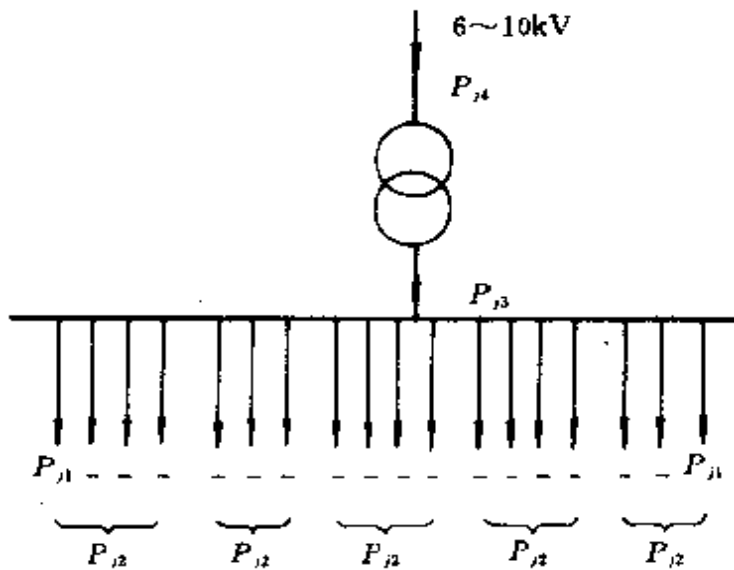


图 2—26 某工厂供电系统

1. 用电设备容量及单台设备计算负荷的确定

(1) 用电设备的设备容量  $P_s$  :

① 长期工作制电动机的设备容量,是指其铭牌上的额定功率  $P_e$ 。即

$$P_s = P_e$$

② 反复短时工作制电动机的设备容量,是指统一换算到负载持续率(或称暂载率)  $FZ = 25\%$  时的额定功率,若其  $FZ$  不等于  $25\%$  时,应按下式换算:

$$P_s = \sqrt{\frac{FZ}{FZ_{25}}} \cdot P_e = 2P_e \sqrt{FZ}$$

式中:  $P_s$  —— 换算到  $FZ_{25} = 25\%$  电动机的设备容量(kW);

$FZ$  —— 铭牌上的负载持续率(%);

$P_e$  —— 电动机额定功率(kW)。

负载持续率定义:

$$FZ = \frac{t_g}{t_g + t_r} \times 100\%$$

式中:  $t_g$  —— 每周期的工作时间;



$t_T$ ——每周期的停歇时间。

$t_g + t_T$  为工作周期。根据我国国家技术标准规定,工作周期以 10min 为计算依据。如吊车电动机的标准负载持续率有 15%、25%、40% 及 60% 四种。

③ 电焊机的设备容量:电焊机及电焊装置的设备容量,是指统一换算到负载持续率  $FZ = 100\%$  时的额定功率,若其  $FZ$  不等于 100% 时,应按下式换算:

$$P_s = \sqrt{FZ} S_e \cos\varphi_e \text{ kW}$$

式中: $S_e$ ——交流电焊变压器的额定视在功率(kW);

$FZ$ ——与  $S_e$  相对应的铭牌负载持续率(%),我国电焊机的负载持续率:50%、65%、75% 及 100%;

$\cos\varphi_e$ ——在  $S_e$  时的额定功率因数。

④ 电炉变压器的设备容量(是指额定功率因数时的额定功率),即

$$P_s = S_e \cos\varphi_e$$

式中: $S_e$ ——电炉变压器的额定视在容量(kVA);

$\cos\varphi_e$ ——电炉变压器的额定功率因数。

⑤ 整流设备的设备容量:

$$P_s = U_z I_z$$

式中: $U_z$ 、 $I_z$ ——分别为整流设备输出的额定直流电压和电流(kV、A)。

⑥ 成组用电设备的设备容量:

$$P_{s2} = \sum_{i=1}^m P_{si}$$

式中: $m$ ——单台用电设备台数。

⑦ 照明设备容量:

白炽灯、碘钨灯  $P_s = P_e$

荧光灯  $P_s = 1.2P_e$

高压汞灯  $P_s = (1.08 \sim 1.10)P_e$ 。

式中： $P_e$ ——灯泡铭牌功率(kW)。

前面的系数是考虑了镇流器的损耗。

在初步设计时，照明设备容量可按单位面积照明容量法来估算。即

$$P_s = A\omega$$

式中： $A$ ——建筑物平面面积(m<sup>2</sup>)；

$\omega$ ——单位容量(W/m<sup>2</sup>)。

一般工厂车间及有关建筑物的照明容量，见表 2—29。若要细算，可参见第十六章照明计算。

表 2—29 单位建筑面积照明容量

房间名称	功率指标 (W/m <sup>2</sup> )	房间名称	功率指标 (W/m <sup>2</sup> )
金工车间	6	各种仓库(平均)	5
装配车间	9	生活间	8
工具修理车间	8	锅炉房	4
金属结构车间	10	机车库	8
焊接车间	8	汽车库	8
锻工车间	7	住宅	4
热处理车间	8	学校	5
铸钢车间	8	办公楼	5
铸铁车间	8	单身宿舍	4
木工车间	11	食堂	4
实验室	10	托儿所	5
煤气站	7	商店	5
压缩空气站	5	浴室	3

注：按白炽灯计算，仅供粗略估算时参考。

(2) 单台用电设备的计算负荷  $P_{js1}$  的确定:

① 对于不需计及效率的单台用电设备为

$$P_{js1} = P_s$$

② 对于需计及效率的单台用电设备(如电动机等)为

$$P_{js1} = P_s / \eta$$

式中: $\eta$ ——用电设备的效率。

### 2. 用电设备计算负荷的确定

当求出各用电设备的设备容量  $P_{js1}$  之后,就可以按需要系数表上的分类方法详细地分成若干组,进行用电设备组的负荷计算。用电设备组的计算负荷的计算公式如下:

$$\text{有功计算负荷 } P_{js2} = k_x \Sigma P_{js1}$$

$$\text{无功计算负荷 } Q_{js2} = P_{js2} \text{tg}\varphi$$

$$\text{视在计算负荷 } S_{js2} = \sqrt{P_{js2}^2 + Q_{js2}^2}$$

式中: $\Sigma P_{js1}$ ——该用电设备组内的设备容量总和,但不包括备用设备容量(kW);

$K_x$ ——该用电设备组的需要系数,参表 2—30 ~ 表 2—33;

$\text{tg}\varphi$ ——与运行功率因数角相对应的正切值。

表 2—30 用电设备组的需要系数及功率因数表

用电设备名称	需要系数 $K_x$	$\cos\varphi$	$\text{tg}\varphi$
机械和冶金工业 生产机床的单独传动装置; 金属热加工车间大批、流水作 业生产	0.27	0.65	1.17

(续表)

用电设备名称	需要系数 $K_x$	$\cos\varphi$	$\lg\varphi$
金属冷加工车间大批、流水作业生产	0.2	0.65	1.17
金属冷加工车间小批、单独生产	0.18	0.65	1.17
木加工车间的一般负荷	0.22	0.65	1.17
木加工车间的重负荷	0.35	0.65	1.17
生产用通风机	0.7	0.8	0.75
卫生用通风机	0.65	0.8	0.75
泵及电动发电机	0.7	0.8	0.75
铸工、冷作车间间歇工作的吊车	0.2	0.5	1.73
加工、装配、修理车间间歇工作吊车	0.15	0.5	1.73
间歇运行工作制的生产机械	0.2 ~ 0.4	0.5	1.73
铸工车间内的连续运输设备及整砂机：			
非联锁的	0.5	0.75	0.88
联锁的	0.65	0.75	0.88
电阻炉、干燥柜、加热器	0.8	0.95	0.33
实验室内小型加热器	0.7	1.0	0
低频感应电炉	0.8	0.35	2.68
高频感应电炉	0.8	0.1	9.95

(续表)

用电设备名称	需要系数 $K_x$	$\cos\varphi$	$\lg\varphi$
电弧炉	0.9	0.87	0.57
单头焊接电动发电机	0.35	0.6	1.33
多头焊接电动发电机、 铆钉加热机	0.5 ~ 0.9	0.65	1.17
单头手动弧焊变压器	0.35	0.35	2.68
多头手动弧焊变压器	0.7 ~ 0.9	0.5	1.73
自动弧焊变压器	0.5	0.5	1.73
点焊机、缝焊机	0.35	0.6	1.33
对焊机	0.35	0.7	1.02
高频发电机	0.7 ~ 0.8	0.7 ~ 0.8	1.02 ~ 0.75
真空管振荡器	0.8	0.7 ~ 0.8	1.02 ~ 0.75
磁力探伤机:			
发电机	0.7	0.8	0.75
变压器	0.3	0.4	2.29
整流器	0.7	1.0	0
退磁机	0.4	0.55	1.52
超声波探伤器	0.7	0.7	1.02
硒整流器	0.7	0.7	1.02
X光设备	0.4 ~ 0.5	0.5 ~ 0.55	1.73 ~ 1.52
机床试验台	0.1	0.5	1.73
电线电缆制造业:			
拔丝机、绞线机、包纱机、 包纸机、铠装机	0.4	0.7	1.02
压延机及其辅助机械	0.5	0.7	1.02

(续表)

用电设备名称	需要系数 $K_x$	$\cos\varphi$	$\text{tg}\varphi$
制漆及漆包线机床绕线机	0.4	0.65	1.17
熔铜车间的重型机床用电动机	0.4	0.65	1.17
照明:			
生产厂房(有天然采光)	0.8~0.9	1.0	0
生产厂房(无天然采光)	0.9~1.0	1.0	0
办公楼	0.7~0.8	1.0	0
设计室	0.9~0.95	1.0	0
仓库	0.5~0.7	1.0	0
锅炉房	0.9	1.0	0
宿舍区	0.6~0.8	1.0	0
室外照明	1.0	1.0	0
事故照明	1.0	1.0	0

表 2—31 3~6~10kV 高压用电设备  
需要系数及功率因数表

高压用电设备组名称	需要系数 $K_x$	$\cos\varphi$	$\text{tg}\varphi$
电弧炉变压器	0.92	0.87	0.57
铜炉	0.90	0.87	0.57
转炉鼓风机	0.70	0.80	0.75
水压机	0.50	0.75	0.88
煤气站、排风机	0.70	0.80	0.75

(续表)

高压用电设备组名称	需要系数 $K_x$	$\cos\varphi$	$\operatorname{tg}\varphi$
空压站压缩机	0.70	0.80	0.75
轧钢设备	0.80	0.80	0.75
氧气压缩机	0.80	0.80	0.75
试验电动机组	0.50	0.75	0.88
高压给水泵(感应电动机)	0.50	0.80	0.75
高压输水泵(同步电动机)	0.80	0.90	0.48
引风机、送风机	0.80 ~ 0.90	0.85	0.62
有色金属轧机	0.15 ~ 0.20	0.70	1.02

表 2—32 各种车间的低压负荷需要系数及功率因数参考表

车间名称	需要系数 $K_x$	$\cos\varphi$	$\operatorname{tg}\varphi$
铸钢车间(不包括电炉)	0.3 ~ 0.4	0.65	1.17
铸铁车间	0.35 ~ 0.4	0.7	1.02
锻压车间(不包括高压水泵)	0.2 ~ 0.3	0.55 ~ 0.65	1.52 ~ 1.17
热处理车间	0.4 ~ 0.6	0.65 ~ 0.7	1.17 ~ 1.02
焊接车间	0.25 ~ 0.3	0.45 ~ 0.5	1.98 ~ 1.73
金工车间	0.2 ~ 0.3	0.55 ~ 0.65	1.52 ~ 1.17
木工车间	0.28 ~ 0.35	0.6	1.33
工具车间	0.3	0.65	1.17
修理车间	0.2 ~ 0.25	0.65	1.17
落锤车间	0.2	0.6	1.33
废钢铁处理车间	0.45	0.68	1.08

(续表)

车间名称	需要系数 $K_x$	$\cos\varphi$	$\lg\varphi$
电镀车间	0.4 ~ 0.62	0.85	0.62
中央实验室	0.4 ~ 0.6	0.6 ~ 0.8	1.33 ~ 0.75
充电站	0.5 ~ 0.7	0.8	0.75
煤气站	0.5 ~ 0.7	0.65	1.17
氧气站	0.75 ~ 0.85	0.8	0.75
冷冻站	0.7	0.75	0.88
水泵站	0.5 ~ 0.65	0.8	0.75
锅炉房	0.65 ~ 0.75	0.8	0.75
压缩空气站	0.7 ~ 0.85	0.75	0.88
乙炔站	0.7	0.9	0.48
试验站	0.4 ~ 0.5	0.8	0.75
发电机车间	0.29	0.6	1.32
变压器车间	0.35	0.65	1.17
电容器车间(机械化运输)	0.41	0.98	0.19
高压开关车间	0.3	0.7	1.02
绝缘材料车间	0.41 ~ 0.5	0.8	0.75
漆包线车间	0.8	0.91	0.48
电磁线车间	0.68	0.8	0.75
线圈车间	0.55	0.87	0.51
扁线车间	0.47	0.75 ~ 0.78	0.88 ~ 0.8
圆线车间	0.43	0.65 ~ 0.7	1.17 ~ 1.02
压延车间	0.45	0.78	0.8
辅助性车间	0.3 ~ 0.35	0.65 ~ 0.7	1.17 ~ 1.02
电线厂主厂房	0.44	0.75	0.88
电瓷厂主厂房(机械化运输)	0.47	0.75	0.88
电表厂主厂房	0.4 ~ 0.5	0.8	0.75
电刷厂主厂房	0.5	0.8	0.75



表 2—33 各种工厂的全厂需要系数及自然功率因数参考表(数值偏大)

工厂类别	需要系数 $K_x$		最大负荷时功率因数 $\cos\varphi$	
	变动范围	建议采用	变动范围	建议采用
汽轮机制造厂	0.38 ~ 0.49	0.38	—	0.88
锅炉制造厂	0.26 ~ 0.33	0.27	0.73 ~ 0.75	0.73
柴油机制造厂	0.32 ~ 0.34	0.32	0.74 ~ 0.84	0.74
重型机械制造厂	0.25 ~ 0.47	0.35	—	0.79
机床制造厂	0.13 ~ 0.3	0.2	—	—
重型机床制造厂	0.32	0.32	—	0.71
工具制造厂	0.34 ~ 0.35	0.34	—	—
仪表仪器制造厂	0.31 ~ 0.42	0.37	0.8 ~ 0.82	0.81
滚珠轴承制造厂	0.24 ~ 0.34	0.28	—	—
量具刃具制造厂	0.26 ~ 0.35	0.26	—	—
电机制造厂	0.25 ~ 0.38	0.33	—	—
石油机械制造厂	0.45 ~ 0.5	0.45	—	0.78
电线电缆制造厂	0.35 ~ 0.36	0.35	0.65 ~ 0.8	0.73
电气开关制造厂	0.3 ~ 0.6	0.35	—	0.75
阀门制造厂	0.38	0.38	—	—
铸管厂	—	0.5	—	0.78
橡胶厂	0.5	0.5	0.72	0.72
通用机器厂	0.34 ~ 0.43	0.4	—	—
小型造船厂	0.32 ~ 0.5	0.33	0.6 ~ 0.8	0.7
中型造船厂	0.35 ~ 0.45	有电炉时取大值	0.7 ~ 0.8	有电炉时取大值
大型造船厂	0.35 ~ 0.4	有电炉时取大值	0.7 ~ 0.8	有电炉时取大值

(续表)

工厂类别	需要系数 $K_x$		最大负荷时功率因数 $\cos\varphi$	
	变动范围	建议采用	变动范围	建议采用
有色冶金企业	0.6 ~ 0.7	0.65	—	—
化学工厂	0.17 ~ 0.38	0.28	—	—
纺织工厂	0.32 ~ 0.6	0.5	—	—
水泥工厂	0.5 ~ 0.84	0.71	—	—
锯木工厂	0.14 ~ 0.3	0.19	—	—
各种金属加工 厂	0.19 ~ 0.27	0.21	—	—
钢结构桥梁厂	0.35 ~ 0.4	—	—	0.6
混凝土桥梁厂	0.3 ~ 0.45	—	—	0.55
混凝土轨枕厂	0.35 ~ 0.45	—	—	—

3. 车间配电干线及变电所低压母线上计算负荷的确定

有功计算负荷  $P_{js3} = K_p \Sigma P_{js2}$

无功计算负荷  $Q_{js3} = K_Q \Sigma Q_{js2}$

视在计算负荷  $S_{js3} = \sqrt{P_{js3}^2 + Q_{js3}^2}$

式中： $\Sigma P_{js3}$ 、 $\Sigma Q_{js3}$ ——各用电设备组的有功、无功计算负荷的总和(kW、kVar)；

$K_p$ 、 $K_Q$ ——分别为最大负荷时有功和无功负荷的同期系数，参见表2—34。

当变电所的低压母线上装有无功补偿电容时，其容量为 $Q_c$ (kVar)，则 $Q_{js3}$ 按下式计算：

$$Q_{js3} = K_Q \Sigma Q_{js2} - Q_c$$

表 2—34 配电干线及低压母线上负荷需要系数

应 用 范 围	$K_p = K_Q$
确定车间变电所低压母线的最大负荷时,所采用的有功负荷同期系数	
冷加工车间	0.7 ~ 0.8
热加工车间	0.7 ~ 0.9
动力站	0.8 ~ 1.0
确定配电所母线最大负荷时,所采用的有功负荷同期系数	
计算负荷小于 5000kW	0.9 ~ 1.0
计算负荷为 5000 ~ 10000kW	0.85
计算负荷超过 10000kW	0.8

注:当由全厂各车间的设备容量直接计算全厂最大负荷时,应同时乘以表中两种同期系数。

应用表 2—30 ~ 表 2—33 时须注意:

- (1) 以用电设备组为范围求计算负荷时,取表 2—30 及表 2—31 中的需要系数值;
- (2) 以车间为范围求计算负荷时,取表 2—32 中的需要系数值;
- (3) 以工厂为范围求计算负荷时,取表 2—33 中的需要系数值。

另外,需要系数  $K_x$  值有一定变动范围时,当设备台数多、使用率低,则取较小值,反之,则取较大值。

#### 4. 变电所中变压器高压侧计算负荷的确定

车间变电所中变压器高压侧计算负荷的计算公式如下:

$$P_{js4} = P_{js3} + \Delta P_b$$

$$Q_{js4} = Q_{js3} + \Delta Q_b$$

$$S_{js4} = \sqrt{P_{js4}^2 + Q_{js4}^2}$$

式中： $P_{js4}$ 、 $Q_{js4}$ 、 $S_{js4}$ ——车间变电所变压器高压侧的有功、无功和视在计算负荷(kW、kVar、kVA)；

$\Delta P_b$ 、 $\Delta Q_b$ ——分别为变压器的有功损耗和无功损耗(kW、kVar)。

一般可按下列经验公式估算：

$$\Delta P_b = 0.02S_{js3}$$

$$\Delta Q_b = 0.1S_{js3}$$

对于一般中小型企业而言， $S_{js4}$  实际上是全厂总计算负荷。

如果企业的供电系统还具有高压供电线路及总降压变电所，如图 2--27 所示，则全厂的负荷计算中，还应包括  $P_{js5}$ 、 $Q_{js5}$  和  $P_{js6}$ 、 $Q_{js6}$ 。计算方法同前。即全厂计算负荷逐级相加，只要注意乘以各级配电点的不同的需要系数就可以了。需要系数一般取 0.85~0.95，但它们的连乘积不得小于 0.8，由于愈趋向电源端负荷越平稳，所以对应的需要系数应越来越大。

### 5. 单相负荷换算成三相负荷的计算

当单相用电设备的总容量超过三相用电设备总容量的 15% 以上时，则需对单相负荷进行换算成三相负荷的计算，然后才能参与负荷计算。换算方法如下：

(1) 对于接在相电压的用电设备：

$$P_{dx} = 3P_{xx}$$

式中： $P_{dx}$ ——三相等效设备容量(kW)；

$P_{xx}$ ——接在相电压的单设备容量(kW)。

(2) 对于接在线电压的用电设备：

$$P_{dx} = \sqrt{3}P_d$$

式中： $P_d$ ——接在线电压的单相设备容量(kW)。

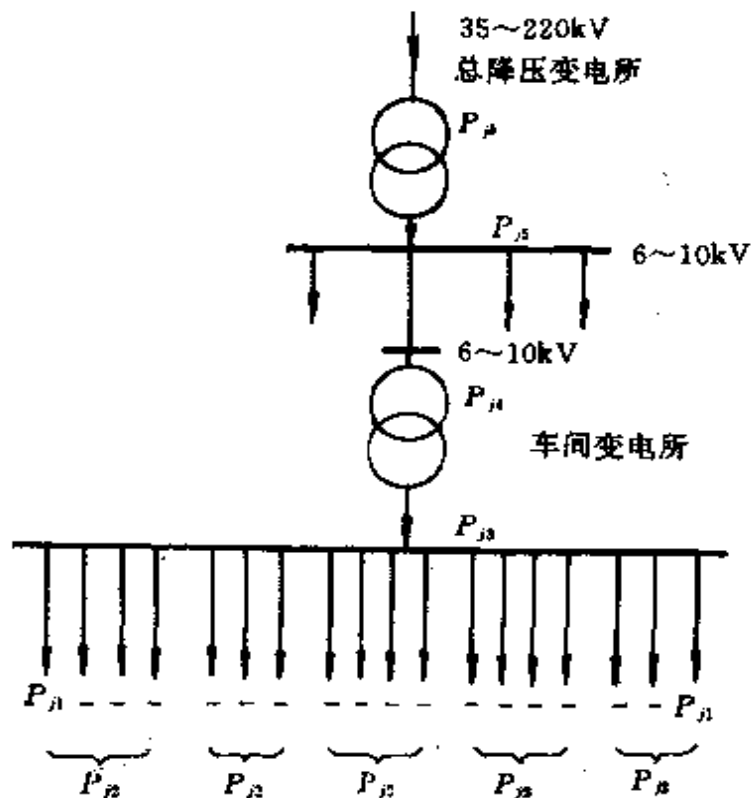


图 2—27 某工厂供电系统(有总降压变电所)

单相用电设备应尽量对称地接入三相电路,使供电网络的电流不平衡度小于 20%。如果三相负荷有明显的不对称时,应将接在线电压的容量都换算为接在相电压容量,并求出负荷最大的一相,然后按  $P_{dx} = 3P_{x,x}$  换算为三相等效负荷。

将接在线电压的容量换算为相电压容量的方法如下:

设接在线电压的单相用电设备有功和无功功率分别为  $P_{ab}$ 、 $P_{bc}$  和  $Q_{ab}$ 、 $Q_{bc}$ ,则换算在 B 相(该相负荷最大)的有功和无功容量分别为

$$P_b = P_{ab}K_{(ab)b} + P_{bc}K_{(bc)b}$$

$$Q_b = Q_{ab}K_{(ab)b} + Q_{bc}K_{(bc)b}$$

如果 A 相负荷最大,则换算在 A 相为

$$P_a = P_{ab}K_{(ab)a} + P_{ca}K_{(ca)a}$$

$$Q_a = P_{ab}K_{(ab)a} + P_{ca}K_{(ca)a}$$

式中的换算系数见表 2—35。

表 2—35 换算系数

换算系数	负荷功率因数								
	0.35	0.4	0.5	0.6	0.65	0.7	0.8	0.9	1.0
$K_{(ab)a}$ 、 $K_{(bc)b}$ 、 $K_{(ca)c}$	1.27	1.17	1.0	0.89	0.84	0.8	0.72	0.64	0.5
$K_{(ab)b}$ 、 $K_{(bc)c}$ 、 $K_{(ca)a}$	-0.27	-0.17	0.0	0.11	0.16	0.2	0.28	0.36	0.5
$K_{(ab)a}$ 、 $K_{(bc)b}$ 、 $K_{(ca)c}$	1.05	0.86	0.58	0.38	0.30	0.22	0.09	-0.05	-0.29
$K_{(ab)b}$ 、 $K_{(bc)c}$ 、 $K_{(ca)a}$	1.63	1.44	1.16	0.96	0.88	0.8	0.67	0.53	0.29

**例 2—12** 某金工车间用电设备清单见表 2—36。已知车间的平面面积为 520m<sup>2</sup>，试按需要系数法确定全车间的计算负荷。

**解：**

(1) 求设备容量：先将具有相近需要系数(查表 2—3)的用电设备分成以下五组，分别求出设备容量。

① 冷加工机床类设备容量：

查表 2—30，取  $K_x = 0.18$ ， $\cos\varphi = 0.65$ ， $\tan\varphi = 1.17$

$$\Sigma P_{N1} = 82 + 30.6 + 17 = 129.6(\text{kW})$$

表 2—36 金工车间用电设备清单

编号	设备名称	台数	额定容量(合计) kW	额定电压 V	相数	备 注
1	车、铣、刨床	12	82	380	3	
2	镗、钻床	5	30.6	380	3	
3	砂轮、锯床	4	17	380	3	$FZ = 40\%$
4	排风机	6	$6 \times 1.1$	380	3	
5	行车	1	$11 + 11 + 2.2$	380	3	
6	电焊机	2	$2 \times 22\text{kVA}$	380	3	$FZ = 65\%$ , $\cos\varphi = 0.5$
7	照明			220	1	按单位面积照 明容量法估算

② 起重机类设备容量:

查表 2—30, 取  $K_x = 0.15$ ,  $\cos\varphi = 0.5$ ,  $\text{tg}\varphi = 1.73$

起重机类设备容量是指统一换算到负载持续率  $FZ = 25\%$  时的额定容量, 故

$$P_{s2} = \sqrt{\frac{FZ}{FZ_{25}}} \cdot P_e$$

$$= \sqrt{\frac{0.4}{0.25}} \times (11 + 11 + 2.2) = 30.6(\text{kW})$$

③ 通风机类设备容量:

查表 2—30, 取  $K_x = 0.65$ ,  $\cos\varphi = 0.8$ ,  $\text{tg}\varphi = 0.75$

$$P_{s3} = 6 \times 1.1 = 6.6(\text{kW})$$

④ 电焊机类设备容量:

查表 2-30, 取  $K_x = 0.35$ ,  $\cos\varphi = 0.35$ ,  $\text{tg}\varphi = 2.68$

$$P_{s4} = \sqrt{FZ} S_e \cos\varphi_e$$

$$= \sqrt{0.65} \times 22 \times 0.5 = 8.87(\text{kW})$$

$$\Sigma P_{s4} = 2 \times 8.87 = 17.7(\text{kW})$$

⑤ 照明设备容量:

查表 2—30, 取  $K_x = 0.8$ ,  $\cos\varphi = 1$ ,  $\text{tg}\varphi = 0$

按单位面积照明容量法估算如下:

查表 2—29, 取  $\omega = 6\text{W}/\text{m}^2$ 。已知车间平面面积为  $520\text{m}^2$ ,

故

$$\Sigma P_{s5} = A\omega = 520 \times 6 = 3120(\text{W}) = 3.12\text{kW}$$

(2) 求用电设备组的计算负荷: 根据公式  $P_{js2} = K_x \Sigma P_{js1}$  和  $Q_{js2} = P_{js2} \text{tg}\varphi$  计算出用电设备组的计算负荷。

现将计算结果列于表 2—37。

### 二、工厂年电能需要量的计算

工厂年电能需要量的计算有以下几种方法:

#### 1. 单位产品耗电量法

(1) 工厂年有功电能需要量(简称年需电量):

$$A_p = \omega m$$

式中:  $A_p$ ——年有功电能需要量(kWh);

$\omega$ ——单位产品耗电量(kWh/单位产品),

可由有关设计单位根据实测统计资料确定,也可查有关设计手册;

$m$ ——产品年产量。

(2) 工厂年无功电能需要量:

$$A_Q = A_p \text{tg}\varphi_n$$

式中:  $A_Q$ ——年无功电能需要量(kVarh);

$\text{tg}\varphi_n$ ——工厂年平均功率因数角的正切值,考虑补偿后的年平均功率因数若取  $\cos\varphi_n = 0.85 \sim 0.95$ , 则相应的。

$$\text{tg}\varphi_n = 0.62 \sim 0.33。$$



表 2-37 金工车间负荷计算表

用电设备名称	台数	额定容量 $P_c$ (kW)	$\Sigma P_{js1}$ (kW)	需要系数 $K_x$	$\cos\varphi$	$\tan\varphi$	计算负荷		
							$P_{js2}$ (kW)	$Q_{js2}$ (kVar)	$S_{js2}$ (kVA)
冷加工机床	24	129.6	129.6	0.18	0.65	1.17	23.3	27.3	35.89
行车	1	11 + 11 + 2.2	30.6	0.15	0.5	1.73	4.59	7.94	9.17
排风机	6	6 × 1.1	6.6	0.65	0.8	0.75	4.29	3.22	5.36
电焊机	2	2 × 22kVA	17.7	0.35	0.35	2.68	6.2	16.6	17.72
照明		3.12	3.12	0.8	1	0	2.5	0	2.5
合计			187.62				40.88	55.06	70.69

2. 年最大负荷利用小时法

$$A_P = P_{\max} \cdot T_{\max} \cdot P$$

$$A_Q = Q_{\max} \cdot T_{\max} \cdot Q$$

式中： $P_{\max}$ 、 $Q_{\max}$ ——年最大有功功率和最大无功功率(kW、Kvar)；

$T_{\max} \cdot P$ 、 $T_{\max} \cdot Q$ ——年最大有功功率利用小时数和年最大无功功率利用小时数，参见2—38；

$A_P$ 、 $A_Q$ ——同前。

表 2—38 各种工厂计算年最大负荷利用小时数

工厂类别	计算年最大负荷年利用小时数	
	$T_{\max} \cdot P$	$T_{\max} \cdot Q$
化工厂	6200	7000
苯酚塑料工厂	7100	—
石油提炼工厂	7100	—
重型机械制造厂	3770	4840
机床厂	4345	4750
工具厂	4140	4960
滚珠轴承厂	5300	6130
起重运输设备厂	3300	3880
汽车、拖拉机厂	4960	5240
农业机械制造厂	5330	4220
仪器制造厂	3038	3180
汽车修理厂	4370	3200
车辆修理厂	3560	3660
电器制造厂	4280	6420
氮肥厂	7000 ~ 8000	—
各种金属加工厂	4355	5880
漂染厂	5710	6650

甲  
乙  
丙  
甲  
乙  
丙  
甲

### 3. 年平均负荷法

$$A_P = \alpha_n P_{\max} T \quad \text{kWh}$$

$$A_Q = \beta_n Q_{\max} T \quad \text{kWh}$$

式中： $\alpha_n$ 、 $\beta_n$ ——年平均有功和无功负荷系数，一般取  $\alpha_n = 0.7 \sim 0.75$ ， $\beta_n = 0.76 \sim 0.82$ ；

$T$ ——年实际工作小时数，其值因工厂的生产班制及设备检修期而异。该值的准确性对电能计算的影响较大。 $T$ 的参考值如下：一班制工厂， $T = 2300\text{h}$ ；二班制工厂， $T = 4600\text{h}$ ；三班制工厂， $T = 6900\text{h}$ ；全年连续工作， $T = 8760\text{h}$ 。

**例 2—13** 已知某电机制造厂全厂计算负荷  $P_{js} = 8500\text{kW}$ ，年平均功率因数为 0.8，求该厂全年有功和无功电能需要量。

**解** 查表 2—38 得  $T_{\max} \cdot P = 4280\text{h}$ ， $T_{\max} \cdot Q = 6420\text{h}$ 。取用计算负荷作为最大负荷，计算过程如下：

$$\begin{aligned} A_P &= P_{\max} T_{\max} \cdot P = P_{js} T_{\max} \cdot P \\ &= 8500 \times 4280 = 36.38 \times 10^5 \end{aligned}$$

由  $\cos\varphi = 0.8$ ，求得  $\text{tg}\varphi = 0.75$  故

$$Q_j = P_j \text{tg}\varphi = 8500 \times 0.75 = 6375(\text{kVar})$$

$$A_Q = Q_{\max} T_{\max} \cdot Q = 6375 \times 6420 = 40.93 \times 10^6(\text{kVarh})$$

**例 2—14** 某工具制造厂年用电量约 520.6 万 kWh，求该厂最大负荷约是多少？并估算变压器容量。设有功率因数补偿。

**解：**

(1) 查表 2—38 得  $T_{\max} \cdot P = 4140\text{h}$

$$P_{js} = P_{\max} = \frac{A_P}{T_{\max} \cdot P} = \frac{5206000}{4140} = 1257.5(\text{kW})$$

(2) 变电所配电变压器的计算容量为

$$S_{jst} = \frac{P_{\max}}{\cos\varphi} = \frac{1257.5}{0.92} = 1366.8(\text{kVA})$$

各种工厂的自然功率因数见表 2—33；采用无功补偿设备情况下，按  $\cos\varphi = 0.92$  计之。

为限制低压电器所承受的短路电流，并考虑提高供电可靠性以及经济运行等因素，可选二台 800kVA 的变压器。

#### 第四节 导线、电缆的选择及计算

##### 一、经济电流密度及计算

##### 1. 沿用的经济电流密度标准及计算公式推导

(1) 经济电流密度：对应于经济截面的电流密度称为经济电流密度。导线的经济截面由线路年计算支出费用最小的条件所决定。线路的年计算支出费用可写为

$$Z = Y_{\Sigma} + a_r F_L, \quad F_L = (F_0 + F_1 S)L$$

式中： $Z$ ——线路的年计算支出费用(元)；

$Y_{\Sigma}$ ——线路的年运行费用(元)；

$a_r$ ——标准经济效益系数；

$F_L$ ——线路投资(元)；

$F_0$ ——每千米线路投资中与导线截面无关的部分(元/km)；

$F_1$ ——每千米线路的每平方毫米截面的投资费用(元/km $\cdot$ mm $^2$ )；

$S$ ——导线截面(mm $^2$ )；

$L$ ——线路长度(km)。

线路的年运行费用可由下式表示：

$$Y_{\Sigma} = \frac{a}{100}(F_0 + F_1 S)L + 3I_{\max}^2 \frac{\rho L}{S} T_{\max} \beta \times 10^{-3}$$

式中： $a$ ——线路折旧及维修费的百分数；

$\beta$ ——电能损耗的校正电价，它不同于发电厂成本或售电

价格。其计算方法见后；

$\rho$ ——导线电阻率( $\Omega \cdot \text{mm}^2/\text{km}$ )；

$T_{\max}$ ——线路年最大负荷利用小时数；

$I_{\max}$ ——线路最大负荷电流(A)。

所以，线路的年计算支出费用可写成

$$Z = Y_{\Sigma} - a_x F_L = \frac{a}{100} (F_0 + F_1 S) L + 3I_{\max}^2 \frac{\rho L}{S} T_{\max} \beta \times 10^{-3} + \alpha_x (F_0 + F_1 S) L$$

$$\text{令 } \frac{dZ}{dS} = \frac{a F_1 L}{100} - 3I_{\max}^2 \frac{\rho L}{S^2} T_{\max} \beta \times 10^{-3} + \alpha_x F_1 L = 0$$

经整理后，得导线的经济截面为

$$S_j = I_{\max} \sqrt{\frac{3\rho T_{\max} \beta \times 10^{-3}}{F_1 \left( \frac{a}{100} + \alpha_x \right)}}$$

由此可得经济电流密度为

$$j_n = \frac{I_{\max}}{S_j} = \sqrt{\frac{F_1 \left( \frac{a}{100} + \alpha_x \right)}{3\rho T_{\max} \beta \times 10^{-3}}}$$

式中： $j_n$ ——经济电流密度(A/mm<sup>2</sup>)；

$S_j$ ——经济截面(mm<sup>2</sup>)。

(2) 电能损耗的校正电价：

$$\beta = b_y K_4 K_5 + \frac{K_z}{T_{\max}} \left( P + \frac{\alpha_1}{100} \right)$$

$$K_z = K_1 K_2 K_3 K_4 K_5 (1 + f)$$

式中： $b_y$ ——补充发电设备的煤耗费(元/kWh)；

$\alpha_1$ ——发、送、变电设备的年折旧及维修费的百分数；

$P$ ——线路输送功率(kW)；

$K_z$ ——补偿线路每千瓦功率损耗所需增加的发、送、变电

设备的投资。

$K_1$ ——每千瓦补充发电设备的投资；

$K_2$ ——线路同时系数,  $K_2 = \frac{\text{线路在系统最大负荷时的功率损耗}}{\text{线路的最大功率损耗}}$ ；

$K_3$ ——电力系统备用容量系数, 约为 1.1 ~ 1.2,

$$K_3 = \frac{\text{发电设备容量}}{\text{电力系统最大负荷}}$$

$K_4$ ——线路中功率损耗系数(网损系数)；

$K_5$ ——厂用电系数；

$f$ ——输送 1kW 电力所需电力网投资与 1kW 发电设备投资的比值。

我国现行的经济电流密度标准, 见表 2—39(于 1956 年由电力部制定)。

表 2—39 经济电流密度(A/mm<sup>2</sup>)

导线种类	年最大负荷利用小时数		
	3000 以下	3000 ~ 5000	5000 以上
裸铜线和母线	3.0	2.25	1.75
裸铝线及钢芯铝线和母线	1.65	1.15	0.9
铜芯电缆	2.5	2.25	2.0
铝芯电缆	1.92	1.73	1.54

## 2. 建议修正经济电流密度标准的必要性和推荐公式

表 2—39 标准一直沿用到现在。由于下述原因,该标准是到了须修正的时候了。

(1) 电能损耗价格已由过去的 0.04 元/kWh 上升到 0.06 ~ 0.07 元/kWh,甚至更高。送电线路单位导线费用随着导线、金具、钢材等价格的上升而增加很多。

(2) 在制订该标准时,我国还没有 300kV 以上的超高压送电线路,现在已出现超高压长送电线路,所以必须考虑电晕引起的电能损耗这一重要因素。

现有推荐采用年社会总消耗最小的方法对五六标准进行修正,得经济电流密度公式如下(推导过程从略):

$$j_n = \sqrt{\frac{1000(K_i - K_i F_j K_j + F_z) F_i}{3(T_{\max} + 8760 K_k) r_0 \delta}}$$

式中:  $j_n$  —— 经济电流密度(A/mm<sup>2</sup>);

$K_i$  —— 投资利用标准经济效果系数。建议对纯收入采用 0.1 ~ 0.15,对国民收入采用 0.18 ~ 0.26;

$F_j$  —— 线路的基本折旧率,国家有统一规定;

$K_j$  —— 基本折旧费年平均扣除系数,取 6.52 ~ 6.62;

$F_z$  —— 线路的综合折旧率,国家有统一规定;

$K_k$  —— 计及电晕引起的电能损耗的系数(电晕功率损耗与导线发热损耗之比);

$r_0$  —— 导线单位电阻( $\Omega/\text{km} \cdot \text{mm}^2$ );

$\delta$  —— 单位电价(元/kWh);

其它符号同前。

国外超高压送电线路电流密度参考值,见表 2—40。

**例 2—15** 已知一条 35kV 送电线路,导线采用钢芯铝线,  $T_{\max} = 5000\text{h}$ ,  $r_0 = 31.5\Omega/\text{km} \cdot \text{mm}^2$ ,  $\delta = 0.065$  元/kWh,  $F_i = 136$  元/ $\text{km} \cdot \text{mm}^2$ ,  $K_j = 6.62$ ,  $F_z = 0.026$ ,  $F_j = 0.018$ ,  $K_i$  取 0.15,  $K_k = 0$ ,求经济电流密度。

表 2—40 国外超高压送电线路电流密度(A/mm<sup>2</sup>)

电 压(kV)	长 线 路	短 线 路
275 ~ 300	0.6 ~ 0.9	1.0 ~ 1.4
330 ~ 345	0.5 ~ 0.8	0.8 ~ 1.05
380 ~ 400	0.55 ~ 0.8	0.8 ~ 1.0
500	0.7 ~ 0.75	0.8 ~ 1.0
750	0.7 ~ 1.0	

解 将上述已知数代入公式得

$$j_n = \sqrt{\frac{1000 \times (0.15 - 0.15 \times 0.018 \times 6.62 + 0.026) \times 136}{3 \times (5000 + 8760 \times 0) \times 31.5 \times 0.065}}$$

$$= 0.793(\text{A}/\text{mm}^2)$$

该数值比表 2—39 中标准 1.15 小很多。

目前,在未制订出新标准之前,可以这样考虑选用导线,即按表 2—39 标准选定的导线,加大一级取用。如按表 2—39 标准的经济电流密度选定的导线截面为 50mm<sup>2</sup>,则实际选用时可取 70mm<sup>2</sup>。

## 二、导线截面的选择

导线截面的选择方法,通常是先求出线路的工作电流,再按线路最大的工作电流不应大于导线的允许载流量,或根据线路年最大负荷利用小时数  $T_{\max}$ ,按经济电流密度求出导线截面,初选出标称导线,然后算出电压损失,作电压损失校验,同时校验机械强度。

### 1. 导线截面的选择计算及校验

(1) 按线路最大工作电流选择导线截面:就是按发热条件选择导线截面。要求线路最大的工作电流不大于导线的允许载流量。



导线载流量见附录 8 ~ 附录 17。对于架空导线的载流量，当环境温度不是 + 25°C 时，应乘以温度校正系数  $K$  (见表 2—41)。导线最高允许温度有 + 70°C 的和 + 90°C 的。

表 2—41 导线载流量温度校正系数  $K$

导线最高允许温度 $t_1$ (°C)	环 境 温 度 $t_2$ (°C)											
	-5	0	+5	+10	+15	+20	+25	+30	+35	+40	+45	+50
+70	1.29	1.24	1.2	1.15	1.11	1.05	1	0.94	0.88	0.81	0.74	0.67
+90	2.14	1.95	1.14	1.11	1.07	1.04	1	0.96	0.92	0.88	0.83	0.79

(2) 按经济电流密度选择导线截面：根据线路年最大负荷利用小时数  $T_{\max}$  和导线材料，由表 2—39 查得经济电流密度 (更合理的可参本节一中的推荐公式)，便可按线路的计算电流 (最大电流) 求出导线的截面  $S$ 。即

$$S = I_{\max} / j_n$$

为了方便起见，列出常用导线的经济负荷电流 (按表 2—39 中标准)，见表 2—42。

表 2—42 常用导线的经济负荷电流 (A)

导线规格	年最大负荷利用小时数		
	3000 以下	3000 ~ 5000	5000 以上
T—25	75	56	44
T—50	155	113	108
T—70	210	158	123
T—90	285	214	166
LGJ—25	41	29	23
LGJ—50	83	58	45
LGJ—95	157	109	89
LGJ—120	198	138	108

线路年最大负荷利用小时数  $T_{\max}$  可参考有关书籍的介绍。

通常一班制企业： $T_{\max} = 1800 \sim 2500\text{h}$ ；二班制企业： $T_{\max} = 2500 \sim 4500\text{h}$ ；三班制企业： $T_{\max} = 5000 \sim 7000\text{h}$ 。

(3) 按允许电压损失选择及校验导线、电缆截面；设线路沿线截面相同，则根据允许电压损失所选择导线、电缆的截面按下列公式计算：

公式一

$$S = \frac{\rho \sum_1^n PL}{U_e \cdot \Delta U_e}$$

公式二

$$\text{三相系统 } S = \frac{\sqrt{3} \rho \sum_1^n IL}{10U_e \cdot \Delta U \%}$$

$$\text{单相系统 } S = \frac{2\rho \sum_1^n IL}{10U_e \cdot \Delta U \%}$$

$$\Delta U_a = \Delta U_{ux} - \Delta U_r, \Delta U_r = \frac{\sum_1^n QX}{U_e} = \frac{x_c \sum_1^n QL}{U_e}$$

式中： $S$ ——导线截面( $\text{mm}^2$ )；

$\rho$ ——导线材料的电阻率( $\Omega \cdot \text{mm}^2/\text{km}$ )；

$U_e$ ——线路额定电压(kV)，对于三相系统为线电压，对于单相系统为相电压；

$P$ ——通过每段线路的有功功率(kW)；

$L$ ——每段线路的长度(km)；

$\Delta U_a$ ——线路电阻中的电压损失(V)；

$\Delta U_{ux}$ ——线路允许的电压损失(V)，见表 2—14；

$\Delta U_r$ ——线路电抗部分的电压损失(V)；

$x_0$ ——导线、电缆单位电抗( $\Omega/\text{km}$ );

$Q$ ——通过每段线路的无功功率(kVar),  $Q = P \tan \varphi$ ;

$I$ ——通过每段线路的电流(A);

$\Delta U\%$ ——线路允许的电压损失百分数,见表 2—14;

其它符号同前。

在截面尚未确定时,可先假定电抗值(平均值)。电缆的电抗约为  $0.08\Omega/\text{km}$ ;架空线的电抗为  $0.36 \sim 0.42\Omega/\text{km}$ 。

**例 2—16** 某 380V 三相配电网如图 2—28 所示,欲采用铜芯绝缘导线穿管敷设,允许电压损失为 5%,干线 AC 采用同一截面导线,试求干线 AC 和支线 BD 导线截面。

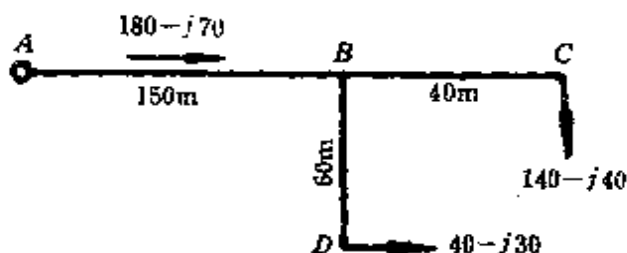


图 2—28 例 2—16 图

**解**

(1) 求干线 AC 的导线截面:查表 2—8 可知,铜芯绝缘导线穿管敷设时,其电抗值为  $0.06 \sim 0.1\Omega/\text{km}$ 。假设  $x_0 = 0.08\Omega/\text{km}$ ,则 AD 段由于电抗引起的电压损失为

$$\begin{aligned} \Delta U_{r,AD} &= \frac{x_0 \sum QL}{U_c} \\ &= \frac{0.08 \times (40 \times 0.04 + 70 \times 0.15)}{0.38} = 2.55(\text{V}) \end{aligned}$$

已知允许电压损失为

$$\Delta U_{ux} = \frac{380 \times 5}{100} = 19(\text{V})$$

则线路 AC 上电阻引起的电压损失为

$$\Delta U_{aAC} = \Delta U_{ux} - \Delta U_{rAC} = 19 - 2.55 = 16.45(\text{V})$$

线路 AC 的导线截面为

$$S = \frac{\rho \sum^i PL}{U_c \cdot \Delta U_{aAC}} = \frac{18.8 \times (140 \times 0.04 + 180 \times 0.15)}{0.38 \times 16.45} = 98(\text{mm}^2)$$

选取 BV—500—3 × 120mm<sup>2</sup> 铜导线, 查表 2—8,  $R_0 = 0.15\Omega/\text{km}$ ,  $x_0 = 0.06\Omega/\text{km}$ 。因此 AB 段实际电压损失为

$$\Delta U_{AB} = \frac{(180 \times 0.15 + 70 \times 0.06) \times 0.15}{0.38} = 12.32(\text{V})$$

(2) 求支路 BD 导线截面: 线路 BE 所允许的电压损失为

$$\Delta U_{uxBD} = \Delta U_{ux} - \Delta U_{AB} = 19 - 12.32 = 5.68(\text{V})$$

假设  $x_0 = 0.1\Omega/\text{km}$ , BD 支线由电抗引起的电压损失为

$$\Delta U_{rBD} = \frac{0.1 \times 30 \times 0.06}{0.38} = 0.47(\text{V})$$

BD 支线由电阻引起的电压损失为

$$\Delta U_{aBD} = 5.68 - 0.47 = 5.21(\text{V})$$

BD 支线的导线截面为

$$S_{BD} = \frac{\rho \sum^i PL}{U_c \cdot \Delta U_{aBD}} = \frac{18.8 \times 40 \times 0.06}{0.38 \times 5.21} = 22.79(\text{mm}^2)$$

选取 BV—500—3 × 35mm<sup>2</sup> 铜导线, 其  $x_0 = 0.064\Omega/\text{km}$ 。比假定的  $0.1\Omega/\text{km}$  小, 因此电压损失能满足要求。

(3) 按机械强度选择导线截面: 根据机械强度允许的最小截面, 见表 2—43。

表 2-43 根据机械强度允许的导线最小截面

导 线	用 途	导线最小截面(mm <sup>2</sup> )	
		铝 线	铜 线
照明装置 用导线	户内	2.5	0.5
	户外	2.5	1
双芯软电线	用于吊灯		0.35
	用于移动或生活用电设备		0.5
多芯软线及软电缆	用于移动式生产用电设备		1
绝缘导线	用于架设在户内绝缘子上,其 间距为 2m 及以下	2.5	1
裸导线	户 外	16	2.5
	户 内	4	4
绝缘导线	户外沿墙敷设	4	2.5
	户外其它方式	10	4
绝缘导线	穿在管内	2.5 <sup>①</sup>	1
	木 板 内	2.5 <sup>①</sup>	1
进户线		2.5	1.5

注:目前已能生产小于 2.5mm<sup>2</sup> 的 BLX、BLV 型铝芯绝缘导线,可按具体情况采用小于 2.5mm<sup>2</sup> 铝芯截面。

## 2. 低压供电线路导线的快速选择

当线路电压为 380/220V 三相供电系统,各相负荷均匀分配,cosφ = 0.8 及允许电压损失为 ΔU% ≤ 7 的条件下,可以用表 2-44 直接查出导线的最大输电距离和截面。

表 2—44 导线的最大输送距离和截面选择

年最大负荷 小时数	经济电流密度(表 2—39 标准) $j_n$ (A/mm <sup>2</sup> )	经济的输电 最大距离 (m)	经济输送功率公式 $P = \frac{j_n}{1.9} S$ (kW)	经济的导线截面公式 $S = \frac{1.9}{j_n} P$ (mm <sup>2</sup> )
--------------	---	----------------------	--	---

裸 铝 线

3000 以下	1.65	403	0.868S	1.15P
3000 ~ 5000	1.15	578	0.61S	1.65P
5000 以上	0.90	739	0.47S	2.11P

铝 芯 电 缆

3000 以下	1.92	346	1.01S	0.99P
3000 ~ 5000	1.72	386	0.91S	1.10P
5000 以上	1.54	432	0.81S	1.23P

铜 芯 电 缆

3000 以下	2.50	441	1.32S	0.76P
3000 ~ 5000	2.25	490	1.18S	0.84P
5000 以上	2.0	552	1.05S	0.95P

电压损失 7% 的最大输电距离公式推导过程如下:

$$I = \frac{P}{\sqrt{3} U \cos\varphi} = S j_n$$

式中:  $I$ —— 输送电流(A);

$S$ —— 导线截面(mm<sup>2</sup>);

$P$ —— 输出功率(kW);

$U$ —— 线电压, 0.38kV;

$\cos\varphi$ —— 负载功率因数, 取 0.8;

$j_n$ —— 经济电流密度。

将以上各值代入下式得

$$S = \frac{P}{\sqrt{3} U \cos \varphi j_n} = \frac{1.9P}{j_n} \quad (1)$$

另据 380/220 伏供电系统的导线截面可按下式计算

$$S = \frac{PL}{C \cdot \Delta U \%} \times 10^3 \quad (2)$$

式中： $L$ ——输电距离(km)；

$C$ ——系数，铝为 50，铜为 83；

$\Delta U \%$ ——电压损失，按  $\Delta U \% = 7$  代入(2)式，

令(1)式大于或等于(2)式，则得

$$\text{铝导线输送距离(km): } L \leq \frac{0.66477}{j_n}$$

$$\text{铜导线输送距离(km): } L \leq \frac{1.10351}{j_n}$$

以上两式即符合电压损失限制在 7% 以下的最大输电距离，随经济电流密度  $j_n$  而变化。

**例 2—17** 某水泵电动机功率为 17kW，采用铝导线供电，该水泵离变压器台 300m，水泵年最大利用小时数约 2500h，试求导线的截面。

**解** 由表 2—44 查得经济电流密度为  $j_n = 1.65 \text{A/mm}^2$ ，输电距离不超过 403m，电压损失小于 7%。导线截面为

$$S = 1.15P = 1.15 \times 17 = 19.55(\text{mm}^2)$$

选用 LJ—25 的铝导线。导线的机械强度及其载流量也符合要求。

### 三、电力电缆的选择

#### 1. 电缆选择的一般原则

(1) 电缆的额定电压等于或大于所在网络的额定电压，电缆的最高工作电压不得超过其额定电压的 15%。

(2) 除在要移动或振动剧烈的场所采用铜芯电缆外，一般情况采用铝芯电缆。

(3) 敷设在电缆构筑物内的电缆宜选用裸铠装电缆或铝包裸塑料护套电缆。

(4) 直埋电缆采用带护层的铠装电缆或铝包裸塑料护套电缆。

(5) 移动机械选用重型橡套电缆。

(6) 有腐蚀性的土壤一般不采用直埋, 否则应采用特殊的防腐层电缆。在有腐蚀性介质的场所, 应采用相应的电缆护套。

(7) 垂直或高差较大处敷设电缆, 应选用不滴流电缆。电缆的最大允许位差见表 2—45。

表 2—45 电缆的最大允许位差

电 缆 类 型	最大允许位差(m)	
	铅 护 层	铝 护 层
普通粘性浸渍电缆		
1 ~ 3kV 铠装	25	25
无铠装	20	25
6kV	15	20
10kV	15	—
20 ~ 35kV	5	—
不滴流电缆 塑料绝缘电缆 橡皮绝缘电缆	无 限 制	
自容式充油电缆 110 ~ 330kV ZQCY22 ZQCY25	30 150(暂定)	

(8) 环境温度超过 40°C 时不宜采用橡皮绝缘电缆。

电力电缆的品种及型号, 见表 2—46。

常用电缆的型号特性及使用范围, 见表 2—47。



表 2-46 电力电缆的品种及型号

绝缘类型	电 缆 名 称	电压等级 (kV)	允许最高工作温度 (°C)	代表产品型号
油浸纸 绝 缘 电 缆	1. 普通粘性浸渍电缆 统包型 分相铅(铝)包型	1 ~ 35	1 ~ 3kV 80 6kV 65 10kV 60 20~ 35kV 50	ZLL, ZL, ZLQ, ZQ ZLLF, ZLQF, ZQF
	2. 不滴流电缆 统包型 分相铅(铝)包型	1 ~ 35	65 ~ 80	ZLQD, ZQD ZLLDF, ZQDF
	3. 自容式充油电缆	110 ~ 750	80 ~ 85	ZQCY
	4. 钢管充油电缆	110 ~ 750	80 ~ 85	
	5. 钢管压气电缆	110 ~ 220	80	
	6. 充气电缆	35 ~ 110	75	
塑料绝 缘电缆	7. 聚氯乙烯电缆	1 ~ 10	65	VLV, VV
	8. 聚乙烯电缆	6 ~ 220	70	YLV, YV
	9. 交联聚乙烯电缆	6 ~ 220	10kV 及以下 90 20kV 及以上 80	YJLV, YJV
橡皮绝 缘电缆	10. 天然丁苯橡皮 电缆	0.5 ~ 6	65	XLQ, XQ, XLV,
	11. 乙丙橡皮电缆	1 ~ 35	80 ~ 85	XV, XLHF, XLF
	12. 丁基橡皮电缆	1 ~ 35	80	
气体绝 缘电缆	13. 压缩气体绝缘 电缆	220 ~ 500	90	
新型电缆	14. 低温电缆 15. 超导电缆			

表 2—47 常用电缆型号特性及使用范围

序号	电缆型号		名称	主要用途
	铜芯	铝芯		
1	ZQ	ZLQ	纸绝缘裸铅包电力电缆	敷设在室内、沟道中及管子内,对电缆应没有机械损伤,且对铅保护层应有中性环境
2	ZQ1	ZLQ1	纸绝缘铅包麻被电力电缆	敷设在土壤中,其它条件同上
3	ZQ2	ZLQ2	纸绝缘铅包钢带铠装电力电缆	敷设在土壤中,能承受机械损伤,但不能受大的拉力
4	ZQ20	ZLQ20	纸绝缘铅包裸钢带铠装电力电缆	敷设在室内、沟道中及管子内,其它条件同上
5	ZQ3	ZLQ3	纸绝缘铅包细钢丝铠装电力电缆	敷设在土壤中,能承受机械损伤及大的拉力
6	ZQ30	ZLQ30	纸绝缘铅包裸细钢丝铠装电力电缆	敷设在室内及矿井中,其它条件同上
7	ZQ5	ZLQ5	纸绝缘铅包粗钢丝铠装电力电缆	敷设在水中,能承受较大的拉力
8	ZQF2	ZLQF2	纸绝缘分相铅包钢带铠装电力电缆	敷设条件同 ZQ2
9	ZQF20	ZLQF20	纸绝缘分相铅包裸钢带铠装电力电缆	敷设条件同 ZQ20
10	ZQF5	ZLQF5	纸绝缘分相铅包粗钢丝铠装电力电缆	敷设条件同 ZQ5
11	ZL	ZLL	纸绝缘裸铝包电力电缆	敷设在干燥的户内、沟管中,电缆不能承受机械外力作用,且对铝层应有中性环境
12	ZL11	ZLL11	纸绝缘铝包裸塑料护套电力电缆	敷设在铝保护层有腐蚀的沟管或土壤中,电缆不能承受机械外力的作用

(续表)

序号	电缆型号		名称	主要用途
	铜芯	铝芯		
13	ZL12	ZLL12	纸绝缘铝包钢带铠装一级防腐电力电缆	敷设在铝保护层有腐蚀的土壤中,电缆能承受机械外力作用,但不能承受拉力
14	ZL120	ZLL120	纸绝缘铝包裸钢带铠装一级防腐电力电缆	敷设在铝保护层有腐蚀的室内及沟管中,其它条件同上
15	ZL13	ZLL13	纸绝缘铝包细钢丝铠装一级防腐电力电缆	敷设在铝保护层有腐蚀的土壤和水中,电缆能承受机械外力作用,亦能承受相当的拉力
16	ZL15	ZLL15	纸绝缘铝包粗钢丝铠装一级防腐电力电缆	敷设在铝保护层有腐蚀的水中,电缆能承受较大的拉力
17	ZQD3	ZLQD3	纸绝缘铅包细钢丝铠装不滴流电力电缆	敷设在土壤及空气中,电缆能承受机械外力作用及相当的拉力,用于垂直敷设或高差较大处
18	ZQD30	ZLQD30	纸绝缘铅包裸钢丝铠装不滴流电力电缆	敷设在室内矿井中,其它条件同上
19	ZQD5	ZLQD5	纸绝缘铅包粗钢丝铠装不滴流电力电缆	敷设在水中或电缆承受较大拉力的地方,用于垂直敷设或位差较大处
20	XQ	XLQ	橡皮绝缘铅包电力电缆	敷设在室内、隧道内及管道中,电缆不能受推动和机械外力作用,且对保护层应有中性环境
21	XQ2	XLQ2	橡皮绝缘铅包钢带铠装电力电缆	敷设在地下(隧道),电缆不能承受大的拉力
22	XQ20	XLQ20	橡皮绝缘铅包裸钢带铠装电力电缆	敷设在室内、隧道内及管道中,电缆不能承受大的拉力
23	VV	VLV	聚氯乙烯绝缘及护套电力电缆	敷设在室内、隧道内及管道中
24	VV <sub>2</sub>	VLV <sub>2</sub>	聚氯乙烯绝缘及护套钢带铠装电力电缆	敷设在地下(隧道),电缆不能承受大的拉力

(续表)

序号	电缆型号		名称	主要用途
	铜芯	铝芯		
25	VV <sub>20</sub>	VLV <sub>20</sub>	聚氯乙烯及护套裸铜带铠装电力电缆	敷设在室内、隧道内及管道中,电缆不能承受大的拉力
26	VV <sub>3</sub>	VLV <sub>3</sub>	聚氯乙烯及护套细钢丝铠装电力电缆	敷设在地下,电缆能承受机械外力作用,并能承受相当的拉力
27	VV <sub>30</sub>	VLV <sub>30</sub>	聚氯乙烯及护套裸细钢丝铠装电力电缆	敷设在室内及矿井中,其它条件同上
28	YHC		重型橡套电缆	用于500V及以下移动式受电装置,能承受较大的机械外力作用
29	CHY		船用橡皮绝缘耐油橡套电缆	固定敷设于瓦斯继电器、变压器温度表等回路中
30	XV <sub>20</sub>	XLV <sub>20</sub>	橡皮绝缘聚氯乙烯护套裸铜带铠装电力电缆	敷设在室内、隧道内及管道中,能承受机械外力作用,但不能承受大的拉力
31	YJV		交联聚乙烯绝缘聚氯乙烯护套电力电缆	敷设在室内、隧道内及管道中,电缆不能承受机械外力作用
32	YJC <sub>2</sub>		交联聚乙烯绝缘聚氯乙烯护套铜带铠装电力电缆	敷设在室内、隧道内及管道中,电缆能承受机械外力作用,但不能承受大的拉力
33			交联聚乙烯绝缘聚氯乙烯护套裸铜带铠装电力电缆	同YJX <sub>2</sub>

注:

① 电缆型号下有横线者为火电厂常用电缆。

② 电缆型号字母及数字所代表的意义:

- |          |          |           |           |
|----------|----------|-----------|-----------|
| Z—纸绝缘    | X—橡皮绝缘   | V—塑料绝缘及护套 | L—铝包      |
| T—铜芯(省略) | Q—铅包     | L—型料绝缘及护套 | D—不滴流     |
| P—干绝缘    | F—分相铅包   | L—铝芯      | HF—非燃性橡套  |
| Y—移动式    | H—橡套     | C—船用      | 1—麻被      |
| 2—铜带铠装   | 20—裸铜带铠装 | C—重型      | 30—裸细钢丝铠装 |
| 5—粗钢丝铠装  | 11—防腐护层  | 3—细钢丝铠装   | 120—裸铜带铠装 |

## 2. 电缆敷设的一些规定

(1) 电缆与热力管道及其它管道之间应保持一定的距离,当条件限制时应采取隔热措施,以免电缆过热。电缆与热力管道平行时要求距离为 2m,交叉时为 0.5m。电缆与其它管道要求距离为 0.5m。

(2) 电缆直埋深度及相互距离:

① 直埋深度:1 ~ 35kV 电缆直埋深度不小于 0.7m,35kV 以上电缆直埋深度不小于 1m。

② 电缆间净距:10kV 及以上电缆间净距不小于 0.1m,10 ~ 35kV 电缆间净距不小于 0.25m。

③ 电缆相互交叉时的距离:不小于 0.5m,但如电缆在交叉点前后 1m 范围内穿入管内或用隔板隔开时,可缩短为 0.25m。

(3) 电缆的最小允许弯曲半径:

① 普通粘性浸渍电缆:多芯电缆的最小允许弯曲半径为  $15D$ ;单芯电缆的最小允许弯曲半径为  $25D$ 。

② 不滴流电缆:单芯和多芯电缆的最小允许弯曲半径为  $25(D + d)$ ;分相电缆的最小允许弯曲半径为  $20(D + d)$ 。

③ 塑料、橡皮电缆:多芯及单芯电缆的最小允许弯曲半径为  $10D$ (交联聚乙烯电缆为  $15D$ )。

④ 自容式充油电缆:单芯电缆(铅护层、皱纹铝护层)的最小允许弯曲半径为  $25(D + d)$ ;三芯电缆(铅护层、皱纹铝护层)的最小允许弯曲半径为  $20(D + d)$ ;平铝护层电缆的最小允许弯曲半径为  $36(D + d)$ 。

其中  $D$  为电缆金属护套外径(油浸纸绝缘电缆)或电缆外径(塑料、橡皮电缆); $d$  为电缆导体外径。

(4) 电缆敷设时的环境温度:敷设电缆时,如环境温度低于下列数值,应将电缆预热,否则不允许敷设。

① 35kV 及以下油浸纸绝缘电缆:敷设时的环境温度不低于

0°C。

② 橡皮绝缘沥青浸渍护层电缆：敷设时的环境温度不高于 7°C。

③ 橡皮绝缘聚氯乙烯护套电缆：敷设时的环境温度不高于 15°C。

④ 橡皮绝缘裸铅包电缆：敷设时的环境温度不高于 20°C。

⑤ 自容式充油电缆：敷设时的环境温度不高于 10°C。

### 3. 电缆截面的选择计算及校验

(1) 按电压选择电缆：即按本节电缆选择的一般原则中的第一条进行选择。

(2) 按经济电流密度选择电缆截面：计算方法同导线截面的计算。

(3) 按线路最大长期负载电流校验电缆截面：

$$I_{\text{UL}} \geq I_{\text{Zmax}}$$

式中： $I_{\text{UL}}$ ——电缆的允许负载电流(A)；

$I_{\text{Zmax}}$ ——电缆中长期通过的最大负载电流(A)，应考虑电缆可能长期过负载。

电缆允许的长期工作电流(见附录 14 ~ 附录 16)应按其允许载流量乘以敷设条件所确定的校正系数来求得。

① 当电缆敷设的周围介质温度不是规定介质温度时，其校正系数  $K_1$  值可由表 2—48 查得。

② 电缆在空气中或在土壤中多根并列敷设时，其校正系数  $K_2$  值可由表 2—49 和表 2—50 查得。







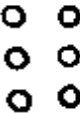
③ 当土壤的热阻率不同于  $80^\circ\text{C} \cdot \text{cm}/\text{W}$  时，应将直埋电缆的载流量乘以土壤热阻率校正系数  $K_3$ ，见表 2—51。



表 2—48 当周围介质温度不同于计算温度时  
电缆的温度校正系数  $K_1$

介质计算温度 (°C)	缆芯最高温度 (°C)	实际周围介质温度(°C)时的载流量校正系数											
		-5	0	+5	+10	+15	+20	+25	+30	+35	+40	+45	+50
15	80	1.14	1.11	1.08	1.04	1	0.96	0.92	0.88	0.83	0.78	0.73	0.68
25		1.24	1.2	1.17	1.13	1.09	1.04	1	0.95	0.9	0.85	0.8	0.74
15	70	1.17	1.13	1.09	1.045	1	0.955	0.905	0.85	0.79			
25		1.29	1.24	1.2	1.15	1.11	1.05	1	0.94	0.88	0.81	0.74	0.67
15	65	1.18	1.14	1.1	1.05	1	0.95	0.89	0.84	0.77	0.71	0.63	0.55
25		1.32	1.27	1.22	1.17	1.12	1.06	1	0.94	0.87	0.79	0.71	0.61
15	60	1.2	1.15	1.12	1.06	1	0.94	0.88	0.82	0.75	0.67	0.57	0.47
25		1.36	1.31	1.25	1.2	1.13	1.07	1	0.93	0.85	0.76	0.66	0.54
15	55	1.22	1.17	1.12	1.07	1	0.93	0.86	0.79	0.71	0.61	0.5	0.36
25		1.41	1.35	1.29	1.23	1.15	1.08	1	0.91	0.82	0.71	0.58	0.41
15	50	1.25	1.2	1.14	1.17	1	0.93	0.84	0.76	0.66	0.54	0.37	
25		1.48	1.41	1.34	1.26	1.18	1.09	1	0.89	0.78	0.63	0.45	

表 2—49 电缆在空气中多根并列敷设时载流量的校正系数  $K_2$

电缆根数	1	2	3	4	6	4	6
排列方式							
电缆中心距离	$S = d$	0.9	0.85	0.82	0.80	0.8	0.75
	$S = 2d$	1.0	0.98	0.95	0.90	0.9	0.90
	$S = 3d$	1.0	1.0	0.98	0.96	1.0	0.96

注：本表系产品外径相同时的载流量校正系数， $d$  为电缆的外径。当电缆外径不同时， $d$  值建议取各产品外径的平均值。



电缆在土壤中多根并列埋设时

表 2—50 载流量的校正系数  $K_2$

电缆间净距 (mm)	不同敷设根数时的载流量校正系数				
	1 根	2 根	3 根	4 根	6 根
100	1.00	0.88	0.84	0.80	0.75
200	1.00	0.90	0.85	0.83	0.80
300	1.00	0.92	0.89	0.87	0.85

注：敷设时电缆相互间净距应不小于 100mm。

不同土壤热阻率对载流量

表 2—51 的校正系数  $K_3$

导线截面 (mm) <sup>2</sup>	不同土壤热阻率时载流量的校正系数				
	在下列土壤热阻率 $\rho T$ 时(°C·cm/W)				
	60	80	120	160	200
2.5 ~ 16	1.06	1.0	0.9	0.83	0.77
25 ~ 95	1.08	1.0	0.88	0.80	0.73
120 ~ 240	1.09	1.0	0.86	0.78	0.71

土壤热阻率的选取：潮湿地区取 60 ~ 80，系指沿海、湖、河畔地带多雨量地区，如华东、华南地区等。普通土壤取 120，如平原地区东北、华北等。干燥土壤取 160 ~ 200，如高原地区、雨量少的山区、丘陵、干燥地带。

① 电缆的穿管系数选择。单根电缆穿管(管内无人工通风)并敷设于空气中，其长期允许电流的校正系数是，电压 1kV 及以下、截面 95mm<sup>2</sup> 及以下的电缆为 0.9；电压 1kV 及以下、截面 120 ~ 185mm<sup>2</sup> 的电缆为 0.85；对于敷设在地中的穿钢管的单根电缆，其长期允许电流按敷设在空气中考虑。

⑤ 电缆允许短时过负荷见本节有关内容。

**例 2—18** 有一条低压铝芯电缆线路。敷设在空气中，周围环境温度为  $40^{\circ}\text{C}$ ，其中通过的最大负载电流为  $60\text{A}$ ，试选择电缆的截面。

**解** 一般低压电缆线路按电缆的长期允许电流选择截面。已知  $I_{z\text{max}} = 60\text{A}$ ，由产品样本查得铝芯电缆敷设在空气中，周围空气温度为  $25^{\circ}\text{C}$  时截面为  $25\text{mm}^2$  的允许电流  $I_{uz}$  为  $80\text{A}$ 。

因为电缆敷设在空气中，周围空气温度为  $40^{\circ}\text{C}$ ，线芯规定温度为  $80^{\circ}\text{C}$  时，由表 2—48 查得  $K_1 = 0.85$ ，故电缆的长期允许电流  $I'_{uz} = 80 \times 0.85 = 68\text{A}$ 。

$$I'_{uz} > I_{z\text{max}}$$

因此，可选用 ZLQ20—1.0— $3 \times 25$  的低压电缆。

(4) 按允许电压损失选择及校验电缆截面：见本节导线截面的选择内容。

(5) 按短路时的热稳定选择电缆截面：

$$S_{\text{min}} \geq I_{\infty} \frac{\sqrt{t_j}}{C}$$

式中： $S_{\text{min}}$ ——短路热稳定要求的最小允许截面 ( $\text{mm}^2$ )；

$I_{\infty}$ ——稳态短路电流 (A)；

$t_j$ ——短路电流假想时间 (s)，可查图 2—29 曲线求得，高压厂用母线可取  $0.3\text{s}$ ；

$C$ ——热稳定系数，见表 2—52，钢母线可取  $60 \sim 70$ 。

采用低压熔断器保护的电缆或导体，可不校验热稳定。仅为满足遮断短路电流的要求而需放大熔断器规范时，应按表 2—53 要求校核电缆及导体安全电流与熔丝额定电流的最小比值。

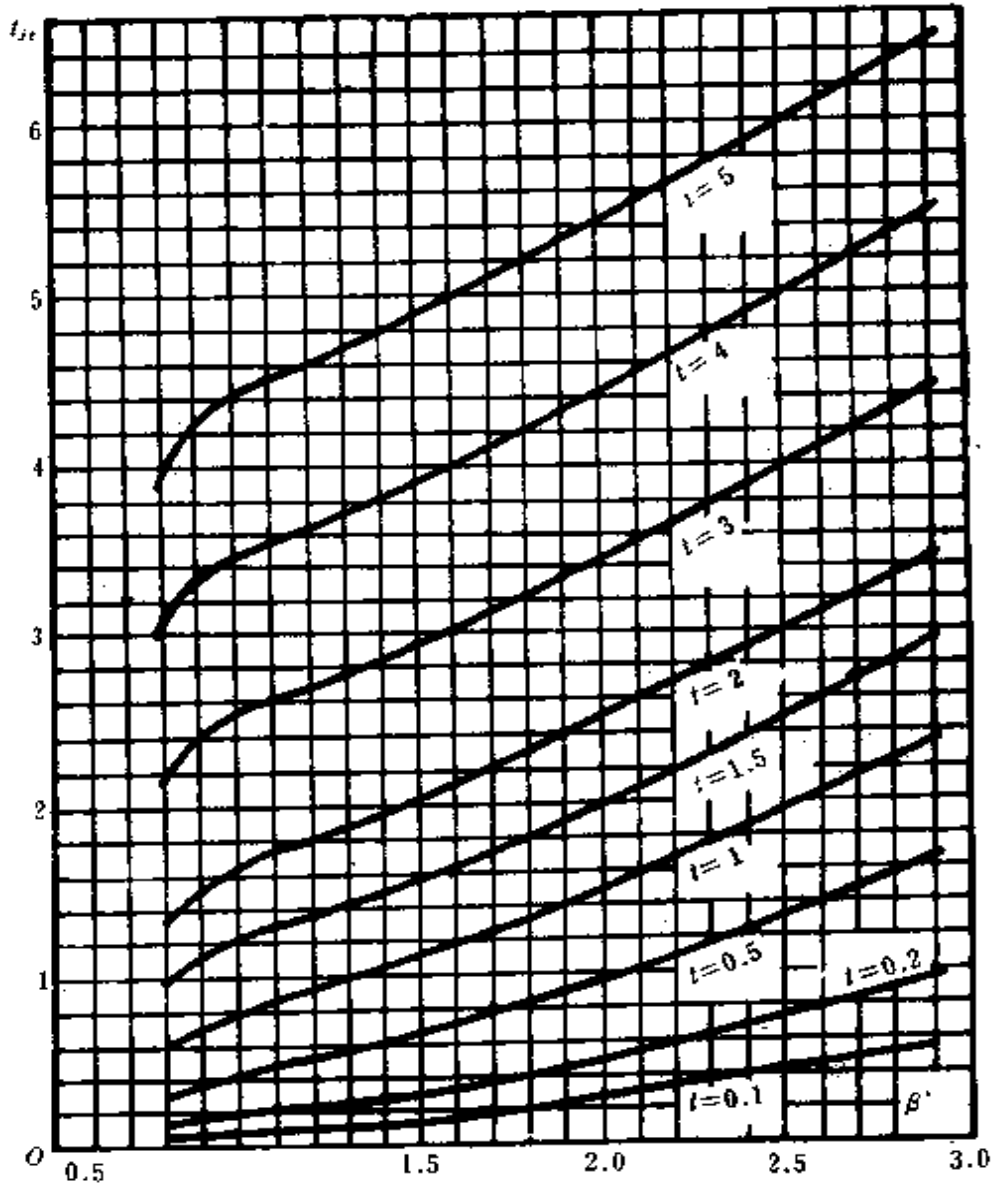


图 2—29 短路电流周期分量作用的假想时间曲线

表 2—52 热稳定系数  $C$

导体种类	铜			铝		
电缆类型	电缆线路有中间接头	20、35kV 油浸纸绝缘	10kV 及以下油浸纸绝缘	电缆线路有中间接头	20、35kV 油浸纸绝缘	10kV 及以下油浸纸绝缘橡皮绝缘
额定电压 (kV)	短路允许最高温度(°C)					
	120	175	250	120	175	200
3 ~ 10	93.4		159	60.4		90
20 ~ 35	101.5	130				

导线及电缆的安全电流与熔断器

表 2—53 额定电流的最小比值

场所名称	网络用途	网络的装置	导线及电缆的安全电流与熔断器额定电流的最小比值
住宅、公共场所、工厂办公室及仓库	电力及照明网络	穿于瓦斯管中的导线或电缆	1.25
		用绝缘子支持的明线电缆	1
工业生产部门	电力网络	穿于瓦斯管中的馈电线及干线	0.66
		敷设在绝缘子上的馈电线及干线	0.85
		电缆馈级及干线	0.66
		敷设在瓦斯管中接到持续运行用电设备的分支线	0.33
		敷设在绝缘子上接到持续运行用电设备的分支明线	0.85
		接到持续运行用电设备的分支线的电缆	0.33
有爆炸危险的场所	照明网络	敷设在瓦斯管中及架设在绝缘子上的或用电缆设置的馈电线、干线与支线	1
		敷设在瓦斯管中接到各种运行情况受电器的馈电线、干线及分支线 同上,但用电缆敷设而成	1.25 1

要求出短路电流的假想作用时间  $t_j$  值, 必须首先知道短路电流持续时间  $t$ 。

$$t = t_b + t_{fd}$$

式中:  $t$ ——短路电流持续时间(s);

$t_b$ ——继电保护的動作时间(s);

$t_{fd}$ ——断路器的分断时间, 低速开关:  $t_{fd} = 0.2\text{s}$ ; 高速开关:  $t_{fd} = 0.1\text{s}$ 。

假想时间  $t_j$  根据图 2—29 的曲线决定, 其步骤如下:

① 确定次暂态电流  $I''$  与稳态电流  $I_\infty$  的比

$$\beta'' = I''/I_\infty$$

② 根据实际的时间  $t$  决定需要的一条曲线。

③ 在横轴上找到  $\beta''$ , 作垂线与(2)决定的曲线相交, 这点的纵座标即为所求的  $t_j$ 。

利用图 2—29 曲线时, 如  $t < 5\text{s}$ , 应按下式决定:

$$t_j = t_{j-5} + (t - 5)$$

式中:  $t_{j-5}$ —— $t = 5\text{s}$  时, 在图上查得的值。

当  $0.1\text{s} < t < 1\text{s}$  时, 需考虑短路电流的非周期分量的热效应, 这时, 假想时间按下式决定:

$$t_j = t_{j-t} + 0.05\beta''^2$$

**例2—19** 今有按正常工作条件选得的截面为  $120\text{mm}^2$  的电缆一根, 其中可能通过的最大短路电流:  $I'' = 25\text{kA}$ ,  $I_\infty = 12.5\text{kA}$ , 且已知  $t_b = 0.7\text{s}$ ,  $t_{fd} = 0.2\text{s}$ , 试校验短路时的热稳定度。

**解**  $t = t_b + t_{fd} = 0.7 + 0.2 = 0.9(\text{s})$

$$\beta'' = I''/I_\infty = 25/12.5 = 2$$

因为图 2—29 上无  $t = 0.9\text{s}$  的曲线, 可用补间法求得  $t_{j-t} = 1.4\text{s}$ 。由于  $t < 1\text{s}$ , 故需考虑短路电流非周期分量的热效应。

$$t_j = t_{j-t} + 0.05\beta''^2 = 1.4 + 0.05 \times 2^2 = 1.6(\text{s})$$

所需最小截面为

$$S_{\min} = \frac{I_{\infty}}{C} \sqrt{t_j} = \frac{12.5 \times 10^3}{165} \sqrt{1.6}$$

$$= 95.7 \text{mm}^2 < 120 \text{mm}^2$$

因此,该电缆在短路情况下是热稳定的。

#### 四、电缆在短时过载和短路状态下的允许电流

##### 1. 允许过载倍数

电缆在事故情况或紧急情况下所允许通过的电流为短时允许过载电流。一般允许过载时间不超过 2h。对于 3kV 及以下电缆允许过载 10%；6 ~ 10kV 电缆,允许过载 15%；20kV 以上的电缆不允许过载。

在正常运行中,10kV 及以下电缆如果在过载开始前 5h 内的负荷率和过载时间符合表 2—54 的规定,其允许短时过载倍数也可按该表的规定。

表 2—54 允许过载倍数

导线截面 (mm <sup>2</sup> )	过载前 5h 内负荷率(%)				
	0		50		70
	过载时间(h)		过载时间(h)		过载时间(h)
	0.5	1	0.5	1	0.5
50 ~ 95	1.15				
120 ~ 240	1.25		1.2		1.15
240 以上	1.45	1.2	1.4	1.15	1.3

##### 2. 短时短路允许温度

电缆线路发生短路故障时,电流可能达到其长期允许载流量的几倍或几十倍,但短路时间一般只有几秒或更短的时间,因此电缆绝缘层温度升高不多,电缆可以有较高的允许短路温度,见表 2—55 和表 2—56。

表 2—55 电缆短路允许温度

电 缆 型 式	短路允许温度(°C)
粘性浸渍纸缘电缆	220
充气电缆	220
充油电缆	160
聚氯乙烯电缆	120
聚乙烯电缆	140
交联聚乙烯电缆	230
天然橡皮电缆	150
乙丙及丁基橡皮电缆	230

表 2—56 几种电线电缆的短时和短路允许温度

产品品种	短时过载允许温度(°C)	短路允许温度(°C)
橡皮绝缘电线	120	150
塑料绝缘电线	120	120
橡皮绝缘和护套电缆	130	150
塑料绝缘和护套电缆	130	130

### 3. 短时过载允许电流计算

当过载电流为长连续负荷电流的 10 倍及以下时,可按下列式近似计算

$$\frac{I_2}{I_1} = \sqrt{\frac{R_1}{R_2} \left[ 1 + \frac{\theta_2 - \theta_1}{\theta_1 - \theta_0} \cdot \frac{1}{1 - e^{-t/\tau}} \right]}$$

式中:  $I_1$ —— 对应于导线长期允许温度  $\theta_1$  时的载流量(A);

$I_2$ —— 对应于过载允许温度  $\theta_2$  时的短时过载允许电流(A);

$R_1, R_2$ —— 对应于  $\theta_1$  和  $\theta_2$  的导线单位电阻( $\Omega/\text{cm}$ );

$\theta_0$ —— 环境温度( $^{\circ}\text{C}$ );

$t$ —— 过载时间;

$\tau$ —— 产品的时间常数,与  $T$  同单位。

为了实用方便,可先绘制有关产品过载时间与允许过载电流的关系曲线或表格。



#### 4. 短路允许电流

表 2-57 是假定产品在绝热条件下短路电流的估算公式。短时过载电流大于 10 倍长期负荷下载流量时,可作为短路电流计算。

表 2—57 某些产品短路电流估算公式

产品品种	短路允许温度(°C)	铜 芯	铝 芯
聚氯乙烯绝缘电缆	120	$I_m = 88.6 \frac{A}{\sqrt{t}}$	$I_m = 58.6 \frac{A}{\sqrt{t}}$
聚氯乙烯绝缘和护套电缆	130	$I_m = 96 \frac{A}{\sqrt{t}}$	$I_m = 63.2 \frac{A}{\sqrt{t}}$
橡皮绝缘电线和橡皮护套电缆	150	$I_m = 108 \frac{A}{\sqrt{t}}$	$I_m = 71.1 \frac{A}{\sqrt{t}}$

注:A 为导线截面(mm<sup>2</sup>);t 为短路时间(s)。

#### 五、控制电缆的选择

控制电缆应选用多芯电缆,缆芯最多不宜超过 24 根。当较长的控制电缆为 6 芯及以上、截面小于 4mm<sup>2</sup> 时,应留有适当的备用芯。一个安装单位同一起止点的控制电缆中至少要有一根备用,但不必每根电缆都留有备用芯。

在设计时应尽量避免一根电缆同时接至屏上两侧的端子排。当不可避免时,若分支芯数为 7 根以上,宜采用单独的电缆。

根据机械强度的条件,铜芯电缆的截面应不小于 1.5mm<sup>2</sup>。

##### 1. 测量表计电流回路用控制电缆选择

测量表计电流回路用控制电缆的截面不应小于 2.5mm<sup>2</sup>(允许电流为 20A),由于目前国产电流互感器的二次电流大多数为 5A,所以不需要按额定电流校验。另外,也不需要按短路时热稳定性校验电缆截面。

电缆芯的截面选择计算公式如下(忽略电抗因素):



$$S = \frac{\rho K_{jx1} L}{R_{ux} - K_{jx2} R_{cj} - R_c}$$

式中： $S$ —— 电缆心的截面( $\text{mm}^2$ )；

$\rho$ —— 电缆芯材料电阻率( $\Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$ )；

$R_{ux}$ —— 电流互感器在某一准确等级下的允许负荷( $\Omega$ )；

$R_{cj}$ —— 测量表计的负荷( $\Omega$ )；

$R_c$ —— 接触电阻，在一般情况下约  $0.05 \sim 0.1\Omega$ ；

$L$ —— 电缆的长度(m)；

$K_{jx1}$ 、 $K_{jx2}$ —— 接线系数，见表 2—39。

由此可得控制电缆的最大允许长度的公式如下：

$$L = \frac{S}{\rho K_{jx1}} (R_{ux} - K_{jx2} R_{cj} - R_c)$$

式中：符号同前。

根据不同接线系数  $K_{jx1}$  和截面所计算出的  $K$  值( $K = S/\rho K_{jx1}$ ) 见表 2—58；接线系数可查表 2—59。

表 2—58 不同接线系数和截面的  $K$  值

$S(\text{mm}^2)$ \ $K_{jx1}$	1	$\sqrt{3}$	$2\sqrt{3}$	2
2.5	135.3	78.2	39.1	67.6
4	216.6	100.5	62.7	108.3
6	325	187	94	162
10	541	313	157	270

表 2—59 测量表计用电流互感器各种接线方式时的接线系数

电流互感器接线方式		接线系数		备 注
		$K_{jx1}$	$K_{jx2}$	
单 相		2	1	
三 相 星 形		1	1	
二 相 星 形	$R_{cjo} = R_{c1}$	$\sqrt{3}$	$\sqrt{3}$	$R_{cjo}$ 为回路中的负荷电阻
	$R_{cjo} = 0$	$\sqrt{3}$	1	
二 相 差 接		$2\sqrt{3}$	$\sqrt{3}$	
三 角 形		3	3	

2. 保护装置电流回路用控制电缆选择  
 电缆芯的截面选择计算公式如下：

$$S = \frac{\rho K_{jx1} L}{R_{ux} - K_{jx2} R_j - R_c}$$

式中： $S$ —— 电缆芯截面( $\text{mm}^2$ )；

$R_{ux}$ —— 根据保护装置一次计算电流倍数  $m$ ，在电流互感器 10% 误差曲线上可查出电流互感器允许二次负载  $R_{ux}$ ；

$R_j$ —— 继电器的负载( $\Omega$ )；

$K_{jx1}$ 、 $K_{jx2}$ —— 接线系数，见表 2—60；

其它符号同前。

表 2—60 继电保护用电流互感器各种接线方式时的接线系数

电流互感器 接线方式		接 线 系 数							
		三相短路		二相短路		单相短路		经 Y/Δ 变 压器二相短路	
		$K_{jx1}$	$K_{jx2}$	$K_{jx1}$	$K_{jx2}$	$K_{jx1}$	$K_{jx2}$	$K_{jx1}$	$K_{jx2}$
单 相		2	1	2	1	2	1		
三相星形		1	1	1	1	2	1 <sup>①</sup>		
二相 星形	$R_{j0} = R_j$	$\sqrt{3}$	$\sqrt{2}$	2	2	2	2	3	2
	$R_{j0} = 0$	$\sqrt{3}$	1	2	1 <sup>②</sup>	2	1	3	1
二相差接		$2\sqrt{3}$	$\sqrt{3}$	4	2	2	1	6	3
三角形		3	3	3	3	2	2		

注：

- ① 单相短路情况下，将三相星形接线的  $R_i + R_{j0}$  视为  $R_j$ 。
- ② 当 A、C 二相电流互感器接负荷时，A、C 二相短路： $K_{jx1} = 1, K_{jx2} = 1$ ；A、B 或 B、C 短路时： $K_{jx1} = 2, K_{jx2} = 1$ 。

### 3. 电压回路用控制电缆选择

电压回路用控制电缆，按允许电压降来选择其截面。

电压校正器与电压互感器之间的电缆截面不小于  $4\text{mm}^2$ 。

计算时只考虑有功电压降，按下式进行：

$$\Delta U = \sqrt{3} K_{jx} \frac{P}{U_{2l}} \cdot \frac{\rho L}{S} \leq \Delta U_{\text{许}}$$

式中： $\Delta U$ ——电压互感器至计量仪表的电压降(V)；

$K_{jx}$ ——接线系数，对于三相星形， $K_{jx} = 1$ ，对于二相星形， $K_{jx} = \sqrt{3}$ ，对于单相接线， $K_{jx} = 2$ ；

- $P$ ——电压互感器每一相负荷(VA)；
- $U_{2t}$ ——电压互感器二次线电压(V)；
- $\rho$ ——电缆芯材料电阻率( $\Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$ )；
- $L$ ——电缆的长度(m)；
- $\Delta U_{ux}$ ——允许电压降(V)，电压互感器至计费测量表计为0.5%；在正常负荷下，电压互感器至测量表计为3%；当全部保护装置动作和接入全部测量表计(即电压互感器负荷最大)时，电压互感器至保护和自动装置为3%；
- $S$ ——电缆芯截面( $\text{mm}^2$ )。

当电压互感器接有距离保护时，其电缆芯截面除按上述选择条件外，还要根据下列原则校验：

(1) 当以熔断器作为二次回路的短路保护时，其电缆截面应满足在距离保护继电器端子上发生二相短路时，流经熔断器的短路电流  $I_d > 2.5I_r$  ( $I_r$  为熔断器的额定电流)。

(2) 当以自动空气开关作二次回路短路保护时，应按下式校验电缆截面：

$$R_2 = \Delta U / I_{r.sd}$$

式中： $R_2$ ——自动开关至装有距离保护的二次电压回路末端二相短路时环路电阻( $\Omega$ )；

$\Delta U$ ——正常运行最低电压与距离保护第Ⅲ段动作阻抗的相应电压之差，一般取19V；

$I_{r.sd}$ ——自动开关瞬时动作电流(A)。

(3) 当有GH—11型距离保护时，还需按现场实际情况进行实际校验。

#### 4. 控制、信号回路用控制电缆选择

控制、信号回路用控制电缆，一般按机械强度条件选择，铜芯电缆的截面不应小于  $1.5\text{mm}^2$ 。对于某些跳、合闸回路用控制

电缆,需根据电缆中允许电压降进行校验。一般操作回路按正常最大负载下至各设备的电压降不得超过 10% 校验电缆芯截面。

电缆的允许长度  $L_{ux}$ ,可按式计算:

$$L_{ux} = \frac{U_n S \cdot \Delta U_{ux} \%}{2 \rho I_{q \cdot \max}} \times 10^{-2}$$

式中:  $L_{ux}$ —— 电缆的允许长度(m);

$U_n$ —— 直流额定电压,如 220V;

$S$ —— 电缆芯截面( $\text{mm}^2$ );

$\Delta U_{ux} \%$ —— 控制线圈正常工作时允许的电压降,取 10;如果实际的允许电压降为  $\Delta U'_{ux} \%$  时,则电缆允许长度  $L'_{ux}$  应为  $L'_{ux} = \frac{\Delta U'_{ux} \%}{10} L_{ux}$ ;

$\rho$ —— 电缆芯材料的电阻率( $\Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$ );

$I_{q \cdot \max}$ —— 流过控制线圈的最大电流(A)。

几种常用电缆截面  $S$  和  $I_{q \cdot \max}$  及允许长度  $L_{ux}$  的关系,见表 2—61。

表 2—61 流过控制线圈电流和控制电缆截面与电缆允许长度的关系

$I_{q \cdot \max} (A)$	$S(\text{mm}^2)$											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1.5	893	447	297	223	179	149	127	115	99	89	81.2	74.4
2.5	1492	746	497	372	298	249	213	186	165	149	136	124
4	2375	1188	791	594	475	396	339	297	264	238	216	198
6	3572	1786	1190	893	714	596	510	446	397	357	325	297

油开关合闸电缆,当通过合闸电缆的电流为单台开关传动装置的合闸电流时,油开关的合闸电缆截面为

$$S = \frac{2\rho IL}{U_c \cdot \Delta U \%} \times 100$$

**例 2—20** 变电所 SN<sub>2</sub>—10 型油开关的合闸电流为 85A,该开关与 220V 直流操作电源距离为 70m,合闸时允许的电压降为 5%。试选择合闸电缆的截面。

**解** 如采用铜芯电缆,  $\rho = 0.0188\Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$ ,合闸电缆芯截面为

$$S = \frac{2\rho IL}{U_c \cdot \Delta U \%} \cdot 100 = \frac{2 \times 0.0188 \times 85 \times 70 \times 100}{220 \times 5} = 20(\text{mm}^2)$$

取标称截面为 25mm<sup>2</sup> 的电缆。

### 六、直流电流表连接电缆截面的选择

图 2·30 中,  $R_t$  为温度补偿电阻,  $R_a$  为检流计电阻,  $R_l$  为连接电缆电阻。连接电缆芯截面按下式计算:

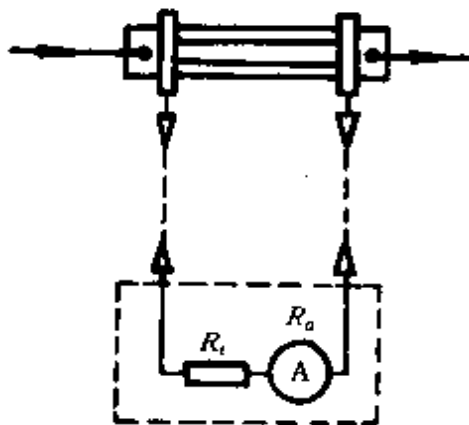


图 2—30 直流电流表连接图

$$S = 2\rho L/R_{t_0}$$

式中： $S$ ——连接电缆芯截面( $\text{mm}^2$ )；

$\rho$ ——电缆芯材料电阻率( $\Omega \cdot \text{mm}^2\text{m}$ )；

$L$ ——分流器至表计的距离( $\text{m}$ )；

$R_{t_0}$ ——基准温度  $t_0$  时，连接电缆的电阻( $\Omega$ )， $R_{t_0} = \frac{\delta R_n (T - t_0)}{t_1 - t_2}$ ；

$\delta$ ——仪表铭牌精度等级；

$R_n$ ——仪表内阻( $\Omega$ )；

$t_0$ ——基准温度，一般取  $20^\circ\text{C}$ ；

$t_1, t_2$ ——连接电缆周围环境温度的上限和下限( $^\circ\text{C}$ )；

$T$ ——温度常数，铜芯为 234.5；铝芯为 225。

**例 2-21** 某发电机转子直流电流表，表内阻为  $5.4\Omega$ ，分流器至表计的距离为  $80\text{m}$ ，连接电缆周围环境温度最低为  $+5^\circ\text{C}$ ，最高为  $+35^\circ\text{C}$ ，表计铭牌精度为 1.5 级。试选择铜芯电缆的截面。

**解** 基准温度  $20^\circ\text{C}$  时连接电缆的电阻为

$$R_{t_0} = \frac{0.015 \times 5.4 \times (234.5 - 20)}{35 - 5} = 0.58(\Omega)$$

电缆芯截面

$$S = 0.0184 \times \frac{2 \times 80}{0.58} = 5.08(\text{mm}^2)$$

取标称截面为  $6\text{mm}^2$  的铜芯电缆。

## 第五节 线路施工计算

### 一、线路安装要求和规定

#### 1. 明线安装要求

明线安装要求，见表 2—62 和表 2—63。

表 2-62 明线安装要求

安装场所	安装方式	导线最小截面 (mm <sup>2</sup> )		前后支持物间的最大距离 (m)	线间最小距离 (cm)	与地面最小距离 (m)	
		铜芯	铝芯			水平敷设	垂直敷设
户内	木槽板	0.5	1.5			0.5	0.15
	塑料线直接沿墙敷设	0.5	1.5	0.2		2.0	1.3
	瓷夹板明敷	1.0	1.5	0.8		2.0	1.3
	瓷柱直接支持敷设	1.0	2.5	2.0	3.5	2.0	1.3
	塑料护套线	0.5	1.5	0.2		0.15	0.15
户外	用瓷柱装在铁横担上	1.5	2.5	4.0	10.0	2.5	2.5
	用瓷瓶装横担上	2.5	6.0	10.0	15.0	2.5	2.5
	塑料护套线沿墙敷设	1.0	2.5	0.2		2.0	1.3
外	架空装置	2.5	6.0	10.0	20.0	参表	
		4.0	10.0	25.0	20.0	2-63	

表 2-63 接户线跨越街道或其它装置距离

接户线跨越部分	最小距离(m)
通车的街道	6.0
一般情况下与地面	2.5
居民密度小,交通困难的地区	3.5
离开屋面	0.6
与通信电路交叉时	0.6

2. 电线管的选择



为了穿线方便,管子内径与导线外径必须保持一定的比例关系,见表 2—64。

表 2—64 各电线外切圆直径与钢管内径的比值

管内线根数	1	2	3	4	5	6	7
单根电线外径 $d$	$d$	$d$	$d$	$d$	$d$	$d$	$d$
各电线外切圆直径 $D_1$	$d$	$2d$	$2.15d$	$2.41d$	$2.7d$	$3d$	$3.4d$
钢管内径	$1.7d$	$3d$	$3.2d$	$3.6d$	$4d$	$4.5d$	$5.1d$
管内线根数	8	9	10	11	12	13	
单根电线外径 $d$	$d$	$d$	$d$	$d$	$d$	$d$	
各电线外切圆直径 $D_1$	$3.73d$	$3.83d$	$4d$	$4.25d$	$4.37d$	$4.63d$	
钢管内径	$5.6d$	$5.8d$	$6d$	$6.4d$	$6.6d$	$7d$	

(1) 按表 2—64 选择管径时,还需根据管线长度和弯头多少予以修正。当管线长度超过 50m 一个弯头,40m 两个弯头及 20m 三个弯头时,应将管径放大一级或在中间装设拉线箱。这里所谓的弯头是指  $90^\circ \sim 105^\circ$  弯头(下同)。两个  $120^\circ$  以上弯头相当于一个  $90^\circ \sim 105^\circ$  弯头。

(2) 当各种不同直径的电线合穿一根钢管时,必须根据系数  $C$  按表 2—65 选择管径。其中  $C$  由下式决定:

$$C_1 = n_1 d_1^2 + n_2 d_2^2 + \dots + n_n d_n^2 \leq C$$

式中: $n_1, d_1, n_2, d_2 \dots$ ——各种不同直径的电线的根数和外径。

**例 2—22** 试选择一钢管,管中穿有: $1 \times 6\text{mm}^2$ (外径 6.2mm)BBLX—500 型电线三根, $1 \times 4\text{mm}^2$ (外径 5.5mm)同类型电线一根及  $1 \times 2.5\text{mm}^2$ (外径 5mm)同类型电线三根。

**解** 系数  $C_1$  为

$$\begin{aligned} C_1 &= n_1 d_1^2 + n_2 d_2^2 + n_3 d_3^2 \\ &= 3 \times 6.2^2 + 1 \times 5.5^2 + 3 \times 5^2 \\ &= 220.6 < 250 = C \end{aligned}$$

查表 2-65,当管线有二个或三个弯头时均可选用管径为 25mm 的钢管。

### 二、导线力学及弛度计算

#### 1. 基本计算公式

(1) 导线所受拉力计算:

$$F = \frac{l_d^2 G_0}{8f_d}$$

式中:  $F$ ——导线所受的实际拉力(N);

$l_d$ ——耐张段内代表档距(m),计算见后;

$G_0$ ——每米导线的重量(N/m);

$f_d$ ——耐张段内代表档距的弧垂(m)。

(2) 导线弧垂及导线实际长度计算:

① 两支点的高度相同时(代表档距):

$$f_d = \frac{l_d^2 g}{8\sigma}$$

$$L = l_d + \frac{8f_d}{3l_d^2}$$

或 
$$L = l_d + \frac{l_d^3 g^2}{24\sigma^2}$$

式中:  $f_d$ ——导线的弧垂(m);

$L$ ——导线实际长度(m);

$g$ ——导线比载(MPa/m);

$\sigma$ ——导线在比载  $g$  的应力(MPa);

$l_d$ ——同前。

② 耐张段内任一档的弧垂:

$$f = \left(\frac{l}{l_d}\right)^2 f_d$$

式中:  $f$ ——耐张段内任一档的弧垂(m);

其它符号同前。

按系数 C 选择管径表

表 2—65

下列管径的最大允许“C”值

管内电线 总根数	管 线 弯 数														
	15	20	25	32	40	50	70	80	100						
2	70	55	130	100	210	160	370	280	500	370	840	1360	1900	3300	2500
3	95	70	170	130	280	210	490	360	650	480	1080	1750	2500	4300	3200
4--6	100	75	180	140	285	220	500	390	680	510	1100	1850	2600	4500	3400
7	110	85	240	160	330	250	580	440	770	580	1300	2100	2950	5100	3850
8~10	95	70	170	130	285	210	500	370	650	500	1080	1750	2500	4300	3200
11	100	75	180	140	290	220	520	390	680	510	1100	1850	2600	4400	3400
12	109	80	200	150	320	240	560	420	750	560	1200	2200	2850	4800	3700

③ 两支点的高度不同时,如图 2-31 所示。

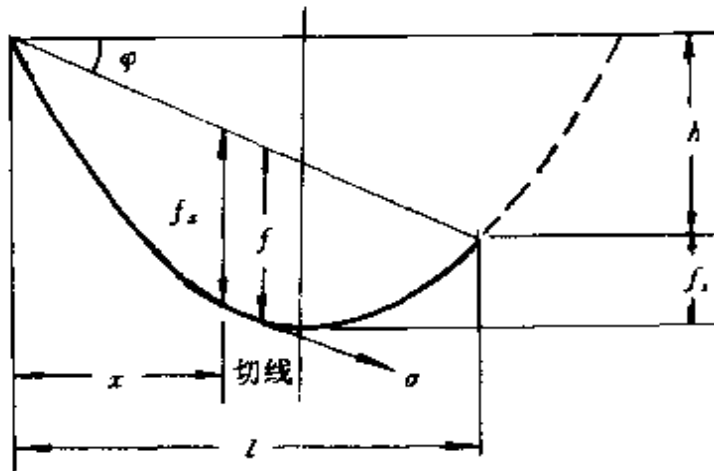


图 2-31 两支点的高度不同

$$f_x = \frac{g(l-x)}{2\sigma\cos\varphi}$$

$$f = \frac{l^2 g}{8\sigma}$$

$$f_s = f \left( 1 - \frac{h}{4f} \right)^2$$

$$L = l + \frac{8f^2}{3l} + \frac{h^2}{2l}$$

式中:  $f_x$ ——任一点弧垂(m);

$f$ ——弧垂(m);

$f_s$ ——水平弧垂(m);

$l$ ——档距(m);

$\varphi$ ——导线悬点间高差角,  $\varphi = \text{tg}^{-1} \frac{h}{l}$ ;

其它符号同前。

① 代表档距(规律档距)计算:

$$l_d = \sqrt{\frac{l_1^3 + l_2^3 + \dots + l_n^3}{l_1 + l_2 + \dots + l_n}}$$

式中:  $l_1, l_2, \dots$ ——耐张段中各档的档距(m)。

⑤ 耐张段的导线总长度  $\Sigma L$ :

$$\Sigma L = \Sigma l + \frac{l_d^2 g^2}{24\sigma^2} \Sigma l$$

或 
$$\Sigma L = \Sigma l + \frac{8f_d}{3l_d^2} \Sigma l$$

式中:符号同前。

⑥ 温度变化对弧垂和导线长度的影响:

当温度为  $t_2^\circ\text{C}$  时,弧垂及导线长度可按下式计算:

$$f_2 = \sqrt{f_1^2 + \frac{3}{8} \alpha (t_2 - t_1) l L_1}$$

$$L_2 = L_1 + \alpha (t_2 - t_1) L_1$$

式中:  $f_2, f_1$  —— 温度为  $t_2^\circ\text{C}$  和  $t_1^\circ\text{C}$  时的弧垂(m);

$L_2, L_1$  —— 温度为  $t_2^\circ\text{C}$  和  $t_1^\circ\text{C}$  时的导线长度(m);

$l$  —— 档距(m);

$\alpha$  —— 导线的线膨胀系数。

(3) 水平档距和垂直档距计算:

图 2--32 为档距计算图。

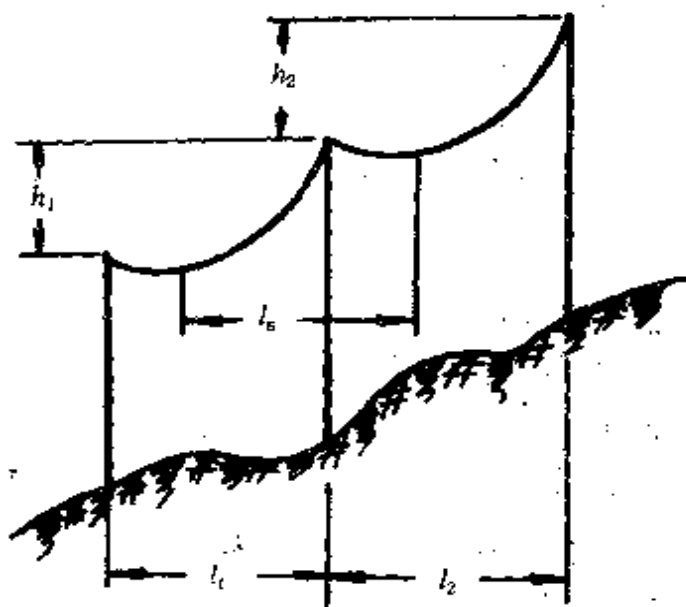


图 2--32 档距计算图

① 水平档距:

$$l_s = \frac{1}{2}(l_1 + l_2)$$

② 垂直档距:

$$l_c = \frac{1}{2}(l_1 + l_2) + \frac{\sigma}{g} \left( \frac{h_1}{l_1} + \frac{h_2}{l_2} \right)$$

式中:  $l_s$ ——水平档距(m);

$l_c$ ——垂直档距(m);

$l_1, l_2$ ——杆塔两侧之档距(m);

$h_1, h_2$ ——支持点高差(m); 相邻支持点较低时取正值, 反之取负值。

(4) 架空线的状态方程式:

$$\begin{aligned} \sigma_n^3 - \left[ \sigma_m - \frac{g_n^2 l_d^2 E}{24 \sigma_m^2} - E \alpha (t_n - t_m) \right] \sigma_n^2 \\ = \frac{g^2 l_d^2 E}{24} \end{aligned}$$

式中:  $\sigma_n$ ——比载为  $g_n$ , 温度为  $t_n$  时架空线的应力(MPa);

$\sigma_m$ ——比载为  $g_m$ , 温度为  $t_m$  时架空线的应力(MPa);

$E$ ——架空线弹性系数(MPa);

$\alpha$ ——架空线膨胀系数;

$l_d$ ——耐张段内代表档距(m)。

## 2. 导线弛度表的使用

架空导线弛度表见附录 18。

导线的弛度可由弛度安装曲线表中查得, 即根据耐张段的代表档距长度和当时的温度, 在安装曲线表中查得相应的弛度值。如果调整弛度时所测的实际温度在弛度表中查不到时, 则可用补插法按下式计算出相应温度的弛度值:

$$f = f_1 - \frac{t_1 - t}{t_1 - t_2} (f_1 - f_2)$$

$$f = f_2 + \frac{t - t_2}{t_1 - t_2} (f_1 - f_2)$$

式中： $f$ ——在温度为  $t$  时的弛度值(m)；

$f_1, f_2$ ——与温度  $t_1$  和  $t_2$  相应的弛度值(m)；

$t$ ——所测实际温度(°C)；

$t_1, t_2$ ——与实际温度相邻近的一个较大和较小的温度值(°C)。

**例 2—23** 已知 LGJ—50 导线，档距为 80m，在温度 20°C 时的弛度为 0.91m (查附录 18)，如实际温度为 16°C 时，求弛度是多少？

**解** 16°C 时的弛度为

$$\begin{aligned} f &= f_1 - \frac{t_1 - t}{t_1 - t_2} (f_1 - f_2) \\ &= 0.9 - \frac{20 - 16}{20 - 10} \times (0.91 - 0.75) = 0.84(\text{m}) \end{aligned}$$

### 三、电杆坑、拉线坑、拉线、拉线盘及电杆埋深计算

#### 1. 电杆埋深计算

(1) 架空电力线路电杆的埋深：无底盘卡盘的电杆埋入土中深度不小于 1.2m。常用直线杆的埋设深度，见表 2—66。

表 2—66 低压线路直线杆埋深度(m)

电杆上导线数量及导线截面	在下列距地面的高度(m)时				
	7.0	7.5	8~9	9~10	10~12
四根导线以内，且每根截面不大于 35mm <sup>2</sup>	1.5	1.6	1.7	1.8	1.9
四根导线以内，且每根截面在 35mm <sup>2</sup> 至 70mm <sup>2</sup>	1.8	1.9	2.0	2.1	2.2

注：终端杆及转角杆的埋设深度较表中的数值增加 5~20%。

另外，还可根据钢筋混凝土电杆的规格，按表 2—67 确定埋设深度。

表 2—67 各种电杆规格及埋设深度表

杆长(m)	7	8	9	10	11	12	13	15
梢径(mm)	100	150	150	190	190	190	190	190
底径(mm)	193	257	270	323	337	350	353	390
埋设深度(mm)	1200	1400	1500	1700	1800	2000	2200	2500
总重(kg)	204	392	480	620	750	680	980	1250

(2) 通信线路电杆的埋设深度:见表 2—68。

表 2—68 通信电杆的埋设深度(m)

埋设土壤 线条数 标高(m)	硬土及沼泽土中埋设				多石的土壤中埋设			软土中埋设			
	6~6.5	7.5	8.5	11	6~6.5	7.5~8.5	11	6~6.5	7.5	8.5	11
6以下	1.2	1.3	1.4	1.5	0.9	1.1	1.3	1.35	1.45	1.55	1.65
7~12	1.2	1.3	1.4	1.5	0.9	1.1	1.3	1.35	1.45	1.55	1.65
13~24	1.4	1.4	1.5	1.6	0.9	1.1	1.3	1.55	1.55	1.65	1.75
25~40		1.6	1.6	1.7		1.1	1.3		1.75	1.75	1.85

### 2. 电杆坑和拉线坑尺寸计算

图 2—33 中  $B$  为坑口尺寸(m),  $h$  为电杆坑深度(m),  $a$  为坑底尺寸, 取  $a = b + 0.4$ (m)。木杆坑口尺寸, 一般为宽 0.8m、长 1.0m。

为了防止坑壁塌方和施工方便, 坑口尺寸要比坑底尺寸加大, 加大数值应视土质情况, 按表 2—69 中公式计算。

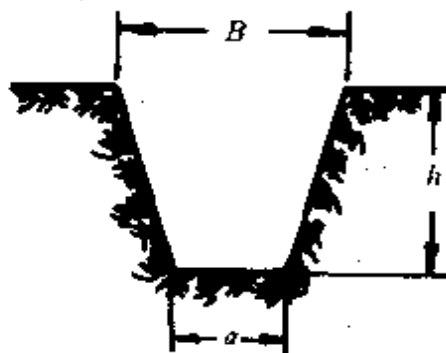


图 2—33 杆坑及拉线坑尺寸图



表 2—69 坑口尺寸加大的计算公式

土质情况	坑壁坡度	坑口尺寸(m)
一般粘土、砂质粘土	10%	$B = b + 0.4 + 0.1h \times 2$
砂砾、松土	30%	$B = b + 0.4 + 0.3h \times 2$
需用档土板的松土		$B = b + 0.4 + 0.6$
松 石	15%	$B = b + 0.4 + 0.15h \times 2$
坚 石	—	$B = b + 0.4$

注：不带地中横木、卡盘或底盘者， $b$  为杆根宽度(m)；带地中横木或卡盘者， $b$  为地中横木或卡盘长度(m)；带底盘者， $b$  为底盘宽度(m)。

### 3. 电杆、导线风荷载及电杆弯矩的计算

电杆或导线所受的风荷载  $W$  可按下列式计算：

$$W = 0.613CAv^2$$

式中： $W$ ——风荷载(N)；

$C$ ——风载体型系数，环形截面钢筋混凝土杆取 0.6，矩形截面钢筋混凝土杆取 1.4；直径  $< 17\text{mm}$  的导线取 1.2，直径  $\geq 17\text{mm}$  的导线取 1.1，覆冰的导线，不论线径大小，均取 1.2；

$A$ ——电杆杆身侧面的投影面积或导线直径与水平档距的乘积( $\text{m}^2$ )；

$v$ ——风速( $\text{m/s}$ )。

常用导线风荷载，见表 2—70。

常用圆形混凝土电杆的风荷载，见表 2—71。

(1) 直线杆：按无冰时有最大水平横向风速和覆冰时有相应的风速取其较大者。

表 2-70 单根导线风荷载(N/m)

导线型号	覆冰时风速(10m/s)			无冰时风速(m/s)	
	冰厚 $b = 5\text{mm}$	冰厚 $b = 10\text{mm}$	冰厚 $b = 15\text{mm}$	25	30
LJ-16	1.108	1.844	2.580	2.344	3.374
LJ-25	1.206	1.942	2.678	2.923	4.208
LJ-35	1.285	2.021	1.756	3.453	4.962
LJ-50	1.393	2.138	2.874	4.138	5.962
LJ-70	1.520	2.256	2.992	4.894	7.051
LJ-95	1.657	2.393	3.129	5.747	8.277
LJ-120	1.765	2.501	3.237	6.434	9.268
LJ-150	1.893	2.629	3.335	7.237	10.424
LJ-185	2.021	2.756	3.942	7.375	10.621
LJ-240	2.197	2.933	3.669	8.385	12.072
LGJ-16	1.138	1.873	2.609	2.482	3.580
LGJ-25	1.226	1.962	2.697	3.031	4.374
LGJ-35	1.354	2.089	2.825	3.865	5.561
LGJ-50	1.442	2.178	2.913	4.413	5.296
LGJ-70	1.579	2.315	3.050	5.237	7.551
LGJ-95	1.746	2.482	3.217	6.297	9.052
LGJ-120	1.854	2.589	3.325	6.992	10.062
LGJ-150	1.962	2.697	3.433	7.904	11.072
LGJ-185	2.138	2.874	3.610	8.012	11.542
LGJ-240	2.305	3.041	3.776	8.150	12.915

表 2—71 圆形混凝土电杆风荷载(N)

电杆梢径 mm	电杆全长 (m)	埋 深 (m)	地面高度 (m)	受风面积 (m <sup>2</sup> )	风速(m/s)		
					10	25	30
150	8	1.5	6.5	1.26	46.09	289.30	416.78
	9	1.6	7.4	1.48	54.92	340.29	490.33
	10	1.7	8.3	1.70	62.76	390.30	552.90
170	8	1.5	6.5	1.39	51.00	319.70	459.93
	9	1.6	7.4	1.62	59.82	372.65	536.42
	10	1.7	8.3	1.87	68.65	429.53	618.78
	11	1.8	9.2	2.13	78.45	489.35	705.10
	12	1.9	10.1	2.40	88.26	552.11	794.34
190	10	1.7	8.3	2.04	75.51	468.76	675.68
	11	1.8	9.2	2.31	85.32	530.54	764.92
	12	1.9	10.1	2.60	96.11	597.22	861.02
	13	2.0	11.0	2.90	106.89	666.85	960.07
	15	2.2	12.8	3.52	129.45	809.05	1165.03
	18	2.5	15.5	4.55	167.69	1045.39	1506.30

图 2—34 为直线杆受力计算图,电杆在地面处的弯矩。

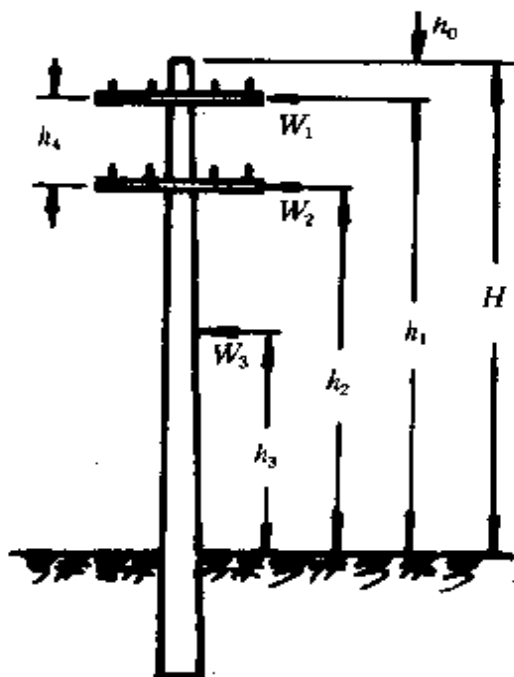


图 2-34 直线杆受力计算图

$$M_d = W_1 h_1 + W_2 h_2 + W_3 h_3$$

$$= n_1 \omega_1 l h_1 + n_2 \omega_2 l h_2 + W_3 h_3$$

验算  $M_d \leq M_{uz}$

式中： $M_d$ ——电杆在地面处的弯矩(N·m)；

$W_1, W_2$ ——上、下层导线风荷载(N)；

$\omega_1, \omega_2$ ——单根导线风荷载(N/m)，见表 2-70；

$n_1, n_2$ ——导线根数；

$h_1, h_2$ ——导线安装高度(m)；

$l$ ——档距(m)；

$h_3$ ——地面以上电杆的重心高度(m)，一般取  $0.5H$ ；

$W_3$ ——圆形混凝土电杆风荷载(N)，见表 2-71；

$M_{uz}$ ——电杆地面处允许弯矩(N·m)，见表 2-72。

(2) 转角杆：按导线拉力引起的水平荷载，以及导线和电杆所受水平横向风荷载计算；但对于带拉线的转角杆，只需计算导线最大拉力时的水平合成荷载。

表 2--72 环形预应力钢筋混凝土电杆  
(44Mn<sub>2</sub>Si 钢筋方案)(70)8039

标志	梢径 (mm)	底径 (mm)	杆长 (m)	埋深 (m)	地面处 允许弯矩 ( $\times 10^3\text{N}\cdot\text{m}$ )	距杆顶一米 处允许弯矩 ( $\times 10^3\text{N}\cdot\text{m}$ )	计算杆重 (t)
杆 51	150	237	6.5	1.5	10.79	6.57	0.31
杆 52	150	243	7.0	1.5	11.38	6.57	0.34
杆 53	150	250	7.5	1.5	11.96	6.67	0.38
杆 54	150	257	8.0	1.6	12.75	6.67	0.41
杆 55	150	263	8.5	1.7	13.14	6.67	0.45
杆 71	170	253	7.0	1.5	13.04	8.14	0.39
杆 72	170	276	8.0	1.6	17.16	9.90	0.46
杆 73	170	283	8.5	1.7	17.85	10.00	0.50
杆 74	170	290	9.0	1.8	18.44	10.00	0.54
杆 75	170	303	10.0	2.0	20.40	10.00	0.62
杆 76	170	316	11.0	2.0	21.57	10.10	0.71
杆 91	190	323	10.0	2.0	22.46	12.06	0.68
杆 92	190	350	12.0	2.0	26.09	12.16	0.87

注：电杆锥度为 1/75，壁厚为 4cm。

表 2-73 常用导线最大允许拉力

导线型号	计算截面 $S$ ( $\text{mm}^2$ )	导线直径 $d$ (mm)	瞬时破坏 应力 $\sigma_p$ (MPa)	安全系数 $K_x$	最大使用 应力 $\sigma_m$ (MPa)	最大允许 拉力 $T_m$ (N)
LJ-16	15.89	5.10	147.1	2.5	58.8	932
LJ-25	24.71	6.36	147.1	2.5	58.8	1451
LJ-35	34.36	7.50	147.1	2.5	58.8	2021
LJ-50	49.48	9.00	147.1	2.5	58.8	2913
LJ-70	69.29	10.65	137.3	3	45.8	3177
LJ-95	93.27	12.50	147.1	3	49.0	4570
LJ-120	116.99	14.00	147.1	3	49.0	5737
LJ-150	148.07	15.75	147.1	4	36.8	5443
LJ-185	182.80	17.50	137.3	4	36.8	6727
LJ-240	235.38	19.90	264.8	4	34.3	8110
LGJ-16	17.81	5.40	264.8	3	88.3	1569
LGJ-25	26.61	6.60	264.8	3	88.3	2344
LGJ-35	43.11	8.40	264.8	3	88.3	3805
LGJ-50	56.30	9.60	264.8	3	88.3	4972
LGJ-70	79.39	11.40	264.8	4	66.2	5256
LGJ-95	112.04	13.68	284.4	4	71.1	7963
LGJ-120	138.33	15.20	284.4	4	71.1	9836
LGJ-150	167.37	16.72	284.4	5	56.8	9522
LGJ-185	216.76	19.02	284.4	5	56.8	12327
LGJ-240	271.11	21.28	284.4	5	56.8	15416

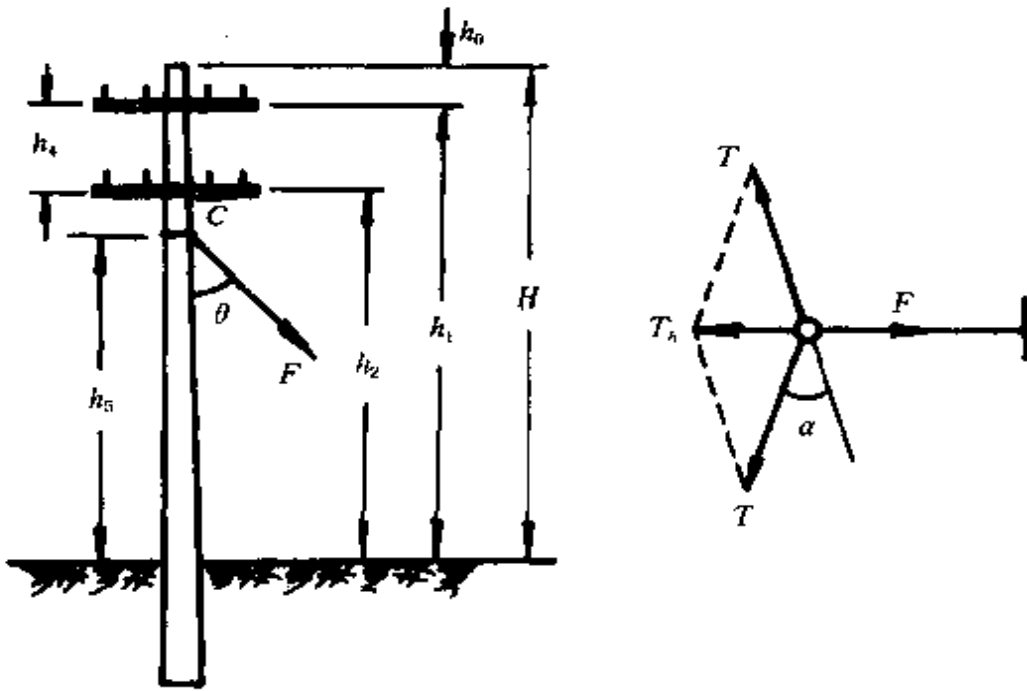


图 2-35 拉线杆受力计算图

图 2-35 为拉线杆受力计算图,导线拉力的合力为

$$T_h = 2T_m \sin \alpha / 2$$

式中:  $T_h$ ——导线拉力的合力(N);

$T_m$ ——导线最大拉力(N),见表 2-73;

$\alpha$ ——线路转角(度)。

拉线承受的拉力为

$$F = \frac{n_1 T_{h2} h_1 + n_2 T_{h2} h_2}{h_5 \sin \theta}$$

式中:  $F$ ——拉线承受的拉力(N);

$T_{h1}, T_{h2}$ ——上、下层导线拉力的合力(N);

$\theta$ ——拉线与电杆的夹角(度)。

电杆在拉线处(C点)的弯矩为

$$M_c = n_1 T_{h1}(h_1 - h_5) + n_2 T_{h2}(h_2 - h_5)$$

验算  $M_c \leq M_{axc}$

式中: $M_c$ ——电杆在C点的弯矩(N·m);

$M_{axc}$ ——电杆在C点的允许弯矩(N·m),

$$M_{axc} = M_{ax1} + \frac{H - h_5 - 1}{H - 1}(M_{ax} - M_{ax1});$$

$M_{ax1}$ ——锥形电杆在距杆顶一米处允许弯矩(N·m),见表2-72;

$M_{ax}$ ——锥形电杆在地面处允许弯矩(N·m)。

(3)耐张杆:按导线和电杆所受水平横向的风荷载,以及邻档导线拉力差引起的水平纵向荷载计算。

横向风荷载与直线杆相同。

正常情况下的水平纵向荷载按导线最大允许拉力计算,断线时的导线拉力取其最大允许拉力的70%计算。

导线拉力差为

$$T_{1-2} = T_1 - T_2(\text{设 } T_1 > T_2)$$

式中: $T_1, T_2$ ——电杆两侧导线最大允许拉力(N)。

断线时最大拉力为

$$T' = 0.7T_1$$

取  $T_{1-2}$  和  $T'$  中较大值计算水平纵向荷载。

其余计算同转角杆。

#### 4. 拉线长度和截面计算

拉线装置,如图2-36所示。



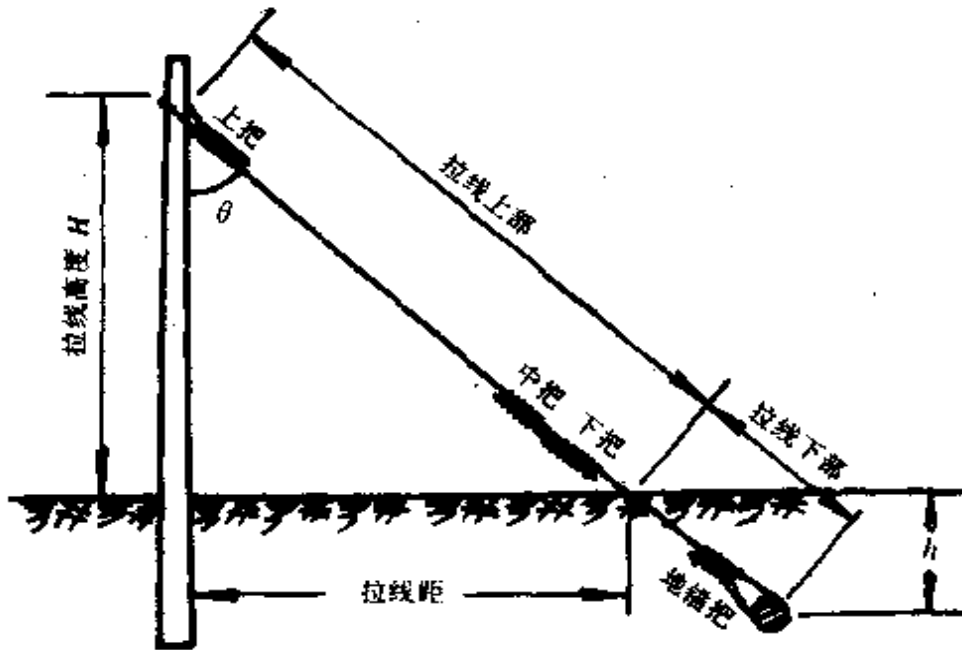


图 2-36 拉线装置

(1) 拉线长度计算：拉线长度为拉线上部、下部及上把、中把和下把长度之和。

① 拉线上部下料长度：

$$L_{\text{上}} = \sec\theta H + l_{\text{上}_1} - l_{\text{上}_2}$$

式中： $L_{\text{上}}$ ——拉线上部下料长度(m)，铁线为一股的长度；

$\theta$ ——拉线与电杆间的夹角(度)；

$l_{\text{上}_1}$ ——缠绕电杆，上、中把缠绕和绝缘子上、下把缠绕所需长度之和(m)，其中，缠绕电杆(包括上把)所需长度为 1.5m，作拉线中把所需长度为 1.2m，安装拉线绝缘子所需长度为  $2 \times 1.2 = 2.4$ (m)；

$l_{\text{上}_2}$ ——拉线下部露出地面长度和花篮螺丝长度之和(m)，其中，拉线下部露出地面长度约为 0.8m；花篮螺丝长度为花篮螺丝两端螺栓环首间的长度(m)；

$H$ ——拉线高，即拉线固定点至地面高度(m)。

② 拉线下部下料长度：

$$L_{\text{下}} = \sec\theta h - l_{\text{下}_1}$$

式中： $L_{\text{下}}$ ——拉线下部下料长度(m)，铁线为一股的长度；

$h$ ——拉线埋深，即拉线坑的垂直深度(m)；

$l_{\text{下}_1}$ ——拉线露出地面长度、作下把长度、作地锚把长度之和(m)；其中，拉线露出地面长度约为 0.8m；作下把所需长度约为 1.2m；作地锚把所需长度约为 1.8m。

为了便于计算，将  $\sec\theta$  值列于表 2—74。

(2) 拉线截面计算：拉线截面或拉线股数(当采用铁线作拉线时)可按表 2—75 ~ 表 2—78 中所列数值进行计算。

表 2—74  $\sec\theta$  值

$\theta$	$\sec\theta$	$\theta$	$\sec\theta$	$\theta$	$\sec\theta$	$\theta$	$\sec\theta$
0	1.000	24	1.095	48	1.494	72	3.236
3	1.001	27	1.112	51	1.589	75	3.864
6	1.006	30	1.155	54	1.701	78	4.810
9	1.012	33	1.192	57	1.836	81	6.392
12	1.022	36	1.236	60	2.000	84	9.657
15	1.035	39	1.287	63	2.203	87	19.107
18	1.051	42	1.346	66	2.895	90	$\infty$
21	1.071	45	1.414	69	2.790		

表 2—75 钢筋混凝土电杆相当于拉线股数

电杆梢径(mm) 及杆高(m)	水平拉线股数 $n_2$	普通拉线股数 $n_1$	
		$\theta = 30^\circ$	$\theta = 45^\circ$
$\phi 150-8.0$	0.5	0.99	0.70
$\phi 150-9.0$	0.45	0.89	0.63
$\phi 150-10.0$	0.74	1.47	1.04
$\phi 170-8.0$	0.54	1.07	0.76
$\phi 170-9.0$	0.48	0.97	0.68
$\phi 170-10.0$	0.79	1.58	1.12
$\phi 170-11.0$	1.03	2.06	1.46
$\phi 170-12.0$	0.96	1.92	1.36
$\phi 190-11.0$	1.10	2.19	1.55
$\phi 190-12.0$	1.02	2.04	1.44

注:

- ① 钢筋混凝土电杆本身强度可起到一部分拉线的作用,表中所列数值即为不同规格的电杆可起到多少根拉线的作用。
- ② 表中所列数值系为  $\phi 4.0$  镀锌铁线。
- ③  $\theta$  为拉线与电杆间的夹角。
- ④ 按被动土压力  $6.26t/m^3$  进行计算的。

表 2—76 每条导线所需的拉线股数

导线规格	水平拉线股数 $n_2$	普通拉线股数 $n_1$	
		$\theta = 30^\circ$	$\theta = 45^\circ$
LJ—16	0.34	0.68	0.48
LJ—25	0.53	1.06	0.75
LJ—35	0.73	1.47	1.04
LJ—50	1.06	2.12	1.50
LJ—70	1.16	2.32	1.64

(续表)

导线规格	水平拉线股数 $n_2$	普通拉线股数 $n_1$	
		$\theta = 30^\circ$	$\theta = 45^\circ$
LJ-95	1.55	3.10	2.20
LJ-120	1.56	3.12	2.20
LJ-150	1.85	3.70	2.26
LJ-185	2.29	4.58	3.24
LGJ-120	2.56	5.11	3.62
LGJ-150	3.26	6.52	4.61
LGJ-185	4.02	8.04	5.68
LGJ-240	5.25	10.50	7.43

注:

① 表中所列数值系为  $\phi 4.0$  镀锌铁线。

②  $\theta$  为拉线与电杆间的夹角。

表 2-77 转角杆折算系数

转角 $\phi$	$30^\circ$	$15^\circ$
折算系数 $\mu$	0.518	0.26

表 2-78  $\phi 4.0$  镀锌铁线与镀锌钢绞线换算表

$\phi 4.0$ 镀锌铁线股数	3	5	7	9	11	13	15	17	19
镀锌钢绞线截面 ( $\text{mm}^2$ )	25	25	35	50	70	70	100	100	100

拉线安全系数及最小截面见表 2-79。

表 2-79 拉线的强度设计安全系数及最小截面

拉线材料	镀锌铁线	镀锌钢绞线
强度安全系数	$\geq 2.5$	$\geq 2.0$
最小截面	$\phi 4.0 \times 3$	$25\text{mm}^2$

**例 2-24** 有一钢筋混凝土电杆,梢径为  $\phi 170$ ,杆高 12m,导线 LGJ—120 三条水平排列,拉线固定点至地面高度为 9m,拉线与电杆间的夹角为  $30^\circ$ ,拉线埋深为 1.8m,不安装拉线绝缘子,拉线采用镀锌钢绞线。试分别下列两种情况,求拉线的长度和股数:

(1) 终端电杆;(2)  $15^\circ$  转角杆。

**解**

(1) 终端电杆:

① 拉线上部长度:

由  $\theta = 30^\circ$  查表 2-74 得  $\sec\theta = 1.155$

$$l_{L_1} = 1.5(\text{作上把所需长度}) + 1.2(\text{作中把所需长度}) \\ = 2.7(\text{m})$$

$$l_{L_2} = 0.8\text{m}, H = 9\text{m}$$

$$\text{故 } l_L = \sec\theta H + l_{L_1} - l_{L_2} = 1.155 \times 9 + 2.7 - 0.8 \\ = 12.3(\text{m})$$

② 拉线下部长度:

$$l_{F_1} = 0.8(\text{拉线露出地面高度}) + 1.2(\text{作下把长度}) \\ + 1.8(\text{作地锚把长度}) = 3.8(\text{m})$$

$$h = 1.8\text{m}$$

$$\text{故 } l_F = \sec\theta h + l_{F_1} = 1.155 \times 1.8 + 3.8 = 5.9(\text{m})$$

由表 2-75 查得电杆相当于拉线股数为 1.92,由表 2-76 查得每根导线所需拉线股数为 5.11,则

$$\text{拉线上部股数} = 3 \times 5.11 - 0.68 = 14.65 \text{ 股}$$

取 17 股  $\phi 4.0$  镀锌铁线作拉线,即相当于用  $100\text{mm}^2$  的镀锌钢绞线。

(2)  $15^\circ$  转角杆:由表 2-77 查得折算系数  $\mu = 0.26$ ,则 3 条 LGJ—120 的导线需要  $3 \times 5.11 \times 0.26 = 3.98$  股  $\phi 4.0$  镀锌铁

线。

考虑电杆的影响,所需拉线股数为  $3.98 - 0.68 = 3.3$  股,取 5 股作拉线上部;查表 2—77 应取  $25\text{mm}^2$  镀锌钢绞线,而拉线下部应较拉线上部高一级,即取  $35\text{mm}^2$  钢绞线。

#### 5. 拉线盘的选择及埋深

拉线盘一般埋深  $1.2 \sim 1.6\text{m}$ 。当土壤容重  $\gamma = 1700\text{kg/m}^3$ ,土壤计算上拔角  $\alpha = 25^\circ$ ,拉线与地面夹角  $\varphi = 60^\circ$ ,电杆基础稳定安全系数取  $K \geq 1.5$  时,拉线盘的埋深见表 2—80。

表 2—80 拉线盘的选择及埋深

拉线所受张力 (t)	选用拉线规格		拉线盘规格 (m)	拉线盘埋深 (m)
	镀锌铁线 $\phi$	镀锌钢绞线 ( $\text{mm}^2$ )		
1.5 及以下	5 及以下	25	$0.6 \times 0.3$	1.2
2.1	7	35	$0.8 \times 0.4$	1.3
2.7	9	50	$0.8 \times 0.4$	1.5
3.9	13	70	$1 \times 0.5$	1.6
5.4	$9 \times 2$	$50 \times 2$	$1.2 \times 0.6$	1.7
7.8	$13 \times 2$	$70 \times 2$	$1.2 \times 0.6$	1.9

#### 四、人字抱杆强度计算

人字抱杆,如图 2—37 所示。每根抱杆所受的压力为

$$F_1 = \frac{\frac{F}{2} \cdot K}{\cos \frac{\alpha}{2}} = \frac{FKL}{2h}$$

式中： $F_1$ ——每根抱杆所受的压力(N)；  
 $F$ ——抱杆所受的总压力(N)；  
 $K$ ——牵引动力系数，取 1.1 ~ 1.4；

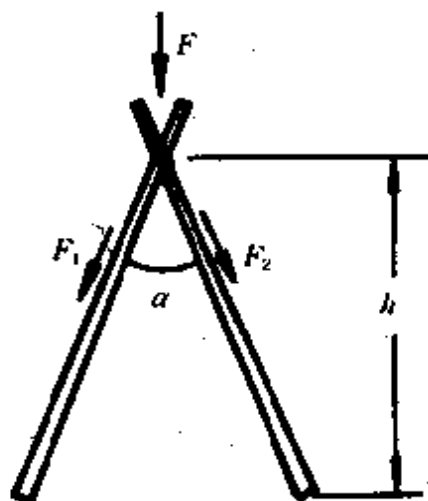


图 2—37 人字抱杆

$\alpha$ ——抱杆之间的夹角(度)；  
 $L$ ——抱杆长度(cm)；  
 $h$ ——抱杆交叉点至地面的高度(m)。

抱杆的压应力为

$$\sigma = \frac{10F_1 + 49W}{\phi S}$$

式中： $\sigma$ ——抱杆的压应力(kPa)；  
 $W$ ——每根抱杆的重量(kg)；  
 $\phi$ ——木材允许压应力的折减系数，见表 2—81；  
 $S$ ——按抱杆平均直径  $d_0$  计算的截面积( $\text{cm}^2$ )， $S = \frac{\pi}{4}d_0^2$ ；  
 $d_0$ ——抱杆平均直径(cm)， $d_0 = \frac{d_1 + d_2}{2} = \frac{\text{梢径} + \text{根径}}{2}$

验算  $\sigma \leq \sigma_{\text{容}}$

式中： $\sigma_{\text{许}}$ ——木材允许压应力，常用的松木为 11770(kPa)。

表 2—81 木材允许压应力折减系数

$L/d_0$	$\phi$	$L/d_0$	$\phi$	$L/d_0$	$\phi$	$L/d_0$	$\phi$
0	1.00	14	0.75	28	0.25	42	0.11
2	0.99	16	0.67	30	0.22	44	0.10
4	0.98	18	0.59	32	0.19	46	0.09
6	0.95	20	0.48	34	0.17	48	0.08
8	0.92	22	0.40	36	0.15	50	0.08
10	0.87	24	0.34	38	0.13		
12	0.82	26	0.29	40	0.12		

**例 2—25** 图 2—37 所示人字抱杆，所受总压力为 17600N，抱杆长度为 700cm，平均直径为 16cm，每根抱杆自重为 150kg，夹角  $\alpha = 30^\circ$ ，牵引动力系数  $K = 1.2$ 。求抱杆(松木)中的压应力是多少？

**解** 抱杆截面

$$S = \frac{\pi}{4} d_0^2 = \frac{\pi}{4} \times 16^2 = 200(\text{cm}^2)$$

$$L/d_0 = 700/16 = 43.75, \text{ 由表 2—81 查得 } \phi = 0.10$$

$$\cos(\alpha/2) = \cos(30^\circ/2) = \cos 15^\circ = 0.966$$

每根抱杆上的下压力为



$$F_1 = \frac{\frac{F}{2} \cdot K}{\cos \frac{\alpha}{2}} = \frac{\frac{17600}{2} \times 1.2}{0.966} = 10931.7(\text{N})$$

抱杆的压应力为

$$\sigma = \frac{10F_1 + 49W}{\phi S} = \frac{109317 + 49 \times 150}{0.10 \times 200} = 5833(\text{kPa}) < 11770(\text{kPa}) = \sigma_{xx}$$

所以是安全的。

### 五、绞磨计算

绞磨,如图 2—38 所示。下轴承对磨心轴的反作用力为

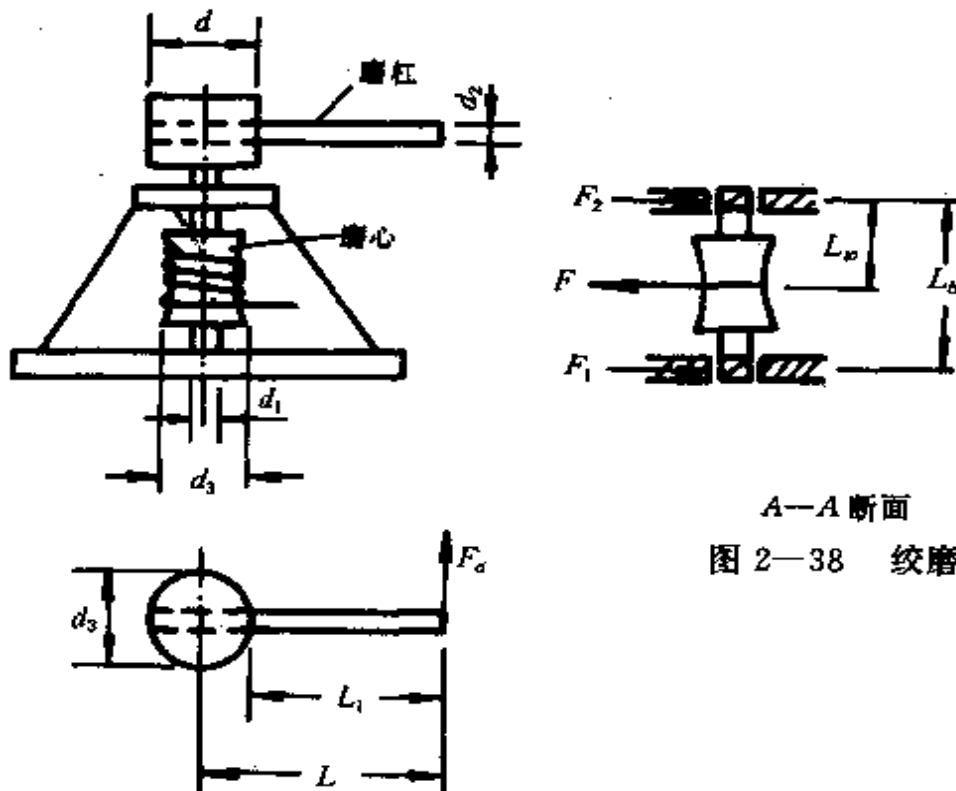
$$F_1 = \frac{FL_w}{L_b}$$

式中:  $F_1$ ——下轴承对磨心轴的反作用力(N);

$F$ ——磨心所受拉力(N);

$L_w$ ——磨心中心至上轴承距离(cm);

$L_b$ ——上、下轴之间的距离(cm)。



A—A 断面

图 2—38 绞磨

下轴的受剪面积为

$$S = 10F_1/\sigma_s$$

式中:  $S$ ——受剪面积( $\text{cm}^2$ );

$\sigma_s$ ——磨心轴允许剪应力(kPa),木制磨心轴为 2160kPa。

由于  $S = \frac{\pi}{4}d_1^2$ ,故磨心轴直径为

$$d_1 = \sqrt{\frac{4S}{\pi}}$$

加在磨杠端部的推力为

$$F_d = \frac{Fd_3}{2L}$$

式中:  $d_1$ ——磨心轴的直径(cm);

$F_d$ ——推力(N);

$d_3$ ——套磨杠盘的直径(cm);

$L$ ——绞磨中心点至磨杠端部长度(cm)。

磨杠受最大弯曲力的地方在  $A-A$  断面处,而  $L_1 = L - d_3/2$ ,故作用在  $A-A$  断面处的最大弯矩为

$$M = F_d L_1$$

如果磨杠是实心铁棒,则磨杠直径为

$$d_2 = \sqrt[3]{\frac{M}{0.01\sigma_s}}$$

式中:  $M$ ——断面处最大弯矩( $\text{N} \cdot \text{cm}$ );

$d_2$ ——磨杠直径(cm);

$\sigma_s$ ——铁棒弯曲应力(kPa),  $\sigma_s = \frac{M}{\omega} = \frac{M}{0.01d_2^3}$ ;

$\omega$ ——铁棒的断面系数。

铁棒允许弯曲应力为  $\sigma_{sz} = 98070\text{kPa}$

如果磨杠是钢管,其内径  $d_2$  为外径  $d_1$  的 80% 时,则磨杠内径为

$$d_2 = \sqrt[3]{\frac{205M}{\sigma_s}}$$

式中： $d_2$ ——磨杠内径(cm)；

$\sigma_s$ ——钢管弯曲应力(kPa)， $\sigma_s = \frac{M}{\omega}$

$$= \frac{M}{0.01[d_1^3 - (0.8d_1)^3]}$$

$\omega$ ——钢管的断面系数。

磨杠外径为

$$d_1 = d_2 / 0.8 = 1.25d_2$$

## 六、地锚计算

### 1. 地锚坑拔计算

图 2—39 为斜向受力地锚坑拔计算图。

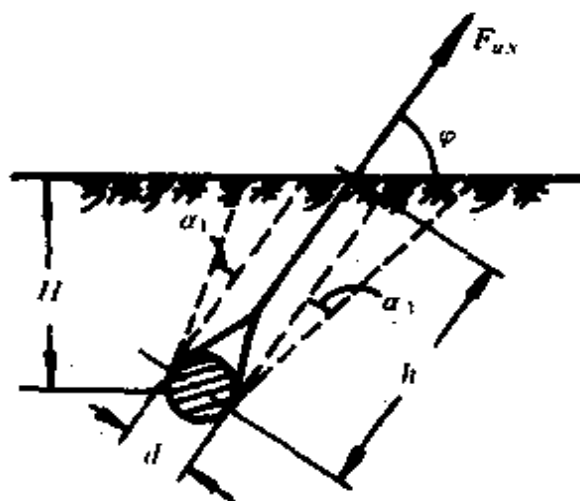


图 2—39 斜向受力地锚坑拔计算图

地锚允许拉力为

$$F_{ax} = \frac{9.81}{K} h [dL + (d + L) h \operatorname{tg} \alpha_1 + \frac{4}{3} h^2 \operatorname{tg}^2 \alpha_1] \gamma \sin \varphi$$

式中： $F_{ax}$ ——地锚允许拉力(N)；

$K$ ——抗拔安全系数,一般为 2.0 ~ 2.5;

$h$ ——地锚斜向深度(m);

$d$ ——横木直径(m);

$L$ ——横木长度(m);

$\alpha_1$ ——土壤计算抗拔角,见表 2—82;

$\gamma$ ——土壤单位容重( $\text{kg}/\text{m}^3$ ),见表 2—82;

$\varphi$ ——倾斜角。

表 2—82 土壤容重及计算上拔角

土壤名称		土壤状态	容重 $\gamma(\text{kg}/\text{m}^3)$	计算上拔角 $\alpha_1$	
粘性土	粘土	坚硬	1800	30°	
		硬塑	1700	25°	
		可塑	1600	20°	
		软塑	1600	10 ~ 15°	
	亚粘土	坚硬	1800	27°	
		硬塑	1700	23°	
		可塑	1600	19°	
		软塑	1600	10 ~ 15°	
	亚砂土	坚硬	1800	27°	
		可塑	1700	23°	
	砂性土	砾砂及粗砂	任何温度	1800	30°
		中砂	任何温度	1700	28°
细砂		任何温度	1600	26°	
粉砂		任何温度	1500	22°	

## 2. 地锚横木强度验算

(1) 一点施力的横木强度验算:

图 2—40 为一点施力横木的受力情况。

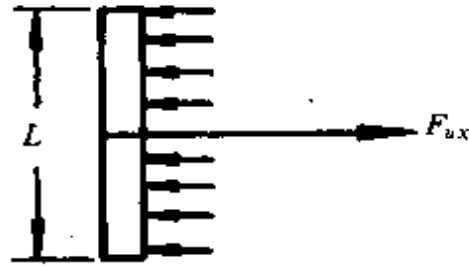


图 2—40 一点施力横木的受力情况

横木弯曲应力为

$$\sigma = \frac{F_{ux}L}{0.08d^3n} \quad \text{验算} \quad \sigma \leq \sigma_{ux}$$

式中： $\sigma$ ——横木弯曲应力(kPa)；

$F_{ux}$ ——地锚的允许拉力(N)；

$L$ ——横木长度(cm)；

$d$ ——单根横木的直径(cm)；

$n$ ——横木根数；

$\sigma_{ux}$ ——横木允许应力(kPa)，松木  $\sigma_{ux} = 11770\text{kPa}$ 。

(2) 两点施力的横木强度验算：

图 2—41 为两点施力横木的受力情况。

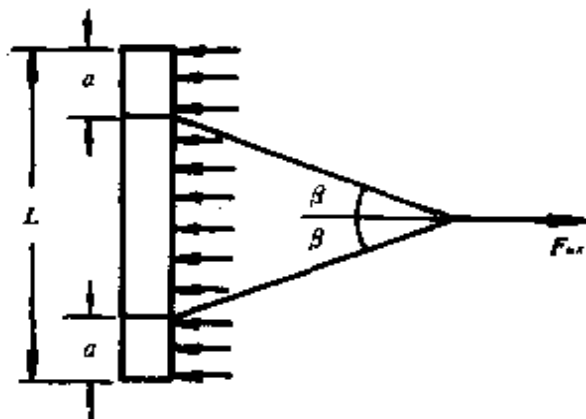


图 2—41 两点施力横木的受力情况

横木弯曲应力为

$$\sigma = \frac{10F_{ux}}{d^2n} \left( \frac{a^2}{0.2Ld} + 0.637\text{tg}\beta \right)$$

式中： $\sigma$ ——横木弯曲应力(kPa)；

$a$ ——横木悬臂长度,即由着力点至横木端头的距离 (cm);

其它符号同前。

**例 2—26** 地锚横木长 1.6m,直径 0.25m,埋深为 1.6m,倾斜角  $\varphi = 45^\circ$ ,土壤为坚硬亚砂土,求地锚允许拉力是多少?

**解** 地锚的斜向深度为

$$h = \frac{H}{\sin\varphi} = \frac{1.6}{\sin 45^\circ} = 2.26(\text{m})$$

取  $K = 2.5$ ,由表 2—58 查得  $\gamma = 1800\text{kg}/\text{m}^3, \alpha_1 = 27^\circ$ ,得地锚允许拉力为

$$\begin{aligned} F_{\text{允许}} &= \frac{9.81}{K} h [dL + (d + L)h \text{tg}\alpha_1 + \frac{4}{3} h^2 \text{tg}^2\alpha_1] \gamma \sin\varphi \\ &= \frac{9.81}{2.5} \times 2.26 \times [0.25 \times 1.6 + (0.25 + 1.6) \\ &\quad \times 2.26 \times \text{tg}27^\circ + \frac{4}{3} \times 2.26^2 \times \text{tg}^2 27^\circ] \\ &\quad \times 1800 \times \sin 45^\circ \\ &= 8.87 \times 4.3 \times 1272.8 = 48545.6(\text{N}) \end{aligned}$$

## 七、锚桩计算

### 1. 单锚桩的抗拉计算

倾斜单锚桩,如图 2—42 所示。锚桩地面土壤不产生变形时的安全拉力为

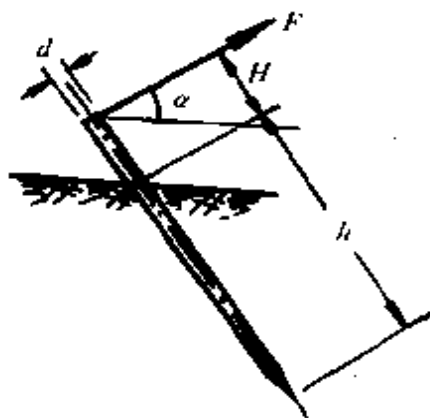


图 2—42 倾斜单锚桩

$$F = \frac{\delta_r h d}{10 K_0 A}$$

式中： $F$ ——作用在锚桩上的拉力(N)；

$K_0$ ——负荷系数，一般为 1.3 ~ 1.4；

$h$ ——锚桩打入地下的斜向深度(cm)；

$d$ ——锚桩直径(cm)；

$A$ ——随  $H/h$  而变化的系数，见表 2—83；

$H$ ——拉力作用点距地面的斜向高度(cm)；

$\delta_r$ ——锚桩对土壤的压力(kPa)；坚硬的土壤不大于 294kPa；普通砂质土壤不大于 196kPa；松质土壤不大于 26.5kPa；坚实并含卵石土壤不大于 490kPa。

表 2—83 随  $H/h$  变化的系数

$H/h$	0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6
$A$	5	6	7	8	9	10	11
$B$	3.77	3.50	3.20	2.93	2.65	2.38	2.15

## 2. 多联锚桩的允许拉力

如图 2—43 所示的多联圆柱锚桩，其允许拉力可直接由表 2—84 查得

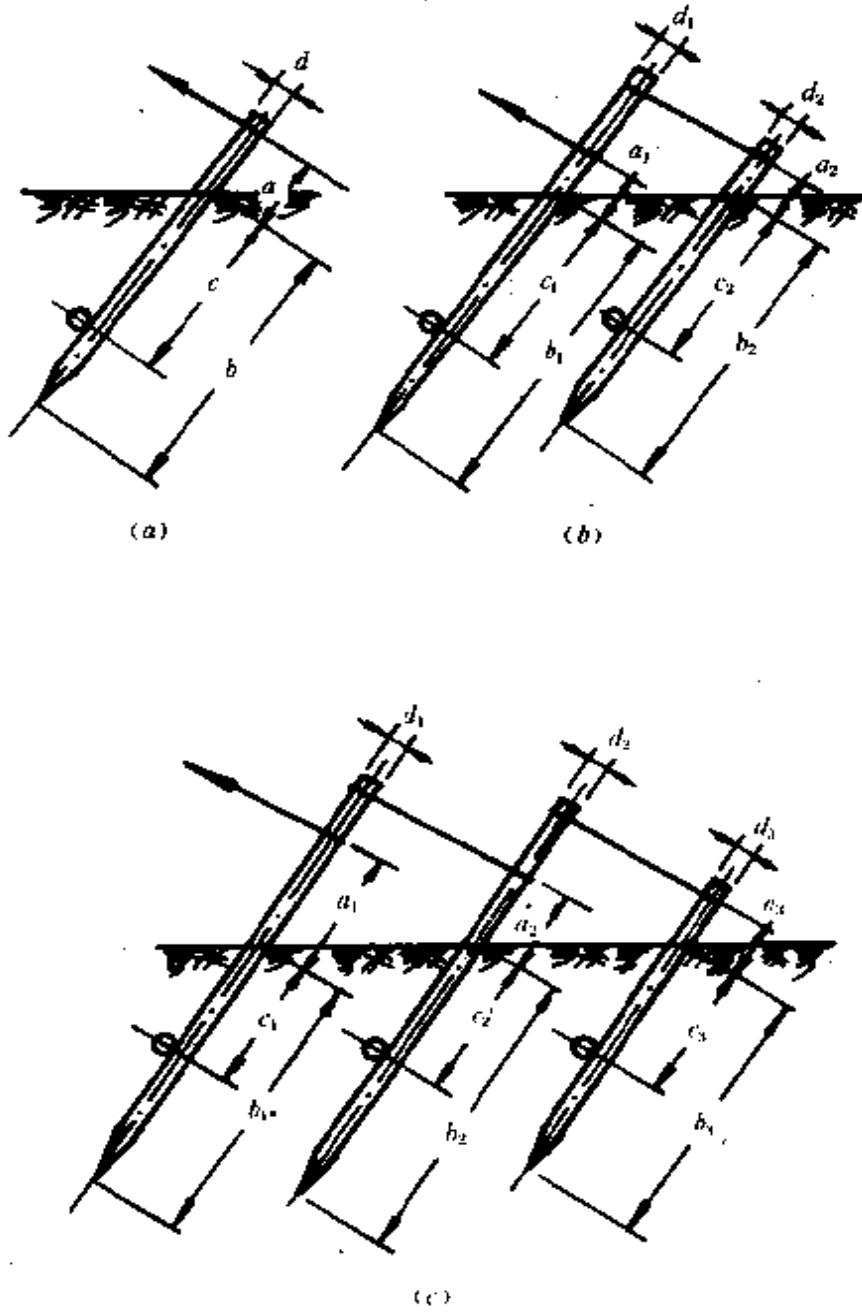


图 2—43 多联锚桩



表 2—84 多联锚桩的允许拉力

图号	允许拉力 $F_{ax}(N)$	9810	14710	19610	29420	39230	49030	58840	78450	98070
图 2—43(a)	作用于土壤的最大压力(kPa)	147	196	226	304					
	$a(cm)$	30	30	30	30					
	$b$	120	120	120	120					
	$c$	40	40	40	40					
	$d$	18	20	22	26					
图 2—43(b)	作用于土壤的最大压力(kPa)				147	196	275			
	$a_1(cm)$				30	30	30			
	$b_1$				120	120	120			
	$c_1$				90	90	90			
	$d_1$				22	25	26			
	$a_2$				30	30	30			
	$b_2$				120	120	120			
	$c_2$				40	40	40			
	$d_2$				20	22	24			
图 2—43(c)	作用于土壤的最大压力(kPa)							147	196	275
	$a_1(cm)$							30	30	30
	$b_1$							120	120	120
	$c_1$							90	90	90
	$d_1$							28	30	33
	$a_2$							30	30	30
	$b_2$							120	120	120
	$c_2$							90	90	90
	$d_2$							20	25	26
	$a_3$							30	30	30
	$b_3$							120	120	120
	$c_3$							40	40	40
	$d_3$							20	22	24

注:

- ① 地埋木长度  $L = 100cm$ 。地埋木直径与桩柱直径相同。
- ② 地质条件为一般密实土壤。

3. 锚桩强度验算(图 2—43)

锚桩所受的最大弯矩为

$$M = \frac{K_0 FH}{B}$$

锚桩所受的应力为

$$\sigma = \frac{10M}{\omega} \leq \sigma_{ux}$$

故有 
$$\sigma = \frac{10K_0 FH}{B\omega} \leq \sigma_{ux}$$

式中： $H$ ——拉力作用点距地面的斜向深度(cm)；

$B$ ——随  $H/h$  而变化的系数，见表 2—83；

$\omega$ ——锚桩的断面系数，铁棒  $\omega = 0.1d^3$ ；钢管  $\omega = \frac{0.1(d_1^4 - d_2^4)}{d_1}$ ， $d_1$  为钢管的外径(cm)， $d_2$  为钢管的内径(cm)；

$\sigma_{ux}$ ——锚桩材料的允许应力(kPa)，木材  $\sigma_{ux} = 11770\text{kPa}$ ，钢材  $\sigma_{ux} = 156910\text{kPa}$ ；

其它符号同前。

**例 2—27** 有一圆钢锚桩的直径为 5cm，锚桩打入地下的斜向深度为 1m，拉力作用点距地面高度为 10cm，土质为坚硬的土壤。求锚桩的安全拉力和强度。

**解**  $H/h = 10/100 = 0.1$ ，由表 2—83 查得  $A = 6$ ， $B = 3.5$ ，取  $K_0 = 1.3$ ，则

$$\text{安全拉力 } F = \frac{\delta_r h d}{K_0 A} = \frac{29.4 \times 100 \times 5}{1.3 \times 6} = 1886(\text{N})$$

$$\begin{aligned} \text{实际应力 } \sigma &= \frac{10K_0 FH}{B\omega} = \frac{10 \times 1.3 \times 1886 \times 10}{3.5 \times 0.1 \times 5^3} \\ &= 5604(\text{kPa}) < \sigma_{ux} = 156910\text{kPa} \end{aligned}$$

未超过允许应力。

## 第六节 有关导线和电缆的一些计算

### 一、导线、避雷线振动频率和运行应力的计算

#### 1. 导线、避雷线的振动频率

$$f = 200v/d$$

式中： $f$ ——导线和避雷线的振动频率(次/s)；

$v$ ——档向吹动导线的风速(m/s)；

$d$ ——导线和避雷线的直径(cm)。

#### 2. 导线、避雷线年平均运行应力

$$\sigma_p = \frac{\sigma_{\max} + \sigma_{\min}}{2}$$

式中： $\sigma_p$ ——导线和避雷线的年平均运行应力(MPa)；

$\sigma_{\max}$ 、 $\sigma_{\min}$ ——导线和避雷线在一年中的最大和最小实际应力(MPa)。

一般认为，如果导线和避雷线的年平均运行应力不大于表2—85中的数值，可不考虑防振。

表 2—85 导线不考虑防振的年平均运行应力

导线材料	年平均应力 $\sigma_p$ (MPa)	导线材料	年平均应力 $\sigma_p$ (MPa)
铝	34.3 ~ 39.2	铜	98.0 ~ 117.7
钢芯铝线 (假想应力)	39.2 ~ 49.0	钢	196.1 ~ 245.2

### 二、电杆、导线上的风压计算

电杆、导线上的风压可按下式计算：

$$F = 9.81aKS \frac{v^2}{16} \sin\theta$$

式中： $F$ ——水平方向的风力(N)；

$a$ ——风速的不均匀系数，电杆取 1.0，在导线上当风速为 20m/s 以下时取 1.0，当风速为 20 ~ 30m/s 时取 0.85，当风速为 30 ~ 35m/s 时取 0.75，当风速为 35m/s 及以上时取 0.70；

$K$ ——空气动力系数：电杆上的圆形构件取 0.7，电杆上的平面构件(外部迎风面)取 1.4，电杆上的平面构件(内部迎风面)取 1.2，风向 45° 角时铁柱平面构件(外部迎风面)取 1.2，风向 45° 角时铁柱平面构件(内部迎风面)取 1.0，导线取 1.2；

$S$ ——受风方向的投影面(m<sup>2</sup>)；

$v$ ——风速(m/s)；

$\theta$ ——风向与平面或圆筒中心线所形成的水平角，等于或小于 90°。

计算导线受力时，应认为风向是与电力线路的走向垂直。

计算各种电杆受力时，除转角电杆外，作用于电杆上的风向应为电杆受力最不利的情况。

计算转角电杆受力时，应认为风向与线路内转角的等分线一致。

### 三、导线安全系数计算

导线的安全系数可按下式计算：

$$K_x = \sigma_p / \sigma_m$$

式中： $\sigma_p$ ——导线的瞬时破坏强度(MPa)；

$\sigma_m$ ——导线材料的最大使用应力(MPa)。

导线的最小允许安全系数，见表 2—86。

表 2—86 导线的最小允许安全系数

导线种类	单股导线	多股导线
钢芯铝线、铝线及铝合金线	—	2.5
铜线、钢(铁)线:		
正常拉力	2.5	2.0
松弛拉力	3.0	2.5

#### 四、架空导线拉断力计算

架空导线在拉力增加的情况下,首次出现任一单线断裂时的拉力,称为拉断力。

##### 1. 普通绞线拉断力计算

$$F_d = a\sigma_b S$$

式中:  $F_d$ ——拉断力(N);

$a$ ——强度损失系数,见表 2—87;

$\sigma_b$ ——单线的抗拉强度(MPa),见表 2—88 和表 2—89;

$S$ ——导线的总截面(mm<sup>2</sup>)。

表 2—87 普通绞线的强度损失系数  $\alpha$

绞线品种		强度损失系数
铝绞线	37根及以下	0.95
	37根以上	0.90
铝合金绞线		0.95
铝包钢绞线 硬铜绞线 镀锌钢绞线		0.90

表 2—88 金属单线的抗拉强度  $\sigma_b$  (MPa)

单线直径 (mm)	硬铝线	铝合金线		硬铜线	镀锌钢线
		热处理型 HL	非热处理型 HL <sub>2</sub>		
1.5	176.5	294.2	274.6	402.1	1274.9
1.51 ~ 2.00	166.7	294.2	250.1	402.1	1274.9
2.01 ~ 2.50	166.7	294.2	250.1	392.3	1274.9
2.51 ~ 2.60	156.9	294.2	230.5	392.3	1274.9
2.61 ~ 3.00	156.9	294.2	230.5	392.3	1176.8
3.01 ~ 3.50	156.9	294.2	230.5	382.5	1176.8
3.51 ~ 4.00	147.1	294.2	220.6	382.5	1176.8
4.01 ~ 5.00	147.1	294.2	220.6	372.7	1176.8

表 2—89 铝包钢及铜包钢单线的抗拉强度及电阻率

产品型号	线径 (mm)	镀锌钢线 直径 (mm)	最小包层 厚度 (mm)	抗拉强度 不小于 (MPa)	电阻率(20°C) ( $\Omega \cdot \text{mm}^2/\text{km}$ )
GL 型铝 包钢线	4.0	2.8	0.30	576.6	50.1
	4.0	3.0	0.25	655.1	56.0
	4.0	3.2	0.20	749.2	64.3
GGL 型 高强度 铝包钢线	3.7	3.0	0.20	865.9	66.3
	4.0	3.2	0.20	975.8	64.3
	4.4	3.2	0.30	807.1	53.0
GT 型钢 包钢线	1.6		0.08	735.5	52.2
	2.0		0.10	735.5	51.5
	2.5		0.12	735.5	51.0
	3.0		0.15	735.5	50.2
	4.0		0.20	735.5	50.2

2. 组合绞线拉断力计算

$$F_d = 0.95\sigma_d S_d + 0.85\sigma_g S_g$$

式中： $F_d$ ——拉断力(N)；

$S_d$ ——导电金属单线的总截面(mm<sup>2</sup>)；

$S_g$ ——加强用金属单线(如钢线)的总截面(mm<sup>2</sup>)；

$\sigma_d, \sigma_g$ ——对应于  $S_d, S_g$  的二种金属单线的抗拉强度(MPa), 见表 2—89。

钢芯铝包钢绞线也可按上式计算, 但  $\sigma_d$  值应采用铝包钢单线的抗拉强度。

五、导线连接的计算

1. 触头接触面积计算

触头无论怎样精细加工, 总是高低不平的, 因此实际接触面积要比名义接触面积(即接头的截面)要小得多。触头实际接触面积应不小于:

$$S = I/j$$

式中： $S$ ——触头实际接触面积(mm<sup>2</sup>)；

$I$ ——通过接触面的工作电流(A)；

$j$ ——允许电流密度(A/mm<sup>2</sup>)，见表 2—90。

表 2—90 母线接触允许电流密度  $j$

接触材料	不同电流下的允许电流密度(A/mm <sup>2</sup> )		
	200A	600A	1000A 以上
铜—铜	0.62	0.26	0.18
铜—铝	0.50	0.21	0.14
铝—铝	0.40	0.18	0.11

### 2. 名义接触面积

通常每安额定电流需要的名义接触面积规定为：铝不小于  $4 \sim 7\text{mm}^2$ ，铜不小于  $3 \sim 3.5\text{mm}^2$ 。名义接触面积大时，为了确保均匀接触，一般每  $1600 \sim 2500\text{mm}^2$  名义接触面积加一个压紧螺栓，以保证接触面积不小于 80%。接触电阻值不大于与接头相同长度导体电阻的 1.5 倍。当电流很大时，为避免钢螺栓和铜铝热膨胀系数不同而产生附加应力，应采用铜螺栓。

### 3. 触头接触电阻计算

压力越大，实际接触面积越大，接触电阻就越小。触头接触电阻可按下式估算：

$$R = \frac{K}{P^{0.5 \sim 0.7}}$$

式中： $R$ ——触头接触电阻( $\Omega$ )；

$P$ ——外加压力(N)；

$K$ ——接触电阻系数( $\Omega \cdot \text{N}$ )，见表 2—91。

表 2—91 干净金属之间的接触电阻系数  $K$

接触材料	银—银	铜—表面 镀锡铜	铜—铜	铜—铝	铝—铝
接触电阻系数 ( $\Omega \cdot \text{N}$ )	$0.588 \times 10^{-3}$	$(0.686 \sim 0.981) \times 10^{-3}$	$(0.785 \sim 1.373) \times 10^{-3}$	$9.61 \times 10^{-3}$	$1.27 \times 10^{-3}$

## 六、输电线路瞬时电流容量的计算

输电线路发生接地及短路时，导线会因瞬时电流剧增而引起温度升高。不致使导线抗拉强度降低的极限温度，硬铜线为  $200^\circ\text{C}$ ，铝线为  $180^\circ\text{C}$ ，铝镍镁合金线为  $150^\circ\text{C}$ 。与这个极限温度相对应的电流值称为瞬时电流容量。

由于短路时间很短(一般小于  $2 \sim 3\text{s}$ )，可假设导线不向外发散热量，并设导线的初始温度为  $40^\circ\text{C}$ ，则可由下列各式计算



出导线的瞬时电流容量。

(1) 硬铜线:

$$\text{温升为 } 160^{\circ}\text{C 时, } I = 152.1S \sqrt{t}$$

(2) 硬铝线:

$$\text{温升为 } 140^{\circ}\text{C 时, } I = 93.26S \sqrt{t}$$

(3) 铝镍镁合金线:

$$\text{温升为 } 110^{\circ}\text{C 时, } I = 79.25S \sqrt{t}$$

式中:  $I$ —— 电流(A);

$S$ —— 导线的截面积( $\text{mm}^2$ );

$t$ —— 通电时间(s)。

### 七、架空线路绝缘子数的确定

#### 1. 电力线路绝缘子的选择

绝缘子应按下列原则进行选择:

(1) 线路直线杆塔悬垂绝缘子串的绝缘子数量,应不少于表 2—92 中规定的数值;

(2) 20 ~ 35kV 线路可采用针式绝缘子,用针式绝缘子时应采用木横担;

表 2—92 直线杆塔悬垂绝缘子串的绝缘子数量

线路电压 (kV)	绝缘子数量(电气性能相当于 X—4.5 或 II—4.5 者)	
	金属或钢筋混凝土横担	木横担
20	2	2
35	3	2
60	5	4
110	7	—
154	10	—
220	13	—

(3) 耐张绝缘子串的绝缘子数量, 应比悬垂式绝缘子串增加一个;

(4) 高度超过 40m 的跨越杆塔, 除按上述(1)、(2)、(3)项考虑外, 还应按照下列规定增加绝缘子串的绝缘子数量:

① 无避雷线保护的线路, 杆塔绝缘用管型避雷器或保护间隙保护时, 另增一个绝缘子;

② 有避雷线保护的线路, 杆塔高度超过 40m 后, 每超过 10m 增加一个绝缘子(不是 10m 的零数, 按较高的 10 位数计)。

### 2. 污秽地区绝缘子的选择

污秽地区等级的划分及其要求的单位泄漏距离, 见表 2—93。各种悬式绝缘子的平均泄漏距离, 见表 2—94。

表 2—93 各种污秽地区绝缘子串要求具有的单位泄漏距离

污秽等级	污 秽 情 况	每千伏线电压所需单位泄漏距离 (mm/kV)
0	一般地区	1.6
1	空气污秽的工业区附近; 重雾地区; 炉烟污秽地区	2.2 ~ 2.5
2	空气污秽较严重的地区, 沿海地带及盐场附近; 空气污秽地区附近又有重雾的地带; 距化学性污染源 300m 以外的地区	2.6 ~ 3.2
3	导电率很高的空气污秽地区(如大化工厂冶金厂附近); 大发电厂烟囱附近且附近有冷水塔时; 严重的盐雾侵袭地区; 距化学性污染源 300m 以内的地区	3.8

表 2—94 各种悬式绝缘子的平均泄漏距离

型 式	制造厂	平均泄漏距离 (mm)	备 注
X—4.5	大连电瓷厂	295.3	一般地区使用
X—1—4.5	大连电瓷厂	291.9	一般地区使用
	醴陵电瓷厂	293.2	
	苏州电瓷厂	281.6	
	西安电瓷厂	272.2	
XSR—4.5	大连电瓷厂	455	用于污秽地区较好

因污秽地区影响,需要加强耐张绝缘子串的泄漏距离时,所要求的绝缘子个数与悬垂式绝缘子串相同。

### 3. 高海拔地区绝缘子的选择

架设在海拔高度超过 1000m 地带的线路,绝缘子串的绝缘子数量应按下式确定:

$$\text{绝缘子数量} = \frac{N}{1.1 - \frac{H}{1000}}$$

式中:  $N$ ——按上述 1、2 确定的绝缘子数量;

$H$ ——海拔高度(m)

计算时,绝缘子数量不是整数的部分按 4 舍 5 入处理。

## 八、超高压送电的电晕计算

### 1. 电场强度计算

(1) 导线发生全面电晕临界场度最大值:

$$E_0 = 30.3m\delta\left(1 + \frac{0.299}{\sqrt{r\delta}}\right), \delta = \frac{2.9P}{273 + t} \times 10^{-3}$$

式中:  $E_0$ ——全面电晕临界场度(kV/cm);

$m$ ——导线表面系数,绞线约为 0.82;

$r$ ——导线半径(cm);

- $\delta$ —— 相对空气密度；
- $P$ —— 大气压力(Pa)；
- $t$ —— 气温(°C)。

(2) 导线表面电场强度最大值：

当线路上每相采用单导线时

$$E_m = 0.0147 \frac{CU_c}{r}$$

当采用分裂导线且分裂导线按多边形排列时

$$E_m = E_p \left[ 1 + 2(n - 1) \frac{r}{d} \sin \frac{\pi}{n} \right]$$

其中，导线表面平均电场强度最大值为

$$E_p = 0.0147 \frac{CU_c}{nr}$$

式中： $E_m$ 、 $E_p$ —— 表面电场强度最大值和平均电场强度最大值 (kV/cm)；

- $C$ —— 某一相线路的工作电容(pF/m)；
- $U_c$ —— 额定线电压有效值(kV)；
- $n$ —— 每相分裂根数；
- $D$ —— 每相分裂间距(cm)。

在海拔不超过1000m的地区，当  $E_m \leq (0.8 \sim 0.85)E_0$  时，一般不必按电晕条件验算导线最小直径。

### 2. 电晕损失

电晕损失同导线表面的电场强度，表面的状况和天气等有关。晴天损失小，雾天、雨天和冰雪天损失大。三相线路的年平均电晕损失功率，一般不大于线路有功功率损失的20%。

电晕的无线电干扰水平，在距离送电线边线20m处应不大于40~50dB。高压线路电晕干扰水平在距离线路边线100m范围内，衰减很快，在1km以外可以忽略。

### 九、不同中性点接地方式下内部过电压的极限值

不同中性点接地方式下内部过电压的极限值，见表2-95。

表中,  $U_x$  为线路相电压。由表可见, 从过电压与绝缘水平观点来看, 采用接地程度愈高的中性点接地方式, 就愈有利。

表 2—95 内部过电压的极限值

内部过电压种类	中性点不接地	中性点经消弧线圈接地(共振接地)	中性点直接接地
电弧接地过电压	$3.15U_x$	$2.8U_x$	$2.3U_x$
开断空载线路过电压	$4U_x$	$4U_x$	$1.6 \sim 3.1U_x$
共振过电压	$4 \sim 4.5U_x$	$4 \sim 4.5U_x$	$3U_x$
开断空载变压器过电压	$4 \sim 4.5U_x$	$4 \sim 4.5U_x$	$3U_x(154 \sim 220kV)$ $3.5U_x(110kV)$

### 十、电力电缆绝缘电阻的换算

用兆欧表测量电缆线芯之间或线芯对地(线芯对金属包皮)的绝缘电阻时, 3kV 及以下的电缆, 使用 1000V 兆欧表, 其测定值换算到长度 1km 和温度 20°C 时, 应不小于 50MΩ; 对于 6 ~ 10kV 的电缆, 使用 2500V 兆欧表, 其测定值换算到长度 1km 和温度 20°C 时应不小于 100MΩ。

换算公式如下:

$$R = a_t R_t L \times 10^{-3}$$

式中:  $R$ ——绝缘电阻换算值(MΩ/km);

$a_t$ ——绝缘电阻温度系数, 见表 2—96;

$R_t$ ——被测电缆绝缘电阻的测定值(MΩ);

$L$ ——被测电缆的长度(m)。

表 2—96 绝缘电阻温度系数

温度(°C)	0	5	10	15	20	25	30	35	40
温度系数 $a_t$	0.48	0.57	0.70	0.85	1.0	1.13	1.41	1.66	1.92

### 十一、电缆散热计算

电缆散热量可用以下两种简化法近似计算：

#### 1. 平均损失系数法

$n$  根电缆每米的总热损失为

$$P = \sum_1^n P_R, P_R = C_R R_{Rmax}$$

式中： $P$ —— $n$  根电缆的热损失；

$P_R$ —— 一根电缆的热损失；

$C_R$ —— 损失系数，视电缆的用途而不同，发电厂敷设的电缆所适用的  $C_R$  平均值见表 2—97；

$P_{Rmax}$ —— 电缆可能产生的最大热损失，见表 2—98。

#### 2. 平均电流密度法

由  $n$  根电缆组成的电缆束，按电流密度在最热季节中大致相同（设为  $j_c A/mm^2$ ）的原则分为几组，则每一组的热损失为

对于铜芯  $P_R = 0.0206 j_c^2 S_z$ ，对于铝芯  $P_R = 0.035 j_c^2 S_z$

式中： $P_R$ —— 每一组电缆的热损失（W/m）；

$S_z$ —— 上述一组电缆所有载流缆芯的总截面（ $mm^2$ ）。

电缆束中的总损失为

$$P = \sum_1^n P_R$$

### 十二、电缆电容量的简单测算

将交流电通于电缆两芯线间或芯线与金属外壳之间，记录通过的电流  $I(A)$  和所加的电压  $U(V)$ ，便可按下式计算所测电缆的电容量  $C(\mu F)$ ：

$$C = \frac{I \cdot 10^6}{2\pi f U}$$

### 十三、单芯电缆金属护层感应电压的计算

#### 1. 正常工作状态

正常工作时,电缆的护层感应电压计算公式,见表 2—99。

2. 短路故障时

短路故障时,电缆的护层感应电压计算公式,见表 2—100。

表 2—97 电缆束散热量的损失系数

序号	电缆的用途	损失系数 $C_R$
1	6 ~ 10kV 发电机出线电缆	0.8 ~ 0.9
2	6 ~ 10kV 主变压器电缆	0.8 ~ 0.9
3	3 ~ 10kV 厂用变压器电缆	0.6 ~ 0.8
4	3(6)kV 用电动机馈线:	
	200kW 以下 200 ~ 400kW	0.2 ~ 0.3 0.4 ~ 0.6
5	引至 380V 电动机和车间动力盘的电缆,如在同一线路中只一根时	0.6 ~ 0.8
	同上,电缆为 5 ~ 10 根时	0.5 ~ 0.7
	同上,电缆为 10 ~ 20 根时	0.4 ~ 0.6
	同上,电缆为 20 根以上	0.35 ~ 0.4
6	不需考虑的电缆: 直流操作电源电缆 照明线路电缆 阀门电动机电缆 备用机组或受电设备的电缆	

表 2—98 铜芯电缆的热损失功率

电缆截面 (mm <sup>2</sup> )	每米电缆在最大电流时的最大损失功率(W/m)					
	3kV 及以下		6kV		10kV	
	$I_{max}$	$P_{max}$	$I_{max}$	$P_{max}$	$I_{max}$	$P_{max}$
3 × 2.5	21.2	12				
3 × 4	31.5	16.5				
3 × 6	41	18				
3 × 10	54	19	48	14.5	45	14
3 × 16	72	21.5	57	13	55	13
3 × 25	95	24.5	78	15	76	14.5
3 × 35	113	24.7	96	16.5	90	15
3 × 50	140	26	126	20	115	16
3 × 70	180	31	152	21	145	19
3 × 95	220	33.5	187	23	170	19
3 × 120	256	35.5	218	24	204	21
3 × 150	300	40.5	252	27	230	22
3 × 185	338	41	284	27.5	260	22.5
3 × 240	386	41.5	325	28.5	300	24

注：表中  $P_{max}$  值是当周围空气温度为 35°C 时的允许电流下的最大热损失。

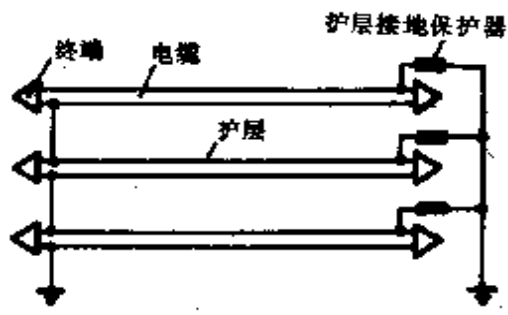
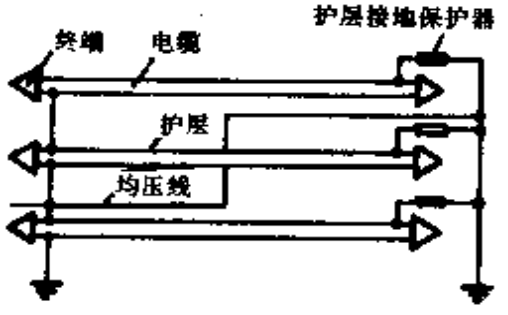
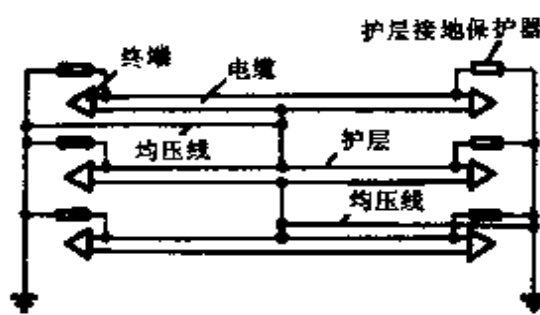


表 2—99 正常工作时的电缆的护层感应电压计算公式

电缆排列方式	④ ③ ② ① (单相)	④ ③ ② ① (三角形排列)	④ ③ ② ① (水平排列)	④ ③ ② ① (直角排列)	④ ③ ② ①
U <sub>A</sub>	$-jx_m I_B$	$\frac{x_m}{2}(-j - \sqrt{3})I_B$	$\frac{1}{2}[j(-x_m + a) - \sqrt{3}y]I_B$	$\frac{1}{2}[j(-x_m + \frac{a}{2}) - \sqrt{3}y]I_B$	$\frac{1}{2}[j(-x_m + \frac{b}{2}) - \sqrt{3}y]I_B$
U <sub>B</sub>	$jx_m I_B$	$jx_m I_B$	$jx_m I_B$	$jx_m I_B$	$j(x_m + \frac{a}{2})I_B$
U <sub>C</sub>	$\frac{x_m}{2}(-j - \sqrt{3})I_B$	$\frac{1}{2}[j(-x_m + a) + \sqrt{3}y]I_B$	$\frac{1}{2}[j(-x_m + \frac{a}{2}) + \sqrt{3}y]I_B$	$\frac{1}{2}[j(-x_m + \frac{a}{2}) + \sqrt{3}y]I_B$	$\frac{1}{2}[j(-x_m + \frac{b}{2}) + \sqrt{3}y]I_B$
符号 y		$x_m + a$	$x_m + \frac{a}{2}$	$x_m + \frac{a}{2}$	$x_m + a + \frac{b}{2}$
备注	$a = 2\omega \ln 2 \times 10^{-4} \Omega/\text{km}$ $x_m = 2\omega \ln \frac{S}{r_m} \times 10^{-4} \Omega/\text{km}$ $r_m$ — 护层平均半径(cm) $b = 2\omega \ln 5 \times 10^{-4} \Omega/\text{km}$ $S$ — 电缆中心间距(cm)				

表 2—100

短路故障时电缆的护层

接 线 方 式	短 路 方 式
<p>1. 一端互联接地</p> 	<p>三相短路</p>
<p>2. 一端互联接地加均压线</p> 	<p>二相短路</p>
<p>3. 中点互联接地加均压线</p> 	<p>一相接 地短路</p>

感应电压计算公式

计 算 公 式

$$U_A = j\omega I_B \cdot 2 \times 10^{-7} \left( -\frac{1}{2} \ln \frac{2S_{12}^2}{dS_{13}} + j \frac{\sqrt{3}}{2} \ln \frac{2S_{13}}{d} \right)$$

$$U_B = j\omega I_B \cdot 2 \times 10^{-7} \left( \frac{1}{2} \ln \frac{4S_{12}S_{23}}{d^2} + j \frac{\sqrt{3}}{2} \ln \frac{S_{23}}{S_{12}} \right)$$

$$U_C = j\omega I_B \cdot 2 \times 10^{-7} \left( -\frac{1}{2} \ln \frac{2S_{23}^2}{dS_{13}} - j \frac{\sqrt{3}}{2} \ln \frac{2S_{13}}{d} \right)$$

$$U_A = j\omega I_{AB} \cdot 2 \times 10^{-7} \ln \frac{2S_{12}}{d}$$

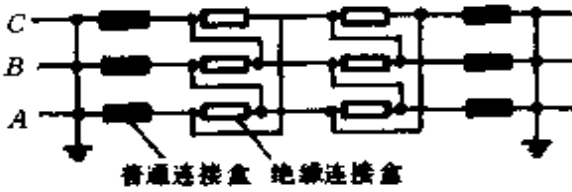
$$U_B = -j\omega I_{AB} \cdot 2 \times 10^{-7} \ln \frac{2S_{12}}{d}$$

$$U_C = j\omega I_{AB} \cdot 2 \times 10^{-7} \ln \frac{S_{23}}{S_{13}}$$

$$U_A = I_A \left( R_C + j\omega 2 \times 10^{-7} \ln \frac{2S_{1c}^2}{d r_C} \right)$$

$$U_B = I_A \left( R_C + j\omega 2 \times 10^{-7} \ln \frac{S_{1c}S_{2c}}{r_C S_{12}} \right)$$

$$U_C = I_A \left( R_C + j\omega 2 \times 10^{-7} \ln \frac{S_{1c}S_{3c}}{r_C S_{13}} \right)$$

接线方式	短路方式
	三相短路
<p>4. 护层交叉换位互联接地线图</p>	二相短路
	一相接地短路

注:

$U_A, U_B, U_C$ —各相电缆护层的相感应电压(V/m)

$U_{AB}, U_{BC}, U_{CA}$ —各相电缆护层的相间感应电压(V)

$I_A, I_B$ —A相和B相电缆的短路电流(A)

$I_{AB}$ —A、B相间的短路电流(A)

$d$ —护层的几何平均直径(cm)

$S_{12}$ —电缆A、B相间轴距(cm)

$S_{13}$ —电缆A、C相间轴距(cm)

(续表)

计 算 公 式
与上述三相短路、二相短路的计算公式相同
(1) 电缆三角形敷设 $U_{AB} = j\omega I_A L \cdot 2 \times 10^{-7} \ln \frac{2S}{d}$ $U_{BC} = 0$ $U_{CA} = -U_{AB}$
(2) 电缆平面敷设 $U_{AB} = j\omega I_A L \cdot 2 \times 10^{-7} \ln \frac{2 \cdot (2)^{1/3} \cdot S}{d}$ $U_{BC} = -j\omega I_A L \cdot 2 \times 10^{-7} \ln 2$ $U_{CA} = j\omega I_A L \cdot 2 \times 10^{-7} \ln \frac{4S}{d}$

$S_{23}$ — 电缆 B、C 相间轴距(cm)

$S_{1c}, S_{2c}, S_{3c}$ — 分别为电缆 A、B、C 相与均压线间的几何平均距离(cm)

$r_c$ — 均压线半径(cm)

$R_c$ — 均压线的电阻( $\Omega/m$ )

$S$ — 电缆轴距(cm)

$L$ — 电缆长度(m)

### 十四、电缆故障点的测算

测定电缆故障点的方法很多,这里介绍常用的几种方法。

#### 1. 电阻回线法

电阻回线法适用于电缆绝缘对地击穿,且至少有一芯绝缘较好的场合。其原理接线如图 2—44 所示。

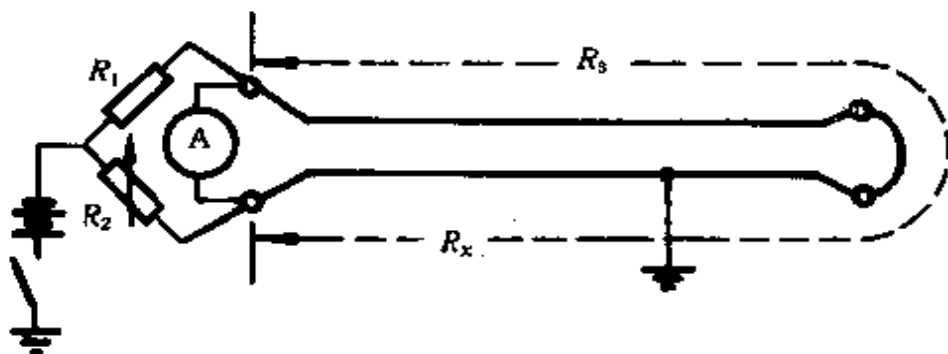


图 2—44 电阻回线法接线图

可选择电缆任一端测量。取完好芯线和接地芯线各一根,对端短接,连线截面不小于缆芯截面,然后在本端同样两缆芯上,按图 2—44 接入桥臂电阻  $R_A$ 、 $R_C$  及电源、检流计  $A$  等。这样,电阻  $R_A$ 、 $R_C$ 、 $R_B$  和  $R_x$  组成了桥路的四个臂,其中  $R_B$  和  $R_x$  就是所接入两电缆芯的电阻。当故障点不同时, $R_B$  与  $R_x$  的比值也不同,但  $R_B + R_x = 2R$  为常数,其值为两根缆芯电阻之和。

调整电阻  $R_A$  或  $R_C$ ,使桥路处于平衡状态,根据直流电桥原理得:

$$\frac{R_A}{R_C} = \frac{R_B}{R_x}$$

由于一般情况下,整根电缆芯截面均相同,电阻与其长度成正比,因此有

$$L_x = 2L \frac{R_c}{R_A + R_c}$$

式中： $L_x$ ——从测量端到故障点的距离(m)；

$L$ ——所测电缆长度(m)。

如某电缆长度为 350m，测得  $R_c$  为  $70\Omega$ ， $R_A$  为  $120\Omega$ ，则从测量端到故障点的距离为

$$L_x = 2 \times 350 \times \frac{70}{120 + 70} = 257.9(\text{m})$$

## 2. 电容法

电容法适用于电缆芯断路，且对地绝缘又较好的场合。铠装或铅皮电缆，可采用交流或直流电桥法；橡胶、塑料皮电缆，还可采用电子管(晶体管)电压表法或音频电容探测法。

(1) 交流电桥法：适用于电缆芯断路，且被测芯线接地过渡电阻不小于  $5\text{k}\Omega$  的场合。测量仪器可采用交流(西林)电桥或万能电桥，测量原理接线如图 2—45 所示。

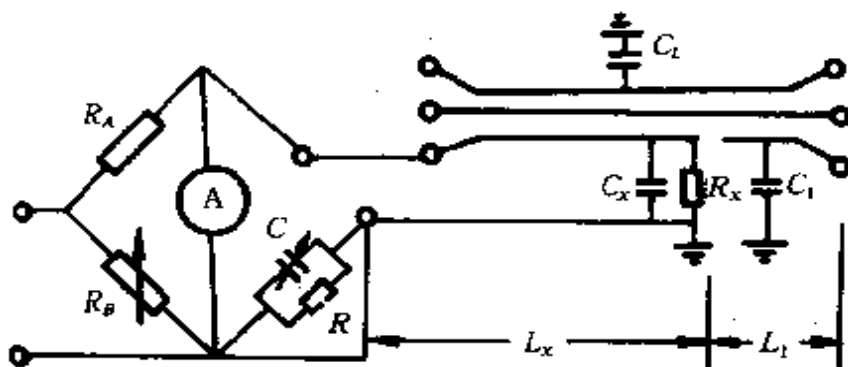


图 2—45 交流电桥法接线图

用交流电桥时，电源为频工 50Hz；用万能电桥时，电源为音频 800 ~ 1000Hz，用耳机代替检流计。

用万能电桥时，最好取  $R_A = R_B$ ， $R = R_x$ ，适当调整电容  $C$  使电桥平衡(耳机中声音最小)，则  $C_x = C$ 。用同样方法，也可测

出  $C_1$  和  $C_L$ , 然后根据电容与电缆长度成正比的原则, 按下式求得故障段的长度:

$$L_x = LC_x/C_L \text{ 和 } L_1 = LC_1/C_2$$

(2) 交流电压电流表法: 当没有专用的交流电桥时, 可用此法。测量原理接线如图 2-46 所示。

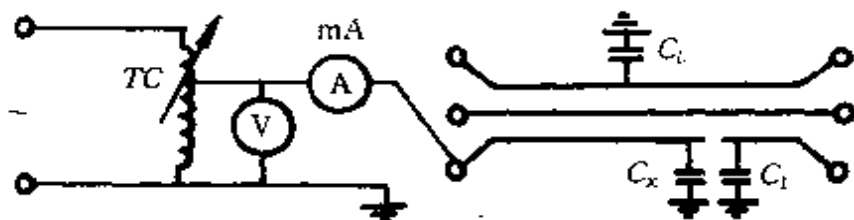


图 2-46 交流电压电流表法接线图

电源通过调压器  $TC$  供给, 分别测出在某一固定电压下各电容电流值, 然后根据电容电流与电容量成正比的关系, 按下式求得故障段的长度:

$$L_x = LI_x/I_L \text{ 和 } L_1 = LI_1/I_L$$

所加电压的选择, 随电缆类型和长度而异, 以毫安表指示能准确读取为准。

如某电缆长度为 290m, 已知  $C$  相断路, 今测得  $I_{LA}$  和  $I_{LB}$  均为 6.2mA,  $I_x$  为 4.5mA,  $I_1$  为 1.7mA, 则故障段的长度为  $L_x = 290 \times \frac{4.5}{6.2} = 210.5(\text{m})$  和  $L_1 = 290 \times \frac{1.7}{6.2} = 79.5(\text{m})$ 。

注意, 该方法只适用于对地绝缘较好, 故障点接地过渡电阻大于  $1\text{M}\Omega$  以上者。过渡电阻过低, 电流中包含电阻成分过大, 会得出错误的结果。

(3) 直流电容法: 适用于电缆芯断路, 且绝缘又较好的场合。测量原理接线如图 2-47 所示。



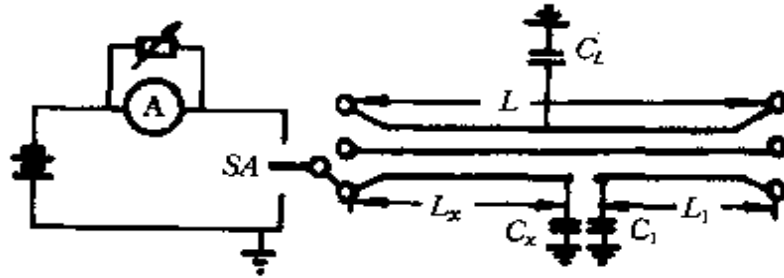


图 2-47 直流电容法接线图

图中电流表为特殊的冲击检流计，它的第一次最大冲击摆幅，与通过它的电量成正比。测量时，利用开关 SA，分别把检流计等测量回路轮流接入  $C_x$ 、 $C_1$  和  $C_L$  上，从每次检流计的最大指示值  $a_x$ 、 $a_1$  和  $a_L$ ，得故障段的长度为

$$L_x = La_x/a_L \text{ 和 } L_1 = La_1/a_L$$

需注意，通过检流计的电量还与每一被测电容的剩余电荷有关，因此每次测试前，应将被测电容至少短路放电三分钟以上，以消除可能引起的误差。

(4) 电子管(晶体管)电压表法：适用于橡胶、塑料外皮绝缘电缆芯线断路的场合。测量原理接线如图 2—48 所示。

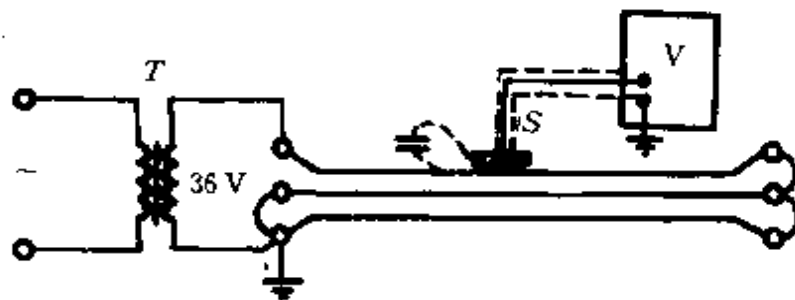


图 2—48 电子管(晶体管)电压表法接线图

电源电压经普通行灯变压器 T 加在故障的芯线上，其余芯线接地，手持检查器 S，从加压端沿电缆滑动，在未滑动至断路点前，由于芯线带电，在芯线与检查器钢片间电容耦合作用下，

电压表  $V$  有明显指示。当  $S$  滑动至断路点后,电压表指示突然减小甚至为零,由此可以准确地找到断路点。

注意,如果采用晶体管电压表,应选择内阻尽可能大的,以满足灵敏度要求,为避免电压表受外界干扰影响,量程不要小于  $1.5V$ 。

(5) 音频电容检测法:适用范围及工作原理与电压表法基本相同,只是电源改用能发出  $400 \sim 1000Hz$  的音频信号发生器  $P$ ,检查器改由铜或铝制造的探叉  $S$ ,电压表改用高阻抗耳机  $B$ 。该方法的测量灵敏度较电压法高。测量原理接线如图 2—49 所示。

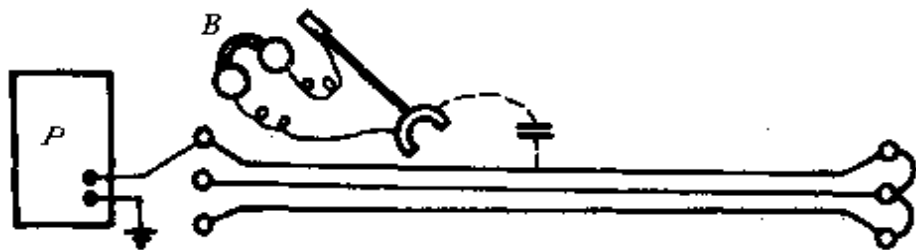


图 2—49 音频电容检测法接线图

测量方法与电压法类似,根据耳机中的信号突然减弱,可以准确地找到断路点。

### 十五、常用电工线材重量的快速计算

电气工作者有时会碰到在施工现场或无资料可查的场所,要估算某电工线材重量的问题。若能记住以下一些简单估算公式,则工作非常方便。

#### 1. 圆铜单心线重量估算

$$G = 7d^2$$

式中: $G$ ——千米线材的重量(kg/km);

$d$ ——线材直径(mm)。

此估算法算得的千米重量的最大误差不超过 0.6%。

2. 圆铝单心线重量估算

$$G = 2.12d^2$$

式中符号同前(下同)。

此估算法算得的千米重量的最大误差不超过 3.6%。

3. 单股镀锌铁线重量估算

$$G = 6.13d^2$$

此估算法算得的千米重量的误差极小。

4. 镀锌钢绞线或硬铜绞线重量估算

$$G = 9S$$

式中： $S$ ——线材截面积( $\text{mm}^2$ )。

此估算法算得的千米重量的最大误差不超过 8.6%(镀锌钢绞线)和 3.6%(硬铜绞线)。

5. 钢芯铝绞线重量估算

$$G = 4S$$

此估算法算得的千米重量的最大误差不超过 9%〔除 LGJ-300(为 10.9%)外〕。

6. 铝绞线重量估算

$$G = 2.73S$$

此估算法算得的千米重量的最大误差不超过 1.86%。

## 第三章 变压器

### 第一节 基本原理计算

#### 一、变压器原理及基本参数

##### 1. 变压器等效电路

单相变压器(或三相变压器的一相)负载运行,如图 3—1 所示。图中箭头符号表示各有关量的正方向。

(1)变比:当变压器一次侧接到频率为  $f$  和电压为  $U_1$  的正弦电源时,

$$U_1 = E_1 = 4.44fW_1\phi_{2m}$$

$$U_2 = E_2 = 4.44fW_2\phi_{2m}$$

因为  $I_1W_1 = I_2W_2$

$$\text{故变比 } k = k_{12} = \frac{U_1}{U_2} = \frac{E_1}{E_2} = \frac{W_1}{W_2} = \frac{I_2}{I_1}$$

式中:  $E_1$ 、 $E_2$ ——变压器一次和二次的感应电势;

$f$ ——电源频率;

$W_1$ 、 $W_2$ ——变压器一次和二次绕组的匝数;

$\phi_{2m}$ ——变压器铁芯磁通最大值;

$I_1$ 、 $I_2$ ——变压器一次和二次电流。

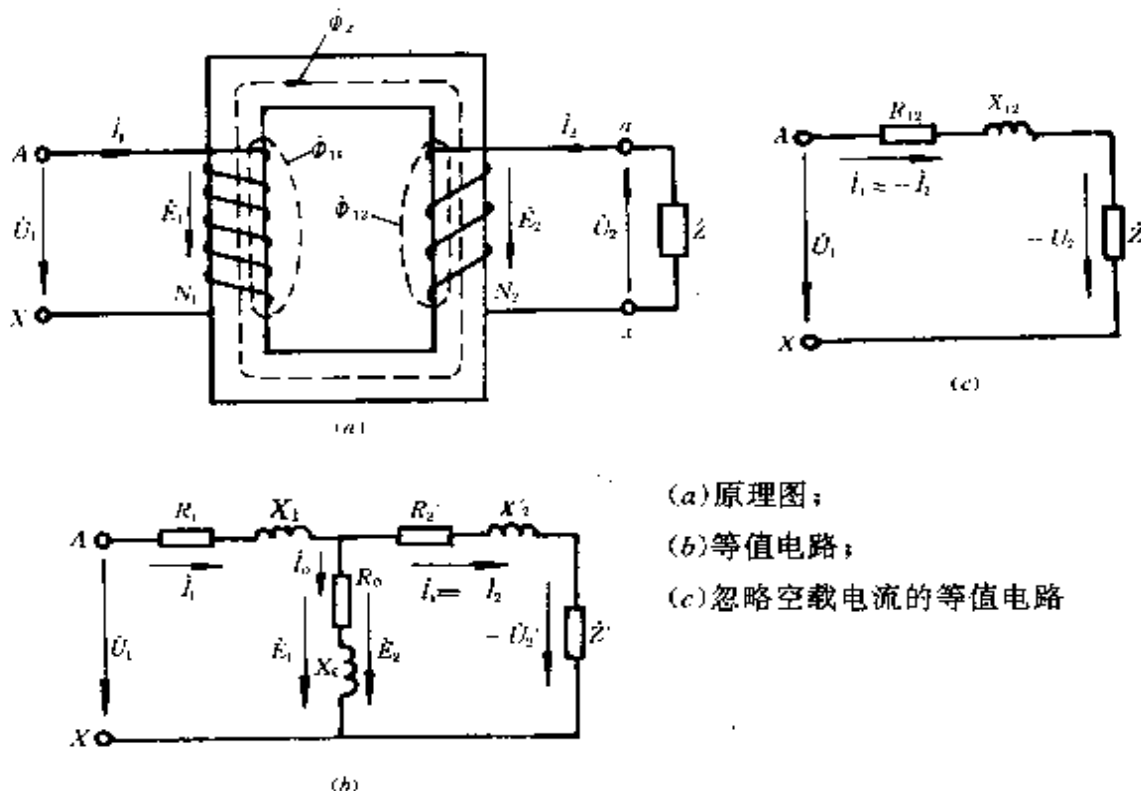
(2)容量:单相变压器的容量为  $S = U_1I_1 = U_2I_2$

三相变压器的容量为  $S = \sqrt{3}U_1I_1 = \sqrt{3}U_2I_2$

##### 2. 变压器基本参数及计算

(1)变压器等效电阻:

①按变压器已知参数计算:



(a)原理图；  
(b)等值电路；  
(c)忽略空载电流的等值电路

图 3-1 单相变压器负载运行图

$$R_{12} = \frac{P_d}{3I_{1e}^2} \times 10^3 = \frac{P_d U_{1e}^2}{S_e^2} \times 10^3$$

$$R_{21} = \frac{P_d}{3I_{2e}^2} \times 10^3 = \frac{P_d U_{2e}^2}{S_e^2} \times 10^3$$

式中： $R_{12}$ 、 $R_{21}$ ——变压器每相等效电阻折算到一次侧值和二次侧值( $\Omega$ )；

$P_d$ ——变压器额定电流时的铜耗(kW)，可由产品目录查得；

$I_{1e}$ 、 $I_{2e}$ ——变压器一次和二次额定电流(A)；

$U_{1e}$ 、 $U_{2e}$ ——变压器一次和二次额定线电压(kV)；

$S_e$ ——变压器额定容量(kVA)。

②按等效电路图计算：

$$R_{12} = R_1 + R'_2 = R_1 + k^2 R_2$$

$$R_{21} = R'_1 + R_2 = R_1/k^2 + R_2$$

式中： $R_1$ 、 $R_2$ ——为一次和二次的每相电阻( $\Omega$ )；

$R'_1$ 、 $R'_2$ ——为一次折算到二次和二次折算到一次的每相电阻( $\Omega$ )；

$k$ ——变压器变比。

(2) 变压器等效漏抗：

$$X_D = U_d \% \frac{10S_e}{3I_e^2} = U_d \% \frac{10U_e}{\sqrt{3}I_e} = U_d \% \frac{10U_e^2}{S_e}$$

式中： $X_D$ ——变压器每相等效漏抗( $\Omega$ )，可以折算到一次侧( $X_{D12}$ )，也可以折算到二次侧( $X_{D21}$ )；

$I_e$ 、 $U_e$ ——同前，与  $X_{D12}$  (或  $X_{D21}$ ) 对应，折算到一次侧 (或二次侧) 的电流和电压值(A、kV)；

$U_d \%$ ——变压器阻抗电压百分数，可由产品目录查得；

$S_e$ ——同前。

## 二、变压器电压变动率及效率计算

### 1. 电压变动率

$$\epsilon \% = \frac{U_{2e} - U_2}{U_{2e}} \times 100$$

式中： $U_2$ ——负载时二次电压；

$U_{2e}$ ——同前。

电压变动率也可写成

$$\begin{aligned} \epsilon \% = & \beta(U_a \% \cos \varphi_2 + U_r \% \sin \varphi_2) \\ & + \frac{\beta^2 (U_a \% \cos \varphi_2 - U_r \% \sin \varphi_2)^2}{200} \end{aligned}$$

近似计算时

$$\epsilon \% = \beta(U_a \% \cos \varphi_2 + U_r \% \sin \varphi_2), \beta = S/S_e$$

式中： $\beta$ ——变压器负载率；

$S$ ——变压器实际输出功率(kVA)；

$S_e$ ——同前(kVA)；

$U_r\%$ 、 $U_x\%$ ——变压器电阻电压百分数和电抗电压百分数；

$\cos\varphi_2$ ——负荷功率因数。

## 2. 效率

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} \times 100\%$$

当略去变压器中阻抗电压的影响时，则

$$\begin{aligned} \eta &= \frac{\beta S_r \cos\varphi_2}{\beta S_r \cos\varphi_2 + P_0 + \beta^2 P_d} \times 100\% \\ &= \frac{\sqrt{3} U_2 I_2 \cos\varphi_2}{\sqrt{3} U_2 I_2 \cos\varphi_2 + P_0 + \beta^2 P_d} \times 100\% \end{aligned}$$

式中： $P_2$ ——变压器输出有功功率(kW)；

$P_1$ ——变压器输入有功功率(kW)；

$P_0$ ——变压器空载损耗，即铁耗(kW)；

$P_d$ ——变压器短路损耗，即铜耗(kW)；

其它符号同前。

通常，中小型变压器的效率约 95~98%，大型变压器的效率一般在 99% 以上。

## 三、自耦变压器基本计算

自耦变压器的绕组由两部分组成，一部分为一、二次侧所公用，称为并联绕组；另一部分为非公用，称为串联绕组。

### 1. 单相自耦变压器

单相自耦变压器原理电路如图 3-2 所示。

自耦变压器的变比，忽略阻抗电压时

$$k = k_{12} = U_1 / U_2 = W_1 / W_2$$

忽略空载电流时

$$k = I_2 / I_1$$

串联绕组容量  $S_1 = (U_1 - U_2) I_1$

并联绕组容量  $S_2 = U_2 (I_2 - I_1)$

由  $U_1 I_1 = U_2 I_2$ , 得  $S_1 = S_2$ 。

$S_1$ 、 $S_2$  的大小是改变绕组抽头为某一电压档的位置而决定的。在各抽头中, 以容量值最大者称为自身容量, 而二次侧容量 ( $U_2 I_2$ ) 的额定值称为输出功率或线路容量。

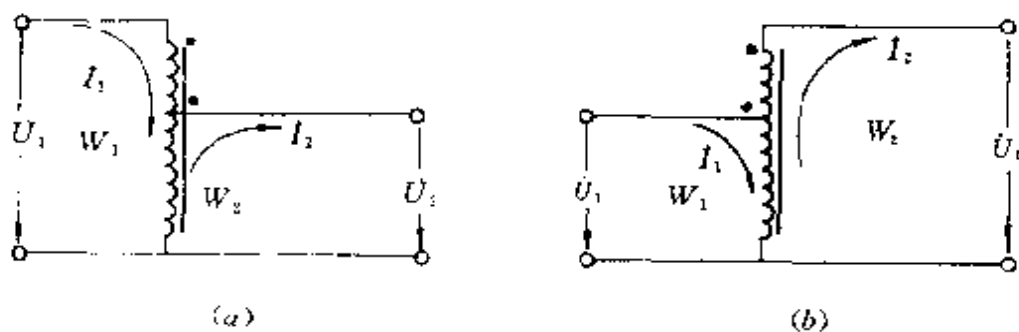


图 3-2 单相自耦变压器原理图

绕组分配比

$$\alpha = \frac{\text{自身容量}}{\text{线路容量}} = \frac{U_1 - U_2}{U_1}$$

$$\alpha = \frac{I_2 - I_1}{I_2}$$

式中:  $U_1$ 、 $U_2$ ——自耦变压器一次和二次电压 (kV);

$I_1$ 、 $I_2$ ——自耦变压器一次和二次电流(A);

$W_1$ 、 $W_2$ ——自耦变压器一次和二次绕组匝数;

$k$ ——自耦变压器变比。

当绕组分配比  $\alpha$  越趋近于零,  $U_2$  越趋近于  $U_1$ , 自身容量就越小, 可大大减小变压器的体积。

阻抗电压百分数、损耗率、电压变化率、励磁电流百分数, 若以线路容量为基准, 则上述各量的值均比双绕组变压器减小  $\alpha$  倍。例如, 线路容量均为 1000kVA, 当  $\alpha = 0.5$  时, 自身容量为 500kVA。对 500kVA 阻抗电压百分数为 5%, 对于线路容量则为 2.5%。

## 2. 三相自耦变压器



三相自耦变压器有降压用的，有升压用的。联结法一般有六种形式。现以降压用自耦变压器为例介绍如下。

(1) 内接双  $\Delta$  联结(图 3-3)；

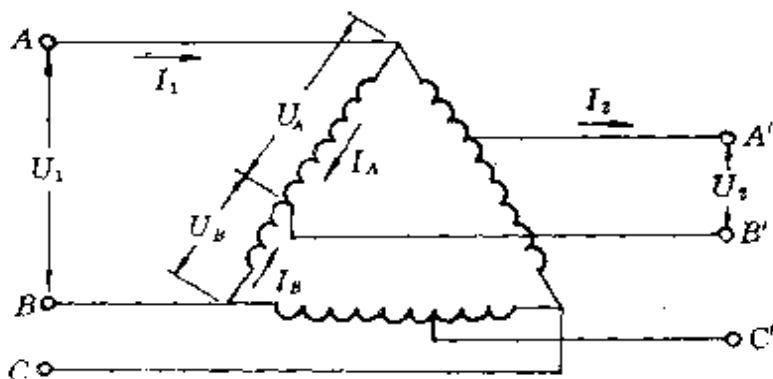


图 3-3 内接双  $\Delta$  联结

对于此种联结法，各量之间有如下关系：

$$I_A + I_B = I_2, \quad I_B = \frac{U_1 - U_B}{U_1} I_2$$

$$I_A = \frac{U_B}{U_A} I_B, \quad U_B = \frac{U_2}{2} + \sqrt{\frac{U_2^2}{3} - \frac{U_1^2}{12}}$$

$$\alpha = \frac{\text{自身容量}}{\text{线路容量}} = \frac{U_1^2 - U_2^2}{\sqrt{3} U_1 U_2}$$

(2) 延边  $\Delta$  联结(图 3-4)；

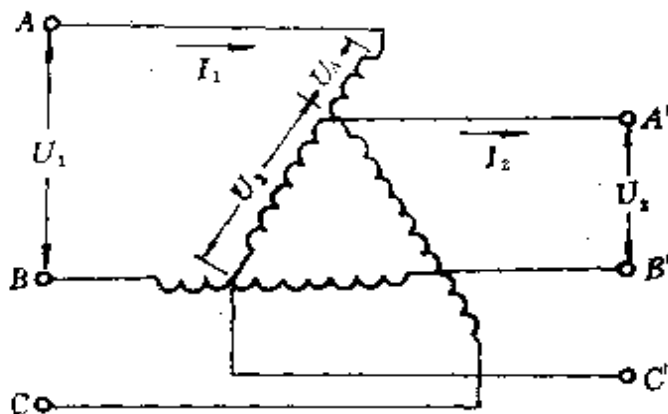


图 3-4 延边  $\Delta$  联结

各量之间有如下关系：

$$U_1^2 = (U_A + U_2)^2 + U_A^2 - 2U_A(U_A + U_2)\cos 120^\circ$$

$$= 3U_A^2 + 3U_A U_2 + U_2^2$$

$$U_A = -\frac{U_2}{2} + \sqrt{\frac{U_1^2}{3} - \frac{U_2^2}{12}}$$

$$\alpha = \frac{\text{自身容量}}{\text{线路容量}} = \frac{\sqrt{3}U_A}{U_1}$$

(3) Y 联结(图 3-5):

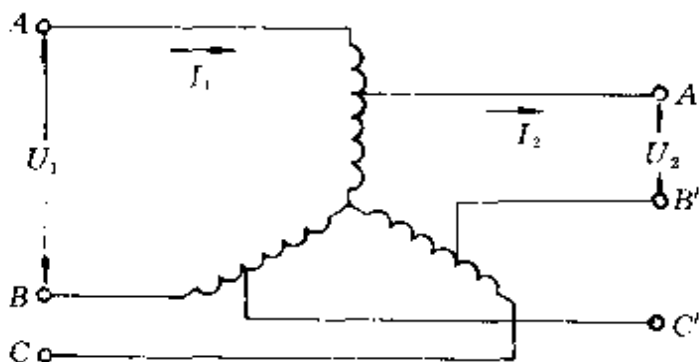


图 3-5 Y 联结

各量之间有如下关系:

$$\text{线路容量} = \sqrt{3}U_1 I_1 = \sqrt{3}U_2 I_2$$

$$\text{自身容量} = \frac{3}{\sqrt{3}}(U_1 - U_2)I_1$$

$$\alpha = \frac{\text{自身容量}}{\text{线路容量}} = \frac{U_1 - U_2}{U_1}$$

可见,与单相自耦变压器中的关系相同。

注意:此种联结的变压器,用于电力系统时,中性点应直接接地。这是为了防止当发生一线接地故障时,其它相对地产生过电压的危险。

**例 3-1** 某边区种马场供电线路全长 10km,实测变电所出口电压为 3.4kV,负荷峰值时末端 B 点电压仅 2.5kV,低谷时为 3.15kV。峰值负荷情况如图 3-6 所示。导线采用 TJ-

25mm<sup>2</sup> 铜绞线, 已知线间几何均距为 1.25m。由于高峰时 B 点电压过低, 且高峰用电时间较长, 致使种马场电动机经常烧损, 照明也不正常。为此欲采用自耦升压办法来改善用电质量, 试确定实施方案。

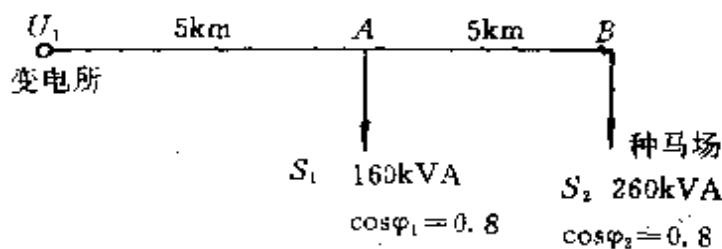


图 3-6 种马场供电情况(高峰时)

**解**

(1) 电压降校验: 由表 2-5 查得 TJ-25mm<sup>2</sup> 导线的电阻和电抗为:  $R_0 = 0.74\Omega/\text{km}$ ,  $x_0 = 0.391\Omega/\text{km}$

高峰时至 B 点的电压降为

$$\begin{aligned} \Delta U &= \frac{PR+QX}{U} = [420 \times 0.8 \times (0.74 \times 5) + 260 \times 0.8 \times \\ &\quad (0.74 \times 5) \\ &\quad + 420 \times 0.6 \times (0.391 \times 5) + 260 \times 0.6 \times (0.391 \times 5)] \\ &\quad \div 3.4 \\ &= 826(\text{V}) = 0.826\text{kV} \end{aligned}$$

高峰时 B 点的电压为

$$U_B = U_1 - \Delta U = 3.4 - 0.826 \approx 2.57(\text{kV})$$

该值与实测值(2.5kV)基本一致。说明该线路导线连接状况等良好(参见例 2-4 计算结果分析)。

(2) 升压变压器容量的确定: 用现成的三台单相变压器, 联结成如图 3-7 所示的形式。由于 A 点电压变化对 A 处负荷影响不大, 主要是 B 点的用电质量差。升压变压器安装在 B 处。

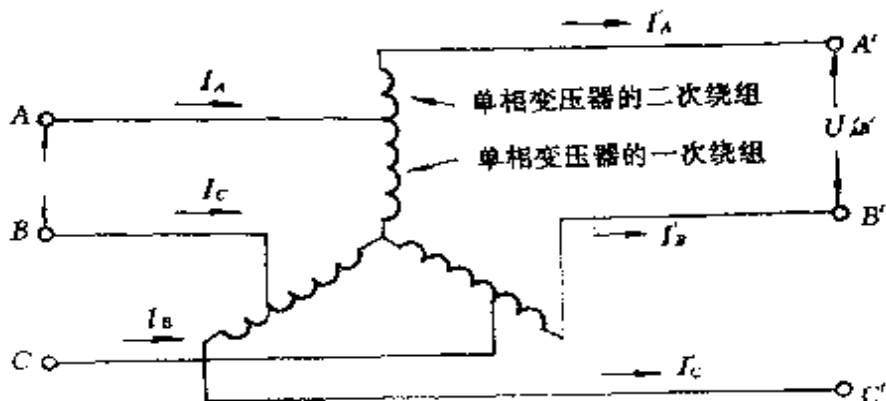


图 3-7 升压方案原理图

$B$  处最大负荷电流为

$$I = \frac{S}{\sqrt{3}U} = \frac{260}{\sqrt{3} \times 2.5} = 60(\text{A})$$

故所选单相 3/0.22kV 变压器的容量为

$$S = UI = 0.22 \times 60 = 13.2(\text{kVA})$$

选取额定容量为 15kVA 的单相变压器三台。

(3) 升压效果分析：测得  $B$  点的高峰、中负荷及低谷时的实际电压分别为 2.6kV、2.8kV 和 3.15kV。相应画出电压矢量图（只画一相），如图 3-8 所示。

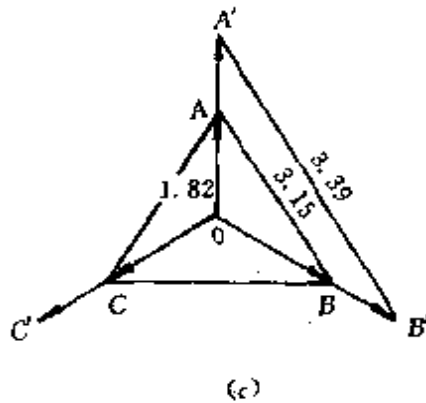
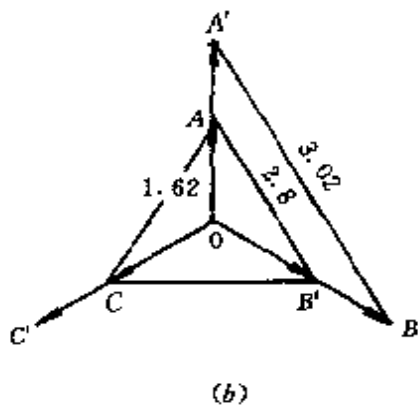
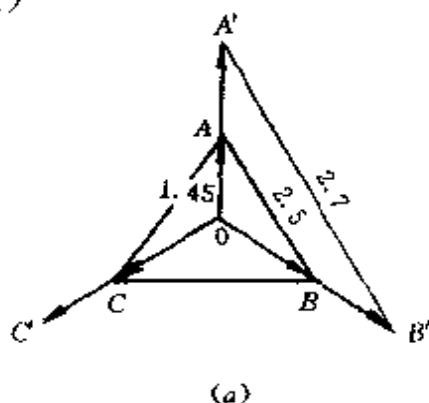


图 3-8 不同负荷时  $B$  点的电压矢量图

(a) 高峰时 (b) 中负荷时 (c) 低谷时

以图 3-8(a) 为例, 已知  $U_{AB}=2.5\text{kV}$ , 得  $U_{A0}=2.5/\sqrt{3}=1.45(\text{kV})$ 。

又原单相变压器的变比  $k=U_1/U_2=2850/220=13$  (一次侧取 2850V 一档), 故可得  $U_{AA'}=U_{A0}/k=1.45/13=0.111(\text{kV})$ 。

$$U_{A'B'}=U_{AB}\frac{U_{A0}+U_{AA'}}{U_{A0}}=2.5\times\frac{1.45+0.111}{1.45}=2.7(\text{kV})$$

用同样方法可求得中负荷和低谷时的电压, 如图 3-8(b)、(c) 所示。

(4) 实施升压方案后的效果, 见表 3-1。

表 3-1 实施升压方案后的效果

	高峰	中负荷	低谷
B 点电压(kV) (自耦变压器使用 2.85kV 档)	(2.5) 升至 2.7	(2.8) 升至 3.02	(3.15) 升至 3.48
低压侧电压(v) (种马场原有变压器使用 2.85kV 档)	(192) 升至 208	(216) 升至 233	(243) 升至 261
电压偏移率(%)	(-12.7) 至 -5.5	(-1.8) 至 +5.9	(+10.5) 至 +18.6
加高压油开关后的低压侧电压 (V) 及电压偏移率(%)	油开关投入 208/-5.5	油开关投入 233/+5.9	油开关切除 243/+10.5

注: 括弧内为未升压前的数值。

由表 3-1 可知, 投入升压变压器后, 若不采取措施, 在负荷低谷时种马场的电压将严重偏高, 为此在自耦升压变压器回路加入一台三相高压油开关, 以便在负荷处于低谷时, 将自耦升压变压器退出。具体接线如图 3-9 所示。

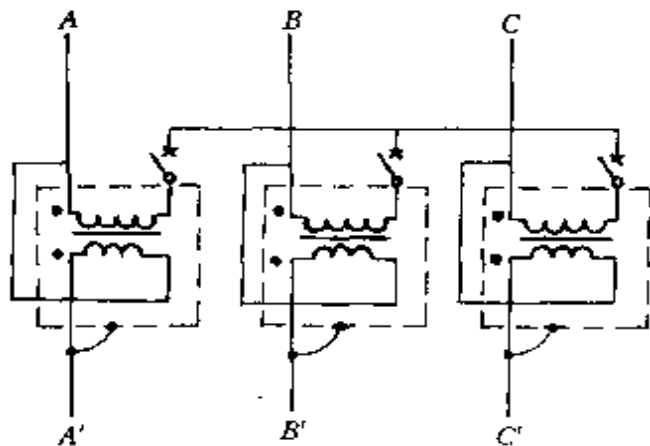


图 3-9 三台单相变压器及油开关的连线图

图 3-9 中,低谷时开关切除后变压器二次线圈仍处于通电状态,由于二次线圈阻抗很小,实际表明,低谷时在二次线圈上的压降约为零点几伏,故可忽略其影响。

(5) 安装注意事项:

① 采用单相变压器作自耦升压器,由于低压侧承受高压,所以应把变压器的外壳按线路电压等级绝缘,如图 3-10 所示。

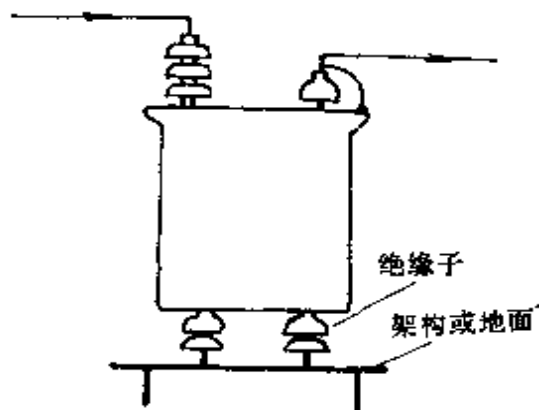


图 3-10 升压器安装示意图

② 为了保证变压器运行安全,还应把变压器的低压侧出线与变压器外壳连接起来。

四、V/V 联结的变压器功率和利用率计算

1. 功率计算

图 3-11 和图 3-12 分别为 V/V 联结的变压器(只画出副绕组)接有三相对称负荷的原理图和矢量图。其中  $\varphi$  为负荷  $Z$  的阻抗角。

由图 3-11 可得基本关系式如下：

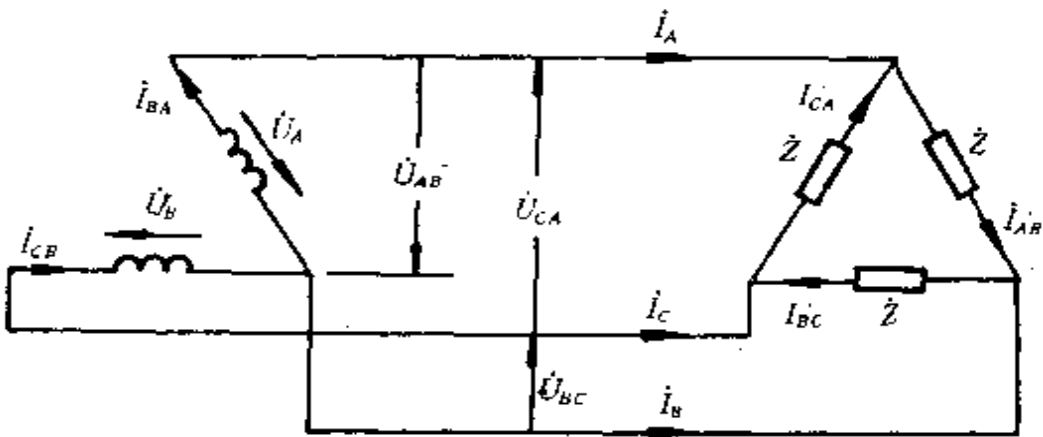


图 3-11 V/V 联结的变压器原理图

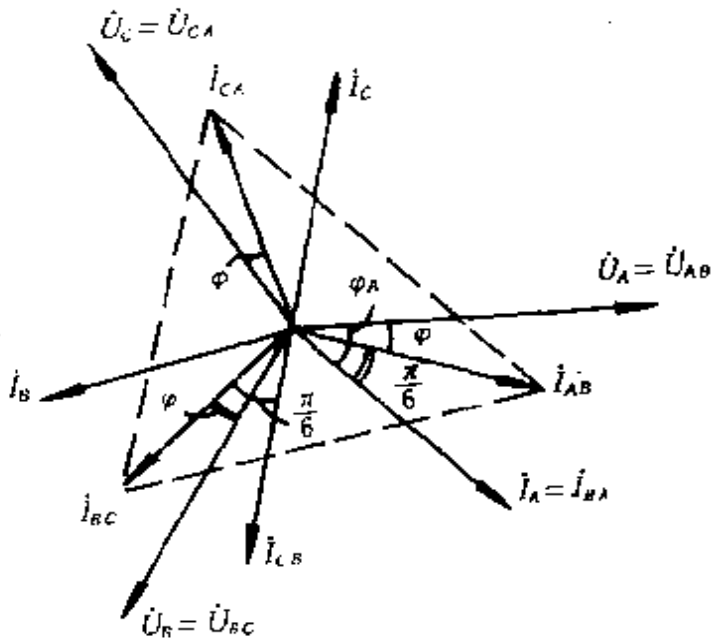


图 3-12 矢量图

$$\begin{cases} \dot{I}_A = \dot{I}'_{AB} - \dot{I}'_{CA} = \frac{\dot{U}_{AB} - \dot{U}_{CA}}{\dot{Z}} \\ \dot{I}_B = \dot{I}'_{BC} - \dot{I}'_{AB} = \frac{\dot{U}_{BC} - \dot{U}_{AB}}{\dot{Z}} \\ \dot{I}_C = \dot{I}'_{CA} - \dot{I}'_{BC} = \frac{\dot{U}_{CA} - \dot{U}_{BC}}{\dot{Z}} \end{cases}$$

由图 3-12 可得变压器输出功率为

$$\begin{aligned} P &= U_A I_{BA} \cos \varphi_A + U_C I_{CB} \cos \varphi_B \\ &= U_A I_A \cos \left( \frac{\pi}{6} + \varphi \right) + U_C I_C \cos \left( \frac{\pi}{6} - \varphi \right) \\ &= \sqrt{3} U I \cos \varphi \end{aligned}$$

因为负荷对称,所以

$$U = U_A = U_B = U_C, I = I_A = I_B = I_C$$

注意, V/V 连接的变压器,当负荷不平衡时会产生零序电流,造成电压中心点移动,使变压器输出的三相电压不平衡。

## 2. 变压器利用率计算

V/V 连接的变压器,能供给负荷的功率为  $S = \sqrt{3} U_e I_e$ ,而变压器的装置容量为  $2U_e I_e$ ,故 V/V 连接时,变压器的容量利用率为

$$\frac{\sqrt{3} U_e I_e}{2 U_e I_e} = \frac{\sqrt{3}}{2} = 86.6\%$$

## 五、变压器负载率计算

变压器负载率可按下式计算:

$$\beta = \frac{S}{S_e} = \frac{I_2}{I_{2e}} = \frac{P_2}{S_e \cos \varphi_2}$$

当测量  $I_2$  有困难时,也可近似用  $I_1/I_{1e}$  求取变压器的负载率。

变压器最大效率时的负载率,即最佳负载率  $\beta_m$  按下式计



算：

$$\beta_m = \sqrt{\frac{P_0 + KQ_0}{P_d + KQ_d}}, Q_0 = I_0\% \cdot S_e \times 10^{-2}, Q_d = U_d\% \cdot S_e \times 10^{-2}$$

式中： $Q_0$ ——变压器空载无功损耗(kVar)；

$Q_d$ ——变压器负载无功损耗(kVar)；

$I_0\%$ ——变压器空载电流百分数，可由产品目录查得；

$K$ ——无功经济当量(kW/kVar)，是指变压器连接处的无功经济当量。表 3-2 给出了无功经济当量概略值，供参考；

其它符号同前。

从而得变压器最佳的经济负荷  $S_{zj}$  为

$$S_{zj} = \beta_m S_e$$

约略估计(即只计及变压器有功功率损耗)时，则  $\beta_m = \sqrt{P_0/P_d}$ ，对于国产电力变压器  $\beta_m$  一般为 0.4~0.6。此时，变压器最大效率可写成：

$$\eta_{\max} = \left[ 1 - \frac{2P_0}{\sqrt{P_0/P_d} S_e \cos \varphi_2 + 2P_0} \right] \times 100\%$$

表 3-2 无功经济当量  $K$  值

变压器安装地点的特征	$K$ (kW/kVar)	
	最大负荷时	最小负荷时
直接由发电厂母线供电的变压器	0.02	0.02
由发电厂供电(发电机电压)的线路变压器	0.07	0.04
由区域线路供电的 35~110kV 的降压变压器	0.1	0.06
由区域线路供电的 10~6/0.4kV 的降压变压器	0.15	0.1

变压器安装距离供给无功功率电源愈远，经济当量愈大。

## 六、变压器损耗计算

### 1. 变压器在任何负载率下的有功损耗

$$\Delta P_b = P_0 + \beta^2 P_d$$

2. 变压器在任何负载率下的无功损耗

$$\Delta Q_b = Q_0 + \beta^2 Q_d$$

3. 变压器综合损耗

$$\Sigma \Delta P_b = \Delta P_b + K \Delta Q_b = P_0 + \beta^2 P_d + K(Q_0 + \beta^2 Q_d)$$

式中符号同前。

### 七、变压器损耗及效率测算

1. 变压器有功损耗和无功损耗的测量

(1) 用电度表测量变压器的总损耗: 如果在变压器的高、低压侧都装有电度表, 且两电度表的准确度等级相同, 则两侧电度表的读数之差, 即为变压器在该负荷下的总有功和无功损耗。

设高、低压侧装有三相有功电度表, 则

$$\Delta P_b = \Delta A_p / T = (A_{P1} - A_{P2}) / T$$

式中:  $\Delta P_b$ ——变压器有功损耗(kW);

$\Delta A_p$ ——在  $T$  时间内变压器的有功损耗电量(kWh);

$A_{P1}, A_{P2}$ ——高压和低压侧有功电度表在  $T$  时间内的读数(kWh);

$T$ ——测量时间(h)。

设高、低压侧装有无功电度表, 则

$$\Delta Q_b = \Delta A_q / T = (A_{Q1} - A_{Q2}) / T$$

式中:  $\Delta Q_b$ ——变压器无功损耗(KVar);

$\Delta A_q$ ——在  $T$  时间内变压器的无功损耗电量(kVarh);

$A_{Q1}, A_{Q2}$ ——高压和低压侧无功电度表在  $T$  时间内的读数(kVarh);

$T$ ——同前。

(2) 用功率表测量变压器的总损耗: 在负荷稳定不变的情况下, 可以用三相有功功率表和无功功率表分别在变压器高、低压侧测量, 这时

$$\Delta P_b = P_1 - P_2, \quad \Delta Q_b = Q_1 - Q_2$$

式中： $P_1$ 、 $P_2$ ——变压器高压和低压侧测得的有功功率(kW)；

$Q_1$ 、 $Q_2$ ——变压器高压和低压侧测得的无功功率(kVar)；

其它符号同前。

(3) 变压器无功损耗的测算：测出高、低压侧的有功功率、电压和电流，先按下列公式计算出变压器高、低压侧的功率因数：

$$\cos \varphi_1 = \frac{P_1}{\sqrt{3} U_1 I_1}, \quad \cos \varphi_2 = \frac{P_2}{\sqrt{3} U_2 I_2}$$

式中： $\cos \varphi_1$ 、 $\cos \varphi_2$ ——高压和低压侧的功率因数；

$U_1$ 、 $U_2$ 、 $I_1$ 、 $I_2$ 、 $P_1$ 、 $P_2$ ——高压和低压侧测得的线电压、电流和有功功率(kV、A、kW)。

然后求出高、低压侧的无功损耗：

$$Q_1 = \sqrt{3} U_1 I_1 \sin \varphi_1$$

$$Q_2 = \sqrt{3} U_2 I_2 \sin \varphi_2$$

变压器本身的无功损耗为

$$\Delta Q_b = Q_1 - Q_2$$

## 2. 变压器效率测算

当测算出变压器低压侧的功率因数  $\cos \varphi_2$ 、负荷率  $\beta$ ，以及已知变压器额定容量  $S_n$ 、空载损耗  $P_0$  及短路损耗  $P_d$  后，便可按下式求得变压器的效率

$$\begin{aligned} \eta &= \frac{P_2}{P_1} \times 100\% = \frac{P_2}{P_2 + \Delta P_2} \times 100\% \\ &= \frac{\beta S_n \cos \varphi_2}{\beta S_n \cos \varphi_2 + P_0 + \beta^2 P_d} \end{aligned}$$

## 八、变压器空载试验和短路试验计算

### 1. 空载试验计算

空载试验就是在变压器低压线圈上施加额定电压  $U_{2n}$ ，其它绕组开路，以测算出变压器的空载损耗，即铁耗和空载电流。

测试电源为三相电源时，接线如图 3-13(a)、(b)所示；测

试电源为单相电源时,接线图图 3-13(c)(d)所示(图中未画出电压表和频率表的接法)。

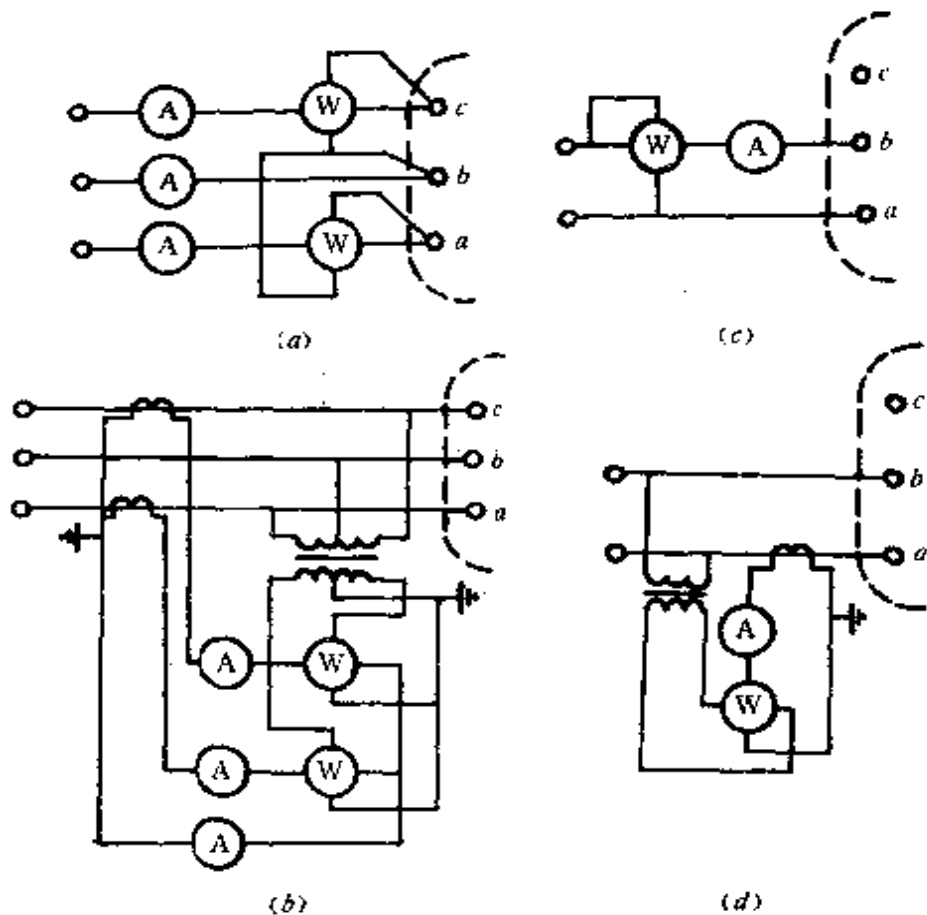


图 3-13 变压器容载试验接线图

(1)测试电源为三相电源:用两只瓦特表测空载损耗按下式计算:

$$P_0 = K_{TV1}K_{TA1}P_1 - K_{TV2}K_{TA2}P_2$$

式中; $P_0$ ——空载损耗(kW);

$K_{TV1}$ 、 $K_{TV2}$ ——两电压互感器倍率;

$K_{TA1}$ 、 $K_{TA2}$ ——两电流互感器倍率;

$P_1$ 、 $P_2$ ——低功率因数瓦特表的读数(kW)。

空载电流百分数按下式计算:

$$I_0\% = \frac{I_{0a} + I_{0b} + I_{0c}}{3I_{2e}} \times 100$$

式中： $I_{0a}$ 、 $I_{0b}$ 、 $I_{0c}$ ——分别为三相线电流(A)；

$I_{2e}$ ——二次额定电流(A)。

(2)测试电源为单相电源：当外加试验电压为 $\frac{2}{\sqrt{3}}U_{2e}$ ，空载

损耗按下式计算：

$$P_0 = \frac{P_{ab} + P_{bc} + P_{ca}}{2}$$

空载电流百分数按下式计算：

$$I_0\% = \frac{I_{0ab} + I_{0bc} + I_{0ca}}{3I_{2e}} \times 100$$

## 2. 短路试验

短路试验就是变压器一侧绕组短路(一般是低压绕组短路)，在另一侧绕组上加一个较小的电压，使绕组中电流达到额定值。外加试验电压称为短路电压。测得的损耗叫短路损耗。

短路试验的接线与空载试验接线相同(见图 3-13)，只是把开路的一侧接成短路，试验电源一般加在低压绕组。

短路试验电流  $I_s$  也可低于额定电流  $I_e$ ，但不应低于  $0.25I_e$ 。这时，测得的阻抗电压  $U'_d$  和短路损耗  $P'_d$  值要按下式换算到额定电流下的值：

$$U_d \approx \frac{U'_d I_e}{I_s}$$

$$P_d \approx \left( \frac{I_e}{I_s} \right)^2 P'_d$$

并按下式换算到相当于  $75^\circ\text{C}$  时的值(试验时变压器油温为  $t^\circ\text{C}$ )：

$$P_{d75} \approx TP_d$$

$$U_{d75} \approx \sqrt{U_d^2 + \left( \frac{P_d}{10S_e} \right)^2 (T^2 - 1)}$$

式中，温度系数  $T$  可按下式计算：

$$\text{铜绕组 } T = \frac{75 + 234.5}{t + 234.5},$$

$$\text{铝绕组 } T = \frac{75 + 225}{t + 225}$$

如果用单相电源测试,则短路损耗按下式计算:

$$P_d = \frac{P_{AB} + P_{BC} + P_{CA}}{2}$$

### 3. 变压器额定性能数据的允许偏差(表 3—3)

表 3—3 变压器额定性能数据允许偏差

项 目	允许偏差(%)	适 用 范 围
空载损耗 $P_0$	+15	所有变压器
短路损耗 $P_d$	+10	
总损耗 $\Delta P_z$	+10	
空载电流 $I_0$	+22	
阻抗电压 $U_d$	±10	
变 比 $k$	±0.5*	
三相直流电阻不平衡度	线 2 相 4	1600kVA 及以下变压器
	相(无中点不引出时为线)2	其它所有的变压器

\* 变比小于 3 的变压器为±1。

### 4. 变压器绝缘要求

变压器无原始资料时绝缘电阻参考值,见表 3—4。

油浸式电力变压器绝缘电阻的温度换算系数,见表 3—5。

铁芯、铁轭螺杆和夹件的绝缘电阻标准,见表 3—6。

油浸式电力变压器线圈的  $\text{tg}\delta$  允许值,见表 3—7。

油浸式电力变压器线圈的  $\text{tg}\delta$  的温度换算系数,见表 3—8。

表 3-4 变压器无原始资料时绝缘电阻参考值(MΩ)

电压等级	线圈温度(°C)	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	
10千伏及以下	允许值(MΩ)	一次对地	675	450	300	200	130	90	60	40	25	18
		一次对二次										
	良好值(MΩ)	二次对地	45	30	20	13	9	6	4	3	2	1
		一次对地	1000	675	450	300	200	130	90	60	40	25
		一次对二次										
		二次对地	68	45	30	20	13	9	6	4	3	2
20~30千伏	允许值(MΩ)	900	600	400	270	180	120	80	50	35	23	
	良好值(MΩ)	1400	900	600	400	270	180	120	80	53	35	

注:对投入运行前的线圈绝缘电阻应不低于制造厂的70%或不低于本表的允许值(此值原规定不一,本表据最近国家标准)。

因温度每差10°C,绝缘电阻值变化50%,故当测量温度与产品出厂试验时温度不符合时,可按表3-5换算到同一温度0°C时的数值(即测试值和出厂值各乘以换算系数)来进行比较。

表 3—5 油浸式电力变压器绝缘电阻的温度换算系数

温度差 (°C)	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60
换算系数	1.2	1.5	1.8	2.3	2.8	3.4	4.1	5.1	6.2	7.5	9.2	11.2

表 3—6 铁芯、铁轭螺杆和夹件(轭铁梁)的绝缘电阻标准

变压器电压等级(kV)	20°C 时绝缘电阻最低限值(MΩ)
0.4	90
3~10	200
20~35	300

注:绝缘电阻值不应低于初始值的 50%,如无原始值时用本表数值。

表 3—7 油浸式电力变压器线圈的 tgδ 允许值%

高压线圈电压等级 温度(°C)	10	20	30	40	50	60	70
35kV 及以下	1.5	2.0	3.0	4.0	6.0	8.0	11.0
35kV 以上	1.0	1.5	2.0	3.0	4.0	6.0	8.0

注:

①同一变压器中压和低压线圈的 tgδ 标准与高压线圈相同。

②当测量温度与产品出厂试验温度不同时,可按表 3—5 换算到同一温度的数值来比较。



表 3—8 油浸式电力变压器线圈的  $\text{tg}\delta$  的温度换算系数

温度差 (°C)	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60
换算系数	1.15	1.3	1.5	1.7	1.9	2.2	2.5	3.0	3.5	4.0	4.6	5.3

### 九、变压器无功经济当量的计算

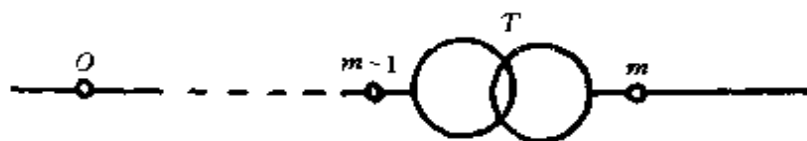


图 3—14 某企业变压器接线示意图

如图 3—14 所示,0 点为供电局电量计量点,如果将该点作为企业计算无功经济当量的基准点,则变压器  $T$  输出端  $m$  处的无功经济当量为(具体推导见第四章第二节设备的无功补偿计算):

$$K_m = \sum_{i=1}^{m-1} K_i + \frac{2Q_m R_m}{U_m^2} \times 10^{-3}$$

$$R_m = \frac{\Delta A \times 10^3}{3I_i^2 \times 24} = \frac{\Delta P \times 10^3}{3I_i^2}$$

式中: $K_m$ —— $m$  处的无功经济当量(kW/kVar);

$\sum_{i=1}^{m-1} K_i$ ——变压器  $T$  至基准点 0 中间各级无功经济当量之和(kW/kVar);

$Q_m$ ——变压器  $T$  输出端  $m$  处的无功功率(kVar);

$U_m$ ——变压器  $T$  输出端  $m$  处的线电压(kV);

$R_m$ ——变压器  $T$  折算到二次侧的等效电阻( $\Omega$ );

$\Delta A$ 、 $\Delta P$ —— 负荷变化周期内变压器的损耗电量和变压器综合损耗(kWh、kW);

$I_i$ —— 负荷变化周期内的均方根电流(A)。

点  $m$  处的无功功率为(取 24h 内的平均值)

$$Q_{mp} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n Q_{mi} = \frac{A_{Qm}}{24}$$

式中： $Q_{mp}$ —— $m$  处的无功功率(kVar);

$A_{Qm}$ —— 正常生产日内，点  $m$  处的无功电量(kVarh)。

$$\text{因此 } K_m = \sum_{i=1}^{m-1} K_i + \frac{2Q_{mp} \cdot \Delta P}{3I_m^2 U_m^2}$$

如果测量的不是变压器  $T$  输出端的无功功率，而是输入端的无功功率，则

$$Q_{mp} = Q_{(m-1)p} - \Delta Q = Q_{(m-1)p} - (\Delta Q_0 + \beta^2 \cdot \Delta Q_d)$$

$$Q_{(m-1)p} = \frac{A_{Q(m-1)}}{24} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n Q_{(m-1)i}$$

式中： $Q_{(m-1)p}$ —— 变压器输入端( $m-1$ 点)无功功率平均值(kVar);

$A_{Q(m-1)}$ —— 正常生产日内，变压器输入无功电量(kVarh)。

**例 3-2** 某企业供电变压器为 SL7—1600/35，低压侧额定电压为 10.5kV。供电局计量表装在高压侧，正常生产日测得输入有功电量为 9800kWh，无功电量为 7500kVarh。另外，从负载曲线中计算出负载率为  $\beta=50\%$ 。求该变压器输出端的无功经济当量。

**解** 由产品目录查得： $P_0=2.65\text{kW}$ ， $P_d=19.5\text{kW}$ ， $I_0\% =$

$$1.4, U_d\% = 6.5$$

因此, 变压器有功损耗为

$$\Delta P = P_0 + \beta^2 P_d = 2.65 + 0.5^2 \times 19.5 = 7.53 (\text{kW})$$

变压器无功损耗为

$$\begin{aligned} \Delta Q &= I_0\% \cdot S_e \cdot 10^{-2} + \beta^2 U_d\% \cdot S_e \cdot 10^{-2} \\ &= 1.4 \times 1600 \times 10^{-2} + 0.5^2 \times 6.5 \times 1600 \times 10^{-2} \\ &= 48.4 (\text{kVar}) \end{aligned}$$

$$\text{又有 } I_j = \beta I_{2e} = 0.5 \times \frac{1600}{\sqrt{3} \times 10.5} = 44 (\text{A})$$

故该变压器折算到二次侧的等效电阻为

$$R_m = R_1 = \frac{\Delta P}{3I_j^2} \times 10^3 = \frac{7.53 \times 10^3}{3 \times 44^2} = 1.296 (\Omega)$$

该变压器输出端无功功率 24h 内平均值为

$$\begin{aligned} Q_{mp} &= \frac{A_{Q(m-1)}}{24} - \Delta Q = \frac{7500}{24} - 48.4 \\ &= 264.1 (\text{kVar}) \end{aligned}$$

因此, 无功经济当量为

$$\begin{aligned} K_m = K_1 &= 0 + \frac{2Q_{1p}R_1}{U_1^2} \times 10^{-3} \\ &= \frac{2 \times 264.1 \times 1.296}{10.5^2} \times 10^{-3} = 0.006 (\text{kW/kVar}) \end{aligned}$$

## 第二节 变压器经济运行计算

### 一、变压器并联运行计算

#### 1. 变压器并联运行的条件

(1) 各变压器具有同样的一次侧额定电压和二次侧额定电压, 即各变压器的变比  $k$  相等 (允许差别  $\leq \pm 0.5\%$ );

(2) 联结方式相同;

(3) 各变压器阻抗电压百分数  $U_d\%$  相等 (允许差别  $\leq \pm$

10%)；

(4) 变压器容量比不应超过 3 : 1。

### 2. 变比相等的两台变压器并联运行计算

阻抗电压及额定容量均不等,但变比相等的两台变压器并联运行时,负荷电流按下式分配:

$$\begin{cases} \frac{I_A}{I_B} = \frac{U_{dB}\%}{U_{dA}\%} \cdot \frac{I_{Ac}}{I_{Bc}} \\ I_A + I_B = I \end{cases}$$

式中:  $I_A$ 、 $I_B$ ——变压器 A 和 B 所承担的负荷电流;

$I_{Ac}$ 、 $I_{Bc}$ ——变压器 A 和 B 的额定电流;

$U_{dA}\%$ 、 $U_{dB}\%$ ——变压器 A 和 B 的阻抗电压百分数;

$I$ ——负荷电流。

由上述公式便可求得两台变压器各自承担的电流。

分析上述公式可知,当并联变压器阻抗电压和额定容量均不等时,若容量大的变压器具有较小的阻抗电压时,总的装置容量利用较好。

如果并联变压器阻抗电压不等,而额定容量相等,则当阻抗电压大的变压器满载时,阻抗电压小的变压器就要过载;反之,当阻抗电压小的变压器满载时,阻抗电压大的变压器处于轻载。这样,两台变压器的容量将得不到充分利用。

### 3. 变比不等的两台变压器并联运行计算

(1) 空载运行时的环流:变比不等的两台变压器并联且空载运行时,虽无负荷电流输出,但两台变压器之间却存在有环流,环流在变压器中产生损耗,使绕组发热。

空载运行时的环流可由下式计算:

$$I_h = \frac{\dot{U}_1 \left( \frac{1}{k_A} - \frac{1}{k_B} \right)}{j(\bar{X}_{D2A} + \bar{X}_{D2B})} \times 10^3$$

式中:  $I_h$ ——变比不等的两台变压器并联且空载运行时的环流

乙丙甲

(A);

$\dot{U}_1$ ——变压器一次侧电压(kV);

$k_A, k_B$ ——变压器 A 和 B 的变比;

$X_{D2A}, X_{D2B}$ ——变压器 A 和 B 每相等效漏抗折算到二次侧的值( $\Omega$ );

$j$ ——虚数符号。

(2)带负荷运行时的电流分配;带负荷运行时,变压器的总电流中,除上述环流依然存在外,还要迭加上一个负载分量的电流,即

$$\begin{cases} \dot{I}_{2A} = \dot{I} \frac{X_{D2B}}{X_{D2A} + X_{D2B}} + \frac{\dot{U}_1 \left( \frac{1}{k_A} - \frac{1}{k_B} \right)}{j(X_{D2A} + X_{D2B})} \times 10^3 \\ \dot{I}_{2B} = \dot{I} \frac{X_{D2A}}{X_{D2A} + X_{D2B}} - \frac{\dot{U}_1 \left( \frac{1}{k_A} - \frac{1}{k_B} \right)}{j(X_{D2A} + X_{D2B})} \times 10^3 \end{cases}$$

式中: $\dot{I}_{2A}, \dot{I}_{2B}$ ——变压器 A 和 B 所承担的电流  
(二次侧电流)(A);

其它符号同前。

由上述公式可知,当变比不等的两台变压器并联运行时,各变压器的电流均由两部分组成:第一部分是认为变比相等时的负荷分量,这一分量按两台变压器的等效漏抗反比分配;第二部分是由于变化不等而产生的环流,这一分量对两台变压器来说大小相等,但方向相反,即由一台变压器流到另一台变压器而不送给负载。

#### 4. 同型号、同参数的变压器投入台数的确定

当并联的变压器型号、容量、特性均相同时,不同负荷情况下该投入运行的变压器台数,按下列公式确定:

若负荷增加,当

$$S > S_e \sqrt{n(n+1) \frac{P_0 + KQ_0}{P_d + KQ_d}} \text{ 时,}$$

向并联运行中的  $n$  台变压器中再投入一台较经济;

若负荷减少,当

$$S < S_e \sqrt{n(n+1) \frac{P_0 + KQ_0}{P_d + KQ_d}} \text{ 时,}$$

对并联运行的  $n$  台变压器切除一台较经济。

式中:  $S$ —— $n$  台变压器实际使用负荷(kVA);

$S_e$ ——一台变压器的额定容量(kVA);

$n$ ——已运行的变压器台数;

$K$ ——无功经济当量(kW/kVar);

$P_0, Q_0, P_d, Q_d$  均为一台变压器的值,意义同前。

当然,还要考虑操作频度。为了减少一昼夜中的操作次数,停用变压器的时间一般不少于 2~3h。

### 5. 不同型号、不同参数的变压器投入台数的确定

当并联的变压器型号、容量、特性不同时,不同负荷情况下该投入运行的变压器台数,可由查曲线的方法确定。具体做法如下:

先将每台变压器的损耗与负荷的关系曲线按下式画出:

$$\sum \Delta P_b = (P_0 + KQ_0) + (P_d + KQ_d) \left( \frac{S_i}{S_e} \right)^2$$

式中:  $S_i$ ——该台变压器的负荷容量(kVA);

其它符号同前。

再将  $n$  台变压器并联运行时的损耗与负荷的关系曲线按下式画出(设各变压器之间的负荷是按其额定容量成比例分配的):

$$\sum_1^n (\sum \Delta P_b) = \sum_1^n (P_0 + KQ_0) + \left[ \frac{S}{\sum_1^n S_e} \right]^2 \sum_1^n (P_d + KQ_d)$$

例如,两台变压器并联运行。按上述方法画出三条曲线(变压器 A 的损耗曲线、变压器 B 的损耗曲线、两台变压器并联运行时的损耗曲线),如图 3—15 所示。

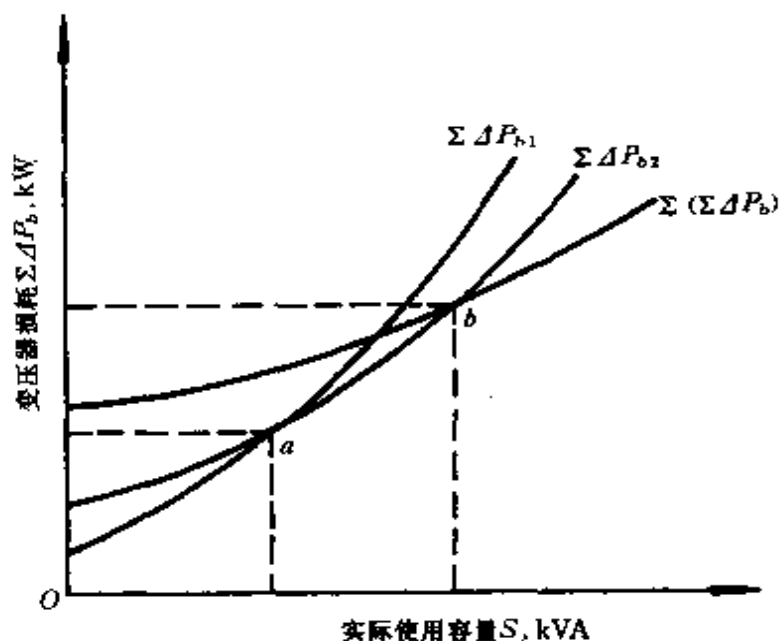


图 3—15 两台变压器并联运行损耗曲线

图中损耗曲线的交点,就是确定经济运行变压器台数的分界点。若在  $a$  点左边,只投入 A 变压器较经济;若在  $a$  点与  $b$  点之间,投入 B 变压器较经济;若在  $b$  点右边,两台同时投入运行最经济。

**例 3—3** 有 A、B 两台单相变压器,一、二次额定电压分别相等,额定容量分别为 630kVA 和 800kVA,阻抗电压分别为 4 和 4.5。现将它们并联运行,承担共同负荷。试求两台变压器均不超载的情况下可供的最大容量。假设变压器的电阻忽略不计。

**解** 以 630kVA 为基准的变压器阻抗电压为



变压器 A  $U_{dA}\% = 4$

变压器 B  $U'_{dB}\% = 4.5 \times (630/800) = 3.54$

设共同负荷为  $S$  (kVA), 则变压器 A 分担的负荷为

$$S_A = S \frac{U'_{dB}\%}{U_{dA}\% + U'_{dB}\%} = \frac{3.54}{4 + 3.54} S$$

$$= 0.47S \leq 630 \text{ kVA}$$

变压器 B 分担的负荷为

$$S_b = S \frac{U_{dA}\%}{U_{dA}\% + U'_{dB}\%} = \frac{4}{4 + 3.54} S$$

$$= 0.53S \leq 800 \text{ kVA}$$

由上两式分别得

$$S \leq 1340.4 \text{ kVA}$$

$$S \leq 1509.4 \text{ kVA}$$

故能满足上两式的负荷  $S$  最大值为

$$S = 1340.4 \text{ kVA}$$

**例 3-4** 两台三相变压器 A 和 B 并联运行。变压器 A 的额定容量为 100kVA, 空载损耗为 0.35kW, 负载损耗为 2.0kW; 变压器 B 的相应参数为 315kVA, 0.76kW 和 4.8kW。设负荷的功率因数为 0.9, 变压器一、二次额定电压及阻抗电压相等。试求:

- (1) 并联运行时各变压器的负荷分配;
- (2) 当负荷超过多少时, 两台变压器并联运行才是经济的?

**解**

(1) 变压器等效漏抗公式为

$$X_D = U_d\% \frac{10U_e^2}{S_e}$$

由于变压器 A 和 B 的  $U_d\%$  和  $U_e$  分别相等, 所以有

$$X_{DA}/X_{DB} = S_{eB}/S_{eA}$$

当并联运行供给负荷为  $S$  (kVA) 时, 变压器 A 负担的负荷

例题 3-4 解答



为  $S_A$ 、变压器  $B$  负担的负荷为  $S_B$ ，则有

$$\begin{aligned} S &= S_A + S_B \\ S_A &= S \frac{X_{DB}}{X_{DA} + X_{DB}} = S \frac{S_A}{S_A + S_B} \\ &= \frac{100}{100 + 315} S = 0.24S \\ S_B &= S \frac{S_B}{S_A + S_B} = \frac{315}{100 + 315} S = 0.76S \end{aligned}$$

(2) 设切换的负荷容量为  $S$ ，则这时两台变压器的损耗分别为

$$\begin{aligned} \Delta P_A &= P_0 + \beta^2 P_d = 0.35 + \left( \frac{S_A}{100} \right)^2 \times 2.0 \\ &= 0.35 + \left( \frac{0.24S}{100} \right)^2 \times 2.0 \\ &= 0.35 + 1.152 \times 10^{-5} S^2 \\ \Delta P_B &= 0.76 + \left( \frac{0.76S}{315} \right)^2 \times 4.8 = 0.76 + 2.794 \times 10^{-5} S^2 \end{aligned}$$

并联运行时的损耗为

$$\Delta P_A + \Delta P_B = 1.11 + 3.946 \times 10^{-5} S^2$$

设当 315kVA 变压器单独供给  $S$  负荷时的损耗为  $\Delta P'_B$ ，则

$$\Delta P'_B = 0.76 + (S/315)^2 \times 4.8 = 0.76 + 4.837 \times 10^{-5} S^2$$

按题意  $\Delta P_A + \Delta P_B = \Delta P'_B$

$$1.11 + 3.946 \times 10^{-5} S^2 = 0.76 + 4.837 \times 10^{-5} S^2$$

得  $S = 198\text{kVA}$

因此，当负荷超过 198kVA 时，两台变压器并联运行才是经济的。

## 二、变压器年电能损耗计算

变压器年负载率  $\beta_n$  可按下列式计算：

$$\beta_n = \frac{A_p}{T S_n \cos \varphi_n}$$

式中： $\cos \varphi_n$ ——年（加权）平均功率因数，可根据  $\text{tg} \varphi_n = A_Q / A_p$ ，由

三角函数表查得；

$A_P, A_Q$ ——根据电度表(电度表装在降压变压器的高压侧)示值,在所计算时间内(这儿是1年)的有功电量和无功电量(kWh、kVarh)；

$T$ ——变压器年运行小时数(h)。

变压器年电能损耗为

$$\begin{aligned} \Delta A &= \Delta A_P + k\Delta A_Q \\ &= (P_0 T + \beta_n^2 P_d \tau) + K(Q_0 T + \beta_n^2 Q_d \tau) \\ &= (P_0 T + \beta_n^2 P_d \tau) + K(I_0 \% \cdot S_c T + \beta_n^2 U_d \% \cdot S_c \tau) \times 10^{-2} \end{aligned}$$

式中： $\Delta A$ ——变压器年电能损耗(kWh)；

$\tau$ ——变压器正常负荷下工作小时数,参见表3—9；

其它符号同前。

年综合电能损耗最小的变压器经济负载率为

$$\beta_m = \sqrt{\frac{(P_0 + KI_0 \% \cdot S_c \times 10^{-2})T}{(P_d + KU_d \% \cdot S_c \times 10^{-2})\tau}}$$

式中：符号同前。

表3—9 生产班制及各种时间(参供值)

生产班制	正常负荷下工作小时数 $\tau$	年运行小时数 $T$	最大负荷年利用小时数 $T_{max}$
一班制	2300	8000	1500
二班间断	4600	8000	3000
三班间断	6900	8000	4500
三班连续	8000	8000	7500

### 三、判定负荷过轻的临界条件

综合功率损耗临界负载率  $\beta_{lz}$  的计算:

$$\beta_{lz} = 0.4 \sqrt{P_{0z}/P_{dz}}$$

式中:  $P_{0z}$ ——变压器综合空载损耗(kW),

$$P_{0z} = P_0 + KQ_0;$$

$P_{dz}$ ——变压器综合短路损耗(kW);

其它符号同前。

当负载率  $\beta > \beta_{lz}$  时,不属于过轻负载;当  $\beta < \beta_{lz}$  时,则属于过轻负载,这时须作经济技术比较后考虑是否更换。

#### 四、变压器经济运行节电效益的计算

##### 1. 经济运行节约电量的计算

$$\Delta\Delta A_p = \Delta\Delta PT_j;$$

$$\Delta\Delta A_Q = \Delta\Delta QT_j;$$

$$\Delta\Delta A_z = \Delta\Delta A_p + K\Delta\Delta A_Q$$

式中:  $\Delta\Delta A_p$ ——节约的有功电量(kWh);

$\Delta\Delta A_Q$ ——节约的无功电量(kVarh);

$\Delta\Delta A_z$ ——节约的综合电量(kWh);

$T_j$ ——经济运行时间(h);

$K$ ——无功经济当量(kW/kVar)。

##### 2. 经济效益计算

对于企业变压器  $G = (\Delta\Delta A_p + K_G\Delta\Delta A_Q)\delta$

对于电力系统变压器  $G = \Delta\Delta A_z \cdot \delta$

式中:  $G$ ——节约资金(元);

$\delta$ ——电价(元/kWh);

$K_G$ ——无功电价等效当量,见表 3-10。

所谓无功电价等效当量  $K_G$ ,是指功率因数在  $\cos\varphi_1 \sim \cos\varphi_2$  区间内,1kVarh 的无功电量电价相当于有功电度电价的倍数。其中  $\cos\varphi$  是变压器电源侧月功率因数。

表 3-10 无功电价等效当量  $K_G$  表

(1)  $\cos\varphi=0.9$  为基准的企业

月 $\cos\varphi$	0.5~ 0.55	0.55~ 0.6	0.6~ 0.55	0.65~ 0.7	0.7~ 0.75	0.75~ 0.8	
$K_G$	0.464	0.541	0.621	0.668	0.179	0.191	
月 $\cos\varphi$	0.8~ 0.85	0.85~ 0.9	0.9~ 0.92	0.92~ 0.94	0.94~ 0.96	0.96~ 0.98	0.98~ 1
$K_G$	0.191	0.183	0.34	0.032	0.042	0.023	0.037

(2)  $\cos\varphi=0.85$  为基准的企业

月 $\cos\varphi$	0.5~ 0.55	0.55~ 0.6	0.6~ 0.65	0.65~ 0.7	0.7~ 0.75	0.75~ 0.8	0.8~ 0.85	
$K_G$	0.464	0.541	0.621	0.668	0.179	0.191	0.191	
月 $\cos\varphi$	0.85~ 0.86	0.86~ 0.88	0.88~ 0.9	0.9~ 0.92	0.92~ 0.94	0.94~ 0.96	0.96~ 0.98	0.98~ 1
$K_G$	0.191	0.09	0.09	0.085	0.032	0.042	0.023	0.037

表 3-10 的使用方法:根据变压器经济运行月功率因数及本单位所执行的功率因数电价基准 ( $\cos\varphi=0.85$  或  $\cos\varphi=0.9$ ),从表 3-10(1)、(2)查出相应的  $K_G$  值。

### 五、变压器是否需要更新的计算

变压器是否需要更新,决定于变压器的回收年限,一般的原則是:①当回收年限小于 5 年时,变压器应予更新;②当回收年限大于 10 年时,不应当考虑更新;③当回收年限为 5~10 年时,应酌情考虑,并以大修时更新为宜。

1. 旧变压器使用年限已到期,即没有剩值,其回收年限可按式计算:

$$T_b = \frac{C_n - C_j - C_c}{G}$$

式中:  $T_b$ ——回收年限(年);

$C_n$ ——新变压器的购价(元);

$C_j$ ——旧变压器残存价值,可取原购价的 10%;

$C_c$ ——减少补偿电容器的投资(元);

$G$ ——年节约电费(元/年)。

2. 上述情况,如旧变压器需大修时,其回收年限按下式计算:

$$T_b = \frac{C_n - C_{JD} - C_j - C_c}{G}$$

式中:  $C_{JD}$ ——旧变压器大修费(元);

其它符号同前。

3. 旧变压器不到使用期限,即还有剩值,其回收年限可按式计算:

$$T_b = \frac{C_n - C_{MJ} - C_{JD} - C_j - C_c}{G}$$

式中:  $C_{MJ}$ ——旧变压器的剩值(元),

$$C_{MJ} = C_b - C_b C_n \% \cdot T_s \times 10^{-2}$$

$C_b$ ——旧变压器的投资(元);

$C_n\%$ ——折旧率;

$T_s$ ——运行年限(年);

其它符号同前。

**例 3—5** 有一台  $SJ_1 - 3200\text{kVA}$  变压器,现已运行 18 年,折旧率为 5%(变压器设计经济使用寿命为 20 年),现部分绕组已损坏,需更换,并进行大修,大修费为该变压器投资费的 50%,该变压器正常负载率为 80%,年运行小时数为 8400h。试

问：变压器是更新合理，还是大修合理？

解 现将新旧变压器的参数等列于表 3—11。

表 3—11 新旧变压器参数比较

变压器 (kVA)	$P_0$ (kW)	$P_d$ (kW)	$I_0\%$	$Q_0$ (kVar)	$U_d\%$	$Q_d$ (kVar)	购价 (元)
旧 SI <sub>1</sub> -3200	10	32.4	2.5	80	5.5	176	37000
新 SL <sub>7</sub> -3150	4.4	27	1.1	34.65	5.5	173.25	42000

在计算时，旧变压器参数仍取出厂值。

变压器更新后有功功率和无功功率节约为

$$\begin{aligned} \Delta\Delta P &= P_{0B} - P_{0A} + \beta^2 (P_{dB} - P_{dA}) \\ &= 10 - 4.4 + 0.8^2 \times (32.4 - 27) = 9.06 \text{ (kW)} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \Delta\Delta Q &= Q_{0B} - Q_{0A} + \beta^2 (Q_{dB} - Q_{dA}) \\ &= 80 - 34.65 + 0.8^2 \times (176 - 173.25) = 47.11 \\ &\text{(kVar)} \end{aligned}$$

年有功电量和无功电量的节约为

$$\Delta\Delta A_P = 9.06 \times 8400 = 76104 \text{ (kWh)}$$

$$\Delta\Delta A_Q = 47.11 \times 8400 = 395724 \text{ (kVar)}$$

设每(kVar)电容器的投资为  $C_{cd} = 36$  元/kVar，则变压器更新后减少电容器的总投资为

$$C_C = \Delta\Delta Q \cdot C_{cd} = 47.11 \times 36 = 1696 \text{ (元)}$$

变压器的剩值为

$$\begin{aligned} C_{bd} &= C_b - C_b C_n \% \cdot T_a \times 10^{-2} \\ &= 37000 - 37000 \times 5 \times 18 \times 10^{-2} = 3700 \text{ (元)} \end{aligned}$$

设电价为  $\delta = 0.14$  元/kWh, 无功电价等效当量为  $K_G = 0.2$ , 则年节约电费为

$$G = (\Delta\Delta A_p + K_G \cdot \Delta\Delta A_Q) \delta$$

$$= (76104 + 0.2 \times 395724) \times 0.14 = 21735 \text{ (元/年)}$$

旧变压器大修费为

$$C_{JD} = 0.5 \times 37000 = 16500 \text{ (元)}$$

回收年限为

$$T_b = \frac{C_n - C_{BJ} - C_{JD} - C_J - C_C}{G}$$

$$= \frac{42000 - 3700 - 16500 - 0.1 \times 3700 - 1696}{21735}$$

$$= 1.1 \text{ (年)} < 5 \text{ 年}$$

因此, 更新变压器合理。

### 六、变压器过负荷计算

#### 1. 正常过负荷曲线

(1) 油浸自冷式和油浸风冷式变压器的正常允许过负荷规定如下: 当变压器昼夜平均负荷率  $\beta_p$  小于 1 时, 则在高峰负荷期间, 变压器允许按图 3-16 所示曲线来确定其允许过负荷倍数及持续时间。图中  $\beta_p = P_p / P_e$ ,  $P_p$  为一昼夜内的平均负荷 (kW);  $P_e$  为额定负荷 (kW)。

(2) 《电力变压器运行规程》(水电部, 85 年 5 月版) 规定如下:

第一, 全天满负荷运行的变压器不宜过负荷运行;

第二, 变压器在低负荷期间, 负载率小于 1 时, 则在高峰负荷期间变压器允许的过负荷倍数和持续时间, 按年等值环境温度, 负荷曲线和过负荷前变压器所带的负荷等来确定。可按图 3-17 来查取;

第三, 在夏季低于额定容量负荷运行, 每低 1%, 冬季可允

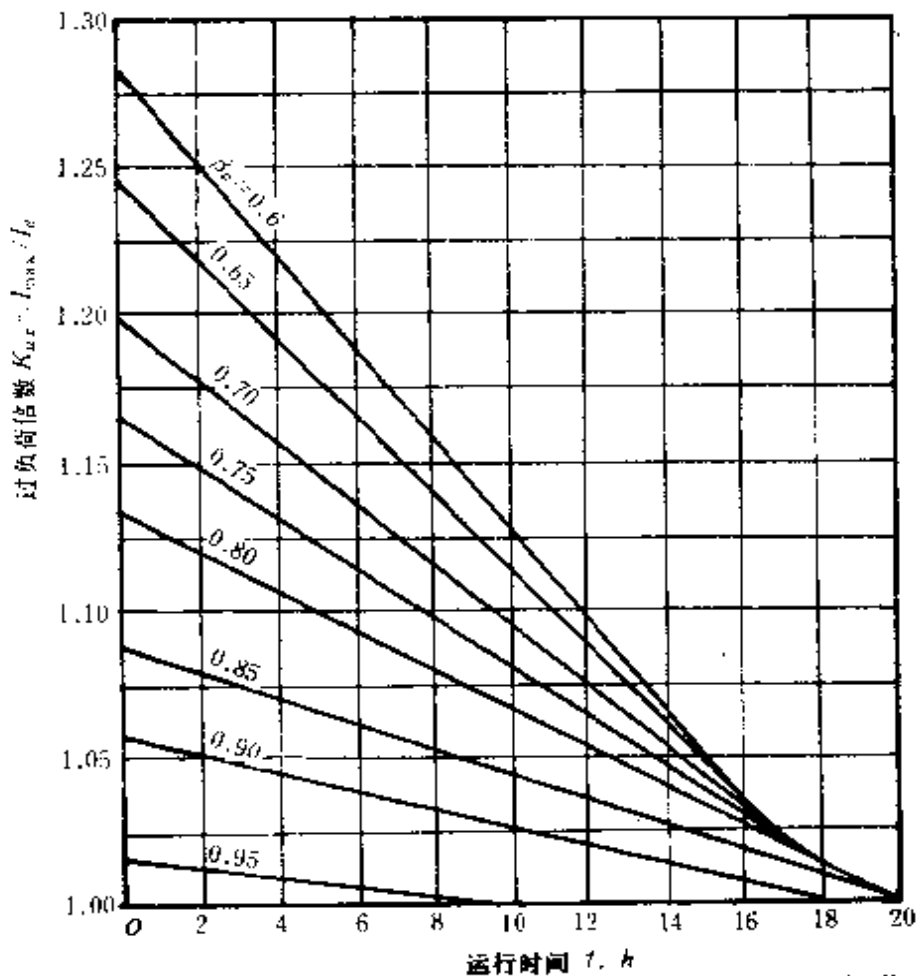
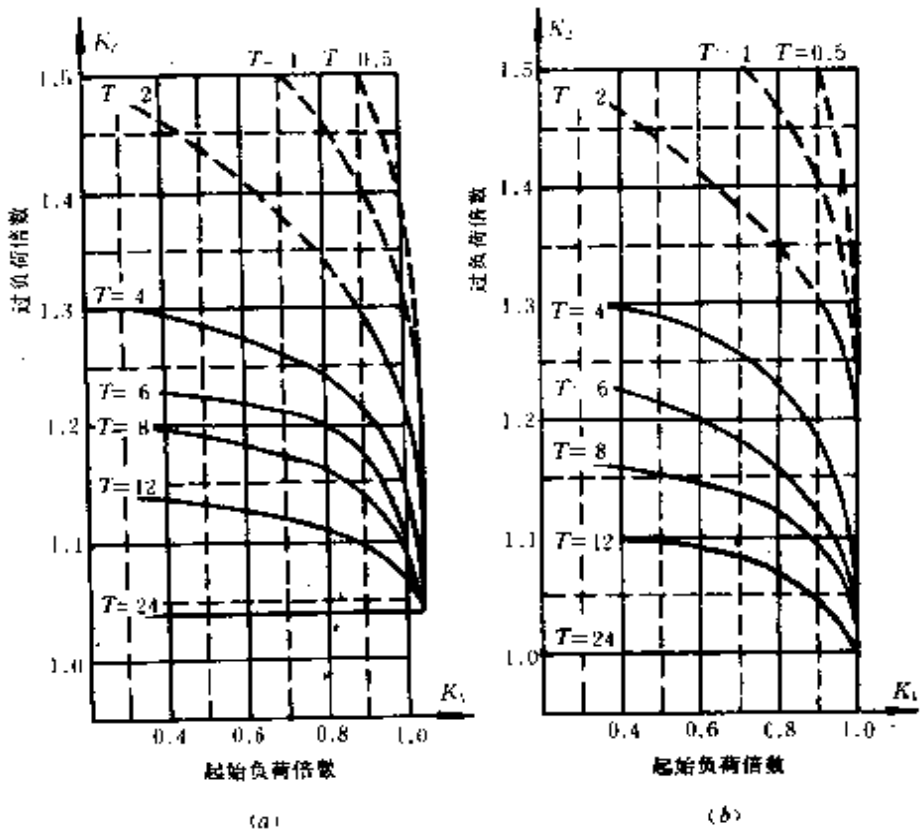


图 3-16 变压器平均负载率小于满载时允许的过负荷曲线



(a)

(b)



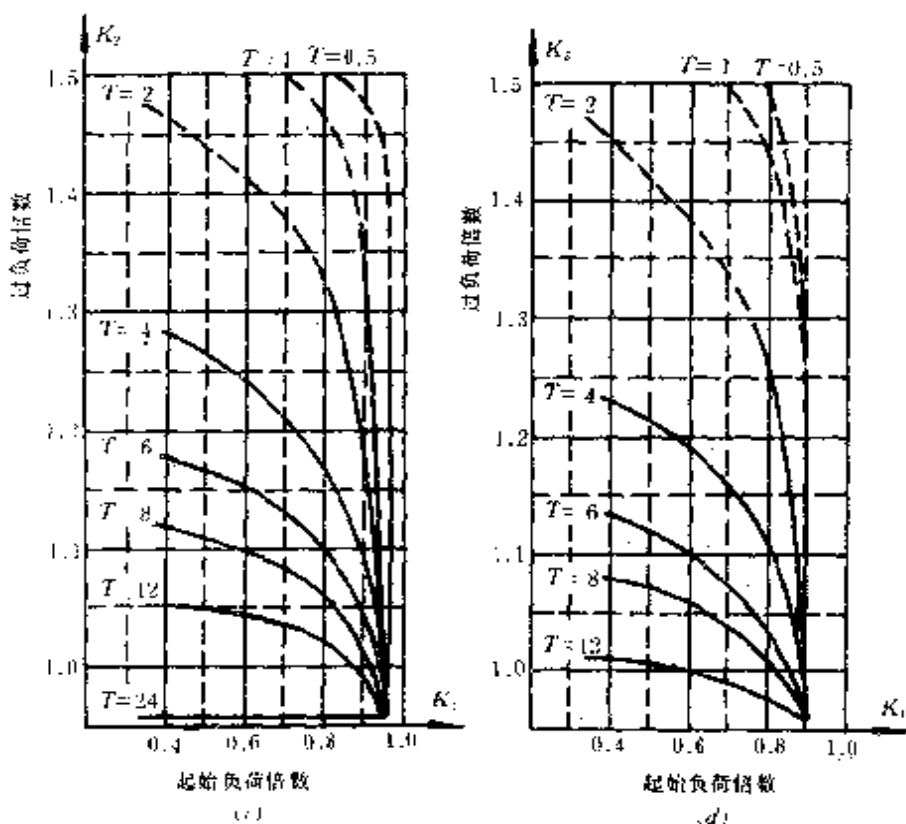


图 3-17 油自然循环变压器正常过负荷曲线

(a)年等值环境温度 $\leq 15^{\circ}\text{C}$  (b)年等值环境温度为 $15\sim 20^{\circ}\text{C}$

(c)年等值环境温度为 $20\sim 35^{\circ}\text{C}$  (d)年等值环境温度 $> 35^{\circ}\text{C}$

许多过负荷 1%，但仍以过负荷 15% 为限。

## 2. 正常过负荷计算

图 3-17 的过负荷曲线中几个有关参数的求法如下：

(1) 起始负荷倍数  $K_1$ 、过负荷倍数  $K_2$  和负荷曲线简化方法：首先把实际变化的日负荷曲线简化为直角折线，如图 3-18 所示。并计算出等效负荷电流  $I'$ 。等效起始负荷电流  $I'_1$  由负荷曲线中小于额定值的部分组成。等效过负荷电流  $I'_2$  由负荷曲线中大于额定值的部分组成。计算公式如下：

$$I' = \sqrt{\frac{a_1^2 t_1 + a_2^2 t_2 + \dots + a_n^2 t_n}{t_1 + t_2 + \dots + t_n}}$$

式中： $I'$ ——等效负荷电流；

$a_1, a_2 \dots a_n$  —— 分别为各段电流平均值(标么值);  
 $t_1, t_2 \dots t_n$  —— 对应各段负荷电流的时间间隔(h)。

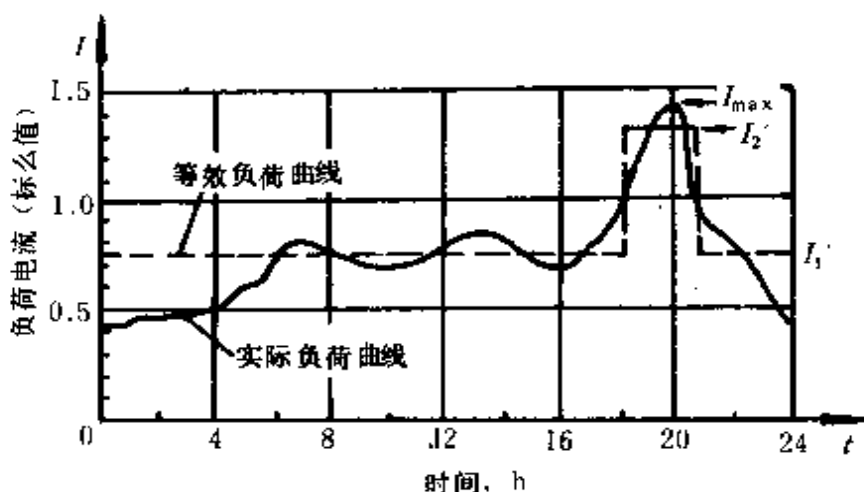


图 3—18 日负荷曲线图

时间间隔  $t$  计算起始负荷电流时,可取 1h;过负荷时应取  $\leq 0.5h$ 。

等效起始负荷电流也可根据过负荷前 12 个小时的负荷,每小时取 1 个值的简化公式来计算:

$$I'_1 = 0.29 \sqrt{a_1^2 + a_2^2 + \dots + a_{12}^2}$$

式中:  $a_1, a_2 \dots a_{12}$  —— 分别为时间间隔为 1h 的平均负荷电流(标么值)。

起始负荷倍数  $K_1$  为

$$K_1 = I'_1 / I_e$$

式中:  $I_e$  —— 额定电流(标么值)。

如果负荷曲线中有  $n$  个过负荷高峰,则计算等效过负荷电流  $I'_2$  应用  $\sum a_i^2 t$ 。

当求得的  $I'_2 > 0.9I_{max}$  ( $I_{max}$  取半小时的平均值),则  $K_2 = I'_2$ ; 当  $I'_2 < 0.9I_{max}$ , 则  $K_2 = 0.9I_{max}$ , 此时过负荷等效时间  $t'_2$  按

下式计算：

$$t'_2 = \frac{(I'_2)^2 t_2}{(0.9I_{\max})^2}$$

式中： $t_2$ ——过负荷时间(h)；

$t'_2$ ——等效过负荷时间(h)。

(2)年等值环境温度计算：年等值环境温度为

$$t'_a = 20 \lg \left[ \frac{1}{12} \sum_1^{12} 10^{\frac{t_a}{20}} \right]$$

式中： $t'_a$ ——年等值环境温度(°C)；

$t_a$ ——月等值环境温度或月平均环境温度(°C)。

**例 3—6** 有一台油浸式变压器，其典型负荷曲线中的起始负荷为 50%，高峰负荷时间为 4h，年等值环境温度为 18°C，求该变压器允许过负荷是多少？

**解** 查图 3—17(b)曲线，从横坐标  $K_1=0.5$  处向上至时间为 4h 曲线，得纵坐标  $K_2=1.28$ ，即该变压器允许过负荷 28%，运行 4 个小时。

**例 3—7** 某地区全年月平均环境温度为 28°C 时 3 个月，16°C 时 3 个月，8°C 时 4 个月，-1°C 时 2 个月，试计算全年平均温度和等值温度是多少？

**解** 年平均温度  $t_a = (3 \times 28 + 3 \times 16 + 4 \times 8 - 2 \times 1) / 12$   
 $= 13.5(°C)$

$$\begin{aligned} \text{年等值温度 } t'_a &= 20 \lg \left[ \frac{1}{12} \sum_1^{12} 10^{\frac{t_a}{20}} \right] \\ &= 20 \lg \left[ \frac{1}{12} (3 \times 10^{28/20} + 3 \times 10^{16/20} \right. \\ &\quad \left. + 4 \times 10^{8/20} + 2 \times 10^{-1/20}) \right] \\ &= 18.9(°C) \end{aligned}$$

(3)当缺少制造厂规定数据时，油浸式变压器事故过负荷可按表 3—12 所规定的数值。

表 3-12 不明标准的变压器允许事故过负荷

过负荷倍数	1.3	1.6	1.75	2.0	2.4	3.0
过负荷允许的持续时间(min)	120	30	15	7.5	3.5	1.5

(1) 自冷或风冷油浸变压器的过负荷允许时间, 见表 3

13.

表 3-13 自冷或风冷油浸变压器的  
过负荷允许时间

过负荷 倍 数	过负荷前上层油的温升(°C)为下列数值时允许过负荷持续时间(h : min)						
	18	24	30	36	42	48	54
1.00	连 续 运 行						
1.05	5 : 50	5 : 25	4 : 50	4 : 00	3 : 00	1 : 30	
1.10	3 : 50	3 : 25	2 : 50	2 : 10	1 : 25	0 : 10	
1.15	2 : 25	2 : 25	1 : 50	1 : 20	0 : 35	—	
1.20	2 : 05	1 : 40	1 : 15	0 : 45	—	—	
1.25	1 : 35	1 : 16	0 : 50	0 : 25	—	—	
1.30	1 : 10	0 : 50	0 : 30		—	—	
1.35	0 : 55	0 : 35	0 : 15		—	—	
1.40	0 : 40	0 : 25	—	—	—	—	
1.45	0 : 25	0 : 10	—	—	—	—	
1.50	0 : 15	—	—	—	—	—	

(5) 风冷油浸变压器在风扇停运时的允许负荷和持续时间, 如无制造厂规定时, 在额定冷却空气温度下风扇停运时允许带额定负荷的 70%; 连续运行的变压器可执行表 3-14 规定。

表 3—14 风冷油浸变压器当风扇停运时的允许过负荷和持续时间

过负荷倍数	吹风停止时变压器上层油的温升(°C)为下列数值时的允许过负荷持续时间(h : min)						
	18	24	30	36	42	48	54
0.70	连续运行						
0.75	12 : 20	11 : 40	10 : 55	10 : 00	8 : 40	7 : 00	4 : 00
0.80	7 : 40	7 : 00	6 : 20	5 : 25	4 : 20	3 : 00	0 : 50
0.85	5 : 20	5 : 00	4 : 20	3 : 35	2 : 40	1 : 30	—
0.90	4 : 20	3 : 50	3 : 15	2 : 35	1 : 45	0 : 45	—
0.95	3 : 25	2 : 55	2 : 25	1 : 45	1 : 08	0 : 15	—
1.00	2 : 45	2 : 20	1 : 50	1 : 20	0 : 40	—	—
1.05	2 : 15	1 : 50	1 : 25	0 : 55	0 : 20	—	—
1.10	1 : 50	1 : 25	1 : 00	0 : 35	0 : 06	—	—
1.15	1 : 30	1 : 10	0 : 45	0 : 20	—	—	—
1.20	1 : 00	0 : 50	0 : 30	0 : 08	—	—	—
1.25	0 : 50	0 : 35	0 : 15	—	—	—	—
1.30	0 : 35	0 : 20	—	—	—	—	—

### 七、干式变压器使用条件及温升限值

根据 GB6450—86 规定：

#### 1. 干式电力变压器正常使用条件

(1) 海拔：不超过 1000m，超过时，作为特殊使用条件处理。

(2) 环境温度：最高气温 +40°C，最高年平均气温 +20°C，最高日平均气温 +30°C，最低气温 -30°C (适用于户外式变压器)；最低气温 -5°C (适用于户内式变压器)

超过上述规定时，作为特殊使用条件处理。

#### 2. 干式变压器的温升限值

在满足上述(1)、(2)条件下,其绕组、铁芯和金属部件的温升均不应超过表 3—15 中温升限值。

表 3—15 干式变压器温升限值

1	2	3
部 位	绝缘系统温度(°C)	最高温升(°C)
线 圈 (用电阻法测量的温升)	105(A)	60
	120(E)	75
	130(B)	80
	155(F)	100
	180(H)	125
	220(C)	150
铁芯、金属部件和其 相邻的材料		在任何情况下,不会出现使铁芯本身、其它部件与其相邻的材料受到损害的温度

### 八、10kV 变压器进风口有效面积查算表

为了保证变压器安全运行,使温升不超过允许限值,户内安装的变压器必须有良好的通风条件。变压器室的通风形式一般有三种,如图 3—19 所示。

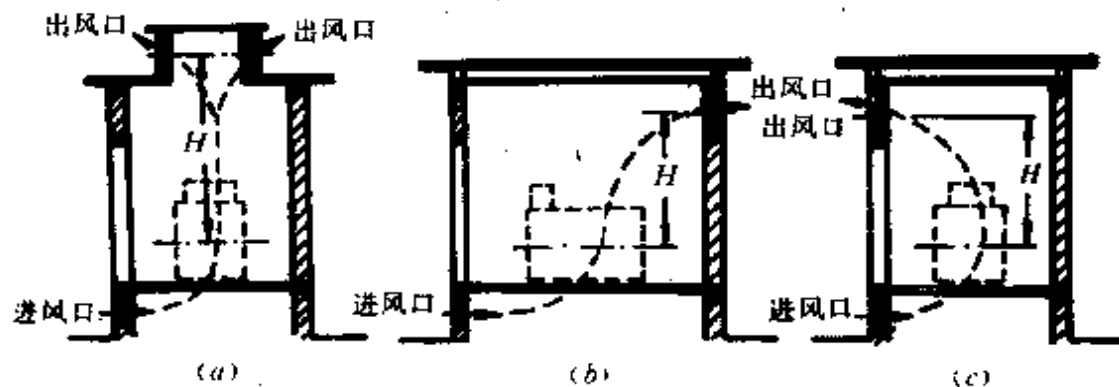


图 3—19 变压器室通风形式

10kV 变压器通风口有效面积可按表 3—16 选择。

表 3-16 10kV 变压器进风口有效面积(m<sup>2</sup>)查算表

容量 (kVA)	变压器中心至出风口中心高度(m)									
	2	2.5	3	3.5	4	4.5	5	5.6	6	6.5
	有效面积 (m <sup>2</sup> )									
100	0.34	0.3	0.28	0.26	0.24	0.23	—	—	—	—
180	0.54	0.48	0.44	0.41	0.38	0.36	0.34	—	—	—
320	0.84	0.75	0.69	0.64	0.59	0.56	0.54	0.51	—	—
560		1.17	1.07	0.99	0.91	0.87	0.83	0.79	0.75	0.73
750		—	1.43	1.32	1.24	1.17	1.11	1.06	1.02	0.91
1000		—	1.76	1.63	1.53	1.44	1.36	1.30	1.25	1.20

注:

- ①风口的实际面积应将表中所查得风口的有效面积乘以下列不同窗网型式的构造系数:金属百叶窗为 1.67;铁丝网为 1.25;金属百叶窗加铁丝网为 2.1。
- ②出风口的有效面积应是进风口有效面积的 2 倍。

### 九、几种用电场合的变压器容量计算

#### 1. 供照明负荷的变压器容量

供照明负荷的变压器容量  $S_t$  按下式计算:

$$S_t = \sum \frac{P_i}{\cos\varphi}$$

式中:  $P_i$  —— 各照明器消耗的功率(包括镇流器损耗)(kW);

$\cos\varphi$  —— 各照明器的功率因数,参见表 3-17。

表 3-17 各种照明器的功率因数(参考值)

照 明 器	功率因数
荧光灯	0.5
高压汞灯	0.6
金属卤化物灯(钠铊铟灯、镝灯)	0.6
高压钠灯	0.4

(续表)

照 明 器	功率因数
低压钠灯	0.6
管形氙灯	0.9

### 2. 供电动机负荷的变压器容量

$$S_e = \sum \frac{P_{2i}}{\eta_i \cos \varphi_i} \approx 0.74 \sum P_{2i}$$

$S_e$  —— 变压器容量(kVA);

式中:  $P_{2i}$  —— 各电动机输出功率(kW);

$\eta_i$  —— 各电动机效率;

$\cos \varphi_i$  —— 各电动机功率因数。

当数台电动机同时起动或在一台变压器供一台电动机用电,以及在输出功率较小的电动机直接起动的场合,由于起动电流产生的压降,往往会使电动机不能起动。这时应按下列式计算:

$$S_e = \frac{P_2}{\eta \cos \varphi} \cdot \frac{U_d \% \cdot K}{\Delta U \%}$$

式中:  $P_2$  —— 电动机输出功率(kW);

$\eta$  —— 电动机效率;

$\cos \varphi$  —— 电动机功率因数;

$U_d \%$  —— 变压器阻抗电压百分数;

$K$  —— 电动机起动电流大于额定电流的倍数;

$\Delta U \%$  —— 电动机起动时可允许的电压损失百分数的限度。

如果按后式计算的结果小于按前式计算的结果,则应采用前式的计算结果。

当动力及照明负荷混合供电时,鼠笼式异步电动机直接起动时的最大功率参考值,见表 3-18。



表 3—18 鼠笼式异步电动机直接起动功率最大值  
(供参考)

变压器容量 (kVA)	电动机功率 (kW)		
	$\Delta U\% = 1.5\%$	$\Delta U\% = 4\%$	$\Delta U\% = 10\%*$
100	3.8	10.5	21
200	7.4	22	42
315	12	35	66
500	22	55	105
630	28	69	132
800	37	88	168
1000	46	100	210

※ 10%仅对起动次数很少的情况而言。

### 3. 建筑施工用电量计算

建筑施工用电大体上分为动力和照明两类。动力部分有电动机和电焊机等。建筑施工用电量可按以下两式计算：

$$S \geq 1.1k \left( K_1 \frac{\sum P_d}{\cos \varphi} + K_2 \sum S_h \right)$$

$$\text{或 } S \geq 1.1 \left( K_1 \frac{\sum P_d}{\eta \cos \varphi} + K_2 \sum S_h \right)$$

式中： $S$ ——需供电设备总容量(kVA)；

$\sum P_d$ ——全部电动机额定功率之和(kW)；

$\sum S_h$ ——全部电焊机额定容量之和(kVA)；

$k$ ——容量损失系数， $k=1.05 \sim 1.1$ ；

$K_1$ ——电动机需要系数，电动机 10 台以内，取  $K_1=0.7$ ；

11~30 台，取  $K_1=0.6$ ；30 台以上，取  $K_1=0.5$ ；

$K_2$ ——电焊机需要系数，电焊机 3~10 台，取  $K_2=0.6$ ；10

台以下，取  $K_2=0.5$ ；

$\cos \varphi$ ——电动机平均功率因数，施工现场取 0.75~0.78；

一般建筑工地取 0.65~0.75；

$\eta$ ——电动机平均效率,可取 0.75~0.9。  
式中的 1.1 系数为考虑了 10%的照明用电。

### 第三节 变压器计算

#### 一、油浸式电力变压器的基本计算

##### 1. 铁柱直径和磁通密度的选择

###### (1) 铁柱直径的选择

现行的标准直径有：

80~270……每增加 5mm 为一档

280~500……每增加 10mm 为一档

520~740……每增加 20mm 为一档

(2)铁柱磁通密度的选择：铁柱磁通密度  $B_z$  推荐值如下：

①冷轧硅钢片： $B_z \leq 1.7T$ ，一般取 1.3~1.5T。

②热轧硅钢片： $B_z \leq 1.45T$ ，一般取 1.0~1.3T。

变压器容量小的  $B_z$  取小值，容量大的  $B_z$  取大值。

## 2. 铁柱和铁轭截面的选择

(1)铁柱截面级数的选择(表 3-20)：

铁柱截面如图 3-20 所示。

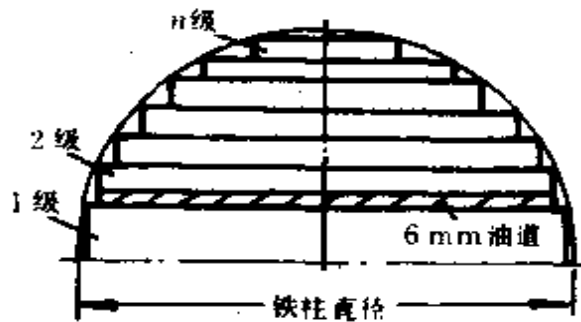


图 3-20 铁柱截面

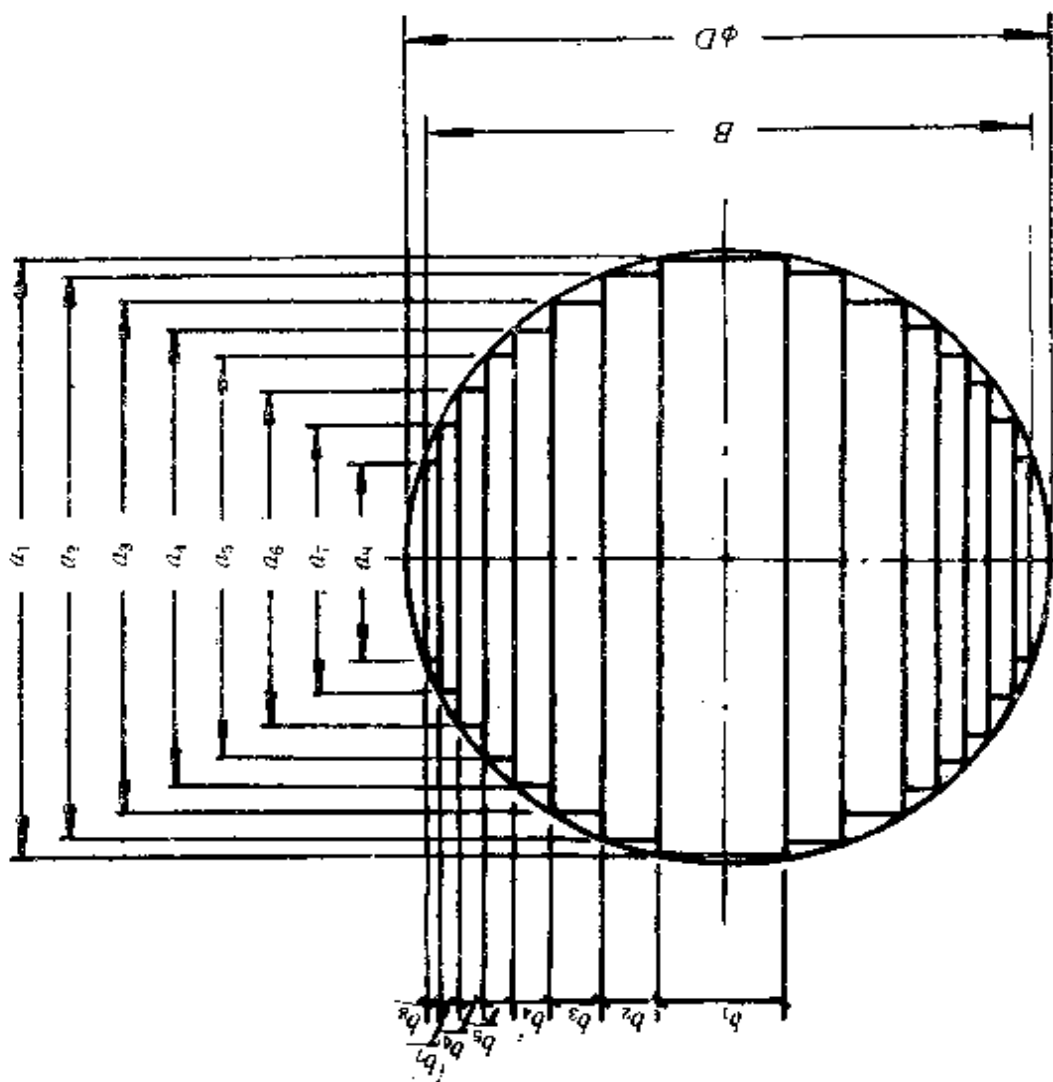
表 3-20 铁柱截面级数的选择

铁柱直径(mm)	级数	铁柱直径(mm)	级数
80~195	5~7	400~740	12~14
200~265	8~10	760 以上	>15
270~390	11		

多级阶梯形铁柱规格尺寸，见表 3-21。

多级阶梯形铁柱规格尺寸表

表 3-1-21



(续表)

外接圆 直径 $D$ (mm)	表面积 $S'$ ( $\text{cm}^2$ )	净面积 $S$ ( $\text{cm}^2$ )			铁柱宽度 (mm)								铁柱厚度 (mm)							
		0.91 $S'$	0.92 $S'$	0.95 $S'$	$a_1$	$a_2$	$a_3$	$a_4$	$a_5$	$a_6$	$a_7$	$a_8$	$b_1$	$b_2$	$b_3$	$b_4$	$b_5$	$b_6$	$b_7$	$b_8$
70	34.30	31.21	31.56	32.95	65	60	50	35	20			26	5	6	6	3				66
75	39.90	36.31	36.71	37.91	70	65	55	40	25			27	5	7	6	4				71
80	45.30	41.22	41.68	43.04	75	65	55	40	25			28	9	6	5	4				76
85	51.00	46.41	46.92	48.45	80	70	60	45	25			28	10	6	6	4				80
90	57.75	52.55	53.13	54.86	85	75	65	50	30			29	10	7	6	5				85
95	64.30	58.52	59.16	61.09	90	80	65	50	30			30	11	9	5	5				90
100	70.95	64.57	65.27	67.40	95	85	70	55	30			31	11	9	6	6				95
105	79.50	72.35	73.14	75.53	100	90	80	65	30	30		32	11	7	7	5	4			100
110	87.15	79.31	80.18	82.79	105	95	85	70	55	30		33	11	7	8	5	5			105
115	95.00	86.45	87.40	90.25	110	100	90	75	55	30		34	11	8	7	7	5			110
120	104.10	94.73	95.77	98.90	115	105	90	75	60	35		34	12	11	7	5	5			114
125	112.80	102.65	103.78	107.16	120	110	95	80	60	35		35	12	11	8	6	5			119

(续表)

外接圆直径 $D$ (mm)	毛面积 $S'$ ( $\text{cm}^2$ )	净面积 $S(\text{cm}^2)$			铁柱宽度 (mm)								铁柱厚度 (mm)									
		0.91 $S'$	0.92 $S'$	0.95 $S'$	$a_1$	$a_2$	$a_3$	$a_4$	$a_5$	$a_6$	$a_7$	$a_8$	$b_1$	$b_2$	$b_3$	$b_4$	$b_5$	$b_6$	$b_7$	$b_8$	$B$	
130	122.55	111.52	112.75	116.42	125	115	100	85	65	35			35	13	11	8	7	6				125
135	132.00	120.12	121.44	125.40	130	115	105	85	65	40			37	17	7	10	7	5				129
140	141.95	129.18	130.59	134.85	135	120	110	90	70	40			37	18	7	10	7	7				135
145	152.20	138.50	140.02	144.59	140	125	110	95	70	40			38	18	10	8	8	7				140
150	165.00	150.15	151.80	156.75	145	135	120	105	90	65	40		38	14	12	9	6	8	4			144
155	175.80	159.99	161.74	167.01	148	140	125	110	90	70	40		45	11	12	9	9	6	5			149
160	188.30	171.35	173.24	178.89	155	145	130	115	95	70	40		40	14	13	9	8	8	6			156
165	199.46	181.51	183.50	189.49	160	148	135	115	95	70	35		41	16	11	12	8	7	6	161		
170	211.55	192.51	194.63	200.97	165	155	140	120	100	75	45		41	14	14	12	8	8	5			163
175	224.30	204.11	206.36	213.09	170	160	140	125	100	75	45		41	15	17	9	10	8	5			169
180	237.30	215.94	218.32	225.44	175	160	145	125	105	80	45		42	20	12	12	8	8	6			174
185	250.44	227.90	230.40	237.92	180	165	148	130	110	80	45		43	20	14	10	9	9	6			179

(续表)

外接圆直径 $D$ (mm)	毛面积 $S'$ ( $\text{cm}^2$ )	净面积 $S$ ( $\text{cm}^2$ )			铁柱宽度 (mm)								铁柱厚度 (mm)										
		0.915'	0.925'	0.955'	$a_1$	$a_2$	$a_3$	$a_4$	$a_5$	$a_6$	$a_7$	$a_8$	$b_1$	$b_2$	$b_3$	$b_4$	$b_5$	$b_6$	$b_7$	$b_8$	$B$		
190	263.65	239.92	242.56	250.47	185	170	155	135	110	85	50		43	21	12	12	11	7				183	
195	278.50	253.44	256.22	264.58	185	175	160	140	115	85	50		62	12	13	12	11	9	6				188
200	292.50	266.18	269.10	277.88	195	180	160	140	115	85	50		44	21	17	11	11	8	7				194
205	308.60	280.83	283.91	293.17	200	185	165	145	120	90	50		45	22	16	12	11	9	7				199
210	322.08	293.09	296.31	305.98	200	185	170	148	120	90	55		64	18	11	13	12	9	6				202
215	339.20	308.67	312.06	322.24	210	195	175	148	125	95	55		46	23	17	15	10	8	8				208
220	353.60	321.78	325.31	335.92	210	200	180	155	130	95	55		66	13	17	15	11	10	7				212
225	372.65	339.11	342.84	354.02	215	200	180	160	130	100	55		67	18	16	15	13	9	8				219
230	387.10	352.26	356.13	367.75	220	205	185	160	135	100	55		67	19	16	14	10	11	8				223
235	404.20	367.82	371.86	383.99	225	210	185	165	135	100	65		68	19	19	12	12	10	7				226
240	422.90	384.84	389.07	401.76	230	215	195	170	140	105	65		69	19	17	14	13	11	7				231
245	445.10	403.22	407.65	420.95	235	220	200	180	155	130	100	60	68	20	16	13	11	10	8	7			238

(续表)

外接圆直径 $D$ (mm)	毛面积 $S'$ ( $\text{cm}^2$ )	净面积 $S(\text{cm}^2)$			铁柱宽度 (mm)								铁柱厚度 (mm)								
		0.91 $S'$	0.92 $S'$	0.95 $S'$	$a_1$	$a_2$	$a_3$	$a_4$	$a_5$	$a_6$	$a_7$	$a_8$	$b_1$	$b_2$	$b_3$	$b_4$	$b_5$	$b_6$	$b_7$	$b_8$	$B$
250	460.90	419.42	424.03	437.86	240	225	210	185	165	135	100	60	70	20	13	16	10	11	9	7	242
255	480.70	437.44	442.24	456.67	245	230	215	185	165	135	100	60	72	19	14	19	10	10	9	7	248
260	500.34	455.31	460.31	475.32	248	235	220	195	170	140	105	65	78	17	14	16	13	11	9	7	252
265	517.10	470.56	475.73	491.25	255	240	225	200	175	140	110	60	70	21	14	17	12	13	8	9	258
270	539.60	491.04	496.43	512.62	260	245	225	205	175	145	110	65	76	19	18	13	15	11	9	8	262
275	557.83	507.63	513.20	529.94	265	248	230	205	180	145	110	65	73	23	16	16	12	13	9	8	267
280	581.06	528.76	534.58	552.01	270	255	235	210	180	148	115	65	74	21	19	16	15	11	9	8	272
285	600.80	546.73	552.74	570.76	275	260	240	215	185	155	115	70	74	21	19	17	15	11	10	8	276
290	621.90	565.93	572.15	590.81	280	265	245	220	185	155	120	70	76	21	19	16	17	12	9	9	282
295	643.16	585.28	591.71	611.00	285	270	248	220	185	155	120	70	76	21	21	18	17	11	9	8	286
300	663.20	603.51	610.14	630.04	290	275	255	225	195	160	115	70	77	21	19	20	15	13	12	7	291



(2) 迭片系数选取(表 3—22):

表 3—22 迭片系数的选取

硅 钢 片 类 型	迭片系数 $K_d$	
	无漆膜绝缘时	有漆膜绝缘时
0.35mm 冷轧硅钢片	0.94~0.95	0.93~0.94
0.35mm 热轧硅钢片	--	0.91~0.92
0.5mm 硅钢片	0.96	0.93

铁柱净面积(有效面积) =  $K_d \times$  铁柱多级梯形截面的几何面积(不包括油道);也可由表 3—21 直接查得。

(3) 油道数的选择(表 3—23):当铁柱直径为 380mm 及以上时,须设置冷却油道。

3—23 冷却油道数的选择

铁柱直径 (mm)	6mm 油道个数	
	冷轧片 $p15/50=1.1$ 时	热轧片 $p10/50=1.05$ 时
380~410	0	1
420~500	1	2
520~620	2	2
640~680	2	3
700~840	3	—

(4) 铁轭截面的选择:铁轭截面有如图 3—21 所示的几种形式。

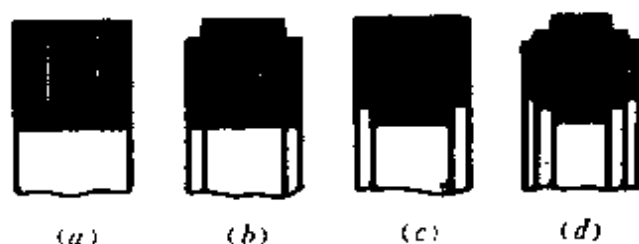


图 3-21 铁轭截面的形式

(a)矩形 (b)外T形 (c)内T形; (d)多级T形

采用冷轧硅钢片铁芯时,铁轭截面与铁柱截面形状相同;采用热轧硅钢片时,铁轭截面一般采用矩形或T形。此时,为了降低空载电流和空载损耗,铁轭截面要比铁柱截面大5~10%。

### 3. 导线和电流密度的选择

(1)导线的选择:为了节约用铜,变压器容量为63000kVA及以下时,一般采用铝导线,容量更大时,采用铝合金导线或铜导线。

常用的导线有漆包圆铝线(QQL-2或QZL-2)、纸包圆铝线(ZL)及纸包扁铝线(ZLB)。常用漆包圆线的裸线直径为0.06~2.44mm,纸包圆线的裸线直径为1.0~5.2mm;直径在1.0~2.02mm范围内时,宜选用漆包圆线。选用扁导线的宽厚比要求:扁导线的宽度≤16mm,厚度≤5.6mm;其宽厚比一般为:圆筒式1.5~3,螺旋式2~4,连续式或纠结式2.5~5。绕组导线截面应为

$$q = I_x / j$$

式中: $q$ ——绕组导线截面( $\text{mm}^2$ );

$I_x$ ——绕组相电流(A);

$j$ ——电流密度( $\text{A}/\text{mm}^2$ )。

(2)电流密度的选择:通常,铝导线取 $j=1.6\sim 2.1\text{A}/\text{mm}^2$ ;铜导线取 $j=3.0\sim 4.0\text{A}/\text{mm}^2$ 。

### 4. 空载性能计算

空载性能包括空载损耗和空载电流。

(1) 空载损耗：

$$P_0 = K_{fj}(p_z G_z + p_E G_E)$$

式中： $P_0$ ——空载损耗(W)；

$K_{fj}$ ——附加损耗系数，由迭积方式、材料和工艺决定，冷轧硅钢片一般为 1.2~2；

$p_z$ 、 $p_E$ ——对应于铁柱、铁轭磁通密度  $B_z$ 、 $B_E$  的单位损耗 (W/kg)；

$G_z$ 、 $G_E$ ——铁柱、铁轭的重量(kg)。

(2) 空载电流：

$$I_0 \% = \sqrt{(I_{0a} \%)^2 + (I_{0r} \%)^2}, I_{0a} \% = P_0 / 10 S_e$$

$$I_{0r} \% = \frac{K_1}{10 S_e} (q_z G_z + q_E G_E + n_z q_{jz} S_z + n_E q_{jE} S_E)$$

式中： $I_{0a} \%$ ——空载有功电流百分数；

$I_{0r} \%$ ——空载无功电流百分数；

$q_z$ 、 $q_E$ ——对应于  $B_z$ 、 $B_E$  的单位励磁容量(VA/kg)；

$q_{jz}$ 、 $q_{jE}$ ——对应于  $B_z$ 、 $B_E$  的接缝处单位面积励磁容量 (VA/cm<sup>2</sup>)；

$S_z$ 、 $S_E$ ——铁柱、铁轭的有效截面(cm<sup>2</sup>)；

$n_z$ 、 $n_E$ ——铁柱、铁轭的接缝数(图 3-22)，三相三柱式铁芯直接缝  $n_z = 3$ ， $n_E = 4$ ；半直半斜接缝  $n_z = n_E = 4$ 。

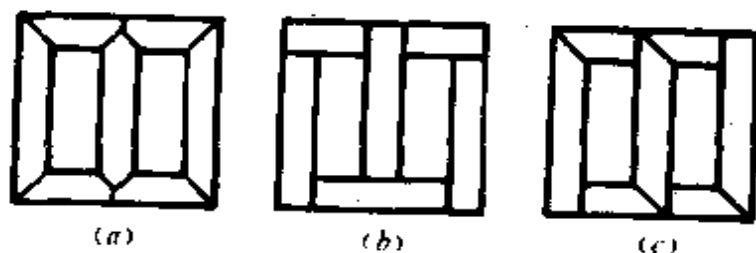


图 3-22 三相铁芯迭积图

(a)斜接缝 (b)直接缝 (c)半直半斜接缝

5. 短路损耗计算:

(1) 两绕组变压器:

$$P_d = P_r + P_{fj}$$

式中:  $P_d$ ——短路损耗, 75°C 时的值(W);

$P_r$ ——两个绕组的直流电阻损耗(W);

$P_{fj}$ ——附加损耗(W)。

(2) 三绕组变压器: 应计算三种电压组合方式(高压—中压、高压—低压、中压—低压)下的短路损耗。计算温升时, 取其中最大的一个。

附加损耗  $P_{fj}$  为绕组涡流损耗(包括并绕导线的环流损耗)、结构损耗和引线损耗之和。

三相变压器的容量为 1600kVA 及以下, 低压电压为 400V、联结组标号为  $Y_{yn0}$  时, 其附加损耗可按表 3-24 中经验系数  $K_2$  计算。 $K_2$  为附加损耗占两个绕组直流电阻损耗的百分数。

表 3-24 经验系数  $K_2$

容量 (kVA)	≤200	250~315	400~500	630	800~1250	1250~1600
$K_2$ (%)	3	5	8	10	12	15
低压出 线方式	-侧引出				1250 两 侧引出	1600 两 侧引出

注: 未注明的容量等级均为一侧引出。

## 二、干式电力变压器的基本计算

### 1. 铁柱直径的选择

$$D_2 = K_D \sqrt[4]{P_Z}$$

式中:  $D_2$ ——铁柱直径(mm);

$K_D$ ——经验系数, 见表 3-25;

$P_Z$ ——变压器每柱容量(kVA), 三相双绕组变压器  $P_Z =$

$S_e/3$ ; 单相双绕组变压器  $P_z = S_e/2$ ;

$S_e$ ——变压器额定容量(kVA)。

表 3—25 经验系数  $K_D$

铁 芯 材 料	$K_D$ (适用于 50Hz)	
	铝 绕 组	铜 绕 组
冷轧硅钢片	56~60	60~69
热轧硅钢片	60~66	69~78

多级阶梯形铁柱规格尺寸,见表 3—21。

当求得铁柱直径  $D_z$  后,便可由表 3—21 直接查得铁柱的净面积  $S$ 、铁柱厚度  $T$  和宽度等尺寸。

铁轭截面  $S_E$  可按下列公式计算:

单相壳式  $S_E = 0.5S$ , 单相芯式  $S_E = S$

当采用多级铁芯柱截面时

$$S_E = (1.05 \sim 1.1)S$$

铁轭高  $h_E = \frac{S_E}{K_d T}$

式中:  $S_E$ ——铁轭截面( $\text{cm}^2$ );

$h_E$ ——铁轭高(cm);

$K_d$ ——迭片系数,见表 3—22。

铁芯柱窗高  $h_c$  为绕组高加二倍绕组端部到铁轭的距离,并要考虑通风散热及引出线方便。试验电压 5kV 以下的主绝缘:绕组端部到铁轭的距离为 15mm;绕组到芯柱距离为 8mm;高、低压绕组间或高压绕组之间的距离为 10~16mm。

绕组最大径向尺寸等于铁芯外径与绕组各导线总厚,加上各层间绝缘的厚度,再加上层间通风道厚度,以上总和再加 5% 的余量。

绕组排布好后,由绕组最大径向尺寸,再加上绕组间绝缘距离(约 20mm 左右)便可决定中心距尺寸  $M_0$ ,如图 3-23 所示。 $M_0$  一般为 5 的倍数。

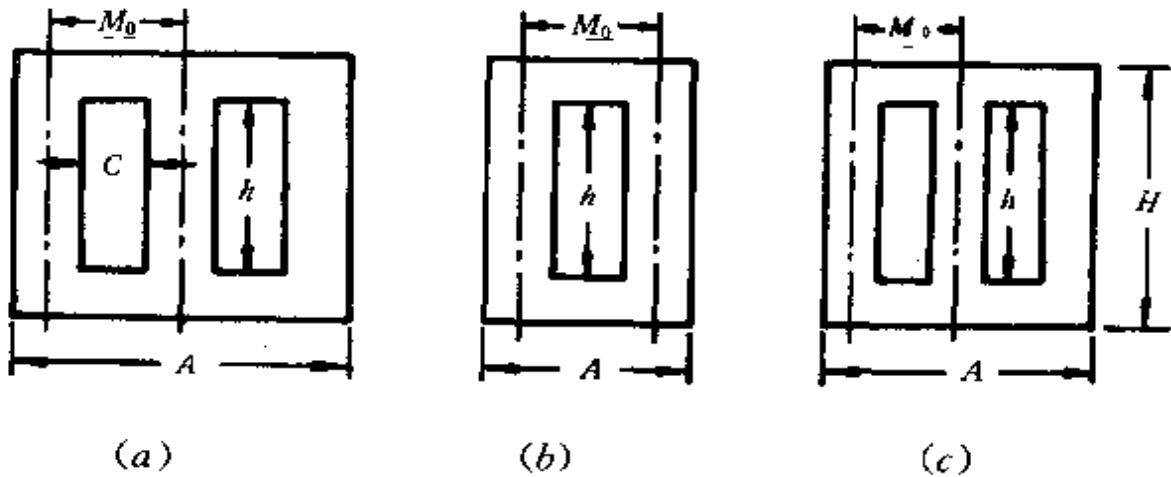


图 3-23 不同铁芯结构的尺寸  
(a)三柱铁芯式 (b)单相芯式 (c)单相壳式

单相变压器,铁芯的外形尺寸即宽与高之比,约为 0.75~0.85;三相变压器,约为 1.30~1.45。

### 2. 铁柱磁通密度和电流密度的选择

铁柱磁通密度的选择,见表 3-26;电流密度的选择,见表 3-27。

表 3-26 干式变压器磁通密度的选择

铁芯材料	绝缘耐热等级	磁通密度 $B_z$ (T)
冷轧硅钢片	B	1.40~1.55
	H	1.50~1.65
热轧硅钢片	B	1.20~1.35
	H	1.30~1.45

表 3—27 干式变压器电流密度的选择

绕组材料	绝缘耐热等级	电流密度(A/mm <sup>2</sup> )	
		内绕组	外绕组
铜导线	B	1.4~2.1	2~3
	H	2.4~3.6	2.8~4.3
铝导线	B	1.0~1.5	1.6~2.1
	H	1.5~2.1	1.8~2.3

当绕组为平行绕制时取小值；通风散热条件好的取大值；外绕组采用裸铜板绕制时可取 3A/mm<sup>2</sup> 以上；容量小的取小值，容量大的取大值。

### 3. 绕组匝数计算

$$W = U_x / e_0, e_0 = 4.44fB_z S \times 10^{-4};$$

式中： $W$ ——一次绕组或二次绕组的匝数；

$U_x$ ——一次侧或二次侧的空载额定相电压(V)；

$e_0$ ——每匝电压(V/匝)；

$f$ ——电源频率(Hz)；

$B_z$ ——磁通密度(T)，见表 3—26；

$S$ ——铁柱的净面积(cm<sup>2</sup>)。

一般先求出低压绕组的匝数  $W_2$ ，再求高压绕组的匝数  $W_1 = kW_2$  ( $k$  为变比)。

### 4. 绕组铁重计算

由图 3—23 求得绕组铁重如下：

三柱铁芯式

$$G_{Fe} = 3 \times 7.6hS \times 10^{-3} + 2 \times 7.6AS_E \times 10^{-3}$$

单相芯式

$$G_{Fe} = 2 \times 7.6hS \times 10^{-3} + 2 \times 7.6AS_E \times 10^{-3}$$

单相壳式(轭的截面是中心柱截面的一半)

$$G_{Fe} = 7.6 \times (2h + A)S \times 10^{-3}$$

式中:  $G_{Fe}$ ——绕组铁重(kg);

其它符号同前。

### 5. 绕组铜重计算

$$G_{cu} = 8.9LqW \times 10^{-3}, L = \pi d$$

式中:  $G_{cu}$ ——绕组铜重(kg);

$L$ ——绕组平均匝长(cm);

$d$ ——绕组平均直径(cm);

$q$ ——绕组导线截面( $cm^2$ );

$W$ ——绕组匝数。

考虑引出线及导线绝缘的重量,一般按上述计算的结果还要增加5~10%的重量。

### 6. 温升计算

干式变压器在额定使用条件下的温升限值,见表3-15。

对于160kVA及以上的变压器,温升计算如下(对于容量更小的变压器,计算结果偏大):

(1)铁芯:

$$\textcircled{1} \text{有效散热面}(m^2): A_x = A_1 + K_{zh}A_2$$

式中:  $A_1$ ——铁芯外露表面积不包括有绝缘件遮蔽的部位和下铁轭下表面;

$A_2$ ——铁柱和铁轭气道内表面积( $m^2$ ),不包括有绝缘件遮蔽的部位;

$K_{zh}$ ——垂直气道散热折合系数,可由图3-24查得。

图3-24中,  $b$ 为气道有效宽度,气道两面的散热面间(如绕组与铁芯间或内、外绕组间)若无绝缘筒隔开时,取气道实际宽度的一半;  $H$ 为气道的高度。



②铁芯表面热负载( $\text{W}/\text{m}^2$ ):  $q_x = P_0/A_x$

③铁芯对空气的温升( $^{\circ}\text{C}$ ):  $\tau'_{x-k} = 0.36q_x^{0.8}$

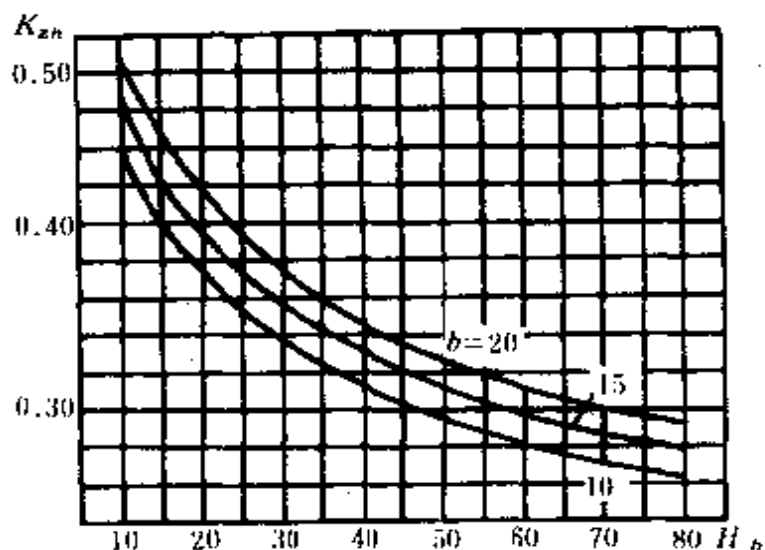


图 3-24 垂直气道散热折合系数  $K_{zh}$

(2)绕组:

①有效散热面( $\text{m}^2$ ):  $A_Q = A_1 + K_{zh}A_2 + K_{hh}A_3$

式中:  $A_1$ ——绕组外露表面积( $\text{m}^2$ ),内绕组无此项面积;

$A_2$ ——绕组各垂直气道的表面积( $\text{m}^2$ );

$A_3$ ——绕组横向气道表面积( $\text{m}^2$ ),圆筒式绕组无横向气道;

$K_{hh}$ ——横向气道散热折合系数,可由图 3-25 查得。

图 3-25 中,  $b_r$  为线饼间气道宽度(不小于 8);  $b_Q$  为线饼幅向厚度。

②绕组表面热负载( $\text{W}/\text{m}^2$ ):  $q_Q = P_S/A_Q$

③绕组对空气温升( $^{\circ}\text{C}$ ):  $\tau'_{Q-k} = 0.36q_Q^{0.8}$

(3)温升校正量:当两相邻发热部件之间有绝缘筒间隔时,求得的温升  $\tau'_{x-k}$ 、 $\tau'_{Q-k}$  不必校正,否则应考虑相互间的热交换而进行校正。

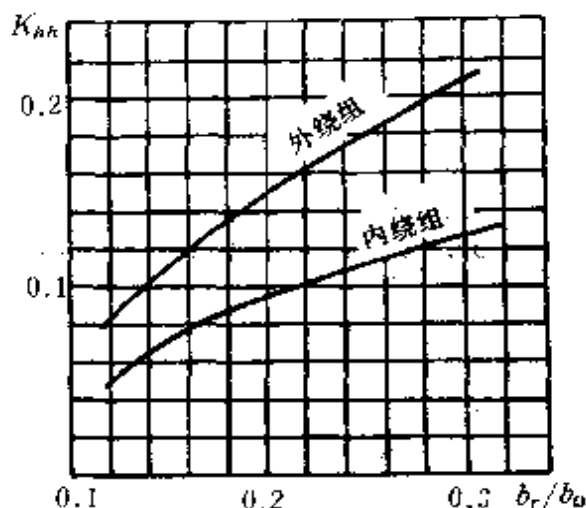


图 3-25 横向气道散热折合系数  $K_{kk}$

①内绕组与铁柱之间的热交换及温升校正：

二者之间的热交换量为

$$\Delta q_{Q-K} = 1.8 \frac{A_{Q-K}}{A_Q} \Delta \tau^{1.25}, \Delta \tau = |\tau'_{Q-K} - \tau'_{X-K}|$$

式中： $\Delta q_{Q-K}$ ——内绕组和铁柱间的热交换量(W/m<sup>2</sup>)；

$A_{Q-X}$ ——内绕组和铁柱间的热交换面(m<sup>2</sup>)。

因此，温升校正量为  $\Delta \tau_{Q-K} = 0.36 \Delta q_{Q-K}^{0.8}$

当  $\tau'_{Q-K} > \tau'_{X-K}$  时，则校正后的铁芯和绕组温升为

$$\tau_{X-K} = \tau'_{X-K} + \Delta \tau_{Q-K}, \tau_{Q-K} = \tau'_{Q-K} - \Delta \tau_{Q-K}$$

当  $\tau'_{Q-K} < \tau'_{X-K}$  时，则校正后的铁芯和绕组温升为

$$\tau_{X-K} = \tau'_{X-K} - \Delta \tau_{Q-K}, \tau_{Q-K} = \tau'_{Q-K} + \Delta \tau_{Q-K}$$

②内、外绕组之间的热交换及温升校正，计算方法同上。

### 三、整流变压器计算

#### 1. 铁芯截面的选择

单相壳式  $S = \sqrt{P}$ ，单相芯式  $S = (0.7 \sim 0.8) \sqrt{P}$

三相芯式  $S = \sqrt{P/3}$

三相圆柱形铁芯(多级铁芯)铁柱直径

$$D_z = (5.8 \sim 6.5) \sqrt[3]{P}$$

式中:  $S$ ——铁芯截面( $\text{cm}^2$ );

$P$ ——变压器容量(VA);

$D_z$ ——铁柱直径(cm)。

各种不可控整流方式。下变压器容量计算,见表 3-28。

表中  $U_z, I_z$  为输出直流电压、电流平均值;  $I_1, I_2$  和  $U_1, U_2$  为变压器一次、二次的电流和线电压。

表中所列是理想状态下得出的,实际设计时,应考虑整流元件管压降、变压器漏抗压降及励磁电流等因素。

考虑整流管的管压降及熔断器导线等压降时,  $U_2$  应加上 1.5V(半波电路)或 3V(桥式电路);如考虑变压器阻抗压降及交流电网电压的波动时,还应再增大 10~15%左右,考虑励磁电流时,一次电流  $I_1$  可加大 5%左右。

## 2. 绕组匝数计算

(1) 变压器二次绕组匝数:

$$W_2 = \frac{U_2 \times 10^4}{4.44 f B_2 S K_d}$$

式中:  $f$ ——电源频率,工频为 50Hz;

$B_2$ ——磁通密度(T),它与变压器容量的关系如表 3-29 所示;

$K_d$ ——迭片系数,见表 3-22,一般可取

$$K_d = 0.9 \sim 0.95;$$

其它符号同前。

(2) 变压器一次绕组匝数:

$$W_1 = \frac{U_1}{U_2} W_2$$

表 3-28 不可控整流方式(电阻性负载理想情况下)的变压器容量计算

	二次相电压 $U_2$	一次相电压 $U_1$	二次电流 $I_2$	一次电流 $I_1$	变压器二次 相容量 $P_2$	变压器一次 相容量 $P_1$	设计容量 $P = \frac{P_1 + P_2}{2}$
单相半波	$2.22U_z$	$U_2 \frac{W_1}{W_2}$	$1.57I_z$	$1.21I_z \frac{W_2}{W_1}$	$3.49U_z I_z$	$2.69U_z I_z$	$3.09U_z I_z$
单相全波 (双半波)	$2 \times 1.11U_z$	$U_2 \frac{W_1}{W_2}$	$0.785I_z$	$1.11I_z \frac{W_2}{W_1}$	$1.74U_z I_z$	$1.23U_z I_z$	$1.49U_z I_z$
单相桥式 (全波)	$1.11U_z$	$U_2 \frac{W_1}{W_2}$	$1.11I_z$	$1.11I_z \frac{W_2}{W_1}$	$1.23U_z I_z$	$1.23U_z I_z$	$1.23U_z I_z$
三相半波	$0.855U_z$	$U_2 \frac{W_1}{W_2}$	$0.58I_z$	$0.47I_z \frac{W_2}{W_1}$	$1.49U_z I_z$	$1.21U_z I_z$	$1.35U_z I_z$
三相桥式	$0.428U_z$	$U_2 \frac{W_1}{W_2}$	$0.817I_z$	$0.817I_z \frac{W_2}{W_1}$	$U_z I_z$	$1.05U_z I_z$	$1.05U_z I_z$
六相双反星形	$0.855U_z$	$U_2 \frac{W_1}{W_2}$	$0.289$	$0.407I_z \frac{W_2}{W_1}$	$1.48U_z I_z$	$1.05U_z I_z$	$1.26U_z I_z$

### 3. 导线截面的选择

一次和二次绕组导线的截面  $q_1$  和  $q_2$  按下列公式计算：

$$q_1 = I_1 / j_1, q_2 = I_2 / j_2$$

式中： $q_1, q_2$ ——一次和二次绕组导线的截面 ( $\text{mm}^2$ )；

$j_1, j_2$ ——一次和二次绕组的电流密度 ( $\text{A}/\text{mm}^2$ )，可参考表 3—30 选用。一般二次绕组在内层，散热条件较差， $j$  可选得稍小；二次绕组在外层， $j$  可选得稍大。

表 3—29 磁通密度  $B_z$  与硅钢片型号及  
变压器容量的关系

$B_z(\text{T})$ 型号	$S$ 100VA 以下	100VA~ 1kVA	1~10kVA	10~ 100kVA	100kVA 以上
冷轧硅钢片 D310, D340	1.0~1.2	1.2~1.5	1.4~1.7	1.5~1.75	1.6~1.8
热轧硅钢片 D41, D42	0.8~1.0	1.0~1.2	1.2~1.3	1.3~1.45	1.4~1.45

表 3—30 电流密度  $j$  与绝缘等级及变压器容量的关系

$j(\text{A}/\text{mm}^2)$	$S$ 10~100VA	100VA~1kVA	1~10kVA	10~ 100kVA	100kVA 以上
A 级绝缘自冷	5~3.5	3.5~2	2.4~1.8	2~3	2~3
A 级绝缘风冷	—	6~4	5~3	4~3	3~2.5
A 级绝缘油冷	—	—	—	3~4.5	4.5~5.5
B 级绝缘自冷	6~4	4~2.5	2.8~2	2.6~1.8	2~1.6

(续表)

S j(A/mm <sup>2</sup> )	10~100VA	100VA~1kVA	1~10kVA	10~ 100kVA	100kVA 以上
	B级绝缘风冷	—	7~5	5.5~3.5	4.5~3.5
B级绝缘油冷	—	—	—	3.5~5	5~6

注意,对于小容量变压器从温升条件考虑虽可选用较大的电流密度,但如果导线电阻压降超过10%,选用导线时必须降低电流密度。

#### 4. 铁芯窗口大小的确定

(1)中、小型变压器:

$$\text{铁芯窗口面积为 } Q = \frac{W_1 q_1 + W_2 q_2}{K_Q} \times 10^{-2}$$

$$\text{窗口高与铁芯柱宽的关系为 } h = (2.5 \sim 3.5)a$$

$$\text{窗口宽为 } C = Q/h$$

式中:Q——窗口面积(cm<sup>2</sup>);

h、c——窗口的高和宽(cm);

K<sub>Q</sub>——窗口填充系数,对于几VA至几十VA的小变压器,取0.25~0.3,对于几百VA以上者,取0.3~0.4;

a——铁芯柱宽(cm);

其它符号同前。

按上述方法选出的铁芯窗口与原选用的铁芯实际窗口面积相比,若相差较大,则应重新选择铁芯尺寸,重复以上计算。

(2)大容量变压器:可根据导线的排列仔细计算。

$$\text{铁芯窗高 } h_c = (2.5 \sim 3.5)a$$

计算时须注意,每层绕组占的尺寸为实际有效匝数加1。选用的扁导线宽度以排满整数的双层数为好,即排满2、4、6、8层为好。

考虑风道或油道算出绕组的厚度后,便可计算铁芯窗口的宽度 $c$ 。芯式较大容量的变压器,铁芯窗口宽为

$$c=2d+2d'+d''$$

式中: $d$ ——绕组厚度

$d'$ ——绕组与铁芯之间的空隙,约2~3mm;

$d''$ ——两绕组间的空隙,约4~6mm。

### 5. 变压器设计合理性的测定

变压器可进行空载电流测试,以判定磁通密度和匝数选择是否合理;也可进行温升试验,以判定电流密度选择是否合理。

按规定,A级绝缘最高工作温度为110℃,B级绝缘最高为120℃,如果温升超过允许值时,应适当增大导线截面,或设法改善冷却条件。

**例3-8** 设计一台90V,0~25A充电机用单相变压器,已知一次电压为220V,采用A级绝缘,空气自冷。

**解**

(1)变压器容量计算:

变压器二次电压计算,应考虑整流管压降及熔断器导线等压降 $\Delta U_1$ ,还应考虑交流电网电压的波动及变压器阻抗压降及交流电网电压的波动的加大系数 $k$ ,按下式计算:

$$\begin{aligned} U_2 &= (1.11U_2 + \Delta U_1)(1+k) \\ &= (1.11 \times 90 + 2 \times 1.5) \times (1+0.15) \approx 120(\text{V}) \end{aligned}$$

忽略励磁电流,并假设可控硅导电角为60°左右,电流有效值与平均值之比约为2,则变压器二次电流为

$$I_2 = 2I_z = 2 \times 25 = 50(\text{A})$$

一次电流  $I_1 = I_2 U_2 / U_1 = 50 \times \frac{120}{220} = 27.3(\text{A})$

变压器容量为

$$P_1 \approx P_2 = U_2 I_2 = 120 \times 50 = 6000(\text{VA})$$

变压器选用单相芯式结构。

(2) 铁芯截面的选择:

$$S = a \cdot b = 0.7 \sqrt{P} = 0.7 \sqrt{6000} = 54.2(\text{cm}^2)$$

定  $a = 6\text{cm}, b = 9\text{cm}, S = 6 \times 9 = 54(\text{cm}^2)$

校验:  $b' = 1.1S/a = 1.1 \times 54/6 = 9.9$

$b'/a = 9.9/6 = 1.66$ , 在  $1 \sim 2$  以内, 所以是合适的。

(3) 一、二次绕组匝数  $W_1, W_2$  的计算:

选用 D310 硅钢片, 取磁通密度  $B_2 = 1.4\text{T}$ , 则

$$W_2 = \frac{U_2 \times 10^4}{4.44 f B_2 S k_d} = \frac{120 \times 10^4}{4.44 \times 50 \times 1.4 \times 54 \times 0.93} \\ = 77(\text{匝}), \text{取 } 78 \text{ 匝}$$

$$W_1 = \frac{U_1}{U_2} W_2 = \frac{220}{120} \times 78 = 143(\text{匝}), \text{取 } 144 \text{ 匝}$$

绕组分绕在两柱上, 每柱匝数分别为

$$W'_2 = W_2 / 2 = 78 / 2 = 39(\text{匝})$$

$$W'_1 = W_1 / 2 = 144 / 2 = 72(\text{匝})$$

(4) 一、二次导线截面的选择:

$$q_1 = I_1 / j_1 = 27.3 / 2.2 = 12.4(\text{mm}^2)$$

$$q_2 = I_2 / j_2 = 50 / 2.0 = 25(\text{mm}^2)$$

导线总截面及窗口面积为

$$Q = \frac{W_1 q_1 + W_2 q_2}{K_Q} \times 10^{-2} \\ = \frac{144 \times 25 + 78 \times 12.4}{0.35} \times 10^{-2} = 130.5(\text{cm}^2)$$

窗高为  $h_c = 2.5a = 2.5 \times 6 = 15(\text{cm})$

窗宽为  $c = Q/h = 130.5/15 = 8.7(\text{cm})$



**例 3-9** 试设计一台三相桥式整流变压器,要求直流输出 110V,300A。已知一次电压 380V,采用 A 级绝缘,强迫风冷,联结组标号为  $Y_y$ 。

**解**

(1) 变压器容量计算:

查表 3-28 得二次电流为

$$I_2 = 0.817I_s = 0.817 \times 300 = 245(\text{A})$$

二次相电压为

$$\begin{aligned} U_2 &= (0.428U_s + \Delta U_1)(1 + 0.10) \\ &= (0.428 \times 110 + 3) \times 1.1 = 55.09(\text{V}), \text{取 } 55\text{V} \end{aligned}$$

一次电流  $I_1 = I_2 U_2 / U_1 = 245 \times 55 / 220 = 61.3(\text{A})$

变压器容量为  $P = 3U_2 I_2 = 3 \times 55 \times 245 = 40425(\text{VA})$   
 $\approx 40(\text{kVA})$

每柱容量  $P_s = 40/3 = 13.3(\text{kVA})$

(2) 采用多级铁芯,圆形直径  $D$  为

$$D = 6.3 \sqrt[4]{P_s} = 6.3 \sqrt[4]{13.3} = 6.3 \times 1.9 = 12(\text{cm})$$

采用六级铁芯,由表 3-21 查得

$$a_1 = 11.5, a_2 = 10.5, a_3 = 9, a_4 = 7.5, a_5 = 6, a_6 = 3.5;$$

$$b_1 = 3.4, b_2 = 1.2, b_3 = 1.1, b_4 = 0.7, b_5 = 0.5, b_6 = 0.5$$

净面积  $S = 98.9(\text{cm}^2)$

采用 D42 0.5mm 硅钢片,磁通密度选用  $B_m = 1.28\text{T}$

窗高  $h = 2.5D = 2.5 \times 12 = 30(\text{cm})$

(3) 一、二次绕组匝数的计算:

$$\begin{aligned} W_1 &= \frac{U_1 \times 10^4}{4.44fB_mSK_d} \\ &= \frac{220 \times 10^4}{4.44 \times 50 \times 1.28 \times 98.9 \times 0.93} = 84(\text{匝}), \text{取 } 84 \text{ 匝} \end{aligned}$$

$$W_2 = \frac{U_2}{U_1} W_1 = \frac{55}{220} \times 84 = 21(\text{匝})$$

(4) 一、二次导线截面的选择:

根据 A 级绝缘, 强迫风冷, 取电流密度  $j = 3\text{A}/\text{mm}^2$ , 故

$$q_1 = I_1/j = 61.3/3 = 20.4(\text{mm}^2)$$

$$q_2 = I_2/j = 245/3 = 81.7(\text{mm}^2)$$

(5) 导线排列:

选窗高  $h_v = 300\text{mm}$ 。

① 二次绕组:  $W_2 = 21$  匝, 绕组两侧与铁轭间的绝缘间距为  $2 \times 10\text{mm} = 20\text{mm}$ 。分两层绕, 每层按 11 匝计算, 采用三根导线并绕, 每根截面积为  $q_2/n = 81.7/3 = 27.2(\text{mm}^2)$ , 每匝导线总宽为  $(300 - 20)/11 = 25(\text{mm})$ , 每根导线宽为  $25/3 = 8.3(\text{mm})$ , 除去绝缘及间隙每根导线净铜宽为  $7.8\text{mm}$ , 从导线规格表中查得  $3.53 \times 7.4 = 25.6(\text{mm}^2)$  能满足要求。

铁芯直径为  $D = 120\text{mm}$ , 绕组内径按  $126\text{mm}$  绕, 二次绕组厚度为  $2 \times (3.52 + 1) + 6 \approx 15(\text{mm})$ , 二次绕组外径为  $126 + 2 \times 15 = 156(\text{mm})$ 。

② 一次绕组:  $W_1 = 84$  匝, 绕两层, 每层 42 匝, 按 42 匝计算, 导线厚为  $(300 - 20)/42 = 6.57(\text{mm})$ 。除去绝缘与间隙选用  $3.28 \times 6.4 = 20.5(\text{mm}^2)$  的导线。

一次绕组的厚度为  $2 \times (3.28 + 1) + 6 \approx 15(\text{mm})$ 。一、二次绕组之间留  $2 \times 5\text{mm}$  的风道, 一次绕组内径为  $156 + 10 = 166(\text{mm})$ , 外径为  $166 + 15 \times 2 = 196(\text{mm})$ 。

绕组总厚为  $196 - 126 = 70(\text{mm})$ 。两相绕组之间留  $12\text{mm}$  间隙, 则铁芯窗口宽度为  $70 + 12 + 6 = 88(\text{mm})$ 。

铁芯总宽为  $A = 3 \times 120 + 2 \times 88 = 536(\text{mm})$ 。

上下铁轭的宽度取  $110\text{mm}$ , 变压器铁芯高为  $H = 300 + 2 \times 110 = 520(\text{mm})$ 。

铁芯外形及绕组尺寸如图 3-26 所示。

(6) 铁重与铜重计算:

铁重计算：先求出铁柱和铁轭的体积，然后按本节干式电力变压器求铁重的公式求得铁芯总重。

铜重计算：先求出一、二次绕组的平均直径和平均周长，然后按本节干式电力变压器求铜重的公式求得总铜重。

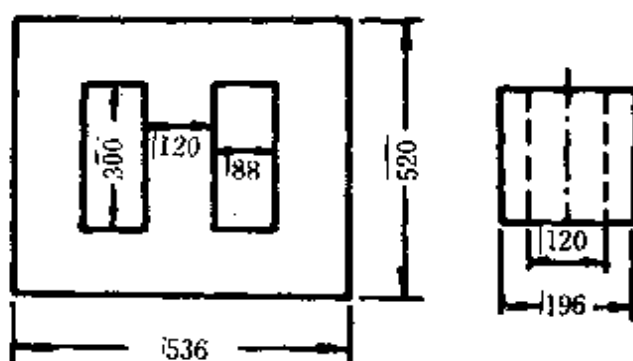


图 3-26 铁芯外形及绕组尺寸

具体计算从略。

#### 四、高压试验变压器的计算及选型

##### 1. 对高压试验变压器的要求

(1)交流耐压试验变压器的电压，由被试验设备的耐压试验标准决定。主要电气设备的交流耐压标准见表 3-31。

(2)试验变压器的容量和被试设备的试验电压和电容有关，

$$Pe = \omega CU^2 \times 10^{-3}$$

式中： $Pe$ ——变压器容量(kVA)；

$C$ ——被试设备的电容( $\mu F$ )，常见被试设备电容量见表 3-32；

$U$ ——试验电压(kV)，由表 3-31 决定；

$\omega$ ——电源角频率， $\omega = 2\pi f (f = 50Hz)$ 。

考虑试验的泄漏电流和电晕等损耗，并留有一定裕度，其实际容量的选择应较上式计算值大。

一般试验变压器允许过电流 10%，若用电力变压器代替耐压变压器时(对试验结果的正确有一定影响)，可过负荷 2.5 倍。

表 3-31 主要电气设备的交流耐压标准

设 备	设备规格及交流耐压试验电压标准										备 注	
定 子	对 3.3 至 6.6kV (包括 6.6kV)										对已运行过的发电机不分容量,其外接试验电压均为 $1.5U_{ef}$	
	6.6kV 以上											
转 子	对凸极式转子										7.5 倍额定励磁电压, 应大于 1.2kV	
	对隐极式转子											7.5 倍额定励磁电压, 应大于 1kV
额定电压(kV)	0.4 以下	0.5	2	3	6	10	15	20	35	44	60	
		15	21	30	38	47	72	90	120	170		
试验电压(kV)			15	21	30	38	47	72	90	120	170	
干式电抗器			25	32	42	57	67	95				

(续表)

设备	设备规格及交流耐压试验电压标准											备注	
	1	1.5	4	5	10	16							
电动机	试验电压(kV)			22	28	38	49	60	85	95	165	260	
电压互感器	试验电压(kV)												
电流互感器及断路器	试验电压(kV)			22	28	38	49	60	85	95	140	230	
套管及支持绝缘子	户外式试验电压(kV)			24	32	42	55	66	95		165	260	
	户内式试验电压(kV)			22	28	38	49	60	85				
绝缘油	使用电压	用于 6kV 以下电气设备的新油耐压 25kV, 运行的油耐压 20kV 用于 6~18kV 电气设备的新油耐压 30kV, 运行的油耐压 25kV 用于 35kV 及以上电气设备的新油耐压 40kV, 运行的油耐压 35kV											

表 3-32 常见被试设备的电容量

序号	试品	工频入口电容(pF)	冲击入口电容(pF)
1	绝缘子	100 以下	
2	高压套管	50~600	
3	高压断路器、电流互感器、 电磁式电压互感器	100~1000	
4	电力变压器、电缆进线的电 力变压器敞开式、全封闭组 合电器	1000~6000	1000~2500 3000~4500 1000~6000
5	电容式电压互感器	3000~5000	
6	电力电缆(每米)	150~400	

国家标准规定：干燥状态下进行外绝缘试验时，工频电压试验设备高压侧的稳态短路电流，不得小于 0.1A(有效值)；淋雨状态下试验时，不得小于 0.7A(峰值)。污秽绝缘试验则需更大的电流。

(3)试验变压器的运行时间：试验变压器在额定电压和额定电流下，一般允许连续运行 30min；当工作电压和电流均在额定值的 70%以下时，允许长期运行。

## 2. 试验变压器的选型

(1)10kV 及以下电气设备的高压试验一般配置 YDJ-5/50 型、电压为 0~50/0.38kV、容量为 5kVA 的试验变压器一台。

(2)35kV 电气设备的高压试验可配置 YDJ-25/150 型、电压为 0~150/0.38kV、容量为 25kVA 的试验变压器。

(3) 发电机高压试验变压器按以下条件选择

$$U_e \geq U_f, P_e \geq P_f$$

$$P_f = U_f I_f = U_f^2 C_f \omega = 0.314 U_f^2 C_f$$

式中： $U_e$ ——试验变压器额定电压(kV)；

$U_f$ ——发电机的试验电压(kV)；

$P_e$ ——试验变压器的额定容量(kVA)；

$P_f$ ——发电机试验容量(kVA)；

$I_f$ ——发电机试验电流(A)；

$C_f$ ——发电机电容( $\mu\text{F}$ )。

试验变压器容量可由试验变压器规范中查得，见表 3—33。

表 3—33 发电机试验变压器规范

发电机容量及电压			耐压变压器规范		
容量 (MW)	电压 (kV)	电容值 ( $\mu\text{F}$ )	型号	电压 (kV)	容量 (kVA)
6	6	0.05	YDJ—5/15	0~15/0.38	5
12	6	0.10	YDJ—5/15	0~15/0.38	5
25	6	0.20	YDJ—10/15	0~15/0.38	10
	10	0.16	YDJ—25/25	0~25/0.38	25
50	10	0.25	YDJ—25/25	0~30/0.38	50
100	10	0.39	YDJ—50/30	0~30/0.38	50
125	10		YDJ—50/30	0~30/0.38	50

(4) 变压器油、绝缘子和安全工具(绝缘棒、安全手套和胶鞋)的电气强度试验，配置一台移动式的试油器，规范为 IJJ/60。

其供电电压为 220V, 输出电压为 0~60kV, 容量为 2kVA。一般用于试验室内。

常用试验变压器参数见表 3-34。

表 3-34 常用的试验变压器参数

型 号	额定容量 (kVA)	额定电压		阻抗电压 (%)
		高压侧 (kV)	低压侧 (V)	
YDJ-5/50	5	50	220	4.6
YDJ-10/100	10	100	220/380	7.52
YDJ-25/100	25	100	380	6.5
YDJ-50/100	50	100	220	6.63
YDJ-100/100	100	100	380	8.25
YDJ-25/150	25	150	380	6.6
YDJ-100/150	100	150	380	6.45
YDJ-200/35	200	35	400	5.5
YDJ-250/100	250	100	380	8.95
YDJ-250/250	250	250	380	8.5
YDJ-500/500	500	500	6000	4.9
YDJ-750/750	750	750	6000/3000	4.97
YDJ-1500/ 1500	1500	1500	6000/3000	
YDJ-2250/ 2250	2250	2250	6000/3000	40.7

### 3. 对试验用调压器的要求

调压器的容量, 一般应和试验变压器的额定容量相等。当短



期工作制时,调压器的容量可比变压器的容量稍小。

(1)几种常用的试验用调压器比较:

①接触调压器:电压波形畸变小,调压范围大,损耗小。容量在 100kVA 及以下。

②感应调压器:电压波形畸变小,调压范围大。容量在 1000kVA 及以下,但结构复杂。

③移圈调压器:调压范围大,容量在 2250kVA 及以下,结构简单。在 25~75%额定电压下,电压波形畸变较小。

(2)常用的调压器型号规格(表 3—35):

表 3—35 常用调压器型号规格

型 号	额定容量 (kVA)	输入电压 (V)	调压范围 (V)	备 注
TDG-Y-25/0.5	25	380	0~400	干式,单相
TDJY-100/0.5	100	380	0~400	油浸,单相
TSJY-100/0.5	100	380	0~400	油浸,三相
TDJK-500/10	500	6000	0~6300	油浸,单相
TDJY-1000/10	1000	3000	0~3150	油浸,单相
		6000	0~6300	
		10000	0~10500	
TSJY-1500/10	1500	3000	0~3150	油浸,三相
		6000	0~6300	
		10000	0~10500	
TDJY-2250/10	2250	3000	0~3150	油浸,单相
		6000	0~6300	
		10000	0~10500	
TSJY-2250/10	2250	3000	0~3150	油浸,三相
		6000	0~6300	
		10000	0~10500	

#### 4. 高压试验变压器的基本计算

##### (1) 铁柱直径和磁通密度的选择:

①铁柱直径的选择:绝缘筒式或双套管式的铁柱直径按下式计算:

$$D_2 = K_D \sqrt[4]{P_s}$$

式中:  $D_2$ ——铁柱直径(mm);

$K_D$ ——经验系数,冷轧硅钢片取 60~66,热轧硅钢片取 68~75;

$P_s$ ——变压器额定容量(kVA)。

②磁通密度的选择:冷轧硅钢片,通常取 1.4~1.5T;热轧硅钢片,则取 1.2~1.3T。

(2)铁柱及铁轭截面计算:同电力变压器计算。

(3)电流密度的选择:由于试验变压器的额定工作时间、散热条件差别较大,电流密度选择范围也较大。对于铜导线,高压绕组取 1~3A/mm<sup>2</sup>,低压绕组取 3~5A/mm<sup>2</sup>。

(4)绕组和绝缘的选取:各绕组一般均采用铜导线。高压导线可采用高强度漆包线、单丝漆包线或纸包圆线。导线直径最细可取到  $\phi 0.15 \sim \phi 1.0$ ;电压低、容量较小者取小值,电压高、容量大者取大值。

引出线采用多股铜绞线,与引出线相连接的导线直径不小于  $\phi 0.7$ 。

对于宝塔形绕组,绕组端部至铁轭的垂直距离可根据各部位的具体试验电压按 12~14kV/cm 选取。当采用 0.08 电缆纸作层间绝缘时,层间绝缘厚度可根据层间的具体试验电压按 8~10kV/mm 选取。

(5)电抗电压计算:双套管式或绝缘筒式试验变压器的电抗电压百分数  $U_x\%$ 按下式计算:

$$U_x \% = \frac{1}{2} (U_{x12} \% + 0.9U_{x14} \%)$$

式中： $U_{x12} \%$ ——同一铁柱上的低压和高压绕组之间的电抗电压百分数；

$U_{x14} \%$ ——同一铁柱上的低压和平衡绕组之间的电抗电压百分数。

$U_{x12} \%、U_{x14} \%$ 计算时均以低压绕组的容量为基准。

(6)温升计算：

①短时间工作时油对空气的平均温升  $\tau_{(Y-K)_t}$ 按下式计算：

$$\tau_{(Y-K)_t} = \tau_{Y-K} (1 - e^{-\frac{t}{\tau}}), \tau = \frac{C\tau_{Y-K}}{P_z} \times \frac{1}{3600}$$

$$C = 1670G_Y + 480G_{Fe} + 390G_{Cu} + 320G_{Yx}$$

式中： $\tau_{Y-K}$ ——油平均温升稳定值(C)，计算方法见电力变压器设计专著；

$t$ ——工作时间(h)；

$\tau$ ——时间常数(h)；

$P_z$ ——总损耗(W)；

$C$ ——总热容量(W·S/°C)，

$G_Y$ ——油重(kg)；

$G_{Fe}$ ——铁芯硅钢片重(kg)；

$G_{Cu}$ ——铜导线重(kg)；

$G_{Yx}$ ——油箱钢板重(kg)。

②油面温升  $\tau_{(M-K)_t}$ 按下式计算：

$$\tau_{(M-K)_t} = 1.2\tau_{(Y-K)_t}$$

③若工作时间小于1小时，可以不考虑散热，这时

$$\tau_{(Y-K)_t} = \frac{3600P_z t}{1670G_Y + 480G_{Fe} + 390G_{Cu} + 320G_{Yx}}$$

绕组对油温升的计算方法，见电力变压器设计专著。

## 五、调压器计算

### 1. 干式自冷式接触调压器的基本计算

(1) 匝电势选择: 对于电化石墨电刷, 匝电势不宜大于 1V, 一般选用 0.7~1V, 小容量接触调压器可取 0.3~0.4V。大容量接触调压器, 当采取电刷直接在绕组每一匝的导体表面上沿着导线绕制方向作螺旋式上升或下降而不匝匝短路的措施后, 匝电势可以大于 1V, 且随着容量的增大而匝电势也增大。

(2) 电流密度和磁通密度的选择: 单层绕组散热条件好, 电流密度可取较大值。按电压比为 2 的位置计算时, 5kVA 环式接触调压器, 可取 4A/mm<sup>2</sup>, 0.5kVA 的可取 7A/mm<sup>2</sup>。

环式接触调压器铁芯散热条件较差, 磁通密度不宜取高。冷轧硅钢片取 1.3~1.5T, 热轧硅钢片取 1.1~1.3T。柱式接触调压器铁芯的磁通密度选取同电力变压器。

(3) 电刷宽度的确定: 电刷的宽度应保证电刷与绕组接触的连续性并不使绕组短路, 为此, 应满足下式要求:

$$a - b < B < (2a - b)$$

式中:  $B$ ——电刷宽度(mm);

$a$ ——相邻线匝的中心距(mm);

$b$ ——导线磨面宽度(mm)。

为了降低电刷电流密度,  $B$  应取上限值。

当调压器容量很小时, 允许电刷短路 2~3 匝。

(4) 铁芯主要尺寸的确定: 环式接触调压器的铁芯外径可按下式计算:

$$D = \frac{360Wd}{\pi\alpha} + 2B_d$$

式中:  $D$ ——铁芯外径(mm);

$W$ ——绕组匝数;

$d$ ——绝缘导线直径(mm);

$\alpha$ ——绕组最大绕线角度, 一般不超过 340°;

$B_d$ ——磨光表面在绕组端面时,绕组磨面径向宽度(mm),它由电刷尺寸决定;若磨光表面在绕组的外柱面, $B_d=0$ 。

如果调压器为油浸自冷式,则匝电势、电流密度和磁通密度等均可取高些。

### 2. 感应调压器的基本计算

(1)感应调压器的常用联接法和电磁容量换算:三相感应调压器和单相感应调压器的常用联接法见图 3—27 和图 3—28。

感应调压器常用联接法的电磁容量换算,见表 3—36。

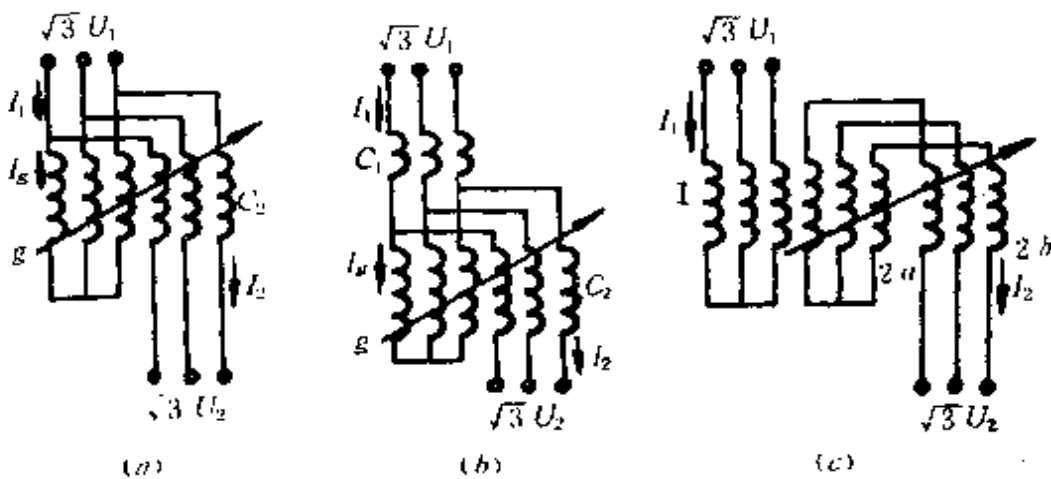


图 3—27 三相感应调压器常用接线图

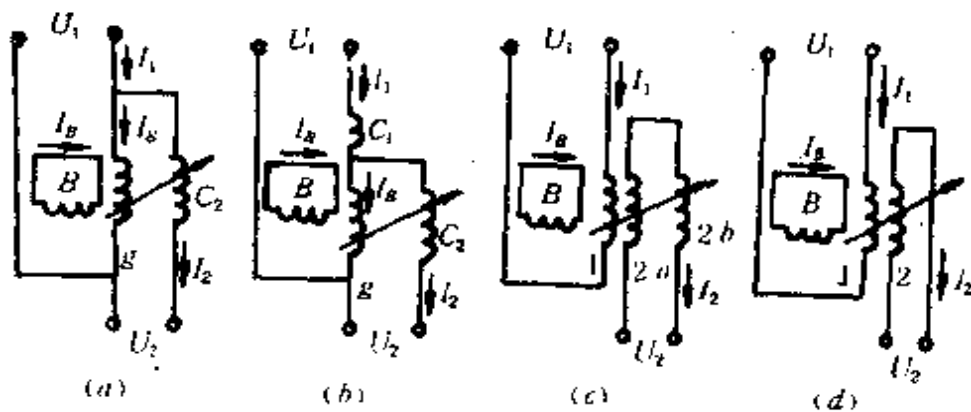


图 3—28 单相感应调压器常用接线图

表 3-36 感应调压器常用联接法的电磁容量换算表

接线图	$\frac{k_g W_g}{k_c W_c} = 1$	$\frac{k_2 W_2}{k_1 W_1 + k_1 W_2} = K_{1/2}$	电磁容量 输出容量 = $K_{1/2}$	型式容量 输出容量	空载电压 $U_{20}$ 的 变化范围
图 3-27(a)	1	1	0.5	0.5	0~2U <sub>1</sub>
	2	1	0.33	0.33	0.5U <sub>1</sub> ~1.5U <sub>1</sub>
	4	1	0.20	0.20	0.75U <sub>1</sub> ~1.25U <sub>1</sub>
	8	1	0.11	0.11	0.875U <sub>1</sub> ~1.125U <sub>1</sub>
图 3-27(b)	1	0.75	0.5	0.625	0~1.5U <sub>1</sub>
	1	0.625	0.5	0.685	0~1.25U <sub>1</sub>
	1	0.5	0.5	0.75	0~U <sub>1</sub>
图 3-27(c)	$k_{2g} W_{2g} = k_{2c} W_{2c} = k_2 W_2$		1.0	1.0	0~2U <sub>1</sub> $\frac{k_2 W_2}{k_1 W_1}$
图 3-28(c)			1.0	1.0	0~U <sub>1</sub> $\frac{k_2 W_2}{k_1 W_1}$
图 3-28(d)			1.0	1.0	0~U <sub>1</sub> $\frac{k_2 W_2}{k_1 W_1}$

注:

$k_g, k_{c1}, k_{c2}, k_1, k_2$ ——分别为绕组  $g, c_1, c_2, 1, 2$  的绕组系数。

$W_g, W_{c1}, W_{c2}, W_1, W_2$ ——分别为绕组  $g, c_1, c_2, 1, 2$  的匝数。

(2)铁芯尺寸的估算:先根据已知的额定数据,查表 3—36 和图 3—27、图 3—28,选定适当的绕组联接方式,求出型式容量,再根据冷却方式、绝缘等级和型式容量选定相应的机座,查表 3—37~表 3—39,初选定子外径和硅钢片的迭厚。表 3—37~表 3—39 中的尺寸仅适用于热轧硅钢片。

表 3—37 干式自冷式 E 级绝缘三相感应调压器的型式容量与铁芯主要尺寸表

型式容量(kVA)	6.3~8.0	10~16
定子铁芯外径 迭厚 (cm)	$\frac{32.7}{10\sim15}$	$\frac{36.8}{18\sim24}$
极 对 数 $p$	1	

表 3—38 油浸自冷式 A 级绝缘三相感应调压器的型式容量与铁芯主要尺寸表

型式容量(kVA)	16~25	32~63	80~100	125~160	200~250	320~500
定子铁芯外径 迭厚 (cm)	$\frac{32.7}{10\sim15}$	$\frac{36.8}{18\sim24}$	$\frac{42.3}{27\sim32}$	$\frac{49.3}{27\sim33}$	$\frac{56}{40\sim50}$	$\frac{65}{42\sim75}$
极 对 数 $p$	1					

表 3—39 强迫风冷 E 级绝缘三相感应调压器的型式容量与铁芯主要尺寸表

型式容量(kVA)	320~500	320~500
定子铁芯外径 迭厚 $\left( \begin{matrix} \text{cm} \\ \text{cm} \end{matrix} \right)$	$\frac{74}{35\sim45}$	$\frac{99}{35\sim45}$
极 对 数 $p$	1	2

单相感应调压器的型式容量约为三相的 70%左右。

(3)槽数及槽配合:定子、转子槽数均为  $6p$  的倍数,定子、转子槽数之差为  $6p$ 。两极感应调压器的槽配合一般取为 18/12, 24/18, 30/24, 36/30;四极的取 48/36, 60/48 等。

(4)气隙及气隙磁通密度的确定三相感应调压器的气隙长度  $\delta=0.35\sim1.0\text{mm}$ ;单相的  $\delta$  比三相的大  $0.1\sim0.25\text{mm}$ 。气隙直径  $D_\delta$  取定子铁芯外径的 55~66%。气隙磁通密度取  $B_\delta=4\sim6\text{T}$ 。

(5)线负载及二次串联绕组匝数的确定:

$$I_2 = \frac{P_e \times 10^3}{mU_2}$$

$$W_{C_2} = \frac{\pi D_\delta A}{2mI_2}$$

式中:  $I_2$ — 负载电流(A);

$W_{C_2}$ — 绕组  $C_2$  每相匝数(匝);

$P_e$ — 输出容量(kVA);

$U_2$ — 输出电压上限值(V);

$m$ — 相数;

$D_\delta$ — 气隙直径(cm);



$A$ ——线负载(A/cm),可根据型式容量  $S_n$ ,由图 3—29 查得。

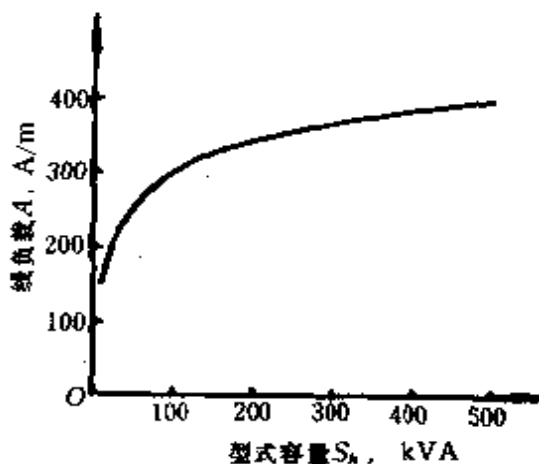


图 3—29 油浸自冷式感应调压器的线负载曲线(极对数  $p=1$ )

干式自冷式感应调压器的线负载为同型式容量油浸自冷式感应调压器的 70%左右。

强迫风冷式感应调压器的线负载与同型式容量油浸自冷式的相同。

单相感应调压器的线负载为同型式容量三相的 70%左右。

(6) 电流密度和磁通密度的选择(表 3—40)：

表 3—40 感应调压器的电流密度和磁通密度

冷却方式	电流密度 ( $A/mm^2$ ) (铜导线)	轭部磁通 密度(T) (热轧硅钢片)	齿部最大磁 通密度(T) (热轧硅钢片)
干式自冷式	1.5~2.5	1.1~1.35	1.4~1.55
油浸自冷式	3~5	1.3~1.55	1.6~1.75
强迫风冷式	3~5	1.3~1.55	1.6~1.75

(7) 电磁转矩计算：

$$M_e = 9555 \frac{P_d}{n_1} \cos \varphi_2$$

式中： $M_e$ ——额定电磁转矩(N·m)；

$P_d$ ——电磁容量，(kVA)，查表 3—36；

$n_1$ ——旋转磁场的同步转速(r/min)；

$\cos \varphi_2$ ——负荷功率因数。

具有两组二次绕组的双圈单相或三相感应调压器(见图 3—27)(c)和图 3—28(c))， $M_e$ 取上式计算值的一半。

(8)单相感应调压器计算的注意事项：

①铁耗  $P_{Fe}$ 为三相感应调压器计算值的一半。

②励磁电流按下式计算：

$$I_{or} = \frac{1.11 p \Sigma AW}{kW}$$

式中： $I_{or}$ ——励磁电流(A)；

$p$ ——极对数；

$\Sigma AW$ ——每极励磁总安匝(按三相感应调压器计算方法求)；

$k$ ——绕组系数；

$W$ ——励磁绕组匝数。

③补偿绕组  $B$  的安匝数应与绕组  $C_2$  的安匝数相等(取  $\sin \varphi = 1$ )。补偿绕组所占用的槽数为所在定子(或转子)总槽数的  $1/3 \sim 1/2$ ，其电流密度可较其它绕组取得略高。

(9)常用联接法的有关参数、电压、电流计算(表 3—41)：

## 六、小型变压器设计

### 1. 单相小型变压器设计

(1)输出总(视在)功率按下式计算：

表 3--41 感应调压器常用联接法的有关参数、电压、电流计算公式汇总表

接线图	输出电压为上限时短路参数计算					$U_2$
	升压极限 有效匝数比 $K_s$	降压极限 有效匝数比 $K_s$	$R_s$	$X_s$	$Z_s$	
图 3--27(a) 图 3--28(a)	$\frac{W_g k_g}{W_g k_g + W_c k_{c2}}$	$\frac{W_g k_g}{W_g k_g - W_c k_{c2}}$	$(1-K_s)^2 \times r_g + K_s^2 r_{c2}$	$(1-K_s)^2 \times x_g + K_s^2 x_{c2}$		
图 3--27(b) 图 3--28(b)	$\frac{W_{c1} k_{c1} + W_g k_g}{W_g k_g + W_c k_{c2}}$	$\frac{W_{c1} k_{c1} + W_g k_g}{W_g k_g - W_c k_{c2}}$	$r_{c1} + (1-K_s)^2 \times r_g + K_s^2 r_{c2}$	$x_{c1} + (1-K_s)^2 \times x_g + K_s^2 x_{c2}$	$(R_s^2 + x_s^2)^{\frac{1}{2}}$	$\frac{I_{lmax} \cdot Z_s \cdot \%}{U_1}$
图 3--27(c) 图 3--28(c)	$\frac{W_1 k_1}{W_{2a} k_{2a} + W_{2b} k_{2b}}$	$\frac{W_1 k_1}{W_{2a} k_{2a} - W_{2b} k_{2b}}$	$r_1 + K_s^2 \times (r_{2a} + r_{2b})$	$x_1 + K_s^2 \times (x_{2a} + x_{2b})$		
图 3--28(d)	$\frac{W_1 k_1}{W_2 k_2}$		$r_1 + K_s^2 r_2$	$x_1 + K_s^2 x_2$		

(续表)

接线图	最大输入电流 $I_{1\max}$	公共绕组最大电流 $I_{g\max}$	空载输出电压简化计算	
			最大 $U_{2\max}$	最小 $U_{2\min}$
图 3-27(a)		$\left\{ \left[ \left( \frac{I_2}{K_s} - I_1 \right) \cos\varphi_2 + I_{or} \right]^2 + \left[ \left( \frac{I_2}{K_s} - I_2 \right) \sin\varphi_2 + I_{or} \right]^2 \right\}^{\frac{1}{2}}$	$\frac{U_1}{K_s} - I_{or}x_g$ $\times \frac{W_{c2}k_{c2}}{W_gk_g}$	$\frac{U_1}{K_s} + I_{or}x_g$ $\times \frac{W_{c2}k_{c2}}{W_gk_g}$
图 3-28(a)				
图 3-27(b)	$\left[ \left( \frac{I_2}{K_s} \cos\varphi_2 + I_{oa} \right)^2 + \left( \frac{I_2}{K_s} \sin\varphi_2 + I_{or} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}}$	$\left\{ \left[ \left( I_2 - \frac{I_2}{K_s} U_s \right) \cos\varphi_2 + \left[ \left( I_2 - \frac{I_2}{K_s} U_s \right) \sin\varphi_2 + I_{or} \right]^2 \right\}^{\frac{1}{2}}$	$\frac{U_1}{K_s} - I_{or}(x_{c1} + x_g)$ $\times \frac{W_{c2}k_{c2}}{W_{c1}k_{c1} + W_gk_g}$	$\frac{U_1}{K_s} + I_{or}(x_{c1} + x_g)$ $\times \frac{W_{c2}k_{c2}}{W_{c1}k_{c1} + W_gk_g}$
图 3-28(b)				
图 3-27(c)			$\frac{U_1 - I_{or}x_1}{K_s}$	$\frac{U_1 - I_{or}x_1}{K_j}$
图 3-28(c)				
图 3-28(d)			$\frac{U_1 - I_{or}x_1}{K_s}$	0

表中  $r, x$  分别为各绕组的电阻和电抗。

$$P_2 = U_2 I_2 + U_3 I_3 + \dots$$

式中： $P_2$ ——输出总功率(VA)；

$U_2、U_3$ ——二次侧各绕组电压有效值(V)；

$I_2、I_3$ ——二次侧各绕组电流有效值(A)。

如果是整流变压器，即二次侧有经整流后供直流负荷用的绕组，则二次侧的直流电压和电流应按下式折算到交流，然后再代入上式进行计算。

$$U_2 = K_U U_{2z}, \quad I_2 = K_I I_{2z}$$

该绕组的功率为  $P_2 = K_b P_{2z}$

式中： $U_2、I_2、P_2$ ——分别为折算到交流的电压、电流和功率(V、A、VA)

$U_{2z}、I_{2z}、P_{2z}$ ——分别为直流电压、电流和功率(V、A、VA)；

$K_U、K_I、K_b$ ——系数，见表 3-42。

表 3-42 系数  $K_U、K_I$  和  $K_b$

系数	负荷性质	单相半波	单相全波	单相桥式	三相桥式
$K_U$	电阻性	2.22	1.11	1.11	0.43
	电感性	2.22	1.11	1.11	0.43
$K_I$	电阻性	1.57	0.79	1.11	0.82
	电感性	0.71	0.71	1	0.82
$K_b$	电阻性	3.09	1.48	1.23	1.05
	电感性	1.34	1.34	1.11	1.05

(2) 输入功率和一次电流的计算:

$$P_x = P_z / \eta, \quad I_1 = K \frac{P_x}{U_1}$$

式中:  $P_x$ ——输入功率(VA);

$I_1$ ——一次电流(A);

$\eta$ ——变压器效率,见表 3—43;

$U_1$ ——外加电源电压(V);

$K$ ——经验系数,约 1.1~1.2。

表 3—43 变压器效率

变压器容量(VA)	效率 $\eta$	变压器容量(VA)	效率 $\eta$
小于 10	0.6~0.7	100~300	0.85~0.9
10~50	0.7~0.8	300~500	0.9
50~100	0.8~0.85	500~1000	0.9~0.95

(3) 铁芯截面的选择:

$$S = K_0 \sqrt{P}, \quad P = \frac{P_x + P_z}{2}$$

式中:  $S$ ——铁芯截面( $\text{cm}^2$ );

$K_0$ ——经验系数,与硅钢片质量有关,  $B_m$  越大,  $K_0$  取得越小;也可根据功率大小而定,参表 3—44 选取;

$P$ ——容量(VA);

$P_x, P_z$ ——同前。

表 3—44 系数  $K_0$  参考值

$P_D$ (VA)	0~10	10~50	50~500	500~1000	1000 以上
$K_0$	2	2~1.75	1.5~1.4	1.4~1.2	1

(4) 每个绕组匝数的计算

$$W_0 = \frac{10^4}{4.44fB_s S}$$

式中： $W_0$ ——每伏匝数(匝/V)；

$f$ ——电源频率，工频为 50Hz；

$B_s$ ——磁通密度(T)，冷轧硅钢片 D310 取 1.2~1.4T；热轧硅钢片 D41、D42 取 1.0~1.2T，D43 取 1.1~1.2T；一般电机用热轧硅钢片 D21~D22 取 0.5~0.7T；黑铁片取 0.6T；

$S$ ——铁芯截面( $\text{cm}^2$ )。

(5) 导线截面的选择：

$$q = I/j, \quad d = 1.13 \sqrt{\frac{I}{j}}$$

式中： $q$ ——导线截面( $\text{mm}^2$ )；

$d$ ——导线直径(mm)；

$j$ ——电流密度( $\text{A}/\text{mm}^2$ )，一般 100VA 以下连续使用的变压器，取  $2.5\text{A}/\text{mm}^2$ ，100VA 以上的取  $2\text{A}/\text{mm}^2$ ，变压器短时工作的取  $4\sim 5\text{A}/\text{mm}^2$ 。

(6) 核算铁芯窗口是否能容纳所有绕组：

① 绕组每层可绕的匝数：

$$n_i = \frac{0.9[h - (2\sim 4)]}{d'}$$

式中： $n_i$ ——绕组每层可绕的匝数(匝)；

0.9——考虑绕组框架两端各空出约5%的空间；

$h$ ——铁心窗高(mm)；

$d'$ ——包括绝缘厚的导线外径(mm)。

②每组绕组需绕的层数

$$m_i = W/n_i$$

式中： $m_i$ ——每组绕组需绕的层数(层)；

$W$ ——绕组匝数。

③一次绕组厚度

$$B_1 = m_1(d' + \delta) + r$$

式中： $B_1$ ——一次绕组的厚度(mm)；

$m_1$ ——一次绕组的层数；

$\delta$ ——层间绝缘厚度(mm)，一般用牛皮纸， $\delta = 0.05\text{mm}$ ，若线径较细，可用透明纸， $\delta = 0.015 \sim 0.02\text{mm}$ ，若线径较粗，也可用青壳纸， $\delta = 0.12\text{mm}$ ；

$r$ ——绕组间绝缘的厚度(mm)，当电压不超过500V时，可用2~3层牛皮纸或0.12mm青壳纸。

变压器常用绝缘材料，见表3—45。

同样可求出套在一次绕组外面的各个二次绕组的厚度  $B_2$ 、 $B_3 \dots$ 。

④所有绕组的总厚度

$$B_z = k(B_0 + B_1 + B_2 + \dots)$$

式中： $B_z$ ——所有绕组的总厚度(mm)；

$k$ ——尺寸裕量，取1.1~1.2；

$B_0$ ——绕组框架的厚度(mm)。



表 3—45 变压器常用绝缘材料

品名	颜色	常用规格		特点	用途	备注
		厚度 (mm)	耐压强度 (V)			
电话纸	白色	0.04 0.05	400	坚实、不易 破裂	线径小于 0.4mm 的漆包线的层间绝 缘垫纸	代用品:相 应厚度的打 字纸,描图纸 或胶版纸
电缆纸	土黄色	0.08 0.12	300 ~400 800	柔顺、耐拉 力强	线径大于 0.5mm 的漆包线的层间绝 缘垫纸,低压绕组间 的绝缘(2~3层)	代用品:牛 皮纸
青壳纸	青褐色	0.25	1500	坚实、耐磨	线包外层绝缘(2 ~3层)	
电容器 纸	白色 黄色	0.03	475	薄、密度高	线径小于 0.4mm 的漆包线层间绝缘	
聚脂 薄膜	透明	0.04 0.05 0.10	3000 4000 9000	耐温 140°C	层间绝缘	
玻璃布	黄色	0.15 0.17	2000 ~ 3000	耐温好	绕组间绝缘	
聚四氟乙 烯薄膜	透明	0.03	6000	耐温 280°C, 耐 酸碱	层间绝缘	
压制板	土黄色	1.0 1.5		坚实、易弯 曲	线包骨架	又称弹性 纸
黄蜡布	糖浆色	0.14 0.17	2500	光滑、耐压 高	高压绕组间绝缘	系凡立水 浸渍的棉制 品
黄蜡绸	糖浆色	0.08	4000	细薄、少针 孔	高压绕组的层间 绝缘,高压绕组间绝 缘(2~3层)	系凡立水 浸渍的丝织 品

(续表)

品名	颜色	常用规格		特点	用途	备注
		厚度 (mm)	耐压 强度 (V)			
高频漆				粘料	粘合绝缘纸、压制板、黄蜡布、黄蜡绸等	系无水酒精和酚醛树脂溶合泡制代用品：洋干漆
青喷漆	透明			粘料	粘合绝缘纸、压制板、黄蜡布、黄蜡绸等	又名罩光漆，蜡克

如果计算得到的绕组厚度  $B$  小于铁芯窗口宽度  $c$  的话，即符合设计要求。否则应加大铁芯迭厚，以减小绕组匝数〔一般迭厚  $b' = (1 \sim 2)a$  较合适〕或重选硅钢片尺寸等办法使之达到要求。

(7) 小型变压器铁芯尺寸规格(图 3—30 和表 3—46 ~ 表 3—48)：为了简化计算，列出了 1kVA 以下部分容量的变压器铁芯及每伏匝数等技术数据，可直接从表 3—49 中查得。

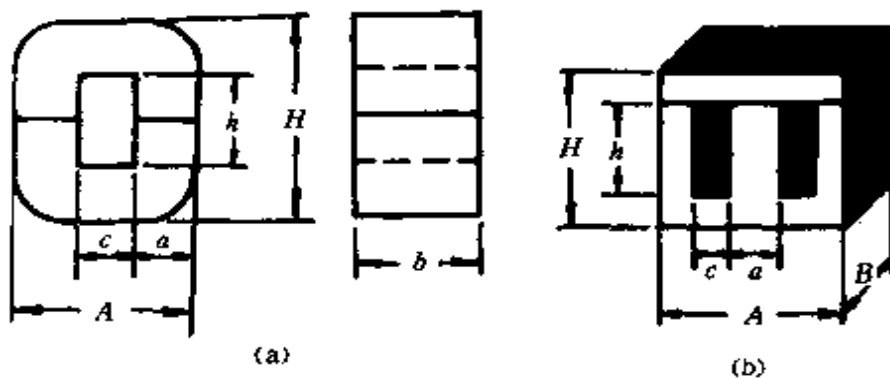


图 3—30 小型变压器铁芯尺寸规格  
(a)XCD 型变压器 (b)GE、XE 型变压器

表 3—46 XCD 型变压器铁芯尺寸

铁芯型号	尺寸 (mm)						参考数据		
	a	b	c	h (不小于)	H	A	平均磁路长度 l (cm)	中间铁芯柱净截面 S (cm <sup>2</sup> )	铁芯重量 (kg)
XCD10×20×20				20	40		9.47		0.129
	10	20	12.5	25	45	32.5	10.5	1.78	0.143
				32	52		11.9		0.162
				40	60		13.5		0.183
XCD12.5×25×25				25	50		11.9		0.261
	12.5	25	16	32	57	41	13.3	2.88	0.292
				40	65		14.9		0.327
				50	75		16.9		0.371
XCD16×32×32				32	64		14.4		0.518
	16	32	16	40	72	48	16.0	4.71	0.575
				50	82		18.0		0.647
				64	96		20.8		0.748

(续表)

铁芯型号	尺寸 (mm)						参考数据			铁芯重量 (kg)
	a	b	c	h (不小于)	H	A	平均磁路长度 l (cm)	中间铁芯柱净截面 S (cm <sup>2</sup> )		
XCD20×40×40				40	80		18.0			1.01
	20	40	20	50	90	60	20.0	7.36		1.13
				64	104		22.8			1.28
				80	120		26.0			1.47
XCD25×50×50				50	100		22.6			1.99
	25	50	25	64	114	75	25.4	11.5		2.23
				80	130		28.6			2.52
				100	150		32.6			2.87
XCD32×64×64				64	128		29.0			4.18
	32	64	32	80	144	96	32.2	18.8		4.64
				100	164		36.2			5.22
				125	189		41.2			5.94

注: S = K<sub>a</sub>ab; 其中 K<sub>a</sub> 为迭片系数, 一般取 0.89~0.82。

GE型变压器铁芯尺寸

表 3—47

铁芯尺寸 $a \times B$	尺 寸 (mm)							参 考 数 据		
	$a$	$c$	$A$	$H$	$h$	标准化 迭 厚 $B$	磁路平 均长度 $l$ (cm)	中间舌片 净截面 $S$ ( $\text{cm}^2$ )	铁芯净 重 $G_c$ (kg)	
								铁芯片厚度 0.35mm		
10×12.5						12.5		1.14	0.0756	
10×15	10	6.5	36	31	18	15	5.76	1.37	0.0908	
10×17.5						17.5		1.59	0.106	
10×20						20		1.82	0.121	
12×15						15		1.64	0.136	
12×18	12	8	44	38	22	18	6.94	1.97	0.163	
12×21						21		2.28	0.190	
12×24						24		2.62	0.217	
14×18						18		2.29	0.211	
14×21	14	9	50	43	25	21	8.04	2.68	0.246	
14×24						24		3.06	0.281	
14×28						28		3.57	0.327	

(续表)

铁芯尺寸 $a \times B$	尺寸(mm)							参考数据		
	$a$	$c$	$A$	$H$	$h$	标准化 迭厚 $B$	磁路平 均长度 $l$ (cm)	中间舌片 净截面 $S$ (cm <sup>2</sup> )	铁芯净 重 $G_c$ (kg)	
								铁芯片厚度 0.35mm		
16×20						20		2.91	0.293	
16×24	16	10	56	48	28	24	9.15	3.49	0.364	
16×28						28		4.08	0.424	
16×32						32		4.66	0.485	
19×24						24		4.15	0.496	
19×28	19	12	67	57.5	33.5	28	10.9	4.84	0.576	
19×32						32		5.53	0.660	
19×38						38		6.57	0.783	
22×28						28		5.62	0.781	
22×33	22	14	78	67	39	33	12.6	6.61	0.920	
22×38						38		7.61	1.06	
22×44						44		8.81	1.23	

(续表)

铁芯尺寸 $a \times B$	尺寸(mm)							参考数据		
	$a$	$c$	$A$	$H$	$h$	标准 迭厚 $B$	磁路平 均长度 $l$ (cm)	中间舌片 净截面 $S$ (cm <sup>2</sup> )	铁芯净 重 $G_c$ (kg)	
								铁芯片厚度 0.35mm		
26×32						32		7.57	1.31	
26×39	26	17	94	81	47	39	15.0	9.23	1.60	
26×45						45		10.7	1.83	
26×52						52		12.3	2.12	
30×38						38		10.4	1.96	
30×45	30	19	106	91	53	45	17.2	12.3	2.32	
30×52						52		14.2	2.68	
30×60						60		16.4	3.09	
35×44						44		14.0	3.12	
35×52	35	22	123	105.5	61.5	52	20.0	16.6	3.65	
35×60						60		19.1	4.22	
35×70						70		22.3	4.92	
40×50						50		18.2	4.84	
40×60	40	26	144	124	72	60	23.0	21.8	5.80	
40×70						70		25.5	6.78	
40×80						80		29.1	7.75	

注:  $S = K_d a B$ , 其中  $K_d$  为迭片系数, 一般取 0.91。

表 3—48 XE 型变压器铁芯尺寸

铁 芯 尺 寸	尺 寸 (mm)						参 考 数 据				
	$a$	$c$	$A$	$H$	$h$	标准化 迭厚 $B$	磁路平 均长度 $l$ (cm)	中间舌片净截面 $S$ (cm <sup>2</sup> )	铁芯净重 $G_2$ (g)		
			厚 度		Ni46 合金片厚度						
$a \times B$								0.1mm	0.2mm	0.1mm	0.2mm
3×4	3	3.5	13	10.5	7.5	4	2.67	0.096	0.109	2.20	2.50
3×6.3						6.3		0.151	0.172	3.47	3.94
4×4						4		0.128	0.146	4.00	4.55
4×5	4	5	18	14	10	5	3.63	0.160	0.182	5.00	5.68
4×6.3						6.3		0.202	0.230	6.30	7.16
4×8						8		0.256	0.291	8.00	9.10
5×5						5		0.200	0.228	7.75	8.75
5×6.3	5	6	22	17.5	12.5	6.3	4.49	0.252	0.287	9.70	11.1
5×8						8		0.320	0.364	12.4	14.1
5×10						10		0.400	0.455	15.5	17.5



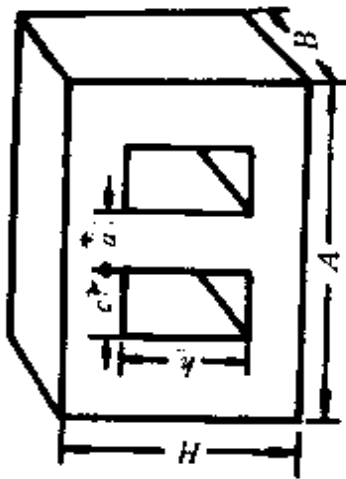
(续表)

铁芯尺寸	尺寸 (mm)						参考数据				
	$a$	$c$	$A$	$H$	$h$	标准化选厚 $B$	磁路平均长度 $l$ (cm)	中间舌片净截面 $S$ (cm <sup>2</sup> )		铁芯净重 $G_i$ (g)	
								厚度		Ni46合金片厚度	
								0.1mm	0.2mm	0.1mm	0.2mm
$6 \times 6.3$					6.3		0.301	0.342	13.8	15.7	
$6 \times 8$					8	5.34	0.384	0.437	17.7	20.1	
$6 \times 10$	6	7	26	21	10		0.480	0.546	22.1	25.1	
$6 \times 12.5$					12.5		0.601	0.683	27.6	31.4	
$8 \times 8$					8		0.501	0.580	31.0	35.2	
$8 \times 10$					10		0.640	0.728	38.8	44.0	
$8 \times 12.5$	8	9	34	28	20	7.06	0.800	0.910	46.5	55.0	
$8 \times 16$					16		1.02	1.16	62.0	70.5	

注:  $S = K_d a B$ ; 其中  $K_d$  为选片系数, 一般取 0.80~0.91。

表 3—49

1kVA 以下的变压器数据



容量 (VA)	一次电压 $U_1=220V$			铁芯截 面积 $S$ ( $cm^2$ )	每伏需绕匝数(匝/V)			参考铁芯尺寸(mm)					
	电流 (A)	裸导线直径(mm)			磁通密度 $B_m$		中心柱宽 $\times$ 迭厚 $a \times B$ (mm)	A	H	c	h		
		$j=2$ (A/ $mm^2$ )	$j=2.5$ (A/ $mm^2$ )		$j=3$ (A/ $mm^2$ )	7T						8.5T	10T
3	0.0136	0.09	0.08	0.08	2.18	31	25	22	12×21	44	38	8	22
4	0.0182	0.11	0.09	0.09	2.47	27	22	19	12×24	44	38	8	22
5	0.0227	0.12	0.11	0.10	2.8	24	20	17	14×22	50	43	9	25
6	0.0273	0.13	0.12	0.108	3.05	22	18	15.5	16×22	56	48	10	28
8	0.0365	0.15	0.136	0.125	3.55	18.5	15.5	13	16×24	56	48	10	28

(续表)

容量 (VA)	一次电压 $U_1=220V$			铁芯截 面积 $S$ ( $cm^2$ )	每伏需绕匝数(匝/V)			参考铁芯尺寸(mm)					
	电流 (A)	裸导线直径(mm)			磁通密度 $B_m$		中心柱宽×迭厚 $a \times B$ (mm)	A	H	c	h		
		$j=2$ (A/ $mm^2$ )	$j=2.5$ (A/ $mm^2$ )		$j=3$ (A/ $mm^2$ )	7T						8.5T	10T
10	0.0454	0.17	0.15	0.14	3.95	17	14	12	16×28	56	48	10	28
12	0.0546	0.19	0.17	0.15	4.35	15	12.7	11	19×26	67	57.5	12	33.5
15	0.0682	0.21	0.18	0.17	4.85	14	11.5	9.6	19×35	56	48	10	28
16	0.0728	0.21	0.19	0.18	5	13	11	9.4	19×30	67	57.5	12	33.5
20	0.0910	0.24	0.21	0.2	5.6	12	10	8.4	19×34	67	57.5	12	33.5
22	0.10	0.25	0.23	0.21	5.85		9.3	8	22×30	78	67	14	39
25	0.1135	0.27	0.24	0.22	6.15	11.3	8.7	7.4	19×37	67	57.5	12	33.5
30	0.1365	0.29	0.26	0.24	6.85	10.5	8	6.8	22×36	78	67	14	39
33	0.15	0.31	0.27	0.25	7.15	9.5	7.6	6.5	19×43	67	57.5	12	33.5
38	0.1725	0.33	0.30	0.27	7.65	8.6	7	6.0	22×40	78	67	14	39
40	0.181	0.34	0.30	0.28	7.8	8.4	6.9	5.9	22×41	78	67	14	39
42	0.191	0.35	0.31	0.28	8	8.2	6.7	5.7	26×35	95	81	17	47

(续表)

容量 (VA)	一次电压 $U_1=220V$			铁芯截 面积 $S$ ( $cm^2$ )	每伏需绕匝数(匝/V)			参考铁芯尺寸(mm)				
	电流 (A)	裸导线直径(mm)			磁通密度 $B_m$		中心柱宽×迭厚 $a \times B$ (mm)	A	H	c	h	
		$j=2$ (A/ $mm^2$ )	$j=2.5$ (A/ $mm^2$ )		$j=3$ (A/ $mm^2$ )	7T						8.5T
45	0.204	0.36	0.32	0.29	8.3	7.8	6.5	5.5	78	67	14	39
50	0.227	0.38	0.34	0.31	8.8	7.4	6.2	5.2	78	67	14	39
55	0.25	0.40	0.36	0.33	9.25	7	5.9	5	94	81	17	47
60	0.273	0.41	0.38	0.35	9.65	6.7	5.6	4.7	94	81	16	47
70	0.318	0.45	0.40	0.36	10.3	6.3	5.2	4.4	106	91	19	53
76	0.345	0.47	0.42	0.38	10.8	6	5	4.2	94	81	17	47
90	0.409	0.51	0.46	0.41	11.8	5.5	4.5	3.8	106	91	19	53
100	0.454	0.53	0.48	0.44	12.4	5.3	4.4	3.7	106	91	19	53
120	0.546	0.59	0.53	0.48	13.6	4.8	3.9	3.4	106	91	19	53
140	0.636	0.63	0.57	0.52	14.7	4.5	3.7	3.1	123	105.5	22	61.5
160	0.728	0.68	0.61	0.56	15.5	4.1	3.4	2.9	123	105.5	22	61.5
185	0.841	0.73	0.66	0.60	16.7	3.8	3.2	2.7	123	105.5	22	61.5
200	0.91	0.76	0.68	0.62	17.7	3.7	3.1	2.6	123	105.5	22	61.5
230	1.045	0.83	0.73	0.67	19	3.4	2.9	2.4	144	124	26	72
250	1.135	0.86	0.77	0.69	19.7	3.3	2.75	2.3	144	124	26	72
280	1.273	0.90	0.8	0.73	20.8	3.1	2.6	2.2	144	124	26	72

(续表)

容量 (VA)	一次电压 $U_1=220V$			铁芯截 面积 $S$ ( $cm^2$ )	每伏需绕匝数(匝/V)			参考铁芯尺寸(mm)					
	电流 (A)	裸导线直径(mm)			磁通密度 $B_m$		中心柱宽×选厚 $a \times B$ (mm)	$A$	$H$	$c$	$h$		
		$j=2$ (A/mm <sup>2</sup> )	$j=2.5$ (A/mm <sup>2</sup> )		$j=3$ (A/mm <sup>2</sup> )	7T						8.5T	10T
320	1.454	0.96	0.86	0.8	22.3	2.9	2.4	2.1	40×64	144	124	26	72
380	1.725	1.04	0.94	0.86	24.5	2.7	2.2	1.9	45×63	161	138.5	29	80.5
420	1.91	1.10	0.98	0.90	25.5	2.6	2.1	1.8	40×73	144	124	26	72
450	2.045	1.14	1.02	0.93	26.5	2.5	2.05	1.75	45×68	161	138.5	29	80.5
518	2.35	1.23	1.10	1.00	28.5	2.30	1.90	1.6	45×73	161	138.5	29	80.5
575	2.61	1.29	1.16	1.04	29.8	2.2	1.8	1.55	45×76	161	138.5	29	80.5
600	2.72	1.33	1.18	1.08	30.5	2.15	1.75	1.5	50×70	178	153	32	89
700	3.18	1.43	1.30	1.16	32.8	2.0	1.63	1.4	50×75	178	153	32	89
781	3.55	1.50	1.35	1.22	34.5	1.85	1.55	1.3	50×79	178	153	32	89
1020	4.63	1.72	1.35	1.40	39.5	1.6	1.35	1.15	50×91	178	153	32	89

**例 3—9** 设计一只输出容量为 120VA 的电源变压器,已知电源电压为 220V,二次电压为 36V。

**解**

(1) 设变压器效率为  $\eta=0.9$ , 则变压器输入视在功率为  
 $P_r = P_z / \eta = 120 / 0.9 = 133.3(\text{VA})$

(2)  $K$  取 1.1, 则一次电流为

$$I_1 = K \frac{P_r}{U_1} = 1.1 \frac{133.3}{220} = 0.667(\text{A})$$

二次电流为

$$I_2 = P_z / U_2 = 120 / 36 = 3.33(\text{A})$$

(3)  $K_0$  取 1.2, 铁芯截面为

$$P = \frac{P_r + P_z}{2} = \frac{133.3 + 120}{2} = 126.6(\text{VA})$$

$$S = K_0 \sqrt{P} = 1.4 \sqrt{126.6} = 15.8(\text{cm}^2)$$

查表 3—47, 选用  $a=30\text{mm}$  的 GE 型硅钢片。这时铁芯迭厚为

$$B = 1.1 \frac{S}{a} = 1.1 \times \frac{158}{30} = 5.79\text{cm} = 57.9(\text{mm}), \text{取 } B =$$

58mm

校验:  $B/a = 58/30 = 1.93$ , 该比值在 1~2 之间, 所以是合适的。

(4) 每个绕组应绕的匝数(设  $B_z = 0.9\text{T}$ ):

$$\textcircled{1} \text{ 每伏匝数: } W_0 = \frac{10^4}{4.44fB_zS} = \frac{10^4}{4.44 \times 50 \times 0.9 \times 15.8} \approx 3.2(\text{匝/V})$$

② 一次绕组匝数:

$$W_1 = U_1 W_0 = 220 \times 3.2 \approx 704(\text{匝})$$

② 二次绕组匝数:

$$W_2 = 1.05 U_2 W_0 = 1.05 \times 36 \times 3.2 \approx 121(\text{匝})$$

1.05 是考虑增加 5% 匝数补偿负载压降。

(5) 导线直径的选择:

① 选取电流密度  $j = 3 \text{ A/mm}^2$ , 则一次绕组导线直径为

$$d_1 = 1.13 \sqrt{\frac{I_1}{j}} = 1.13 \sqrt{\frac{0.667}{3}} \approx 0.53 (\text{mm})$$

查标称导线, 选取相近导线线径  $d_1 = 0.59 \text{ mm}$  的 Q 型漆包线, 包括绝缘后的导线外径为  $d'_1 = 0.64 \text{ mm}$ 。

② 二次绕组导线直径为

$$d_2 = 1.13 \sqrt{\frac{I_2}{j}} = 1.13 \sqrt{\frac{3.33}{3}} = 1.19 (\text{mm})$$

查标称导线, 选取  $d_2 = 1.20 \text{ mm}$  的 Q 型漆包线,  $d'_2 = 1.28 \text{ mm}$ 。

(6) 核算铁芯窗口是否能容纳所有绕组; 变压器铁芯及绕组排列如图 3—31 所示。

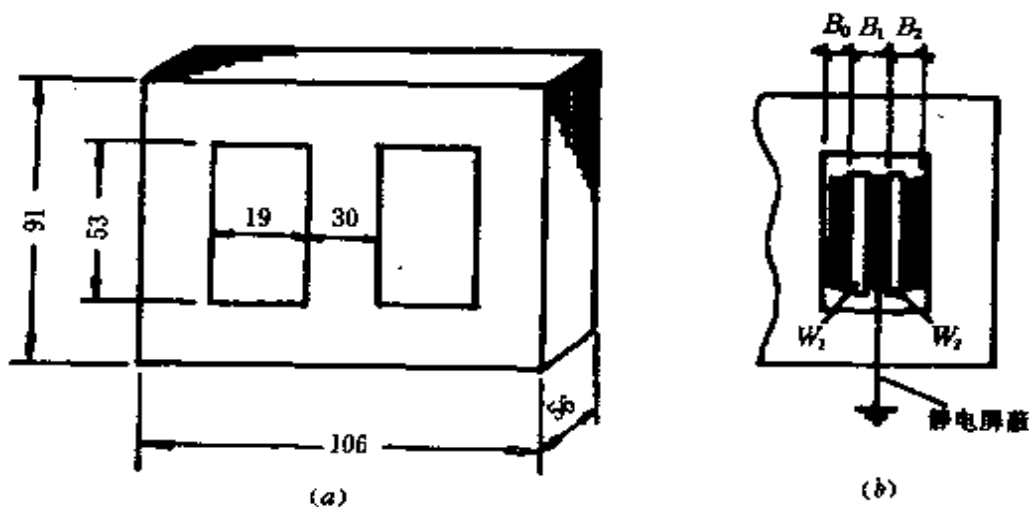


图 3—31 变压器铁芯及绕组排列图

(a) 铁芯尺寸 (b) 绕组排列

① 各绕组每层绕制匝数为

$$n_1 = \frac{0.9[h - (2 - 4)]}{d'_1} = \frac{0.9 \times (53 - 4)}{0.64} = 68.9 (\text{匝}), \text{取 } 68 \text{ 匝}$$

$$n_2 = \frac{0.9 \times (53 - 4)}{1.28} = 34.5 (\text{匝}), \text{取 } 34 \text{ 匝}$$

②各绕组所绕的层数为

$$m_1 = W_1/n_1 = 704/68 = 10.4 \text{ (层)}, \text{取 } 11 \text{ 层};$$

$$m_2 = W_2/n_2 = 121/34 = 3.6 \text{ (层)}, \text{取 } 4 \text{ 层}。$$

③各绝缘衬垫厚度如下:

框架及外包共厚  $B_0 = 1.3\text{mm}$ ;

一次绕组层间绝缘  $\delta_1 = 0.05\text{mm}$ ;

二次绕组层间绝缘  $\delta_2 = 0.07\text{mm}$ ;

绕组间绝缘  $\gamma = 0.12\text{mm}$ 。

④总厚度为

$$B_z = k(B_0 + B_1 + B_2)$$

$$= k\{B_0 + [m_1(d'_1 + \delta_1) + v] + [m_2(d'_2 + \delta_2) + v]\}$$

$$= 1.2 \times [1.3 + 11 \times (0.64 + 0.05) + 0.12$$

$$+ 4 \times (1.28 + 0.07) + 0.12] = 17.4 \text{ (mm)}$$

此尺寸小于窗口宽度  $19\text{mm}$ , 因此窗口能容纳下所有绕组。

## 2. 小型变压器骨架的制作

(1)纸芯无框骨架的制作:纸芯无框骨架适用于  $1\text{kVA}$  以下的变压器。所用弹性纸的厚度  $t$ , 见表 3—50。

表 3—50 制作骨架的弹性纸厚度  $t$

变压器容量(VA)	30	50	300 以下	300~1000
弹性纸厚度 $t$ (mm)	0.5	0.8	1.0	1.0~1.5

通常,无框骨架的长度  $h'$  比铁芯窗高  $h$  短  $2\text{mm}$  左右,弹性纸的长度为

$$L = 2(b' + t) + a' + 2(a' + t) = 2b' + 3a' + 4t$$

纸质无框骨架,如图 3—32 所示。



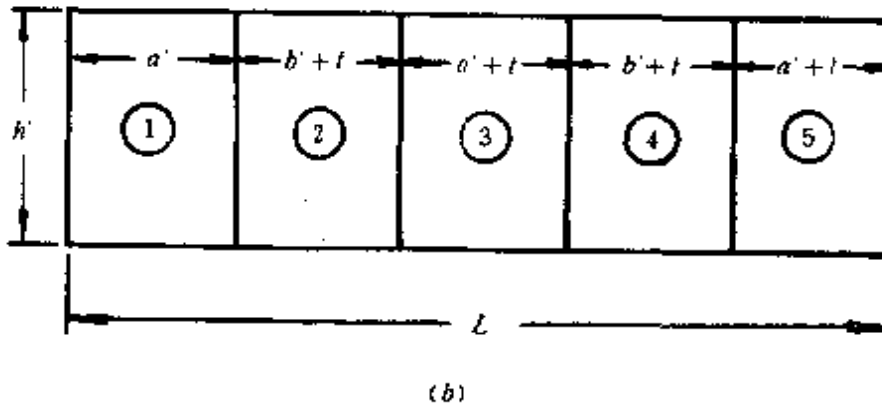
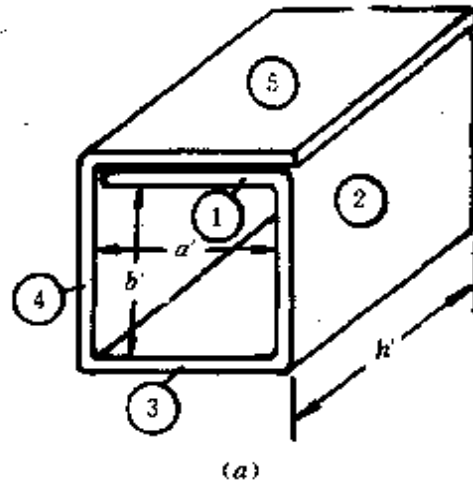


图 3—32 纸质无框骨架  
(a)粘迭后骨架 (b)弹性纸尺寸

对于容量为 1~5kVA 或绝缘性能要求较高的变压器,可采用有框骨架。

(2)整体式骨架的制作:如图 3—33 所示。

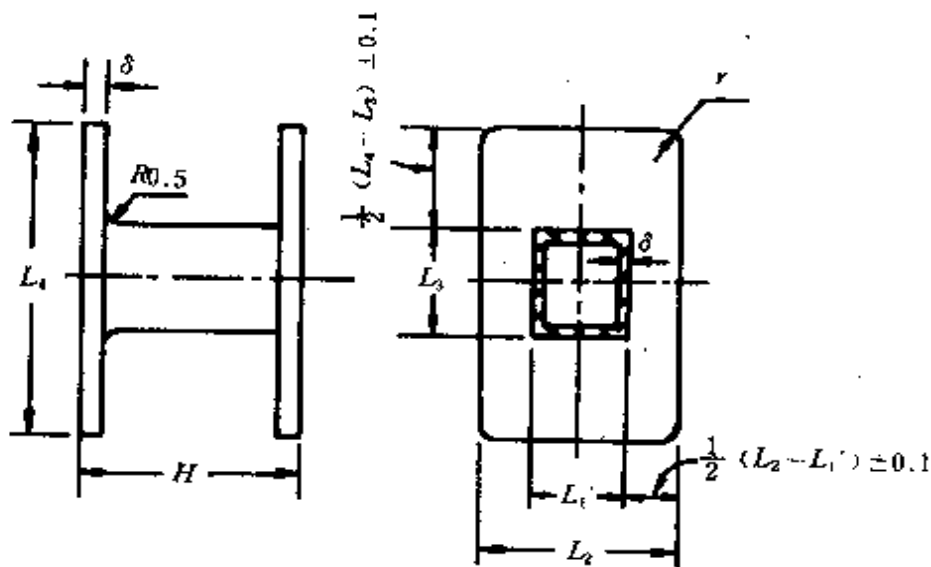


图 3—33 整体式骨架

$$L'_1 = a + 2\delta + 0.2, \quad L_2 = a + 2L_1 - 0.2$$

$$L_3 = B + 2\delta, \quad L_4 = L_3 + (L_2 - L'_1) + A$$

$$H = h - A_1$$

式中： $a$ 、 $L_1$ 、 $B$ ——铁芯尺寸(mm)；

$\delta$ ——骨架壁厚(mm)；

0.2——装配间隙留量(mm)；

$A$ ——经验数据(mm)，与引出线头数及其粗细有关：对铁芯片  $E_2$ 、 $E_{2.5}$ ，取 2； $E_3$ 、 $E_4$  取 3； $E_5$ 、 $E_6$  取 4； $E_8$  取 5；

$A_1$ ——装配间隙余量经验数据(mm)，对铁芯片  $E_2$ 、 $E_3$ ，取 0.25；其余铁芯片取 0.2；

$h$ ——铁芯中柱高度。

整体式骨架尺寸，见表 3—51。

表 3—51 整体式骨架尺寸

铁芯型号	尺寸 $a \times B$	$L'_1$	$L_2$	$L_3$	$L_4$	$H$		$\gamma$	$\delta$	
						E 型	XE 型			
E <sub>2</sub>	2×1.5	2.8	6.8	3.5	9	6		10		
	2×4			5	10.6					
E <sub>2.5</sub>	2.5×3.2	3.3	8.3	4.2	10.8	7.3		10		
	2.5×5			6	12.6					
E <sub>3</sub>	3×4	3.8	9.8	5	13.6	8.5	7.3			
	XE <sub>3</sub>			3×6.3	7.3					16
E <sub>4</sub>	4×4	5.2	13.8	5	16.6	12.3	9.8	0.5		
	4×5			6	17.6					
	XE <sub>4</sub>			4×6.3	7.3					19
				4×8	9					20.6
E <sub>5</sub>	5×5	6.2	16.8	6	20.6	14.8	12.3	1.5		
	5×6.5			7.3	22					
	XE <sub>5</sub>			5×8	9					23.6
				5×10	11					25.6
E <sub>6</sub>	6×6.3	7.2	19.8	7.3	24	17.3	14.3			
	6×8			9	25.6					
	XE <sub>6</sub>			6×10	11					27.6
				6×1.25	13.5					30
E <sub>8</sub>	8×8	9.6	25.8	9.4	30.6	22.3	19.3	2	0.8	
	8×10			11.4	32.6					
	XE <sub>8</sub>			8×12.5	13.9					35
				8×16	17.4					38.6

(3)组合式骨架的制作:如图 3—34 所示。

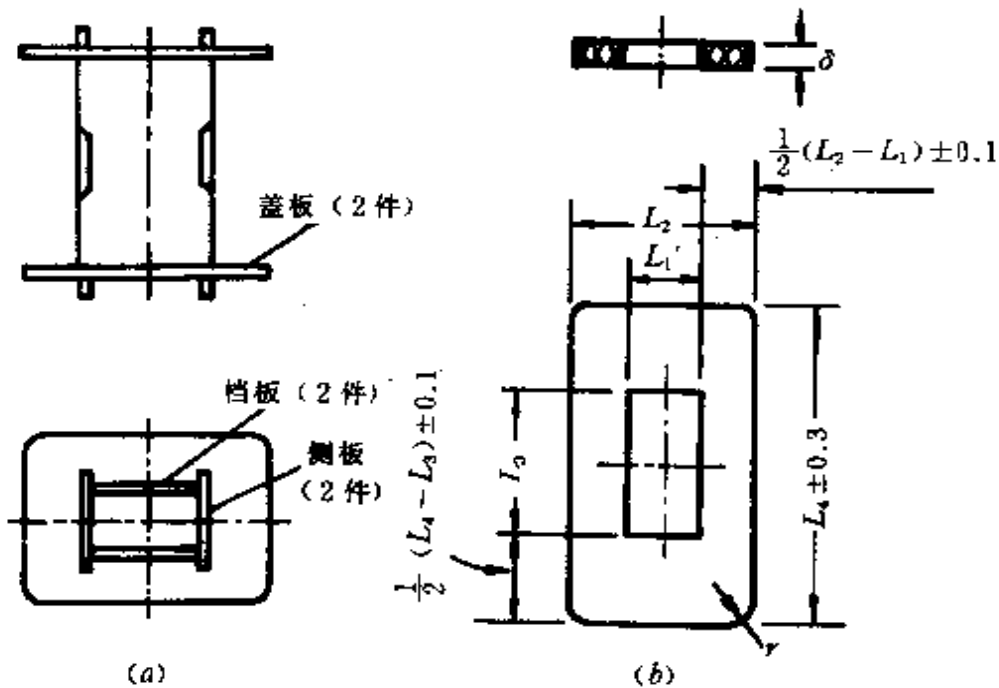


图 3—34 组合式骨架

(a)骨架结构 (b)盖板尺寸

$$L'_1 = a + 2\delta + 0.2, \quad L_2 = a + 2L_1 - 0.2$$

$$L_3 = B - 2\delta, \quad L_4 = L_3 + (L_2 - L_1) + A$$

式中符号意义同前。

组合式骨架尺寸,见表 3—52。

表 3—52 组合式骨架尺寸

铁芯尺寸 $a \times B$	$L'_1$	$L_2$	$L_3$	$L_4$	$\gamma$	$\delta$
2×2.5	2.8	6.8	3.1	9	1.0	0.3
2×4			4.6	10.6		
2.5×3.2	3.3	8.3	3.8	10.8		
2.5×5			5.6	12.6		
3×4	3.8	9.8	4.6	13.6		
3×6.3			6.9	16		
4×4	5.2	13.8	5	16.6	1.5	0.5
4×5			6	17.6		
4×6.3			7.3	19		
4×8			9	20.6		
5×6.3	6.2	16.8	7.3	22		
5×8			9	23.6		
5×5			6	20.6		
5×10			11	25.6		
6×6.3	7.2	19.8	7.3	24		
6×8			9	25.6		
6×10			11	27.6		
6×12.5			13.5	30		
8×8	9.6	25.8	9.4	30.6		
8×10			11.4	32.6		
8×12.5			13.9	35		
8×16			17.4	38.6		

变压器骨架用档板尺寸,如图 3—35 所示。

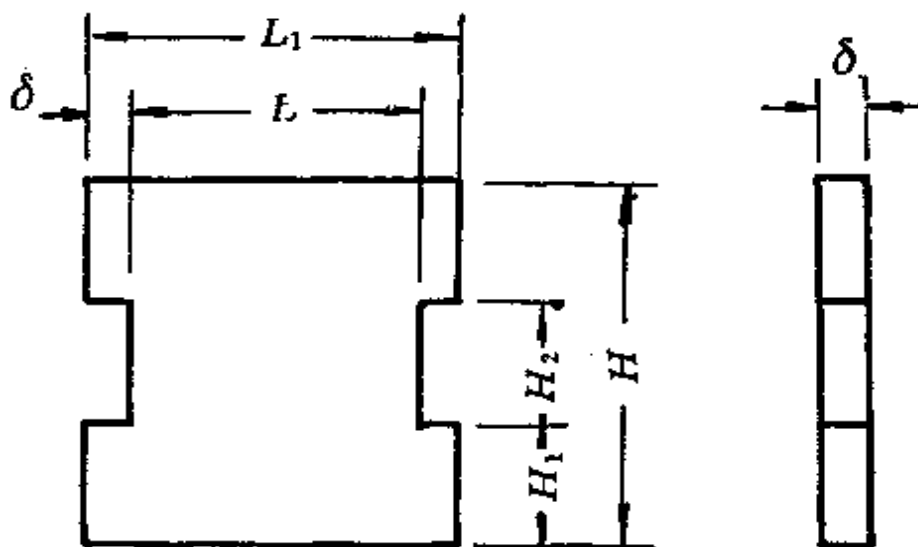


图 3—35 档板尺寸

$$L_1 = B, L = L_1 + 2\delta, H = h - A, H_1 = H_2$$

式中： $\delta$ ——档板厚度(mm)；

$A$ ——装配间隙余量(mm)，对于  $E_2$ 、 $E_3$  铁芯， $A = 0.25$ ；

其余铁芯， $A = 0.2$ ；

$B$ ——铁芯选厚(mm)；

$h$ ——铁芯中柱高度(mm)；

其它符号见图 3—35。

变压器骨架用档板尺寸,见表 3—53。

变压器骨架用侧板尺寸,如图 3—36 所示。

表 3—53 变压器骨架用档板尺寸

铁芯型号	铁芯尺寸 $a \times B$	$L$	$L_1$	$H$	$H_1$	$H_2$	$\delta$
$E_2$	$2 \times 2.5$	2.5	3.1	6	2	2	0.3
	$2 \times 4$	4	4.6				
$E_{2.5}$	$2.5 \times 3.2$	3.2	3.8	7.3	2.5	2.3	
	$2.5 \times 5$	5	5.6				
$E_3$	$3 \times 4$	4	4.6	8.5	3	2.5	
	$3 \times 6.3$	6.3	6.9				
$E_4$	$4 \times 4$	4	5	12.3	4	4.3	
	$4 \times 5$	5	6				
	$4 \times 6.3$	6.3	7.3				
	$4 \times 8$	8	9				
$E_5$	$5 \times 5$	5	6	14.5	5	4.8	
	$5 \times 6.3$	6.3	7.3				
	$5 \times 8$	8	9				
	$5 \times 10$	10	11				
$E_6$	$6 \times 6.3$	6.3	7.3	17.3	6	5.3	
	$6 \times 8$	8	9				
	$6 \times 10$	10	11				
	$6 \times 12.5$	12.5	13.5				

(续表)

铁芯型号	铁芯尺寸 $a \times B$	$L$	$L_1$	$H$	$H_1$	$H_2$	$\delta$
$E_8$	8×8	8	9.4	22.3	7.5	7.3	0.7
	8×10	10	10.4				
	8×12.5	12.5	13.9				
	8×16	16	17.4				
$XE_3$	3×4	4	4.6	7.3	2.5	2.3	0.3
	3×6.3	6.3	6.9				
$XE_4$	4×4	4	5	9.8	3.4	3	
	4×5	5	6				
	4×6.3	6.3	7.3				
	4×8	8	9				
$XE_5$	5×5	5	6	12.3	4	4.3	0.5
	5×6.3	6.3	7.3				
	5×8	8	9				
	5×10	10	11				
$XE_6$	6×6.3	6.3	7.3	14.8	5	4.8	
	6×8	8	9				
	6×10	10	11				
	6×12.5	12.5	13.5				
$XE_8$	8×8	8	9.4	19.8	6.5	6.8	0.7
	8×10	10	10.4				
	8×12.5	12.5	13.9				
	8×16	16	17.4				



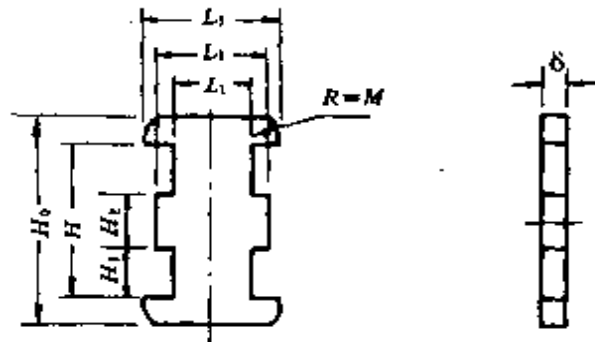


图 3-36 变压器骨架用侧板

$$L_1 = a + 0.2, \quad L_2 = L_1 + 2\delta$$

$$L_3 = L_2 + A, \quad H_0 = H + 2M$$

式中： $a$ ——铁芯中柱宽度(mm)；

$\delta$ ——侧板厚度(mm)；

$A$ ——经验数据，对  $E_2$ 、 $E_{2.5}$  铁芯， $A=2$ ； $E_3$ 、 $E_4$ ， $A=3$ ； $E_5$ 、 $E_6$ ， $A=24$ ； $E_8$ ， $A=5$ ；

$M$ ——系数，对  $E_2$ 、 $E_{2.5}$ 、 $E_3$  铁芯， $M=1.2$ ； $E_4$ 、 $E_6$ ， $M=1.5$ ； $E_8$ ， $M=2$ ；

其它符号见图 3-36。

变压器骨架用侧板尺寸，见表 3-54。

表 3-54 变压器骨架用侧板尺寸

铁芯型号	$L_1$	$L_2$	$L_3$	$H$	$H_1$	$H_2$	$H_0$	$M$	$\delta$
$E_2$	2.2	2.8	4.8	6	2	2	8.4	1.2	0.3
$E_{2.5}$	2.7	3.3	5.3	7.3	2.5	2.3	9.7		
$E_3$	3.2	3.8	6.8	8.5	3	2.5	10.9		

(续表)

铁芯型号	$L_1$	$L_2$	$L_3$	$H$	$H_1$	$H_2$	$H_0$	$M$	$\delta$
E <sub>4</sub>	4.2	5.2	8.2	12.3	4	4.3	15.3	1.5	0.5
E <sub>5</sub>	5.2	6.2	10.2	14.8	5	4.8	17.8		
E <sub>6</sub>	6.2	7.2	11.2	17.3	6	5.3	20.3		
E <sub>8</sub>	8.2	9.6	14.6	22.3	7.5	7.3	26.3	2	0.7
XE <sub>3</sub>	3.2	3.8	6.8	7.3	2.5	2.3	9.7	1.2	0.3
XE <sub>4</sub>	4.2	5.2	8.2	9.8	3.4	3	12.8	1.5	0.5
XE <sub>5</sub>	5.2	6.2	10.2	12.3	4	4.3	15.3		
XE <sub>6</sub>	6.2	7.2	11.2	14.8	5	4.8	17.8		
XE <sub>8</sub>	8.2	9.6	14.6	19.8	6.5	6.8	23.8	2	0.7

### 3. 自耦变压器的简单设计

(1) 计算容量的确定(见图 3—2): 自耦变压器的计算容量  $P_j$  和额定容量  $P_e$  有如下关系:

$$P_j = KP_e$$

当降压变压器时( $U_1 > U_2$ ), 则  $K = \frac{U_1 - U_2}{U_1}$

当升压变压器时( $U_1 < U_2$ ), 则  $K = \frac{U_2 - U_1}{U_2}$

式中:  $U_1$ 、 $U_2$ ——一次和二次电压(V)。

(2) 铁芯截面的选择: 计算出  $S = 1.5 \sqrt{P_j}$ , 然后查表求得铁芯中柱宽  $a$  及铁芯迭厚  $B$ ; 再根据磁通密度  $B_m$  求出每伏应绕的匝数  $W_0$ , 进而求出一、二次绕组匝数。以上计算均与小型变压器设计的相同。

(3) 电流计算:

$$I_1 = P_e / U_1, \quad I_2 = P_e / U_2$$

$$I = I_2 - I_1 (\text{降压}), \quad I = I_1 - I_2 (\text{升压})$$

式中:  $I_1$ 、 $I_2$ 、 $I$ ——分别为输入、输出和公用绕组中的电流(A)。

(4) 导线截面的选择〔参见图 3—2(a)〕:

$$q_1 = I_1 / j, \quad q_2 = I / j$$

式中:  $j$ ——电流密度(A/mm<sup>2</sup>)。

**例 3—10** 设计一台单相 500VA 自耦变压器, 已知一次电压为 220V, 二次电压为 24V。

**解**

(1) 计算容量的确定:

$$K = \frac{220 - 24}{220} = 0.89$$

$$P_j = KP_e = 0.89 \times 500 = 445 (\text{VA})$$

(2) 铁芯截面的选择:

$$S = 1.5 \sqrt{P_j} = 1.5 \times \sqrt{445} = 31.64 (\text{cm}^2)$$

查表 3—47, 选用  $a = 500\text{mm}$  的 GE 型硅钢片, 这时铁芯送厚为

$$B = 1.1 \frac{S}{a} = 1.1 \times \frac{31.64}{5} = 6.96 (\text{cm})$$

$$= 69.6 (\text{mm}), \text{取 } B = 70\text{mm}.$$

校验:  $B/a = 70/50 = 1.4$ , 该比值在 1~2 之间, 所以是合适的。

(3) 每个绕组应绕匝数

取  $B_2 = 1.0\text{T}$ , 则每伏匝数为

$$W_0 = \frac{10^4}{4.44fB_2S} = \frac{10^4}{4.44 \times 50 \times 1.0 \times 31.64} \\ = 1.42 (\text{匝/V})$$

一次绕组匝数为  $W_1 = U_1 W_0 = 220 \times 1.42 = 312$  (匝)

二次绕组匝数为  $W_2 = U_2 W_0 = 24 \times 1.42 = 34$  (匝)

(4) 电流计算:

$$I_1 = P_e / U_1 = 500 / 220 = 2.27 \text{ (A)},$$

$$I_2 = P_e / U_2 = 500 / 24 = 20.8 \text{ (A)}$$

$$I = I_2 - I_1 = 20.8 - 2.27 = 18.53 \text{ (A)}$$

(5) 导线截面的选择:

取电流密度  $j = 2 \text{ A/mm}^2$ , 则由 0 至 278 匝的导线截面为

$$q_1 = I_1 / j = 2.27 / 2 = 1.14 \text{ (mm}^2\text{)}$$

可选取标称导线直径  $d = 1.20 \text{ mm}$ 。

由 278 匝至 312 匝的导线截面为

$$q_2 = I / j = 18.53 / 2 = 9.27 \text{ (mm}^2\text{)}$$

可选取标称导线直径  $d = 3.53 \text{ mm}$ 。

其它计算与一般单相小型变压器相同。

## 七、电动机起动用自耦变压器的设计

### 1. 铁芯截面的选择

由于电动机起动用自耦变压器为短时工作制, 铁芯材料多采用低碳钢片, 允许空载电流较大 ( $I_0 \leq 0.2 I_e$ )。

三相异步电动机起动用三相自耦变压器铁芯截面可按下列式计算:

$$S = (5.85 \sim 6.9) \sqrt{P_{de}}$$

式中:  $S$ ——铁芯截面 ( $\text{cm}^2$ );

$P_{de}$ ——电动机额定功率 (kW)。

### 2. 绕组匝数计算

$$W = \frac{U_x \times 10^4}{4.44 f B_s S}$$

式中:  $U_x$ ——相电压, 为 220V;

$f$ ——电源频率, 工频为 50Hz;

$B_c$ ——磁通密度(T),可取 1.6~1.8T;

$S$ ——同前。

设每相有二个抽头,它们的电压比分别为  $n_1\%$  和  $n_2\%$  (图 3-37),其中  $n_1\% > n_2\%$ , 则各绕组段的匝数为:

$$W_1 = W(1 - n_1\%)$$

$$W_2 = W(n_1\% - n_2\%)$$

$$W_3 = Wn_2\%$$

3. 各段绕组可能通过的最大电流的计算

(1) 当使用  $n_1\%$  抽头时(即  $W_1$  中)

$$I_1 = 0.8(n_1\%)^2 k I_{de}$$

(2) 当使用  $n_2\%$  抽头时(即  $W_2$  中)

$$I_2 = 0.8(n_2\%)^2 k I_{de}$$

(3) 当使用  $n_2\%$  抽头时(即  $W_3$  中)

$$I_3 = 0.8n_2\% k I_{de} (1 - n_2\%)$$

式中:  $I_1, I_2, I_3$ ——可能流过各绕组段的最大电流(A);

$k$ ——电动机直接起动电流倍数,取  $k=6$ ;

$I_{de}$ ——电动机额定电流(A)。

4. 电流密度的计算

$$j = \sqrt{\frac{C\gamma\tau}{\rho t(1-K_s)}}$$

式中:  $j$ ——电流密度(A/mm<sup>2</sup>);

$C$ ——导线的比热(J/g·°C);

$\gamma$ ——导线的密度(g/cm<sup>3</sup>);

$\tau$ ——绕组的允许温升(°C);

$\rho$ ——导线的电阻率( $\Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$ );

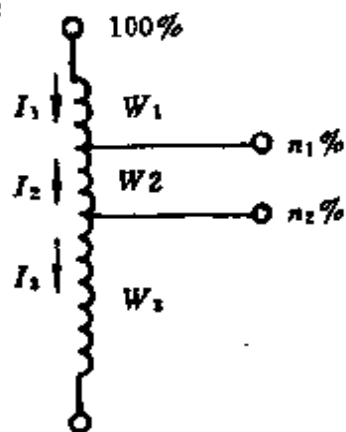


图 3-37 每相二个抽头的示意图  
(图中电流表示可能通过的最大电流)

$t$ ——绕组的通电时间总和(s);

$K_s$ ——散热系数,对于  $t < 10s$ ,取  $K_s = 0$ , $t$  为数秒时,取  $K_s = 0.1 \sim 0.2$ 。

### 5. 导线截面的选择

$$q_1 = \frac{I_1}{j}, q_2 = \frac{I_2}{j}, q_3 = \frac{I_3}{j}$$

式中: $q_1, q_2, q_3$ ——各段绕组( $W_1, W_2, W_3$ )导线截面( $mm^2$ );

其它符号同前。

若选用铝导线,可按下式换算:

$$q_{Al} = 1.56q_{Cu}$$

**例 3-11** 试设计一台供电动机起动用的三相自耦变压器。已知 Y250M-2 电动机的额定功率  $P_{de}$  为 55kW,额定电流  $I_{de}$  为 103A,起动总时间  $t$  为 60s,绕组允许温升  $\tau$  为 125°C。变压器二次抽头: $n_1\% = 80\%$ , $n_2\% = 65\%$ 。

**解:**

(1)铁芯截面的选择:

$$S = (5.85 \sim 6.9) \sqrt{P_{de}} = (5.85 \sim 6.9) \sqrt{55} \\ = 43.4 \sim 51.2 (cm^2) \quad \text{取 } S = 45cm^2$$

(2)绕组匝数的计算:

$$W = \frac{U_x \times 10^4}{4.44fB_s S} = \frac{220 \times 10^4}{4.44 \times 50 \times 1.7 \times 45} = 129.5 (\text{匝})$$

取  $W = 130$  匝

各绕组段的匝数为

$$W_1 = W(1 - n_1\%) = 130 \times (1 - 80\%) = 26 (\text{匝}) \quad \text{取 } 26 \text{ 匝}$$

$$W_2 = W(n_1\% - n_2\%) = 130 \times (80\% - 65\%) = 19.5 (\text{匝})$$

取 20 匝

$$W_3 = Wn_2\% = 130 \times 65\% = 84.5 (\text{匝}) \quad \text{取 } 85 \text{ 匝}$$

(3)各段绕组可能通过的最大电流的计算:

$W_1$  中流过的电流

$$I_1 = 0.8(n_1\%)^2 k I_{de} = 0.8 \times 0.8^2 \times 6 \times 104 = 319.5 (\text{A})$$

$W_2$  中流过的电流

$$I_2 = 0.8(n_2\%)^2 k I_{de} = 0.8 \times 0.65^2 \times 6 \times 104 = 210.9 (\text{A})$$

$W_3$  中流过的电流

$$\begin{aligned} I_3 &= 0.8n_2\% k I_{de} (1 - n_2\%) \\ &= 0.8 \times 0.65 \times 6 \times 104 \times (1 - 0.65) = 113.6 (\text{A}) \end{aligned}$$

(4) 电流密度的计算:

已知铜导线密度  $\gamma = 8.94 \text{g/cm}^3$ ,  $85^\circ\text{C}$  时的导线电阻率  $\rho_{85} = 0.0223 \Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$ , 取  $K_s = 0.15$ , 则

$$\begin{aligned} j &= \sqrt{\frac{C\gamma\tau}{\rho t(1-K_s)}} = \sqrt{\frac{0.39 \times 8.94 \times 125}{0.0223 \times 60 \times (1-0.15)}} \\ &= 19.6 (\text{A/mm}^2) \end{aligned}$$

(5) 各段导线截面的选择

$$W_1 \text{ 绕组 } q_1 = I_1/j = 319.5/19.6 = 16.3 (\text{mm}^2)$$

$$W_2 \text{ 绕组 } q_2 = I_2/j = 210.9/19.6 = 10.8 (\text{mm}^2)$$

$$W_3 \text{ 绕组 } q_3 = I_3/j = 113.6/19.6 = 5.8 (\text{mm}^2)$$

## 八、铁磁谐振稳压器设计

### 1. 电厂、变电所整流装置用稳压器的设计

稳压器的一次绕组  $W_1$  接至电流互感器二次侧, 电容器绕组  $W_C$  接电容器, 二次绕组  $W_2$  与补偿绕组  $W_B$  反极性串联后接入整流器。 $W_2$  与  $W_C$  中的电势随  $W_1$  中电流增加而升高, 达到一定值后因铁芯磁饱和而平稳。 $W_B$  中电势与  $W_1$  中电流成正比, 而  $W_B$  与  $W_2$  反极性串联, 因此, 当系统短路, 电流互感器二次电流有很大变化时,  $W_B$  能有效地抵消  $W_2$  中部分电压, 使直流电压保持稳定。接线如图 3—38 所示。

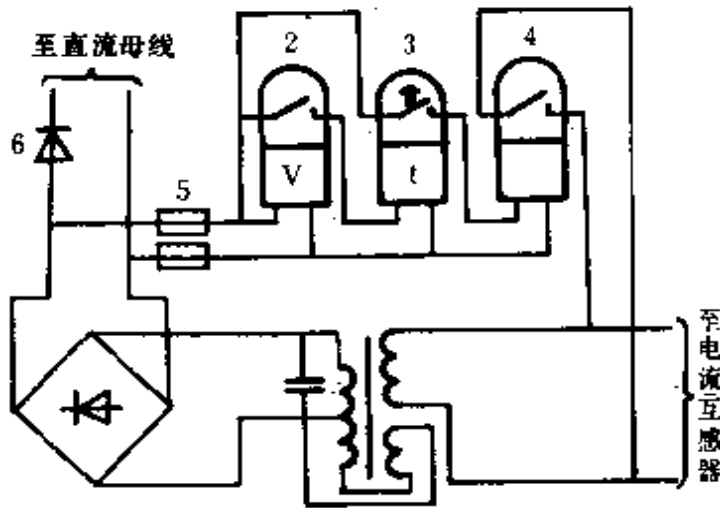


图 3-38 监视电压的消振装置接线图

- 1. 铁磁消振稳压器；
- 2. 电压继电器；
- 3. 时间继电器；
- 4. 中间继电器；
- 5. 熔断器；
- 6. 硅整流器；

(1)铁芯型式的选择:铁芯可采用不等截面和等截面。这两种铁芯的比较见表 3—55。

表 3—55 等截面与不等截面铁芯的比较

序号	不等截面	等截面
1	空载时稳压性能良好	空载时稳压性能较差
2	防止电压由线起翘时所需电容容量小	防止电压曲线起翘时需要较大的电容容量或电容绕组反接
3	抗负载能力弱	抗负载能力强
4	制造较复杂	制造方便
5	适用于电源稳压器	适用于电源稳压器

示意图



表 3—55 中,  $W_1$ 、 $W_B$  为一次绕组和补偿绕组, 装在不饱和铁芯柱上;  $W_2$ 、 $W_C$  为二次绕组和电容器绕组, 装在饱和铁芯柱上。

(2) 铁芯截面的选择:

① 不等截面:

非饱和铁芯柱截面为  $S_1 = 1.1 \sqrt{P}$

式中:  $P$ ——稳压器容量(VA)。

饱和铁芯柱截面  $S_2 = 0.582S_1$

有磁分路铁芯柱截面为  $S_3 = 0.4S_1$

② 等截面:

$S = (0.65 \sim 0.85) \sqrt{P}$

(3) 每个绕组应绕匝数的计算:

① 每匝绕组的电压为

$e_0 = 4.44fB_z S \times 10^{-4}$

式中:  $e_0$ ——每匝绕组的电压(V/匝);

$S$ ——铁芯截面( $\text{cm}^2$ );

$f$ ——电源频率(Hz);

$B_z$ ——磁通密度(T), 一般硅钢片取  $0.8 \sim 1.0\text{T}$ 。

② 一次绕组应绕匝数为

$W_1 = U_1 / e_0$

式中:  $W_1$ ——一次绕组应绕匝数(匝);

$U_1$ ——对电压源稳压器为输入电压(V); 对电流源稳压器取电流互感器伏安特性曲线上高于拐点的电压, 宜取偏后一些, 使  $W_1$  偏大, 以便于调整。

③ 二次绕组应绕匝数  $W_2$  为

若二次加补偿  $W_2 = 1.4U_2 / e_0$ , 若二次不加补偿

$W_2 = U_2 / e_0$

式中:  $U_2$ ——输出电压(V), 单相桥时  $U_2 = 1.1U_z$ , 三相桥时  $U_2$

$=0.74U_2/\sqrt{3}$  (稳压器二次接星形),  $U_2$  为直流输出电压(V)。

④ 补偿绕组应绕匝数  $W_B$  为

当  $W_B$  作为二次回路补偿时  $W_B=(0.2\sim0.3)W_2$

当  $W_B$  作为电容器绕组补偿时  $W_B=(0.2\sim0.3)W_C$

⑤ 电容器绕组应绕匝数  $W_C$  为

不采用补偿绕组时  $W_C=(U_C-U_2)/e_0$

采用补偿绕组时  $W_C=(1.3\sim1.4)(U_C-U_2)/e_0$

式中:  $U_C$  —— 二次绕组与电容器绕组电压之和(V), 一般取小于 1000V;

⑥  $U_c$  按所选电容器允许额定电压选择时

对移相电容器:

当不正常谐振时  $U_c=U_g$

当正常谐振时  $U_c=(0.8\sim0.9)U_g$

式中:  $U_g$  —— 电容器的工作电压(V)。

对直流电容器: 见表 3--56。

表 3--56 CZM 型密封纸电容器允许电压值

直流工作电压 (V)	允许交流电压的有效值(V)				极限脉冲电压(V)		
	在 $f=50\text{Hz}$		在 $f=500\text{Hz}$		在重复频率不大于 1000, 脉冲宽度 $0.5\sim5\mu\text{s}$ , 脉冲电流 5A 以下		
	$C\leq 2\mu\text{F}$	$C\geq 4\mu\text{F}$	$C\leq 2\mu\text{F}$	$C\geq 4\mu\text{F}$	$C\leq 0.01\mu\text{F}$	$C=0.01\sim 0.1\mu\text{F}$	$C=0.1\sim 1\mu\text{F}$
200	160	130	100	50	150	100	60
400	250	200	125	75	250	150	100
600	300	250	150	100	350	250	150
1000	400	350	200	150	500	300	200
1500	500	—	250	—	600	400	300

(4)各绕组导线直径的选择:

$$\text{一次绕组电流为 } I_1 = \frac{2P}{U_1}$$

$$\text{电容器绕组电流为 } I_c = 1.5 \frac{P}{U_c}$$

$$\text{补偿绕组电流为 } I_B = P/U_2$$

$$\text{二次绕组电流为 } I_2 = \sqrt{I_c^2 + I_B^2}$$

$$\text{一次绕组导线直径为(铜导线) } d_1 = 0.8 \sqrt{I_1}$$

$$\text{二次绕组导线直径为(铜导线) } d_2 = 0.9 \sqrt{I_2}$$

$$\text{电容器绕组导线直径为(铜导线) } d_c = 0.9 \sqrt{I_c}$$

$$\text{补偿绕组导线直径为(铜导线) } d_B = 0.8 \sqrt{I_B}$$

当采用铝导线时,上述各式应乘以系数  $K_x = 1.285$ ,

(5)电容量的确定:一般铁磁稳压器选用的经验公式为

$$C = 11000P/U_c^2$$

式中: $C$ ——电容器电容值( $\mu\text{F}$ );

$P$ ——稳压器容量(VA);

$U_c$ ——同前。

由上式推出补偿电容量  $Q_c = 3P$ ,补偿量较大。为此,也可按以下经验公式选用:

$$C = 3180P/U_c^2 \text{ 即选 } Q_c = U_c^2 \omega C = P$$

$$\text{得 } C = \frac{Q_c}{\omega U_c^2} \times 10^6 = \frac{P}{\omega U_c^2} \times 10^6 = 3180 \frac{P}{U_c^2}$$

据试验,在给定的最小短路电流下,当  $Q_c = P$  时可得最佳输出功率。

(6)谐振点的选择:

①据试验结果有:

$$I_1 W_1 = I_c W_c - I_L W_c = (I_c - I_L) W_c$$

即当稳压器的补偿电容量  $Q_c$  确定后,起振安匝不变。

②式中  $(I_c - I_L)$  可用作图法求出,如图 3-39 所示。先作出稳压器空载特性  $U_L = f(I_L)$  和  $U_c = f(I_c)$  曲线;在  $U_L = f(I_L)$  曲线上作一与  $U_c = f(I_c)$  曲线平行的切线,过  $a$  点作一平行与横轴的直线,则线段  $ab$  代表  $(I_c - I_L)$  值,该值也是起振前最大电流差值。

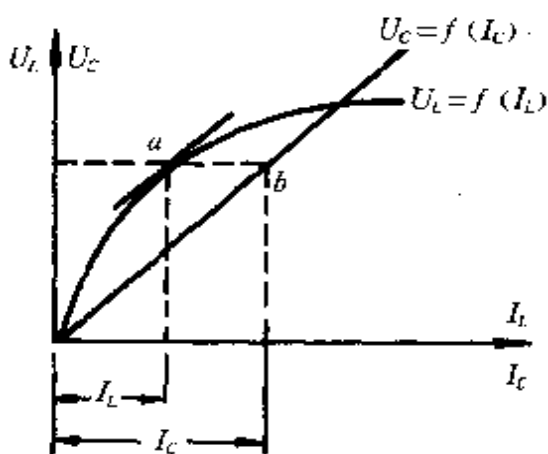


图 3-39 谐振点的选择曲线

(7) 稳压器制造参数参考值:

见表 3-57。

## 2. 小型铁磁谐振稳压器设计

(1) 功率 60W 以下的交流稳压器:原理电路如图 3-40 所示。该稳压器在输入电压有较大波动时,可保证输出有足够的稳定电压。图中电阻  $R$  取  $30 \sim 500k\Omega$ 、2W。

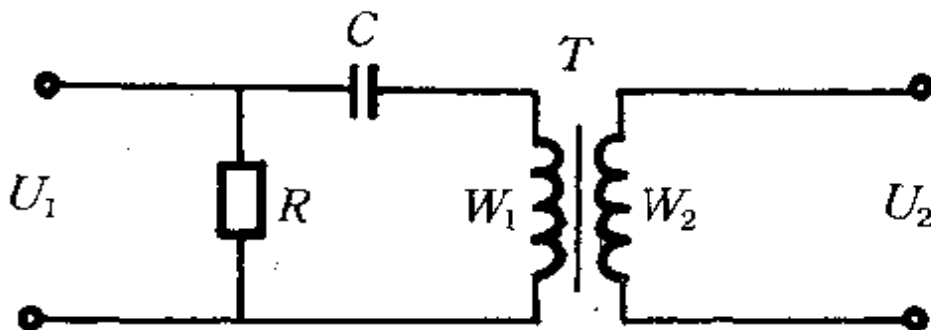


图 3-40 最简单的稳压器

表 3 57 稳压器的制造参数

容量(W)		500	1000	500	1000	2000	3000	铁芯代号
铁 心 尺 寸 (mm)	①	237×60	237×60	237×60	237×60	255×91	266×99	
	②	237×33	237×33	237×33	237×33	255×50	266×56	
	③	270×23	270×23	270×23	270×23	305×38	322×40	
	④	127×33	164×33	122×33	150×33	197×50	129×56	
	⑤	78×33	102×33	73×33	97×33	127×50	136×56	
	⑥	22×33	33×33	22×33	35×33	35×50	46×56	
迭厚(mm)		55	75	51	73	70	83	
绕 组 匝 数 直 径 (匝/ mm)	W <sub>1</sub>	281/1.81	207/2.44	282/1.81	197/2.44	140/2.44	103/4.1	
	W <sub>2</sub>	322/1.81	230/2.44	355/1.81	250/2.44	165/3.28	124/4.1	
	W <sub>3</sub>	700/1.4	800/1.81	700/1.4	740/1.81	770/2.02	450/2.83	
	W <sub>4</sub>	45/1.81	40/2.44	70/1.81	65/2.44	40/2.63	30/2.83	
电 容 器		10μF 2kV	10μF 2kV	4μF 2kV	10μF 2kV	10μF 或 8 μF×2.2kV	10μF×2 2kV	

注:绕组如采用铝导线时,应增加直径1.285倍。

设计步骤:

①根据负载功率  $P$  (近似变压器功率) 和铁芯种类, 查图 3—41 曲线, 得到“ $\pi$ ”型变压器的铁芯截面  $S$  和电容器  $C$  的电容量; 然后按表 3—58 选择标准铁芯 (设定铁芯迭厚);

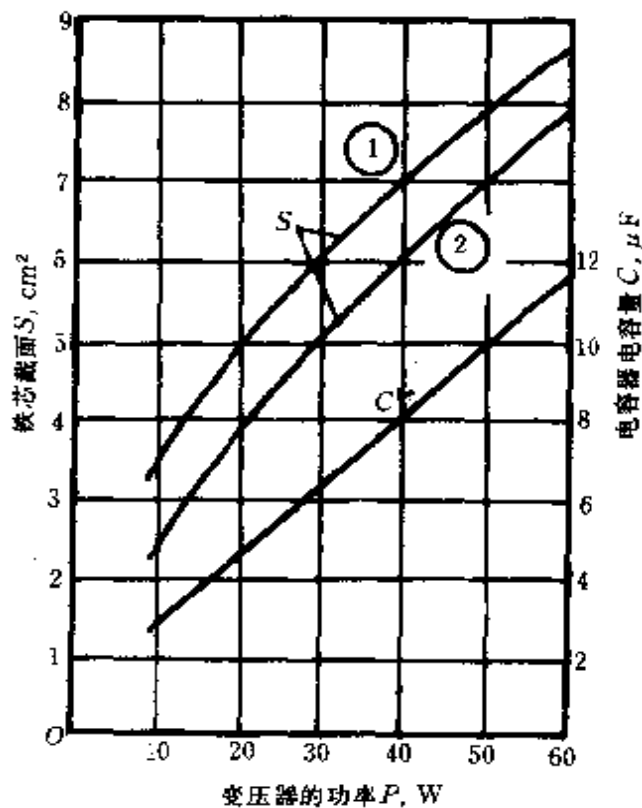


图 3-41 确定铁芯截面和电容量的曲线

- ①曲线:  $B_m = 0.8 \sim 1.0T$ , 如热轧硅钢片
- ②曲线:  $B_m = 1.0 \sim 1.2T$ , 如冷轧硅钢片  $D41$ 、 $D42$

表 3—58 小型变压器通用硅钢片尺寸(mm)

<i>a</i>	<i>c</i>	<i>h</i>	<i>A</i>	<i>H</i>
13	7.5	22	40	34
16	9	24	50	40
19	10.5	30	60	50
22	11	33	66	55
25	12.5	37.5	75	62.5
28	14	42	84	70
32	16	48	96	80
38	19	57	114	95
44	22	66	132	110
50	25	75	150	125
56	28	84	168	140
64	32	96	192	160

②变压器一、二次绕组的匝数和导线直径的计算：

$$\text{一次绕组匝数 } W_1 = \frac{40U_1}{S}$$

$$\text{一次绕组线径 } d_1 = 0.9 \sqrt{\frac{P}{U_1}}$$

$$\text{二次绕组匝数 } W_2 = \frac{30U_2}{S}$$

$$\text{二次绕组线径 } d_2 = 0.8 \sqrt{I_2}$$

式中： $U_1$ 、 $U_2$ ——输入和输出电压(V)；

$I_2$ ——负荷电流(A)。

③核算铁芯窗口是否能容纳所有绕组：

$$\frac{\pi(W_1d_1^2+W_2d_2^2)}{4ch} \leq 30\%$$

式中： $ch$ ——铁芯窗口面积( $\text{mm}^2$ )。

若满足上式要求，则能放下；否则放不下，应另选铁芯。

绕制时，一次绕组绕在中心铁芯柱上，二次绕组绕在两边柱上。

**例 3—12** 设计一只只能带动 40W 负载的交流稳压器，输入为市电 220V，输出为 110V，采用冷轧硅钢片， $B_m$  为 1.2T。

**解** 查图 3—41 得  $S = 6\text{cm}^2$ ， $c = 8\mu\text{F}$ 。设铁芯迭厚为 24mm，查表 3—58 得标准铁芯： $a = 25$ 、 $c = 12.5$ 、 $h = 37.5$ 、 $A = 75$ 、 $H = 62.5\text{mm}$ 。

负荷电流  $I_2 = P/U_2 = 40/110 \approx 0.364(\text{A})$

一次绕组匝数  $W_1 = 40U_1/S = 40 \times 220/6 \approx 1467(\text{匝})$

二次绕组线径  $d_1 = 0.9 \sqrt{40/220} \approx 0.164(\text{mm})$

二次绕组匝数  $W_2 = 30U_2/S = 30 \times 110/6 = 550(\text{匝})$

二次绕组线径  $d_2 = 0.8 \sqrt{0.364} \approx 0.482(\text{mm})$

取标称漆包线  $d_1 = 0.17\text{mm}$ ， $d_2 = 0.49\text{mm}$

由于

$$\frac{\pi(1467 \times 0.17^2 + 550 \times 0.49^2)}{4 \times 12.5 \times 37.5} = 29.2\% < 30\%$$

故绕组能放入铁芯窗口。

(2)功率 80W 和 140W 交流稳压器：这两种稳压器功率较大，需用两只“m”型变压器组成，其接线图如图 3—42 所示。其中  $L$  作扼流圈用。这种稳压器当市电压  $\pm 40\%$  范围波动时，能保证有足够的稳定输出。



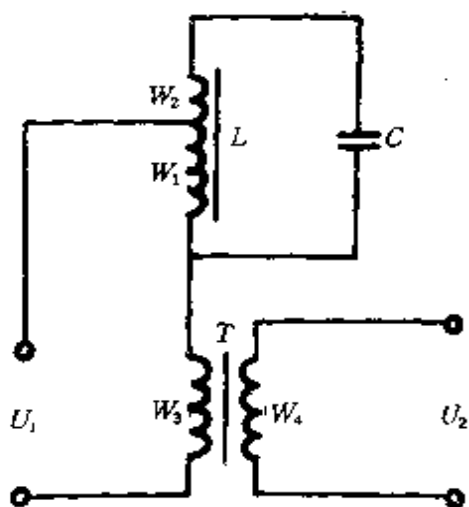


图 3-42 采用扼流圈的铁磁谐振式稳压器

下面列出其参数(铁芯采用热轧硅钢片)。

①扼流圈  $L$ ：

铁芯  $a=44$ 、 $c=22$ 、 $h=66$ 、 $A=132$ 、 $H=110$ ，选厚 40mm；

绕组 均用裸线直径为 0.8mm 的漆包线， $W_1=750$  匝， $W_2=150$  匝。

②变压器  $T$ ：

铁芯 不论 40W 还是 140W，均采用  $a=38$ 、 $c=19$ 、 $h=57$ 、 $A=114$ 、 $H=95$ mm；80W 时选厚 40mm，140W 时选厚 70mm。

绕组 80W 时  $W_3=W_4=500$  匝，均用裸线直径为 0.69mm 的漆包线；140W 时  $W_3=W_4=280$  匝，均用裸线直径为 0.8mm 的漆包线。

③电容器  $C$ ：耐压不小于 600V，电容量  $6\mu\text{F}$  (80W 时)， $10\mu\text{F}$  (104W 时)。

### 九、脉冲变压器及音频变压器设计

#### 1. 可控硅脉冲变压器设计

(1)用于窄脉冲的脉冲变压器设计要点：用普通单结晶体管

产生的脉冲,脉冲宽度为  $100 \sim 50 \mu s$ ,其脉冲变压器数据可这样考虑:

①铁芯材料可选用热轧或冷轧硅钢片。如果用铁淦氧磁芯作铁芯,必须选用  $B_m$  最大磁通密度较高的,其前沿陡度会好些。

②当采用硅钢片时,截面不宜小于  $0.5 \text{cm}^2$ ,可采用大型的半导体收音机用输出变压器。如果用冷轧硅钢片绕成的环形铁芯,可选内径为  $1.8 \sim 2.0 \text{cm}$ ,外径  $3.0 \text{cm}$ ,高  $1.0 \text{cm}$  左右。

③当铁芯磁路长度为  $6 \sim 8 \text{cm}$  左右时,一次绕组匝数  $W_1$  约为:

热轧硅钢片  $250 \sim 350$  匝。

冷轧硅钢片的环形铁芯  $200 \sim 300$  匝。

铁淦氧磁环  $50 \sim 60$  匝。

当铁芯磁路长度长时  $W_1$  取大些,磁路长度短时  $W_1$  取小些。

④二次绕组匝数取  $W_2 = W_1$ ;绕组导线一般选直径为  $0.15 \sim 0.25 \text{mm}$  的高强度漆包线;宽脉冲要选用稍粗的导线。

(2)用于宽脉冲的脉冲变压器计算步骤:先根据脉冲电压的宽度与幅度的要求,选择铁芯材料,然后计算变压器的铁芯截面及一、二次绕组匝数等。具体计算如下:

①铁芯截面和一次绕组匝数的计算:

$$W_1 S = \frac{\Delta \psi}{100 \cdot \Delta B} \quad \begin{array}{l} \text{输出单向脉冲 } \Delta B = B_1 - B_2 \\ \text{有去磁绕组时 } \Delta B = 2B_1 \end{array}$$

式中:  $W_1$ ——一次绕组匝数;

$S$ ——铁芯截面( $\text{cm}^2$ );

$\Delta \psi$ ——变压器一次绕组磁链最大的变化值( $V \cdot \mu s$ ),它由一次侧脉冲幅度、宽度及形状决定,参图 3—43;

$\Delta B$ ——变压器铁芯磁通密度的变化值(T),它由铁芯磁

化曲线决定。

$B_s$  —— 铁芯饱和磁通密度,  $B_s \approx 1.43B_m$ ;

$B_r$  —— 剩余磁通密度, 一般铁淦氧磁环取  $0.1 \sim 0.3T$ ; 冷轧硅钢片取  $0.4 \sim 0.5T$ ; 热轧硅钢片取  $0.7 \sim 0.8T$ ;

$B_m$  —— 同前。

图 3—43 中  $U_1$  为变压器一次侧脉冲的幅值(V); 一般的晶体管触发电路,  $U_1$  即为电源电压  $E_c$ , 对单结晶体管触发电路可取为单结晶体管的峰点电压  $V_p = \eta V_{BB}$ 。

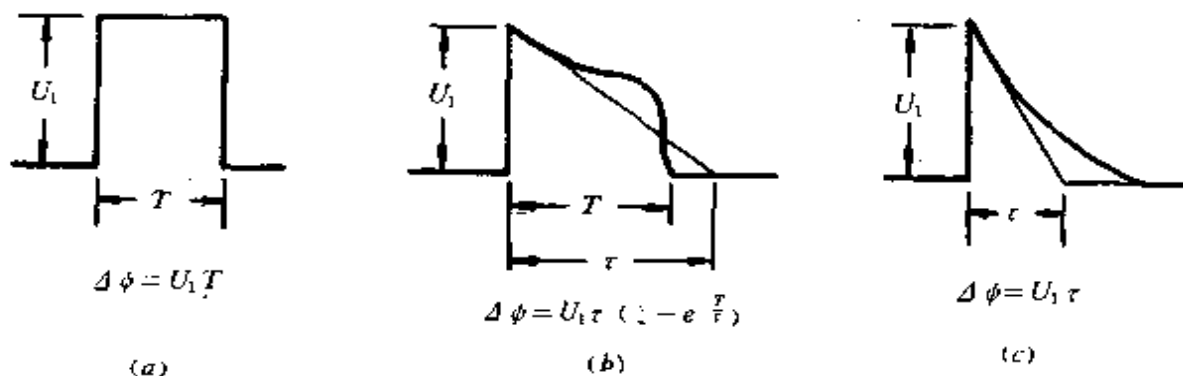


图 3—43 几种形状的脉冲  
(a)矩形波 (b)梯形波 (c)尖波

初步选定  $W_1$  后, 就可估算出截面  $S$  的大小。

当脉冲宽度较小时(如  $1000\mu s$  左右), 可选  $W_1 = 200$ ; 当脉冲宽度大, 选出的  $S$  过大(超过  $3mm^2$ )时, 可适当增大  $W_1$  (例如 400 或更大)。

在脉冲宽度大时, 一般可采用去磁绕组和采用  $\Delta B$  大的铁芯材料, 以使  $S$  大大减小。

也可按下列范围选取  $S$  后, 计算  $W_1$  再根据实际使用情况进行调整。

$$S = (2 \sim 4) \sqrt{P}, P = V_g I_g$$

式中： $S$ ——铁芯截面( $\text{cm}^2$ )；

$P$ ——可控硅最大触发功率(W)；

$V_g$ ——可控硅最大触发电压(V)；

$I_g$ ——可控硅最大触发电流(A)。

②截面  $S$  确定后，便可初选铁芯尺寸，定出磁路长度  $l$ 。脉冲变压器铁芯，如图 3—44 所示。

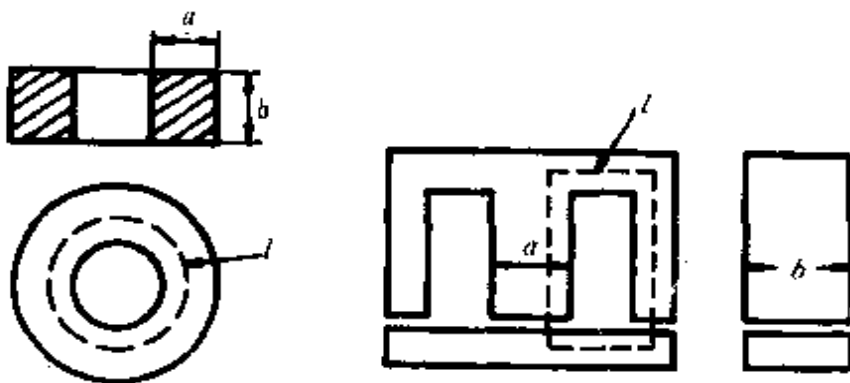


图 3—44 脉冲变压器铁芯

③计算磁化电应  $i_\mu$ ，再根据  $i_\mu$  及三极管能供给的电流大小校核原先选的  $W_1$ 。

供给脉冲变压器的管子除了要供给负荷电流  $i_1$  外，还要供给变压器的磁化电流  $i_\mu$ 。

$i_1$  可按下式计算：

$$i_1 = i_2 \frac{W_1}{W_2} = \frac{1.2U_2^2}{RU_1}$$

式中： $i_1$ ——负荷电流(A)；

$U_2$ ——脉冲变压器输出脉冲幅值(V)；

R——负载电阻( $\Omega$ )；

1.2——考虑回路电压损失的系数；

$U_1$ ——同前。

再根据  $W_1$ ，算出  $i_\mu$ （计算公式见后），考虑  $i_1$  后，管子能够供出足够的  $i_\mu$  电流，这就可确定  $W_1$ ；如不能供应  $i_\mu$  的电流，则需重新修改，或把原计算的  $W_1$  适当加大，或选择功率较大的管子或改用铁芯材料。

磁化电流按下式计算：

$$i_\mu = H_s l / W_1$$

式中： $i_\mu$ ——磁化电流(A)；

$H_s$ ——磁场强度(A/cm)，选用冷轧硅钢片时可取 0.955A/cm；

其它符号同前。

④二次绕组匝数  $W_2$  的计算：

$$W_2 = \frac{1.2W_1U_2}{U_1}$$

式中：1.2——考虑回路中管压降，电阻压降等电压损失的系数。

**例 3—13** 设计要求：输出脉冲幅值  $U_2 = 7V$ ；输出脉冲宽度  $T = 1100\mu s (20^\circ)$ ；变压器一次侧供电电压  $U_1 = 18V$ ；负载电阻  $R = 35\Omega$ （相当于 50A 可控硅的控制极内阻）。求：一、二次绕组匝数  $W_1$  和  $W_2$ ，及铁芯截面  $S$ ，迭厚  $B$ 。

**解**

(1) 选用冷轧硅钢片： $B_s = 1.0T$ ， $B_r = 0.45T$ ，

$$H_s = 0.99A/cm$$

(2) 铁芯截面的选择：要求脉冲是矩形波，故

$$\Delta\phi = U_1 T = 18 \times 1100 = 19800 (V \cdot \mu s)$$

输出单向脉冲，没有去磁绕组，所以

$$\Delta B = B_s - B_r = 1.0 - 0.45 = 0.55 (T)$$

考虑脉冲宽度较小，故选  $W_1 = 200$  匝

由此得铁芯截面为

$$S = \frac{\Delta\phi}{100W_1\Delta B} = \frac{19800}{100 \times 200 \times 0.55} = 1.8(\text{cm}^2)$$

取  $B/a = 1.3, S = aB$ , 故

$$a = \sqrt{1.8/1.3} = 1.18(\text{cm})$$

选用尺寸较相近的铁芯尺寸如图 3-45 所示。由图得磁路长度  $l = 9.2\text{cm}$ 。

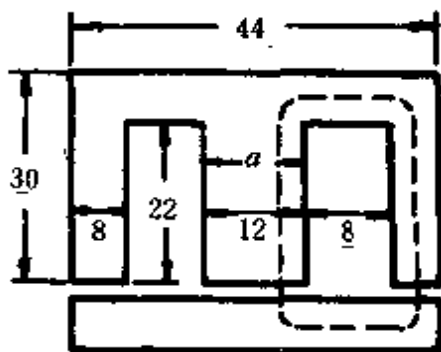


图 3-45 铁芯尺寸

(3) 根据磁化电流  $i_m$  校核  $W_1$ :

① 供给负载电流为

$$i_1 = 1.2 \frac{U_2^2}{RU_1} = 1.2 \times \frac{7^2}{35 \times 18} = 0.094(\text{A}) \\ = 94(\text{mA})$$

② 磁化电流为

$$i_m = \frac{H_l l}{W_1} = \frac{0.955 \times 9.2}{200} = 0.044(\text{A}) = 44(\text{mA})$$

③ 考虑管子除供给  $i_1$  外, 是可以供给这么大的磁化电流的, 故  $W_1$  不必另算。

校核结果表明,  $W_1 = 200$  匝是合适的。

(4)  $W_2$  的计算:

$$W_2 = 1.2 \frac{W_1 U_2}{U_1} = 1.2 \times \frac{200 \times 7}{18} = 93(\text{匝}), \text{取整数为 } 100 \text{ 匝。}$$

(5)铁芯迭厚的计算:

$S=1.8\text{cm}^2, a=1.2\text{cm}$ , 取迭片系数  $K_d=0.93$ , 则铁芯迭厚为  $B=\frac{S}{K_d a}=\frac{1.8}{0.93 \times 1.2} \approx 1.6(\text{cm})$

(3)去磁绕组的计算: 当脉冲宽度要求较大时, 如  $T=3300\mu\text{s}(60^\circ)$ , 或  $6700\mu\text{s}(120^\circ)$ , 变压器应有去磁绕组直接由电源经限流电阻供电。去磁绕组应满足以下关系:

$$\left(\frac{W_2}{W_Q}\right)^2 R_Q > (8 \sim 10)R$$

式中:  $W_Q$ ——去磁绕组匝数;

$R_Q$ ——去磁回路限流电阻( $\Omega$ );

$W_2$ ——变压器二次绕组匝数;

$R$ ——负载电阻( $\Omega$ )。

$R_Q$ 的大小可按下式初步选定:

$$\frac{U_1}{R_Q} W_Q = i_1 W_1 \frac{\theta}{360^\circ}$$

式中:  $U_1$ ——变压器一次侧电压(V);

$W_1$ ——变压器一次绕组匝数;

$\theta$ ——以角度表示的脉冲宽度, 可在试验中根据输出脉冲最大来调定。

由一个脉冲变压器供给两组相差  $180^\circ$  的移相触发电路时, 应按图 3-46 的接法, 这样可起到互相去磁的作用, 变压器利用率高。

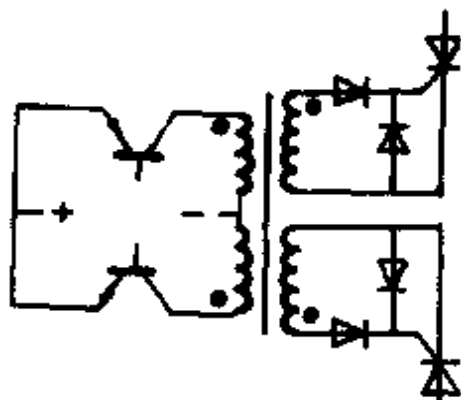


图 3-46 双拍脉冲变压器接法

## 2. 脉冲数字电路用的脉冲变压器估算

由于这类脉冲变压器的磁心是个非线性元件,且参数的离散性很大。加上漏感和分布电容等受工艺和结构的影响显著,因此很难精确计算。一般只对变压器的主要参数励磁电感进行估算。

$$L_i = 7.958 \mu_{\Delta} \frac{\Delta \pi W_1^2 S}{l} \times 10^2$$

式中  $L_i$ ——励磁电感( $\mu\text{H}$ );

$\mu_{\Delta}$ ——脉冲导磁率( $\text{T/A} \cdot \text{m}^{-1}$ ),  $\mu_{\Delta}$  的数值举例如表 3—59,其中  $\mu_0$  为一般导磁率;

$W_1$ ——一次绕组匝数;

$S$ ——磁芯截面( $\text{cm}^2$ );

$l$ ——平均磁路长度( $\text{cm}$ )。

表 3—59 环形磁芯的脉冲导磁率 [ $\text{T/A} \cdot \text{m}^{-1}(\text{G/Oe})$ ]

磁芯型号	M1000	M2000
$\mu_0$	$1.2566 \times 10^{-3}(1000)$	$2.5132 \times 10^{-3}(2000)$
$\mu_{\Delta}$	$0.5026 \times 10^{-3} \sim 0.8168 \times 10^{-3}$ (400~650)	$0.9425 \times 10^{-3} \sim 1.7592 \times 10^{-3}$ (750~1400)

如图 3—47 所示的环形磁芯,  $S = (d_2 - d_1) \frac{h}{2}$ ,  $l = \frac{\pi}{2} (d_1 + d_2)$ , 将它们代入上式,经整理得

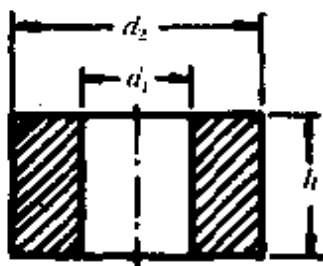


图 3—47 环形磁芯



$$W_1 = 0.0177 \sqrt{\frac{L_1(d_1 + d_2)}{\mu_s h (d_2 - d_1)}}$$

式中： $d_1$ 、 $d_2$ 、 $h$ ——磁芯的内径、外径和高(cm)；其它符号同前。

### 3. 变换器中的变压器设计

变换器中的变压器有自激式和它激式两类。自激式〔图 3—48(a)〕为变压器用于饱和式推挽电路；它激式〔图 3—48(b)〕为变压器用于非饱和式推挽电路。

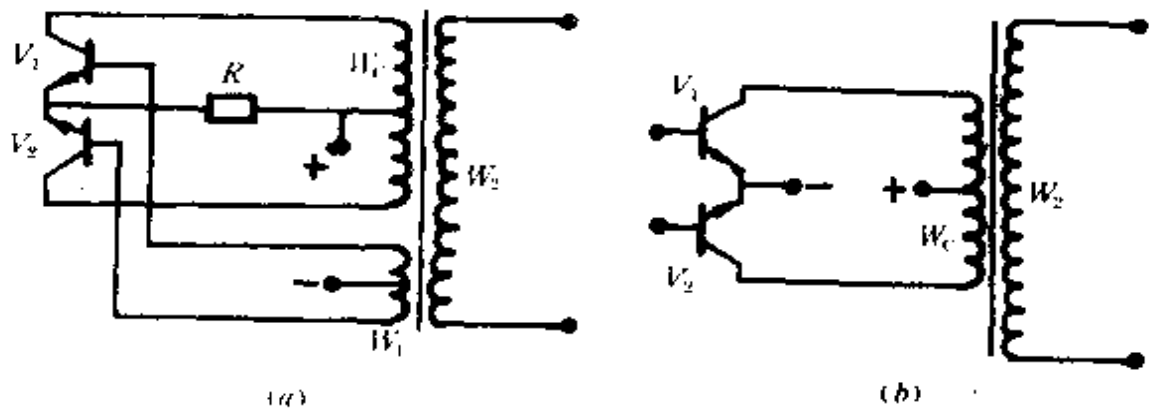


图 3-48 变换器中的变压器

(a)自激式 (b)它激式

现以 100VA 自激式推挽变压器为例，介绍变压器的设计步骤。

(1)设计要求：额定输出功率  $P_o = 100\text{VA}$ ；额定蓄电池直流电压  $E = 12\text{V}$ （电瓶电压降至 10.5V 时，必须停机、充电）；逆变输出额定电压（交流） $U_o = 220\text{V}$ （可调）；逆变输出方波频率  $f = 50\text{Hz} \pm 10\%$ ；变压器效率  $\eta = 0.8$ 。

(2)计算步骤：

①变压器容量  $P_j$  计算：

$$P_j = \frac{P_0}{2} \left[ \sqrt{n_2} + \frac{\sqrt{n_1}}{\eta} \right] = \frac{100}{2} \left[ \sqrt{1} + \frac{\sqrt{2}}{0.8} \right]$$

$$= 138(\text{VA})$$

式中： $n_1$ ——一次绕组的个数，推挽绕组  $n_1 = 2$ ，其余情况  $n_1 = 1$ ；

$n_2$ ——二次绕组的个数，推挽绕组  $n_2 = 2$ ，其余情况  $n_2 = 1$ 。

根据  $P_j$ ，选用标准铁芯 CD20×40×50。

②变压器绕组匝数的计算：

$$\text{集电极绕组 } W_c \text{ (一个绕组匝数) 为 } W_c = \frac{(E - U_{ces}) \times 10^4}{4.44fB_s S}$$

$$= \frac{(12 - 0.8) \times 10^4}{4.44 \times 50 \times 2.05 \times 7.6}$$

$$= 33(\text{匝})$$

式中： $U_{ces}$ ——晶体管 3DD15B 饱和压降(V)；

$B_s$ ——铁芯饱和磁通密度，用  $Z_{10} = 0.35$  材料时可取 2.05T；

$S$ ——铁芯净截面( $\text{cm}^2$ )。

反馈绕组  $W_f$  (一个绕组匝数) 为

$$W_f = \frac{W_c U_f}{E - U_{ces}} = \frac{W_c \cdot \frac{1}{3} E}{E - U_{ces}} = \frac{33 \times \frac{1}{3} \times 12}{12 - 0.8} = 12(\text{匝})$$

式中： $U_f$ ——反馈绕组电压(V)。

反馈电压  $U_f$  与管子输入阻抗及所加基极电阻有关，而且管子参数不同，要求反馈电压也不同，一般  $U_f$  取电源电压的 1/3。

二次绕组匝数为

$$W_2 = \frac{W_c U_0}{E - U_{ces}} = \frac{33 \times 220}{12 - 0.8} = 648(\text{匝})$$

考虑到绕组内阻压降，绕组匝数放大系数 1.05 和电瓶电压降至 10.5V 时，保证额定电压输出，则

$$W_2 = \frac{1.05 W_c U_0}{E_{降} - 0.8} = \frac{1.05 \times 33 \times 220}{10.5 - 0.8} = 785(\text{匝})$$

为便于调节输出,在 785 匝至 648 匝间适当抽几个头。

③导线直径的选择:

集电极绕组  $W_c$  的有效电流为

$$I_c = \frac{1}{\sqrt{n_1}} \cdot \frac{P_0}{\eta(E-U_{ces})} = \frac{1}{\sqrt{2}} \times \frac{100}{0.8(12-0.8)}$$

$$= 7.8(\text{A})$$

导线直径为

$$d_c = 1.13 \sqrt{I_c/j} = 1.13 \sqrt{7.8/2.5} = 2(\text{mm})$$

式中:  $j$  —— 电流密度,取  $2.5(\text{A}/\text{mm}^2)$ 。

为了保证在最小的放大倍数  $\beta_{\min}$  时晶体管能可靠的饱和,应按下式选取反馈电流:

$$I_{bc} = \frac{kI_c}{\beta_{\min}} = \frac{2 \times 7.8}{34} = 0.45(\text{A})$$

式中:  $k$  —— 饱和储备系数,这儿取  $k=2$ ;

$\beta_{\min}$  —— 晶体管 3DD15 的最小放大倍数。

反馈绕组导线直径为

$$d_f = 1.13 \sqrt{I_{bc}/j} = 1.13 \sqrt{0.45/2.5} = 0.49(\text{mm})$$

输出绕组电流  $I_2$  为

$$I_2 = \frac{1}{\sqrt{n_2}} \cdot \frac{P_0}{U_0} = \frac{1}{\sqrt{1}} \cdot \frac{100}{220} = 0.45(\text{A})$$

导线直径为

$$d_2 = 1.13 \sqrt{I_2/j} = 1.13 \sqrt{0.45/2.5} = 0.49(\text{mm})$$

(3)变换器转换频率的初步核算:

$$f = \frac{(E-U_{ces}) \times 10^4}{4B_c W_c S} = \frac{(12-0.8) \times 10^4}{4 \times 2.05 \times 33 \times 7.6}$$

$$\approx 54.5(\text{Hz})$$

(4)变压器绕制时注意事项:

①为提高变压器变换效率,集电极绕组  $W_c$  应绕在内层;由

于集电极电流大,希望内阻尽可能小。

②为减少漏感及分布电容,推挽绕组要对称绕制,以减少波形畸变击穿晶体管。

③为了改善波形,在电路中可考虑增加吸收回路。

#### 4. 推挽输出音频变压器的设计

(1)设计要求:额定输出功率  $P_{2e}$  (VA);电源额定电压  $U_c$  (V)二次阻抗  $R_2$  ( $\Omega$ );工作频率(指最低工作频率)  $f$  (Hz);失真分贝数  $S$  (dB)。

(2)计算步骤:常用音频变压器电路图如图 3—49 所示。

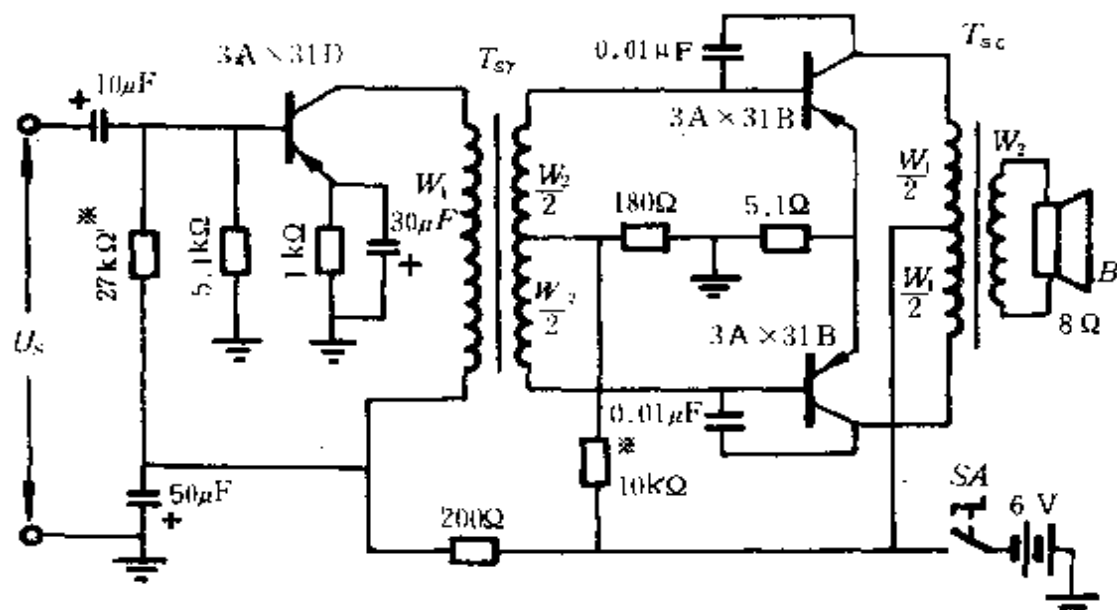


图 3—49 常用音频变压器电路

$T_{sr}$ ——输入变压器(单端); $T_{sc}$ ——输出变压器(推挽)

①计算一次阻抗:

$$Z_c = \frac{2(U_c - U_{ces})}{I_1}, I_1 = \frac{1.1P_{2e}}{(U_c - U_{ces})\eta_b\eta}$$

式中： $Z_1$ ——一次阻抗( $\Omega$ )；

$U_c$ ——电源电压(V)；

$U_{ces}$ ——晶体管饱和压降(V)；

$I_1$ ——一次绕组电流(A)，

$P_{2e}$ ——额定输出功率(W)；

$\eta_b$ ——变压器效率，1W 以下取 0.7；

$\eta$ ——晶体管乙类推挽放大效率，约为 0.65~0.75。

为了简化计算，一次阻抗  $Z_1$  可直接从图 3—50 的曲线上查得。

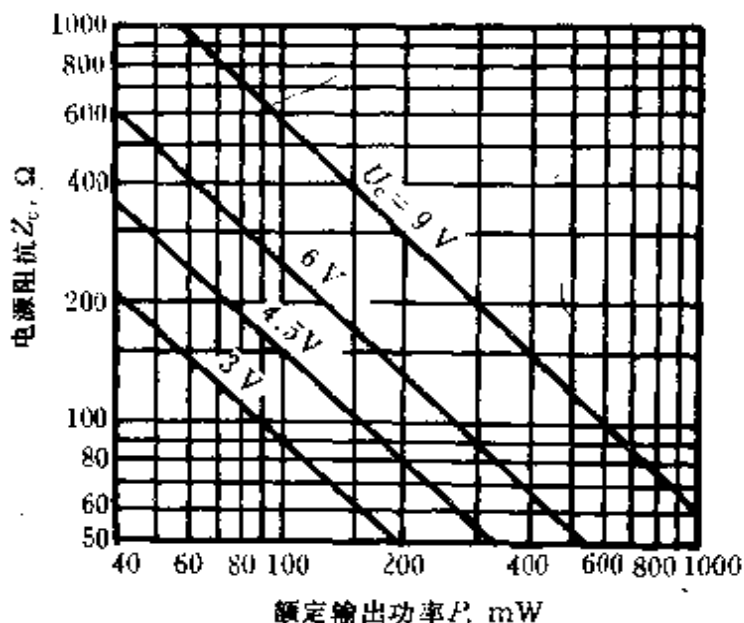


图 3—50 负载阻抗与输出功率的关系曲线

②一、二次绕组的匝数比为

$$n = \frac{W_1}{W_2} = \frac{U_1}{U_2} = \sqrt{\frac{R_1}{R_2}}$$

小变压器效率较低，为了补偿绕组中的电压降，还应考虑变压器效率  $\eta_b$ ，这时

$$n = \sqrt{\frac{Z_c \eta_b}{R_y}}$$

③二次绕组电感量为

$$L_1 = \frac{Z_c}{2\pi f \sqrt{M^2 - 1}}, \quad M = 10^{\frac{S}{20}}$$

式中： $L_1$ ——二次绕组电感量(H)；

$M$ ——衰减  $S$  分贝时的失真系数。

④选择铁芯截面：

当选用表 3—48 的 XE 型铁芯系列时，

$$S = \sqrt{P_{2e}}$$

式中： $S$ ——铁芯截面( $\text{cm}^2$ )；

$P_{2e}$ ——额定输出功率(W)。

⑤计算一、二次绕组匝数：

$$W_1 = 10 \sqrt{\frac{L_1 l}{\mu S_j}}, \quad W_2 = W_1 / n$$

式中： $l$ ——磁路平均长度(cm)，由表 3—48 查得；

$\mu$ ——磁性材料导磁率( $\text{T}/\text{Am}^{-1}$ )，硅钢片  $\mu$  约为  $1.2566 \times 10^{-3} \text{T}/\text{A} \cdot \text{m}^{-1}$ 。

⑥选择导线直径：

$$d = 1.13 \sqrt{I/j}$$

式中： $d$ ——导线直径(mm)；

$j$ ——电流密度，一、二次取相同，取  $2 \sim 3 \text{A}/\text{mm}^2$ 。

**例 3—14** 设计一个额定输出功率  $P_{2e}$  为 220mW 的推挽输出变压器。已知电源电压  $U_c$  为 6V，二次阻抗  $R_y$  为  $8\Omega$ ，最低工作频率  $f$  为 300Hz，失真系数不大于 1.5dB。

**解** (1)  $U_{ces}$  取 0.5V， $\eta_c$  和  $\eta$  均取 0.7，则一次绕组电流为

$$I_1 = \frac{1.1 P_{2e}}{(U_c - U_{ces}) \eta_b \eta} = \frac{1.1 \times 0.2}{(6 - 0.5) \times 0.7 \times 0.7}$$

$$=0.081(\text{A})$$

(2)二次绕组电流为

$$I_2 = \sqrt{P_{2r}/R_y} = \sqrt{0.2/8} = 0.158(\text{A})$$

(3)当  $U_c = 6\text{V}$ 、 $P_{2r} = 200\text{mW}$  时,由图 3—50 曲线查得一次阻抗  $Z_c = 140\Omega$ 。

(4)一、二次绕组的匝数比为

$$n = \sqrt{\frac{Z_c \eta_b}{R_y}} = \sqrt{\frac{140 \times 0.7}{8}} = 3.5$$

(5)由于  $M = 10^{\frac{1.5}{20}} = 1.188$ ,故一次绕组电感量为

$$L_1 = \frac{Z_c}{2\pi f \sqrt{M^2 - 1}} = \frac{140}{6.28 \times 300 \sqrt{1.188^2 - 1}} = 0.12(\text{H})$$

(6)采用 XE 型铁芯(见表 3—48),则铁芯截面为

$$S = \sqrt{P_{2r}} = \sqrt{0.2} = 0.45(\text{cm}^2)$$

可选用 XE6×8 铁芯,该铁芯的净截面为  $0.467\text{cm}^2$ , $l = 5.34\text{cm}$ 。

(7)一、二次绕组匝数的计算:

$$W_1 = 10 \sqrt{\frac{L_1 l}{\mu S}} = 10 \sqrt{\frac{0.12 \times 5.34}{1.13 \times 10^{-3} \times 0.467}} = 348(\text{匝}), \text{取 } 350 \text{ 匝}$$

可用双线并绕  $2 \times 175$  匝,然后串联连接并引出中心抽头及两端线头,这样能使两半绕组的直流电阻平衡。

$$W_2 = W_1/n = 350/3.5 = 100(\text{匝})$$

(8)取  $j = 2.5\text{A}/\text{mm}^2$ ,则一、二次绕组导线直径为

$$d_1 = 1.13 \sqrt{\frac{I_1}{j}} = 1.13 \sqrt{\frac{0.081}{2.5}} = 0.21(\text{mm})$$

$$d_2 = 1.13 \sqrt{\frac{I_2}{j}} = 1.13 \sqrt{\frac{0.158}{2.5}} = 0.29(\text{mm})$$

### 第四节 电抗器计算

#### 一、滤波电抗器计算

滤波电抗器又称直流电抗器。一般电抗器的电感  $L$  和额定负荷电流  $I$  是已知的。如果电抗器的电感未知,可按第十四章第三节中滤波电抗器电感估算法求出其电感量  $L_m$ (即  $L$ )。

##### 1. 铁芯形式的选择

电抗器常用的铁芯形状有 E 型(图 3—51)、口型(图 3—52)和十字形截面的口形(图 3—53)。

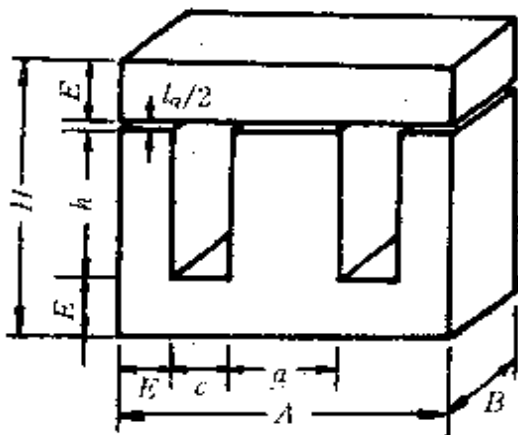


图 3—51 E 型铁芯

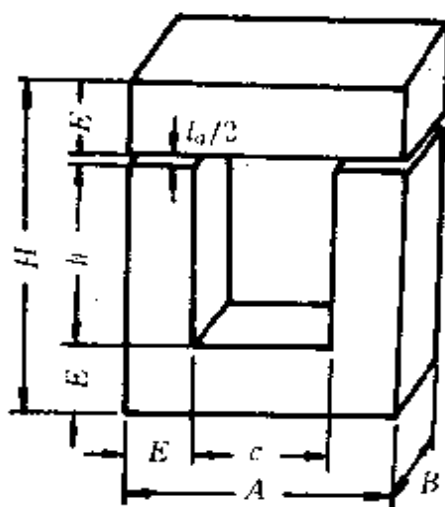


图 3—52 口形铁芯

$1 < LI^2 < 2$  的小型电抗器,可選用 E 形鐵芯, $LI^2 > 2$  的中  
型電抗器,可選用口形鐵芯; $LI^2 \geq 30$  的大型電抗器,可選用十  
字形截面的口形鐵芯。其中, $L$  為額定負荷電流下的電感(H); $I$   
為額定負荷電流(A)。



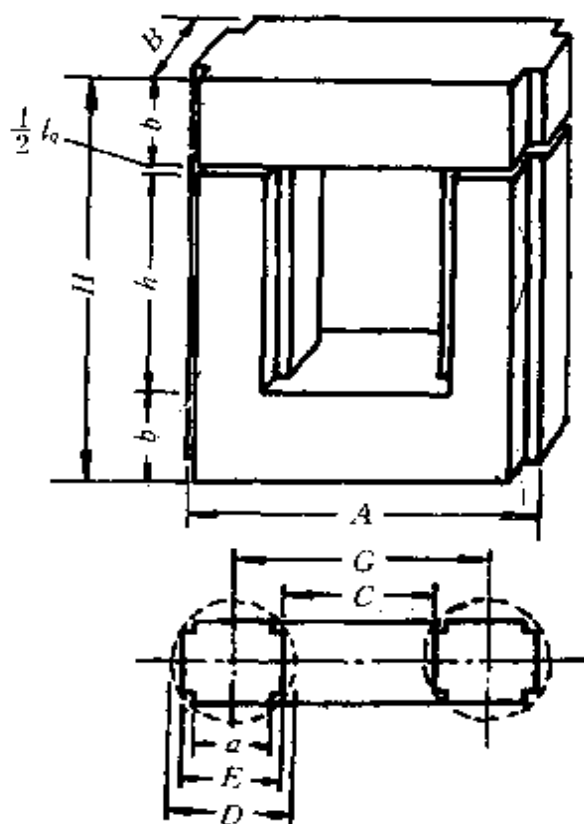


图 3—53 十字形截面的口形铁芯

设  $Q$  为铁芯窗口面积( $\text{cm}^2$ );  $S$  为铁芯截面( $\text{cm}^2$ );  $l$  为铁芯平均磁路长度( $\text{cm}$ );  $l_q$  为气隙长度( $\text{cm}$ )。

### 2. 铁芯尺寸的选择

E 形铁芯  $E \approx (2.4 \sim 2.7) \sqrt[3]{LI^2}$

口形铁芯  $E \approx (2.6 \sim 2.9) \sqrt[3]{LI^2}$

十字形截面的口形铁芯  $E \approx (3.3 \sim 3.7) \sqrt[3]{LI^2}$

式中:  $E$ ——硅钢片的宽度( $\text{cm}$ )。

硅钢片的宽度确定后,再计算出铁芯其余各部分的尺寸。采用冷轧硅钢片时,铁芯尺寸可在上述范围内取偏小些。

### 3. 绕组匝数 $W$ 和最佳气隙 $l_q$ 的计算

可利用图 3—54 的曲线来计算  $W$  和  $l_q$ 。曲线  $a$  和  $b$  对应于

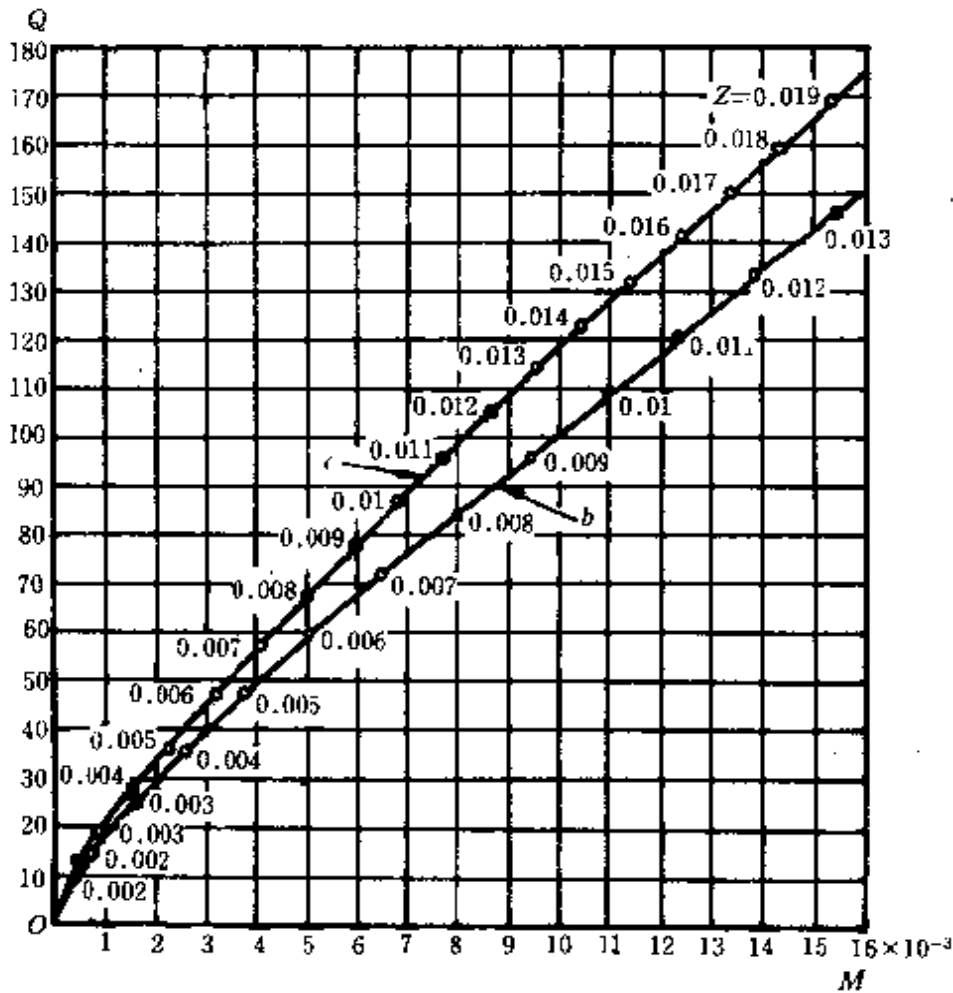


图 3—54 电抗器绕组匝数和最佳气隙的计算曲线

D43 热轧硅钢片和 D310 冷轧硅钢片：

$$Q = \frac{WI}{l}, M = \frac{LI^2}{Sl}, Z = \frac{l_q}{l}$$

计算方法：先计算出  $M$  值，然后在曲线上查出相对应的  $Q$  值和  $Z$  值，则

$$W = Ql/I, l_q = Zl$$

4. 导线直径的选择

$$S_b = I/j, d = 1.3 \sqrt{I/j}$$

式中： $S_b$ ——扁导线的截面(mm<sup>2</sup>)；

$d$ ——圆导线的直径(mm)；

$j$ ——电流密度，取 1.8~2.4A/mm<sup>2</sup>。

5. 核算铁芯窗口是否能容纳绕组

核算方法同前，此处从略。

6. 电抗器的电感核算与调整

先按下式计算出电感：

$$L = \frac{12.6W^2S}{L_q + \frac{l}{\mu_{r\Delta}}} \times 10^{-9}$$

式中  $L$ ——电抗器的电感(H)；

$\mu_{r\Delta}$ ——硅钢片的相对有效导磁率，D43 热轧硅钢片  $\mu_{r\Delta} \approx 1000$ ，D310 冷轧硅钢片  $\mu_{r\Delta} \approx 1200$ 。

然后与按第十四章第三节中方法算得的  $L_{ij}$  进行比较。如果  $L \geq L_{ij}$ ，则所设计的电抗器能满足电流连续要求。如果  $L < L_{ij}$ ，则应适当减小  $l_q$  以增大最小负荷电流时的电感，以满足电流连续的要求。

二、交流电抗器计算

交流电抗器常用来限制交流电流及变频滤波，为了有较好的线性度，电抗器通常有适当的气隙。交流电抗器的设计与变压器相似。

1. 铁芯形式的选择

交流电抗器铁芯形式的选择，同直流电抗器。

2. 铁芯截面的选择

电抗器铁芯截面、窗口面积与电抗器容量有如下关系：

$$SQ = \frac{UI \times 10^2}{4.44fB_j K_u K_Q}$$

式中： $S$ ——铁芯截面( $\text{cm}^2$ )；

$Q$ ——铁芯窗口截面( $\text{cm}^2$ )；

$U$ ——电抗器上所加的额定电压(V)；

$I$ ——通过电抗器的额定电流(A)；

$B_s$ ——磁通密度(T)；

$j$ ——电流密度，可取  $1.6 \sim 2.4 \text{A/mm}^2$ ；

$K_d$ ——铁芯迭片系数，取 0.93；

$K_Q$ ——窗口填充系数，取 0.4~0.5。

根据电抗器容量  $UI$  的大小，选用适当的铁芯，使  $SQ$  乘积符合上式即可。

例如，选用  $B_s = 1.1 \text{T}$ ， $j = 2.2 \text{A/mm}^2$ ， $K_d = 0.93$ ，

$K_Q = 0.45$ ，又设  $Q = 1.5S$ ，则有

$$1.5 S^2 = \frac{UI \times 10^2}{4.44 \times 50 \times 1.1 \times 2.2 \times 0.93 \times 0.45} = \frac{UI}{2.25} \text{得}$$

$$S = \frac{1}{1.84} \sqrt{UI} = 0.54 \sqrt{UI}$$

### 3. 绕组匝数 $W$ 和气隙 $l_g$ 的计算

(1) 求出铁芯截面后，便可按下式求得所需绕组的匝数：

$$W = \frac{U \times 10^4}{4.44 f B_s S K_d}$$

(2) 气隙  $l_g$  可按以下方法确定(图 3—55)：

先计算出交流磁化力  $H = IW/l$

式中： $H$ ——交流磁化力(A/m)；

$l$ ——铁芯平均磁路长度(m)。

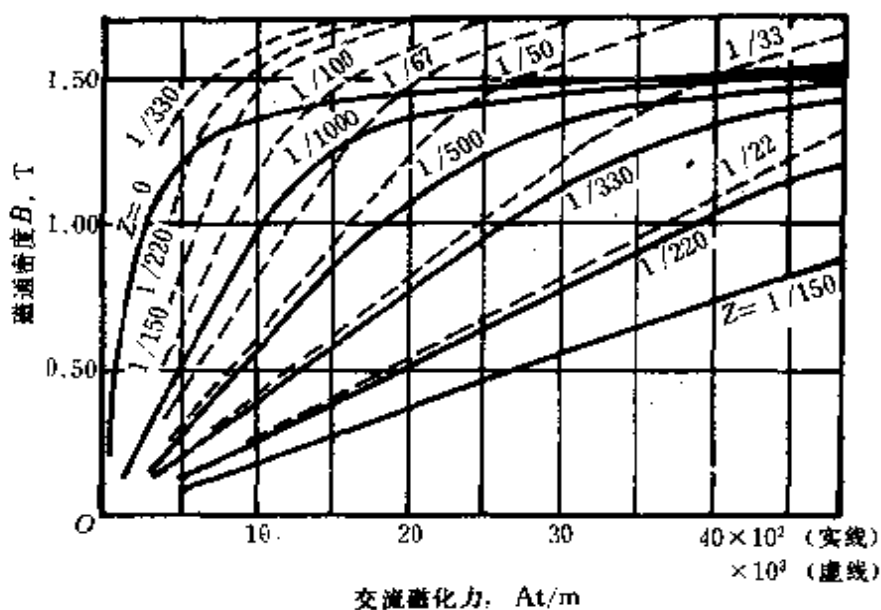


图 3—55 带气隙铁芯电抗器的  $B-H$  曲线

然后在曲线上查出  $Z$  值, 则气隙为

$$l_g = Zl$$

实际调整时可根据测得的电抗值  $X = U/I$ , 适当增减。

### 三、均流电抗器计算

均流电抗器主要用于硅整流装置中解决并联整流元件的均流问题(图 3—56)。

#### 1. 铁芯截面的选择

$$S = \frac{\Delta U \times 10^4}{2fWB_2}$$

式中:  $S$ ——铁芯截面( $\text{cm}^2$ );

$f$ ——电源频率(Hz);

$W$ ——绕组匝数;

$B_2$ ——磁通密度, 可按表 3—60 选取。

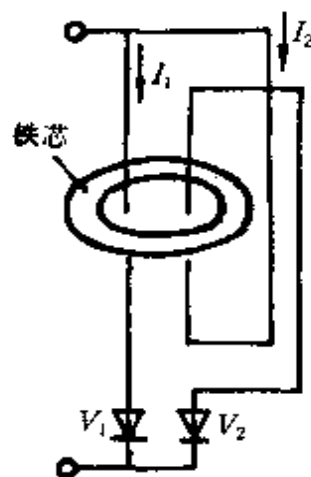


图 3—56 均流电抗器的接线

$\Delta U$ ——并联元件的管压降差,可由整流二极管及可控硅元件电参数表中查得。当多个管子并联时,应选用两个管压降相差最大的管子的管压降来计算。

当采用三个元件  $V_1$ 、 $V_2$ 、 $V_3$  并联时,可采用三柱铁芯均流电抗器,其绕法如图 3—57 所示。

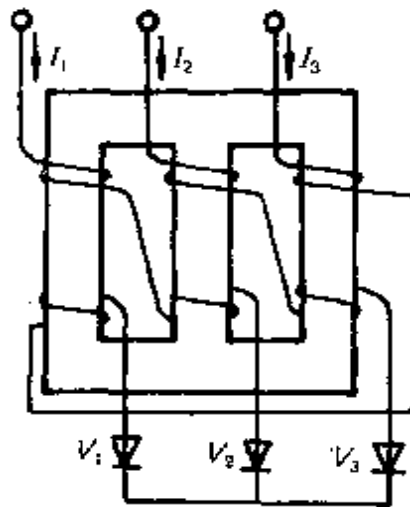


图 3—57 三柱铁芯的均流电抗器

表 3—60 均流电抗器磁通密度选用表

铁芯 磁密 (T)	匝数	元件额定电流(A)			
		1	2	3	4
50		0.45	0.55	0.60	0.65
100		0.50	0.60	0.65	0.70
200		0.55	0.65	0.70	0.75

铁芯截面计算公式同上,但  $B_m$  值要相应取小一些。

### 2. 匝数的确定

均流电抗器的匝数,根据经验,以不超过 4 匝为宜。

须注意,均流电抗器的磁路长度应尽可能短些为好。

#### 四、空芯电抗器计算

为了限制可控硅元件导通瞬间的电流变化速度  $di/dt$ ,并利于并联及可控硅元件的均流,在每个整流桥臂上串入一只空芯电抗器。

##### 1. 空芯电抗器的电感

$$L = \frac{\mu_p}{di/dt}, \quad \mu_p = 1.1 \sqrt{2} U_2$$

式中: $L$ ——空芯电抗器的电感( $\mu H$ );

$\mu_p$ ——每臂元件开闭最大电压(V),需考虑电网电压波动 10%;

$U_2$ ——变压器二次电压有效值(V);

$di/dt$ ——可控硅元件允许的电流变化速度(A/ $\mu s$ ),可取 10A/ $\mu s$ 。

##### 2. 空芯电抗器的结构

当电感量小时可制成单层螺管式,电感量大时可制成多层式,如图 3—58 所示。

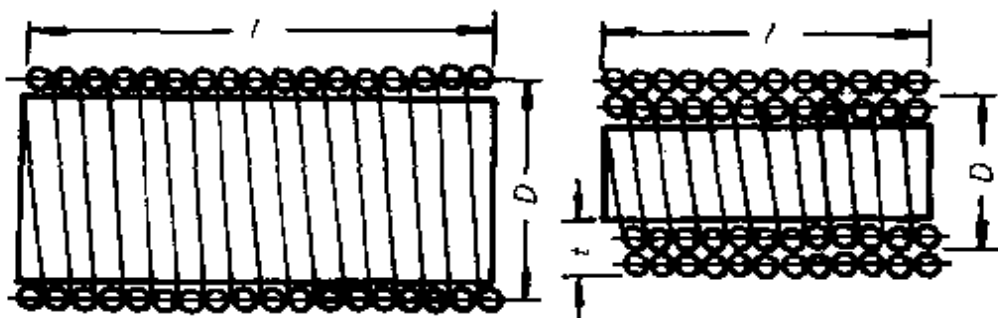


图 3—58 单层及多层空芯电抗器

(a)单层圆柱 (b)双层圆柱

(1)单层螺线管的电感:

$$L = K(\pi n D)^2 l$$

式中： $L$ ——电感( $\mu H$ )；

$K$ ——系数，是螺管长度与直径比  $l/D$  的函数，见图 3—59。

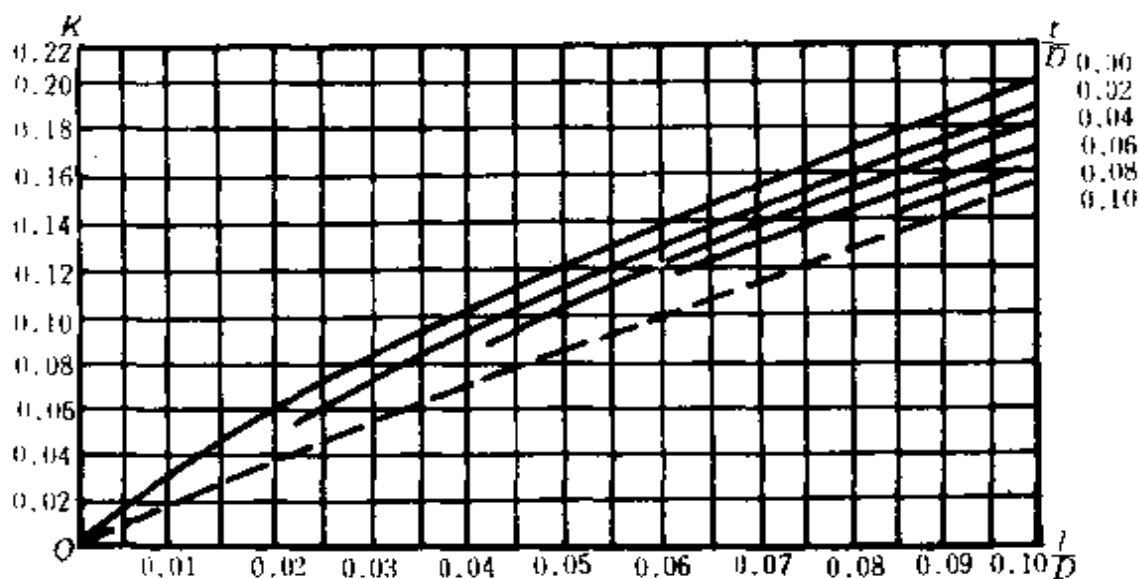


图 3—59 单层空芯电抗器的系数

$n$ ——每厘米长度内绕组匝数(匝/cm)；

$D$ ——螺管直径(cm)；

$l$ ——绕组长度(cm)。

(2)多层螺线管的电感：

$$L = K' (\pi n D)^2 l$$

式中： $L$ ——电感( $\mu H$ )

$K'$ ——系数，是螺管直径与长度比  $l/D$  和绕组厚度与平均直径比  $t/D$  的函数，见图 3—60；

$D$ ——绕组平均直径(cm)；

$n$ ——同前。



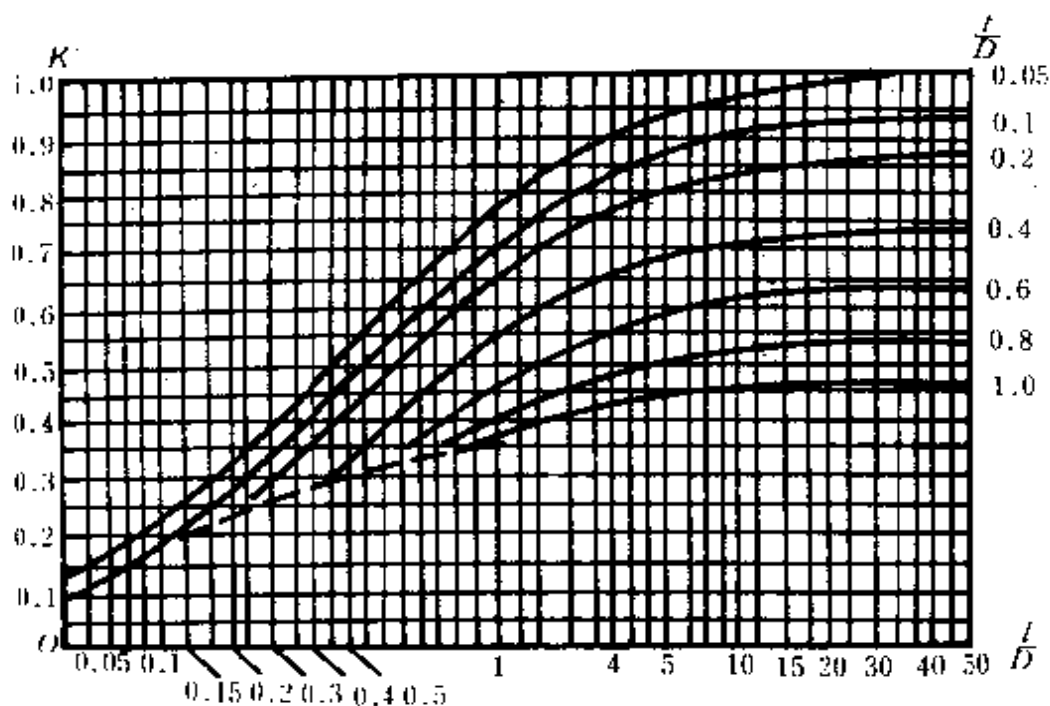


图 3—60 多层空芯电抗器的系数

设计时,先根据流过电抗器的电流选取导线(即决定了每厘米的匝数  $n$ ),然后假设一个电抗器直径  $D$ ,取一个  $K$  值,求出长度  $l$ ,再验算  $l/D$  与所选  $K$  值的误差,重选  $K$  值,再进行计算,直到相符为止。

### 五、平衡电抗器计算

在双反星形带不平衡电抗器线路中,为了隔离两个变压器,需接入平衡电抗器(图 3--61)。

#### 1. 铁芯截面的选择

$$E \text{ 形铁芯截面 } S = 0.35 \sqrt{U_{z\max} I_z}$$

$$[] \text{ 形铁芯截面 } S = 0.22 \sqrt{U_{z\max} I_z}$$

式中:  $S$ ——铁芯截面( $\text{cm}^2$ );

$U_{z\max}$ ——整流器最大输出直流电压(V);

$I_z$ ——整流器额定输出直流电流(A)。

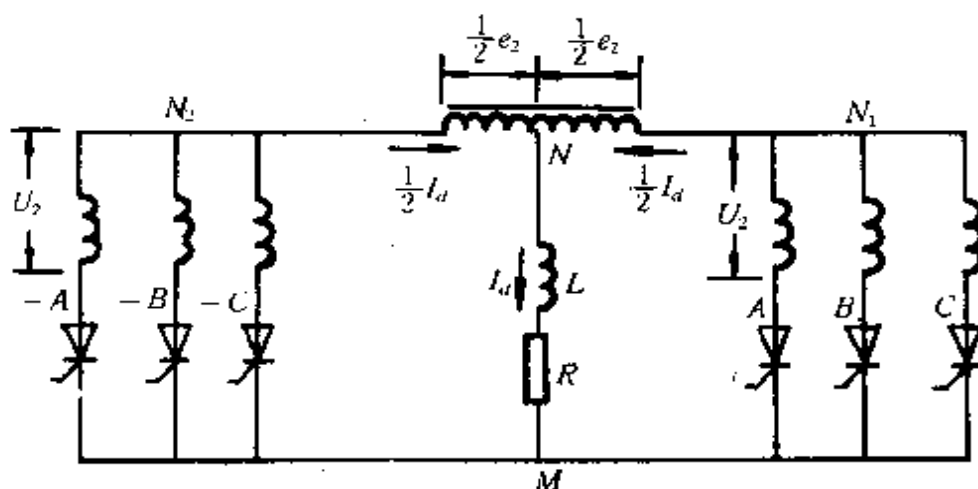


图 3—61 双 Y 带平衡电抗器的整流电路

2. 绕组总匝数的计算

$$W = \frac{2.25U_i \times 10^3}{f_i B_s S}$$

式中： $W$ ——绕组总匝数(匝)；

$U_i$ ——平衡电抗器两端电压有效值(V)；

$f_i$ ——平衡电抗器频率(Hz)，是电网频率的三倍；

$B_s$ ——磁通密度，一般取 0.5T；

第五节 变压器干燥计算

一、涡流法干燥变压器

涡流法是在变压器油箱外缠上导线，通电后使油箱铁芯等处产生涡流发热而达到干燥的目的，如图 3—62 所示，用此法加热，油箱温度可达 100~125℃，而铁芯温度约 85℃ 左右。

1. 干燥电源功率和外绕线圈匝数

$$P = 5F(100 - t_0) \quad (\text{保温变压器})$$

$$P = 12F(100 - t_0) \quad (\text{不保温变压器})$$

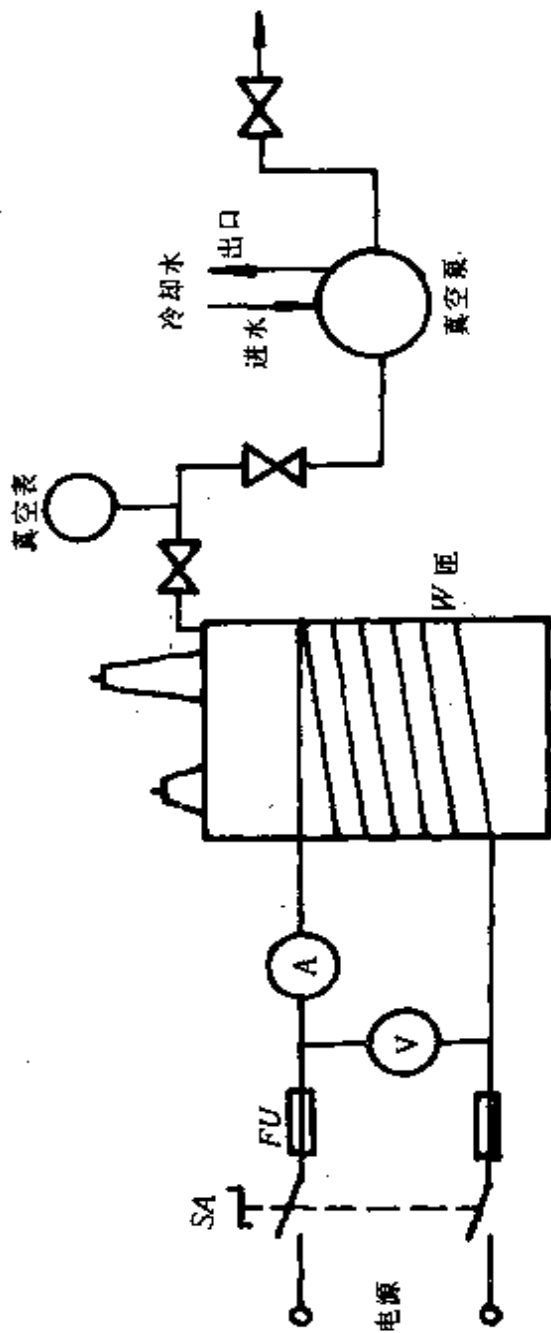


图 3—62 涡流法干燥变压器示意图

$$W = K \frac{U}{I}, \quad I = k \frac{H}{W} \times 100$$

式中： $P$ ——干燥电源功率(W)；

$W$ ——外绕线圈匝数(匝)；

$F$ ——油箱外表散热面积( $m^2$ )，如有油管可用绝热材料包扎，以其总散热面折扣计算；

$t_0$ ——环境温度( $^{\circ}C$ )；

$U$ ——外加电源电压(V)；

$l$ ——油箱周围长度(m)；

$H$ ——油箱高度(m)；

$K$ 、 $k$ ——系数，由  $P/Hl$  值决定，可由图 3-63 查得。

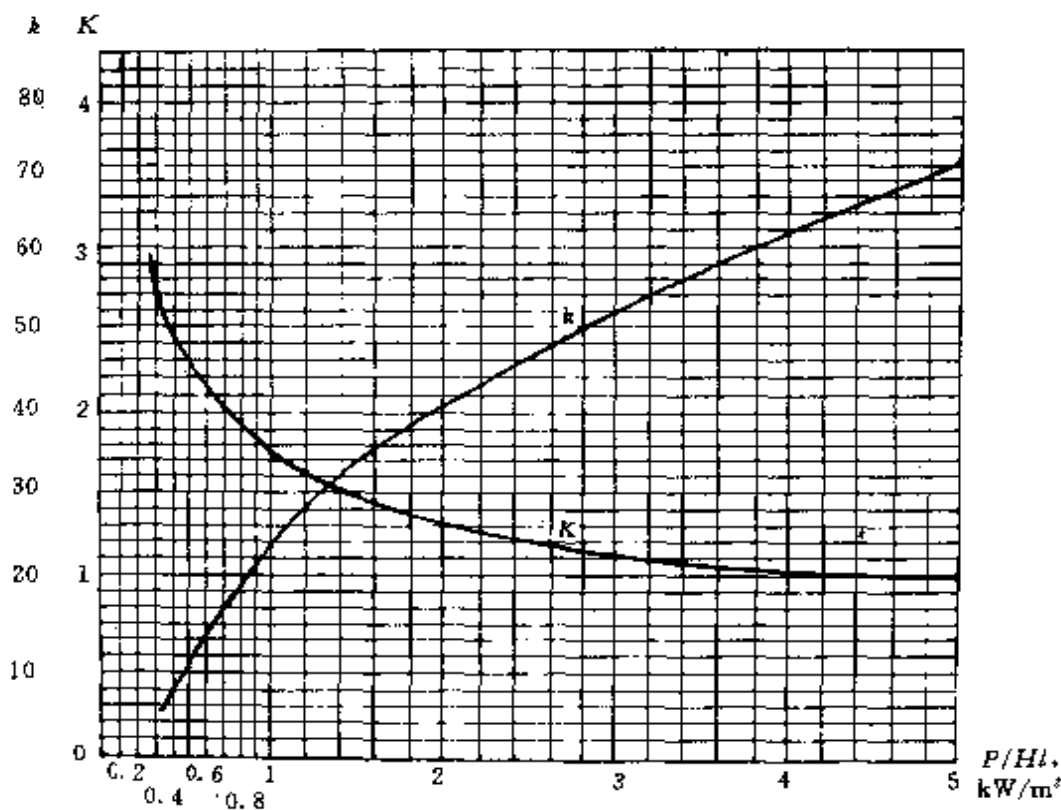


图 3-63 查取系数  $K$ 、 $k$  的曲线

实用上电流采用约 150A 较为合适,可采用 25~35mm<sup>2</sup> 的铜导线。

## 2. 注意事项

(1) 由于热量容易向上传递,因此外绕线圈下部要绕得密,愈向上部愈稀,以便使铁壳的上下部温度能保持一致。

(2) 干燥前先在油箱外部包上保温材料,施以 110~220V 的电压,使油箱温度在 100~125℃ 之间,铁芯温度则在 85℃ 左右。

(3) 干燥中待线圈温度升至 85℃ 或绝缘电阻降低至最低值时,即可逐渐抽为真空。真空在 8h 内抽至 66.66kPa。

(4) 有时为了提高干燥效率,缩短时间,可采用内外加热法,即在内部内短路、外路用涡流感应,再抽真空。但短路电流要减少至额定电流的 10~20% 左右,以防过热。

## 二、利用发电机零起升压干燥变压器

该方法适用于具备发电机组的电厂或企业采用。此法经济、方便,变压器可带油干燥。

### 1. 电源容量和施加电压

用交流电时,干燥电源容量按下式计算:

$$P_s = 1.25 P_r U_d \% \times 10^{-2}$$

式中:  $P_s$  —— 干燥电源容量(kVA);

$P_r$  —— 被干燥的变压器额定容量(kVA);

$U_d\%$  —— 被干燥的变压器阻抗电压百分数;

1.25 —— 过负荷系数。

变压器短路绕组中流过额定电流时电源侧施加的电压为

$$U = U_r U_d \% \times 10^{-2}$$

式中:  $U$  —— 施加电压(V);

$U_r$  —— 变压器额定电压(V)。

例如,有一台 SL<sub>7</sub>-800kVA、10/0.4kV 的变压器,  $U_d\% =$

4.5, 则干燥电源容量为  $P_1 = 1.25 \times 800 \times 4.5 \times 10^{-2} = 45$  (kVA); 变压器高压侧绕组短路, 低压侧施加的电压为  $U = 380 \times 4.5 \times 10^{-2} \approx 17\text{V}$ 。

### 2. 干燥前的主要准备工作

(1) 将变压器高压绕组短路, 短接线应有足够大的截面。

(2) 变压器油面高度要保持在稍低于散热管上口处。无散热管者, 则要保持正常工作时的油位。

(3) 变压器顶盖上要留有排气孔, 便于排去潮气。

(4) 油箱阀门要关闭, 以减少散热损失。

### 3. 注意事项

(1) 升压要缓慢。

(2) 干燥开始时, 可使用较大的电流加热(约为额定电流的 120~125%), 控制温度为每小时 5~10°C; 当油面温度达到 60°C 时, 改用额定电流, 到 70°C, 再降低到 80% 的额定电流, 最后控制温度不超过 80°C, 以避免油质老化。

(3) 干燥时要密切监视变压器油温, 并记录电压、电流、温度和绝缘数值等。每 4h 测量绝缘电阻和油耐压试验, 当油的击穿电压呈稳定状态, 绝缘电阻也连续 6h 保持稳定, 即可停止干燥。

(4) 如果带油干燥不能改善绝缘测定的结果, 应换用无油干燥。

## 三、电炉加热干燥变压器计算

计算公式与第五章第七节电动机热风干燥法的计算公式相同。

加热干燥的注意事项同前。 $t_2$  温度, 根据国标 GB1232—82 《电气装置安装工程施工及验收规范》规定不超过 100°C, 但制造厂家也有采用 100~105°C 的。湿空气排出温度保持在 85~90°C。

## 第四章 电容器及无功补偿

### 第一节 电容器和无功补偿容量的计算

#### 一、电容器运行规定和技术性能

##### 1. 移相电容器运行的一般规定

(1)额定电压:移相电容器的额定电压原则上应等于电网的额定电压。选用时,对于额定电压为0.22、0.38、3.6和10kV的电网,电容器的额定电压为0.23、0.4、3.15、6.3和10.5kV。

(2)运行温度:安装运行地区环境空气温度范围为 $-50\sim+55^{\circ}\text{C}$ 。电容器按适应环境空气温度分为若干类别。其下限温度(为电容器要以投入运行的最低环境空气温度)有 $+5^{\circ}\text{C}$ 、 $-5^{\circ}\text{C}$ 、 $-25^{\circ}\text{C}$ 、 $-40^{\circ}\text{C}$ 和 $-50^{\circ}\text{C}$ 五种;上限温度(为电容器可以在其中连续运行的最高环境空气温度)由代号A、B、C、D表示,见表4-1。

电容器运行时的冷却空气温度应不超过相应温度类别的最高环境空气温度加 $5^{\circ}\text{C}$ 。

表4-1 GB3983—83中规定的上限温度

代号	环境空气温度( $^{\circ}\text{C}$ )		
	最高	24h 平均最高	年平均最高
A	40	30	20
B	45	35	25
C	50	40	30
D	55	45	35



(3)海拔高度:电容器一般应在海拔高度不超过 1000m 的地区使用。对于海拔高度超过 1000m 的地区,由制造厂另外提供高原型电容器。

(4)过电压:电容器能在 1.1 倍额定电压下长期运行,并能在 1.15 倍额定电压下每 24h 中运行 30min;在 1.2 倍额定电压下运行 5min;在 1.36 倍额定电压下运行 1min。但应尽量避免最高环境温度与瞬时过电压同时出现。

以上过电压以不使过电流超过(5)条规定之值为准。

当电容器组接成星形而中心点不接地时,相间的电容之差一般不应超过 5%,以防止在电容较小的一相上产生较高的过电压。

(5)过电流:电容器能在不超过其额定电流的 1.3 倍下长期运行。这种过电流是过电压和高次谐波造成的。对于具有最大正偏差的电容器,这个过电流允许达到 1.43 倍额定电流。

(6)铁磁谐振:为了避免铁磁谐振,在投入空载变压器或电抗器前,可暂时切除电容器组。

(7)电容器组断开电源后,规定不论电容器的额定电压高低,在放电电路上经 30s 放电后,电容器两端的电压不应超过 65V。自动切换较频繁的电容器装置,在投入时电容器端头上的残余电压应不高于额定电压的 10%,以免电容器受到过高的过电压。

## 2. 串联电容器运行的一般规定

串联电容器比移相电容器能承受更高的过电压。

(1)当一昼夜平均电压不超过额定电压值时,电容器能在 1.25 倍额定电压下连续运行 4h。

(2)在正常运行条件下,能在 1.5 倍额定电压下运行 1h,但在电容器的整个使用过程中,这种情况不得超过 10 次。

(3)在正常运行条件下,能在 5 倍额定电压下运行 0.2s,但



在电容器的整个使用过程中,这种情况不得超过 30 次。

(4)在正常工作条件下,电容器在受到 5 倍额定电压下运行 0.2s 后,再受 2.5 倍额定电压作用 30s,但在电容器的整个使用过程中,这种情况不得超过 20 次。

(5)并联放电间隙击穿的整定电压值一般为电容器额定电压的 2.5 倍左右。

(6)电容器放电时,以并联电感和电阻作阻尼装置,应使放电电流的峰值小于电容器额定电流有效值的 50 倍。

3. 电容器的技术性能(表 4—2 和表 4—3)。

表 4—2 移相电容器技术数据

型 号	额定电压 (kV)	额定容量 (kVar)	额定电容 ( $\mu\text{F}$ )	出厂试验电压 (kv)		内部接线	重量 (kg)
				极间	对地		
YY0.23-4-3	0.23	4	240	0.5	2	每组 10 并, 3 组接成 $\Delta$  30 并	23
0.23-4-3 TH							
0.23-4-1							
0.23-4-1-TH							
YY0.4-10-3	40	10	200	0.86	2	每组 10 并, 3 组接成 $\Delta$  30 并  每组 10 并, 3 组接成 $\Delta$  30 并	23
0.4-10-1		9	180				
0.4-9-3-TH							
0.4-9-1 TH							

(续表)

型 号	额定电压 (kV)	额定容量 (kVar)	额定电容 ( $\mu\text{F}$ )	出厂试验电压 (kV)		内部接线	重量 (kg)
				极间	对地		
0.525-10-3	0.525	10	116	1.13	2	每组 10 并, 3 组接成 $\Delta$	23
0.525-10-1						30 并	
0.525-9-3-TH		9	104			每组 10 并, 3 组接成 $\Delta$	
0.525-9-1-TH						30 并	
YY1.05-10-1	1.05	10	29	2.26	5	20 并	23
1.05-10-1-TH							
3.15-10-1	3.15	10	3.21	6.8	18	6 并 4 串	23.5
3.15-10-1-TH							
YY6.3-10-1	6.3	10	0.802	13.6	25	3 并 8 串	24
6.3-10-1-TH							
10.5-10-1	10.5	10	0.29	22.6	35	2 并 14 串	25
10.5-10-1-TH							

(续表)

型 号	额定电压 (kV)	额定容量 (kVar)	额定电容 ( $\mu\text{F}$ )	出厂试验电压 (kV)		内部接线	重量 (kg)
				极间	对地		
YYW3.15-9-1	3.15	9	2.89	6.8	18	6并4串	27
3.15-9-1-TH							
6.3-9-1	6.3	9	0.721	13.6	25	3并8串	27
6.3-9-1-TH							
10.5-9-1	10.5	9	0.26	22.6	35	2并14串	28
10.5-9-1-TH							
YLW6.3-25-1	6.3	25	2	13.6	25		31.5
6.3-25-1-TH							
6.3-50-1		50	4				54.5
6.3-50-1-TH							
YLW10.5-25-1	10.5	25	0.745	22.6	35		35.5
10.5-25-1-TH							
10.5-50-1		50	1.49				59
10.5-50-1-TH							

注:Y—移相,Y—油浸,W—户外式,L—氯化联苯浸渍,TH—湿热带用。

表 4-3 串联补偿电容器技术数据

型 号	额定电压 (kV)	额定容量 (kVar)	额定电容 ( $\mu\text{F}$ )	重 量 (kg)
CY0.6-10-1	0.6	10	88.5	21
CY0.6-20-1	0.6	20	177	40
CL0.6-20-1	0.6	20	177	23.5
CL0.6-40-1	0.6	40	354	44.5
CY1-10-1	1	10	31.8	21
CY1-20-1	1	20	63.6	40
CL1-20-1	1	20	63.6	23.5
CL1-40-1	1	40	127.2	44.5
CL1-45-1	1	45	143.2	58

注：C—串联；Y—油浸；L—氯化联苯浸渍。

## 二、电容测算和保护元件计算

### 1. 电容器的静电电容量和 kVar 容量

$$C = 0.0885 \epsilon_r \frac{S}{b} \times 10^6$$

$$Q = 2\pi f C U^2 \times 10^9$$

式中：C——电容器的静电电容量，简称电容量( $\mu\text{F}$ )；

Q——电容器的 kVar 容量，简称电容器容量(kVar)；

$\epsilon_r$ ——介质的相对介电系数，油浸纸介  $\epsilon_r$ ，当用矿物性绝缘油时为 3.5~4.5；当用合成绝缘油时为 5~7；

S——电极的有效面积( $\text{cm}^2$ )；

b——介质厚度(cm)；

f——电源频率(Hz)；

U——电源电压(V)。

### 2. 电介质损耗公式

$$P = 2\pi f C_0 \epsilon t_g \delta U^2 \times 10^{-6} = 2\pi f C t_g \delta U^2 \times 10^{-6}$$

式中： $P$ ——电介质损耗(W)；

$C_0$ ——无电介质时的静电电容( $\mu\text{F}$ )；

$C$ ——有电介质时的静电电容( $\mu\text{F}$ )；

$\epsilon$ ——电介质的介电系数；

$\delta$ ——放入电介质时充电电流的相位比  $90^\circ$  超前一个小的角度，即介质损耗角；

其它符号同前。

$t_g \delta$  为介质损耗因数，见第一章第二节九、3 项。介质损耗因数与介质种类、工作电压、频率及温度有关。

### 3. 电容器电容量的测算

用电压、电流表法测量电容器电容量，如图 4-1 所示。

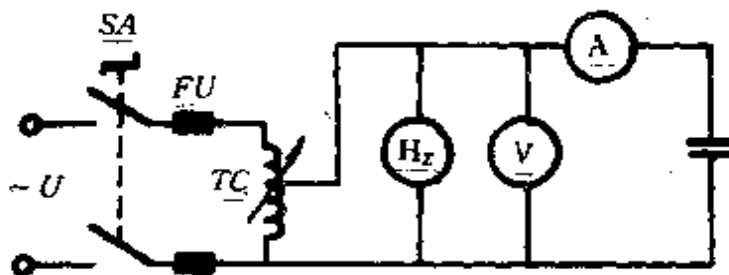


图 4-1 电压、电流表法电容器电容量

外加电源频率为  $f = 50\text{Hz}$  时

$$C = \frac{I \times 10^6}{314U}, \quad I = U/X_c = 2\pi fCU \times 10^{-6}$$

式中： $C$ ——电容器电容量( $\mu\text{F}$ )；

$U$ ——外加电容器两端的电压(V)；

$I$ ——通过电容器的电流(A)。

上述方法可用于测定单相电容器和三相电容器的电容量。在测定三相电容器时，要将电容器三个接线端子中的两个端子

短接,然后轮流一一测定未短接接线端子与短接的两端子间的电容量(图 4-2、表 4-4),根据电容器的不同接法按表 4-5 和表 4-6 算出所测电容器的电容量。

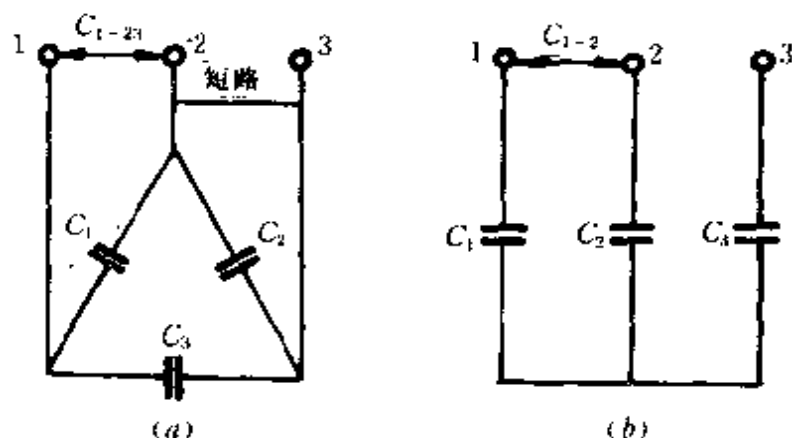


图 4-2 电容器测量示意图

(a)△接法 (b)Y 接法

表 4-4 三相电容器电容量的测定方法

短路接线头	测量电容出线头	测量电容符号
2-3	1-2,3	$C_{1-23}$
1-2	3-1,2	$C_{3-12}$
1-3	2-1,3	$C_{2-13}$

表 4-5 △接法电容器电容量计算方法

每相电容量计算公式	三相电容总电容量计算公式
$C_1 = \frac{1}{2}(C_{1-23} + C_{2-13} - C_{3-12})$	$C = \frac{1}{2}(C_{1-23} + C_{3-12} + C_{2-13})$
$C_2 = \frac{1}{2}(C_{3-12} + C_{2-13} - C_{1-23})$	
$C_3 = \frac{1}{2}(C_{1-23} + C_{2-13} - C_{3-12})$	

表 4—6 Y 接法电容器电容量计算方法

每相电容量计算公式	三相电容总电容量计算公式
$C_1 = \frac{2C_{1-2}C_{2-3}C_{3-1}}{C_{3-1}C_{2-3} + C_{1-2}C_{2-3} - C_{1-2}C_{3-1}}$ $C_2 = \frac{2C_{1-2}C_{2-3}C_{3-1}}{C_{3-1}C_{2-3} + C_{1-2}C_{3-1} - C_{1-2}C_{2-3}}$ $C_3 = \frac{2C_{1-2}C_{2-3}C_{3-1}}{C_{1-2}C_{2-3} + C_{1-2}C_{3-1} - C_{3-1}C_{2-3}}$	$C = C_1 + C_2 + C_3$

所加电源电压为电容器的工作电压,电容器实测电容量与铭牌标称值之偏差,不应大于±10%。

测试时要注意监视电源频率,如果电源频率相差较多时,则需核算公式。

#### 4. 移相电容器组有功和无功功率的测算

移相电容器是一种低功率因数的三相基本平衡的容性负荷,其有功和无功功率可用两只单相电度表按图 4—3(a)所示的接线正确测量。

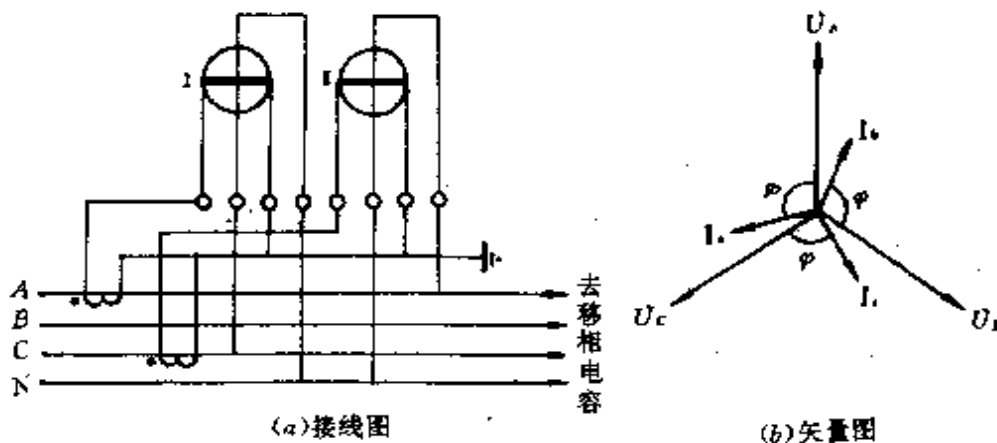


图 4—3 电容器有功和无功功率的测量

由矢量图可知:两只电度表所测得的电量分别为

$$\begin{aligned} W_2 &= U_c I_a t \cos(120^\circ - \varphi) \\ &= -\frac{\sqrt{3}}{6} U I t \cos \varphi + \frac{1}{2} U I t \sin \varphi \\ W_1 &= -U_A I_c t \cos(\varphi - 60^\circ) \\ &= \frac{\sqrt{3}}{6} U I t \cos \varphi + \frac{1}{2} U I t \sin \varphi \end{aligned}$$

式中:  $U_A, U_C$ ——A相、C相的相电压(V);

$I_a, I_c$ ——A相、C相的相电流(二次侧)(A);

$I$ ——由于三相负荷基本平衡,故  $I_a = I_b = I_c = I$ ;

$t$ ——时间(h)

当  $\varphi \leq 90^\circ$  时,  $W_2 \leq 0.5 U I t$ ;  $W_1 \geq 0.5 U I t$ 。

两只电度表测得的电量之差的绝对值为

$$|W_2 - W_1| = \frac{\sqrt{3}}{3} U I t \cos \varphi$$

若将上式乘以3,再乘以电流互感器的倍率  $K_{TA}$ (如果还有电压互感器的,则还应乘以电压互感器倍率  $K_{TV}$ ),即为移相电容器所消耗的有功电能。此电能值除以计量期间所用时间  $t$ ,即为电容器的有功功率。

两只电度表测得的电量之和为

$$W_2 + W_1 = U I t \sin \varphi$$

将此值乘以  $\sqrt{3}$ (还需乘以  $K_{TA}$  及  $K_{TV}$ ),即为移相电容器所输出的无功电能。此电能值除以计算期间所用时间  $t$ ,即为电容器输出的无功功率。

#### 4. 移相电容器组放电电阻的计算

为了保证安全操作及减少冲击电流,应设法在电容器与电源断开后,在电容器两端并联一个放电电阻,将电容器上的电荷快速放掉。根据电容器运行规定,电容器在经过30s放电后,其



外接线端子间的剩余电压应降低到 65V 以下。通常,380V 及以下的低压电容器组,采用白炽灯作为放电电路;3.3~11kV 高压电容器组,常采用接成 V 形的单相电压互感器或三相电压互感器作为放电电路

(1)用电阻作为放电电路的计算:

电容器放电时间为

$$t=2.3RCI_g \frac{\sqrt{3}U}{u_c}$$

式中:  $t$ ——电容器放电时间(s);

$R$ ——放电电阻( $\Omega$ );

$C$ ——每相的电容量(F);

$U$ ——电网线电压(V);

$u_c$ ——电容器上的电压(V)。

当电容器组为三角形接法时,每相电容量为

$$C=\frac{Q_c \times 10^{-9}}{3\omega U^2}$$

当电容器组为星形接法时,每相电容量为

$$C=\frac{Q_c \times 10^{-9}}{\omega U^2}$$

式中:  $C$ ——电容器组每相电容量(F);

$Q_c$ ——移相电容器总容量(kVar);

$\omega$ ——角频率(rad/s);

$U$ ——同前。

当  $U=380V$ ,要求  $u_c=65V$  和放电时间不大于  $t=30s$  时,根据以上各式可得:

①放电电阻采用三角形接法时,每相放电电阻为

$$R_{\Delta} \leq \frac{193 \times 10^4}{Q_c}$$

②放电电阻采用星形接法时,计算时必须将放电电阻换算为相应的三角形接法时对称电路的阻值,这时每相放电电阻为

$$R_Y = \frac{R_{\Delta}}{3} \leq \frac{64.3 \times 10^4}{Q_c}$$

(2)用电感性负载作为放电电路的计算:设放电电路的电阻为  $R(\Omega)$  与电感为  $L(H)$ :

①当  $R \geq 2 \sqrt{L/C}$  时,放电电流为非周期性的单向电流,放电时间可按上述公式计算。

(2)当  $R < 2 \sqrt{L/C}$  时,放电电流为周期性的振荡电流,放电时间按下式计算:

$$t = 4.6 \frac{L}{R} \lg \frac{\sqrt{2}U}{u_c}$$

**例 4—1** 现有一三角形联接的电容器组 96kVar,电网电压为 380V,试分别计算其放电电阻在三角形和星形接法时的电阻值。

**解** 由已知参数可求得每相放电电阻为:

当放电电阻采用三角形接法时

$$R_{\Delta} \leq \frac{193 \times 10^4}{96} = 2 \times 10^4 (\Omega)$$

当放电电阻采用星形接法时

$$R_Y \leq \frac{64.3 \times 10^4}{96} = 6.5 \times 10^3 (\Omega)$$

**例 4—2** 现有一星形联接的电容器组 600kVar,电网电压为 6kV,放电电路是由接成 V 形的两个单相电压互感器所组成(图 4—4),电压互感器的一次侧电阻是 1970 $\Omega$ ,电感是 1910

享,试计算放电电路是否符合要求。

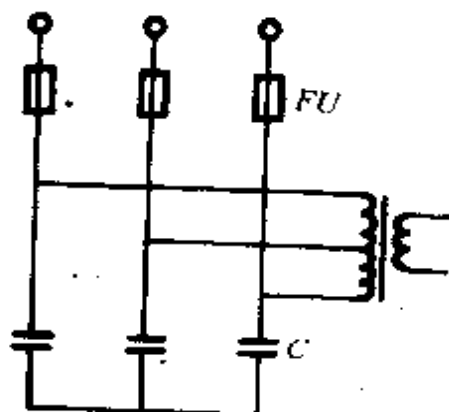


图 4-4 例 4-2 接线图

**解** 电容器组为星形联接,所以每相电容量为

$$C = \frac{Q_c \times 10^{-9}}{\omega U^2} = \frac{600 \times 10^{-9}}{314 \times 6^2} = 53.1 \times 10^{-6} (\text{F})$$

由于放电电路为非对称电路,所以放电电路的计算电容为  $C/2$ ,即  $53.1 \times 10^{-6} / 2 = 26.5 \times 10^{-6} \text{F}$  (如果电容器是三角形联接,则为  $1.5C$ )。

放电电路是由两个绕组串联,所以放电电路的参数为

$$R = 2 \times 1970 = 3940 (\Omega), L = 2 \times 1910 = 3820 (\text{H})$$

故 
$$\sqrt{\frac{L}{C}} = \sqrt{\frac{3820}{26.5 \times 10^{-6}}} = 12000 (\Omega)$$

而  $3940 < 2 \times 12000$ ,即  $R < 2 \sqrt{L/C}$ ,放电电流是周期性振荡电流,所以放电时间为

$$\begin{aligned} t &= 4.6 \frac{L}{R} \lg \frac{\sqrt{2} U}{u_c} = 4.6 \frac{3820}{3940} \lg \frac{\sqrt{2} \times 6000}{65} \\ &= 9.4 (\text{s}) \end{aligned}$$

小于 30s,放电电路符合安全要求。

表 4—7 高压电容器熔丝选择表

型 号	额定电压 (kV)	相 数	熔丝额定电流 (A)	熔丝直径 (mm)
YY3.15-10-1	3.15	1	3	1 根 0.15
YY6.3-10-1	6.3	1	2	1 根 0.1
YY10.5-10-1	10.5	1	2	1 根 0.1
YY3.15-12-1	3.15	1	3	1 根 0.15
YY6.3-12-1	6.3	1	2	1 根 0.1
YY10.5-12-1	10.5	1	2	1 根 0.1
YY3.15-14-1	3.15	1	5	2 根 0.15
YY6.3-14-1	6.3	1	2	1 根 0.1
YY10.5-14-1	10.5	1	2	1 根 0.1
YY3.15-25-1	3.15	1	7.5	2 根 0.2
YY6.3-25-1	6.3	1	5	2 根 0.15
YY10.5-25-1	10.5	1	3	1 根 0.15
YY6.3-50-1	6.3	1	15	3 根 0.25
YY10.5-50-1	10.5	1	10	2 根 0.20

### 5. 高压电容器熔丝的选择

保护 1kV 以上的电容器的熔断器熔丝按电容器之额定电流来选择(见表 4—7),不宜过大,以防止电容器油箱爆炸。

### 三、功率因数和无功补偿容量的计算

#### 1. 功率因数的测算

(1)功率因数可以从所接电网的功率因数表中直接读出。

(2)没有装功率因数表的企业,可以从所装的有功和无功电度表的读数求出其功率因数。即

$$\cos\varphi = \sqrt{\frac{1}{1+\operatorname{tg}^2\varphi}} = \frac{A_p}{\sqrt{A_p^2 + A_Q^2}} = \frac{1}{\sqrt{1+(A_Q/A_p)^2}}$$

上式关系可作成表格的形式,见表4—8。

当记录某段时间内所消耗的有功电能和无功电能后,便可得到该时间内的加权平均功率因数。

表4—8 无功电度/有功电度与功率因数对照表

$A_Q/A_p = \operatorname{tg}\varphi$	$\cos\varphi$	$A_Q/A_p = \operatorname{tg}\varphi$	$\cos\varphi$
1.01~1.03	0.70	0.59~0.60	0.86
0.98~1.00	0.71	0.56~0.58	0.87
0.95~0.97	0.72	0.53~0.55	0.88
0.93~0.94	0.73	0.50~0.52	0.89
0.90~0.92	0.74	0.48~0.49	0.90
0.87~0.89	0.75	0.45~0.47	0.91
0.85~0.86	0.76	0.42~0.44	0.92
0.82~0.84	0.77	0.38~0.41	0.93
0.79~0.81	0.78	0.35~0.37	0.94
0.77~0.78	0.79	0.32~0.34	0.95
0.74~0.76	0.80	0.28~0.31	0.96
0.72~0.73	0.81	0.23~0.27	0.97
0.69~0.71	0.82	0.18~0.22	0.98
0.66~0.68	0.83	0.11~0.17	0.99
0.64~0.65	0.84	0.00~0.10	1.00
0.61~0.63	0.85		

(3)若要计算某瞬时功率因数,可先根据有功电度表和无功电度表按下列公式求出有功功率和无功功率:

$$P = \frac{3600n_1 \times 10^3}{K_p t} \cdot K_{TV} K_{TA}$$

$$Q = \frac{3600n_2 \times 10^3}{K_Q t} \cdot K_{TV} K_{TA}$$

式中： $P$ ——有功功率(kW)；

$Q$ ——无功功率(kVar)；

$n_1、n_2$ ——有功电度表和无功电度表的转数；

$K_p、K_Q$ ——有功电度表和无功电度表的电度表常数(r/kWh)；

$t$ ——有功电度表和无功电度表所走的时间(s)，即测试时间；

$K_{TV}$ ——电压互感器变比；

$K_{TA}$ ——电流互感器变比。

然后，根据前述的公式或表 4—8 中的  $\text{tg}\varphi$  值，便可求得瞬时功率因数。

**例 4—3** 某企业 10kV 配电室电源进线装有有功和无功电度表。已知月用电量有功为 25000kWh，无功为 8500kVarh，求该企业该月的加权平均功率因数。

**解**

(1) 计算法：

$$\text{tg}\varphi = \frac{A_Q}{A_p} = \frac{8500}{15000} = 0.57$$

故月加权平均功率因数为

$$\cos\varphi = \sqrt{\frac{1}{1 + \text{tg}^2\varphi}} = \sqrt{\frac{1}{1 + 0.57^2}} = 0.87$$

(2) 查表法：

因为  $A_Q/A_p = 0.57$ ，查表得月加权平均功率因数 0.87。

**例 4—4** 某企业配电室电源进线电压互感器变比为 10000/100, 电流互感器变比为 100/5。现测得有功电度表铝盘转 35 转, 走时 20s; 无功电度表铝盘转 5 转, 走时 15.5s。由电度表铭牌可知, 有功、无功电度表常数均为 2500r/kWh (或 r/kVarh)。试求瞬间功率因数。

**解**

(1) 计算法:

有功功率为

$$P = \frac{3600 \times 35 \times 10^3}{2500 \times 20} \times 10000/10 \times 100/5 \\ = 5040(\text{kW})$$

无功功率为

$$Q = \frac{3600 \times 35 \times 10^3}{2500 \times 15.5} \times 10000/10 \times 100/5 \\ = 929(\text{kVar})$$

得瞬时功率因数为

$$\cos\varphi = \frac{5040}{\sqrt{5040^2 + 929^2}} = 0.98$$

(2) 查表法:

因为  $Q/P=0.184$ , 查表 4—8 得瞬时功率因数为 0.98。

## 2. 无功补偿容量的确定

(1) 关于《功率因数调整电费办法》的规定: 为了提高电网的经济运行水平, 减少线损, 提高供电质量, 水利电力部和国家物价局颁布了《功率因数调整电费办法》的规定。规定指出: 大于 160kVA 的高压供电工业用户(包括社队工业用户), 装有带负

荷调整电压装置的高压供电用户,以及不小于 3200kVA 的高压供电电力排灌站均执行以 0.9 为标准值的功率因数调整电费表,见表 4-9。不小于 100kVA 的其它工业用户(包括社队工业用户),非工业用户,电力排灌站和未划归由电业直接管理的大工业趸售用户均执行以 0.85 为标准值的功率因数调整电费表。并且对用户的功率因数进行考核。凡用户实际月平均功率因数超过或低于标准值功率因数时,电费按功率因数调整电费表所订的增减百分比值计算收费。

表 4-9 以 0.9 为标准值的功率因数调整电费表

减收电费	实际功率因数	0.90	0.91	0.92	0.93	0.94	0.95~1.00								
	月电费减少 (%)	0.0	0.15	0.30	0.45	0.60	0.75								
增收电费	实际功率因数	0.89	0.88	0.87	0.86	0.85	0.84	0.83	0.82	0.81	0.80	0.79	0.78	0.77	0.76
	月电费增加 (%)	0.5	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0	3.5	4.0	4.5	5.0	5.5	6.0	6.5	7.0
增收电费	实际功率因数	0.75	0.74	0.73	0.72	0.71	0.70	0.69	0.68	0.67	0.66	0.65	≤0.64		
	月电费增加 (%)	7.5	8.0	8.5	9.0	9.5	10.0	11.0	12.0	13.0	14.0	15.0	功率因数每降低 0.01 电费增加 2%		



(2)改善功率因数的最佳值确定:企业最后用电功率因数的最佳经济效益,与每KVA视在功率的设备费用和安装电容器进行无功补偿的设备费用有关。为寻求最适宜的功率因数,一般可参照下式来确定:

$$\cos\varphi = \sqrt{1 - \left(\frac{C_p}{C_c}\right)^2}$$

式中: $C_p$ ——变配电设备费用(元/kVA)

$C_c$ ——电容器设备费用(元/kVA)

据有关资料介绍,认为  $C_p/C_c > 1.7$  较经济。

改善功率因数的经济分析表明,改善到超过 0.95 很少是合算的。同时,安装第一个 kVar 的无功补偿设备的容量,其效果要比以后安装一个 kVar 的无功补偿设备容量的效果要大些。随着负荷功率因数的提高,继续安装无功补偿设备的效益会越来越小。如功率因数由 0.9 提高到 1 所需的补偿容量与由 0.72 提高到 0.9 时相同,但其经济性显著降低。而当功率因数由 0.95 提高到 1 时所需的补偿容量增加的更多,可能得不偿失。因此将功率因数提高到 1 是不合适的。

电容补偿的回收期一般不大于 3 年。

(3)补偿容量的确定:补偿容量的大小决定于电力负荷的大小、补偿前负荷的功率因数以及补偿后提高的功率因数值。补偿容量  $Q_c$  可按下列式计算:

$$Q_c = P_{ap}(\operatorname{tg}\varphi_1 - \operatorname{tg}\varphi_2)$$

式中: $Q_c$ ——无功补偿容量(kVar);

$P_{ap}$ ——年平均功率(kW);

$\operatorname{tg}\varphi_1$ ——改善前功率因数角的正切值;

$\operatorname{tg}\varphi_2$ ——改善后功率因数角的正切值。

为了计算方便起见,可查表 4—10。

表 4—10 1kW 功率所需补偿电容器的补偿容量(kVar)

$\cos\phi_2$ \ $\cos\phi_1$	0.80	0.81	0.82	0.83	0.84	0.85	0.86	0.87	0.88	0.89
0.40	1.54	1.57	1.60	1.62	1.65	1.67	1.70	1.73	1.75	1.78
0.41	1.47	1.50	1.53	1.55	1.58	1.60	1.63	1.66	1.68	1.71
0.42	1.41	1.44	1.47	1.49	1.52	1.54	1.57	1.60	1.62	1.65
0.43	1.35	1.38	1.41	1.43	1.46	1.48	1.51	1.54	1.56	1.59
0.44	1.29	1.32	1.34	1.37	1.39	1.41	1.44	1.47	1.50	1.53
0.45	1.23	1.26	1.29	1.31	1.34	1.36	1.39	1.42	1.44	1.47
0.46	1.18	1.21	1.23	1.26	1.28	1.31	1.36	1.38	1.39	1.42
0.47	1.12	1.15	1.18	1.20	1.23	1.26	1.28	1.31	1.34	1.36
0.48	1.08	1.10	1.12	1.16	1.18	1.21	1.23	1.26	1.29	1.31
0.49	1.04	1.06	1.09	1.12	1.14	1.17	1.19	1.22	1.25	1.27
0.50	0.98	1.01	1.04	1.06	1.09	1.11	1.15	1.17	1.19	1.22
0.51	0.94	0.97	0.99	1.02	1.04	1.07	1.11	1.13	1.16	1.19
0.52	0.89	0.92	0.94	0.97	1.00	1.02	1.05	1.08	1.10	1.13
0.53	0.84	0.88	0.90	0.93	0.95	0.98	1.01	1.03	1.06	1.09

(续表)

$\cos\varphi_2 \backslash \cos\varphi_1$	0.80	0.81	0.82	0.83	0.84	0.85	0.86	0.87	0.88	0.89
0.54	0.81	0.84	0.86	0.89	0.91	0.94	0.97	0.99	1.02	1.05
0.55	0.77	0.79	0.82	0.85	0.87	0.90	0.92	0.95	0.98	1.00
0.56	0.72	0.76	0.78	0.81	0.83	0.86	0.89	0.91	0.94	0.97
0.57	0.69	0.72	0.75	0.77	0.80	0.82	0.85	0.88	0.90	0.93
0.58	0.66	0.68	0.71	0.73	0.76	0.79	0.81	0.84	0.87	0.89
0.59	0.62	0.65	0.67	0.70	0.72	0.75	0.78	0.80	0.83	0.86
0.60	0.58	0.61	0.64	0.66	0.69	0.71	0.74	0.77	0.79	0.82
0.61	0.55	0.58	0.60	0.63	0.65	0.68	0.71	0.73	0.76	0.79
0.62	0.51	0.54	0.57	0.59	0.62	0.65	0.67	0.70	0.73	0.75
0.63	0.48	0.51	0.54	0.56	0.59	0.61	0.64	0.67	0.69	0.72
0.64	0.45	0.48	0.50	0.53	0.56	0.58	0.61	0.64	0.66	0.69

(续表)

$\cos\varphi_1 \backslash \cos\varphi_2$	0.90	0.91	0.92	0.93	0.94	0.95	0.96	0.97	0.98	0.99	1.0
0.40	1.81	1.84	1.87	1.90	1.93	1.97	2.00	2.04	2.09	2.15	2.29
0.41	1.74	1.77	1.80	1.83	1.86	1.90	1.93	1.98	2.02	2.08	2.22
0.42	1.68	1.71	1.74	1.77	1.80	1.84	1.87	1.91	1.96	2.02	2.16
0.43	1.62	1.65	1.68	1.71	1.74	1.78	1.81	1.85	1.91	1.96	2.10
0.44	1.55	1.58	1.61	1.65	1.68	1.71	1.75	1.79	1.84	1.90	2.04
0.45	1.50	1.53	1.56	1.59	1.62	1.66	1.70	1.74	1.78	1.84	1.99
0.46	1.44	1.48	1.50	1.54	1.57	1.60	1.64	1.68	1.73	1.79	1.93
0.47	1.39	1.42	1.46	1.49	1.52	1.56	1.60	1.64	1.68	1.75	1.88
0.48	1.34	1.37	1.40	1.43	1.46	1.50	1.54	1.58	1.62	1.69	1.83
0.49	1.30	1.33	1.36	1.39	1.42	1.46	1.50	1.54	1.58	1.65	1.79
0.50	1.25	1.28	1.31	1.34	1.37	1.40	1.44	1.48	1.53	1.59	1.73
0.51	1.21	1.24	1.27	1.31	1.34	1.37	1.41	1.45	1.50	1.56	1.69
0.52	1.16	1.19	1.21	1.25	1.28	1.31	1.35	1.39	1.44	1.50	1.64
0.53	1.11	1.14	1.17	1.21	1.24	1.27	1.31	1.35	1.40	1.46	1.60

(续表)

$\cos\varphi_1 \backslash \cos\varphi_2$	0.90	0.91	0.92	0.93	0.94	0.95	0.96	0.97	0.98	0.99	1.0
0.54	1.07	1.10	1.13	1.17	1.20	1.23	1.27	1.31	1.36	1.42	1.56
0.55	1.03	1.06	1.09	1.12	1.15	1.19	1.23	1.27	1.31	1.38	1.52
0.56	0.99	1.02	1.05	1.09	1.12	1.15	1.19	1.23	1.28	1.34	1.48
0.57	0.96	0.99	1.02	1.05	1.08	1.11	1.15	1.19	1.24	1.30	1.44
0.58	0.92	0.95	0.98	1.01	1.04	1.08	1.12	1.16	1.20	1.27	1.41
0.59	0.88	0.91	0.94	0.98	1.01	1.04	1.08	1.12	1.17	1.23	1.37
0.60	0.85	0.88	0.91	0.94	0.97	1.01	1.04	1.09	1.13	1.19	1.33
0.61	0.81	0.84	0.87	0.91	0.94	0.97	1.01	1.05	1.10	1.16	1.30
0.62	0.78	0.81	0.84	0.87	0.90	0.94	0.98	1.02	1.06	1.13	1.27
0.63	0.75	0.78	0.81	0.84	0.87	0.90	0.94	0.98	1.03	1.09	1.23
0.64	0.72	0.75	0.77	0.81	0.84	0.87	0.91	0.95	1.00	1.06	1.20

(续表)

$\cos\phi_2 \backslash \cos\phi_1$	0.80	0.81	0.82	0.83	0.84	0.85	0.86	0.87	0.88	0.89
0.65	0.42	0.44	0.47	0.50	0.52	0.55	0.57	0.60	0.63	0.66
0.66	0.39	0.42	0.44	0.47	0.49	0.52	0.55	0.57	0.60	0.63
0.67	0.36	0.38	0.41	0.44	0.46	0.49	0.51	0.54	0.57	0.60
0.68	0.33	0.35	0.38	0.41	0.43	0.46	0.48	0.51	0.54	0.57
0.69	0.30	0.32	0.35	0.38	0.40	0.43	0.45	0.48	0.51	0.54
0.70	0.27	0.30	0.32	0.35	0.38	0.40	0.43	0.46	0.48	0.51
0.71	0.24	0.27	0.30	0.32	0.35	0.37	0.40	0.43	0.45	0.48
0.72	0.21	0.24	0.27	0.29	0.32	0.34	0.37	0.40	0.42	0.45
0.73	0.19	0.21	0.24	0.26	0.29	0.32	0.34	0.37	0.40	0.42
0.74	0.16	0.18	0.21	0.24	0.26	0.29	0.31	0.34	0.37	0.40
0.75	0.13	0.16	0.19	0.21	0.24	0.26	0.29	0.32	0.34	0.37
0.76	0.10	0.13	0.16	0.18	0.21	0.23	0.26	0.29	0.31	0.34
0.77	0.08	0.11	0.13	0.16	0.18	0.21	0.24	0.26	0.29	0.32
0.78	0.05	0.08	0.11	0.13	0.16	0.18	0.21	0.24	0.26	0.29



(续表)

$\cos\varphi_1 \backslash \cos\varphi_2$	0.90	0.91	0.92	0.93	0.94	0.95	0.96	0.97	0.98	0.99	1.0
0.65	0.68	0.71	0.74	0.77	0.80	0.84	0.88	0.92	0.97	1.03	1.17
0.66	0.65	0.68	0.71	0.75	0.78	0.81	0.85	0.89	0.94	1.00	1.14
0.67	0.62	0.65	0.68	0.71	0.74	0.78	0.82	0.86	0.91	0.97	1.11
0.68	0.59	0.62	0.65	0.68	0.71	0.75	0.79	0.83	0.88	0.94	1.08
0.69	0.56	0.59	0.62	0.65	0.68	0.72	0.76	0.80	0.85	0.91	1.05
0.70	0.54	0.57	0.59	0.63	0.66	0.69	0.73	0.77	0.82	0.88	1.02
0.71	0.51	0.54	0.57	0.60	0.63	0.66	0.70	0.74	0.79	0.85	0.99
0.72	0.48	0.51	0.54	0.57	0.60	0.64	0.67	0.71	0.76	0.82	0.96
0.73	0.45	0.48	0.51	0.54	0.57	0.61	0.65	0.69	0.73	0.80	0.94
0.74	0.42	0.45	0.48	0.51	0.54	0.58	0.62	0.66	0.71	0.77	0.91
0.75	0.40	0.43	0.46	0.49	0.52	0.55	0.59	0.63	0.68	0.74	0.88
0.76	0.37	0.40	0.43	0.46	0.49	0.53	0.56	0.61	0.65	0.71	0.85
0.77	0.34	0.37	0.40	0.44	0.47	0.50	0.54	0.58	0.63	0.68	0.83
0.78	0.32	0.35	0.38	0.41	0.44	0.48	0.51	0.55	0.60	0.66	0.80
0.79	0.29	0.32	0.35	0.38	0.41	0.45	0.49	0.53	0.57	0.63	0.78



(续表)

$\cos\varphi_1 \backslash \cos\varphi_2$	0.90	0.91	0.92	0.93	0.94	0.95	0.96	0.97	0.98	0.99	1.0
0.80	0.27	0.30	0.33	0.36	0.39	0.42	0.46	0.50	0.55	0.61	0.75
0.81	0.24	0.27	0.30	0.33	0.36	0.39	0.43	0.47	0.52	0.58	0.72
0.82	0.21	0.24	0.27	0.31	0.34	0.37	0.41	0.45	0.50	0.56	0.70
0.83	0.18	0.21	0.24	0.27	0.31	0.34	0.38	0.42	0.47	0.53	0.67
0.84	0.16	0.19	0.22	0.25	0.28	0.31	0.35	0.39	0.44	0.50	0.64
0.85	0.14	0.17	0.20	0.23	0.26	0.29	0.33	0.37	0.42	0.48	0.62
0.86	0.11	0.14	0.17	0.20	0.23	0.26	0.30	0.34	0.39	0.45	0.59
0.87	0.08	0.11	0.14	0.17	0.20	0.23	0.27	0.31	0.36	0.42	0.56
0.88	0.06	0.09	0.12	0.15	0.18	0.21	0.25	0.29	0.34	0.40	0.54
0.89	0.03	0.06	0.09	0.12	0.15	0.18	0.22	0.26	0.31	0.37	0.51
0.90	—	0.03	0.06	0.09	0.12	0.15	0.19	0.23	0.28	0.34	0.48

由  
此  
表  
查  
得

**例 4-5** 某变电所负荷容量为 5600kW,功率因数为滞后 0.82。现要增加 2000kW、功率因数为滞后 0.79 的新负荷。这些负荷无功功率分别为  $S_1$ 、 $P_1$ 、 $Q_1$ ；新增负荷的各相应值为  $S_2$ 、 $P_2$ 、 $Q_2$ ；改善功率因数用的补偿电容容量为  $Q_c$ ，则使总功率因数提高到 0.9 时的矢量图如图 4-5 所示。其中  $\varphi_1 = \cos^{-1}0.82 = 34.9^\circ$ ， $\varphi_2 = \cos^{-1}0.79 = 37.8^\circ$ ， $\varphi = \cos^{-1}0.9 = 25.8^\circ$ 。

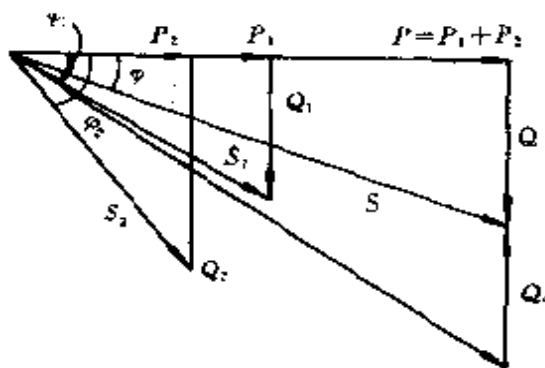


图 4-5 例 4-5 图

总视在功率为

$$S = P / \cos\varphi = (5600 + 2000) / 0.9 \approx 8444 \text{ kVA}$$

无功功率为

$$Q = P \tan\varphi = 7600 \times \tan 25.8^\circ = 3674.0 (\text{kVar})$$

$$Q_1 = P_1 \tan\varphi_1 = 5600 \times \tan 34.9^\circ = 3906.6 (\text{kVar})$$

$$Q_2 = P_2 \tan\varphi_2 = 2000 \times \tan 37.8^\circ = 1551.4 (\text{kVar})$$

因此，补偿电容容量为

$$\begin{aligned} Q_c &= Q_1 + Q_2 - Q \\ &= 3906.6 + 1551.4 - 3674.0 = 1784 (\text{kVar}) \end{aligned}$$

#### 四、采用电容补偿调压的计算

电网电压较低の場合，如农电网，可采用电容补偿来提高电压。电容补偿有并联电容补偿和串联电容补偿两种。

##### 1. 并联电容器补偿容量计算

并联电容器补偿,即在变电所低压母线上接入移相电容器。补偿容量的计算方法同前。也可查表 4—6 确定。

电容器组的额定容量与结线方式有关:

单相结线的电容器总容量为  $Q_c = \omega C U_x^2 \times 10^{-3}$

三相三角形结线的电容器总容量为  $Q_c = 3\omega C U_l^2 \times 10^{-3}$

三相星形结线的电容器总容量为  $Q_c = \omega C U_l^2 \times 10^{-3}$

式中:  $Q_c$ ——补偿容量(kVar);

$C$ ——单相等效电容(uF),当  $n$  个电容器  $C_i$  串联时,  $C = C_i/n$ ; 并联时,  $C = nC_i$ ;

$U_x, U_l$ ——电网相电压和线电压(kV)。

## 2. 串联电容器补偿容量计算

串联电容器补偿容量  $Q_c$  按下式计算:

$$Q_c = P_2 \left\{ \frac{Q_2}{P_2} - \sqrt{\left(\frac{U_1}{U_2}\right) \left[1 + \left(\frac{Q_2}{P_2}\right)^2\right]} - 1 \right\}$$

式中:  $Q_c$ ——补偿容量(kVar);

$P_2$ ——受电端的有功功率(kW);

$Q_2$ ——受电端的无功功率(kVar);

$U_1$ ——线路送电端的电压(kV);

$U_2$ ——线路受电端接入串联电容器后的电压(kV)。

串联电容器的安装地点,应能使沿线电压尽可能均匀,并使沿路分支线各负荷点的电压变化均不超过允许的范围。当线路始端电压  $U_1$  变化不大,而又不使沿线任何一点的电压大于  $U_1$  时,安装地点最好选择在电压降的二分之一处,并选择合适的补偿容量,使接入后该点电压升高到  $U_1$ ,而使线路末端的电压降减小一半。这样,能使沿线其它各点的电压质量都有所改善。

## 五、电网电压对移相电容器影响的计算

### 1. 运行电压升高对移相电容器影响的计算

(1) 运行电压升高对电容器容量的影响:

运行电压升高,会使补偿容量增加。当电容器实际运行电压不等于额定电压时,补偿容量应按下式修正:

$$Q_c = Q_c \left( \frac{U}{U_c} \right)^2$$

式中:  $Q_c$ ——电容器在实际运行电压下的容量(kVar);

$Q_c$ ——电容器的额定容量,即铭牌上的标值(kVar);

$U$ ——电容器实际运行电压(V);

$U_c$ ——电容器的额定电压,即铭牌上的标值(V)。

由上式可见,无功功率  $Q$  与  $U$  的平方成正比,当电容器的运行电压为额定电压的 90% 时,  $Q$  降低了 19%; 而当运行电压为额定电压的 110% 时,  $Q$  增加了 21%。因此,如果 10kV 电容器用于 6kV 系统中,补偿容量将大为降低,不能充分发挥该电容器的作用,这是不经济的。

(2) 运行电压升高对电容器寿命的影响: 运行电压升高,会使电容器的功率损耗和发热随电压值的平方增加,容易损坏电容器及降低其寿命。电压升高 15%, 寿命就要缩短到运行于额定电压时的 32.7~37.6% 左右。因此,严格要求移相电容器运行电压在允许范围之内,是保证电容器安全运行的重要措施。

2. 电网电压波形畸变对移相电容器影响的计算。

随着大功率可控硅整流装置的增多、电解工艺的发展及大容量电动机突然甩负荷等作用,都会使电网电压的波形发生畸变。对电容回路来讲,一般不存在偶次倍数的谐波。此外,中性点不接地星形连接电容器组的相电流和三角形连接电容器组的相电压中,都不包括 3 次及其整数倍的谐波,因此主要考虑 5、7、11、13 等次谐波的影响。

(1)  $n$  次谐波电流计算:

$n$  次谐波电流可按下式计算:

$$I_n = 2\pi fnCU_n$$

式中： $I_n$ —— $n$ 次谐波电流(A)；

$f$ ——基波频率，为50Hz；

$U_n$ —— $n$ 次谐波电压(V)；

$C$ ——电容器容量(F)。

可见， $n$ 次谐波电流占基波电流的比例为 $n$ 次谐波电压占基波电压的比例的 $n$ 倍。因此， $n$ 次谐波电流所造成的电流波形畸变，远比电压波形的畸变严重。

(2) 电容器的损耗计算：

①  $n$ 次谐波产生的无功损耗和有功损耗分别为

$$Q_n = U_n I_n = 2\pi fnCU_n^2 \times 10^{-3} = \frac{I_n^2}{2\pi fnC} \times 10^{-3}$$

$$P_{jxn} = Q_n \operatorname{tg} \delta_n = 2\pi fnCU_n^2 \operatorname{tg} \delta_n \times 10^{-3}$$

式中： $Q_n$ —— $n$ 次谐波产生的无功损耗(kVar)；

$P_{jxn}$ —— $n$ 次谐波产生的有功损耗(介质损耗) (kW)；

$\operatorname{tg} \delta_n$ ——对 $n$ 次谐波频率的介质损失角正切值。

② 电容器组的无功或有功损耗分别为基波电压和各次谐波电压产生的无功或有功损耗的总和。即

$$Q = \sum_1^n Q_n \quad P_{jx} = \sum_1^n P_{jxn}$$

③ 波形畸变引起的功率损耗计算：

由于波形畸变引起的功率损耗可由下式计算：

$$\begin{aligned} P_{bq} &= \sqrt{S^2 - P_{jx}^2 - Q^2} \\ &= \sqrt{(UI \times 10^{-3})^2 - \left(\sum_1^n Q_n\right)^2 - \left(\sum_1^n P_{jxn}\right)^2} \end{aligned}$$

式中： $P_{bq}$ ——波形畸变引起的功率损耗(kW)；

$S$ ——从表计上读得电容器组的视在功率(kVar)， $S =$

$$UI \times 10^{-3};$$

$U$ ——电压表读数(有效值)(V),

$$U = \sqrt{U_1^2 + U_3^2 + \dots + U_n^2};$$

$I$ ——电流表读数(有效值)(A),

$$I = \sqrt{I_1^2 + I_3^2 + \dots + I_n^2};$$

$U_1$ ——基波电压(有效值)(V);

$I_1$ ——基波电流(有效值)(A);

$U_3, \dots, U_n$ ——各次谐波电压(有效值)(V);

$I_3, \dots, I_n$ ——各次谐波电流(有效值)(A)。

**例 4—6** 某网络电压波形包括基波和 5 次谐波,基波电压与额定电压值相等,5 次谐波电压值为额定电压的 26.45%。试分析接于该网络的补偿电容器的运行状况。设电容器产生的有功损耗  $P_{r,c}$  可忽略。

**解** 由于  $U_1 = U_e, U_5 = 26.45\%U_e$ , 则

$$I_5 = 5U_5 \quad \omega_1 C = 1.3225 I_e$$

电压有效值为

$$U = \sqrt{U_1^2 + U_5^2} = \sqrt{1^2 + 0.2645^2} U_e = 1.034 U_e$$

$$I = \sqrt{I_1^2 + I_5^2} = \sqrt{1^2 + 1.3225^2} I_e = 1.656 I_e$$

故电容器的无功功率为

$$Q = \sum_1^n Q_n = \frac{I_e^2}{\omega c} + \frac{(1.3225 I_e)^2}{5 \omega c} = 1.35 Q_{e,c}$$

由于补偿电容器的有功损耗忽略不计,所以从无功功率表上读得的数为

$$S = 1.034 U_e \times 1.656 I_e = 1.712 Q_{e,c}$$

因此,略去  $P_{jx}$  后可算出由于 5 次谐波产生的畸变功率损耗为

$$P_{bq} = \sqrt{S^2 - P_{jx}^2 - Q^2}$$

$$= \sqrt{(1.712Q_c)^2 - (1.35Q_c)^2} = 1.05Q_c$$

计算结果表明,当 5 次谐波电压为额定电压的 26.45%、基波电压与额定电压相等时,电容器组过电压为 3.4%,过电流为 65.6%,电容器的无功出力过负荷为 35%,而无功功率表的读数却为电容器组额定无功功率  $Q_c$  的 171.2%,5 次谐波产生的畸变功率高达电容器额定无功功率的 105%。

## 第二节 设备的无功补偿计算

### 一、企业内无功经济当量的计算

无功功率经济当量简称无功经济当量。其定义是:电力系统中任意一点减少或增加一千乏无功功率后,使系统有功功率损耗减少或增加的千瓦数。即

$$K = \frac{\Delta\Delta P}{Q_1 - Q_2} = \frac{\Delta\Delta P}{\Delta Q}$$

式中:  $K$ ——电力系统中某点的无功经济当量(kW/kVar);

$\Delta\Delta P$ ——电力系统中某点无功功率变化所引起该点至电源之间有功功率损耗的变化量(kW);

$Q_1, Q_2$ ——电力系统中某点无功功率变化前后值(kVar);

$\Delta Q$ ——电力系统中某点无功功率变化量(kVar)。

由上式可知,系统中各处的无功当量是不一样的。距电源越远,因  $\Delta P$  越大,无功当量也就越大;反之,距电源越近,  $\Delta P$  越小,无功当量也就越小。

图 4--6 为某企业供电系统示意图,各部分的等值阻抗标于



图中。

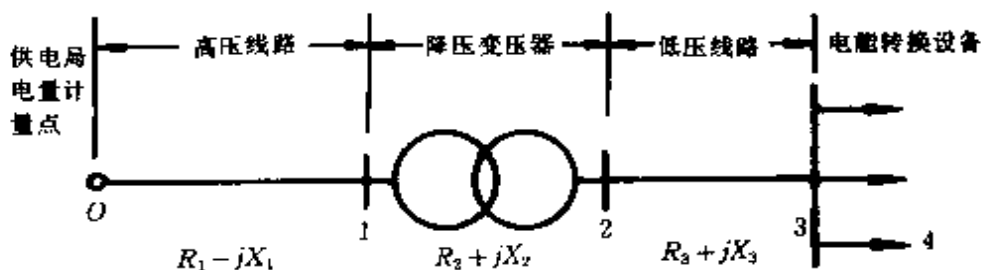


图 4—6 某企业供电系统

如果以供电局电量计量点作为该企业电源,则企业内各处无功当量计算如下:

因为设点 0 为电源,所以该点无功当量为零。

0~1 段高压线路的有功功率损耗为

$$\Delta P = 3I_1^2 R_1 \times 10^{-3} = \frac{P_1^2 + Q_1^2}{U_1^2} R_1 \times 10^{-3}$$

式中:  $\Delta P$ ——有功功率损耗;(kW);

$U_1, I_1$ ——点 1 处三相线电压和线电流(kV、A);

$P_1, Q_1$ ——点 1 处有功功率和无功功率(kW、kVar)。

若点 1 后(包括点 1)任意一处装设补偿电容,使点 1 处的无功功率减少了  $\Delta Q$  千乏,则 0~1 段高压线路有功功率损耗降低到:

$$\Delta P' = 3I_1^2 R_1 \times 10^{-3} = \frac{P_1^2 + (Q_1 - \Delta Q)^2}{U_1^2} R_1 \times 10^{-3}$$

减少了有功损耗  $\Delta \Delta P$  为

$$\Delta \Delta P = \Delta P - \Delta P' = \frac{(2Q_1 - \Delta Q)\Delta Q}{U_1^2} R_1 \times 10^{-3}$$

因此点 1 处的无功当量为

$$K_1 = \frac{\Delta P - \Delta P'}{\Delta Q} = \frac{2Q_1 - \Delta Q}{U_1^2} \times 10^{-3}$$



通常  $Q_1 \gg \Delta Q$ , 所以

$$K_1 \approx \frac{2Q_1 R_1}{U_1^2} \times 10^{-3}$$

同理可得, 点 2 处的无功当量为

$$K_2 \approx K_1 + \frac{2Q_2 R_2}{U_2^2} \times 10^{-3}$$

注意, 对变压器而言,  $R_2$  应折算到  $U_2$  同侧。

点 3 处的无功当量为

$$K_3 \approx K_1 + K_2 + \frac{2Q_3 R_3}{U_3^2} \times 10^{-3}$$

所以, 得点  $m$  处的无功当量为

$$K_m = \sum_{i=1}^{m-1} K_i + \frac{2Q_m R_m}{U_m^2} \times 10^{-3}$$

式中:  $Q_m$ ——点  $m$  处的无功功率(kVar);

$R_m$ ——点  $(m-1)$  至点  $m$  之间等效电阻( $\Omega$ );

$U_m$ ——点  $m$  处的电压(kV)。

如果设法在点  $m$  处减少了  $\Delta Q$  无功功率, 则整个企业共减少有功功率损耗  $K_m \Delta Q$ , 其中第  $m$  级(以  $K_1$  为第一级计算)用

电设备减少有功功率损耗  $(K_m - \sum_{i=1}^{m-1} K_i) \cdot \Delta Q$

图 4—7 为某企业无功电能分布情况, 方框中的数字为该设备在电平衡时间内消耗的无功电量。方框前后数字为该设备输入端和输出端的无功当量(以供电局计量点为参考)。

现以  $J$  点为例, 若设法使感应电炉的无功功率需求量减少  $\Delta Q$ , 则全企业共减少了  $0.12\Delta Q$  的有功功率损耗。其中感应电炉本身减少有功损耗为

$$\begin{aligned} \Delta P_r &= [K_J - (K_A + K_B + K_C + K_F)] \Delta Q \\ &= [0.12 - (0 + 0.02 + 0.025 + 0.05)] \Delta Q \\ &= 0.025 \Delta Q (\text{kW}) \end{aligned}$$

车间变压器减少有功损耗为

$$\begin{aligned} \Delta P_{b2} &= [K_F - (K_A + K_B + K_C)] \Delta Q \\ &= [0.05 - (0 + 0.02 + 0.025)] \Delta Q \\ &= 0.005 \Delta Q (\text{kW}) \end{aligned}$$

配电线路减少有功损耗为

$$\begin{aligned} \Delta P_l &= [K_C - (K_A + K_B)] \Delta Q = [0.025 - (0 + 0.02)] \Delta Q \\ &= 0.005 \Delta Q (\text{kW}) \end{aligned}$$

主变压器减少有功损耗为

$$\Delta P_{b1} = (K_B - K_A) \Delta Q = 0.02 \Delta Q (\text{kW})$$

## 二、几种设备的无功补偿容量的确定

### 1. 必须改善功率因数的设备

必须改善功率因数的设备见表 4—11。

表 4—11 必须改善功率因数的设备

用 电 设 备	容 量 (kW)
鼠笼式感应电动机	100
绕线式感应电动机	100
坩锅式感应炉	100
沟形感应炉	100
真空感应炉	100
炼钢用电弧炉	—
倾式电弧炉	—
闪光对焊机(携带式除外)	10
电弧焊机(携带式除外)	10
整流器	10000

### 2. 感应电动机补偿容量的确定

(1) 电动机在某一负荷下的功率因数计算: 先测出电动机在某一负荷  $P$  下的工作电流  $I$  和空载电流  $I_0$ , 计算出  $(I_0/I_e)\%$  和  $(I/I_e)\%$  值 ( $I_e$  为电动机额定电流), 再从图 4—8 中求得该电动机工作时的功率因数。

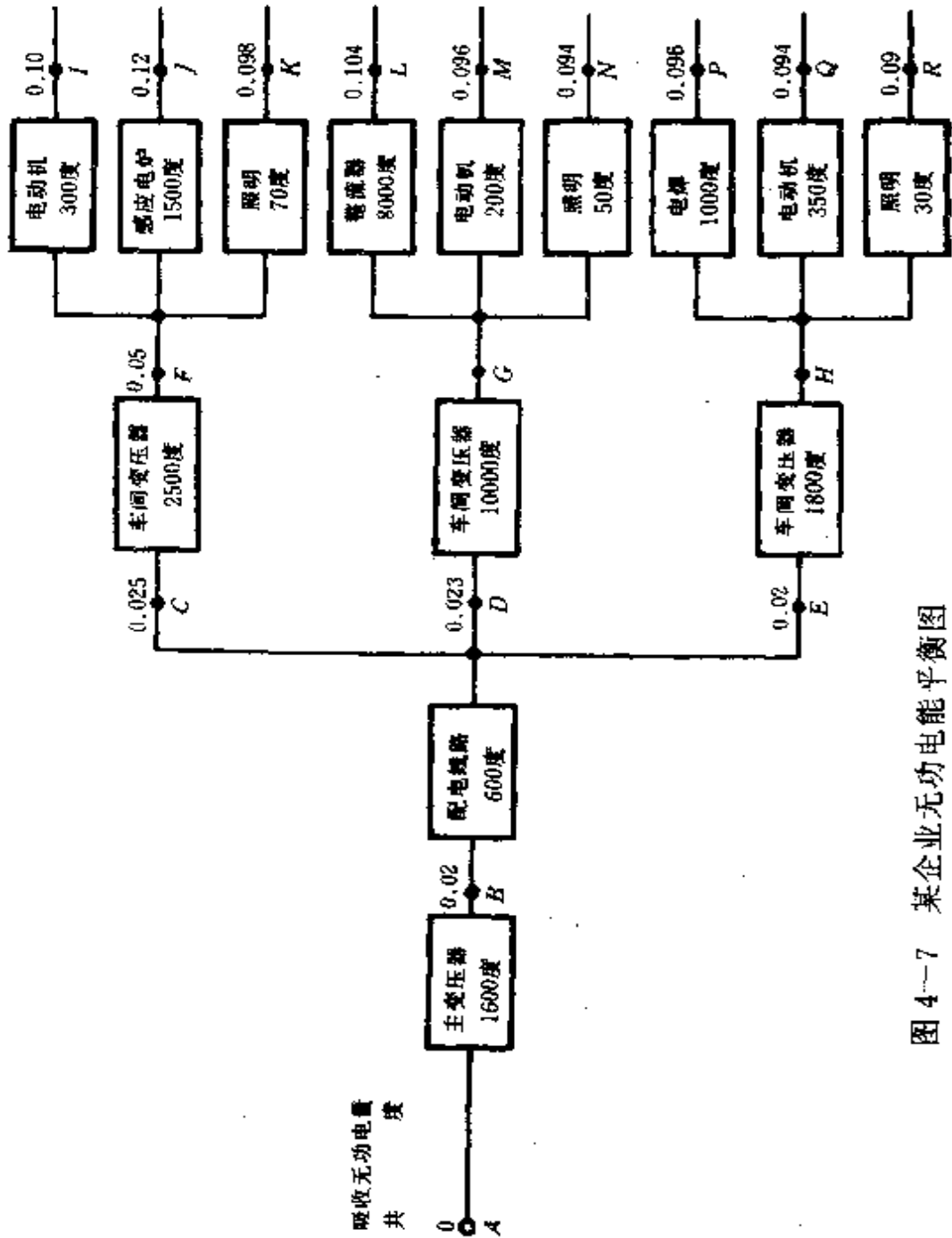
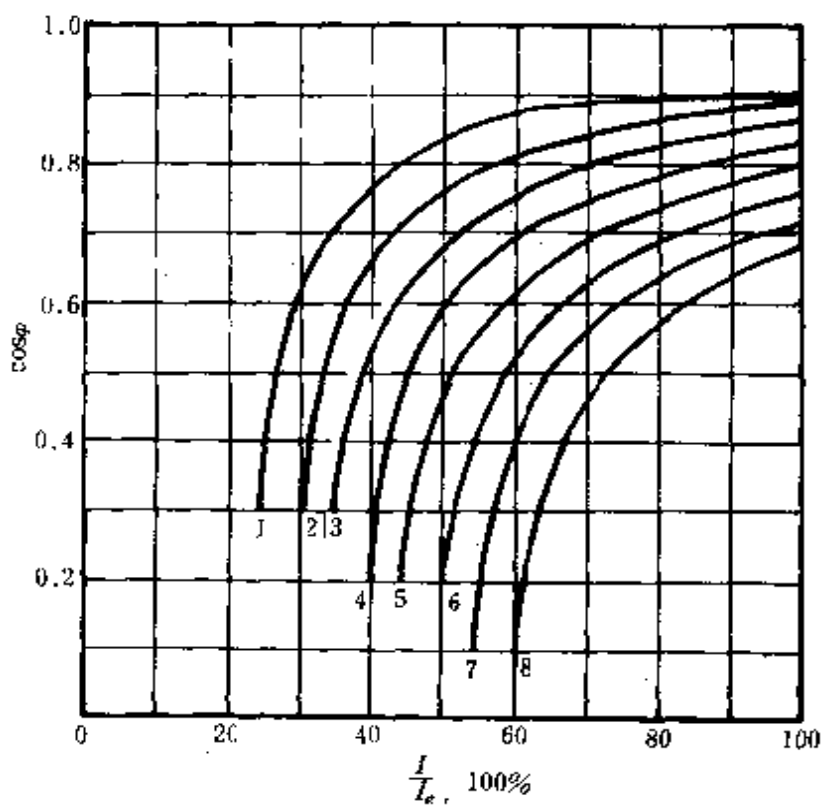


图 4-7 某企业无功电能平衡图

$$\frac{I}{I_e}, 100\%$$

曲线	1	2	3	4	5	6	7	8
$\frac{I}{I_e} \%$	25	30	35	40	45	50	55	60



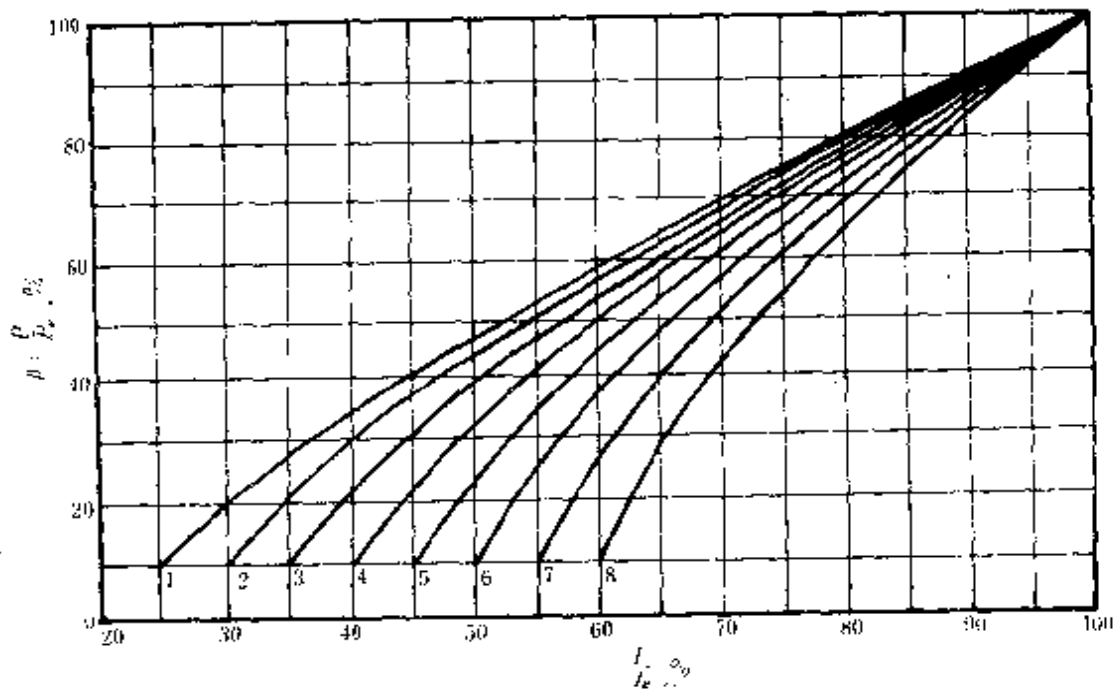
曲线	1	2	3	4	5	6	7	8
$\frac{I}{I_e} \%$	25	30	35	40	45	50	55	60

图 4-8  $\cos\varphi=f(\frac{I}{I_e})$  曲线

如果测得电动机端电压  $U$  值与额定电压  $U_e$  值相差较大, 则应代入下式算出额定电流:

$$I'_e = I_e \frac{U_e}{U}$$

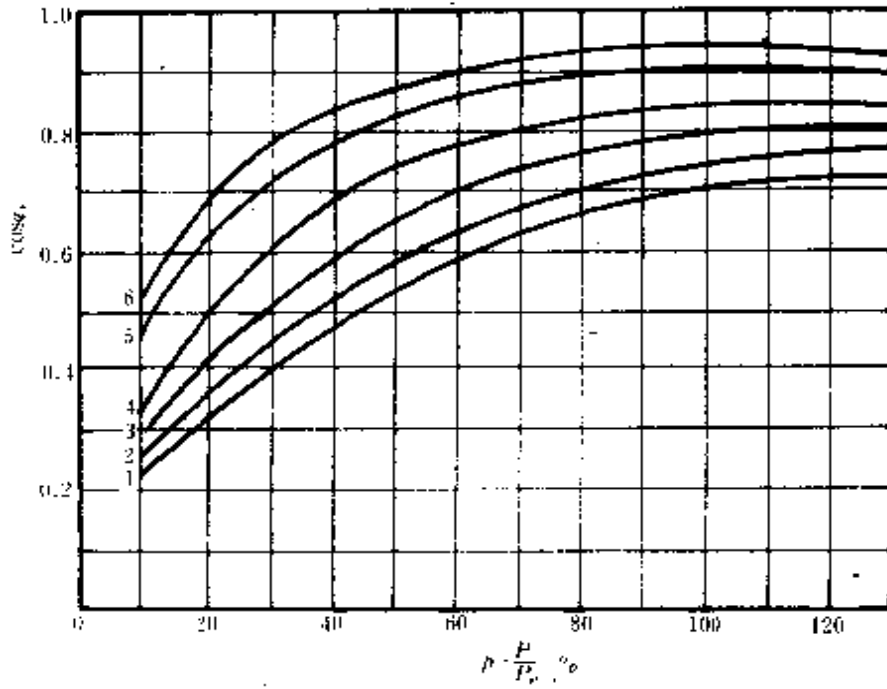
有时受运行条件的限制, 不可能测得空载电流  $I_0$ , 在这种情况下, 可测出工作电流  $I$ , 算出  $(I/I_e)\%$ , 再查得铭牌上的额定功率因数  $\cos\varphi$ , 便可在图 4-9 中得到电动机的负荷率



$\cos\varphi$	0.92	0.89	0.86	0.83	0.79	0.76	0.73	0.69
曲线	1	2	3	4	5	6	7	8

图 4-9 各种额定功率因数的感应电动机负荷因数与电流百分数的关系曲线

$\beta = (P/P_e)\%$ , 最后从图 4—10 中得出电动机在负荷率  $\beta$  时的功率因数。



曲线	1	2	3	4	5	6
cosφ	0.70	0.75	0.80	0.85	0.90	0.92

图 4—10 各种额定功率因数的电动机工作时的功率因数与负荷因数的关系曲线

(2) 补偿电容的计算: 已知电动机工作电流  $I$  及功率因数  $\cos\varphi$  后, 便可按下式求出

$$I_c = I(\sin\varphi - \text{tg}\varphi \cos\varphi), Q_c = \sqrt{3}UI_c \times 10^{-3}$$

式中:  $I_c$ ——所需补偿电容器的电流(A);

$Q_c$ ——电容器的容量(kVar);

$\varphi$  —— 功率因数改善后的功率因数角。

改善后的功率因数  $\cos\varphi$  应尽可能达到 0.95。

电动机采用无功补偿时应注意：当电容器与电动机直接连接作单台补偿时，为了防止电动机自激产生过电压，电容器的电流应比电动机的空载电流小约 10%。若用公式表示，则

$$Q_c = 0.9 \sqrt{3} U I_0 \times 10^{-3}$$

式中： $I_0$  —— 电动机的空载电流(A)

### 3. 农用水泵类电动机补偿容量的确定

农用水泵类负荷具有特殊性，其电动机无功就地补偿的容量，可以突破上述公式的限制，而不会发生自激危险。

农用排灌用水泵，尤其是深井和潜水泵，当电动机在带有水泵机械负荷的情况下断开电源时，由于所带轴负荷的反向制动，电动机转速将急速下降。因此，即使补偿电容量较大，也不会发生自激过电压现象。

农用水泵的无功补偿容量可按下式计算：

$$Q_0 < Q_c < Q_c$$

式中： $Q_c$  —— 单机无功补偿容量(kVar)

$Q_0$  —— 电动机空载无功负荷(kVar)

$$Q_0 = \sqrt{3} U I_0 \sin\varphi_0;$$

$Q_c$  —— 电动机负载额定无功负荷(kVar)，

$$Q_c = \sqrt{3} U I_c \sin\varphi_c;$$

$\sin\varphi_0$  —— 电动机在空载状态下的功率因数角的正弦值；

$\sin\varphi_c$  —— 电动机在负载状态下的功率因数角的正弦值；

其它符号同前

对于 100kW 以下的排灌用电动机，也可按下式估算：

$$Q_c = (0.5 \sim 0.7) P_c$$

式中： $P_c$  —— 电动机的额定功率(kW)；

$Q_c$ ——同前。

**例 4—7** 有一台三相异步电动机,  $P_e = 75\text{kW}$ ,  $U_e = 380\text{V}$ ,  $I_e = 139\text{A}$ ,  $\cos\varphi_e = 0.89$ ,  $n = 980\text{r/min}$ ,  $\eta = 0.92$ 。现测得正常工作时的电流  $I = 72\text{A}$ ,  $U = U_e = 380\text{V}$ , 空载电流  $I_0$  无法测得, 试求它的功率因数及所需的补偿电容器的容量。

$$\text{解 } \frac{I}{I_e} \% = \frac{72}{139} \times 100 = 51.8$$

又因  $\cos\varphi_e = 0.89$ , 由图 4—9 可查得负荷率  $\beta = 44\%$ , 然后从图 4—10 中查得该电动机工作时的功率因数  $\cos\varphi = 0.75$ 。

设补偿后的功率因数为  $\cos\varphi' = 0.95$ , 则电容器电流为

$$\begin{aligned} I_c &= I(\sin\varphi - \text{tg}\varphi' \cos\varphi) = 72 \times (0.66 - 0.329 \times 0.75) \\ &= 29.7(\text{A}) \end{aligned}$$

电容器的容量为

$$Q_c = \sqrt{3} \times 380 \times 29.7 \times 10^{-3} = 19.6(\text{kVar})$$

接入 19.6kVar 容量的电容后, 若电动机在额定出力下运行, 则

$$\text{tg}\varphi' = \frac{I_e \sin\varphi_e - I_c}{I_e \cos\varphi_e} = \frac{139 \times 0.456 - 29.7}{139 \times 0.89} = 0.27$$

从而得  $\cos\varphi' = 0.96$

#### 4. 交流弧焊机补偿容量的确定

交流弧焊机的功率因数很低, 仅为 0.45~0.60, 效率为 80%左右。

(1) 计算法确定补偿容量:

① 方法一: 在电焊机一次侧并联补偿电容器以提高功率因数时:

$$Q_c = K_c P_e$$

$$K_c = \sqrt{1 - \cos\varphi_1^2} - \frac{\cos\varphi_1}{\cos\varphi_2} \sqrt{1 - \cos\varphi_2^2}$$

式中:  $Q_c$ ——所需的电容器容量(kVar);

$K_c$ ——系数, 取决于补偿前功率因数  $\cos\varphi_1$  及补偿后的



功率因数  $\cos\varphi_2$ ;

$P_2$ ——弧焊变压器的使用容量(kVA)。

为了减小电容器容量,可以在变压器的一次侧加升压抽头,电容器接在抽头位置,如图 4-11 所示。这时电容器的电压须大于或等于抽头端的电压。

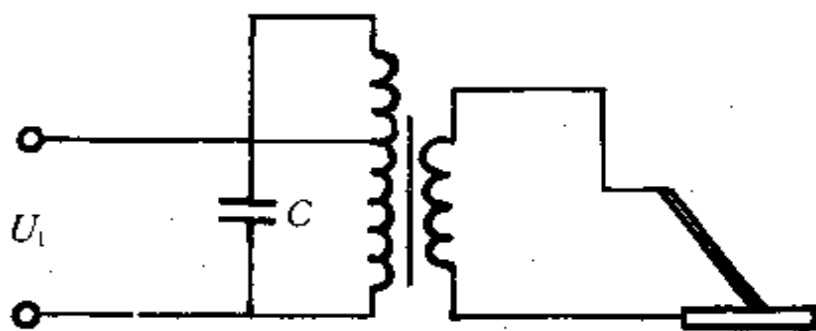


图 4-11 在升压抽头上加补偿电容器

② 方法二:在电焊机一次侧并联补偿电容量  $C$  可参考下式选取:

$$C \approx 8.1 I_0, Q_c = \omega C U^2 \times 10^{-3}$$

式中:  $C$ ——电容量( $\mu\text{F}$ );

8.1——经验系数;

$I_0$ ——弧焊机的空载电流(A);

$Q$ ——补偿电容器容量(kVar);

$\omega$ ——角频率(rad/s);

$U$ ——单相弧焊机的额定电压(kV)。

(2)查表法确定补偿容量:380V 交流弧焊机的补偿电容器容量也可参照表 4-12 选取。这时功率因数将由 0.45~0.60 提高到 0.60~0.70 左右,输入视在功率减少 20%左右,而一次侧

配线损耗降低到 64% 左右。

表 4-12 380 伏交流弧焊机的电容器补偿容量

最大输入功率(kVA)	5~7	7~10	10~15	15~20	20~25	25~30	30~40	40~50
电容量(μF)	30	60	70	80	100	150	200	250
补偿容量(kVar)	1.36	2.72	3.17	3.62	4.53	6.80	9.70	11.34

若电焊机的额定电压为 220V, 则表中的电容量可按下式折算:

$$C_2 = \left(\frac{U_1}{U_2}\right)^2 C_1 = \left(\frac{380}{220}\right)^2 C_1 = 2.98C_1$$

式中:  $C_2$ ——电压为 220V 电焊机的补偿电容器电容量(μF);

$C_1$ ——电压为 380V 电焊机的补偿电容器电容量(μF)。

### 三、无功补偿方式的选择

工厂的无功补偿有采用高压补偿、低压补偿和高低压混合补偿等方式。在选择补偿方式时,通常以高、低压移相电容器投资费用的差额,与采用不同补偿方式在 5 年内所节约电能的费用差额做比较,加以确定。

#### 1. 选择补偿方式的计算公式

高压或低压补偿方式的选择按下式确定:

$$\frac{2Q_{js} - Q_{cd}}{U_d^2} R\delta\tau \times 10^{-3} \geq \frac{C_{cd} - C_{cg}}{T}$$

由上式可得用低压补偿方式的低压电容器经济容量为

$$Q_{dj} \leq 2Q_{js} - \frac{(C_{cd} - C_{cg})U_d^2}{\tau R\delta T} \times 10^{-3}$$

式中： $Q_{js}$ ——低压无功计算负荷(kVar)；  
 $Q_{cd}$ ——低压补偿容量(kVar)；  
 $Q_{dj}$ ——低压电容器经济容量(kVar)；  
 $U_d$ ——低压线电压(kV)；  
 $R$ ——包括变压器和至低压电容器线路的每相电阻( $\Omega$ )。  
变压器电阻可参考附录；  
 $\delta$ ——电价(元/kVarh)；  
 $T$ ——附加一次投资的还本年限数；  
 $C_{cd}$ ——低压移相电容器每 kVar 的初投资(元/kVar)，  
电压 0.4~0.525kV 的  $C_{cd}=36$ ；电压 0.23kV 的  
 $C_{cd}=50$ ；  
 $C_{cg}$ ——高压移相电容器每 kVar 的初投资(元/kVar)，  
电压 3.15~10.5kV 的  $C_{cg}=28$ ；  
 $\tau$ ——电容器组年运行小时数，一班制工厂取 2300h；二  
班制工厂取 4600h；三班制工厂取 6900h。

## 2. 选择补偿方式的一般考虑原则

(1)用电负荷分散及补偿容量较小的工厂，一般采用低压补偿方式较合适。移相电容器安装在负荷设备上(个别补偿)，可以提高负荷端的功率因数，减少线损和变压器的损耗。不过个别补偿需用电容器多，而利用率低，初期投资大，维护工作量也大，操作不太方便。个别补偿一般适用于长期运行的大容量电动机等(见表 4—11)，以及由较长线路供电的场合。将移相电容器集中安装在低压母线上，能减少变压器及高压供电线路的损耗，不能减少供电支、干线的线损。然而对节电起主要作用的是减少变压器损耗。电容器安装在低压侧，与安装在高压侧相比，有少受雷击，运行安全，寿命较长等优点，并可避免个别补偿方式的缺点。

(2)用电负荷比较集中而补偿容量比较大的大型工厂，宜采用高低压混合补偿方式。高压电容器集中高压母线上补偿，能减

少高压供电线路的损耗,操作方便,但工厂的变压器和配电线路等损耗不能减少。

#### 四、采用同步电动机补偿的计算

除了常用的静止型移相电容器作无功补偿外,还可采用同步电动机作无功补偿。

同步电动机输出的无功功率可由下式计算:

$$Q_d = S_{de} q$$

式中:  $Q_d$ ——同步电动机输出的无功功率(kVacr);

$S_{de}$ ——同步电动机的额定容量(kVA)

$q$ ——同步电动机的补偿能力(kVar/kVA),该值与电动机负荷率  $\beta$ 、励磁电流  $I_{Lz}$  与额定励磁电流  $I_{Lze}$  的比值及额定功率因数  $\cos\varphi_e$  有关,可由图 4-12 查得。

当同步电动机的负荷率  $\beta$  在 0.4~1 范围内变化时,同步电动机输出的无功功率可按下式近似计算:

$$Q_d = S_{de} [\sin\varphi_e + r(1 - \beta)]$$

式中:  $Q_d$ ——同步电动机输出的无功功率(kVar);

$\varphi_e$ ——同步电动机额定功率因数角;

$\beta$ ——同步电动机的负荷率;

$r$ ——同步电动机负载时的无功功率增加系数,见表 4-13。

表 4-13 无功功率增加系数  $r$  值

$\cos\varphi_e$	$\sin\varphi_e$	$r$
0.8	0.6	0.2
0.9	0.44	0.36
1.0	0	0.4

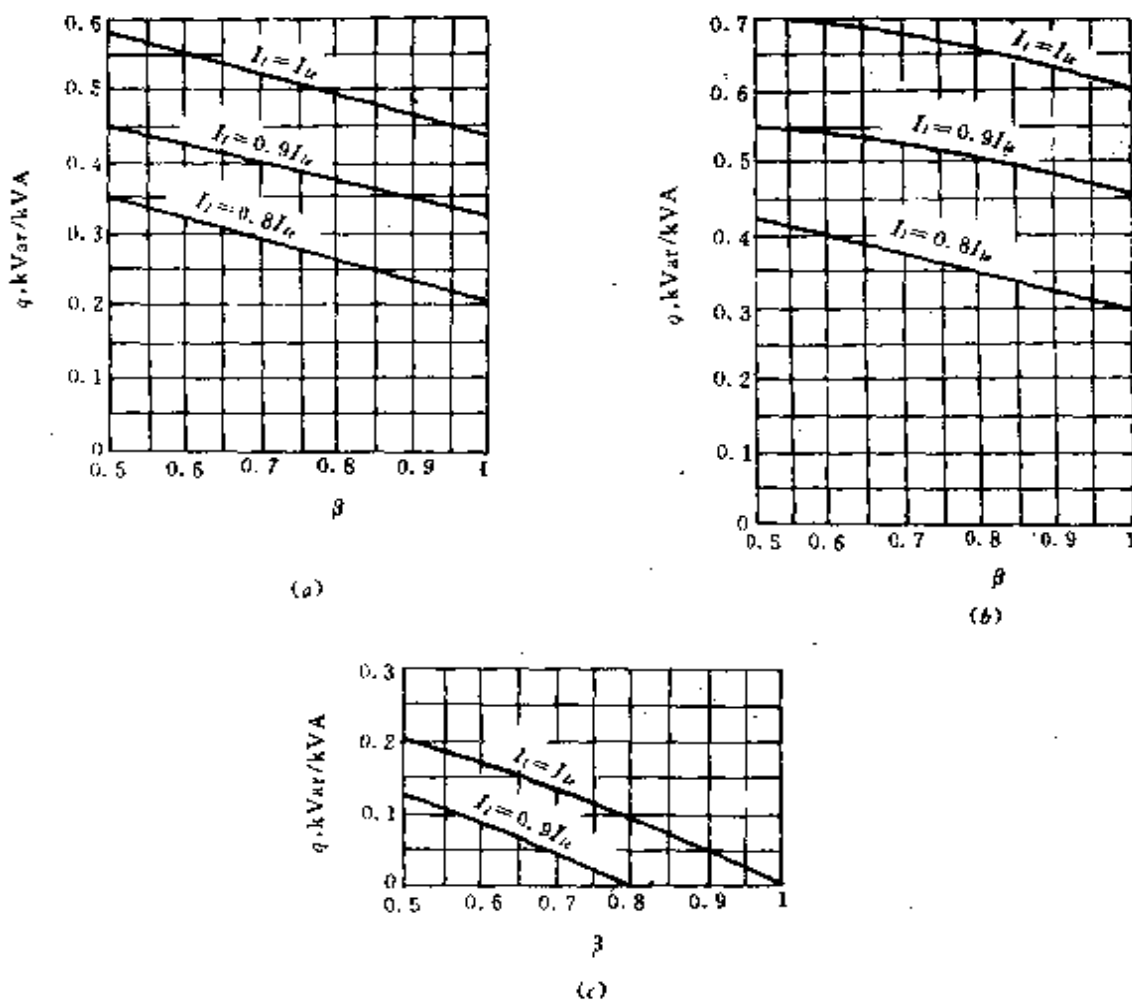


图 4-12 同步电动机的补偿能力  $q$  与负荷率  $\beta$ 、励磁电流  $I_f$  及额定功率因数  $\cos\varphi_n$  的关系  
 (a) 当  $\cos\varphi_n = 0.9$  超前 (b) 当  $\cos\varphi_n = 0.8$  超前  
 (c) 当  $\cos\varphi_n = 1$

当同步电动机的负荷率低于 0.4 时,其输出的无功功率等于按以上近似式求出的无功功率加  $(0.01 \sim 0.04)S_{de}$ 。

**例 4-8** 某工厂实际使用负荷为 2000kW,平均功率因数为滞后 0.707。厂拟采用同步电动机来提高功率因数。当同步电动机的功率因数调到 0.866(超前)时,恰能将全厂的功率因数

提高到滞后 0.866。求该同步电动机的视在功率。

**解** 设补偿前的负荷有功功率、无功功率和功率因数分别为  $P_1$ 、 $Q_1$  和  $\cos\varphi_1$ ；同步电动机的相应数值为  $P_d$ 、 $Q_d$ 、 $\cos\varphi_2$ ；补偿后的全厂功率因数为  $\cos\varphi'$ 。

$$\text{由于 } \cos\varphi_1 = 0.707 \quad \therefore \varphi_1 = 45^\circ$$

$$\cos\varphi_2 = \cos\varphi' = 0.866 \quad \therefore \varphi_2 = \varphi' = 30^\circ$$

$$Q_1 = P_1 \operatorname{tg}\varphi_1 = 2000 \times \operatorname{tg}45^\circ = 2000 (\text{kVar})$$

$$Q_d = P_d = P_d \operatorname{tg}\varphi_2 = P_d \operatorname{tg}30^\circ = 0.577 P_d (\text{kVar})$$

投入同步电动机后的总无功功率为

$$Q' = Q_1 - Q_d = 2000 - 0.577 P_d$$

也可写成  $Q' = (P_1 + P_d) \operatorname{tg}\varphi'$

$$= (2000 + P_d) \operatorname{tg}30^\circ = 1154.7 + 0.577 P_d$$

$$\text{即} \quad 2000 - 0.577 P_d = 1154.7 + 0.577 P_d$$

$$P_d = \frac{2000 - 1154.7}{2 \times 0.577} \approx 732 (\text{kW})$$

因此,同步电动机的视在功率(计算值)为

$$S_d = P_d / \cos\varphi_2 = 732 / 0.866 = 845 (\text{kVA})$$

### 第三节 提高功率因数与降损及改善电压的计算

#### 一、提高功率因数与降损关系的计算

##### 1. 不同供电方式下功率因数改善前后的效果比较

不同供电方式下功率因数改善前后的受电功率、有功损耗、视在功率、补偿容量、线路电压降及输出电压的关系,见表 4-13。

表 4—13 功率因数改善前、后的各关系式表

	功率因数改善前		功率因数改善后	
	单相二线制	三相制	单相二线制	三相制
受电功率 $P(\text{kW})$	$P = UI_1 \cos \varphi_1 \times 10^{-3}$	$P = \sqrt{3} VI_1 \cos \varphi_1 \times 10^{-3}$	$P = UI_2 \cos \varphi_2 \times 10^{-3}$	$P = \sqrt{3} UI_2 \cos \varphi_2 \times 10^{-3}$
有功损耗 $\Delta P(\text{kW})$	$\Delta P_1 = I_1^2 R \times 10^{-3}$	$\Delta P_1 = 3I_1^2 R \times 10^{-3}$	$\Delta P_2 = I_2^2 R \times 10^{-3}$	$\Delta P_2 = 3I_2^2 R \times 10^{-3}$
视在功率 $S(\text{kVA})$	$S_1 = \frac{P}{\cos \varphi_1}$		$S_2 = \frac{P}{\cos \varphi_2}$	
补偿容量 $Q_c(\text{kVar})$			$Q_c = P(\text{tg} \varphi_1 - \text{tg} \varphi_2)$	
线路电压降 $\Delta U(\text{V})$	$\Delta U_1 = (R \cos \varphi_1 + X \sin \varphi_1) I_1$		$\Delta U_2 = (R \cos \varphi_2 + X \sin \varphi_2) I_2$	
输出电压 $U'(\text{V})$	$U'_1 = U + \Delta U_1$		$U'_2 = U + \Delta U_2$	

注： $U$ ——受电端电压，三相时为线电压(V)。

$\Delta U$ ——线路电压降，三相时为线电压(V)。

$R, X$ ——三相时为每相导线的电阻和电抗，单相二线制时为来回二条导线的值( $\Omega$ )。

## 2. 功率因数降低与电网元件(线路和变压器)损耗增加的关系

当负荷的功率因数从 1 降低到  $\cos \varphi$  时，电网元件的功率损耗增加的百分数可由下式近似计算(表 4—14)：

$$\Delta P\% = \left( \frac{1}{\cos^2\varphi} - 1 \right) \times 100$$

表 4-14 功率因数由 1 下降与电网元件损耗增加的关系

功率因数由 1 降低到右列数值	0.95	0.9	0.85	0.8	0.75	0.7	0.65	0.6
电网元件有功损耗增加百分数 (%)	11	23	38	56	78	104	136	178

### 3. 提高功率因数与降低线损的关系

因为功率因数改善前的线路电流为

$$I_1 = \frac{S_1}{\sqrt{3}U} \times 10^3 = \frac{P}{\sqrt{3}U \cos\varphi_1} \times 10^3$$

改善后的线电流为

$$I_2 = \frac{S_2}{\sqrt{3}U} \times 10^3 = \frac{P}{\sqrt{3}U \cos\varphi_2} \times 10^3$$

所以线路损耗减少为

$$\Delta\Delta P_l = \Delta P_1 - \Delta P_2 = 3R(I_1^2 - I_2^2) \times 10^{-3}$$

将  $I_1$  和  $I_2$  的关系式代入上式得

$$\begin{aligned} \Delta\Delta P_l &= \frac{RP^2}{U^2} \left( \frac{1}{\cos^2\varphi_1} - \frac{1}{\cos^2\varphi_2} \right) \times 10^6 \\ &= 3\Delta P_1 \left( 1 - \frac{\cos^2\varphi_1}{\cos^2\varphi_2} \right) \end{aligned}$$

式中： $\Delta\Delta P_l$  —— 线路损耗减少量(kW)；

$\Delta P_1$ 、 $\Delta P_2$  —— 分别为功率因数提高前、后的线损(kW)；

$P$  —— 负荷功率(kW)；

$U$  —— 电网线电压(V)；

$R$  —— 每相导线的电阻( $\Omega$ )；

$\cos\varphi_1$ 、 $\cos\varphi_2$  —— 补偿前、后的功率因数。



提高功率因数与降低线损的关系见表 4—15

表 4—15 提高功率因数与降低线损的关系

功率因数 由有列数值提 高到 0.95	0.6	0.65	0.7	0.75	0.8	0.85	0.9
线路有功 损耗降低百分 数(%)	60	53	46	38	29	20	10

#### 4. 提高功率因数与降低变压器铜损的关系

功率因数提高, 负荷电流会减少, 变压器铜损也相应减少。

设变压器短路损耗为  $P_d$ , 二次额定电流为  $I_{2e}$ , 当电流为  $I_1$  (功率因数改善前) 时的铜损:

$$P_{d1} = P_d \left( \frac{I_1}{I_{2e}} \right)^2$$

当电流为  $I_2$  (功率因数改善后) 时的铜损:

$$P_{d2} = P_d \left( \frac{I_2}{I_{2e}} \right)^2$$

因此铜损减少量为

$$\Delta P_d = P_{d1} - P_{d2} = P_d \left( \frac{I_1^2 - I_2^2}{I_{2e}^2} \right)$$

将  $I_1$  和  $I_2$  的关系式 (见上述 3 项内容) 代入上式得

$$\begin{aligned} \Delta P_d &= P_d \left[ \frac{\left( \frac{P}{\sqrt{3}U} \right)^2 \left( \frac{1}{\cos^2 \varphi_1} - \frac{1}{\cos^2 \varphi_2} \right) \times 10^6}{\left( \frac{S_e}{\sqrt{3}U} \right)^2 \times 10^6} \right] \\ &= P_d \left( \frac{P}{S_e \cos \varphi_1} \right)^2 \left( 1 - \frac{\cos^2 \varphi_1}{\cos^2 \varphi_2} \right) \end{aligned}$$

式中:  $\Delta P_d$ ——变压器铜损减少量(kW);

$S_e$ ——变压器额定容量(kVA);

$S_e = \sqrt{3} U_2 I_{2e} \times 10^3$ , 此处  $U_{2e} = U$  (V),

即二次额定线电压；

其它符号同前。

**例 4—9** 在三相配电线路末端有 100kW、功率因数为滞后 0.75 的对称负荷。现在负荷点并联移相电容器进行补偿，试问使线损为最小时所需的补偿容量是多少？并求出补偿前后的线损比及线损减少百分数。设补偿前后负荷端电压不变。

**解** 设负荷端电压为  $U$ ，线路电阻为  $R$ ，功率因数为  $\cos\varphi$ ，则线损为

$$\Delta P = 3I^2R = 3 \times \left( \frac{100 \times 10^3}{\sqrt{3}U \cos\varphi} \right)^2 \times R \quad (1)$$

(1) 按题意， $U$ 、 $R$  不变，要使线损最小，应将(1)式中的  $\cos\varphi$  调整到 1，这时所需的补偿容量为

$$Q_c = P \tan\varphi = P \frac{\sin\varphi}{\cos\varphi} = 100 \times \frac{\sqrt{1-0.75^2}}{0.75} = 88.2 \text{ (kVar)}$$

(2) 由(1)式可知，线损与  $\cos\varphi$  的平方成正比，所以补偿前后的线损比为

$$\frac{\Delta P_{\text{前}}}{\Delta P_{\text{后}}} = \frac{3 \times \left( \frac{100 \times 10^3}{\sqrt{3}U \times 0.75} \right)^2 \times R}{3 \times \left( \frac{100 \times 10^3}{\sqrt{3}U \times 1} \right)^2 \times R} = \frac{1}{0.75^2} = 0.78$$

线损减少的百分数为

$$\begin{aligned} \Delta\Delta P_i \% &= \frac{\text{线损减少量}}{\text{补偿前的线损}} = 1 - \left( \frac{\cos\varphi_1}{\cos\varphi_2} \right)^2 \\ &= 1 - \left( \frac{0.75}{1} \right)^2 = 57.8\% \end{aligned}$$

**例 4—10** 图 4—13 为三相三线式配电线路，供给滞后功率因数的均匀分布的负荷。现为降低线损，在线路上设置补偿电容  $Q_c$ 。试求电容容量  $Q_c$  为负荷无功功率的几倍 ( $n > 0$ ) 时，为使

线损最小的电容器安装位置  $l$ 。

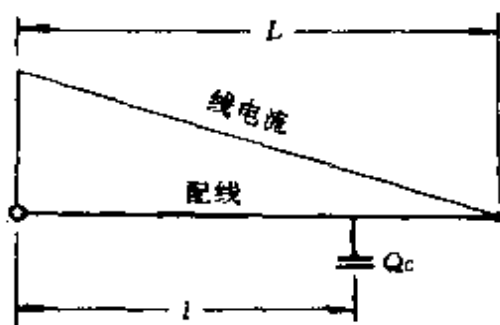


图 4—13 例 4—10 图

**解** 设配线电流的有功和无功分量分别为  $I_a$  和  $I_r$ , 电容电流为  $I_c$ , 电线单位长度的电阻为  $R_0$ 。安装电容后线路上的无功电流分布如图 4—14 所示。线损降低量为

$$\begin{aligned} \Delta\Delta P_l &= \int_0^l 3R(I_a^2 + I_r^2)dx - \int_0^l 3R_0[I_a^2 + (I_r - I_c)]dx \\ &= 3I_c \int_0^l (2I_r - I_c)R_0 dx \\ &= 3I_c R_0 \left( \int_0^l 2I_r dx - I_c l \right) \end{aligned}$$

由于负荷是均匀分布的, 设送电端的无功电流为  $I_0$ , 则

$$I_r = (1 - x/L)I_0$$

故 
$$\begin{aligned} \Delta\Delta P_l &= 3I_c R_0 \left[ \int_0^l 2(1 - x/L)I_0 dx - I_c l \right] \\ &= 3I_c R_0 l [I_0(2 - l/L) - I_c] \end{aligned}$$

$\Delta\Delta P_l$  为最大时的距离  $l$ , 所以  $d(\Delta\Delta P_l)/dl = 0$

求得:

$$l = (1 - I_c/2I_0)L$$

按题意  $I_c/I_0 = n$

$$l = (1 - n/2)L$$

若以  $n$  表示  $l$ , 则如图 4—15 所示。  $n=1$ , 即负荷无功功率与

补偿电容容量相同时,在  $L/2$  点安装补偿电容,电能损耗最小;电容容量是负荷无功功率的  $2/3$  倍时, $l$  在  $(1/3)L$  位置,损耗最小。

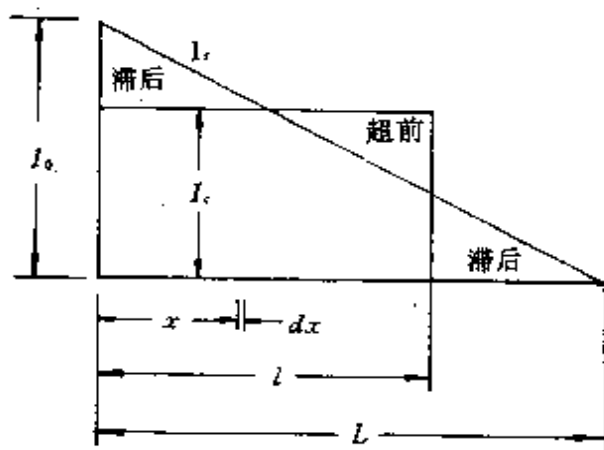


图 4—14 无功电流分布

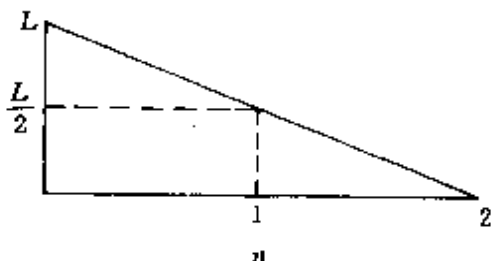


图 4 15  $n, l$  的关系

## 二、提高功率因数与改善电压关系的计算

### 1. 减少线路压降的计算

提高功率因数线路压降减少量可由下式计算:

$$\Delta\Delta U_L = \Delta U_1 - \Delta U_2 = [I_1 \cos\varphi_1 (R + X \operatorname{tg}\varphi_1)] - [I_2 \cos\varphi_2 (R + X \operatorname{tg}\varphi_2)]$$

由于负荷功率在功率因数改善前后没有变化,所以  $I_1 \cos \varphi_1 = I_2 \cos \varphi_2$ , 代入上式得

$$\begin{aligned} \Delta \Delta U_z &= I_1 \cos \varphi_1 (R + X \operatorname{tg} \varphi_1) \left(1 - \frac{R + X \operatorname{tg} \varphi_2}{R + X \operatorname{tg} \varphi_1}\right) \\ &= \Delta U_1 \left(1 - \frac{R + X \operatorname{tg} \varphi_2}{R + X \operatorname{tg} \varphi_1}\right) \end{aligned}$$

式中:  $\Delta \Delta U_z$  —— 相电压压降减少量(V);

$\Delta U_1$ 、 $\Delta V_z$  —— 分别为功率因数改善前、后的线路相电压压降(V);

$R$ 、 $X$  —— 三相时为每相导线的电阻和电抗,单相二线制时为来回二条导线的值( $\Omega$ );

其它符号同前。

若用电压降减少百分数表示,则可用下式近似计算:

$$\Delta \Delta U_z \% \approx \frac{\Delta Q_c X \cdot 10^3}{U_z^2} \times 100$$

式中:  $\Delta \Delta U_z \%$  —— 线路电压降减少的百分数;

$\Delta Q_c$  —— 移相电容器投入增加量(kVar),若原先未并联补偿电容,则  $\Delta Q_c$  即为改善后电容器的投入容量  $Q_c$ ;

$U_z$  —— 线路额定电压(V)。

## 2. 减少变压器电压降的计算

用电压降减少百分数表示,可用下式近似计算:

$$\Delta \Delta U_z \% \approx \frac{\Delta Q_c \cdot U_d \%}{S_c}$$

式中:  $\Delta \Delta U_z \%$  —— 变压器电压降减少的百分数;

$U_d \%$  —— 变压器阻抗电压百分数;

$S_c$  —— 变压器额定容量(kVA)。

投入电容器后线路及变压器电压降减少的数据,可参考表 4-16。

表 4—16 投入电容器后电压降减少的数据

供电元件	SL <sub>1</sub> 型变压器容量 (kVA)					每千米架空线路电压(kV)			每千米电缆线路电压(kV)		
	315	500	630	800	1000	0.38	6	10	0.38	6	10
投入 100kVar 电容器后电压提高值(%)	1.27	0.8	0.71	0.56	0.45	28	1.1	0.4	5.5	0.022	0.008
电压提高 1%需投入电容器容量 (kVar)	79	125	140	178	222	3.6	900	2500	18	4500	12500

### 三、提高功率因数与增加设备容量的计算

由于移相电容器供给了相位超前的无功电流,减少了流入负荷的滞后的无功电流,因此能减少变压器及线路等的负荷,即增加了这些设备的容量。

#### 1. 增加线路供电能力的计算

如图 4-16 所示,在负荷的功率因数  $\cos\varphi_1$  一定时,将供电功率由  $P_1$  增加到  $P_2$ 。这时视在功率也由  $S_1$  增加到  $S_2$ ,即增加了  $\Delta S = S_2 - S_1$ 。若配电线路的容量短缺为  $\Delta S$ ,如果安装  $Q_c = OF = ED$  的补偿电容器,则合成视在功率为  $OD = S_1$ ,等于原来的视在功率,解决了容量不足的问题,并可增加  $\Delta P_l = P_2 - P_1$  的供电功率。即

$$\Delta P_l = P_2 - P_1 = S_1 (\cos\varphi_2 - \cos\varphi_1)$$

式中:  $\Delta P_l$ ——功率因数提高所增加线路的供电功率(kW);

$S_1$ ——功率因数提高前的视在功率(kVA)。

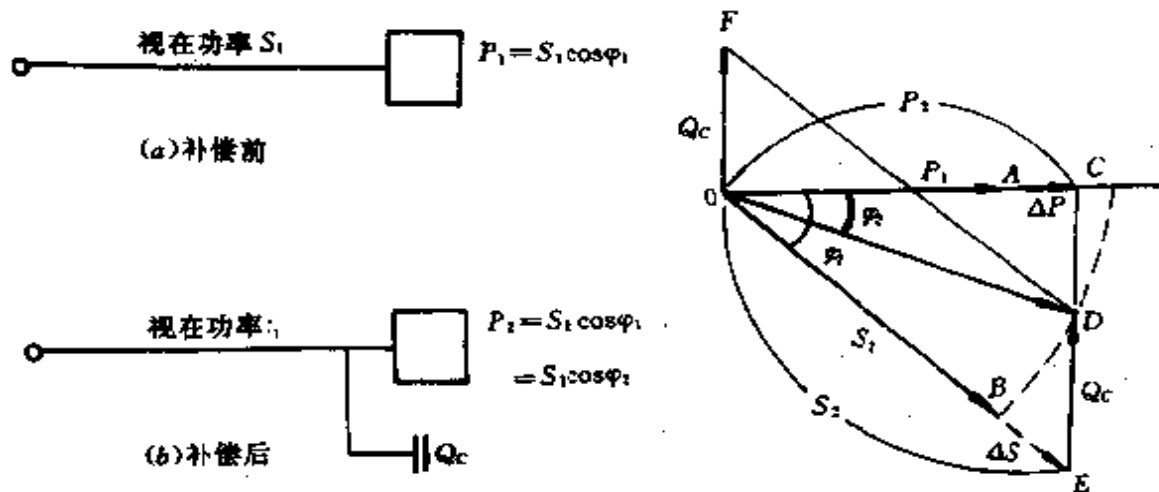


图 4—16 增加设备容量的说明图

也可用以下公式计算：

$$\Delta S_t = \frac{XQ_c}{R \cos \varphi_1 + X \sin \varphi_1}$$

式中： $\Delta S_t$ ——功率因数提高所增加线路的供电容量(kVA)；

$Q_c$ ——无功补偿容量(kVar)；

$\cos \varphi_1$ ——补偿前的功率因数；

其它符号同前。

## 2. 增加变压器供电能力的计算

$$\Delta S_b = \left[ \frac{Q_c}{S_e} \sin \varphi_1 - 1 + \sqrt{1 - \left( \frac{Q_c}{S_e} \right)^2 \cos^2 \varphi_1} \right] S_e$$

式中： $\Delta S_b$ ——功率因数提高后，变压器增加的供电能力(kVA)；

$S_e$ ——变压器额定容量(kVA)；

其它符号同前。

**例 4—11** 有一变压器容量为 2400kVA 的变电所,供电给 2000kVA、功率因数为滞后 0.8 的负荷。如在该变电所安装 600kVar 的补偿电容器,试问:

(1)该变电所的功率因数为多大?

(2)该变电所的负荷还能增加多少?设增加负荷的功率因数为 0.85,并不使变压器过载。

**解**

(1)变电所负荷的有功功率和无功功率分别为

$$P_1 = S_1 \cos \varphi_1 = 2000 \times 0.8 = 1600 (\text{kW});$$

$$Q_1 = S_1 \sin \varphi_1 - Q_c = 2000 \times \sqrt{1 - 0.8^2} - 600 \\ = 600 (\text{kVar})$$

所以,变电所的功率因数为

$$\cos \varphi' = \frac{P}{\sqrt{P^2 + Q^2}} = \frac{1600}{\sqrt{1600^2 + 600^2}} = 0.936$$

(2)设增加的负荷为  $x$ (kW),则变电所的有功功率为

$$P_2 = P_1 + x = 1600 + x$$

由于新增负荷的功率因数  $\cos \varphi_2 = 0.85, \text{tg} \varphi_2 = 0.62$ ,故新增负荷的无功功率为

$$Q_2 = x \text{tg} \varphi_2 = 0.62x$$

所以视在功率为

$$S_2^2 = P_2^2 + (Q_1 + Q_2)^2$$

$$2400^2 = (1600 + x)^2 + (600 + 0.62x)^2$$

经整理,得

$$x^2 + 2848.9x - 2308870 = 0$$

$$x = 658 \text{kW} (\text{另一个解为负值,不合题意,舍去}).$$

因此,无功补偿后,该变压器还可增加负荷 658kW(新增负荷的功率因数为 0.85)。



## 第五章 电动机

### 第一节 基本原理计算

#### 一、异步电动机的基本公式及等值电路图

##### 1. 转差率

$$s = \frac{n_1 - n}{n_1}, \quad n_1 = \frac{60f}{p}$$

式中： $s$ ——转差率；

$n_1$ ——同步转速(r/min)；

$n$ ——转子转速(r/min)；

$f$ ——电源频率(Hz)；

$p$ ——电动机极对数。

##### 2. 电势方程

(1) 定子绕组产生的感应电势：

$$E_1 = k_e U_1 = 4.44 k_{d\phi 1} f_1 W_1 \phi$$
$$\phi = B_{\phi 1} S$$

式中： $E_1$ ——定子绕组产生的感应电势(V)；

$k_e$ ——降压系数，又称电势系数，小型电动机可取 0.86，  
中型电动机可取 0.90，大型电动机可取 0.91；

$U_1$ ——外加电源电压(V)；

$k_{d\phi 1}$ ——定子的绕组系数；

$f_1$ ——电源频率(Hz)；

$W_1$ ——定子绕组每相串联线圈匝数；

$\phi$ ——每极磁通(Wb);

$B_{pj}$ ——气隙中平均磁通密度(T),它与气隙中最大磁通密度  $B_s$  的关系为:

$$B_{pj} = \frac{2}{\pi} B_s = 0.637 B_s;$$

$S$ ——每极下的气隙面积(m<sup>2</sup>)。

最大磁通密度(气隙) $B_s$ 可由表5—1中选取,电机容量较大的取较大值;容量较小的取较小值。J、JO型电动机的  $B_s$  值为0.60~0.70T,  $J_2$ 、 $JO_2$ 型电动机为0.65~0.75T,1kW以下电动机为0.40~0.60T, Y系列电动机为0.57~0.86T。

绕组系数  $k_{dp1}$  由分布系数  $k_{d1}$  和短距系数  $k_{p1}$  的乘积求得,即

$$k_{dp1} = k_{d1} k_{p1}$$

$k_{d1}$  数值见表5—2;  $k_{p1}$  数值见表5—3。

表5—1 三相异步电动机的气隙磁通密度  $B_s$ (T)

型 式	极 数			
	2	4	6	8
开启式	0.60~0.75	0.70~0.80	0.70~0.80	0.70~0.80
封闭式	0.50~0.65	0.60~0.70	0.60~0.75	0.64~0.74
Y系列	Y(IP44)			Y(IP23)
	H80~112	H132~160	H180以上	
	0.60~0.73	0.59~0.75	0.75~0.80	0.73~0.86

表5—2 分布系数  $k_{d1}$

每极分相槽数 $q$	1	2	3	4	5	6	7以上
分布系数 $k_{d1}$	1.0	0.966	0.960	0.958	0.957	0.956	0.956



(续表)

节距 y	每极槽数												
	24	18	16	15	14	13	12	11	10	9	8	7	6
1~14	0.752	0.906	0.956	0.978	0.994	1.000							
1~13	0.707	0.866	0.924	0.951	0.975	0.993	1.000						
1~12		0.819	0.882	0.914	0.944	0.971	0.991	1.000					
1~11		0.766	0.831	0.866	0.901	0.935	0.966	0.990	1.000				
1~10		0.707	0.773	0.809	0.847	0.884	0.924	0.960	0.988	1.000			
1~9			0.707	0.743	0.782	0.833	0.866	0.910	0.951	0.985	1.000		
1~8				0.669	0.707	0.749	0.793	0.841	0.891	0.940	0.981	1.000	
1~7						0.663	0.707	0.756	0.809	0.866	0.924	0.975	1.000
1~6								0.655	0.707	0.766	0.832	0.901	0.966
1~5										0.643	0.707	0.782	0.866
1~4												0.624	0.707

(2) 转子产生的感应电势:

$$E_2 = sE_{20} = 4.44k_{dp2}fW_2\phi$$

式中:  $E_2$ —— 转子每相绕组中产生的感应电势(V);

$s$ —— 转差率;

$E_{20}$ —— 电动机刚接通电源时, 转子由于惯性而尚未转动的瞬间(转子转速  $n = 0$ , 转差率  $s = 1$ , 则  $f_2 = f_1$ ,  $s = f_1$ , 相当于静止变压器状态), 此时的转子电势值(V);

$k_{dp2}$ —— 转子的绕组系数, 由绕组结构决定;

$f_2$ —— 转子电势的频率(Hz),  $f_2 = f_1s$ ;

$W_2$ —— 转子绕组一相的匝数;

$\phi$ —— 同前。

### 3. 异步电动机的机械特性(图 5—1)

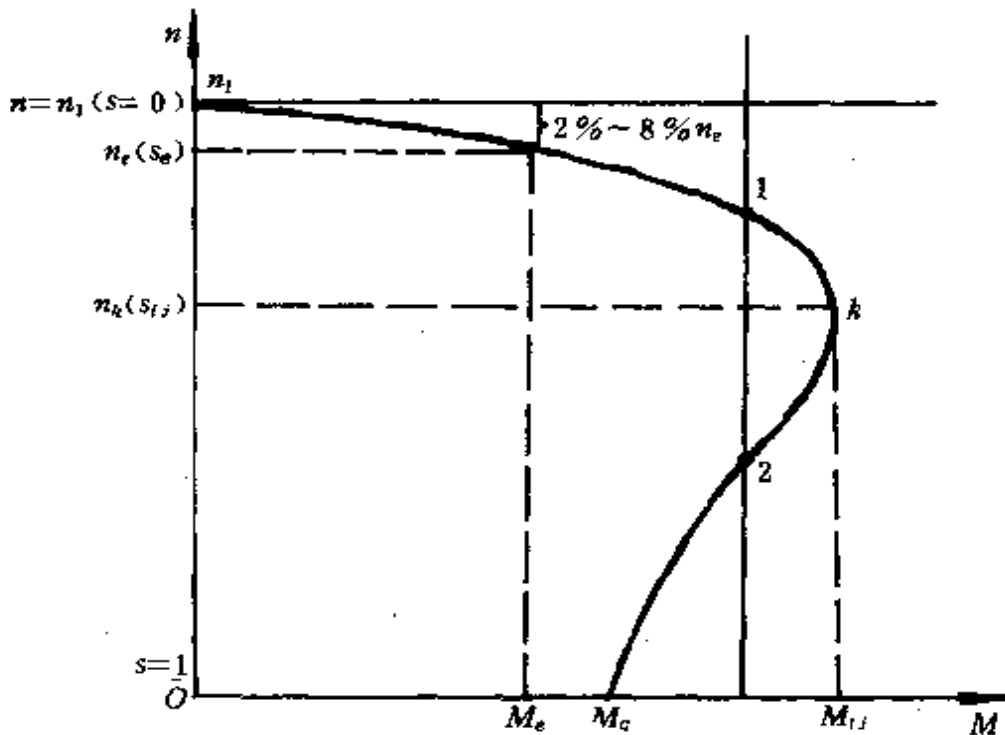


图 5—1 异步电动机的机械特性

(1) 异步电动机的机械特性可用下式近似地表示:

$$\frac{M}{M_{\max}} = \frac{2}{\frac{s}{s_{\max}} + \frac{s_{\max}}{s}}$$

当  $s$  比  $s_{\max}$  小得多时, 则上式可简化为

$$M = \frac{2M_{\max}}{s_{\max}} s$$

式中:  $M$ ——电动机转矩(N·m);

$M_{\max}$ ——最大转矩(N·m);

$s, s_{\max}$ ——转差率和临界转差率。

(2) 电动机额定转矩:

$$M_e = 9555 \frac{P_e}{n_e}$$

式中:  $M_e$ ——电动机额定转矩(N·m);

$P_e$ ——电动机额定功率(kW);

$n_e$ ——电动机额定转速(r/min)。

(3) 过载系数:

$$\lambda = M_{\max}/M_e$$

异步电动机的过载系数一般在 1.8 ~ 2.5 之间, Y 系列电动机为 2.0 ~ 2.2, J<sub>2</sub>、JO<sub>2</sub> 型电动机为 1.8 ~ 2.2, JO<sub>3</sub> 型电动机为 2.0 ~ 2.2, JZR 型电动机可达 3.3 ~ 3.4, 甚至更大。

(4) 功率平衡方程: 图 5-2 为异步电动机功率流向图。

$$P_2 = P_1 - \Sigma \Delta P$$

$$P_2 = \sqrt{3} U I \eta \cos \varphi \times 10^{-3}$$

$$P_1 = \sqrt{3} U I \cos \varphi \times 10^{-3}$$

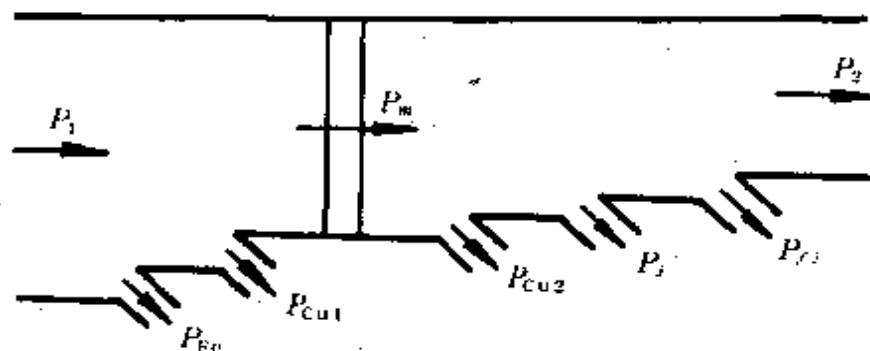


图 5—2 异步电动机功率流向图

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = 1 - \frac{\Sigma\Delta P}{P_1} = 1 - \frac{\Sigma\Delta P}{P_2 + \Sigma\Delta P}$$

$$\Sigma\Delta P = P_{Fe} + P_{Cu1} + P_{Cu2} + P_j + P_{fi}$$

式中： $P_1$ 、 $P_2$ ——电动机的输入功率和输出功率(kW)；

$U$ ——电源电压(V)；

$I$ ——电动机负载电流(定子电流)(A)；

$\eta$ ——电动机效率；

$\cos\varphi$ ——电动机功率因数；

$\Sigma\Delta P$ ——电动机总损耗(kW)，

$P_{Fe}$ ——铁耗(kW)；

$P_{Cu1}$ ——定子铜耗(kW)；

$P_{Cu2}$ ——转子铜耗(kW)，对异步电动机而言应称为铝条中的损耗，这里统称铜耗；

$P_j$ ——机械损耗(kW)；

$P_{fi}$ ——附加损耗(kW)，包括风摩损耗(即通风功耗) $P_f$ 和杂散损耗  $P_s$  等。

## 二. 异步电动机的工作特性

### 1. 工作特性曲线

工作特性一般是指电动机在额定电压和额定频率下运行

时,转子转速  $n$ 、电磁转矩  $M$ 、功率因数  $\cos\varphi$ 、效率  $\eta$  和定子电流  $I_1$  等随输出功率  $P_2$  而变化的关系。图 5—3 中以标么值表示的普通异步电动机典型的工作特性曲线。

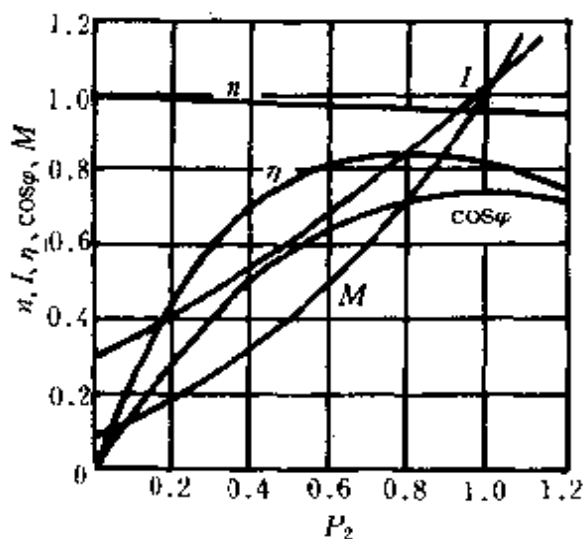


图 5—3 异步电动机工作特性曲线

由图可见：

(1) 异步电动机的转速基本上与负载

大小无关,在不超出满载范围内运行时,转速基本不变。

(2) 轻负载时,功率因数和效率很低,而当负载增大到大于 50% 以上额定值时,功率因数和效率变化很少。

(3) 电磁转矩  $M$  和定子电流  $I_1$  随负载增大而增大。

## 2. 电源电压或频率变化对电动机工作性能的影响

当电动机的负载转矩不变,而电源电压或频率低于额定值时,电动机的工作性能将发生变化,其变化情况见表 5—4。

## 三、绕线型异步电动机转子电阻的计算

绕线型异步电动机转子每相电阻的精确测量可用电桥在转子出线端子处进行。要求不严时,也可用下列公式计算:

近似求法

$$R_2 = \frac{S_e U_{2e}}{\sqrt{3} I_{2e}}$$

较准确求法

$$R_2 = \frac{s_e}{1 - s_e} \cdot \frac{P_e + P_j}{3I_{2e}^2} \times 10^3$$



表 5—4 工作性能的变化

性 能	频率额定,电压低于额定值	电压额定,频率低于额定值
转 矩	$M_{\max}$ 减小( $\propto U^2$ ); $M_g$ 减小( $\propto U^2$ )	$M_{\max}$ 增大( $\propto \frac{1}{f^2}$ ); $M_g$ 也增大
功率因数	因 $\phi_1$ 减小( $\propto U_1$ ),故励磁电 流 $I_l$ 减小, $\cos\varphi$ 增大	因 $U_1 \approx E_1 \propto f\phi_1 = \text{常值}$ ,即 $\phi_1$ 增大( $\propto \frac{1}{f}$ ),故 $I_l$ 增大, $\cos\varphi$ 降低
电 流	因 $M \propto \phi_1 I_2 \propto U_1 I_2 = \text{常值}$ , 故 $I_2$ 增大( $\propto \frac{1}{U_1}$ );负载较大时 $I_1$ 一般增大	因 $M \propto \phi_1 I_2 \propto \frac{I_2}{f} = \text{常值}$ ,故 $I_2$ 减小( $\propto f$ );而 $I_l$ 增大,故 $I_1$ 视 具体情况而定
转差率	$s$ 增大( $\propto I_2^2 \propto \frac{1}{U_1^2}$ )	$s$ 降低( $\propto \frac{I_2^2}{f} \propto f$ )
转 速	当电压过低,轻载时 $n$ 变化较 小,重载时 $n$ 变化大	$n$ 降低( $\propto f$ )
损 耗	$P_{Fe1}$ 减小; $P_{r2}$ 增大; $P_f$ 近似 不变; $P_{Cu1}$ 轻载时变化小;负载 较大时一般增大	$P_{Fe1}$ 增大; $P_{Cu2}$ 减小; $P_f$ 减小; $P_{Cu1}$ 视具体情况而定
效 率	轻载时 $\eta$ 稍增加,负载较大时 $\eta$ 降低	因输出功率降低,故 $\eta$ 一般略 降低
温 升	$\tau$ 增加	$\tau$ 略增加

注:详细分析见第五节。

式中： $R_2$ ——转子每相电阻( $\Omega$ )；

$s_e$ ——电动机额定转差率；

$U_{2e}$ ——转子开路电压(V)；

$I_{2e}$ ——转子额定电流(A)。

$P_e$ ——电动机额定功率(kW)；

$P_j$ ——电动机机械损耗(kW)，一般可取(0.01 ~ 0.02) $P_e$ 。当求绕线型异步电动机起动电阻涉及  $R_2$  时，为了安全起见， $P_j$  估算时可取 0.01 $P_e$ 。

**例 5-1** 异步电动机 JZR12-6，已知  $P_e$  为 3500W， $n_e$  为 910r/min， $U_{2e}$  为 204V， $I_{2e}$  为 12.2A，试求转子每相电阻。

**解** 额定转差率为

$$s_e = \frac{1000 - 910}{1000} = 0.09$$

将已知条件等代入公式一，得

$$R_2 = \frac{0.09 \times 204}{\sqrt{3} \times 12.2} = 0.869(\Omega)$$

代入公式二，得

$$R_2 = \frac{0.09}{1 - 0.09} \times \frac{(1 + 0.01) \times 3500}{3 \times 12.2^2} = 0.783(\Omega)$$

用电桥实测得  $R_2 = 0.7993(\Omega)$ 。

可见近似计算值比实测值大 9%，而较准确计算值比实测值仅小 2%。

#### 四、直流电机的基本公式

##### 1. 电枢电动势

$$E_a = C_e \phi n$$

$$C_e = \frac{PN}{60a}$$

式中： $E_a$ ——电枢电动势(V)；

$C_e$ ——电动势常数；

$p$ ——电机极对数；

$N$ ——绕组导体数；

$a$ ——绕组支路数；

$\phi$ ——每极磁通(Wb)；

$n$ ——电枢转速(r/min)。

2. 直流电动机转矩特性(图 5--4)

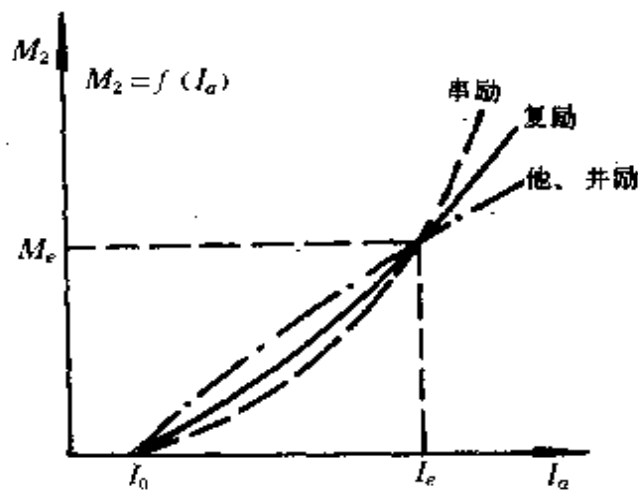


图 5--4 直流电动机转矩特性

$$M_2 = M - M_0 = C_m \phi I_a - M_0$$

$$C_m = \frac{pN}{2\pi a}$$

式中： $M_2$ ——输出转矩(N·m)；

$M$ ——电磁转矩(N·m)；

$M_0$ ——涡流、磁滞与通风摩擦阻转矩(N·m)，其作用方向与电机转向相反；

$I_a$ ——电枢电流(A)；

$C_m$ —— 转矩常数；

其它符号同前。

空载时,  $I_a = I_0 = \frac{M_0}{C_m \phi}$ ; 负载时,  $M_2$  随  $I_a$  的增加而增加, 并与  $\phi$  随  $I_a$  而变的情况有关。

3. 电压平衡方程

图 5—5 为他励直流电动机电路图。

$$U = E_a + I_a(R_a + R_f) + \Delta U_b$$

式中:  $U$ —— 外加电枢电压(V);

$E_a$ —— 电枢电动势(V);

$R_a$ —— 电枢电阻( $\Omega$ );

$R_f$ —— 附加电阻( $\Omega$ );

$\Delta U_b$ —— 正负电刷的接触电阻压降(V);

$I_a$ —— 同前。

4. 直流电动机的转速特性(图 5—6)

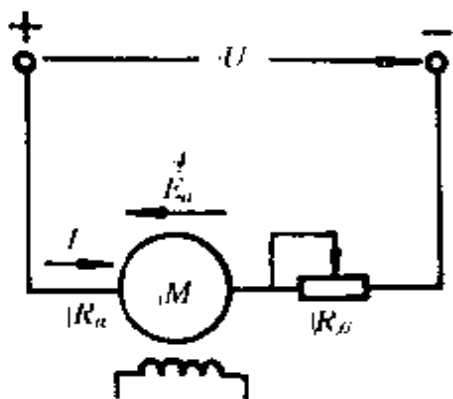


图 5—5 他励直流电动机电路图

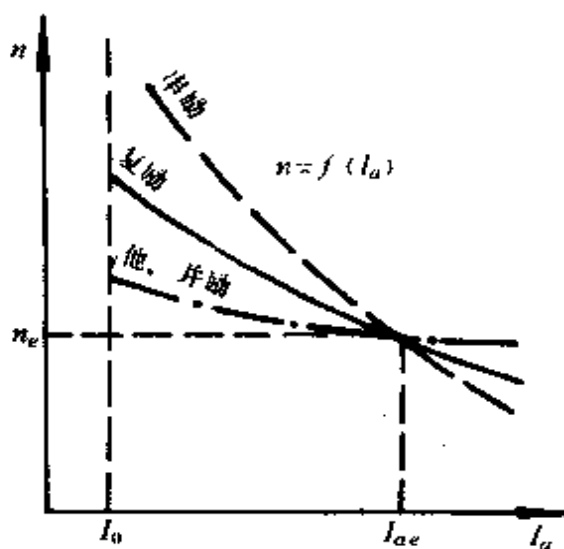


图 5—6 直流电动机的转速特性

$$n = \frac{U - [I_a(R_a + R_f)] + \Delta U_b}{C_e \phi}$$

式中符号同前。

当外加电枢电压  $U$  为常值, 电枢电流  $I_a$  变化时, 影响转速特性的因素是电枢回路电阻压降与气隙磁通的变化。

5. 直流电动机的机械特性(图 5—7)

$$n = \frac{U - \Delta U_b}{C_e \phi} - \frac{M}{C_e C_m \phi^2} (R_a + R_f)$$

式中符号同前。

机械特性曲线与转速特性曲线相似。电枢回路串入外接电阻后, 其外特性将变软。

图 5—8 为他励直流电动机励磁改变时的机械特性 ( $\phi_1 > \phi_2$ )。

图 5—9 为他励直流电动机电枢电压改变时的机械特性 ( $U_2 > U_1 > U_3$ )。

图 5—10 为他励直流电动机电枢串接电阻时的机械特性 ( $R_{f3} > R_{f2} > R_{f1}$ )。

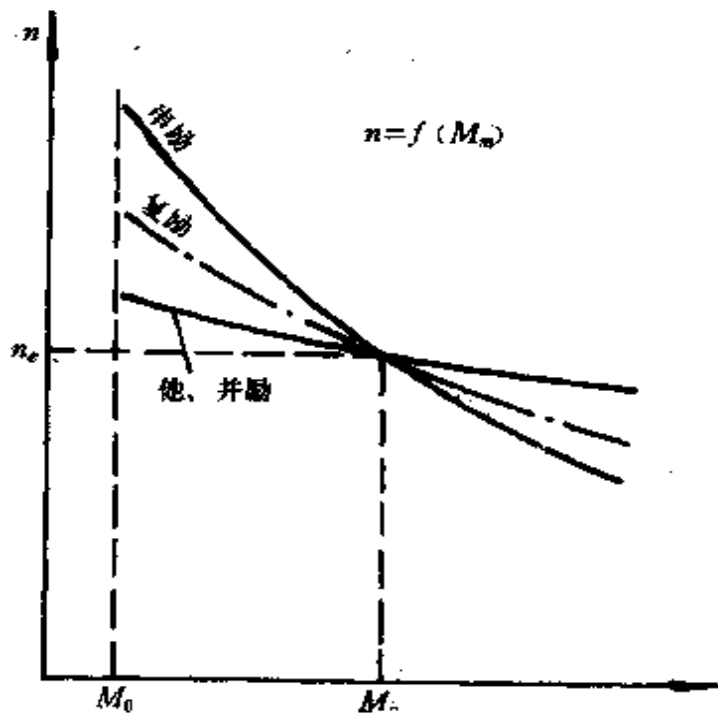


图 5—7 直流电动机的机械特性

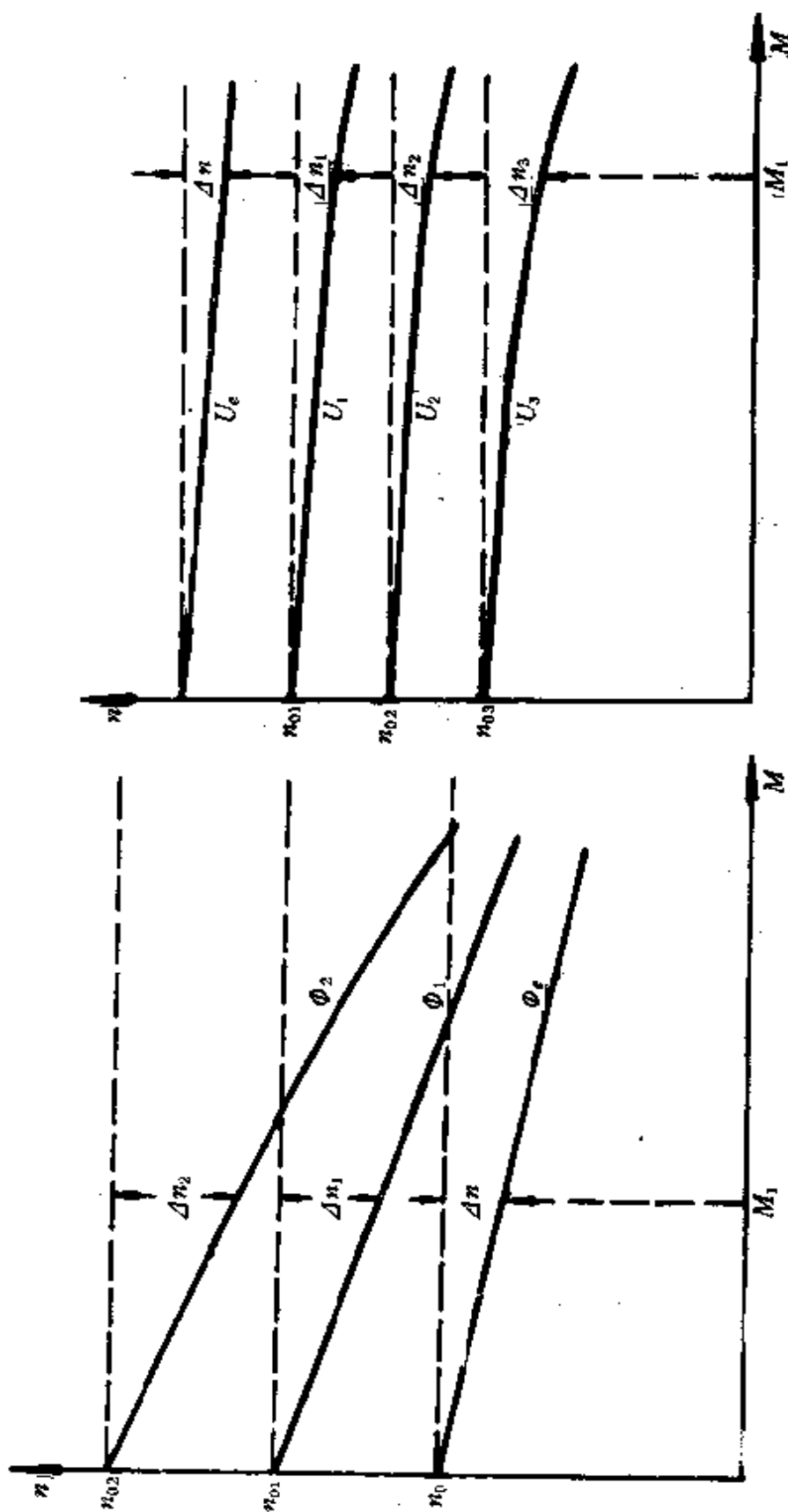


图 5-8 他励直流电动机励磁改变时的机械特性 ( $\phi_2 > \phi_1 > \phi_e$ )

图 5-9 他励直流电动机电枢电压改变时的机械特性 ( $U_1 > U_2 > U_3$ )

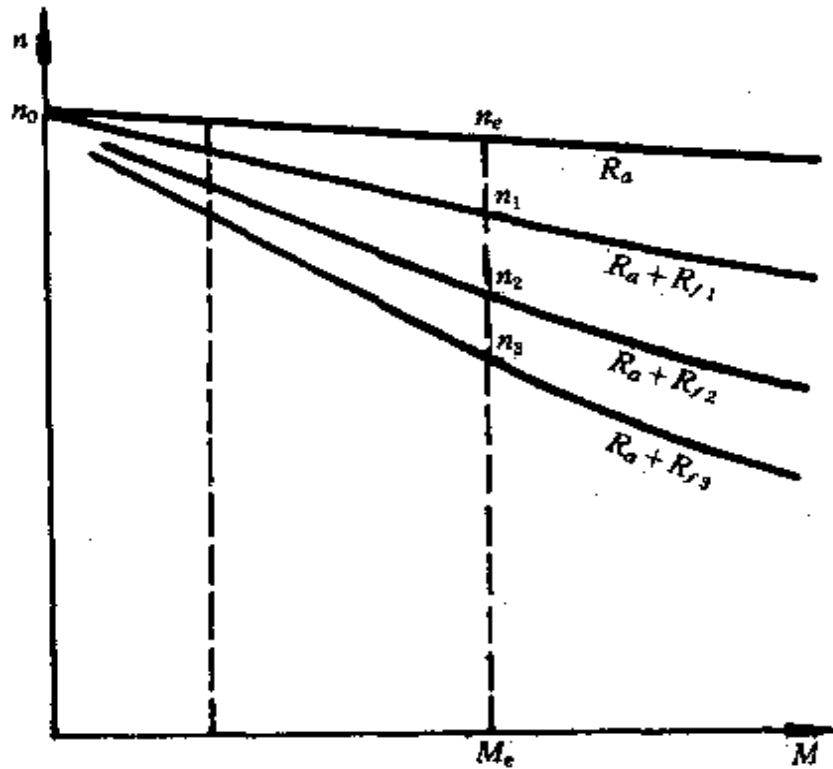


图 5—10 他励直流电动机电枢串接电阻时的机械特性 ( $R_{f3} > R_{f2} > R_{f1}$ )

6. 功率平衡方程

$$P_1 = P_m + \Sigma \Delta P_a = P_0 + \Sigma \Delta P_a + P_2$$

$$P_2 = P_m - P_0$$

$$P_1 = UI_a \times 10^{-3}, \quad P_m = E_a I_a \times 10^{-3}$$

$$\Sigma \Delta P_a = (I_a^2 R_a + I_a \Delta U_b) \times 10^{-3}$$

式中： $P_1$ ——电动机输入功率(kW)；

$P_m$ ——电磁功率(kW)；

$\Sigma \Delta P_a$ ——电枢回路总损耗(kW)；

$P_0$ ——涡流、磁滞与通风摩擦损耗(kW)；

$P_2$ ——电动机输出功率(kW)；

其它符号同前。

电动机效率

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = 1 - \frac{\Sigma\Delta P}{P_1} = 1 - \frac{\Sigma\Delta P}{P_2 + \Sigma\Delta P}$$

### 五、直流电机电枢回路电感、电阻的计算

#### 1. 电动机电枢回路的电感和电阻

$$L_a = \frac{19.1CU_e}{2pn_e I_e} \times 10^3$$

$$R_a = R_{a1} + R_{a2} + R_{a3}$$

式中： $L_a$ ——电动机电枢回路的电感(mH)；

$R_a$ ——电动机电枢回路的电阻( $\Omega$ )；

$C$ ——系数，有补偿电机为 0.1，无补偿电机为 0.4；

$U_e$ ——电动机额定电压(V)；

$I_e$ ——电动机额定电流(A)；

$n_e$ ——电动机额定转速(r/min)；

$p$ ——极对数；

$R_{a1}$ ——电枢绕组电阻( $\Omega$ )；

$R_{a2}$ ——换向绕组电阻( $\Omega$ )；

$R_{a3}$ ——补偿绕组电阻( $\Omega$ )。

#### 2. 发电机电枢回路的电感和电阻

$$L_a = \frac{19.1CU_e}{2pn_e I_e} \times 10^3$$

$$R_a = R_{a1} + R_{a2} + R_{a3}$$

式中： $L_a$ ——发电机电枢回路的电感(mH)；

$R_a$ ——发电机电枢回路的电阻( $\Omega$ )；

$C$ ——系数，有补偿电机为 0.2，无补偿电机为 0.6；

$U_e$ ——发电机额定电压(V)；

$I_e$ ——发电机额定电流(A)；

$n_e$ ——发电机额定转速(r/min)；



$R_{a1}$ ——发电机电枢绕组电阻( $\Omega$ );

$R_{a2}$ ——发电机换向绕组电阻( $\Omega$ );

$R_{a3}$ ——发电机补偿绕组电阻( $\Omega$ )。

### 六、无铭牌直流发电机额定电流的估算

先查出电枢绕组的种类,再查出绕组导线的截面,然后由估算的电流密度来估算电枢电流。

波绕组及 2 极迭绕组  $I_a = 2NS_i j$

4 极迭绕组  $I_a = 4NS_i j$

式中: $I_a$ ——电枢电流(A);

$N$ ——由  $N$  根线组成的导线;

$S_i$ ——每根导线的截面( $\text{mm}^2$ ),可由线规表查得;

$j$ ——导线电流密度,约  $4.5 \sim 6\text{A}/\text{mm}^2$ 。

再根据估算出的电枢电流,作电机温升发热试验,最后核对确定。

**例 5—2** 如图 5—11 所示,有一电枢电阻为  $0.055\Omega$  的直流并励发电机,当转速为  $1000\text{r}/\text{min}$ ,端电压为  $220\text{V}$  时,电枢电流为  $85\text{A}$ 。现要将它作电动机用,若保持它的端电压及电枢电流与

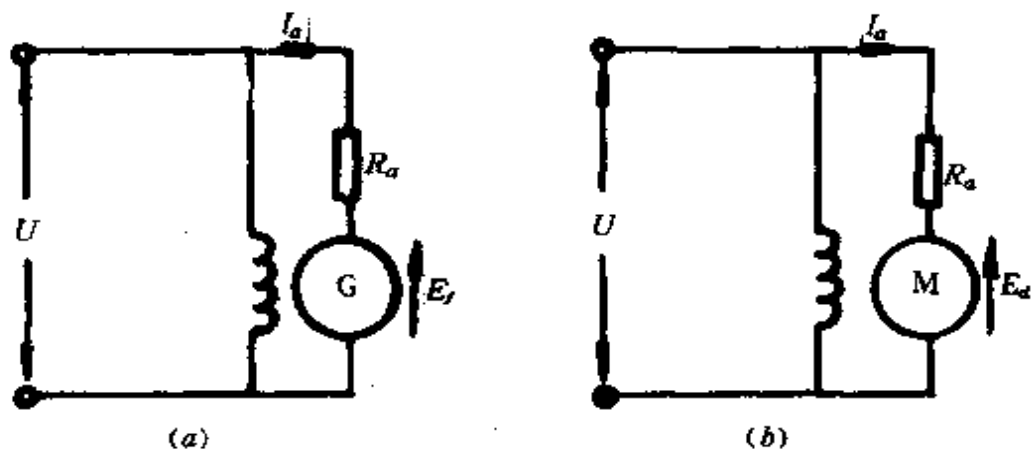


图 5 11 例 5—2 图  
(a) 作发电机时 (b) 作电动机时

上述数值相同时,试问它的转速为多少?设电枢反应可忽略不计。

**解** 设端电压为  $U$ , 电枢电流为  $I_a$ , 电枢电阻为  $R_a$ , 电势常数为  $C_e$ , 作为发电机时的感应电动势为  $E_f$ , 转速为  $n_f$ , 磁通为  $\phi_f$ ; 作为电动机时的反电动势为  $E_d$ , 转速为  $n_d$ , 磁通  $\phi_d$ , 则有下列关系

(1) 作发电机运行时:

$$E_f = U + I_a R_a = 220 + 85 \times 0.055 = 224.7(\text{V})$$

因为  $E_f = C_e \phi_f n_f$

故  $C_e \phi_f = E_f / n_f$

(2) 作电动机运行时:

$$E_d = U - I_a R_a = 220 - 85 \times 0.055 = 215.3(\text{V})$$

$$E_d = C_e \phi_d n_d$$

按题意,端电压  $U$  不变,忽略电枢反应,所以磁通在作电动机的情况下也不变,即  $\phi_f = \phi_d$ ,因此,转速为

$$n_d = \frac{E_d}{C_e \phi_d} = \frac{E_d}{E_f} n_f = \frac{215.3}{224.7} \times 1000 \approx 961(\text{r/min})$$

### 七、滑差电动机的基本计算

滑差电动机又称电磁调速异步电动机。

#### 1. 机械特性

机械特性可近似地用以下经验公式表示:

$$n_2 = n_1 - K \frac{M_2}{9.81 I_d^2}$$

式中:  $n_2$ ——转差离合器输出轴转速(r/min);

$n_1$ ——原动机转速(r/min);

$M_2$ ——转差离合器输出轴转矩(N·m);

$I_d$ ——转差离合器励磁电流(A);

$K$ ——与转差离合器类型有关的系数。

滑差电动机的人工机械特性如图 5—12 所示。图中虚线为

自然机械特性,随着负载转矩的增大,转速急剧下降,故机械特性很软。这样的机械特性不能直接应用于要求速度比较稳定的工作机械上。为此,在这种系统中一般都引入速度负反馈,从而使机械特性变硬,如图中实线所示。

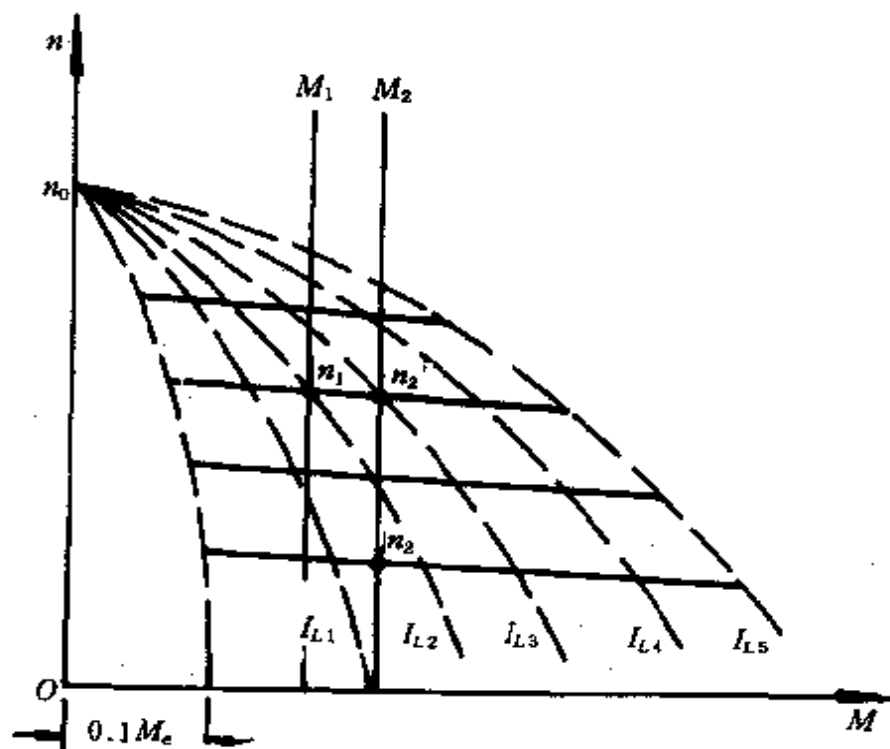


图 5-12 人工机械特性 ( $I_{L1} < I_{L2} < I_{L3} < I_{L4} < I_{L5}$ )

由于摩擦转矩和剩磁转矩的存在,故在负载转矩小于 10% 额定转矩时,控制特性明显变坏,有时甚至失控。

## 2. 传递效率

$$\eta = n_2/n_1$$

式中:  $n_1$  —— 拖动电动机输出转速;

$n_2$  —— 离合器输出转速。

通常,在高速时传递效率为 80~85%。当转速降低时,离合器的输出功率相应降低。因此,这种电动机不适用于恒功率负载,而适用于鼓风机负载和恒转矩负载。

### 3. 离合器输出功率

$$P_2 = P_1 \eta = P_1 \frac{n_2}{n_1}$$

式中： $P_1$ ——拖动电动机输出功率(kW)；

$P_2$ ——离合器输出功率(kW)。

## 第二节 电动机损耗计算及节电计算

### 一、异步电动机空载电流计算

电动机的铭牌或产品说明书上一般不记入空载电流的数值，如果运行时没有留下空载电流数据，可用计算方法来确定。计算方法通常有以下几种：

#### 1. 公式一

$$I_0 = m I_e \cos \varphi_e$$

而

$$m = \operatorname{tg} \varphi_e - \frac{1}{\frac{k_q}{\cos \varphi_e \sin \varphi_q} - \operatorname{tg} \varphi_q}$$

$$\sin \varphi_q = \sqrt{1 - \left( \frac{2 \cos \varphi_e \cdot k_m}{k_q} \right)^2}$$

式中： $I_0$ ——电动机空载电流(A)；

$I_e$ ——电动机额定电流(A)；

$\cos \varphi_e$ ——额定功率因数；

$\operatorname{tg} \varphi_e$ ——额定功率因数角的正切值；

$\operatorname{tg} \varphi_q$ ——起动功率因数角的正切值；

$\sin \varphi_q$ ——起动功率因数角的正弦值；

$k_q$ ——起动电流倍数，即起动电流与额定电流之比；

$k_m$ ——起动转矩倍数，即起动转矩与额定转矩之比。

上式是根据电动机的简化圆图推导出来的计算公式,由于参数多,计算较麻烦。

2. 公式二

$$I_0 = K[(1 - \cos\varphi_e) \sqrt{1 - \cos^2\varphi_e} I_e]$$

式中:K——系数,见表5—5;

其它符号同前。

表5—5 系数 K 值

cosφ	极 数	K
≥ 0.85	4,2	5.5
0.81 ~ 0.85	4,6,8	4.2
0.70 ~ 0.80	4,6,8	3.4
≤ 0.75	6,8	3.0

上式是通过对大量电动机的试验数据的分析和统计,归纳出的一个实用近似计算公式。由于参数少,计算方便。

3. 公式三

$$I_0 = I_e \cos\varphi_e (2.26 - \xi \cos\varphi_e)$$

式中:ξ——系数,当cosφ<sub>e</sub> ≤ 0.85时,取2.1,当cosφ<sub>e</sub> > 0.85时,取2.15。

上式为经验公式,计算方便,较公式二准确。

4. 粗略估算时可按下式进行

$$I_0 = k I_e$$

式中:k——经验系数。

该系数对于Y系列电动机为0.16 ~ 0.55,2极电机取较小值,6,8极电机取较大值,同规格电机的空载电流波动幅度约为

5 ~ 15%；其它系列电机， $k$  为 0.3 ~ 0.5，一般 5.5kW 以下者取 0.4，7.5 ~ 11kW 者取 0.35，13 ~ 22kW 者取 0.3。

## 二、异步电动机功率因数的计算

### 1. 方法一

先测出电动机的输入功率、线电压和线电流，然后按下式计算：

$$\cos\varphi = \frac{P_1 \times 10^3}{\sqrt{3}U_1 I_1}$$

式中： $P_1$ ——输入功率(kW)；

$U_1$ ——线电压(V)；

$I_1$ ——线电流(A)。

### 2. 方法二

用两个瓦特表测量出功率，然后按下式计算：

$$\cos\varphi = \frac{1}{\sqrt{1 + 3 \frac{W_1 - W_2}{W_1 + W_2}}}$$

式中： $W_1$ ——二瓦特表中较大的读数；

$W_2$ ——另一瓦特表的读数(应注意正负号)，单位同  $W_1$ 。

用上述两种方法求得的  $\cos\varphi$  值基本一致。

## 三、异步电动机转差率和工作特性的测算

### 1. 异步电动机转差率的测算(闪光测频法)

用光测频器测定转差率的方法比较简便，应用的工具也较简单，如图 5—13 所示。在圆纸片上画上黑条或扇形黑条(数目可视需要而定)将其粘着在转子轴端上，另用一气体放电灯(也可用日光灯)照射之，则在旋转的纸圆片上出现黑色影形。若转子同步旋转，则影形静止不动；若转差率为正，即转子转速小于同步转速时，影形反转子转向而旋转；若转差率为负，即转子转

速大于同步转速时，影形顺转子转向而旋转。记录影形在某一时间内通过空间某一位置的数目，或旋转的次数，便可计算出转差率。

(1) 计算转差率的方法：若灯光与电机用同一电源，其频率为每称 50 周。设光测频器上的影形，在一定的空间某一位置上，于  $t$  秒内测得有  $z$  个经过，则转差率为

$$s = \frac{z}{100t} = \frac{z}{t} \%$$

上式适用于  $f' = 2f_1 = 100$  影形数等于极数  $P$  时的情况

( $f'$  为灯光闪烁的频率——系指灯光每秒明熄的次数，为接入电源频率  $f_1$  的二倍)。

例如，有一电动机，其光测频器上的影形，在一定的空间位置，10s 内测得经过 50 次，灯光与电动机用同一电源，( $f = 50\text{Hz}$ )，则转差率为

$$s = \frac{z}{t} \% = \frac{50}{10} \% = 5\%$$

(2) 计算影形数目及转差率的一般公式：

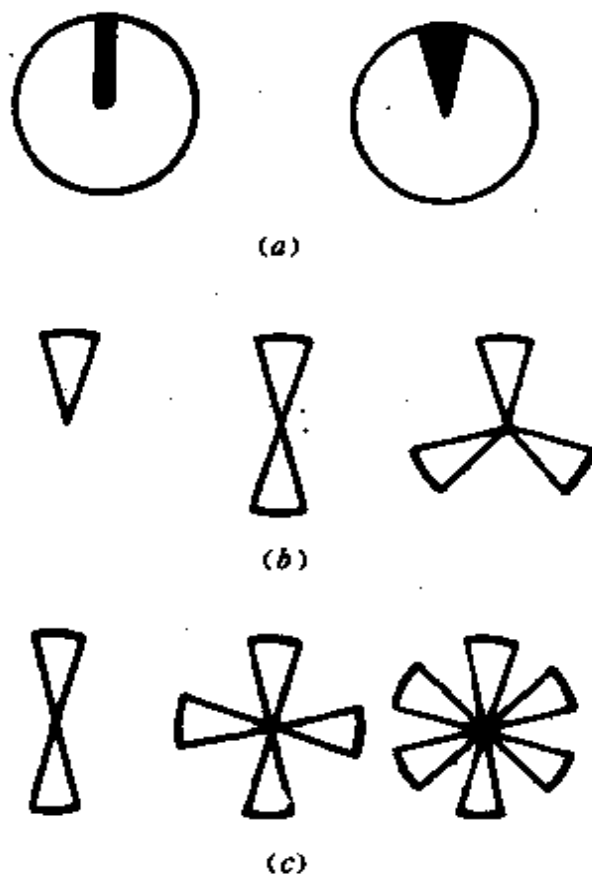


图 5—13 闪光测频法  
(a) 纸圆片 (b)  $f' = f_1$  影形图  
(c)  $f' = 2f_1$  影形图

$$C = \frac{mp}{(mq, p)}, \quad s = \frac{Pz}{Cf_1t}$$

式中:  $C$ ——影形数目;

$s$ ——转差率;

$m$ ——纸圆片上所画扇形黑条的总数, 此扇形黑条要均匀分布在整个纸圆片上;

$p$ ——电动机的极对数;

$q$ ——电动机电源频率与灯光频率的比值,  $q = f_1/f'$ ;

$(mq, p)$ —— $mq$  及  $p$  的最大公约数。

**例 5—3** 用一画有四扇形黑条的纸圆片测定 6 极感应电动机的转差率。已知电动机和灯光采用同一电源,  $f_1 = 50\text{Hz}$ , 在 20s 内测得于空间某一定位置有 4 个黑色影形经过, 试求转差率。

**解**  $m = 4, \quad q = f_1/f' = 50/100 = 0.5$

$p = 3, \quad (mq, p) = (2, 3) = 1$

因此  $C = \frac{mp}{(mq, p)} = 4 \times 3 = 12$

转差率为  $s = \frac{pz}{Cf_1t} = \frac{3 \times 4}{12 \times 50 \times 20} = 0.001$

(3) 多扇形纸圆片的制作: 制作一个如图 5—14 所示的多扇形纸圆片, 能在各种不同的情况下测定各种转差率, 不论  $n$  极电动机均可应用。

注意: 用光测频器法测定的转差率, 得到的是某一段时间内的平均转差率, 而不是瞬时的转差率。因此在负载变动过大时, 所测结果误差较大。

## 2. 中小型异步电动机工作特性的测算

异步电动机的工作特性在第一节二中已作介绍。这里讲述异步电动机典型工作特性  $P_1 = f(P_2)$ 、 $I_1 = f(P_2)$ 、 $\eta = f(p_2)$ 、 $\cos\varphi = f(p_2)$  及  $s = f(p_2)$  的简易测试。



(1) 绕组在冷态下直流电阻的测定:用双臂电桥在电动机出线端子上测量定子绕组的电阻,每一电阻应测量  $n$  次,每次测量值与其平均值的偏差,应不大于  $\pm 0.5\%$ 。电阻的实际值取其平均值。



图 5—14 多扇形纸圆片

若绕组在电动机内部三相接成 Y 形或  $\Delta$  形,则相电阻应按下列公式确定:

$$Y \text{ 形接法 } R_x = \frac{1}{2} R_i, \Delta \text{ 形接法 } R_x = \frac{3}{2} R_i$$

式中:  $R_x$  —— 相电阻 ( $\Omega$ );

$R_i$  —— 在电动机出线端上测得的电阻平均值 ( $\Omega$ )。

然后按下式换算成基准工作温度下的相电阻:

$$R_{xw} = \frac{T + 75}{T + t_c} R_i \quad (\text{A、E、B 级绝缘}),$$

$$R_{xw} = \frac{T + 115}{T + t_c} R_i \quad (\text{F、H 级绝缘})$$

式中:  $T$  —— 常数,铜导线为 234.5,铝导线为 225;

$t_c$  —— 绕组实际冷态的温度 ( $^{\circ}\text{C}$ )。

(2) 空载试验:试验线路如图 5—15 所示。将电动机接入电源空转。当电源电压对称时,各相电流与三相平均电流之差,不应超过 10%。电机空转时间:1.1kW 以下者为 15min;1.1 ~ 11kW 者为 30min;15 ~ 100kW 者为 60min;132 ~ 1000kW 者为 90 ~ 120min。然后在额定频率下,调节输入电压,在  $(1.2 \sim 0.4)U_n$  范围内 ( $U_n$  为额定电压) 测量 7 ~ 9 点,记录每点的电压、电流和输入功率。

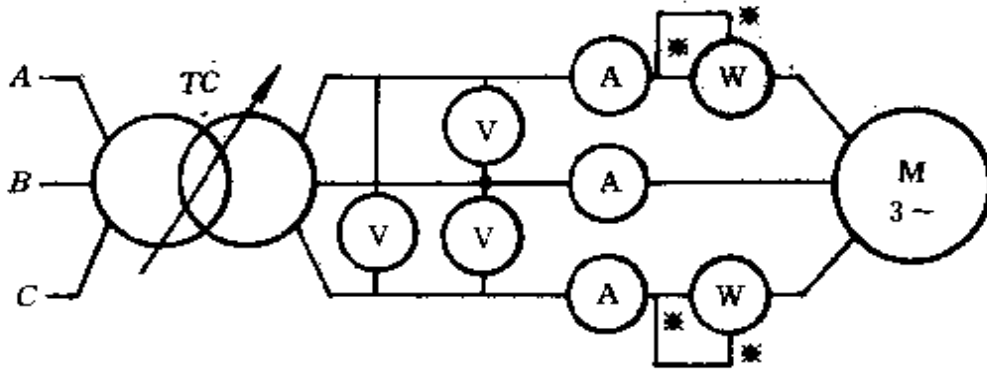


图 5—15 空载试验接线图

$$I_0 = \frac{A_1 + A_2 + A_3}{3} C_i$$

$$P_0 = (W_1 - W_2) C_w$$

式中： $I_0$ ——每点的空载电流(A)；

$C_i$ ——电流表表面读数化为电流值的倍数；

$A_1, A_2, A_3$ ——三表的电流表读数(A)；

$P_0$ ——每点的空载输入功率(kW)；

$C_w$ ——瓦特表的倍数；

$W_1, W_2$ ——瓦特表的读数，由于 $W_1$ 为正， $W_2$ 为负，故取二者读数之差。

则各点的空载铜耗为

$$\text{Y形接法 } P_{ocCu} = 3I_0^2 R_{rw} \times 10^{-3}$$

$$\text{\(\Delta\)形接法 } P_{ocCu} = I_0^2 R_{rw} \times 10^{-3}$$

各点的铁耗与机械损耗之和为

$$P_{Fe} + P_j = P_0 - P_{ocCu}$$

以  $\left(\frac{U_0}{U_e}\right)^2$  为横坐标,  $P_0 - P_{0Cu}$  为纵坐标, 作  $P_0 - P_{0Cu} = f\left(\frac{U_0}{U_e}\right)^2$  曲线, 延长此线与纵坐标相交点, 该交点的纵坐标值即为机械损耗  $P_j$ ,  $\left(\frac{U_0}{U_e}\right)^2 = 1$  对应的  $P_0 - P_{0Cu}$  减去  $P_j$  即为铁耗  $P_{Fe}$ , 如图 5—16 所示。

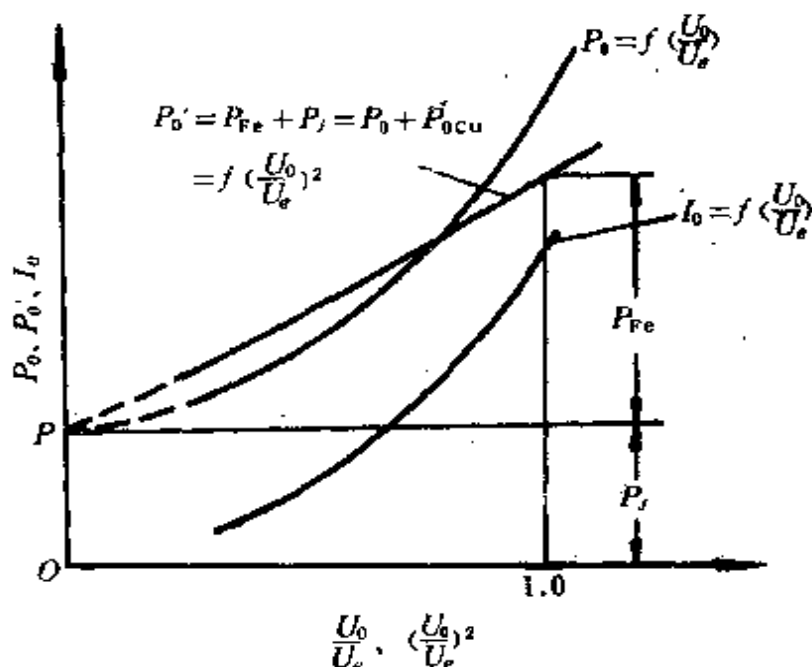


图 5—16 空载特性曲线

最后, 作空载特性曲线  $P_0 = f\left(\frac{U_0}{U_e}\right)$  和  $I_0 = f\left(\frac{U_0}{U_e}\right)$ , 并查得  $\frac{U_0}{U_e} = 1$  时的空载电流  $I_0$  和空载损耗  $P_0$  (见图 5—16)。

(3) 堵转试验: 按表 5—6 规定电压进行堵转试验, 读取对应堵转电压  $U_d$  的堵转电流  $I_d$ , 并按下式换算成额定电压时的堵转电流  $I_d$ :

$$I_d = I_a \frac{U_e}{U_d}$$

表 5—6 堵转电压规定值

电机额定电压(V)	220	380	660	3000	6000
堵转电压 $U_d$ (V)	70	110	170	850	1600

(4) 电动机带负载试验：用精度较高的钳形电流表测出三相线电流，测  $n$  次，取其平均值，设为  $I_1$ 。另外，用上述介绍的光测频器测出对应  $I_1$  的转差率  $s$ 。

(5) 工作特性的计算：

① 对应额定电流  $I_e$  的功率因数  $\cos\varphi$  计算：

$$\sin\varphi = \frac{I_{0x} \left( 1 - \frac{I_{ex} R_{xw}}{U_{ex}} \right) + \frac{I_{ex}^2 - I_{0x}^2}{I_{dx} + 2I_{0x}}}{I_{ex}}$$

$$- \frac{2 \frac{I_{0x} R_{xw}}{U_{ex}}}{I_{ex}} \times \sqrt{\frac{I_{ex}^2 - I_{0x}^2}{1 + 2I_{0x}/I_{dx}}}$$

$\Delta$  形接法： $U_{ex} = U_e$ ,  $I_{ex} = I_e / \sqrt{3}$

$I_{0x} = I_0 / \sqrt{3}$ ,  $I_{dx} = I_d / \sqrt{3}$

Y 形接法： $U_{ex} = U_e / \sqrt{3}$ ,  $I_{ex} = I_e$

$I_{0x} = I_0$ ,  $I_{dx} = I_d$

$$\cos\varphi = \sqrt{1 - \sin^2\varphi}$$

② 对应额定电流  $I_e$  的转差率  $s_e$  的计算：

$$s_e = \frac{s}{\sqrt{\frac{I_1^2 - I_0^2}{I_e^2 - I_0^2}}}$$

③ 对应额定电流  $I_e$  的总损耗  $\Sigma\Delta P_e$  的计算:

$$P_{Cu1e} = 3I_e^2 R_{xu} \times 10^{-3}$$

$$P_{Cu2e} = (P_{1e} - P_{Cu1e} - P_{Fe})s_e$$

$$P_{\Sigma e} = k_x P_1$$

$$\text{总损耗 } \Sigma\Delta P_e = P_{Fe} + P_j + P_{Cu1e} + P_{Cu2e} + P_{\Sigma e}$$

式中:  $P_{1e}$ ——电动机额定输入功率(kW),

$$P_{1e} = \sqrt{3} U_e I_e \cos\varphi \times 10^{-3};$$

$k_x$ ——系数,见表 5—7。

表 5—7 系数  $k_x$  值

极数 电机类型	2	4	6	8 以上
鼠笼型	0.025	0.02	0.015	0.01
绕线型	0.02	0.015	0.01	0.005

④ 对应  $I_e$  的输出功率  $P_{2e}$  和效率  $\eta_e$  的计算:

$$P_{2e} = P_{1e} - \Sigma\Delta P_e, \quad \eta = P_{2e}/P_{1e}$$

⑤ 任意负载下的  $I_1$ 、 $P_1$ 、 $\cos\varphi$ 、 $\eta$  和  $s$  的计算: 设电动机的负载率为  $\beta$ , 则

$$I_1 = \sqrt{\beta^2 (I_e^2 - I_0^2) + I_0^2}, \quad P_2 = \beta P_{2e}$$

$$\Sigma\Delta P = P_0 + \beta^2 (\Sigma\Delta P_e - P_0), \quad P_1 = P_2 + \Sigma\Delta P$$

$$\cos\varphi = \frac{P_1 \times 10^3}{\sqrt{3} U_e I_1}, \quad \eta = P_2/P_1, \quad s = \beta s_e$$

根据以上各式, 便可求出  $\beta = 1, 0.8, 0.7, 0.5$  及  $0.25$  时的  $I_1$ 、 $P_1$ 、 $\cos\varphi$ 、 $\eta$  和  $s$  (根据  $I_e$  计算出具体数值), 填入表 5—8 中即可作出运行特性曲线。

表 5--8 求运行特性表

特 性 值	$\beta = 1$	0.8	0.7	0.5	0.25
$I_1 = \sqrt{\beta^2(I_2^2 - I_0^2) + I_0}$					
$\Sigma\Delta P = P_0 + \beta^2(\Sigma\Delta P_c - P_0)$					
$P_1 = \beta P_2 + \Sigma\Delta P$					
$\cos\varphi = \frac{P_1}{\sqrt{3} U_e I_1} \times 10^3$					
$\eta = P_2/P_1$					
$s = \beta s_c$					

#### 四、异步电动机损耗及功率平衡计算

##### 1. 异步电动机损耗计算

异步电动机的损耗包括铁耗  $P_{Fe}$ 、定子铜耗  $P_{Cu1}$ 、转子铜耗  $P_{Cu2}$ 、机械损耗  $P_j$  和附加损耗  $P_{fj}$ ，而  $P_{fj}$  又包括风摩耗  $P_f$  和杂散损耗  $P_s$ 。

(1) 定子铜耗(定子绕组电阻损耗)：

$$P_{Cu1} = 3I_{x1}^2 R_{xw1} \times 10^{-3}$$

式中： $I_{x1}$ —— 定子绕组中的电流(A)；

$R_{xw1}$ —— 换算到基准工作温度的定子每相绕组的电阻( $\Omega$ )，即定子相电阻，求法同前。

(2) 转子铜耗(转子绕组电阻损耗)：

$$P_{Cu2} = \frac{P_1 - P_{Cu1} - P_{Fe}}{100} s_w, \quad s_w = s \frac{T + t_w}{T + t}$$

式中： $P_1$ —— 电动机输入功率(kW)；

$s_w$ —— 换算到基准工作温度的转差率；

$s$ ——测得的转差率；

$T$ ——常数，铜导线为 234.5，铝导线为 225；

$t_w$ ——基准工作温度(°C)；

$t$ ——测量转差率时的转子绕组温度(°C)，如不能实测，可用温升试验时的定子绕组温度代替。

定子铜耗与转子铜耗也可一起计算，即先将转子电阻折算到定子的冷态电阻  $R'_2$ ，并换算到基准工作温度值  $R'_{w2}$ 。冷态电阻按下式计算：

$$R'_2 = 1.02 \frac{P_e s_e}{3I_e^2} \times 10^3$$

式中： $R'_2$ ——冷态电阻( $\Omega$ )；

$P_e$ ——电动机额定功率(kW)；

$s_e$ ——电动机额定转差率；

$I_e$ ——电动机额定电流(A)。

基准温度时定子和转子相电阻之和为  $R_w = R_{w1} + R'_{w2}$

电动机总铜耗为  $P_{Cu} = P_{Cu1} + P_{Cu2} = 3I_{x1}^2 R_w \times 10^{-3}$

(3) 铁耗  $P_{Fe}$  与机械损耗  $P_j$ ：

① 当铁耗与机械损耗一起求时：

$$P' = P_{Fe} + P_j = P_c - P_{0Cu}$$

$$P_{0Cu} = 3I_{0x}^2 R_w \times 10^{-3}$$

式中： $P_0$ ——电动机空载损耗(kW)；

$P_{0Cu}$ ——电动机空载铜耗(kW)；

$I_{0x}$ ——定子绕组中空载电流(A)；

② 当铁耗与机械损耗分开来求时：若空载特性曲线已知，可按本节三由空载特性曲线求得(见图 5—16)。若空载特性曲线未知，可用以下简易方法计算。

对于  $\Delta$  接法的 Y 系列电动机，分别测得  $\Delta$  接法和 Y 接法

的有关数据,及定子绕组的线电阻  $R_1$ ,则对应电网电压  $U_0$  的铁耗  $P'_{Fe}$  为

$$P'_{Fe} = \frac{P_{0\Delta} - P_{0Y} - P_{0Cu\Delta} + P_{0CuY}}{0.67}$$

$$P_{0Cu\Delta} = 1.5I_{0\Delta}^2 R_1 \times 10^{-3},$$

$$P_{0CuY} = 1.5I_{0Y}^2 R_1 \times 10^{-3}$$

式中: $P_{0\Delta}$ 、 $P_{0Y}$ ——对应  $U_0$  时测得的  $\Delta$  接法和 Y 接法下的空载输入功率(kW);

$P_{0Cu\Delta}$ 、 $P_{0CuY}$ ——对应  $U_0$  时  $\Delta$  接法和 Y 接法下的电动机定子铜耗(kW),

$I_{0\Delta}$ 、 $I_{0Y}$ ——对应  $U_0$  时  $\Delta$  接法和 Y 接法下的电动机空载电流;

$R_1$ ——定子绕组的线电阻( $\Omega$ )。

因此, $\Delta$  接时电动机的机械损耗  $P_j$  为

$$P_j = P_{0\Delta} - P_{0Cu\Delta} - P_{Fe}$$

额定电压  $U_e$  下的铁耗  $P_{Fe}$  为

$$P_{Fe} = P'_{Fe} \left( \frac{U_e}{U_0} \right)^2$$

③ 如果电动机与生产机械无法脱开,则实测时只能得到未脱开生产机械的不带负载时的“空载功率” $P'_0$  和“空载电流” $I'_0$ ,这时电动机的真正空载功率  $P_0$  和空载电流  $I_0$  可按下列公式估算:

$$P_0 = (0.5 \sim 0.7)P'_0,$$

$$I_0 = (0.5 \sim 0.7)I'_0$$

粗略估算时,Y 系列电动机的空载损耗为  $P_0 = (0.03 \sim 0.08)P_e$  ( $P_e$  为额定功率),2 极电动机取较大值,6、8 极电动机取较上值。空载损耗的波动幅度约为 5 ~ 20%。

④ 额定电压时的空载电流换算:



$$I_{0e} = I_0 \frac{1 - 0.66U^*}{0.18 + 0.16U^*}$$

式中： $I_{0e}$ ——额定电压时的空载电流(A)；

$I_0$ ——实测的空载电流(A)；

$U^*$ ——空载电压与额定电压之比，即  $U_0/U_e$ 。

⑤ 频率不为额定值时，铁耗与机械损耗的修正：设实测时的频率为  $f$ ，额定频率为  $f_e$ ，与它们对应的电压为  $U'$  和  $U_e$ ，铁耗为  $P'_{Fe}$  和  $P_{Fe}$ ，机械损耗为  $P'_j$  和  $P_j$ ，则

$$U_e = U' \frac{f_e}{f}$$

$$P_{Fe} = P'_{Fe} \frac{f_e}{f_e + 1.5(f_e - f)}$$

$$P_j = P'_j \frac{f_e}{f_e + 2(f_e - f)}$$

Y(IP44) 系列电动机的机械损耗参考值，见表 5—9。

表 5—9 Y(IP44) 系列电动机的机械损耗  $P_j$  参考值

极 数	2	4	6	8
额定功率 $P_e$ (kW)	$P_j$ (W)	$P_j$ (W)	$P_j$ (W)	$P_j$ (W)
4	90	40	30	40
5.5	115	60	30	40
7.5	170	60	70	50
11	350	120	70	70
15	350	120	100	110
18.5	350	180	150	135
22	650	180	150	150
30	1000	300	280	160
37	1000	450	300	200
45	1130	450	400	200
55	1150	600	400	
75	2500	1100		
90	2500	1100		

(4) 杂散损耗  $P_s$ : 异步电动机杂散损耗值从理论上进行计算比较困难, 通常都参考相似结构、相近规格电动机的杂散损耗实测值进行估算, 一般铜条转子  $P_s = 0.005P_e$ ; 铸铝转子,  $P_s = 0.01 \sim 0.03P_e$  (极数少者取较大值)。在无实测值时, 可参表 5-10 选取。

表 5-10 普通小型异步电动机(铸铝转子)杂散损耗  $P_s$  参考值

极对数 $2p$	1	2	3	4	5
杂散损耗 $P_s$	$0.025P_e$	$0.02P_e$	$0.015P_e$	$0.01P_e$	$0.01P_e$

注:  $P_e$ ——电动机额定功率。

(5) 风摩擦耗(风扇通风功率)  $P_f$ : 计算见本节电动机通风风扇功耗的计算。

### 2. 电动机效率计算

(1) 求出以上各损耗后, 便可按下式计算电动机的效率:

$$\eta = 1 - \frac{\Sigma \Delta P}{P_1}$$

(2) 有电动机效率曲线时, 可按负荷大小从曲线图查得  $\eta$  值; 无效率曲线但知道额定负荷下的效率时, 可按负荷率 ( $\beta = P_2/P_e$ ) 查取修正值  $K$ , 然后按下式计算:

$$\eta = K\eta_e$$

式中,  $K$ ——效率修正值,  $K = \eta/\eta_e$ , 可由图 5-17 查得;

$\eta_e$ ——电动机额定效率。

(3) 估算: 当电动机负荷率  $\beta > 50\%$  时,  $\eta \approx \eta_e$ ; 当  $\beta = 50\%$

~ 25% 时,  $\eta \approx \eta_e - 0.1$ ; 当  $\beta < 25\%$  时,  $\eta = \eta_e - 0.5$ 。电动机额定效率  $\eta_e$  可按电动机类型、转速、功率从电机样本中查得。

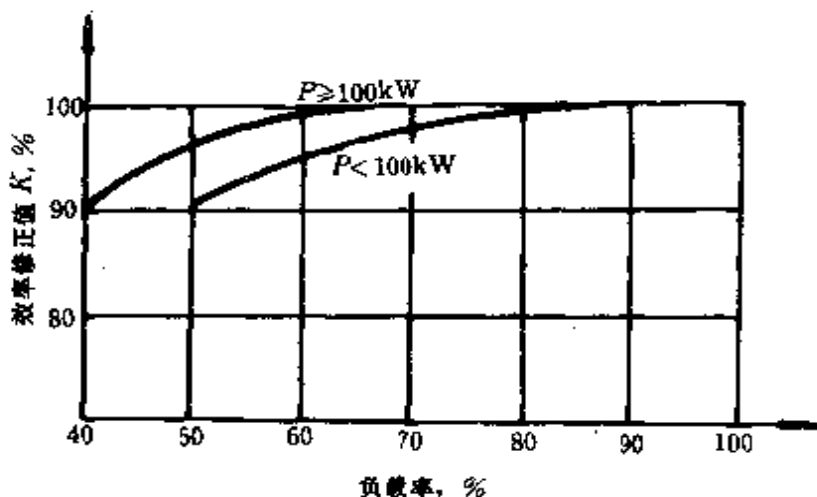


图 5-17 异步电动机通用效率修正曲线

**例 5-4** 有一台额定功率为 45kW 的三相异步电动机,  $\Delta$  接法, 测试结果如下: 负载时输入功率为 30.5kW, 空载输入功率为 3.06kW, 负荷线电流为 61A, 空载线电流为 34.2A, 负荷时转速为 1480r/min, 空载时为 1498r/min。用双臂电桥测得电动机定子各相绕组电阻分别为 0.196 $\Omega$ 、0.192 $\Omega$  和 0.199 $\Omega$ , 测定时定子绕组温度为 30 $^{\circ}\text{C}$ 。试计算该电动机的负荷率和效率〔假设附加损耗(风摩耗及杂散损耗)忽略不计〕。

**解**

(1) 定子绕组的平均电阻为

$$R_{30} = \frac{0.196 + 0.192 + 0.199}{3} = 0.196(\Omega)$$

折算成 75 $^{\circ}\text{C}$  时的电阻为

$$\begin{aligned} R_{75} &= \frac{235 + 75}{235 + t} R_t \\ &= \frac{310}{235 + 30} \times 0.196 = 0.229(\Omega) \end{aligned}$$

(2) 空载定子铜耗和负载时定子铜耗为

$$P_{0Cu} = 3I_0^2 R_{75} \times 10^{-3}$$

$$= 3 \times \left( \frac{34.2}{\sqrt{3}} \right)^2 \times 0.299 \times 10^{-3} = 0.268(\text{kW})$$

$$P_{Cu1} = 3 \times \left( \frac{61}{\sqrt{3}} \right)^2 \times 0.299 \times 10^{-3} = 1.082(\text{kW})$$

(3) 空载时和负载时的转差率为

$$s_0 = \frac{n_1 - n_0}{n_1} = \frac{15000 - 1498}{1500} = 0.00133$$

$$s = \frac{n_1 - n}{n_1} = \frac{1500 - 1480}{1500} = 0.01333$$

空载转子铜耗为

$$P_{0Cu2} = P_0 s = 3.06 \times 0.00133 = 0.0067(\text{kW})$$

铁耗和机械损耗为

$$P_{Fe} + P_j = P_0 - P_{Cu1} - P_{0Cu2}$$

$$= 3.06 - 0.268 - 0.0067 = 2.785(\text{kW})$$

因此负载时转子铜耗为

$$P_{Cu2} = P_{ds} = [P_1 - (P_{Fe} + P_j + P_{Cu1})]s$$

$$= [30.5 - (2.785 + 1.082)] \times 0.01333$$

$$= 0.355(\text{kW})$$

(4) 输出轴功率为

$$P_2 = P_1 - (P_{Fe} + P_j + P_{Cu1} + P_{Cu2})$$

$$= 30.5 - (2.785 + 1.082 + 0.355)$$

$$= 26.28(\text{kW})$$

(5) 负荷率为

$$\beta = \frac{P_2}{P_e} = \frac{26.28}{45} = 58.4\%$$

效率为

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{26.28}{30.5} = 86.2\%$$

### 五、高速异步电动机损耗的计算

高速异步电动机的转速一般为 0.6 ~ 24 万 r/min, 有的可达 30 万 r/min, 常用于三相中频机组或硅可控静止变频器作电源用, 频率通常为 100 ~ 400Hz。

高速异步电动机的机械损耗和铁耗较大, 效率较低。在采用实心转子时, 附加损耗也较大。

#### 1. 铁耗 $P_{Fe}$

(1) 定转子齿、轭的铁耗: 无相应频率曲线时, 可先根据齿或轭的磁通密度, 按实际所用硅钢片的 400Hz 的比耗曲线分别查得它们的单位铁耗值  $P_{Fe}$ , 再按下式分别计算定转子齿、轭的铁耗:

$$P_{Fe} = P_{Fe} B^2 \left( \frac{f}{400} \right)^{1.3} G \times 10^{-3}$$

式中:  $P_{Fe}$ ——定子(或转子)齿或轭的铁耗(kW);

$P_{Fe}$ ——磁通密度为 1T、频率为 400Hz 情况下硅钢片的单位铁耗, 厚度为 0.35 或 0.2mm 的 D4 硅钢片  $P_{Fe} = 19\text{W/kg}$ ;

$B$ ——定子(或转子)齿或轭的磁通密度(T);

$f$ ——频率(Hz), 当计算定子铁耗时,  $f$  用供电频率; 当计算转子铁耗时,  $f$  用转差频率;

$G$ ——定子(或转子)的齿或轭重(kg)。

#### (2) 电动机铁耗:

$$\Sigma P_{Fe} = k_{Fet} (P_{Fet1} + P_{Fet2} + k_{Fec} (P_{Fec1} + P_{Fec2})) \text{KW}$$

式中:  $P_{Fet1}$ 、 $P_{Fet2}$ ——定子和转子齿部铁耗 kW;

$P_{Fec1}$ 、 $P_{Fec2}$ ——定子和转子轭部铁耗(kW);

$k_{\text{Pec}}, k_{\text{Fec}}$  —— 齿和轭的铁耗修正系数,  $k_{\text{Pec}}$  可取 2.6,  $k_{\text{Fec}}$  可取 2.0。

为了降低铁耗,通常选用厚度为 0.2 或 0.35 毫米的 D4 和 DG4 硅钢片。

### 2. 附加损耗 $P_{fj}$

$$P_{fj} = (0.01 \sim 0.02)P_2$$

实心转子  $P_{fj} = (0.1 \sim 0.2)P_2$

式中:  $P_2$  —— 电动机输出功率(kW)。

### 3. 风摩耗 $P_f$

风摩耗包括转子表面的摩擦损耗  $P_{f2}$  和轴承摩擦损耗  $P_{fc}$ , 计算公式如下:

$$P_{f2} = k_2 \omega_2^3 D_2^5 \left( 1 + 5 \frac{l_2}{D_2} \right) \times 10^{-10}$$

$$P_{fc} = 96.2 k_f R U \times 10^{-3}$$

$$\omega_2 = 2\pi n_1 / 60, \quad U = \pi d n / 60$$

式中:  $k_2$  —— 与转子粗糙度有关的系数, 对于磨削过的转子,  $k_2 = 1.1 \times 10^{-6}$ ;

$D_2, l_2$  —— 转子直径和长度(cm);

$\omega_2$  —— 转子角速度(rad/s);

$n_1$  —— 同步转速(r/min);

$k_f$  —— 磨擦系数, 对油雾润滑的精密径向推力轴承,  $k_f = 0.0025$ ;

$R$  —— 轴承的最大负荷(N);

$v$  —— 线速度(m/s);

$d$  —— 通过滚珠中心的圆的直径(m)。

总的风摩耗  $P_f = P_{f2} + P_{fc}$

为了降低风摩耗,应采用精密度较高的向心推力球轴承。

## 六、电动机输入功率、输出功率和效率的测算

测算出输入功率  $P_1$  和输出功率  $P_2$  后, 便可由公式  $\eta = P_2/P_1$  求出电动机的效率。

### 1. 输入功率的测算

(1) 方法一: 在电动机进线装设电度表, 取有代表性的正常运行工况进行测量。记录下电度表转盘转数  $N$  所需要的时间  $t(s)$ , 便可按下式计算:

$$P_1 = \frac{N}{t} \cdot \frac{3600}{K} K_{TA} K_{TV}$$

式中:  $P_1$ ——输入功率(kW)

$N$ ——转盘的转数, 一般取 10 转;

$K$ ——电度表常数(r/kWh);

$K_{TA}$ ——电流互感器变化;

$K_{TV}$ ——电压互感器变化。

(2) 方法二: 已知或测出电动机空载功率  $P_0$  时, 可按下式计算:

$$P_1 = \beta P_c + P_0 + \beta^2 \left[ \left( \frac{1}{\eta_c} - 1 \right) P_c - P_0 \right]$$

式中:  $\beta$ ——负载率;

其它符号同前。

(3) 方法三(两瓦特表法): 接线如图 5—18 所示。三相输入功率  $P_1$  为两只瓦特表读数的代数和, 即  $P_1 = W_1 + W_2$ , 瓦特表数值的正和负, 取决于电动机运行时的功率因数  $\cos\varphi$  的大小。当  $\cos\varphi > 0.5$  时, 两瓦特表均为正值; 当  $\cos\varphi < 0.5$  时, 其中一只瓦特表为负值。

按图 5—18 的极性接线, 如发现瓦特表指针反向偏转时, 此表的读数就是负值, 此时需将表针极性反接后再读数。

### 2. 输出功率的测算

(1) 方法一: 有电动机效率曲线时, 可从测算得的输入功率  $P_1$ , 查出对应于  $P_1$  时的效率  $\eta$ , 然后由公式  $P_2 = \eta P_1$  求出。

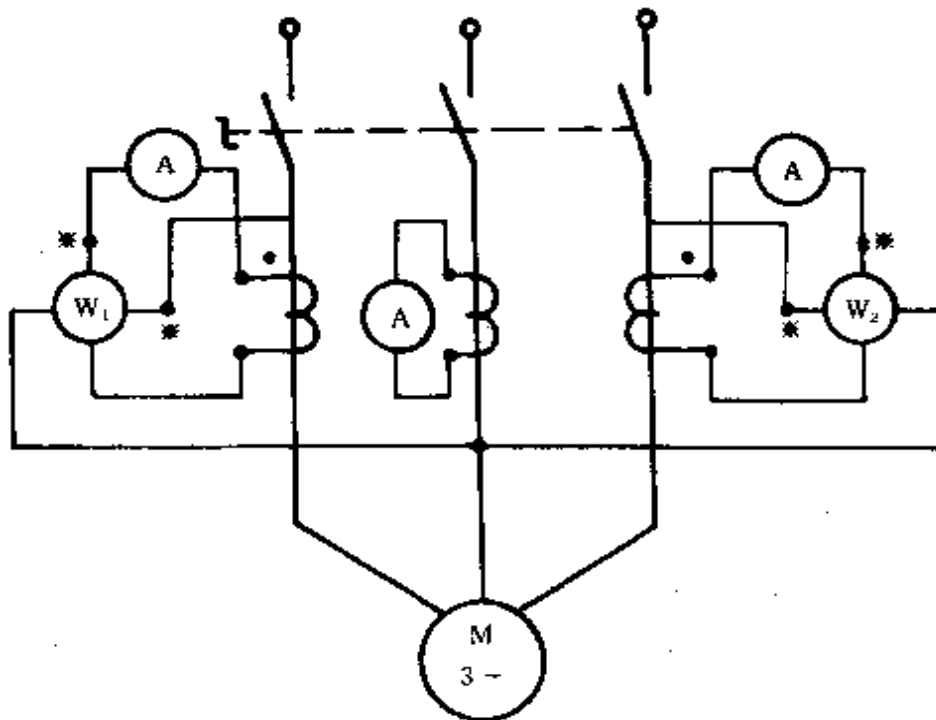


图 5—18 两瓦特表法

(2) 方法二：已知电动机的额定效率  $\eta$  时，可根据测算得的输入功率  $P_1$ ，选择一个与  $P_1$  相对应的效率  $\eta$ ，然后由公式  $P_2 = \eta P_1$  求出。

效率  $\eta$  的估算见 517 页(3)。

(3) 方法三(电流法)：

$$P_2 = \beta P_e$$

$$\beta \approx \sqrt{\frac{I_1^2 - I_0^2}{I_e^2 - I_0^2}}$$

式中： $\beta$ —— 负荷率；

$I_1$ —— 任意负载时测得的电流(A)；

$I_0$ —— 空载电流(A)。



上式中  $I_e$  和  $P_e$  是电动机铭牌值。

该方法用同一电流表测出  $I_1$  和  $I_0$ , 计算出的功率  $P_2$  精确性较高, 但该方法精确性受运行电压偏离额定电压的影响。

(4) 方法四(闪光测频法): 测出某负载时的转速  $n$  和电压  $U_1$ , 然后按下式计算:

$$P_2 = \left( \frac{n_1 - n}{n_1 - n_e} \right) \left( \frac{U_1}{U_e} \right)^2 \left( \frac{n}{n_e} \right) P_e$$

式中:  $U_1$  —— 电动机出线端子线电压(V);

其它符号同前。

此方法要求转速要测得精确, 通常可用闪光测频法测转速。

(5) 方法五: 利用  $M - s$  曲线计算。

① 按下式作出  $M - s$  曲线:

$$\frac{M}{M_{\max}} = \frac{2}{\frac{s_{\max}}{s} + \frac{s}{s_{\max}}}$$

根据产品样本查出最大转矩  $M_{\max}$ , 再将电动机额定转矩  $M_e$  及额定转速  $n_e$  相对应的转差率  $s_e$  代入上式, 求出产生最大转矩时的转差率  $s_m$ 。这样上式的  $M_m$  和  $s_m$  就成为已知数, 然后每假定一个  $M$ , 求出一个相应的  $s$ , 从而可作出  $M - s$  曲线。

②  $M - s$  曲线的使用: 先测出某一负载下的转速  $n$ , 计算出转差率  $s$ , 查  $M - s$  曲线, 找到对应的转矩  $M$ , 再按下式求出输出功率  $P_2$ :

$$P_2 = \left( \frac{M}{M_e} \right) \left( \frac{n}{n_e} \right) P_e$$

(6) 方法六(损耗法测算): 先按前述介绍的方法求出电动

机的总损耗  $\Sigma\Delta P$ , 然后由公式  $P_2 = P_1 - \Sigma\Delta P$  求得输出功率。

(7) 上述几种方法的比较: 用电流法和损耗法计算出的效率与产品样本提供的效率很接近; 而用闪光测频法和  $M-s$  曲线法求得的效率误差较大, 原因如下:

① 闪光测频法和  $M-s$  曲线法, 都用到额定转速  $n_n$  的数值 [ $s_n = (n_1 - n_n)/n_1$ ]; 而中小型电机标准规定, 允许  $s_n$  存在  $\pm 20\%$  的误差,  $s_n$  不是电机制造厂的考核指标, 因此精度无保证。

② 异步电动机转速特性很硬, 如果实测的转速稍有误差, 求得的轴输出功率  $P_2$  误差较大, 由此计算出的效率, 误差也较大。

### 七、异步电动机无功功率的计算

求得输入功率后, 便可按下式计算无功功率:

$$Q = P_1 \operatorname{tg} \varphi$$

在额定电压下, 电动机的功率因数为

$$\cos \varphi = \frac{P_1 \times 10^3}{\sqrt{3} U_n I_1}$$

对于一般异步电动机, 当负荷率  $\beta \leq 0.4$  时,

$$Q \approx \sqrt{3} U_n I_0 \times 10^{-3}$$

当  $0.4 < \beta \leq 1$  时,  $Q$  与  $\beta$  存在线性关系, 故无功功率可按下列式计算:

$$Q = \left( \frac{P_c}{\eta_c} \operatorname{tg} \varphi_c - \sqrt{3} U_n I_0 \times 10^{-3} \right) \times \frac{\beta - 0.4}{0.6} + \sqrt{3} U_n I_0 \times 10^{-3}$$

式是:  $Q$  —— 无功功率(kVar);

$P_1$  —— 输入功率(kW);

$\operatorname{tg}\varphi$ ——功率因数角的正切值；

$\operatorname{tg}\varphi_0$ ——额定功率因数角的正切值；

其它符号同前。

### 八、异步电动机最佳负载率的计算

电动机的固定损耗等于可变损耗时，电动机运行效率最高，其相应的电动机最佳负载率  $\beta_{zj}$  为

$$\beta_{zj} = \sqrt{\frac{P_0 + K \sqrt{3} U I_0 \times 10^{-3}}{\left(\frac{1}{\eta_c} - 1\right) P_c - P_0 + \left(\frac{P_0 \operatorname{tg}\varphi_0 - \sqrt{3} U I_0 \times 10^{-3}}{\eta_c}\right) K}}$$

式中： $K$ ——无功经济当量，对于功率因数已集中补偿至 0.9 及以上的企业，取  $K = 0.01$ ；对于发电厂自用电的电动机，取  $K = 0.05$ ；对于功率因数未作补偿时，取  $K = 0.1$ 。

对于 Y(IP44) 系列电动机，按上述公式算得的  $\beta_{zj}$  值，见表 5—11。

### 九、异步电动机等效功率和等效损耗的计算

三相异步电动机在实际使用中，其负载通常随时间而变化，如果这种变化呈周期性，就可用以下方法计算其等效功率和等效损耗。

#### 1. 测定负载变化并绘制变化图

测出电机运行中的定子线电流，记录电流值和对应的持续时间，见表 5—12。注意，电流表采用 0.5 级，并配置相应的电流互感器。

表 5—12 负载变化表

电流 $I$ (A)	$I_1 \quad I_2 \quad I_3 \cdots I_n$
时间 $t$ (s 或 min)	$t_1 \quad t_2 \quad t_3 \cdots t_n$

表 5-11

Y(IP44) 系列

额定 功率 $P_N$ (kW)	2 极				4 极			
	$P_0$ (W)	$I_0$ (A)	$K = 0.01$	0.1	$P_0$ (W)	$I_0$ (A)	$K = 0.01$	0.1
			$\beta_{zj}$	$\beta_{zj}$			$\beta_{zj}$	$\beta_{zj}$
0.55					94	1.02	0.96	1.2
0.75	95	0.82	0.8	0.95	117	1.3	0.95	1.2
1.1	105	1.06	0.71	0.86	110	1.5	0.77	0.99
1.5	150	1.5	0.76	0.92	117	1.8	0.67	0.87
2.2	158	1.9	0.72	0.89	180	2.5	0.76	0.98
3	265	2.6	0.84	1.0	270	3.5	0.89	1.12
4	225	2.9	0.73	0.89	245	4.4	0.75	1.0
5.5	265	3.4	0.65	0.79	250	4.7	0.63	0.84
7.5	300	4.0	0.6	0.71	285	5.96	0.62	0.83
11	660	6.4	0.85	0.92	450	8.4	0.69	0.88
15	780	7.3	0.81	0.87	570	10.4	0.67	0.85
18.5	760	8.2	0.72	0.79	650	13.4	0.77	1.01
22	1280	12	0.96	1.04	692	15	0.72	0.93
30	1650	16.9	1.0	1.1	900	19.5	0.78	0.99
37	1660	18.6	0.87	0.97	1140	19	0.75	0.86
45	1780	18.7	0.87	0.95	1250	22	0.73	0.86
55	2530	28.5	1.0	1.08	1560	28.6	0.77	0.91
75	3380	37.4	0.98	1.05	2410	39.4	0.85	0.94
90	3600	34.1	0.93	1.0	2650	43.8	0.88	0.99

异步电动机的最佳负载率

6 极				8 极			
$P_0$ (W)	$I_0$ (A)	$K = 0.01$	0.1	$P_0$ (W)	$I_0$ (A)	$K = 0.01$	0.1
		$\beta_{xj}$	$\beta_{xj}$			$\beta_{xj}$	$\beta_{xj}$
135	1.6	0.98	1.27				
157	1.93	0.84	1.05				
195	2.71	0.94	1.24				
200	3.4	0.81	1.09	220	3.71	0.9	1.2
194	3.8	0.71	0.96	220	4.45	0.75	1.01
228	4.9	0.69	0.95	250	6.2	0.75	1.09
223	5.3	0.6	0.81	300	7.5	0.72	1.02
376	8.65	0.71	0.985	420	9.1	0.77	1.03
520	12.4	0.73	1.0	630	13	0.8	1.03
690	13.8	0.81	1.04	600	16.2	0.69	0.95
680	14.9	0.73	0.95	740	17.9	0.76	0.97
740	17.1	0.71	0.93	835	19.9	0.76	0.97
1050	18.7	0.71	0.81	1160	26	0.8	1.02
1200	19.4	0.71	0.82	1430	28.5	0.83	0.97
1350	23.3	0.75	0.87	1420	32.1	0.76	0.91
1340	25.5	0.65	0.76				

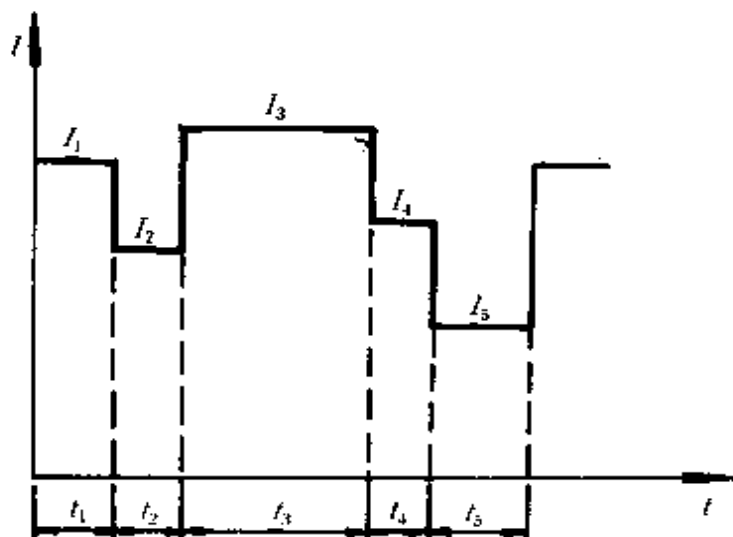


图 5-19 负载变化图

根据表 5-12 的数据,作负载变化图(图 5-19)。

2. 计算等效功率  $P_{dx}$

在图 5-19 中,设电动机对应各负载电流的损耗(即发热损耗功率)为  $\Sigma P_1, \Sigma P_2 \dots \Sigma P_5$ , 则  $\Sigma P_1 t_1, \Sigma P_2 t_2 \dots \Sigma P_5 t_5$ , 电动机的工作周期为  $T = t_1 + t_2 + \dots + t_5$ 。则电动机的等效功率  $P_{dx}$ , 就是电动机在此功率时产生的发热损耗  $\Sigma P_{dx} T$ , 应与  $\Sigma P_1 t_1 + \Sigma P_2 t_2 + \dots + \Sigma P_5 t_5$  相等。由此可推导出电动机等效功率为

$$P_{dx} = P_c \sqrt{\frac{1}{I_r^2 - I_0^2} \left( \frac{I_1^2 t_1 + I_2^2 t_2 + \dots + I_5^2 t_5}{T} - I_0^2 \right)}$$

式中符号同前。

3. 计算等效有功损耗  $\Sigma \Delta P_{dx}$

$$\Sigma \Delta P_{dx} = P_0 + \left[ \left( \frac{1}{\eta_e} - 1 \right) P_c - P_0 \right] \beta_{dx}^2$$

$$\beta_{dx} = P_{dx}/P_e,$$

式中： $\beta_{dx}$ ——等效负载率；

其它符号同前。

#### 4. 计算等效无功损耗

可按本节异步电动机无功功率的计算公式计算，只要将  $\beta$  改为  $\beta_{dx}$  代入即可。

**例 5—5** 有一台 Y180M—4 电动机，功率为 18.5kW，4 极，带负载运行，测得的定子线电流和持续时间如下：

$$I(\text{A}) \quad I_1 = 35 \quad I_2 = 24 \quad I_3 = 19 \quad I_4 = 29$$

$$t(\text{min}) \quad t_1 = 8 \quad t_2 = 20 \quad t_3 = 10 \quad t_4 = 6$$

试求该电动机的等效功率、等效有功损耗、等效无功损耗和年用电量（按每天运行 10h，动行 300 天计；用电场所的功率因数已集中补偿到 0.91）。

**解** 由产品目录查得该电机的  $P_0 = 0.65\text{kW}$ ， $I_0 = 13.4\text{A}$ ， $I_e = 35.9\text{A}$ ， $\eta_e = 0.91$ ， $\cos\varphi_e = 0.86$ 。

(1) 电动机的等效功率为

$$\begin{aligned} P_{dx} &= 18.5 \sqrt{\frac{1}{35.9^2 - 13.4^2}} \\ &\times \sqrt{\left( \frac{35^2 \times 8 + 24^2 \times 20 + 19^2 \times 10 + 29^2 \times 6}{8 + 20 + 10 + 6} - 13.4^2 \right)} \\ &= 12.44(\text{kW}) \end{aligned}$$

(2) 等效有功损耗为

$$\begin{aligned} \Sigma \Delta P_{dx} &= \left[ \left( \frac{1}{0.91 - 1} \times 18.5 - 0.65 \right) \right] \left( \frac{12.44}{18.5} \right)^2 + 0.65 \\ &= 1.18(\text{kW}) \end{aligned}$$

(3) 等效无功损耗为

$$\begin{aligned}
 Q_{dr} &= \left( \frac{P_e}{\eta_e} \operatorname{tg} \varphi_e - \sqrt{3} U_e I_0 \times 10^{-3} \right) \left( \frac{\beta - 0.4}{0.6} \right) \\
 &\quad + \sqrt{3} U_e I_0 \times 10^{-3} \\
 &= \left( \frac{18.5}{0.91} \times 0.593 - \sqrt{3} \times 380 \times 13.4 \times 10^{-3} \right) \\
 &\quad \times \left( \frac{0.67 - 0.4}{0.6} \right) + \sqrt{3} \times 380 \times 13.4 \times 10^{-3} \\
 &= 10.37(\text{kVar})
 \end{aligned}$$

(4) 该电机年用电量为

$$\begin{aligned}
 A &= (12.44 + 1.18 + 10.37 \times 0.01) \times 10 \times 300 \\
 &= 41171.1(\text{kWh})
 \end{aligned}$$

### 十、同步电动机损耗、输出功率和效率的测算

同步电动机损耗、输出功率和效率的测算方法和异步电动机基本相同。区别在于同步电动机还应计入励磁机引起的励磁损耗,而不计转子损耗。

1. 定子每相绕组电阻  $R_{75}$

测出定子温度  $t$  时的电阻,再算出折算到  $75^\circ\text{C}$  时的电阻值。

2. 励磁绕组电阻  $R_{l75}$

测出励磁绕组在温度  $t^\circ\text{C}$  时的电阻,再算出折算到  $75^\circ\text{C}$  时的电阻值。

3. 定子绕组的铜耗  $P_{Cu1}$

测出带负载时的定子电流  $I_1$ ,便可按下式算出:

$$P_{Cu1} = 3I_1^2 R_{75} \times 10^{-3}$$

4. 励磁绕组损耗  $P_l$



测出励磁电流  $I_l$ , 便可按下式算出:

$$P_l = I_l^2 R_{l75} \times 10^{-3}$$

5. 铁耗  $P_{Fe}$  和机械损耗  $P_j$

测出同步电动机的空载损耗(等于空载时两瓦特表之和)  $P_0$  和空载电流  $I_0$ , 便可按下式算出:

$$P_{Fe} + P_j = P_0 - 3I_0^2 R_{75} \times 10^{-3}$$

6. 同步电动机输出功率  $P_2$

测出负载时的输入功率(等于负载时两瓦特表之和)  $P_1$ , 便可按下式算出:

$$P_2 = P_1 - (P_{Cu1} + P_l + P_{Fe} - P_j + P_z)$$

式中:  $P_z$  —— 杂散损耗; 可按下式估算:

$$P_z = 0.005 P_1 \left( \frac{I_1}{I_c} \right)^2;$$

$I_1$  —— 带负载时的定子电流。

7. 同步电动机效率

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} \times 100\%$$

## 十一、电动机通风风扇功耗及通风噪声的计算

1. 通风风扇功耗计算

$$P_f = HQ/\eta_f \quad \text{或} \quad P_f = ZQ^3/\eta_f$$

式中:  $P_f$  —— 风扇功耗(W);

$H$  —— 风扇全压(Pa);

$Q$  —— 风量( $m^3/s$ );

$\eta_f$  —— 风扇效率;

$Z$  —— 风阻( $Pa/m^6 \cdot s^{-2}$ ),  $Z = H/Q^2$ 。

对于 Y 系列大功率的 2 极和 4 极电动机, 其风摩耗约占总损耗的 20% 左右; 对于 JQ<sub>2</sub> 系列 22kW 及以上的 2 极和 4 极电动机, 约占 30% 左右, 相当于电动机容量的 3%。

## 2. 通风噪声声压级的计算

$$L_p = L_{p0} + 10\lg\left[\left(\frac{H}{9.81}\right)^2 Q\right]$$

$$= L_{p0} + 10\lg\left[\left(\frac{Z}{9.81}\right)^2 Q^2\right]$$

式中： $L_p$ ——通风噪声声压级(dB)；

$L_{p0}$ ——风扇的比声压级，对同一台电动机上用的几何形状相似的风扇，是个常数。

当风扇效率改变时，噪声按下式变化

$$L_p = L_{p0} + 10\lg\left(\frac{1}{\eta_f} - 1\right) D^3 n^3$$

式中： $L_{p0}$ ——比声压级，与风扇型式有关；

$D$ ——风扇的外径(m)；

$n$ ——风扇的转速(r/min)。

可见，当 $Q$ 、 $H$ 、 $Z$ 、 $\eta_f$ 变化时， $L_p$ 变化趋势与 $P_f$ 大体一致。

表 5—13 列出了 JQ<sub>2</sub> 系列电动机的一些实测值。

Y 系列电动机的噪声和振动比 J<sub>2</sub>、JQ<sub>2</sub> 系列低。

表 5—13 JQ<sub>2</sub> 系列电动机的实测值

极数	2			4
	电动机额定功率 $P_e$ (kW)	22	55	100
通风损耗 $P_f$ (W)	1000	1720	2800	800
百分比 $P_f/P_e$ (%)	4.55	3.13	2.80	1.45
电动机噪声 $L_p$ (平均)(dB(A))	86.3	90	92	83

注：通风损耗  $P_f$  即外通风损耗，它由空载试验中带风扇与拆去风扇时的输入功率之差求出。

## 十二、直流电动机损耗及效率的计算

### 1. 并励电动机的功率流向图(图 5—20)

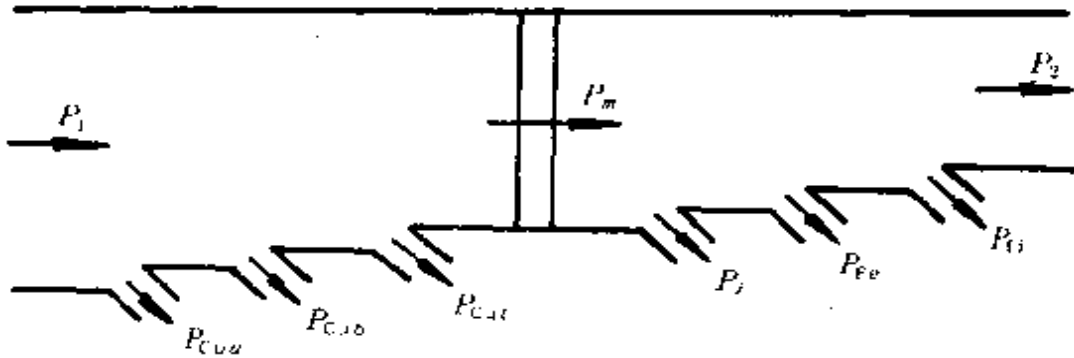


图 5—20 并励电动机的功率流向图

输出功率为  $P_2 = P_1 - \Sigma\Delta P$

$$\text{效率为 } \eta = \frac{P_2}{P_1} \times 100\% = \left(1 - \frac{\Sigma\Delta P}{P_1}\right) \times 100\%$$

总损耗为  $\Sigma\Delta P = P_{Cu_a} + P_{Cu_b} + P_{Cu_f} + P_j + P_{Fe} + P_{j1}$

式中： $P_{Cu_a}$ ——电枢回路铜耗(kW)；

$P_{Cu_b}$ ——电刷接触损耗(kW)；

$P_{Cu_f}$ ——励磁回路铜耗(kW)；

$P_j$ ——机械损耗(kW)；

$P_{Fe}, P_{j1}$ ——铁耗与附加损耗(kW)。

### 2. 电枢回路铜耗

$$P_{Cu_a} = I_a^2 R_{aw} \times 10^{-3}$$

式中： $P_{Cu_a}$ ——电枢回路铜耗(kW)；

$I_a$ ——电枢电流(A)；

$R_{aw}$ ——换算到基准温度(一般取 75°C)的电枢回路电阻( $\Omega$ )。

### 3. 电刷接触损耗

$$P_{Cu_b} = I_a^2 R_b \times 10^{-3} \text{ 或 } P_{Cu_b} = 2\Delta U I_a \times 10^{-3}$$

式中： $P_{\text{Cub}}$ ——电刷接触损耗(kW)；

$R_b$ ——电刷接触电阻( $\Omega$ )；

$2\Delta U$ ——一对正付电刷的接触电压降(V)，对于碳—石墨及电化石墨电刷，取 2V；对于金属石墨电刷，取 0.6V。

#### 4. 励磁回路铜耗

$$P_{\text{Cul}} = U_l I_l \times 10^{-3}$$

式中： $P_{\text{Cul}}$ ——励磁回路铜耗(kW)；

$U_l$ ——励磁回路端电压(V)；

$I_l$ ——励磁电流(A)。

#### 5. 铁耗与机械损耗

铁耗与机械损耗由空载试验得到。试验接线如图 5-21 所示。

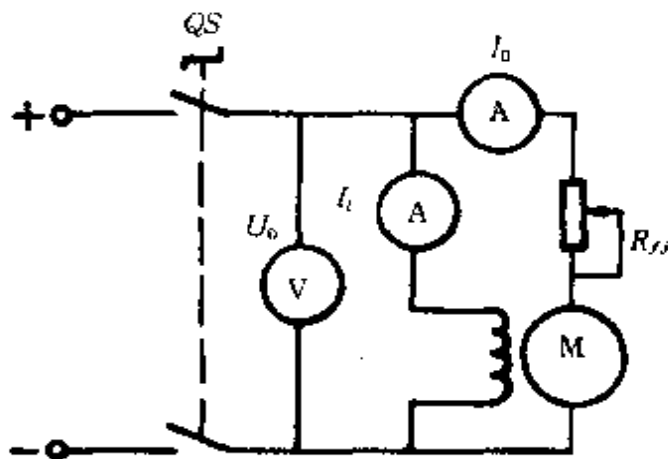


图 5-21 并励电动机空载试验接线图

将电动机空转一段时间，运行稳定后，在额定电压下读取  $U_0$ 、 $I_0$ 、 $I_l$ ，然后断开电源，立即测量电枢电阻  $R_a$ 。于是铁耗和机械损耗按下式求得：

$$P_{\text{Fe}} + P_j = p_0 + (I_a^2 R_a - 2\Delta U I_a) \times 10^{-3}$$

式中： $P_0$ ——空载功率(kW)， $P_0 = U_0 I_0 \times 10^{-3}$ 。

#### 6. 附加损耗

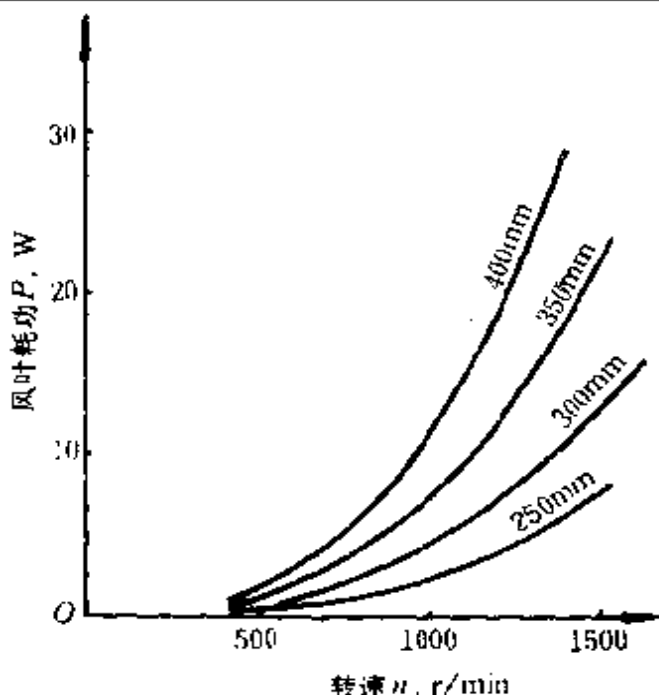


图 5-22 某系列台扇的风叶耗功曲线

附加损耗  $P_{fj}$  通常用估算法确定,其值约为电动机额定功率的 0.5 ~ 1%。

### 十三、电风扇风叶的功率消耗计算

风叶在不同转速时的功率消耗,可以用耗功曲线  $P = f(n)$  表示。风叶的功率消耗约与转速的三次方成正比。

#### 1. 风叶耗功曲线的制作

用测功机测量驱动电动机在不同转速时的轴功率,或将风叶直接装在经过校准的直流电动机上,通过不同转速时电动机的输入功率求得风叶的耗功,便可画出风叶的耗功曲线,如图 5-22 所示。

#### 2. 计算公式

由图 5-22 可得该系列 4 种规格风叶耗功的近似公式:

(1)400 毫米:

$$n < 500\text{r/min 时}, P = 12(n/1000)^3$$

$$n = 500 \sim 1500\text{r/min 时}, P = 10.7(n/1000)^{2.84}$$

(2)350 毫米:

$$n < 1000\text{r/min 时}, P = 7.15(n/1000)^3$$

$$n = 1000 \sim 1600\text{r/min 时}, P = 7.15(n/1000)^{2.78}$$

(3) 300 毫米:

$$n < 1000\text{r/min 时}, P = 4.05(n/1000)^3$$

$$n = 1000 \sim 1700\text{r/min 时}, P = 4.05(n/1000)^{2.78}$$

(4) 250 毫米:

$$n < 900\text{r/min 时}, P = 2.7(n/1000)^3$$

$$n = 900 \sim 1600\text{r/min 时}, P = 2.55(n/1000)^{2.74}$$

#### 十四、电动机节电计算

##### 1. 异步电动机节电更换的计算

(1) 确定现有负荷所需要的功率:如前所述,电动机输出功率可按式计算:

$$P_2 = \sqrt{\frac{I^2 - I_0^2}{I_c^2 - I_0^2}} P^2$$

对于新购电动机替换已安装电动机的场合,应按投资、运行费用和利率等进行综合费用计算,从而确定最佳功率。

(2) 异步电动机节能更换原则:由于异步电动机的总耗为

$$\Sigma\Delta P = P_0 + \beta^2 \left[ \left( \frac{1}{\eta_c} - 1 \right) P_c - P_0 \right]$$

所以两台额定功率不同的电动机的  $\Sigma\Delta P = f(P_2)$  关系曲线,不外乎有如图 5-23、图 5-24 和图 5-25 所示的三种情况。

设已安装的电动机为 A,其额定功率为  $P_{ca}$ 、功率为  $\eta_{ca}$ 、空载功率为  $P_{0a}$ ;欲换用的电动机为 B,其相应的数据为  $P_{cb}$ 、 $\eta_{cb}$  和  $P_{0b}$ 。若电动机 A 的实际输出功率为  $P_2$ ,则 A 的负荷率为  $\beta_a = P_2/P_{ca}$ ,换用电动机 B 相应的负荷率为  $\beta_b = P_2/P_{cb} = (P_{ca}/P_{cb}) \cdot \beta_{a0}$

① 当  $\eta_{cb} > \eta_{ca}$ ,  $P_{0b} < P_{0a}$  时:

这时  $\Sigma\Delta P = f(P_2)$  在额定负荷至空截的范围内,两条曲线

无交点,且  $\Sigma\Delta P_a - \Sigma\Delta P_b > 0$ ,即在任意负荷率下,换用电动机 B 均能节电,如图 5—23 所示

空载时节电量  $\Delta P = P_{0a} - P_{0b}$

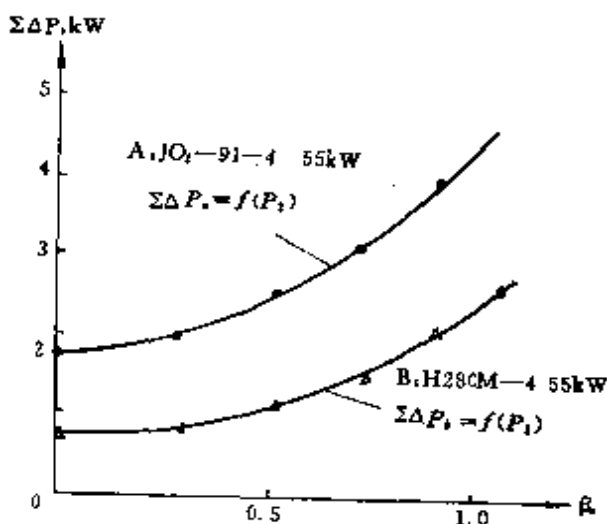


图 5—23  $\eta_{eb} > \eta_{ea}$   $P_{0b} < P_{0a}$

任意负荷时节电量  $\Delta P = \Sigma\Delta P_a - \Sigma\Delta P_b$

$$= P_{0a} - P_{0b} + \beta_a^2 \left[ P_{0a} \left( \frac{P_{ea}}{P_{eb}} \right)^2 - P_{0b} \right] + \beta_b^2 \left[ P_{ea} \left( \frac{1}{\eta_{ea}} - 1 \right) - \frac{P_{ea}^2}{P_{eb}} \left( \frac{1}{\eta} - 1 \right) \right]$$

当  $P_{ea} = P_{eb}$  时,

$$\Delta P = (P_{0a} - P_{0b})(1 - \beta_a^2) + \beta_a^2 \left[ P_{ea} \left( \frac{1}{\eta_{ea}} - \frac{1}{\eta_{eb}} \right) \right]$$

如采用高效率电动机和部分 Y(IP44) 系列电动机更换 JO<sub>2</sub> 系列电动机,则能在任意负荷率下节电。

② 当  $\eta_{ea} > \eta_{eb}, P_{0a} > P_{0b}$  时:

这时  $\Sigma\Delta P = f(\beta_2)$  在 (0 ~ 1) 额定负载范围内,两条曲线有一个交点,且已安装的电动机 A 对应此交点的负荷率  $\beta_a$ ,称为临界负荷率,用  $\beta_c$  表示,见表 5—14。此时,两台电动机对应

此负荷率的总损耗相等。如图 5-24 所示。

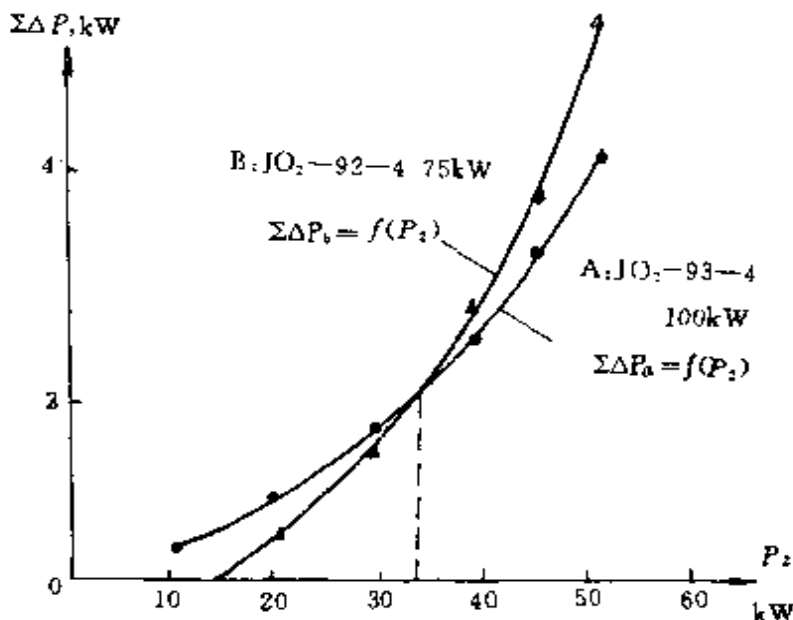


图 5-24  $\eta_{ea} > \eta_{eb}, P_{0a} > P_{0b}$

$$\Sigma\Delta P_a = P_{0a} + \beta_{ij}^2 \left[ \left( \frac{1}{\eta_{ea}} - 1 \right) P_{ea} - P_{0a} \right]$$

$$\Sigma\Delta P_b = P_{0b} + \left( \frac{P_{ea}}{P_{eb}} \beta_{ij} \right)^2 \left[ \left( \frac{1}{\eta_{eb}} - 1 \right) P_{eb} - P_{0b} \right]$$

因  $\Sigma\Delta P_a = \Sigma\Delta P_b$ , 故

$$\beta_{ij} = \sqrt{\frac{P_{0a} - P_{0b}}{\left( \frac{P_{ea}}{P_{eb}} \right)^2 \left[ \left( \frac{1}{\eta_{eb}} - 1 \right) P_{eb} - P_{0b} \right] - \left[ \left( \frac{1}{\eta_{ea}} - 1 \right) P_{ea} - P_{0a} \right]}}$$

③ 当  $\eta_{eb} > \eta_{ea}, P_{0a} < P_{0b}$  时,

这时两条曲线也有一个交点, 如图 5-25 所示。临界负荷率  $\beta_{ij}$  为

$$\beta_{ij} = \sqrt{\frac{P_{0b} - P_{0a}}{\left( \frac{1}{\eta_{eb}} - 1 \right) P_{eb} - P_{0b} - \left( \frac{P_{ea}}{P_{eb}} \right)^2 \left[ \left( \frac{1}{\eta_{ea}} - 1 \right) P_{ea} - P_{0a} \right]}}$$





(续表)

$P_{cb}$ (kW)	$P_{ca}$ (kW)																
	100	75	55	40	30	22	17	13	10	7.5	5.5	4	3	2.2	1.5	1.1	0.8
7.5					0.215	0.273	0.377	0.447	0.511								
5.5						0.307	0.355	0.4	0.45	0.314							
4							0.29	0.19	0.273	0.23							
3								0.175	0.242	0.209	0.36						
2.2								0.153	0.307	0.22	0.29	0.3					
1.5								0.137	0.183	0.214	0.29	0.36	0.52				
1.1										0.183	0.29	0.293	0.396	0.46			
0.8											0.199	0.242	0.32	0.265	0.48		
0.6												0.2	0.26	0.217	0.347	0.01	

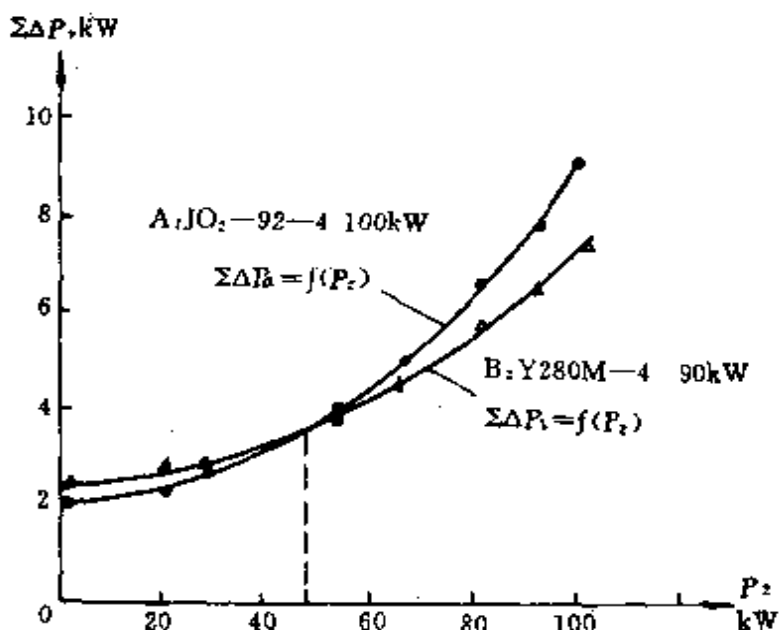


图 5-25  $\eta_{cb} > \eta_{ca}, P_{0a} < P_{0b}$

**例 5-6** 已安装电动机为 JO<sub>2</sub>-93-4 型, P<sub>1</sub> 为 100kW, η<sub>e</sub> 为 0.92, P<sub>0</sub> 为 2.25kW, 现欲用 JO<sub>2</sub>-92-4 更换, P<sub>1</sub> 为 75kW, η<sub>e</sub> 为 0.92, P<sub>0</sub> 为 2.1kW。试求临界负荷率。

**解** 设 JO<sub>2</sub>-93-4 电动机为 A, JO<sub>2</sub>-92-4 为 B, 因为 P<sub>0a</sub> > P<sub>0b</sub>, η<sub>ca</sub> = η<sub>cb</sub>, 所以临界负荷率为

$$\begin{aligned} \beta_{ij} &= \sqrt{\frac{P_{0a} - P_{0b}}{\left(\frac{P_{ca}}{P_{cb}}\right)^2 \left[\left(\frac{1}{\eta_{cb}} - 1\right) P_{cb} - P_{0b}\right] - \left[\left(\frac{1}{\eta_{ca}} - 1\right) P_{ca} - P_{0a}\right]}} \\ &= \sqrt{\frac{2.25 - 2.1}{\left(\frac{100}{75}\right)^2 \left[\left(\frac{1}{0.92} - 1\right) \times 7.5 - 2.1\right] - \left[\left(\frac{1}{0.9} - 1\right) \times 100 - 2.25\right]}} \\ &= 0.326 \end{aligned}$$

两台电动机在各输出功率为 P<sub>2</sub> 下的总损耗, 见表 5-15。根据表 5-15 数据, 作 ΣΔP = f(P<sub>2</sub>) 的关系曲线, 见图 5-24。

从图 5-24 可见, 当电动机 A 的实际负荷率 β > β<sub>ij</sub> 时, JO<sub>2</sub>

— 93 — 4,100kW 电动机的总损耗小于 JO<sub>2</sub> — 92 — 4,75kW 电动机的总损耗;当  $\beta < \beta_c$  时,电动机 A 的损耗大于 B 的总损耗。因此这种场合,对任何一台已安装的电动机来说,只有实际负荷率小于它的临界负荷率时,才有更换的必要。

表 5—15 两台电动机的总损耗

$\Sigma\Delta P$ $P_2$ (kW)	$P_1$ (kW)							
	100	75	55	40	30	22	17	13
100	8.7	5.88	4.05	3.28	2.83	2.56	2.44	2.36
75		6.25	4.48	3.36	2.81	2.48	2.33	2.23

**例 5—7** 有一台 JO<sub>2</sub> — 71 — 4 型异步电动机,已知额定参数为: $P_e$  为 22kW,  $\cos\varphi_e$  为 0.88,  $I_e$  为 42.5A, 空载电流  $I_0$  为 12.1A, 实测负荷电流  $I_1$  为 20A。试比较选用其他规格的电动机时的节电效果。设电动机年运行小时数为 4000h。

**解** 在该负荷下电动机的输出功率为

$$P_2 = \sqrt{\frac{I_1^2 - I_0^2}{I_e^2 - I_0^2}}$$

$$P_2 = \sqrt{\frac{20^2 - 12.1^2}{42.5^2 - 12.1^2}} \times 22 = 8.6(\text{kW})$$

负荷率为

$$\beta = P_2/P_e = 8.6/22 = 0.39$$

倘需更换,对于输出功率为 8.6kW、可更换的 4 极电动机有:

JO<sub>2</sub> 系列:10kW、13kW、17kW 和 22kW;

Y(IP<sub>44</sub>) 系列:11kW、15kW、18.5kW 和 22kW;

高频率电动机:11kW、15kW、18.5kW 和 22kW。

按照下列公式算出各规格电动机在输出功率为 8.6kW 时总损耗  $\Sigma\Delta P$ 、效率  $\eta$  和全年用电量  $A$ ,见表 5—16。

表 5—16 电动机总损耗、效率和年用电量

电动机系列	JO <sub>2</sub>					Y(IP44)					高效率电动机					
	10	13	17	22	11	15	18.5	22	11	15	18.5	22	11	15	18.5	22
额定功率 $P_e$ (kW)	87.5	88	89	89.5	88	88.5	91	91.5	91.3	91.7	92.5	93	91.3	91.7	92.5	93
额定效率 $\eta_e$ (%)	0.315	0.55	0.7	0.75	0.45	0.57	0.65	0.692	0.33	0.49	0.5	0.52	0.33	0.49	0.5	0.52
固定损耗 $P_0$ (kW)	0.86	0.66	0.51	0.39	0.78	0.57	0.46	0.39	0.78	0.57	0.46	0.39	0.78	0.57	0.46	0.39
总损耗 $\Sigma\Delta P$ (kW)	1.138	1.083	1.064	1.028	1.089	1.018	0.9	0.898	0.767	0.772	0.712	0.693	0.767	0.772	0.712	0.693
输入功率 $P_2 + \Sigma\Delta P$ (kW)	9.738	9.683	9.664	9.627	9.689	9.618	9.5	9.498	9.376	9.372	9.312	9.292	9.376	9.372	9.312	9.292
效率 $\eta$ (%)	88.3	88.8	89	89.3	88.8	89.4	90.5	90.6	91.8	91.8	92.4	92.6	91.8	91.8	92.4	92.6
年用电量 $A$ (kWh)	38952	38656	38512	38756	38756	38472	38000	37956	37468	37448	37248	37168	37468	37448	37248	37168

总损耗为

$$\Sigma\Delta P = P_0 + \beta^2 \left[ \left( \frac{1}{\eta_c} - 1 \right) P_c - P_0 \right]$$

$$\text{效率 } \eta = \frac{P_2}{P_2 + \Sigma\Delta P} = \frac{1}{1 + \frac{\Sigma\Delta P}{\beta P_c}}$$

从表 5-16 可见, JO<sub>2</sub> 系列中以 22kW 最节电, 比 10kW 每年节电 440kWh; Y (IP44) 系列中, 以 22kW 最节电, 比 Y 系列 11kW 电动机节电 800kWh, 比 JO<sub>2</sub> 系列 22kW 电动机节电 556kWh, 因此采用 Y 系列更换 JO<sub>2</sub> 系列电动机可节电; 高效率电动机中, 仍以 22kW 最节电, 它比 11kW 的高效率电动机节电 300kWh, 比 JO<sub>2</sub> 系列 22kW 电动机节电 1344kWh, 所以选用高效率电动机更换 JO<sub>2</sub> 系列 22kW 电动机, 节电效果最好。

当然要决定新购电动机更换已安装电动机时, 应按照本章第四节一项内容进行综合费用计算才能确定。

### 十五、“大马拉小车”节电计算

“大马拉小车”节电计算, 举例说明如下: 有一台 JO<sub>2</sub>-72-4, 30kW 电动机, 实际负载为 10kW, 测出电动机的实际效率只有 75%, 功率因数为 0.5。

这时电动机的输入功率为

$$P_1 = P_2 / \eta = 10 / 0.75 = 13.35(\text{kW})$$

无功损耗为

$$Q_1 = P_1 \text{tg}\varphi = 13.35 \frac{\sqrt{1 - 0.5^2}}{0.5} = 23.2(\text{kVar})$$

如果更换成 Y160M-4, 11kW 电动机, 额定效率为 88%, 功率因数为 0.84, 则

电动机的输入功率为

$$P'_1 = 10 / 0.88 = 11.36(\text{kW})$$

无功损耗为

$$Q'_1 = P'_1 \operatorname{tg} \phi' = 11.36 \frac{\sqrt{1 - 0.84^2}}{0.84} = 7.34 (\text{kVar})$$

更换电机后节约有功功率为

$$\Delta P = P_1 - P'_1 = 13.35 - 11.36 = 1.99 (\text{kW})$$

节约无功功率为

$$\Delta Q = Q_1 - Q'_1 = 23.2 - 7.34 = 15.86 (\text{kVar})$$

如果每年连续运行 6000h, 则电动机每年节约有功电量 11940kWh, 节约无功电量 95160kVar。

### 十六、星—三角变换的节电计算

当电动机负载低于 50% 时可考虑  $\Delta - Y$  变换的节电措施。

#### 1. $\Delta$ 接法改为 Y 接法后, 电动机各种损耗的变化

改成 Y 接后, 电动机相电压降低  $\sqrt{3}$  倍, 此时铁耗降低 3 倍。由于电动机转速基本不变, 故机械损耗基本不变。附加损耗与电流平方成正比, 改成 Y 接法后, 由于定子电流较小, 所以定子附加损耗不大或略有下降, 功率因数得到改善, 达到节电的效果。

但在电动机转矩不变的条件下, 改接后转子电流增加了  $\sqrt{3}$  倍, 所以转子铜耗也增加了 3 倍, 转子附加损耗会增加。电动机转差率增大 3 倍左右。

#### 2. 改接的条件

$\beta = \beta_{ij}$  时, 改接意义不大, 因为浪费电能负载区比节能负载区大, 有功损耗可能增加。 $\beta > \beta_{ij}$  时, 改接没有意义。只有  $\beta < \beta_{ij}$  时, 改接才有意义。 $\beta$  为电动机实际负载率;  $\beta_{ij}$  为临界负载率, 即 Y 接法与  $\Delta$  接法的总损耗相等时的负载率, 可按下列公式计算:

(1) 公式一:

$$\beta_{ij} = \sqrt{\frac{\beta_{ij1}}{2\left[\left(\frac{1}{\eta_1} - 1\right)P_e - P_0 + \beta_{ij2}\right]}}$$

式中： $\beta_{ij1} = 0.67(P_0 - P_j + K \sqrt{3}U_e I_0 \times 10^{-3})$

$$\beta_{ij2} = \left(\frac{P_0}{\eta_e} \operatorname{tg}\varphi_e - \sqrt{3}U_e I_0 \times 10^{-3}\right)K$$

符号同前。

(b) 公式二(简化计算)：

$$\beta_{ij} = \sqrt{\frac{0.67P_{Fe\Delta} + 0.75P_{0Cu\Delta}}{2\left[\left(\frac{1}{\eta_e} - 1\right)P_e - P_{0\Delta}\right]}}$$

式中： $P_{Fe\Delta}$ —— $\Delta$ 接法时的铁耗(kW)；

$P_{0Cu\Delta}$ —— $\Delta$ 接法时的空载铜耗(kW)；

$P_{0\Delta}$ —— $\Delta$ 接法时的空载损耗(kW)；

其它符号同前。

如用公式一计算，改接后节约的有功功率(kW)为

$$\Delta P = 2\beta^2 \left[ \left( \frac{1}{\eta_e} - 1 \right) P_e - P_0 + \left( \frac{P_e}{\eta_e} \operatorname{tg}\varphi_e - \sqrt{3}U_e I_0 \times 10^{-3} \right) K \right] - 0.67(P_0 - P_j + K \sqrt{3}U_e I_0 \times 10^{-3})$$

当  $\Delta P < 0$  时，表示节电； $\Delta P > 0$  时，表示多用电。

由于电动机极数不同，故临界负载率也不相同。为了便于计算，现将部分电动机的临界负载率列于表 5-17，供参考。

改接后节约的有功功率只能等于或少于额定负载时的总损耗，其计算公式如下：



表 5—17 部分电动机的临界负载率

极 数	2	4	6	8
临界负载率 $\beta_{Lj}$ (%)	31	33	36	49

$$\Sigma \Delta P = P_e \left( \frac{1 - \eta_e}{\eta_e} \right)$$

如 Y160M—6, 7.5kW 电动机, ( $\eta_e = 86\%$ ), 总损耗为

$$\Sigma \Delta P = 7.5 \left( \frac{1 - 0.86}{0.86} \right) = 1.22(\text{kW})$$

该电动机由  $\Delta$  接法改为 Y 接法后, 所节约的有功功率不会超过 1.22kW。

**例 5—8** 有一台 Y132S—4, 5.5kW 电动机,  $\Delta$  接法时, 已知  $U_e$  为 380V,  $I_0$  为 4.7A,  $P_j$  为 60W,  $P_0$  为 250W,  $\eta_e$  为 0.855,  $\cos \varphi_e = 0.84$ , 假设无功经济当量  $K = 0.01$ , 试求:

- (1) 电动的临界负载率  $\beta_{Lj}$ ;
- (2) 负载率  $\beta = 0.2$  时, 改为 Y 接法的节电量。

**解** (1) 临界负载率为

$$\begin{aligned} \beta_{Lj} &= \sqrt{\frac{0.67 \times \beta_{Lj1}}{2[\beta_{Lj2} - 0.25 + \beta_{Lj3}]}} \\ \beta_{Lj} &= \sqrt{\frac{\beta_{Lj1}}{2\left[\left(\frac{1}{0.855} - 1\right) \times 5.5 - 0.25 + \beta_{Lj2}\right]}} \\ &= 0.327 \end{aligned}$$

式中:  $\beta_{Lj1} = 0.67 \times (0.25 - 0.06 + 0.01 \times \sqrt{3}$

$$\times 380 \times 4.7 \times 10^{-3}) = 0.148$$

$$\beta_{tj2} = \left( \frac{5.5}{0.855} \times 0.646 - \sqrt{3} \times 380 \times 4.7 \times 10^{-3} \right) \times 0.01 = 0.011$$

(2) 当  $\beta = 0.2$  时, 因  $\beta < \beta_{tj}$ , 故改接后可以节电, 节电功率为

$$\begin{aligned} \Delta P &= 2 \times 0.2^2 \left[ \left( \frac{1}{0.855} - 1 \right) \times 5.5 - 0.25 \right. \\ &\quad \left. + \left( \frac{5.5}{0.855} \times 0.646 - \sqrt{3} \times 380 \times 4.7 \times 10^{-3} \right) \right. \\ &\quad \left. \times 0.01 - 0.67(0.25 - 0.06 + 0.01 \times \sqrt{3} \right. \\ &\quad \left. \times 380 \times 4.7 \times 10^{-3}) \right] \\ &= -0.0925(\text{kW}) = -92.5(\text{W}) \end{aligned}$$

负值表示节电。

### 第三节 传动电动机的选择

#### 一、传动电动机的选择程序

传动电动机的一般选择程序如图 5—26 所示。

#### 二、电动机过载能力及平均起动转矩计算

##### 1. 过载能力

电动机的过载能力可从电动机产品目录中查得。一般常用电动机允许的转矩过载能力, 见表 5—18。

##### 2. 平均起动转矩

鼠笼型异步电动机及同步电动机异步起动时, 在起动过程中其机械特性  $M = f(n)$  为非线性。因此, 平均起动转矩值要根

据电动机的机械特性来计算。一般估算时,可参见表 5—19。

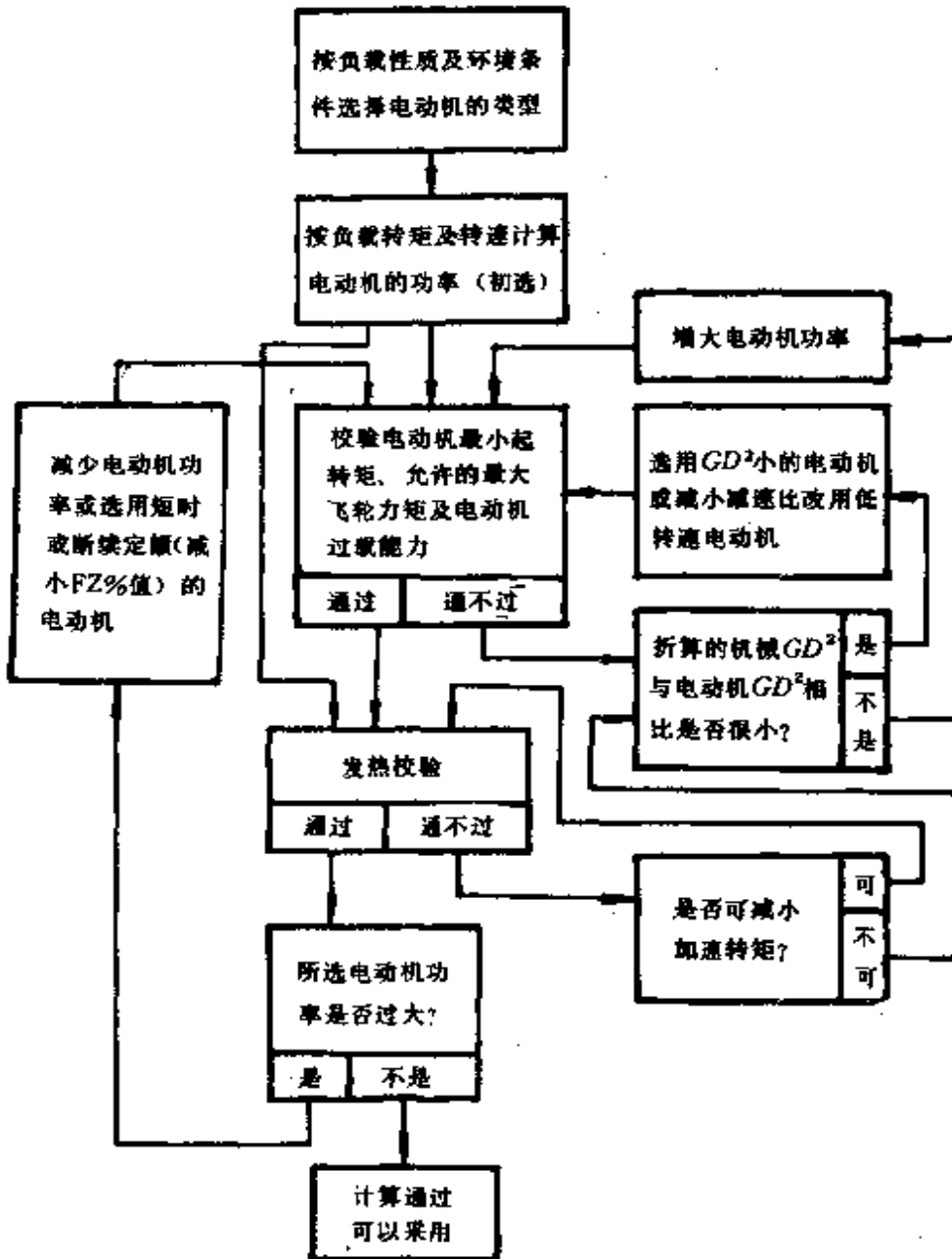


图 5—26 传动电动机的一般选择程序

表 5—18 一般电动机允许的转矩过载倍数

$$(\lambda = M_{\max}/M_e)$$

电动机类型	工 作 制	过载倍数 $\lambda$
鼠笼型异步电动机	连续工作制	$\geq 1.65$
	起重冶金型(10kW 及以下)	$\geq 2.5$
	起重冶金型(10kW 以上)	$\geq 2.8$
绕线型异步电动机	连续工作制	$\geq 1.8$
	起重冶金型(10kW 及以下)	$\geq 2.5$
	起重冶金型(10kW 以上)	$\geq 2.8$
同步电动机	$\cos\varphi = 0.8$ (超前)	$\geq 1.65$
	强励时	3 ~ 3.5
直流电动机(一般型)	额定励磁时	1.5

注:1.8、2.5、2.8 是电机厂提供的保证值。

表 5—19 交流电动机的平均起动转矩

电 动 机 类 型	平均起动转矩	符号含义
同步电动机 $M_q > M_{qr}$ 时 $M_q \leq M_{qr}$	$M_{qpj} = 0.5(M_q + M_{qr})$ $M_{qpj} = 1.0 \sim 1.1M_q$	$M_{qpj}$ — 平均起动转矩 $M_q$ — 最初起动转矩 ( $s = 1$ 时) $M_{qr}$ — 牵入转矩 $M_{lj}$ — 临界转矩
鼠笼型异步电动机 (一般用途)	$M_{qpj} = 0.45 \sim 0.5(M_q + M_{lj})$	

3. 部分机械所需起动转矩和最大转矩参考值(表 5—20)。

表 5—20 部分机械所需的起动转矩和最大转矩参考值

类 型	机 械	起动转矩 额定转矩	最大转矩 额定转矩
1. 冶金业	轧机		
	(1) 粗轧机、钢板轧机、扩管轧机	0.4	2.4 ~ 3.6
	(2) 线材轧机	1.0	2.2
	(3) 黄铜及铜加工轧机	1.5	2.2
	(4) 其它各种轧机	0.4 ~ 0.6	2.2
2. 造纸机械	(1) 搅拌器(标准)、粉碎机、 连续型液压浆料	1.25	1.4
	(2) 粉碎机(空载起动)		
	① 碾磨机和排气风扇 (共用电动机)	1.05	1.6
	② 碾磨机(单独驱动)	1.75	1.5
	(3) 搅拌器(粉碎机)	1.25	1.8
	(4) 春纸机(空载起动)	0.6	2.2
	(5) 其它造纸机械	0.4 ~ 0.5	1.4
3. 水泥机械	管磨机(球磨机)	1.4	1.6
4. 各种粉碎 机(除碎铁 机之外)	(1) 谷物碾磨机	1.0	1.6
	(2) 球磨机(煤、岩石)	1.4	1.6
	(3) 球磨机(矿石)	1.5	1.6
	(4) 带式碾磨机	0.4	2.2
	(5) 球磨机(碎煤、空载起动)		

(续表)

类 型	机 械	起动转矩 额定转矩	最大转矩 额定转矩
4. 各种粉碎机 (除碎铁机 之外)	(1) 共用电动机(碾磨机和排 风扇)	0.9	1.4
	(2) 单独驱动(碾磨机)	1.4	2.2
	(6) 碎矿机(空载起动)	1.0	2.2
	(7) 圆锥式破碎机(空载起动)	1.0	2.2
	(8) 回转破碎机(空载起动)	1.0	2.2
	(9) 爪式破碎机(空载起动)	1.5	2.2
	(10) 滚筒式破碎机(空载起动)	1.5	2.2
	(11) 锤碎机(空载起动)	1.0	2.2
	(12) 地面破碎机	1.75	1.3
	(13) 棒磨机(矿石)	1.6	1.6
5. 木工机械	各类木工机械,如各种锯用	0.4 ~ 0.6	2.2
6. 鼓风机	各种鼓风机	0.3 ~ 0.4	1.3 ~ 1.5
7. 空气压缩机	各种空气压缩机	0.3 ~ 0.6	1.0 ~ 1.5
8. 泵类	(1) 无分流的三筒式往复泵	1.5	1.5
	(2) 其它各类泵	0.4 ~ 0.8	1.5
9. 发电机组	(1) 150kW 以上的直流发电机组	0.2	2.0
	(2) 其它发电机组	0.2	1.5
10. 煤矿机械	(1) 采煤机	1.8 ~ 2.5	2 ~ 2.7
	(2) 装载机	2 ~ 2.8	2.8
	(3) 运输机	1.6 ~ 2.0	1.8 ~ 2.2
11. 其它机械	(1) 密闭式混练机	1.25	2.2 ~ 2.5
	(2) 橡胶磨机	1.25	2.2 ~ 2.5
	(3) 整形机	1.25	2.2 ~ 2.5

4. Y 系列与 JO<sub>2</sub> 系列三相异步电动机效率和起动转矩的比较(表 5—21)。

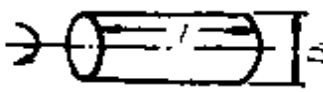

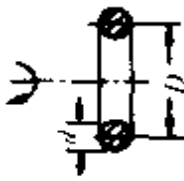


表 5—21 Y 系列与 JO<sub>2</sub> 系列电动机效率和起动转矩的比较

指 标	Y 系列	JO <sub>2</sub> 系列	增 减	备注
系列 $\eta$ (%)	86.91	86.41	+ 0.50	同步转速
起动转矩倍数	1.97	1.48	+ 0.49	3000r/min
效率 $\eta$ (%)	87.19	85.22	+ 1.97	同步转速
起动转矩倍数	1.99	1.49	+ 0.50	1500r/min
效率 $\eta$ (%)	86.64	85.25	+ 1.39	同步转速
起动转矩倍数	2.07	1.53	+ 0.54	1000r/min
效率 $\eta$ (%)	88.39	86.58	+ 1.81	同步转速
起动转矩倍数	1.93	1.42	+ 0.52	750r/min

### 三、飞轮力矩计算

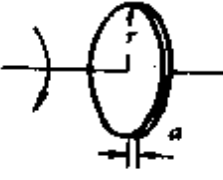


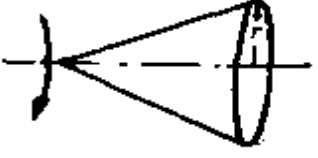
几种物体的飞轮力矩的计算见表 5—22。

表 5—22 飞轮力矩的计算

飞 轮 力 矩	物体的几何形状	符号含义
实心圆柱体 $GD^2 = G \frac{D_1^2}{2} = \frac{\pi}{8} \gamma l D_1^3$		$GD^2$ — 飞轮力矩 (N·m <sup>2</sup> ) $G$ — 重量(N) $D_1$ — 外径(m)
空心圆柱体 $GD^2 = \frac{G(D_1^2 + D_2^2)}{2}$ $= \frac{\pi}{8} \gamma l (D_1^3 - D_2^3)$		$\gamma$ — 比重(N/m <sup>3</sup> ) $l$ — 长度(m) $D_2$ — 内径(m) $D$ — 圆环直径(m)
圆环 $GD^2 = G(D^2 + 0.75d^2)$ $= \frac{\pi^2}{4} \gamma (D^3 d^2 + 0.75 D d^4)$		$a$ — 厚度(m) $b$ — 宽度(m) $d$ — 圆截面径(m) $\rho$ — 回转半径(m)
六面体(对轴线 01—01) $GD^2 = \frac{G(a^2 + b^2)}{3}$ $= \frac{a^2 + b^2}{3} \gamma a b l$		
六面体(对轴线 02—02) $DG^2 = GD_{01}^2 + 4G\rho^2$		



(续表)

飞 轮 力 矩	物体的几何形状	符号含义
<p>圆板</p> $GD^2 = G \frac{r^2}{4} = \frac{\pi}{8} \gamma a r^4$		<p><math>r</math>—半径(m)  <math>r_1</math>—外半径(m)  <math>r_2</math>—内半径(m)</p>
<p>空心球体</p> $GD^2 = \frac{2}{5} G \left( \frac{r_1^5 - r_2^5}{r_1^3 - r_2^3} \right)$		
<p>实心球体</p> $GD^2 = \frac{2}{5} Gr^2$		
<p>圆锥体</p> $GD^2 = \frac{3}{10} Gr^2$		

#### 四、根据打滑条件允许的最大加速度计算

为防止行走机械或运送钢材的辊道等机械在加、减速过程中打滑,其最大允许加速度由下式决定:

$$a_{\max} < g\mu$$

式中: $g$ —重力加速度, $g = 9.18\text{m/s}^2$ ;

$\mu$ —摩擦面间最小滑动摩擦系数,见表 21—17 ~ 表 21—19。

在辊道上输送钢材时:冷钢材最大允许加速度  $a_{(\max)} \approx 0.94 \sim 1.47(\text{m/s}^2)$ , 热钢材最大允许加速度  $a_{\max} \approx 1.47 \sim 2.94(\text{m/s}^2)$ 。

从满足上式要求出发,也可换算成直接限制电动机在加、减速过程中的动态转矩值:

$$M_d \leq \frac{60g}{375} \cdot \frac{i\mu GD^2}{\pi DK_c}$$

式中:  $M_d$ —— 动态转矩(N·m);

$D$ —— 传动轮(辊子)直径(m);

$K_c$ —— 滑动系数,可取 0.98;

$GD^2$ —— 传动系统的总飞轮力矩(N·m<sup>2</sup>);

$i$ —— 机械传动系统的总速比(传动比);

$\mu$ —— 同前。

### 五、电动机功率的校验

#### 1. 平稳负载长期工作制电动机容量的校验

##### (1) 电动机额定功率计算:

① 对于平稳或变化很小的负载长期工作制的电动机额定功率按下式计算:

$$P_e \geq P_z = \frac{M_z n_e}{9555}$$

式中:  $P_e$ —— 电动机额定功率(kW);

$P_z$ —— 负载功率(kW);

$M_z$ —— 折算到电动机轴上的静负载转矩(N·m);

$n_e$ —— 电动机额定转速(r/min)。

② 对恒定负载转矩,在额定转速以上调速时,应使电动机弱磁后的最高工作转速符合机械所要求的最高转速。此时按最高转速来校验电动机的功率,即

$$P_e \geq \frac{M_z n_{\max}}{9555}$$

式中： $n_{\max}$ ——电动机的最高工作转速(r/min)；  
其它符合同前。

(2) 校验起动过程中的最小转矩及允许的最大飞轮力矩：  
对起动沉重的机械，当采用鼠笼型异步电动机或同步电动机时，还应按下列公式校验最小起动转矩和允许的机械最大飞轮力矩，以保证能顺利起动和起动过程中电动机不致过热。该两项校验必须同时通过。

① 校验最小转矩：

$$M_{\min} \geq \frac{M_{\max} K_s}{K_u^2}, \quad K_u = U_q / U_e$$

式中： $M_{\min}$ ——起动过程中电动机的最小转矩(N·m)；

$M_{\max}$ ——起动过程中的最大负载转矩(N·m)；

$K_s$ ——保证起动时有足够加速转矩的系数，一般取 1.15 ~ 1.25；

$K_u$ ——电压波动系数，直接起动时取 0.85；

$U_q$ ——起动时电动机端电压(V)。

② 校验允许的机械最大飞轮转矩：

$$GD_{j\max}^2 \leq GD_{u\text{容}}^2 = GD_0^2 \left( 1 - \frac{M_{\max}}{M_{qpj} K_u^2} \right) - GD_a^2$$

式中： $GD_{j\max}^2$ ——传动机械实际的最大飞轮力矩(N·m<sup>2</sup>)，需折算到电动机轴上；

$GD_{u\text{容}}^2$ ——允许传动机械具有的最大飞轮力矩(N·m<sup>2</sup>)，需折算到电动机轴上；

$GD_0^2$ ——包括电动机在内的整个传动允许的最大飞轮力矩(N·m<sup>2</sup>)，需折算到电动机轴上，可由产品目录中查得；

$GD_a^2$ ——电动机转子的飞轮力矩(N·m<sup>2</sup>)；

$M_{qpj}$ ——电动机的平均起动转矩(N·m)；见表 5—19。

**例 5—9** 已知负载转矩  $M_e$  为 1446.5N·m，起动过程中的

最大静阻转矩  $M_{z\max}$  为  $561.9\text{N}\cdot\text{m}$ , 要求电动机的转速  $n$  为  $2900 \sim 3000\text{r}/\text{min}$ , 传动机械折算到电动机轴上的总飞轮力矩  $GD_{j\max}^2$  为  $1960\text{N}\cdot\text{m}$ , 试选择电动机。

解 (1) 负载功率计算:

$$P_z = \frac{M_z n_e}{9555} = \frac{1446.5 \times 2975}{9555} = 450(\text{kW})$$

初选 JK - 500 鼠笼型异步电动机, 由产品目录查得  $P_e = 500\text{kW}$ ,  $n_e = 2975\text{r}/\text{min}$ , 转矩过载倍数  $\lambda = 2.5$ , 最小起动转矩倍数

$$M_{d\min}^* = M_{d\min}/M_e = 0.73$$

电动机转子飞轮力矩  $GD_2^2 = 441\text{N}\cdot\text{m}^2$ , 允许的最大飞轮力矩  $GD_0 = 3825\text{N}\cdot\text{m}^2$

电动机的额定转矩

$$M_e = \frac{9555P_e}{n_e} = \frac{9555 \times 500}{2975} = 1603.4(\text{N}\cdot\text{m})$$

电动机的实际负载率

$$\beta = \frac{P_z}{P_e} = \frac{450}{500} = 0.90$$

(2) 校验最小起动转矩: 起动过程中电动机需要的最小起动转矩(假设电动机为全压起动)

$$M_{\min} = \frac{M_{z\max}K_s}{K_u^2} = \frac{561.9 \times 1.25}{0.85^2} = 970.9(\text{N}\cdot\text{m})$$

电动机实际的最小起动转矩  $M_{d\min} = M_{d\min}^* M_e = 0.73 \times 1603.4 = 1167(\text{N}\cdot\text{m})$ 。  $M_{d\min} > M_{\min}$ , 故最小起动转矩校验合格。

(3) 校验允许的最大飞轮力矩: 由表 5-19 查得平均起动转矩为

$$\begin{aligned}M_{q\phi j} &= 0.45(M_q + M_{tj}) = 0.45(M_{d\min}M_e + \lambda M_e) \\ &= 0.45 \times (0.73 + 2.5) \times 1603.4 \\ &= 2330.5(\text{N} \cdot \text{m})\end{aligned}$$

允许的最大飞轮力矩为

$$\begin{aligned}GD_{uzm}^2 &= GD_0^2 \left( 1 - \frac{M_{z\max}}{M_{q\phi j} K_s^2} \right) - GD_d^2 \\ &= 3825 \times \left( 1 - \frac{561.9}{2330.5 \times 0.85^2} \right) - 441 \\ &= 2098.6(\text{N} \cdot \text{m}^2)\end{aligned}$$

由于  $GD_{uzm}^2 > GD_{j\max}^2 (1961\text{N} \cdot \text{m})$ , 故允许的最大飞轮力矩校验合格。

因此, JK - 500 型电动机的发热及起动条件校验均通过, 可以选用此电动机。

### 2. 短时工作制电动机功率的校验

对于异步电动机, 其额定功率  $P_e$  按下式计算:

$$P_e = \frac{P_{z\max}}{0.75\lambda}$$

式中:  $P_{z\max}$  —— 短时负载功率的最大值(kW);

$\lambda$  —— 电动机允许的转矩过载倍数, 见表 5—18。

### 3. 波动负载长期工作制电动机容量的校验

下面介绍不带飞轮工作的波动负载长期工作制电动机功率的校验。

(1) 发热校验:

① 电动机的负载曲线为矩形时(图 5—27):

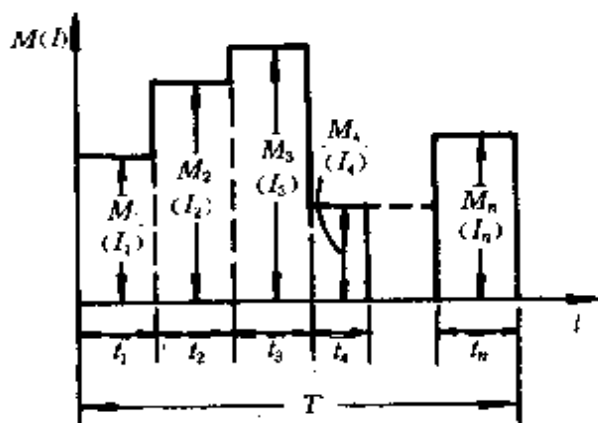


图 5—27 矩形曲线的负载图

$$M_{jf} = \sqrt{\frac{M_1^2 t_1 + M_2^2 t_2 + \dots + M_n^2 t_n}{t_1 + t_2 + \dots + t_n}}$$

$$I_{jf} = \sqrt{\frac{I_1^2 t_1 + I_2^2 t_2 + \dots + I_n^2 t_n}{t_1 + t_2 + \dots + t_n}}$$

式中： $M_{jf}$ ——负载等效转矩(N·m)，即均方根值；

$I_{jf}$ ——负载等效电流(A)；

$M_1 \sim M_n$ ——各分段时间的转矩值(N·m)；

$I_1 \sim I_n$ ——各分段时间的电流值(A)；

$t_1 \sim t_n$ ——相应的各分段时间(s)。

当  $M_e > M_{jf}$  或  $I_e > I_{jf}$  时，发热校验合格。

② 电动机的负载曲线是梯形或三角形时(图 5—28)：应将每一个梯形或三角形的转矩(或电流)换算成等效平均值，然后再按 ① 中的公式计算等效转矩或等效电流，进行校验。

每个梯形转矩(或电流)的等效平均值(时间  $t_1$  间隔内)可按下列式求得：

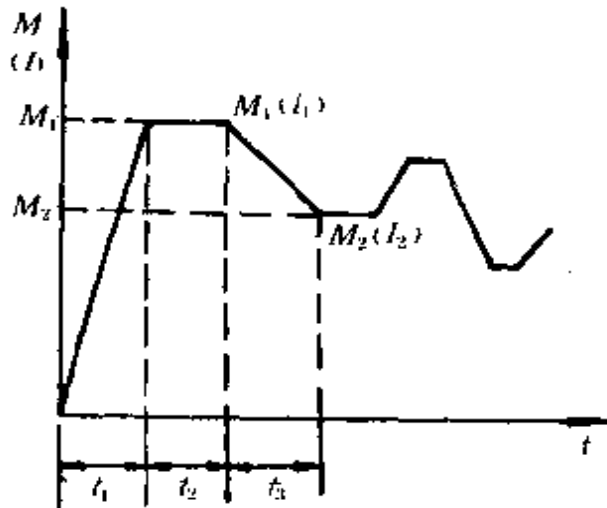


图 5-28 梯形和三角形曲线的负载图

$$M_{pj} = \sqrt{\frac{M_1^2 + M_2^2 + M_1 M_2}{3}}$$

$$I_{pj} = \sqrt{\frac{I_1^2 + I_2^2 + I_1 I_2}{3}}$$

每个三角形曲线转矩(或电流)的等效平均值(时间  $t_1$  间隔内)可按下列式求得:

$$M_{pj} = \sqrt{\frac{M_1^2}{3}} = 0.578M_1$$

$$I_{pj} = \sqrt{\frac{I_1^2}{3}} = 0.578I_1$$

等效电流法适用于直流电动机、绕线型及鼠笼型异步电动机;等效转矩法只适用于转矩与电流成正比的条件下,如磁场不变的直流电动机、稳定工作速度下的绕线型和鼠笼型异步电动机及同步电动机,而不能用于直流串激电动机。

(2) 校验最大过载转矩:

$$M_e \geq \frac{M_{zmax}}{0.9K_x\lambda}$$

式中:  $M_e$ —— 电动机的额定转矩(N·m);

$M_{zmax}$ —— 最大负载转矩(N·m);

$K_x$ —— 考虑电网电压波动对电动机转矩影响系数,对于同步电动机取 0.85;异步电动机取 0.72;直流电动机取 1.0;

$\lambda$ —— 同前。

(3) 校验起动过程中的最小转矩及允许的最大飞轮力矩: 校验方法同平稳负载长期工作制电动机。

#### 4. 重复短时工作制电动机功率的校验

一般重复短时工作的电动机的速度与负载图如图 5—29 所示,电动机通常选用 JZ、JZR 系列。这类电动机的标准负荷持续率  $FZ\%$  值分别为 25%、40%、60% 三种,采用 10min 作为周期计算时间。当实际的负荷持续率大于 60% 时,应按长期工作制选择电动机或采用强迫通风。

(1) 按等效转矩(或等效电流)法校验发热:

$$M_{jf} = \sqrt{\frac{\sum M_q^2 t_q + \sum M_z^2 t_z + \sum M_w^2 t_w}{C_a(\sum t_q + \sum t_z) + \sum t_w}}$$

$$I_{jf} = \sqrt{\frac{\sum I_q^2 t_q + \sum I_z^2 t_z + \sum I_w^2 t_w}{C_a(\sum t_q + \sum t_z) + \sum t_w}}$$

式中:  $M_{jf}$ 、 $I_{jf}$ —— 电动机在一个工作周期  $T$  内的等效转矩和等效电流(N·m、A);



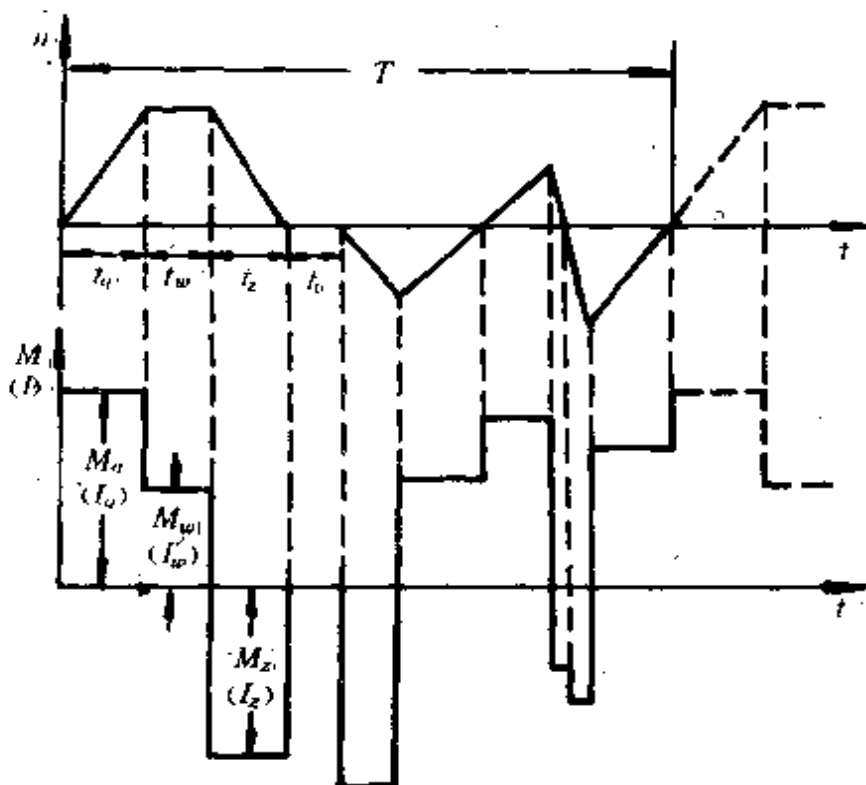


图 5-29 重复与短时工作制电动机的速度与负载图

$M_q, I_q$ —— 起动转矩和起动电流 ( $N \cdot m, A$ );

$M_z, I_z$ —— 制动转矩和制动电流 ( $N \cdot m, A$ );

$M_w, I_w$ —— 稳态运行转矩和电流 ( $N \cdot m, A$ );

$\Sigma t_q$ —— 一个周期起动时间的总和 (s);

$\Sigma t_z$ —— 一个周期制动时间的总和 (s);

$\Sigma t_w$ —— 一个周期稳态运行时间的总和 (s);

$C_a$ —— 电动机起、制动过程中的散热恶化系数  $C_a = (1 + C_\beta)/2$ ,  $C_\beta$  值见表 5-23。

表 5—23 散热恶化系数  $C_p$  值

电动机的冷却方式	$C_p$ 值
封闭式电动机(无冷却风扇)	0.95 ~ 0.98
封闭式电动机(强迫通风)	0.9 ~ 1.0
封闭式电动机(自带内冷风扇)	0.45 ~ 0.55
防护式电动机(自带内冷风扇)	0.25 ~ 0.35

实际负载持续率  $FZ\%$  为

$$FZ\% = \frac{\sum t_g + \sum t_r + \sum t_w}{T} \times 100$$

式中： $T$ ——一个工作周期的总时间(s)。

当实际的负载持续率  $FZ\%$  与电动机铭牌规定的负载持续率  $FZ_e\%$  不同(但相差不多)时,应将电动机的额定转矩和额定电流折算到实际负载持续率来计算,折算公式如下:

$$M'_e = \sqrt{\frac{FZ_e\%}{FZ\%}} M_e \quad I'_e = \sqrt{\frac{FZ_e\%}{FZ\%}} I_e$$

式中： $M'_e$ ——折算到实际负载持续率时的额定转矩(N·m)；

$I'_e$ ——折算到实际负载持续率时的额定电流(A)；

$M_e$ ——对应于  $FZ_e\%$  时电动机的额定转矩(N·m)；

$I_e$ ——对应于  $FZ_e\%$  时的电动机的额定电流(A)。

当  $M'_e \geq M_{jf}$  或  $I'_e > I_{jf}$  时,发热校验合格。

(2) 校验最大过载转矩:校验方法同波动负载长期工作制电动机。

只有以上两项校验都合格后,电动机的功率校验才算通过。

## 第四节 电动机功率的选定

### 一、采用寿命期费用分析法选定电动机

所选定的电动机,不仅要保证其安全可靠运行,还要做到经济合理。电动机寿命期间的全部费用为

$$Z = G + Q + F_M$$

式中: $Z$ ——全部费用(元);

$G$ ——购买费(元),已知;

$Q$ ——安装费(元),可根据电动机的安装要求和工作现场的条件估算出;

$F_M$ ——寿命期内的全部使用费现值(元)。

第 $m$ 年的使用费现值可由下式计算:

$$F_m = C_m \left( \frac{1}{1+i} \right)^m$$

式中: $C_m$ ——第 $m$ 年发生的使用费(元);

$i$ ——使用费的利率,由财务部门提供。

设选定的电动机的使用寿命为 $M$ 年,则 $M$ 年内发生的使用费现值为

$$F_M = F_1 + F_2 + \dots + F_m = \sum_1^M \left[ C_m \left( \frac{1}{1+i} \right)^m \right]$$

由于电动机在使用过程中效率逐年有所下降,使用费则逐年递增。设递增率为 $e$ ,则

$$F_M = \sum_1^M \left[ C_m \left( \frac{1+e}{1+i} \right)^m \right]$$

式中： $e$ ——递增率(经验系数)，一般取 0.75 ~ 0.80。

在正常使用的条件下，电动机效率的衰减很小，各年使用费的增长数值不大。可以假设  $C_1 = C_2 = \dots = C_m = A$ ，利用等比数列求和的公式可得：

$$F_M = A \frac{\left(\frac{1-e}{1+i}\right) \left[1 - \left(\frac{1+e}{1+i}\right)^M\right]}{1 - \frac{1+e}{1+i}}$$

$$A = \left\{ P_2 + P_0 + \left(\frac{P_2}{P_e}\right)^2 \left[ \left(\frac{1}{\eta_e} - 1\right) P_e - P_0 \right] \right\} T \delta$$

式中： $A$ ——每年的使用费(元)；

$P_2$ ——电动机输出功率(kW)；

$P_0$ ——电动机空载损耗(kW)；

$P_e$ ——电动机额定功率(kW)；

$\eta_e$ ——电动机额定效率；

$T$ ——电动机年运行小时数(h)；

$\delta$ ——电价(元/kWh)。

根据上述公式，逐台比较预选电动机的全部费用  $Z$  值的大小，就可以选出  $Z$  值最小的电动机，即经济性最佳的电动机。

## 二、在不同环境温度时电动机功率的计算

电动机的额定功率以周围环境温度为 +40°C 来标定，当环境温度为 +40°C 时，电动机能以其额定功率连续运行而温升不超出允许范围；电动机在非标准环境温度下运行时，其功率应作相应修正，修正的近似公式为

$$P_t = P_e \sqrt{\frac{\tau_t}{\tau_e} (m+1) - m}$$

式中： $P_t$ ——当周围环境温度为  $t^\circ\text{C}$  时，电动机的功率(kW)；

$P_e$ ——电动机额定功率(kW)；

- $\tau_t$ ——当周围环境温度为  $t^\circ\text{C}$  时,电动机的允许温升( $^\circ\text{C}$ );
- $\tau_c$ ——当周围环境温度为  $+40^\circ\text{C}$  时,电动机的允许温升( $^\circ\text{C}$ ),视电动机绝缘等级而异,见表 5—30;
- $m$ ——电动机空载损耗  $P_0$  与铜耗  $P_{Cu}$  之比,  $m = P_0/P_{Cu}$ , 见表 5—24。

表 5—24 电动机的  $m$  值

电动机型式	$m$ 值	
复激电动机	低 速	0.5
	高 速	1.0
并激电动机	低 速	1.0
	高 速	2.0
普通工业用感应电动机	0.5 ~ 1.0	
吊车用感应电动机	0.5 ~ 1.5	

上式有三种情况:

1. 当  $\tau_t > \frac{m\tau_c}{m+1}$  时,根号内的数值为正,表示在这种温升下,电动机能发挥出  $P_t$  的功率。

2. 当  $\tau_t = \frac{m\tau_c}{m+1}$  时,  $P_t$  等于零,表示在这种温升下,电动机由于它的空载损耗  $P_0$  已经使其发热达到极限程度,因而不能再带负载运行了。

3. 当  $\tau_t < \frac{m\tau_c}{m+1}$  时,根号内的数值为负,  $P_t$  变成一个虚数,表示在这种温升下,电动机即使空载运行也是不可能的。

**例 5—10** 试确定功率为 30kW、Y200L—4 型电动机在周围空气温度为  $+30^\circ\text{C}$  时,所能发挥的功率。电动机绕组绝缘为

B级。

**解** 当周围空气温度为  $\pm 30^{\circ}\text{C}$  时,其允许温升为

$$\tau_t = \tau_e + 40 - t = 80 + 40 - 30 = 90(^{\circ}\text{C})$$

设  $m = 0.7$  (精确值应计算),则

$$\begin{aligned} P_t &= P_e \sqrt{\frac{\tau_t}{\tau_e} (m + 1) - m} \\ &= 30 \sqrt{\frac{90}{80} (0.7 + 1) - 0.7} = 33(\text{kW}) \end{aligned}$$

### 三、各种设备的电动机功率的选择

各种设备的负载功率  $P$  (已考虑传动机械效率) 求出后,则电动机的功率  $P_e$  在满足负荷特性的前提下 (即  $M_q, M_{\max}, M_{\min}$  符合要求时),就可按式  $P_e \geq P$  确定。

#### 1. 卷扬机电动机功率的计算

卷扬机电动机的负载曲线如图 5-30 所示。电动机的负载功率可按式计算:

$$P_{jf} = \frac{1}{\eta} \sqrt{\frac{P_1^2 t_1 + (P_2^2 + P_2 P_3 + P_3^2) \frac{t_2}{3} + P_4^2 t_3}{t_1 + t_2 + t_3 + \frac{t_4}{3}}}$$

式中:  $P_{jf}$  —— 电动机的负载功率 (kW);

$\eta$  —— 卷扬机构效率;直接联接的:  $0.8 \sim 0.9$ ,一对齿轮乘以  $0.9 \sim 0.95$

其它符号见图 5-30。

卷扬机电动机功率另一计算公式

$$P = 0.105 \frac{nM}{\eta} \times 10^{-3}$$

式中:  $P$  —— 所需的电动机功率 (kW);

- $n$ ——转速(r/min)；  
 $M$ ——电动机的负载转矩(N·m)；  
 $\eta$ ——同前。

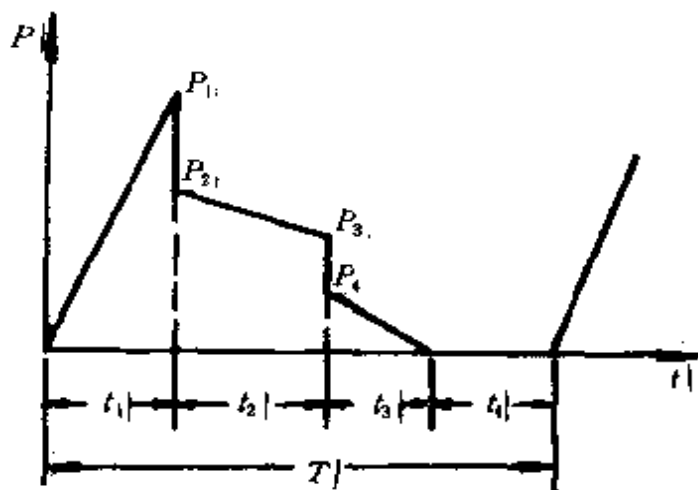


图 5-30 卷扬机电机负载曲线

**例 5—11** 某卷扬机的电动机负载曲线如图 5—30。已知  $t_1$  为 12s、 $t_2$  为 30s、 $t_3$  为 6s、 $t_4$  为 20s； $P_1$  为 350kW、 $P_2$  为 200kW、 $P_3$  为 160kW、 $P_4$  为 40kW，试选择电动机的功率。

**解** 设滚筒轴的效率  $\eta = 0.95$ ，则电动机的负载功率为

$$P_{if} = \frac{1}{\eta} \frac{1}{\sqrt{12 + 20 + 6 + \frac{30}{3}}} \times \sqrt{350^2 \times 12 + (200^2 + 200 \times 160 + 160^2) \times \frac{20}{3} + 40^2 \times 6}$$

$$= \frac{1}{0.95} \times 225.3 = 237(\text{kW})$$

因此，可选用 JRQ 型 245kW、735r/min、380V 的电动机。  
 用上述方法计算时，周期  $T$  值一般不超过 15min。如果  $T$  值

超过 15min,应用温升曲线去计算。

### 2. 摩擦负载电动机功率的计算

皮带运输机、吊车在轨道上运动等,都属于摩擦负载类型。这类负载的电动机功率可按下列公式计算。

#### (1) 直线运动:

$$F = \mu G$$

$$P = Fv \times 10^{-3} = \mu Gv \times 10^{-3}$$

式中: $F$ ——滑动摩擦力(N),具体计算见第二十一章第一节五项;

$P$ ——电动机所需功率(kW);

$G$ ——垂直正压力(N);

$v$ ——运动速度(m/s);

$\mu$ ——滑动摩擦系数,见表 21 - 18。

#### (2) 回转运动:

$$M = \rho Gr$$

$$P = \omega M \times 10^{-3} = \omega \rho Gr \times 10^{-3}$$

式中: $M$ ——所需转矩(N·m);

$r$ ——轴承的旋转半径(m);

$\omega$ ——旋转轴的角速度(rad/s);

$\rho$ ——轴承摩擦系数,套筒轴承为 0.001 ~ 0.006;滚珠轴承、滚柱轴承为 0.001 ~ 0.007。

### 3. 各类机床电动机的选择

#### (1) 机床主传动电动机的负载功率:

$$P = \frac{M_z \eta_c}{9555} \quad \text{或} \quad P = P_{\max} / \eta_{\min}$$

式中: $P$ ——电动机的负载功率(kW);

$M_z$ ——电动机的负载转矩(N·m);

$n_c$ ——电动机额定转速(r/min);



- $P_{max}$ ——机床最大切削功率(kW);
- $\eta_{min}$ ——传动最低效率(采用多速电机)。

(2) 车床给进电动机的负载功率:

$$P = \frac{P_1}{\eta} = \frac{Fv \times 10^{-3}}{60\eta} \quad \text{或} \quad P = 36.5D^{1.54}$$

- 式中: $P$ ——电动机的负载功率(kW);
- $P_1$ ——车床的切削功率(kW);
  - $\eta$ ——传动机构的效率;
  - $F$ ——给进运动的总阻力(N);
  - $v$ ——切削速度(m/min),取最大值;
  - $D$ ——工件的最大直径(m)。

(3) 刀架快速移动所需电动机(即辅助传动电机)的功率

$$P = \frac{GvF}{102 \times 60\eta\lambda}$$

- 式中: $P$ ——辅助传动电机的功率(kW);
- $G$ ——被移动元件的重量(kg);
  - $v$ ——移动速度(m/min);
  - $\mu$ ——摩擦系数,可取 0.1 ~ 0.2;
  - $\eta$ ——传动机构的效率,可取 0.1 ~ 0.2;
  - $\lambda$ ——电动机过载倍数,可由产品目录查得。

(4) 切削机床电动机的负载功率

$$P = \left( \frac{F_1 R n}{9555} + \frac{F_2 v \times 10^{-3}}{60} \right) \frac{1}{\eta}$$

- 式中: $P$ ——电动机的负载功率(kW);
- $F_1, F_2$ ——切削力(N);
  - $R$ ——半径(m);
  - $n$ ——转速(r/min);

$v$ ——送刀速度(m/min);

$\eta$ ——机床传动效率。

(5) 摇臂钻床电动机的负载功率:

$$P = 0.0646D^{1.19}$$

式中: $P$ ——电动机的负载功率(kW);

$D$ ——最大的钻孔直径(mm)。

(6) 电钻转矩计算:钻削 45 号钢,不采用冷却液时,电钻的转矩可按下式计算:

$$M = 0.29D^2v^{0.8}$$

$$v = \left( \frac{F}{559D} \right)^{1.43}$$

式中: $M$ ——电钻的转矩(N·m);

$D$ ——最大钻孔直径(mm);

$v$ ——钻头进给速度(mm/r);

$F$ ——在电钻上施加的轴向压力(N)。

各种规格的电钻钻削 45 号钢时设计用轴向压力,见表 5—25。

表 5—25 电钻轴向压力推荐值

最大钻孔直径 (mm)	4	6	10	13	16	19	23	38	49
轴向压力(N)	245	343	539	883	1177	1667	2256	4217	5884

(7) 电动攻丝机转矩计算:利用冷却润滑液切削螺纹的电动攻丝机转矩可按下式计算:

$$M = 0.0981KD^{1.4}S^{1.5}$$

式中: $M$ ——攻丝机转矩(N·m);

$K$ ——系数,钢取 2.75;铸铁按硬度不同,取 1.29~1.89;

青铜及黄铜取 0.55;

$D$ —— 螺纹直径(mm);

$S$ —— 螺距(mm)。

丝锥的切削速度,见表 5—26。

表 5—26 电动攻丝机的切削速度推荐值

螺 纹 直 径 (mm)	切 削 材 料		
	用 冷 却 液		不用冷却液
	$\delta_s$ 为 392 ~ 588(MPa) 的钢或黄铜	$\delta_s$ 为 392(MPa) 以内和 588(MPa) 以上的钢	铸铁、青铜及铝合金
	切 削 速 度 (m/min)		
6	6.5	4.5	6.0
8	7.5	5.0	7.0
10	8.0	5.5	8.0
12	9.0	6.0	9.0
14	9.5	6.5	10.0
16	11.0	7.5	11.0

(8) 砂磨电动工具参数的选择:

① 磨具安全线速度:纤维加强砂轮为 80m/s,树脂砂轮为 50m/s,各类磨头为 30m/s,布、塑料、皮革抛光盘为 12m/s。

② 空转转速:最高空载转速在 1.1 倍的额定电压时,不得使磨具的线速度超过规定的安全值。

交直流两用电动机额定电压时的空载转速为：

$$n_0 = \frac{n}{0.55 \sim 0.6}$$

三相鼠笼型电动机的空载转速接近于同步转速。

额定电压时，交直流两用砂磨工具实际空载转速应不大于标称空载转速。

③ 额定转矩：

以圆周面加工的角向磨光机  $M_e = 7.5F_p D \times 10^{-5}$

以端面加工的角向磨光机  $M_e = 2.94FD^2 \times 10^{-5}$

角向抛光机  $M_e = 6.86D^2 \times 10^{-5}$

磨具直径大于 50mm 的直向砂轮机

$$M_e = 2.94D^{1.5}b \times 10^{-5}$$

式中： $M_e$ —— 额定转矩(N·m)；

$D$ —— 磨具直径(mm)；

$F_p$ —— 磨具切削时施加的压力，见表 5—27；

$b$ —— 磨具厚度(mm)。

表 5—27 切削压力推荐值

砂轮直径 (mm)	100	125	180	230
砂轮切削压力 (N)	24.5 ~ 34.3	49.0 ~ 58.8	156.9 ~ 166.7	166.7 ~ 176.5

(9) 木材锯割电动工具参数的选择：

① 电圆锯、带锯电动机的输出功率：

$$P = \frac{K_p bHC}{9.81 \times 6120\eta}$$

式中： $P$ ——输出功率(kW)；

$K_y$ ——锯截时的单位切削阻力(N/mm<sup>2</sup>)，  
对通用锯截电动工具取 196N/mm<sup>2</sup>；

$b$ ——锯截宽度(mm)；

$H$ ——锯截高度(mm)；

$C$ ——进给速度(m/min)，见表 5—28；

$\eta$ ——传动机构效率。

电圆锯锯片空载线速度一般在 50 ~ 60m/s。

表 5—28 电圆锯进给速度

木 质	进给速度(m/min)
硬	0.7 ~ 0.9
中 硬	1.0 ~ 1.2
软	1.2 ~ 1.8

② 电刨电动机的输出功率：

$$P = \frac{K_B b H C}{9.18 \times 6120 \eta}$$

式中： $P$ ——电动机的输出功率(kW)；

$K_B$ ——刨削时的阻力，通常取 29.4N/mm<sup>2</sup>；

$b$ ——刨削宽度(mm)；

$H$ ——刨削深度(mm)；

$C$ ——进给速度，取 3 ~ 5m/min；

$\eta$ ——传动机构效率。

电刨刨刀的线速度一般在 20 ~ 30m/s。

(10) 一般连续运行电动机功率的选择：

$$P_e \geq P_s / \eta_i$$

式中： $P_e$ ——电动机额定功率(kW)；

$P_s$ ——生产机械功率(kW)；

$\eta_i$ ——传动机构效率。

#### 4. 农用机械电动机功率的选择

(1) 电犁电动机的负载功率：

$$P = \frac{Fv}{\eta} \times 10^{-3}$$

式中： $P$ ——电动机的负载功率(kW)；

$F$ ——电犁最大牵引力(N)；

$v$ ——电犁速度(m/s)；

$\eta$ ——从电动机转轴到农田机械轴间的总传送效率，可取  
0.7 ~ 0.9。

(2) 脱粒机电动机的负载功率：

$$P = \frac{KLDZ}{102\eta}$$

式中： $P$ ——电动机的负载功率(kW)；

$K$ ——经验系数，可取 0.134；

$L$ 、 $D$ ——脱粒机滚筒长度和直径(cm)；

$Z$ ——谷物稻秆数；

$\eta$ ——总效率。

### 第五节 有关电动机运行方面的计算

#### 一、异步电动机一般工作条件的规定和要求

1. 为了保证电动机的额定出力，电动机出线端电压不得高于额定电压的 10%，不得低于额定电压的 5%。

2. 电动机出线端电压低于额定电压的 5% 时，为了保证额定出力，定子电流允许比额定电流增大 5%。

3. 电动机在额定出力运行时，相间电压的不平衡率不得超

过5%。

4. 当环境温度不同时,电动机电流允许增减:

(1) 周围环境温度在 30°C 时,电动机的额定电流允许增加 5%;

(2) 周围环境温度在 25°C 时,电动机的额定电流允许增加 8%;

(3) 周围环境温度超过 35°C 时,则要降低出力,大约每超过 1°C 电动机额定电流降低 1%。

5. 正常使用负载率低于 40% 的电动机应予以调整或更换。空载率大于 50% 的中小型电动机应加限制空载装置(所谓电动机的空载率,是指电动机空载运行的时间  $t_0$  与电动机带负载运行的时间  $t$  之比,即  $\beta_0 = t_0/t \times 100\%$ )。

6. 新加轴承润滑脂的容量不宜超过轴承内容积的 70%。

## 二、电机用电刷的电流密度与电刷牌号的选择(表 5—29)

表 5—29 电机用电刷的电流密度与电刷牌号的选择

系列电动型号	电刷选用电流密度(A/cm <sup>2</sup> )	选用电刷牌号
ZQ	4.5 ~ 12	D308、D374B、DH312
ZD ZF	4.4 ~ 11	D374B、D374N
ZZJ ZZJ <sub>0</sub>	3.44 ~ 8.2	D308、DH312
ZZH ZZKH	3.27 ~ 8.6	D214、D374B
ZKD ZKL	6.31 ~ 9.5 7.8 ~ 11	D374B、D374N、D376N
ZDW ZFW	6.0 ~ 9.5	DH312、D374B
ZL	5.0 ~ 9.2	D172、D374B
Z <sub>2</sub>	3.5 ~ 8.5	D214、D374B

### 三、绕组温升和绝缘电阻的计算

#### 1. 异步电动机的最高允许温度和温升

电动机各部分最高允许温度和允许温升,根据电动机绝缘等级和类型而定,见表 5—30。

当地点的海拔超过 1000m(但不超过 4000m)时,每超过 1000m 电机的温升限度增加 0.5°C; 低于 1000m 时,每降低 100m 温升限度减少 0.5°C。

#### 2. 环境温度对电机性能影响的计算

根据国标 GB755—65 规定,电机的周围环境温度不超过 40°C。如果超过 40°C,则规定的极限允许温度应减去此超过值; 如果超过值在 10°C 以上,则温升限度的降低值由制造厂给出。如果周围环境温度低于 40°C,则对 A 级和 E 级绝缘,温升限度保持不变; 对于耐热性更高的绝缘材料,温升限度可以提高,其提高的数值等于周围环境温度与 40°C 之差; 对于一般电机超过值不得大于 10°C,制造厂在产品使用说明书中规定出与上述极限温升相适应的允许负载。

电动机的输出功率可根据下列公式进行换算:

(1) 当  $+5\% \geq \frac{I_1 - I_c}{I_c} \geq -5\%$  时,只需考虑定子电流  $I_1$  变化的影响:

$$I_1 = \sqrt{\frac{\tau_1}{\tau_c}} I_c$$

(2) 当  $+20\% \geq \frac{I_1 - I_c}{I_c} \geq +5\%$ 。及  $-5\% \geq \frac{I_1 - I_c}{I_c} \geq -20\%$  时,应考虑  $I_1$  和定子绕组电阻  $R_1$  的共同变化的影响,按下式求得  $I_1$ :



$$\tau_e = \tau_1 \left( \frac{I_e}{I_1} \right)^2 \left( 1 + \frac{\tau_1 (I_e/I_1)^2 - \tau_1}{T + \tau_1 + t_0} \right)$$

式中： $I_1$ ——根据温升换算的电流(A)；

$I_e$ ——电动机额定电流(A)；

$\tau_1$ ——对应于  $I_1$  的温升( $^{\circ}\text{C}$ )；

$\tau_e$ ——对应于  $I_e$  的温升( $^{\circ}\text{C}$ )；

$T$ ——常数,铜导线为 234.5,铝导线为 225；

$t_0$ ——测试结束时的冷却介质温度( $^{\circ}\text{C}$ )。

根据电流和功率成正比的关系,由上述公式可得到换算后的电动机输出功率。

### 3. 电机绕组温度的测算

#### (1) 绕组温度的测定：

① 电阻法：用该法测得的绕组温度是平均温度。测试应尽可能在不断电的情况下进行。若在切断电源后测定,应将测得的结果修正到断电瞬间。对于一般中小型电机,如果第一点电阻值在断电后 20s 左右测得,其对应的温度将比断电瞬间的实际温度低  $3^{\circ}\text{C}$  左右。

绕组温升可按下式计算：

$$\tau = \frac{R_r - R_l}{R_l} (T + t_l) + t_l - t_0$$

式中： $\tau$ ——绕组温升( $^{\circ}\text{C}$ )

$R_r$ ——绕组在试验结束断电瞬间的热态电阻( $\Omega$ )；

$R_l$ ——绕组实际冷态下的电阻( $\Omega$ )；

$T$ ——常数,铜导线为 234.5；铝导线为 225；

$t_l$ ——绕组在实际冷态下的温度( $^{\circ}\text{C}$ )；

$t_0$ ——同前。

注意, $R_r$  与  $R_l$  必须在同一出线端上测量。

断电瞬间电阻值的修正：当绕组热态电阻是在切断电源后

表 5—30

三相异步电动机的最高允许温度

电动机的部分		A 级绝缘				E 级绝缘			
		最高允许温度 (°C)		最大允许温升 (°C)		最高允许温度 (°C)		最大允许温升 (°C)	
定子绕组		温度计法	电阻法	温度计法	电阻法	温度计法	电阻法	温度计法	电阻法
				95	100	55	60	105	115
转子绕组	绕线型	95	100	55	60	105	115	65	75
	鼠笼型	—	—	—	—	—	—	—	—
定子铁芯		100	—	60	—	115	—	75	—
滑 环		100	—	60	—	110	—	70	—
滑动轴承		80	—	40	—	80	—	40	—
滚动轴承		95	—	55	—	95	—	55	—

(周围环境温度为 +40°C)

B 级绝缘				F 级绝缘				H 级绝缘			
最高允许温度 (°C)		最大允许温升 (°C)		最高允许温度 (°C)		最大允许温升 (°C)		最高允许温度 (°C)		最大允许温升 (°C)	
温度计法	电阻法	温度计法	电阻法	温度计法	电阻法	温度计法	电阻法	温度计法	电阻法	温度计法	电阻法
110	120	70	80	125	140	85	100	145	165	105	125
110	120	70	80	125	140	85	100	145	165	105	125
—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
120	—	80	—	140	—	100	—	165	—	125	—
120	—	80	—	130	—	90	—	140	—	100	—
80	—	40	—	80	—	40	—	80	—	40	—
95	—	55	—	95	—	55	—	95	—	55	—

若干秒内测得时,根据停车后测得的电阻值  $R$  与对应的时间  $t$  作  $R = f(t)$  或  $I_g R = f(t)$  曲线,延长曲线交纵座标于  $R_r$  或  $I_g R_r$ 。 $R_r$  即为断电瞬间的热态电阻(图 5—31)。

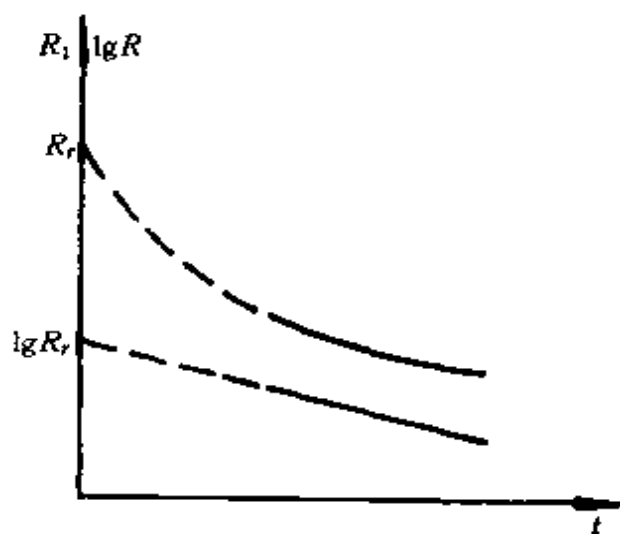


图 5—31. 电阻值的修正

② 温度计法:用该法测得的是被测点的表面温度。一般采用酒精温度计进行测试。

(2) 冷却介质温度的测定:当冷却介质是周围的空气时,用几只温度计放在电机周围距电机表面约 1 ~ 2m 处,温度计的球部与电机高度的一半处于同一平面上,取几只温度计读数的平均值。

对于采用强迫通风或闭路循环冷却系统的电机,测定位置设在电机进风口处。

(3) 温升的修正:温升试验时如定子电流  $I_1$  与额定电流  $I_n$  不同,应将测得的温升  $\tau$ ,按本节环境温度对电机性能影响的计算公式进行修正。

**例 5—12** 某电动机温升试验时测得定子电流  $I_1$  为

29A, 温升  $\tau$  为  $52^{\circ}\text{C}$ , 已知额定电流  $I_e$  为 30.3A, 试求额定功率时的温升是多少? (试验地点在海拔 2000m)。

解 由于  $\frac{I_1 - I_e}{I_e} = \frac{29 - 30.3}{30.3} = -4.3\% \geq -5\%$

所以可按下列式换算

$$\tau_e = \tau_1 \left( \frac{I_e}{I_1} \right)^2 = 52 \left( \frac{30.3}{29} \right)^2 = 56.7 (^{\circ}\text{C})$$

即额定功率时的温升为  $56.7^{\circ}\text{C}$ 。

在试验地点的海拔超过 1000m 时, 电机温升限度应按每超过 100m 增加  $0.5^{\circ}\text{C}$  计, 故上述温  $\tau$  经海拔修正后为

$$56.7 + \frac{2000 - 1000}{100} \times 0.5 = 61.7 (^{\circ}\text{C})$$

#### 4. 电机绝缘电阻的计算

电机的绝缘电阻, 包括绕组与绕组之间、绕组与机壳之间等的绝缘电阻。对于 500V 及以下的电机, 使用 500V 的兆欧表测试; 对于 500V 以上至 1000V 的电动机, 使用 1000V 的兆欧表; 对于 1000V 以上的电机, 使用 2500V 的兆欧表。

绝缘电阻要求: 每 1kV 电压不得低于  $1\text{M}\Omega$ ; 一般 220V 电动机的绝缘电阻应不低于  $0.22\text{M}\Omega$ ; 三相 380V 电动机不低于  $0.38\text{M}\Omega$ 。

(1) 热态绝缘电阻: 电机绕组的绝缘电阻, 随温度的变化而呈指数变化。按规定, 在接近工作温度下的电机绝缘电阻不得低于按下式计算的数值:

$$R_t = \frac{U_e}{1000 + \frac{P_e}{100}}$$

式中:  $R_t$ ——电机绝缘电阻 ( $\text{M}\Omega$ );

$U_e$ ——电机额定电压 (V);

$P_e$ ——电机额定功率 (kW)。

(2) 冷态电阻: 电机在干燥清洁的环境中, 在室温  $t^{\circ}\text{C}$  下的

绕组绝缘电阻可按下列公式进行估算：

热塑性绝缘  $R_t = R_r \cdot 2^{\frac{75-t}{10}}$

B级热固性绝缘  $R_t = R_r \cdot 1.6^{\frac{100-t}{10}}$

式中： $R_t$ ——在室温  $t^{\circ}\text{C}$  下的绕组绝缘电阻(MΩ)。

$R_r$ ——绕组热态绝缘电阻(MΩ)。

如，热塑性绝缘的三相 380 伏电动机， $R_r = 0.38\text{M}\Omega$ ，则  $R_t$   
 $= 0.38 \times 2^{\frac{75-t}{10}}$  (MΩ)

按上式算得的室温(冷态)绝缘电阻的合格值见表 5—31。

表 5—31 冷态绝缘电阻的合格值

$t(^{\circ}\text{C})$	0	5	10	15	20	25	30	35	40
$R_t(\text{M}\Omega)$	69	47	34	24	17	12	8.6	6	4.3

(3) 湿热带电机绕组绝缘电阻：

湿热带电机在室温及高湿高下测定的绕组绝缘电阻，不得低于按下列公式计算的数值：

中型封闭式电机  $R = 3 \frac{U_e}{1000}$  (MΩ)

中型开启式电机  $R = 2 \frac{U_e}{1000}$  (MΩ)

大型电机  $R = \frac{U_e}{1000 + \frac{P_e}{100}}$  (MΩ)

式中： $R$ ——绕组绝缘电阻(MΩ)

其它符号同前。

(4) 吸收比：标准规定吸收比  $K$  为 60s 时的绝缘电阻与 15s 时的绝缘电阻的比值。对于大型电机吸收电流衰减过程延长至

数分钟者,可采用 10min 绝缘电阻和 1min 绝缘电阻的比值。

对于前者,吸收比为

$$K = R_{60} / R_{15}$$

一般要求  $K > 1.3$ 。 $K$  值小,表示绝缘结构的情况不良。

#### 四、电压变动对电动机性能的影响

电压变化对电动机运行特性的影响在表 5—4 中已作了概括性的介绍。这里将作详细分析。

##### 1. 电压偏差对异步电动机性能的影响

(1) 对力能指标的影响,见表 5—32。

(2) 对起动电流  $I_q$ 、起动转矩  $M_q$  和最大转矩  $M_{max}$  的影响

$$I_q = K_u I_{qe}, \quad M_q = K_u^2 M_{qe}$$

$$M_{max} = K_u^2 M_{maxe}, \quad K_u = U_1 / U_e$$

式中: $K_u$ ——电压偏差率;

$U_1$ ——电动机出线端电压(V);

$I_{qe}$ 、 $M_{qe}$ 、 $M_{maxe}$ ——分别为对于额定电压  $U_e$  的起动电流,起动转矩和最大转矩(A, N·m)。

(3) 对空载电流和温升的影响:

$$I_0^1 = I_0 \frac{0.22 + 0.16K_u}{1 - 0.62K_u}$$

$$\tau = \tau_e \frac{0.47P_{Fe} + P_{Cu1} + P_{Cu2} + P_s}{0.47P_{Fee} + P_{Cue1} + P_{Cue2} + P_{se}}$$

式中: $I_0^1$ ——电压偏差率为  $K_u$  时电动机的空载电流(A);

其它符号同前。式中带有角码“e”者为额定条件下的值。

##### 2. 频率偏差对异步电动机性能的影响

当频率偏离额定值大于  $\pm 1\%$  时,可按表 5—33 所列公式估算。

表 5—32 电压偏差对异步电动机性能指标的影响

项 目	公 式	$\beta = 1$				$\beta = 0.7$			
		$K_u = 1$	1.05	0.95	0.9	$K_u = 1$	1.05	0.95	0.9
		总损耗 $\Sigma\Delta P$ (kW)	$\Sigma\Delta P = \left[ \left( \frac{1}{\eta_c} - 1 \right) P_c + P_0 \right] \frac{K_2^2}{\beta^2} + K_2^2(P_0 - P_c) + P_j$	1.816	1.745	1.908	2.025	1.176	1.164
效率 $\eta$ (%)	$\eta = \frac{\beta P_c}{\beta P_c + \Sigma\Delta P} \times 100$	89.2	89.56	88.72	88.11	89.92	90.02	89.76	89.48
定子电流 $I_1$ (A)	$I_1 = \sqrt{\frac{\beta^2}{K_2^2} (I_2^2 - I_0^2) + K_2^2 I_0^2}$	29.55	28.49	30.77	32.18	21.88	21.3	22.58	23.43
功率因数 $\cos\varphi$	$\cos\varphi = \frac{\beta P_c + \Sigma\Delta P}{\sqrt{3} K_u U_1 I_1} \times 10^{-3}$	0.865	0.85	0.878	0.893	0.811	0.792	0.829	0.845

注： $\beta$ —负载率  $\beta = P_c/P_e$ ；  $P_j$ —机械损耗(kW)；  $I_0$ —对应额定电压  $U_1$  时的空载电流(A)。



表 5-33 频率偏差对异步电动机性能的影响

项 目	公 式	$\beta = 1$			$\beta = 0.7$		
		$K_f = 1$	1.2	0.9	$K_f = 1$	1.2	0.9
同步转速 $n_1$ (r/min)	$n_1 = Km_e$	3000	3600	2700	3000	3600	2700
总损耗 $\Sigma\Delta P$ (kW)	$\Sigma\Delta P = \beta^2 K_f^2 \left[ \left( \frac{1}{\eta_e} - 1 \right) P_e - P_0 \right]$ $+ \frac{1}{2.5K_f - 1.5} (P_0 - P_f)$ $+ \frac{1}{2K_f - 1} P_f$	1.004	1.171	1.099	0.642	0.648	0.805
输出功率 $P_2$ (kW)	$P_2 = \beta K_f P_e$	7.5	9	6.75	5.25	6.3	4.725
效 率 $\eta$ (%)	$\eta = \frac{P_2}{P_2 + \Sigma\Delta P} \times 100$	88.19	88.49	86.0	89.1	90.67	85.44

(续表)

项目	公式	β = 1			β = 0.7		
		K <sub>f</sub> = 1	1.2	0.9	K <sub>f</sub> = 1	1.2	0.9
定子电流 I <sub>1</sub> (A)	$I_1 = \sqrt{\beta^2 K_f^2 (I_2^2 - I_3^2) + \left( \frac{I_0}{2.5 K_f - 1.5} \right)^2}$	14.27	16.58	14.4	10.37	11.68	11.38
功率因数 cosφ	$\cos\varphi = \frac{P_2 + \Sigma\Delta P}{\sqrt{3} U_e I_1 \times 10^{-3}}$	0.905	0.932	0.829	0.863	0.904	0.738
K <sub>Iq</sub>	$K_{Iq} = K_{Iqe} / K_f$	6.99	5.83	7.77			
K <sub>Mq</sub>	$K_{Mq} = K_{Mqe} / K_f^2$	2.44	1.41	3.35			
λ <sub>max</sub>	$\lambda_{max} = \lambda_e / K_f^2$	2.81	1.95	3.47			

注: K<sub>f</sub>—电源频率偏差率, K<sub>f</sub> = f/f<sub>e</sub> = f/50, n<sub>1e</sub>—额定同步转速, (r/min);

K<sub>Iqe</sub>—额定起电机电流倍数, K<sub>Iqe</sub> = I<sub>qe</sub>/I<sub>e</sub>; λ<sub>e</sub>—额定最大转矩倍数, λ<sub>e</sub> = M<sub>maxe</sub>/M<sub>e</sub>;

K<sub>Mqe</sub>—额定起电倍数, K<sub>Mqe</sub> = M<sub>qe</sub>/M<sub>e</sub>。

### 3. 电压不对称对异步电动机性能的影响

三相电压不对称时,可利用对称分量法将电压分解成正序、负序和零序分量。对于定子绕组为 $\Delta$ 形接法或为Y形接法但中点不接地时,零序电压对电动机运行一般影响不大;但负序电压将会使电动机的转矩降低,损耗增大,温升上升,影响电动机的寿命。所以,对三相电源的电压不平衡度有一定限制。

不对称电压的不平衡程度用不平衡率表示,即

$$\begin{aligned} \text{不平衡率} &= \frac{\text{负序分量}}{\text{正序分量}} \times 100\% \\ &= \frac{U_2}{U_1} \times 100\% \approx \frac{\text{最大电压} - \text{平均电压}}{\text{平均电压}} \times 100\% \end{aligned}$$

不对称电压将造成三相电流不对称,其电流不平衡率( $I_2/I_1$ )约为电压不平衡率的4~7倍(见表5—34)。

表5—34 电压不平衡对电动机电流不平衡的影响

电压不平衡(%)	满载时电流不平衡(%)
1	7~10
2	14~18
3	23~30

据统计,3.5%的不平衡电压使电动机损耗增加约20%。因此,电动机的标准规定,电动机的电源电压的负序分量不应超过正序分量的1%;电动机任意一相的空载电流,与三相空载电流平均值之差,不应超过平均值的10%。

电压不对称对Y系列电动机效率的影响,表5—35。

表 5-35 电压不对称对异步电动机性能的影响

项 目	估 算 公 式	$\beta = 1$			$\beta = 0.7$		
		$K_{bpu} = 1$			$K_{bpu} = 1$		
		1	2	3	1	2	3
负序电流与额定电流之比 $I_{1-}/I_e$	$I_{1-}/I_e = K_{Iq} K_{bpu} \times 10^{-2}$	0.0688	0.1367	0.2064	0.0688	0.1367	0.2064
总损耗 $\Sigma \Delta P$ (kW)	$\Sigma \Delta P = \left( 1 + \frac{0.8 I_{1-}}{I_e} \right)^2 \times \frac{\beta^2}{K_e^2} \left[ \left( \frac{1}{\eta_c} - 1 \right) P_c - P_0 \right] + P_0$	2.105	2.227	2.358	1.758	1.844	1.935
效 率 $\eta$ (%)	$\eta = \frac{\Sigma \Delta P}{\beta P_c + \Sigma \Delta P} \times 100$	87.69	87.07	86.42	85.66	85.06	84.43

注:  $K_{bpu}$ —电压不平衡率,  $K_{bpu} = \frac{U_{\max} - U_{\min}}{U_{\beta}} \times 100$ ;  $U_{\beta}$ —平均电压。

### 五、电动机寿命的预测

为了确保电动机长期安全可靠运行,必须在运行维护中对电动机的寿命进行预测,及时掌握电动机的状态,以便及时维护、大修,防止意外事故的发生。一台优质的电动机,在良好的维护条件下可以运行 20 ~ 30 年。但如果使用环境恶劣,维护不当,电动机寿命将大大降低。

电动机的寿命由老化损耗率和最低耐压水平决定。

#### 1. 老化损耗率计算电动机的寿命

总老化损耗率  $D_z$  可以分成电老化损耗率  $D_d$ 、机械老化损耗率  $D_i$ 、热老化损耗率  $D_r$  (见表 5-36) 和环境老化损耗率  $D_w$  四部分。如果不考虑各老化因素间的相互作用,则可用下式估算电动机的寿命:

$$D_z = D_d + D_i + D_r + D_w$$

其中  $D_d = \Sigma(t/t_d)$ ;  $D_i = \Sigma(N'/N)$

$$D_r = \Sigma(t/t_r); \quad D_w = \Sigma(t/t_w)$$

式中:  $t$ ——实际运行时间;

$t_d, t_r, t_w$ ——分别对电老化、热老化和环境老化到达寿命极限水平的的时间,单位与  $t$  相同;

$N'$ ——实际起动停止次数;

$N$ ——到达寿命极限水平的起动停止次数。

当  $D_z$  与电动机允许老化损耗率  $D_{uz}$  相等时,则认为电动机寿命終了,一般  $D_{uz} = 30\%$ 。

可见,要保证电动安全运行,第一个条件是要满足:  $D_z < D_{uz} = 30\%$ 。

#### 2. 最低耐压水平估计电动机的寿命

最低耐压水平,即要满足  $(2E + 3000V) \times 0.65$  交流耐压 1min。绝缘水平低于 2 倍安全运行水平时应考虑予以更新。

表 5—36 老化损耗率

电动机绝缘	电老化(%)	机械老化(%)	热老化(%)
沥青	1.8 ~ 5.4	6 ~ 12	0.2 ~ 0.3
聚脂	0.9 ~ 1.8	3 ~ 4	0.1
环氧树脂	0.3 ~ 0.9	1 ~ 2	0.05 ~ 0.33

注：电老化、热老化为每 8760 小时的老化损耗率，机械老化为每起动停止 1000 次时的老化损耗率。

电动机绕组可用绝缘击穿电压  $U_{jc}$  来表示寿命是否终了。

即

$$U_{jc} = 100(1 - D_d)(1 - D_j)(1 - D_r)(1 - D_w)\%$$

或

$$U_{jc} = (1 - a\tau)(1 - bN),$$

式中： $U_{jc}$ ——绝缘击穿电压，初期值作对 100，用 % 表示，即残余击穿电压  $U_x$  与初期击穿电压  $U_0$  之比；

$a$ ——年度总损耗常数，对聚脂绝缘为  $7 \times 10^{-3}$ ；

$\tau$ ——实际运行年数；

$b$ ——起动停止损耗常数，对聚脂绝缘为  $8 \times 10^{-5}$ 。

当  $U_{jc} < 70\%$  时就应考虑绕组更新。

用上述方法预测电动机寿命的准确性，取决于所记录的运行数据的正确性。因此，做好电动机运行日志的记录，非常重要。

**例 5—13** 一台 10kW、380V 环氧聚脂绝缘的电动机，在良好的环境下正常运行 10 年，共起动停止 800 次，试预测其寿命是否终了。

**解** (1) 按表 5—36 取中间值，则

$$\begin{aligned} D_z &= D_d + D_j + D_r + D_w = 0.6\% \times 10 \\ &\quad + 1.5\% \times \frac{800}{1000} + 0.19\% \times 10 + 0 \times 10 \\ &= 9.2\% < D_{wr} (= 30\%) \end{aligned}$$

(2) 绕组击穿电压

$$\begin{aligned}
 U_{\kappa} &= 100(1 - D_d)(1 - D_j)(1 - D_r)(1 - D_w)\% \\
 &= 100(1 - 0.6\% \times 10) \times \left(1 - 1.5\% \times \frac{800}{1000}\right) \\
 &\quad \times (1 - 0.19\% \times 10) \times (1 - 0)\% = 93.6\% > 70\%
 \end{aligned}$$

因此,该电机可继续使用。

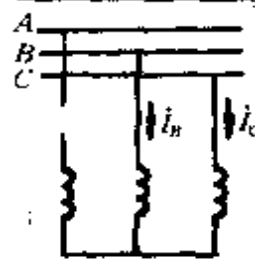
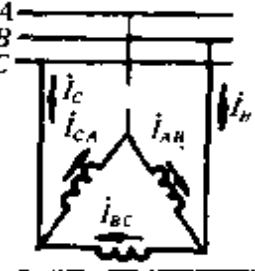
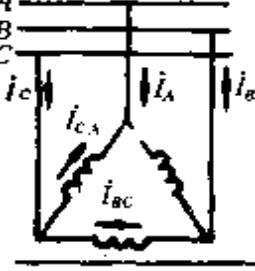
### 六、电动机断相运行时各绕组电流的计算

电动机在断相状态下运行,电压、电流、转矩都将变化。电动机各相绕组电流变化情况,见表 5—37。

如在运转中断一相,则电动机的允许功率约为其额定功率  $P_e$  的 57%。因为这时输入功率约  $U_e I_e \cos\varphi$ ,

$$\frac{U_e I_e \cos\varphi}{\sqrt{3} U_e I_e \cos\varphi} = 57\%。$$

表 5—37 电动机断相时各相绕组的电流

回路情况	起动时断相	运行中断相	
		100% 负载时	低负载时
	$I_B = I_C = 0.866I_e$ $I_A = 0$ $M_q = 0$	$I_B = I_C = 1.73I_e$ $I_A = 0$	58% 额定负载时: $I_B = I_C = I_e$ $I_A = 0$
	$I_B = I_C = 0.866I_e$ $I_A = 0$ $I_{BC} = I_{qx}$ $I_{AB} = I_{CA} = 0.5I_{qx}$ $M_q = 0$	$I_B = I_C = 1.73I_e$ $I_A = 0$ $I_{BC} = 2I_{ex}$ $I_{AB} = I_{CA} = I_{ex}$	58% 额定负载时: $I_B = I_C = I_e$ $I_A = 0$ $I_{BC} = 1.16I_{ex}$ $I_{AB} = I_{CA} = 0.56I_{ex}$
	$I_A = I_B = 0.58I_e$ $I_C = I_q$ $I_{BC} = I_{CA} = I_{qx}$ $I_{AB} = 0$ $M_q \neq 0$	$I_A = I_B = 0.866I_e$ $I_C = 1.5I_e$ $I_{BC} = I_{CA} = 1.5I_{ex}$ $I_{AB} = 0$	67% 额定负载时: $I_A = I_B = 0.58I_e$ $I_C = I_e$ $I_{BC} = I_{CA} = I_{ex}$ $I_{AB} = 0$

注： $I_q$ —正常起动时线电流；  $I_{qx}$ —正常起动时相电流；  
 $I_e$ —电动机额定线电流；  $I_{ex}$ —电动机额定相电流；  
 $M_q$ —起动转矩。

### 七、三相异步电动机改为单相使用时电容器的计算

在只有单相电源的场合，可以利用并联电容的方法，将三相异步电动机改为单相使用，该方法只适用于容量较小的电动机。接线如图 5—32 所示。图中  $C_x$  为工作电容， $C_q$  为起动电容。

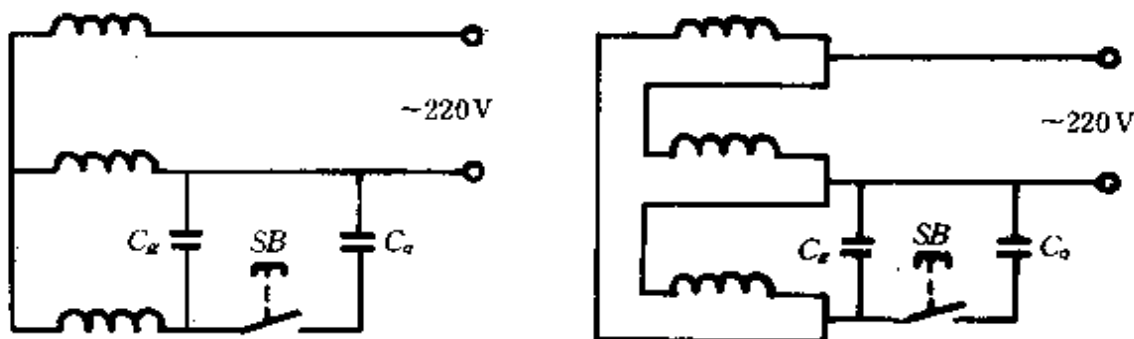


图 5—32 三相电动机改单相使用接线图

工作电容器的电容量按下式计算：

$$C_x = \frac{1950I_e}{U \cos\varphi}$$

式中： $C_x$ ——工作电容器的电容量( $\mu\text{F}$ )；

$I_e$ ——电动机的额定电流(A)；

$U$ ——单相电源电压(V)；

$\cos\varphi$ ——功率因数。

选用接近所计算值的标准电容器。

起动电容器的电容量  $C_q$  可根据电动机起动负载而定，一般为工作电容量的 1 ~ 4 倍，即

$$C_q = (1 \sim 4)C_x$$

实际上 1kW 以下的电动机可以不加起动电容器，只要把工作电容器的电容量适当加大一些即可。一般以每 0.1kW 用工作



电容器约  $6.5\mu\text{F}$ ，耐压  $220\text{V}$ 。

### 八、改变电动机绕组接法的简易计算

在修理电动机时，可能选择不到合适的绕组线径，可通过改变电动机定子绕组的接法来解决（图 5—33），而电动机的原有性能保持不变。

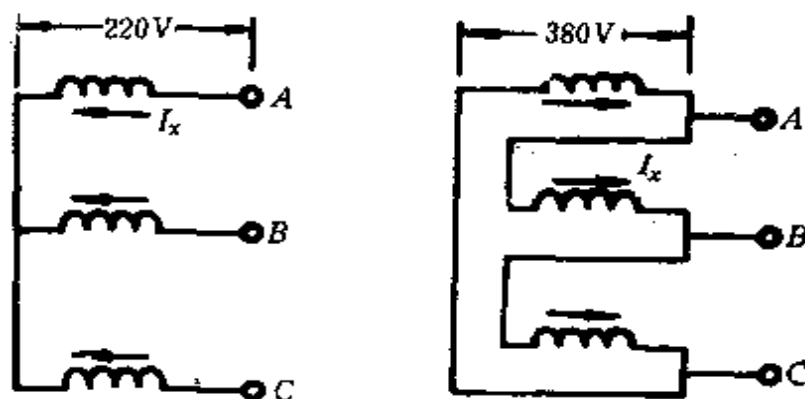


图 5—33 定子绕组改接图

在改变电动机绕组接法时，其绕组线圈的导线截面  $q$  和绕组每只线圈的匝数  $W$ ，可按下列公式计算：

$$W_{\Delta} = \sqrt{3} W_Y, \quad q_{\Delta} = q_Y / \sqrt{3}$$

式中： $W_{\Delta}$ 、 $W_Y$ ——电动机绕组为  $\Delta$  和  $Y$  接法时线圈的匝数；

$q_{\Delta}$ 、 $q_Y$ ——电动机绕组为  $\Delta$  和  $Y$  接法时线圈导线截面 ( $\text{mm}^2$ )。

**例 5—14** 有一台  $\text{JQ}_2-41-6$  型、 $3\text{kW}$  的电动机，绕组导线直径为  $1.20\text{mm}$ ，并绕根数为 1 根，线圈匝数为 40 匝，电压  $380\text{V}$ ， $Y$  接法，现将它改为  $\Delta$  接法，试计算导线直径和线圈匝数。

**解** 由  $W_Y = 40$  匝，得

$$q_Y = \frac{\pi}{4} d_Y^2 = \frac{\pi}{4} \times 1.20^2 = 1.13(\text{mm}^2)$$

故  $W_\Delta = \sqrt{3} W_Y = \sqrt{3} \times 40 = 69.3$  匝, 取 69 匝

$$q_\Delta = q_Y / \sqrt{3} = 1.13 / \sqrt{3} = 0.65(\text{mm}^2)$$

$$d_\Delta = \sqrt{4q_\Delta/\pi} = \sqrt{4 \times 0.65/\pi} = 0.91(\text{mm})$$

可选用标称直径为 0.93mm 的导线。

有了绕组导线直径和线圈匝数两个参数, 就可方便地改变电动机绕组的接法。

### 九、单相电容电动机的电容量的简易估算

在检修 220V 单相电容电动机时, 会遇到绕组重绕或改绕后线径变更, 以及电容器损坏而电容量不清等情况, 此时可以用以下方法进行简易估算电容量:

$$C = 8I_{qe}, \quad I_{qe} = jq$$

式中:  $C$ ——电容量( $\mu\text{F}$ );

$I_{qe}$ ——起动绕组额定电流(A);

$j$ ——起动绕组导线电流密度, 一般可取  $5 \sim 7\text{A}/\text{mm}^2$ ;

$q$ ——起动绕组导线截面( $\text{mm}^2$ )。

**例 5—15** 有一台 1400mm 吊扇, 已知起动绕组采用  $\phi 0.21$  的导线, 试估算电容量。

**解** 起动绕组导线截面为

$$q = \frac{\pi}{4} d^2 = \frac{\pi}{4} \times 0.21^2 = 0.0346(\text{mm}^2)$$

取电流密度为  $j = 7\text{A}/\text{mm}^2$ , 则

$$I_{qe} = jq = 7 \times 0.0346 = 0.242(\text{A})$$

因此, 电容量为

$$C = 8I_{qe} = 8 \times 0.242 = 1.936(\mu\text{F})$$

通过实际调试, 最后确定为  $2\mu\text{F}$ 。

实践表明, 估算值与实际调试值基本相符。在调试过程中只

要掌握电容电动机负载时启动绕组电流略有下降而运行绕组电流随负载增大而上升的原则,适当调整启动电容量,就可得到圆形旋转磁场。

## 第六节 电动机启动、制动和调速的计算

### 一、异步电动机直接启动功率的确定

鼠笼型异步电动机能否直接启动,取决于下列条件:

1. 电动机自身要允许直接启动。对于惯性较大,启动时间较长或启动频繁的电动机,过大的启动电流会使电动机老化,甚至损坏。

2. 所带动的机械设备能承受直接启动时的冲击转矩。

3. 电动机直接启动时所造成的电网电压下降不致影响电网上其它设备的正常运行。一般情况下要求经常启动的电动机引起的电网压降不大于 10%;不经常启动的电动机不大于 15%;当能保证生产机械要求的启动转矩,且在网络中引起的电压波动不致破坏其它电气设备工作时,电动机引起的电网压降允许为 20% 或更大;由一台变压器供电给许多不同特性的负载,而有些负载要求电压变动小时,则允许直接启动的异步电动机的功率就要小一些。

4. 电动机启动不通过于频繁。因为频繁启动会给同一电网上的其它负载带来较大影响。

因此,电动机能否直接启动,须综合考虑上述因素,不宜简单地利用下式进行判定(许多书中介绍了此公式):

$$\frac{I_s}{I_e} \leq \frac{3}{4} + \frac{\text{供电变压器的容量(kVA)}}{4 \times \text{电动机的功率(kW)}}$$

建议参考表 5—38 和表 5—39 予以确定。

表 5—38 按电源容量估算鼠笼型异步电动机直接起动时的功率

电源情况	允许直接起动的鼠笼型电动机最大功率(kW)
小容量发电厂	每 1kVA 发电机容量为 0.1 ~ 0.12kW
变电所	经常起动时,不大于变压器容量的 20%
	不经常起动时,不大于变压器容量的 30%
高压线路	不超过电动机连接线路上的短路容量的 3%
变压器—电动机组	电动机功率不大于变压器容量的 80%

表 5—39 6(10)/0.4kV 变压器允许直接起动的鼠笼型电动机最大功率

变压器供电的其它负载 $S_j$ 和功率因数 $\cos\varphi$	起动时允许电压降 (%)	供电变压器容量 $S_0$ (kVA)					
		100	200	365	630	800	1000
		起动鼠笼型电动机最大功率 (kW)					
$S_j = 0.5S_0$ $\cos\varphi = 0.7$	10	22	45	90	132	160	220
	15	30	55	110	200	250	280
$S_j = 0.6S_0$ $\cos\varphi = 0.8$	10	18.5	30	90	110	132	185
	15	30	55	110	200	250	280

注:所列数据系指电动机与变压器低压母线直接相连时的情况。

## 二、异步电动机降压起动方式的选择

如果三相异步电动机不允许直接起动,就应该选择适当方式降压起动。所采取的降压起动方式,必须使电动机的起动转矩大于负载的阻力矩。因此,电动机所拖动负载的性质,是选择降压起动方式的依据。根据一些负载的性质选择降压起动方式,见表 5—40。各种起动器特性及优缺点比较,见表 5—41。

表 5—40 启动方式选择表

负载性质	对启动的要求		负载举例
	限制启动电流	减小启动时对机械的冲击	
无载或轻载启动	星三角形减压启动 电阻或电抗减压启动		车床、钻床、铣床、镗床、齿轮加工机床、圆锯、带锯等； 带有离合器的卷扬机、绞盘和带卸料机的破碎机； 带离合器的普通纺织和工业机械； 电动发电机组
负载转矩与转速成平方关系的负载(风机负载)	延边三角形减压启动 自耦减压启动 电抗或阻抗减压启动		离心泵、叶轮泵、螺旋泵、轴流泵等； 离心式鼓风机和压缩机、轴流式风扇和压缩机等
重力负载		电阻、电抗或阻抗减压启动	卷扬机、倾斜式传送带类机械； 升降机、自动扶梯类机械
摩擦负载	延边三角形减压启动 电阻或电抗减压启动	电阻、电抗或阻抗减压启动	水平传送带、活动台车、粉碎机、混砂机、压延机和电动门等
阻力矩小的惯性负载	三角形减压启动 延边三角形减压启动 自耦减压启动 电抗减压启动		离心式分离机、脱水机、曲柄式压力机等(限于阻力矩小的机械)
恒转矩负载	延边三角形减压启动 电阻或电抗减压启动	电阻或电抗减压启动	往复泵和压缩机、罗茨鼓风机、容积泵、挤压机
恒重负载		电阻、电抗或阻抗减压启动	织机、卷纸机、夹送辊、长距离皮带输送机、链式输送机

表 5—41

各种起动器起动特性

项 目		全压直接 起动器	减 压			
			星三角 起动器	电抗减压起动器		
				抽 头		
				50%	65%	80%
起 动 特 性	起动时电动机 端电压	$U_e$	$0.58U_e$ (相电压)	$0.5U_e$	$0.65U_e$	$0.8U_e$
	起动时电动机 电流	$I_q$	$0.33I_q$	$0.5I_q$	$0.65I_q$	$0.8I_q$
	起动转矩	$M_q$	$0.33M_q$	$0.25M_q$	$0.42M_q$	$0.64M_q$
优 缺 点 比 较	起动过程中电 动机端电压	恒定	恒定	随速度增加而较快加大		
	起动电流	最大	小	在相同的起动电流下起动转矩较 自耦减压起动器小		
	起动转矩	最大	小			
	起还对电源电 压的影响	最大	小	一般		
	起动时对机械 的冲击	最大	小	较小		
	起动过程中力 矩变化情况	得到充分 加速力矩	力矩增 加不大	力矩增加较快		
	最大转矩	大	较小	较大		
	电动机起动时 间	最短	较长	较短		
	线路复杂性	最简单	简单	较复杂		
价格	最便宜	便宜	较贵			

及优缺点比较

起 动 器						
电阻减压起动器			自耦减压起动器			延边 星三角 起动器
抽 头			抽 头			
50%	65%	80%	50%	65%	80%	
$0.5U_e$	$0.65U_e$	$0.8U_e$	$0.5U_e$	$0.65U_e$	$0.8U_e$	$(0.7 \sim 0.8)U_e$
$0.5I_q$	$0.65I_q$	$0.8I_q$	$0.5I_q$	$0.65I_q$	$0.8I_q$	$\sim 0.7I_q$
$0.25M_q$	$0.42M_q$	$0.64M_q$	$0.25M_q$	$0.42M_q$	$0.64M_q$	$\sim 0.49M_q$
随速度增加而稍加大			不 变			恒定
在相同的起动电流下起动转矩较自耦减压起动器小			即使起动电流较小也能获得较大的起动转矩			中等 较小
一 般			较 小			较小
较 小			较 小			较小
随速度增加而稍加大			力矩有增加			力矩有 增加
一 般			一 般			一般
较 长			较 短			较短
较复杂			最复杂			复杂
较 贵			最 贵			一般



### 三、磁力起动器的选择

磁力起动器由交流接触器和热继电器组成,是直接起动电动机的电器,它具有失压和过载保护功能。

#### 1. QC10 系列磁力起动器的技术参数(表 5—42)

表 5—42 QC10 系列磁力起动器的技术参数

起动器型号	额定电流 (A)	配用接触 器型号 CJ10 系列	配用热继 电器型号 JR15 系列	可控鼠笼型三相异步电 动机最大功率(kW)			
				127V	220V	380V	500V
QC10--1	5	5	10	1.1	1.2	2.2	2.2
QC10--2	10	10	20	1.5	2.2	4	4
QC10—3	20	20	40	3	5.5	10	10
QC10—4	40	40	40	6	11	20	26
QC10—5	60	60	100	9	17	30	40
QC10—6	100	100	100	17	29	50	
QC10--7	150	150	150	25	47	75	

#### 2. 磁力起动器的主要技术性能

(1) 机械寿命:在额定条件下不低于 300 万次,电寿命不低于 60 万次,其热继电器的寿命不低于 1000 次过载动作。

(2) 操作频率:

① 在额定条件下控制鼠笼型异步电动机,正常起动功率因数为 0.35 ~ 0.4,TD = 40%,额定电压时接通 6 倍额定电流,17% 额定电压下分断额定电流,其操作频率不低于 600 次/h(不带热继电器);在减轻负载时可提高到 1200 次/h。

② 一般在带热继电器时,不应超过 60 次/h。

(3) 起动器的接通和分断能力:与组成起动器的交流接触



器相同；在工作环境恶劣的场合，宜适量降低。

(4) 具有过载保护特性：带热继电器的启动器，允许过载不超过 5%（视电动机的过载能力而定），一般过载 20% 时，在 20min 内即动作。

#### 四、星—三角启动器的选择

启动器在启动时将电动机的定子绕组接成星形，正常运转时接成三角形，以减小启动电流。

##### 1. 星—三角启动器原理（图 5—34）

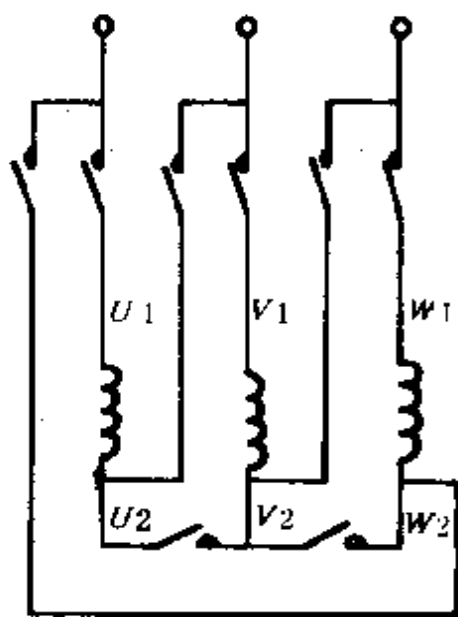


图 5—34 星—三角启动器原理接线图

(1) 绕组接成星形启动时：

$$U_Y = \frac{U}{\sqrt{3}}, \quad I_Y = I_{xY} = \frac{U_Y}{Z} = \frac{U}{\sqrt{3}Z}$$

式中： $U$ ——三相电源线电压(V)；

$U_Y$ ——电动机绕组接成 Y 形的相电压(V)；

$I_Y, I_{xY}$ ——电动机绕组接成 Y 形的线电流和启动相电流；

$Z$ ——电动机启动时的一相等效阻抗( $\Omega$ )。

(2) 绕组接成三角形启动时：

$$U_{\Delta} = U, I_{\Delta} = \sqrt{3} I_{r\Delta} = \frac{\sqrt{3} U_{\Delta}}{Z} = \frac{\sqrt{3} U}{Z}$$

式中： $U_{\Delta}$ ——电动机绕组接成 $\Delta$ 形时的相电压(V)；

$I_{\Delta}, I_{r\Delta}$ ——电动机绕组接成 $\Delta$ 形时的线电流和起动相电流(A)。

$$\text{由此得 } \frac{I_Y}{I_{\Delta}} = \frac{\frac{U}{\sqrt{3}Z}}{\frac{\sqrt{3}U}{Z}} = \frac{1}{3}$$

可见,电动机绕组接成Y形起动时的电流要比接成 $\Delta$ 形时的起动电流小 $2/3$ ,从而有效地限制起动电流。但

$$M_Y \propto U_Y^2 = U^2/3, \quad M_{\Delta} \propto U_{\Delta}^2 = U^2$$

故  $M_Y = M_{\Delta}/3$

可见,起动转矩却随之减少到 $1/3$ 。

星—三角起动器多用于起动设备的转矩不大于电动机起动转矩的 $1/3$ 、功率不大于 $125\text{kW}$ 的三相鼠笼型异步电动机。

## 2. QX4系列自动星三角起动器的技术数据(表5—43)

**例 5—16** 有一台Y160L—4型、 $15\text{kW}$ 电动机,其额定参数如下: $P_e$ 为 $15\text{kW}$ ,转速 $n_e$ 为 $1460\text{r/min}$ ,电压 $220/380\text{V}$ ,效率 $\eta_e$ 为 $0.88$ ,功率因数 $\cos\varphi_e$ 为 $0.85$ ,起动转矩与额定转矩之比 $M_q/M_e$ 为 $2.2$ ,起动电流与额定电流之比 $I_q/I_e$ 为 $7.0$ ,试求:

(1) 额定电流;

(2) 用星三角起动时起动电流和起动转矩;

(3) 当负载转矩为额定转矩的 $80\%$ 和 $40\%$ 时,电动机能否起动?

表 5—43 QX4 系列自动 Y—Δ 起动器的技术数据

起动器型号	控制功率 (kW)	额定电压 (V)	额定电流 (A)	热元件整定 电流 (A)	延时调节 范围 (s)	反复短时工 作操作频率 (次/h)
QX4—14	13	500	26	15	11	30
	17	380	33	19	13	30
QX4—30	22	500	42.5	25	15	30
	30	380	58	34	17	30
QX4—55	40	500	77	45	20	30
	55	380	105	61	24	30
QX4—75	75	380	142	85	30	30
QX4—125	125	380	260	100 ~ 160	14 ~ 60	30

解 (1) 额定电流为

$$I_e = \frac{P_e \times 10^3}{\sqrt{3} U_e \cos \varphi_e \eta_e} = \frac{15 \times 10^3}{\sqrt{3} \times 380 \times 0.85 \times 0.88} = 30.2(\text{A})$$

(2) 设 Y 接线和 Δ 接线时的起动电流和起动转矩分别为  $I_{qY}$ 、 $I_{q\Delta}$  和  $M_{qY}$ 、 $M_{q\Delta}$ ，则

$$I_{q\Delta} = 7I_e = 7 \times 30.2 = 211.4(\text{A})$$

$$I_{qY} = 1/3 I_{q\Delta} = 1/3 \times 211.4 = 70.5(\text{A})$$

电动机的额定转矩为

$$M_e = \frac{9555 P_e}{n_e} = \frac{9555 \times 15}{1460} = 98.2(\text{N} \cdot \text{m})$$

$$M_{q\Delta} = 2.2M_e = 2.2 \times 98.2 = 216(\text{N} \cdot \text{m})$$

$$M_{qY} = 1/3M_{q\Delta} = 1/3 \times 216 = 72(\text{N} \cdot \text{m})$$

(3) 当负载转矩为额定转矩的 80% 时的负载转矩为

$$M_x = 0.8M_e = 0.8 \times 98.2 = 78.6(\text{N} \cdot \text{m}) > M_{qY}$$

所以不能起动。

当负载转矩为额定转矩的 40% 时的负载转矩为

$$M_x = 0.4M_e = 0.4 \times 98.2 = 39.3(\text{N} \cdot \text{m}) < M_{qY}$$

所以能起动。

### 3. 起动时间的计算

星—三角法或自耦变压器法起动异步电动机时,从起动到切换为全电压运行的时间,可由下式计算:

$$t = \frac{\pi n J}{30 M_q}$$

式中: $t$ —— 起动时间(s);

$n$ —— 切换终止时的电动机转速,一般取  $n = 0.7 \sim 0.8n_e$  (r/min);

$n_e$ —— 电动机额定转速 (r/min);

$J$ —— 转动惯量(包括电动机和负载的总转动惯量) ( $\text{N} \cdot \text{m}^2$ );

$M_q$ —— 平均起动转矩( $\text{N} \cdot \text{m}$ ),  $M_q = 0.45 \sim 0.5(M_s + M_{\max})$ ;

$M_s$ —— 转差率  $s = 1$  时的起动转矩( $\text{N} \cdot \text{m}$ );

$M_{\max}$ —— 电动机的最大转矩( $\text{N} \cdot \text{m}$ )。

$M_s$  和  $M_{\max}$  均为电动机在额定工况下的数据。

## 五、自耦减压起动器的选择与计算

### 1. 自耦减压起动器的选择

自耦减压启动器是利用自耦变压器降低电源电压，以减小启动电流，同时还能通过选择自耦变压器的不同抽头改变启动电流并达到改变启动转矩的目的。通常用于控制 320kW 以下的三相鼠笼型异步电动机作不频繁启动、停止之用，具有过载和失压保护功能，其原理接线如图 5—35 所示。

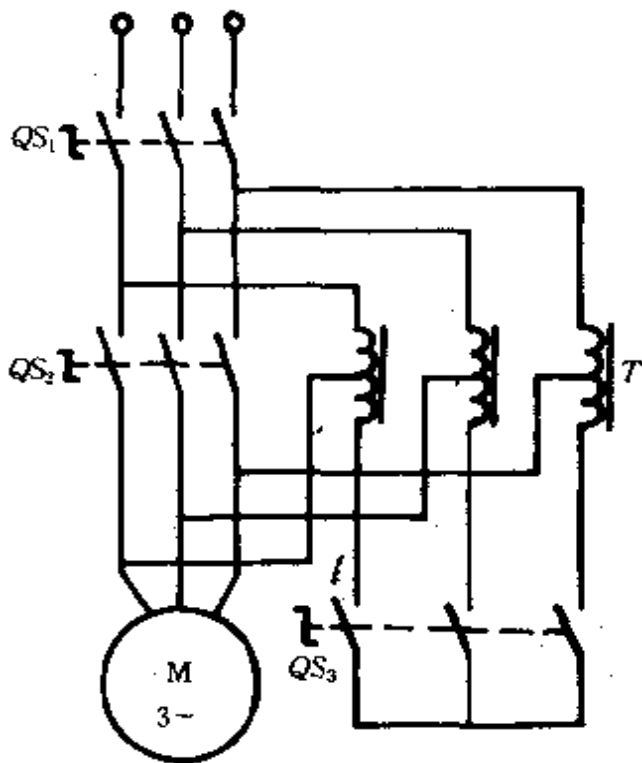


图 5—35 自耦减压启动器原理接线图

自耦减压启动器的启动电流和启动转矩有如下关系：

$$I_{1q} = k^2 I_{qe}, \quad M_q = k^2 M_{qe}$$

式中： $k$ ——自耦变压器的变比， $k = U_2/U_1 < 1$ ；

$I_{1q}$ ——降压启动时自耦变压器的一次侧电流(A)；

$I_{qe}$ ——在额定电压下的启动电流(A)；

$M_q$ ——降压启动时电动机的启动转矩(N·m)；

$M_{qe}$ ——在额定电压下的启动转矩(N·m)。

常用自耦减压启动器的主要技术数据见表 5—44，正常启动条件见表 5—45。

表 5—44 常用自耦减压起动器的技术数据

型 号	额定电压 (V)	额定电流 (A)	控制电动机功率 (380V 时) (kW)	起动时间 (s)
QJ2—75	380	75	40	6
QJ2—150	380	150	75	6
QJ2—200	380	200	100	6
QJ2—300	380	300	130	6
QJ3—40	380	40	10、15、20	30
QJ3—80	380	80	22、28、40	40
QJ3—150	380	150	55、75	60

表 5—45 自耦减压起动器正常操作条件

接 通 条 件			分 断 条 件		
电压(V)	电流(A)	cosφ	电压(V)	电流(A)	cosφ
380	$4.5I_e$	0.4	$380 \times 0.16$	$I_e$	0.4

自耦减压起动器的机械寿命,手动和自动式为10000次,电磁式可达100000次;电寿命在表5—45规定的操作条件下应不少于上述机械寿命的二分之一。其通电间隔为60s,通电时间不超过0.3s。

起动器主触头的通断能力,在电压为额定值的105%、cosφ不大于0.4时,能承受8倍额定电流20次接通与分断,每次时间间隔为30s,通电时间不大于0.5s,之后仍能继续工作。

启动自耦变压器为短时工作制,当电动机接在 65% 或 80% 额定电压比抽头时,其连续负载时间应符合表 5—46 的规定。如再次承受负载时,需冷却 4h 以上。

表 5—46 自耦减压启动器承载时间

可供启动的电动机额定功率(kW)	一次或数次连续负载时间的总和(s)
10 ~ 13	30
17 ~ 30	40
40 ~ 75	60
100 ~ 125	80
132 ~ 320	100

## 2. 启动自耦变压器的计算

自耦变压器可以启动单台电动机,也可以用于启动电动机群。

启动自耦变压器的容量按下列两种方法计算。

(1) 方法一:

$$S_b = \frac{S_{qd} t_q n}{T}$$

$$S_{qd} = K S_c \left( \frac{U_{qd}}{U_e} \right)^2$$

式中:  $S_b$  —— 自耦变压器容量(kVA);

$t_q$  —— 电动机启动时间(min),一般按一次启动 0.2min 计;

$n$  —— 电动机启动次数,如果有  $N$  台连续启动,每台按二次计,则  $n = 2N$ ;

$T$  —— 设计启动自耦变压器时,规定的一次或数次连续启动的最大启动时间,不同类型时  $T$  为 0.5 ~ 2min,

一般定型的  $T$  为 2min;

$S_{qd}$  —— 电动机起动功率(kVA),若为电动机群,则指电动机群的起动功率平均值;

$K$  —— 电动机全压起动时的电流倍数;

$U_{qd}$  —— 电动机起动电压(V);

$U_e$  —— 电动机额定电压(V);

$S_e$  —— 电动机额定功率(kVA),

$$S_e \approx \sqrt{3} U_e I_e \times 10^{-3};$$

$I_e$  —— 电动机额定电流(A)。

按上式计算的起动自耦变压器的功率  $S_b$  是指其短时(一般设 2min)的工作容量,并非指起动器铭牌上标的被控电动机的功率。例如, QJ3—22 型的自耦减压起动器中的自耦变压器,  $T = 2\text{min}$ 。Y180L—4 型 22kW 电动机的额定容量  $S_e = \sqrt{3} U_e I_e \times 10^{-3} = \sqrt{3} \times 380 \times 42.5 \times 10^{-3} = 27.8\text{kVA}$ ,  $K = 5$ , 则自耦变压器在 65% 抽头并起动时间为 2min 时,自身功率应为  $S_b = S_{qd} = K S_e \left( \frac{65}{100} \right)^2 = 5 \times 27.8 \times 0.432 = 60(\text{kVA})$ 。

(2) 方法二:根据实际的电动机功率及起动时间和次数,按定型补偿器铭牌标的被控电动机额定功率(若为电动机群,则指电动机群的功率平均值)  $P_e$  来选取相应的自耦变压器。这时自耦变压器的额定功率可近似地按下式计算:

$$P_b = \frac{P_e t_q n}{T}$$

式中:  $P_b$  —— 自耦变压器额定功率(kW);

其它符号同前。

**例 5-17** 四台 JSL—128—8 型、155kW 电动机公用一台补偿起动器,  $U_e$  为 380V,  $I_e$  为 294A, 全压起动时电流倍数  $K$  为 5.3 倍,自耦变压器选用 65% 的抽头,起动时间  $t_q$  为 0.3min。



设四台电动机连续启动,每台按两次计。试选择自耦变压器的功率。

**解** 电动机额定容量为

$$S_e \approx \sqrt{3} U_e I_e \times 10^{-3} = \sqrt{3} \times 380 \times 294 \\ = 193.5(\text{kVA})$$

电动机启动容量为

$$S_{qb} = K S_e \left( \frac{U_{qd}}{U_e} \right)^2 = 5.3 \times 193.5 \times 0.65^2 \\ = 433.3(\text{kVA})$$

启动自耦变压器功率为

$$S_b = \frac{S_{qd} t_{qn}}{T} = \frac{433.3 \times 0.3 \times (4 \times 2)}{2} = 520(\text{kVA})$$

选取相近或稍大的定型补偿器中的自耦变压器:GTZ5302—53A3,190kW 补偿器中的自耦变压器,其自身容量为  $S_b = S_{qa} = K S_e \left( \frac{65}{100} \right)^2 = 5 \times 236 \times 0.432 \approx 500(\text{kVA})$ 。

若按下式估算,则

$$P_b = \frac{P_e t_{qn}}{T} = \frac{155 \times 0.3 \times (4 \times 2)}{2} \approx 186(\text{kW})$$

因此,可选取 190kW 电动机所用的自耦变压器。

## 六、延边三角启动法的计算

1. 不同抽头下,延边三角形接法(简写“Δ”接法)和 Δ 接法的电压、电流和启动转矩的关系

$$1:1 \text{ 时 } U'_x \approx \frac{2}{3} U_x; \quad I'_q \approx 0.5 I_q; \quad M'_q \approx 0.25 M_q$$

$$1:2 \text{ 时 } U'_x \approx \frac{3}{4} U_x; \quad I'_q \approx 0.6 I_q; \quad M'_q \approx 0.36 M_q$$

$$1:3 \text{ 时 } U'_x \approx \frac{4}{5} U_x; \quad I'_q \approx 0.68 I_q; \quad M'_q \approx 0.46 M_q$$

式中:  $U'_x$ 、 $I'_q$ 、 $M'_q$ ——分别为 Δ 接法的相电压、启动电流和启动转矩;

$U_x, I_q, M_q$ ——分别为  $\Delta$  接法的相电压、起动电流和起动转矩。

2. 延边三角形与自耦变压器起动的比较(表 5-47)

表 5-47 延边三角形与自耦变压器起动比较

型 号	起 动 方 法	项 目			
		$I_q$ (A)	$I_q/I_{mq}$ (%)	$M_q$ (N·m)	$M_q/M_{mq}$ (%)
JO <sub>2</sub> -52-2 10 kW	全压起动	122		60.8	
	自耦变压器 60%	40.5	33.1	14.7	24.2
	自耦变压器 80%	75.8	62.1	3.4	56.5
	$\Delta$ 1:3	82	67.2	3.9	64.5
JO <sub>2</sub> -62-4 17kW	全压起动	271		250.1	
	自耦变压器 60%	85	31.4	61.8	24.7
	自耦变压器 80%	164	60.4	12.1	48.2
	$\Delta$ 1:1	132	48.7	10.9	43.5
JO <sub>2</sub> 62-6 13kW	全压起动	178		27.5	
	自耦变压器 60%	58.7	33	7.1	25.7
	自耦变压器 80%	113	63.5	16.2	59
	$\Delta$ 1:2	105	59	14.6	53
JO <sub>2</sub> -62-8 10kW	全压起动	120		26.5	
	自耦变压器 60%	41.3	34.4	7.1	26.7
	自耦变压器 80%	75.5	55.8	14.7	55.6
	$\Delta$ 3:5	67	49.1	12.7	48

注：①  $I_q, M_q$ ——起动电流和起动转矩； $I_{mq}, M_{mq}$ ——全压起动时的起动电流和起动转矩。

② 自耦变压器 60% 轴头时起动转矩，相当于星形接法时的起动转矩，故本表略去星三角起动性能。

### 七、三相鼠笼型异步电动机起动电阻的计算

三相鼠笼型异步电动机电阻降压起动,适用于中等功率的电动机要求平稳起动的场合。起动时,三相绕组串联降压电阻  $R$ ,起动完毕后,交流接触器主触头闭合,切除降压电阻。

$$R = \frac{220}{I_e} \sqrt{\left(\frac{I_q}{I'_q}\right)^2 - 1}, \quad P = \left(\frac{1}{3} \sim \frac{1}{4}\right) I_e^2 R$$

式中: $R$ ——降压电阻( $\Omega$ );

$P$ ——降压电阻的功率(W);

$I_q$ ——未串降压电阻时起动电流(A),可由产品目录查得;

$I'_q$ ——串降压电阻后的起动电流(A),即允许起动电流,一般取 $(2 \sim 2.5)I_e$ ;

$I_e$ ——电动机额定电流(A)。

### 八、绕线型异步电动机起动电阻的计算

#### 1. 三相对称起动电阻的计算

继电器控制的起动线路如图 5—36 所示。图中, $KI$  为过电流继电器; $KM$  为交流接触器; $KT_1$ 、 $KT_2$ 、 $KT_3$  为加速接触器。

起动电阻的计算步骤如下:

(1) 最大起动转矩与换接起动转矩之比  $k$  为

$$k = \frac{M_{\max}}{M_h} = \sqrt[m]{\frac{1}{\frac{M_{\max}}{M_e} s_e}}$$

$$M_{\max} = (1.5 \sim 2)M_e$$

式中: $M_{\max}$ ——最大起动转矩(N·m);

$M_h$ ——换接起动转矩(N·m),比负载转矩  $M_e$  大些;

$M_e$ ——电动机额定转矩;

$m$ ——变阻器级数,通常  $m = 3$ ;

$S_n$ —— 额定转差率。

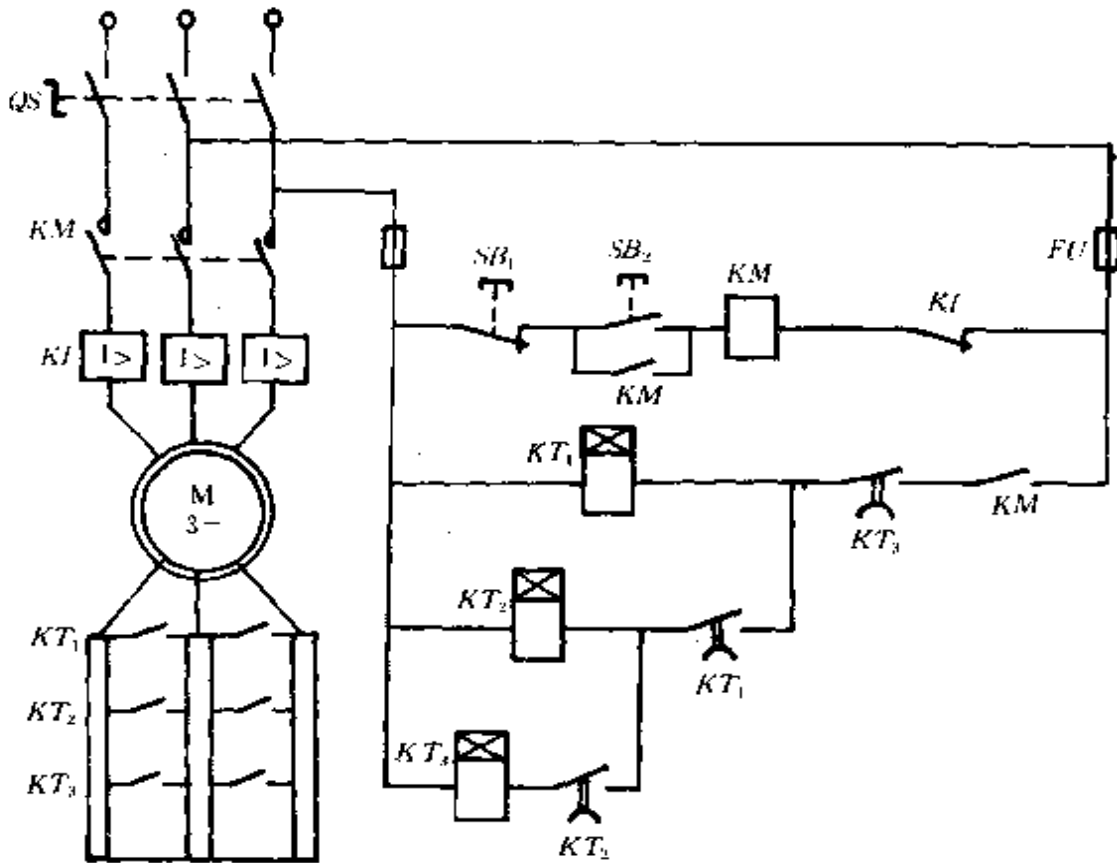


图 5--36 继电器接触控制线路

(2) 校验换接转矩  $M_2$  是否大于静阻力矩  $M_{jz}$ , 即

$$M_h > \frac{M_{\max}}{\lambda} > M_{jz}$$

(3) 转子内阻  $r_2$ :

$$r_2 = s_n R_{2e}, \quad R_{2e} = \frac{U_{2e}}{\sqrt{3} I_{2e}}$$

式中:  $R_{2e}$  —— 转子额定电阻 ( $\Omega$ );

$I_{2e}$ 、 $U_{2e}$  —— 转子额定电流和电压 (A、V)。

(4) 转子接入电阻:

$$R_1 = kr_2$$

$$R_2 = kR_1 = k^2r_2$$

$$R_3 = kR_2 = k^3r_2$$

(5) 各段电阻:

$$R_{F1} = R_1 - r_2 = (k - 1)r_2$$

$$R_{F2} = R_2 - R_1 = kR_{F1}$$

$$R_{F3} = R_3 - R_2 = kR_{F2}$$

**例 5—18** 一台 JR62—4 型、14kW 绕线型异步电动机，额定转速  $n_e$  为 142r/min，转子额定电压  $U_{2e}$  为 262V，转子额定电流  $I_{2e}$  为 35A，最大转矩倍数为 2.4，负载转矩  $M_e$  为  $0.7M_e$ 。试求三级起动时各级起动电阻值。

**解**

(1) 确定  $k$ :

取  $M_{\max} = 1.8M_e$ ，则

$$s_e = \frac{n_1 - n_e}{n_1} = \frac{1500 - 1420}{1500} = 5.33\%$$

故

$$k = \sqrt[3]{\frac{1}{\frac{M_{\max}}{M_e} s_e}} = \sqrt[3]{\frac{1}{1.8 \times 0.0533}} = 2.18$$

(2) 校验静阻力矩:

$$\begin{aligned} M_h &= \frac{M_{\max}}{k} = \frac{1.8M_e}{2.18} \\ &= 0.826M_e > M_{\neq} (= M_e = 0.7M_e) \end{aligned}$$

满足要求。

(3) 确定  $r_2$ :

$$R_{2e} = \frac{U_{2e}}{\sqrt{3} I_{2e}} = \frac{262}{\sqrt{3} \times 35} = 4.34(\Omega)$$

$$r_2 = s_e R_{2e} = 0.0533 \times 4.34 = 0.23(\Omega)$$

(4) 确定  $R_1, R_2, R_3$  及  $R_{F1}, R_{F2}, R_{F3}$  :

$$R_1 = kr_2 = 2.18 \times 0.23 = 0.5(\Omega)$$

$$R_2 = kR_1 = 2.18 \times 0.5 = 1.09(\Omega)$$

$$R_3 = kR_2 = 2.18 \times 1.09 = 2.38(\Omega)$$

$$R_{F1} = R_1 - r_2 = 0.5 - 0.23 = 0.27(\Omega)$$

$$R_{F2} = R_2 - R_1 = 1.09 - 0.5 = 0.59(\Omega)$$

$$R_{F3} = R_3 - R_2 = 2.38 - 1.09 = 1.29(\Omega)$$

## 2. 三相不对称起动电阻的计算

采用三相不对称起动电阻的接法,能减少电阻段数,简化控制回路的结构。三相转子不对称电阻可以采用对称的等效电阻来计算。现举例介绍其计算方法。

如图 5—37 为某吊车用四级不对称电阻的切换情况。

设  $R_a, R_b, R_c$  为三相转子不对称电阻的实际值,则等效对称电阻  $R_{dx}$  为

$$R_{dx} = \frac{R_a R_b + R_b R_c + R_c R_a}{R_a + R_b + R_c}$$

由于  $R_a, R_b, R_c$  的关系为等比级数关系,即

$$\frac{R_a}{R_b} = \frac{R_b}{R_c} = k$$

所以  $R_a = kR_b, R_b = kR_c, R_c = R_b/k$

$$R_{dx} = \frac{kR_b^2 + \frac{R_b^2}{k} + R_b^2}{kR_b + R_b + \frac{R_b}{k}} = R_b$$

上式表明,当三相不对称的电阻值成等比级数时,其等效对称电阻值相当于对称的转子回路中每相电阻值(为三相等比级数中的一个阻值)。

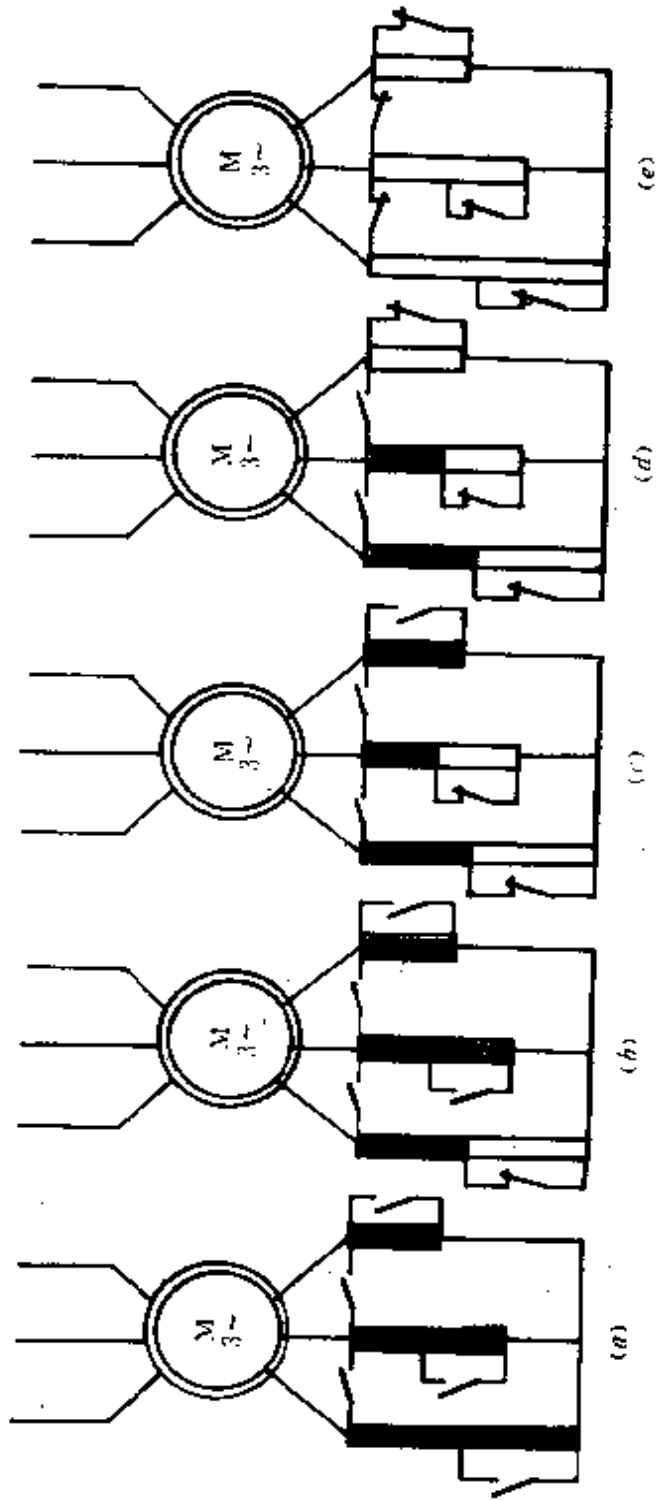


图 5-37 四级不对称电阻的切除顺序  
(a) 全接入 (b) 一组切除 (c) 二组切除 (d) 三组切除 (e) 全切除

对应图 5—38 的不对称电阻计算方法,见表 5—48。

表 5—48 四级不对称电阻切除段数计算公式

控制 器位 置	串入 电阻 级数	等效对 称电阻	三相不对称电阻			各级切除的分段电阻		
			1	2	3	1	2	3
1	4	$R_4 = kR_3$	$R_5 = kR_4$	$R_4$	$R_3 = \frac{R_4}{k}$	—	—	—
2	3	$R_3 = kR_2$	$R_2 = \frac{R_3}{k}$	$R_4 = kR_3$	$R_3$	$R_5 - R_2$ $= R_{F1}$	—	—
3	2	$R_2 = kR_1$	$R_3$	$R_1 = \frac{R_2}{k}$	$R_3 = kR_2$	—	$R_4 - R_1$ $= R_{F2}$	—
4	1	$R_1 = kr_2$	$R_2 = kR_1$	$R_1$	$r_2 = \frac{R_1}{k}$	—	—	$R_3 - r_2$ $= R_{F3}$
5	0	$r_2$	$r_2$	$r_2$	$r_2$	$R_2 - r_2$ $= R_{F4}$	$R_1 - r_2$ $= R_{F5}$	—

注: $r_2$ — 转子内阻; $R_1, R_2, \dots$ — 依次被切除的电阻。

### 九、异步电动机反接制动计算

#### 1. 鼠笼型异步电动机反接制动限流电阻的计算

图 5—38 为三相鼠笼型异步电动机正反转驱动、反接制动线路图。图 5—38(a) 线路,在起动及制动时电动机供电线路中都接入限流电阻;图 5—38(b) 线路,仅在制动时接入限流电阻。

(1) 如果要求反接制动最大电流等于该电动机直接起动时的起动电流,则反接制动限流电阻可按式估算:

$$R \approx 0.13Z = 0.13 \frac{U}{\sqrt{3} I_n}$$

式中: $R$ — 限流电阻( $\Omega$ );

$Z$  — 电动机起动时每相阻抗( $\Omega$ );



$U$ ——电源电压(V)；

$I_q$ ——电动机直接启动时启动电流(A)。

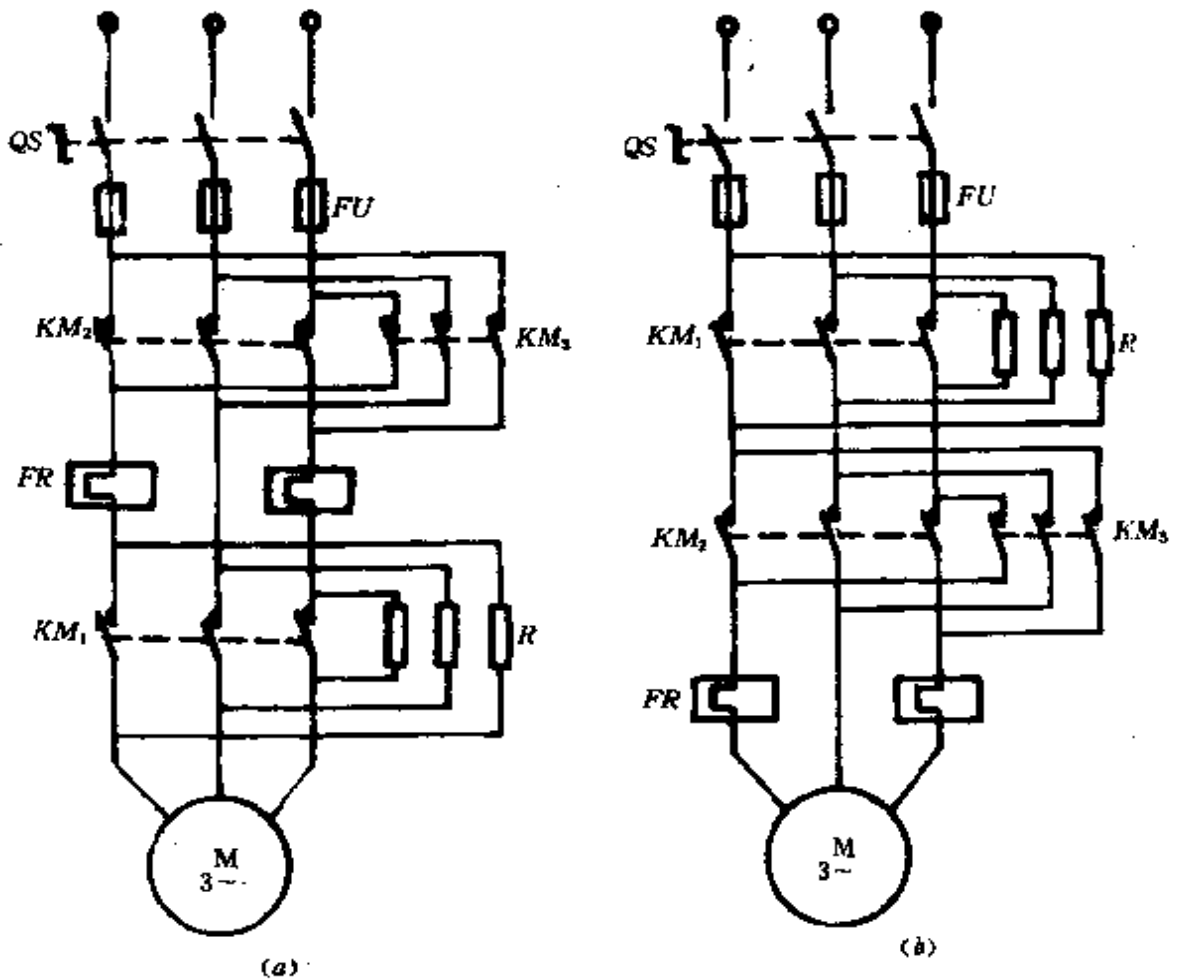


图 5—38 鼠笼型异步电动机反接制动线路图

(2) 如果反接制动最大电流取  $I_q/2$ ，则限流电阻的阻值可按下式估算：

$$R \approx 1.5 \frac{U}{\sqrt{3} I_q}$$

(3) 限流电阻的功率可按下式估算：

$$P = \frac{I_f^2 R}{3}$$

式中： $P$ ——限流电阻的功率(W)；

$I_f$ ——反接制动时的制动电流(A)。

(4) 如果仅有两相接有限流电阻，则阻值应略大，分别取上述电阻值的 1.5 倍左右。

### 2. 绕线型异步电动机反接制动限流电阻的计算

图 5-39 为三相绕线型异步电动机正转驱动、反接制动线路图。其中  $R_1$ 、 $R_2$ 、 $R_3$  为起动电阻。绕线型异步电动机反接制动机械特性曲线，如图 5-40 所示。

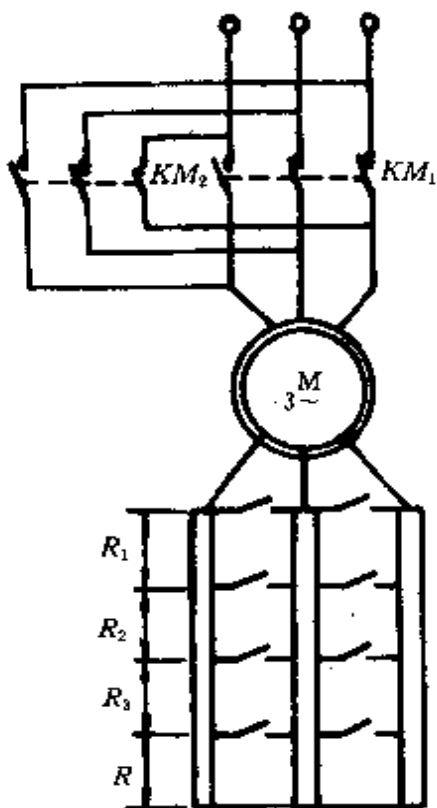


图 5-39 绕线型异步电动机反接制动线路图

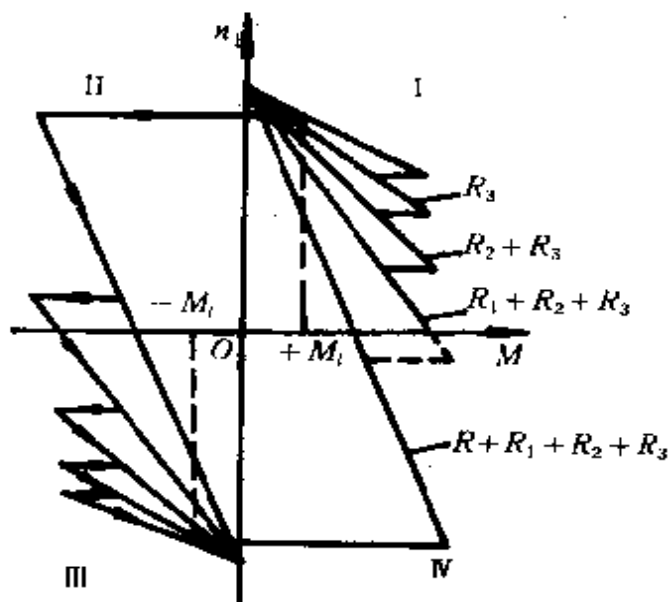


图 5-40 绕线型异步电动机反接制动机械特性曲线

反接制动电阻按下式计算：

$$R = R_z - R_q - r_2 \quad R_z = \frac{s_f}{M_f^*} R_{2e}$$

$$R_{2e} = \frac{U_{2e}}{\sqrt{3} I_{2e}}$$

式中： $R$  —— 反接制动电阻( $\Omega$ )；

$R_z$  —— 反接制动时转子回路总电阻( $\Omega$ )；

$s_f$  —— 反接制动开始时电动机的转差率，一般取  $s_{fz} = 2$ ；

$M_f^*$  —— 反接制动时，转矩标么值(需考虑到电动机能承受的最大转矩)；

$R_{2e}$  —— 电动机转子额定电阻( $\Omega$ )；

$U_{2e}$  —— 电动机转子额定电压(V)；

$I_{2e}$  —— 电动机转子额定电流(A)；

$R_q$  —— 电动机启动电阻( $\Omega$ )，如图 5-39 中  $R_1$ 、 $R_2$ 、 $R_3$ ；

$r_2$  —— 电动机转子内阻( $\Omega$ )。

**例 5-19** 有一台 JZR31-8 型、7.5kW 绕线型异步电动机，已知  $U_{2e}$  为 185V， $I_{2e}$  为 28A， $r_2$  为 0.21 $\Omega$ ， $R_q$  为 1.12 $\Omega$ ，求反接制动电阻。

解  $R_{2e} = \frac{U_{2e}}{\sqrt{3} I_{2e}} = \frac{185}{\sqrt{3} \times 28} = 3.82(\Omega)$

设  $M_f^* = 1.98$ ，则

$$R_z = \frac{s_f}{M_f^*} R_{2e} = \frac{2}{1.98} \times 3.82 = 3.85(\Omega)$$

因此，反接制动电阻为

$$R = 3.85 - 1.12 - 0.21 = 2.52(\Omega)$$

## 十、异步电动机能耗制动计算

### 1. 工作原理

异步电动机能耗制动线路如图 5-41 所示，其制动机械特性曲线如图 5-42 所示。将运行中的异步电动机定子绕组断开

交流电源后,接到制动用的直流电源上,从而得到励磁,此时电动机即变为一台交流发电机运行,其电能消耗于转子回路,产生制动转矩,从而使电动机停止下来。调节励磁电流(制动电流) $I_2$ ,可改变制动转矩。该制动方法适用于要求制动平稳停位准确的场合。

绕线型电动机的能耗制动与鼠笼型电动机相同。

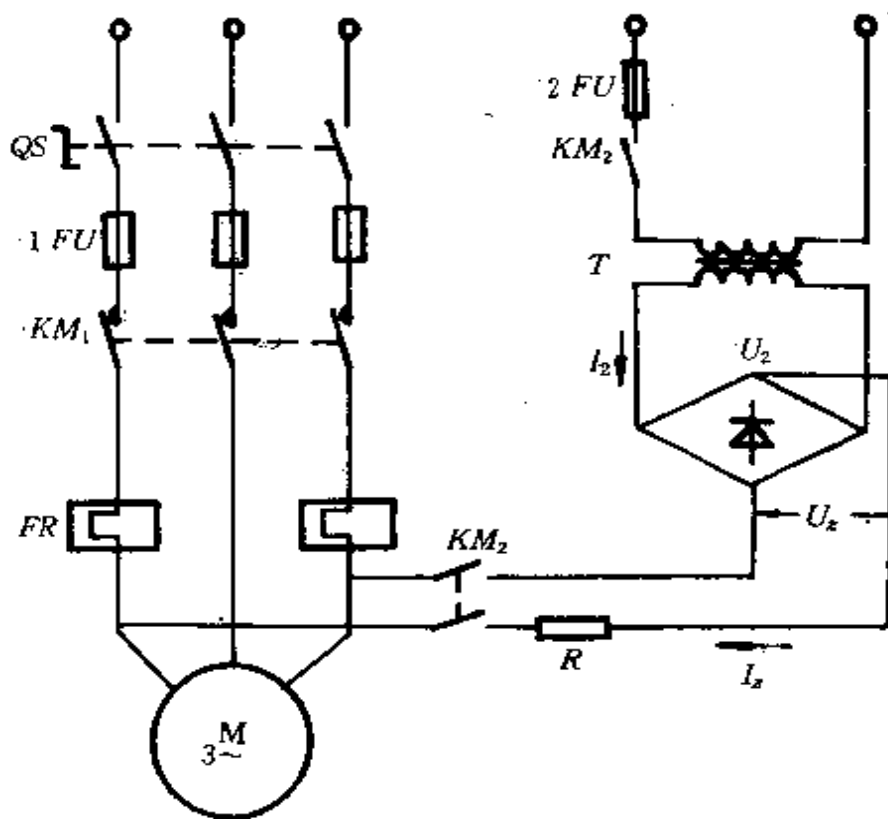


图 5—41 鼠笼型异步电动机能耗制动线路图

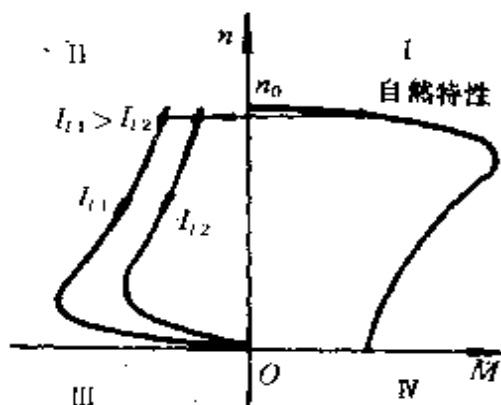


图 5-42 异步电动机能耗制动机械特性曲线

## 2. 能耗制动电路参数的计算

(1) 采用不改变电动机绕组接法的不对称能耗制动时, 电路参数可近似按下列公式计算:

$$I_z = 1.22I_e \quad P_z = 6I_z^2 R_1$$

$$U_z = 4.88I_z R_1 \quad R = R_1$$

式中:  $I_z$ ——制动时的励磁电流(制动电流)(A);

$P_z$ ——直流回路的功率(VA);

$U_z$ ——直流电源的电压(V);

$R$ ——直流回路中的限流电阻( $\Omega$ );

$R_1$ ——电动机定子绕组任意两根电源接线柱之间的冷态电阻( $\Omega$ );

$I_e$ ——电动机额定电流(A)。

(2) 采用改变电动机绕组接法(改成并联或串联)的对称能耗制动电路时, 电路参数可近似按下列公式计算:

$$I_z = K I_e; \quad R = U_z / I_z \text{ (绕组并联时)}$$

$$R = \left( \frac{U_z}{I_z} \right) - R_2 \text{ (绕组串联时)}$$

式中:  $I_z$ ——制动电流(A);

$K_r$ ——强迫系数,由所需制动转矩的大小决定,一般取  
1.5 ~ 3.5;

$R$ ——限流电阻( $\Omega$ );

$R_z$ ——绕组串联后的总电阻( $\Omega$ );

其它符号同前。

(3) 整流变压器的计算:

① 直流回路串限流电阻的场合

变压器二次电压: $U_2 = 1.11U_z + 2\Delta U_g$

式中: $\Delta U_g$ ——一只整流管子的压降,约 0.6 ~ 0.7V。

变压器二次电流: $I_2 = 1.11I_z$

变压器计算容量: $S_{2j} = U_2 I_2$

② 直流回路不串限流电阻的场合:直流回路不串限流电阻的方案,其电机运行的安全性较串限流电阻的方案差,然而,一般情况都采用此方案。这时变压器的计算公式如下:

直流电源电流: $I_z = 1.5I_r$

直流电源电压: $U_z = I_z R_1$

变压器二次电压: $U_2 = 1.11U_z + 2\Delta U_g$

变压器二次电流: $I_2 = 1.11I_z$

变压器计算容量: $S_{2j} = U_2 I_2$

以上两方案的变压器实际容量: $S_2 = S_{2j}/2$ (制动特别频繁的场合) $S_2 = S_{2j}/3$ (制动不频繁的场合)

由于整流变压器仅在制动过程中短时间内工作,变压器实际容量取得较小。

(4) 硅整流元件的选用;单相桥式整流电路中,每个二极管中流过的电流平均值为  $0.5I_z$ ,最大反向电压为  $1.57U_z$ ,考虑 1.5 ~ 2.5 倍的裕度,选择适当的整流二极管。

**例 5-20** 一台三相 380V 异步电动机,功率为 13kW,额定电流为 25A,定子绕组 Y 形接法,两绕组在 15°C 时的电阻值为

0.64Ω。试求能耗制动用变压器电压、电流和容量。设采用直流回路不串限流电阻的方案(此电动机用于制动频繁的场所)。

**解** 能耗制动时定子绕组中的直流电流和电压为

$$I_2 = 1.5I_c = 1.5 \times 25 = 37.5(\text{A})$$

$$U_2 = I_2 R_1 = 37.5 \times 0.64 = 24(\text{V})$$

变压器二次电压和电流为

$$U_2 = 1.11U_x + 2\Delta U_x = 1.11 \times 24 + 1.3 = 27.9(\text{V}),$$

取  $U_2 = 28\text{V}$

$$I_2 = 1.11I_x = 1.11 \times 37.5 = 41.6(\text{A}), \text{取 } I_2 = 42\text{A}$$

变压器的计算容量

$$S_{2j} = U_2 I_2 = 28 \times 42 = 1176(\text{VA})$$

由于此电动机用于制动频繁的场所,所以变压器实际容量为

$$S = S_{2j}/2 = 1176/2 = 588(\text{VA})$$

## 十一、异步电动机电容—电磁制动的电容计算

### 1. 工作原理

三相异步电动机电容—电磁制动线路如图5—43所示。制动过程分两个阶段,首先为自励发电制动,然后把电动机三相绕组短接,转入能耗制动。该制动方法适用于小功率的三相鼠笼型异步电动机。

### 2. 电容器电容量的计算

三角形接法  $C_\Delta = 4.85KI_0$

星形接法  $C_Y = 1.45KI_0$

式中: $C_\Delta$ 、 $C_Y$ ——三角形和星形接法电容器电容量( $\mu\text{F}$ );

$K$ ——强迫系数,取4~6;

$I_0$ ——电动机空载电流(A)。

电容器耐压:大于600V。

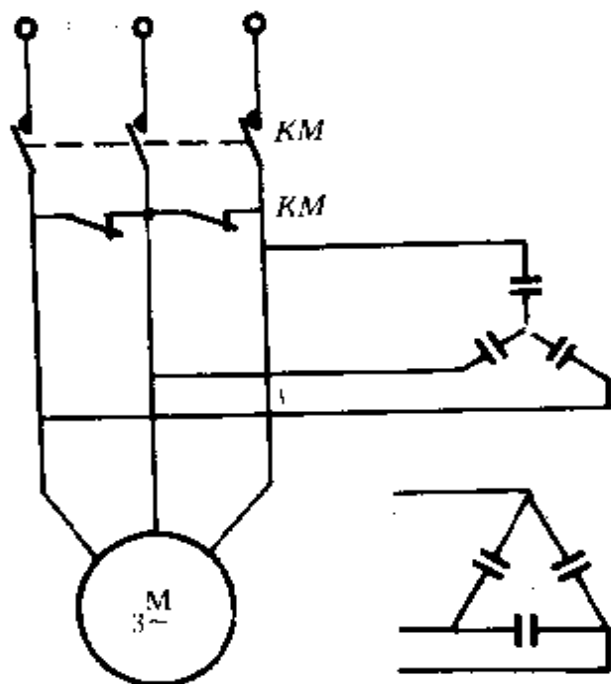


图 5-43 鼠笼型异步电动机电容——电磁制动线路图

## 十二、直流他励电动机反接制动计算

### 1. 工作原理

直流电动机反接制动线路如图 5—44 所示,其制动机械特性如图 5—45 所示。在直流电动机运转时,励磁不变,突然将电枢电源反接,由于反接后的电源电压极性和电动机的反电势极性相同,在电枢回路中产生较大的反向制动电流  $I_f$ ,从而使电动机迅速制动停转。在图 5—44 中,当反接制动时,正转接触器触点  $KM_1$  打开,反接制动接触器触点  $KM_3$  打开,反转接触器触点  $KM_2$  闭合。该制动方法适用于要求迅速制动停转并反转的场合。



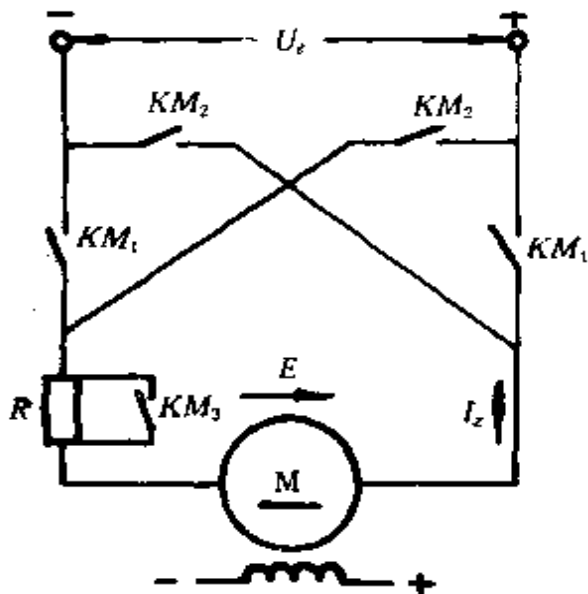


图 5-44 直流电动机反接制动  
线路图

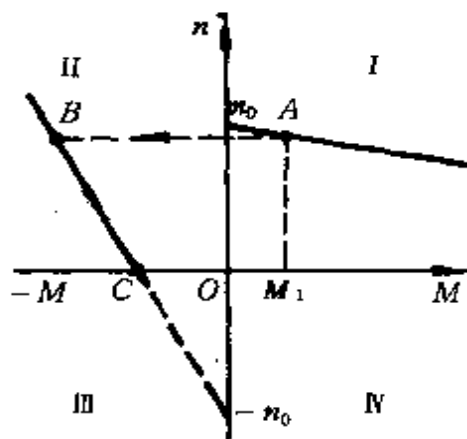


图 5-45 直流电动机反接制动  
机械特性

### 2. 反接制动电阻的计算:

$$R_f = \frac{U_e - E_{\max}}{I_{z\max}} - (R_a + R_q)$$

式中:  $R_f$ ——反接制动电阻( $\Omega$ );

$I_{z\max}$ ——允许最大的反接制动电流(A), 取决于电动机允许的电流过载倍数, 一般取  $I_{z\max} = (1.5 \sim 2.5)I_n$ ;

$E_{\max}$ ——电动机最大反电势(V);

$R_q$ ——启动电阻( $\Omega$ );

$R_a$ ——电动机电枢电阻( $\Omega$ ).

### 3. 反接继电器的整定

反接继电器  $KM_1$ , 当反接制动开始时, 将电阻  $R_f$  接入电路; 而当制动到电动机转速接近于零时, 将电阻  $R_f$  短接, 如图

5-46 所示。继电器  $KM_1$  线圈的连接点  $A$ ，由电阻  $R_x$  值来决定。

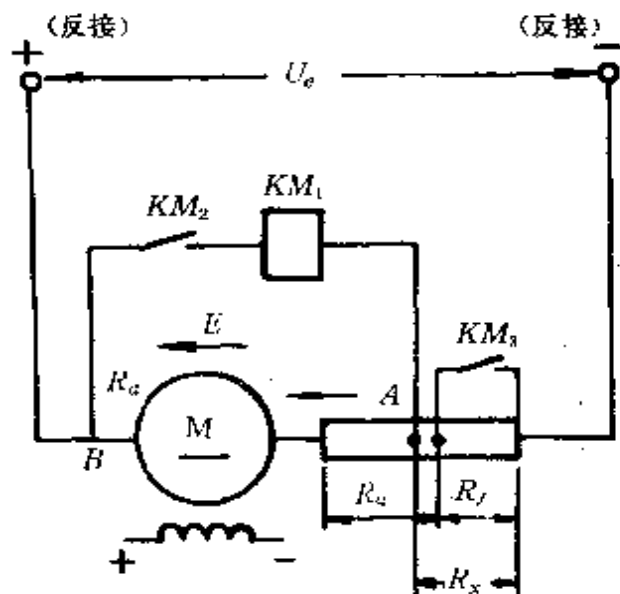


图 5-46 反接继电器整定线路图

$$R_x = \frac{1}{2}R = \frac{1}{2}(R_a + R_f)$$

上式表示  $KM_1$  继电器连接点  $A$ ，在总电阻  $R$  值的一半处。  
 $KM_1$  继电器的吸上电压，一般整定在  $0.4 \sim 0.45U_e$ 。

### 十三、直流他励电动机能耗制动计算

#### 1. 工作原理

直流电动机能耗制动线路如图 5-47 所示，其制动机械特性如图 5-48 所示。将电动机电枢从电源断开后，并联制动电阻  $R$ ，这时电动机因负载的惯性而继续运转，成为一台向  $R$  供电的发电机，而制动。

#### 2. 制动电阻的计算

$$R = \frac{E}{I_{zmax}} - R_a$$

式中： $R$ ——制动电阻( $\Omega$ )；

$E$ ——制动开始时电动机的反电势(V)；

$I_{zmax}$ ——电动机最大制动电流(A)；

$R_e$ ——电动机电枢电阻( $\Omega$ )。

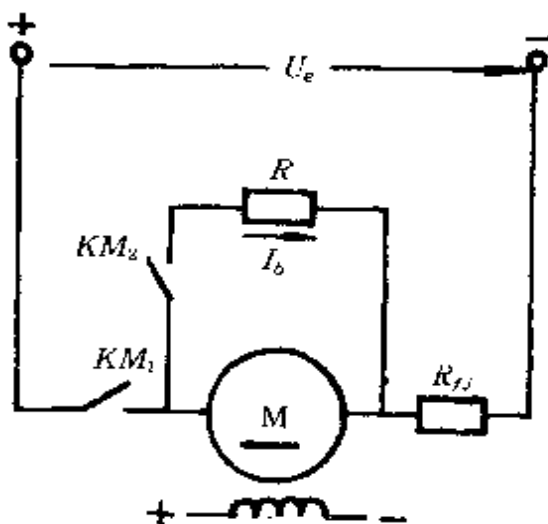


图 5-47 直流电动机能耗制动  
线路图

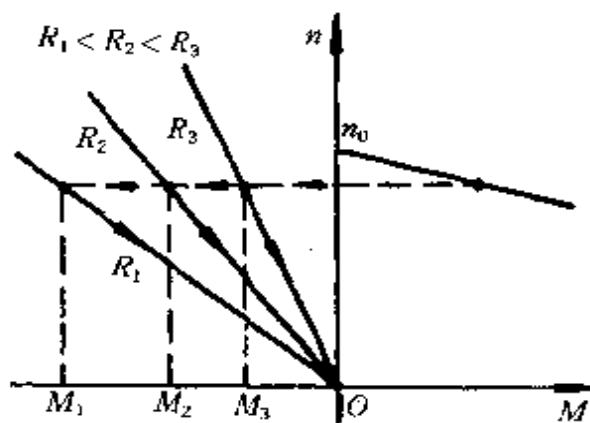


图 5-48 直流电动机能耗制动  
机械特性

#### 十四、绕线型异步电动机转子附加电阻调速的计算

某卷扬机采用 30kW、6 极、380V 三相绕线型异步电动机，要求有  $n_n$ 、 $n_n/2$  和  $n_n/3$  三种速度，则转子附加电阻可按下法计算：

绕线型异步电动机用转子串入附加电阻调速时，在一定负载转矩下，电动机的转差率  $s$  与转子回路的电阻  $R$  成正比，即

$$\frac{s_1}{s_2} = \frac{R_1}{R_2}$$

相对转速为  $n_c$ 、 $n_c/2$  和  $n_c/3$  的转差率分别为

$$s_1 = s_c = \frac{n_1 - n_c}{n_1}, \quad s_2 = \frac{n_1 - n_c/2}{n_1}$$

$$s_3 = \frac{n_1 - n_c/3}{n_1}$$

相应转子回路中的每相全部电阻分别为

$$R_1 = r_2, R_2 = r_2 \frac{s_2}{s_c}, \quad R_3 = r_2 \frac{s_3}{s_c}$$

式中： $r_2$ ——转子绕组每相电阻( $\Omega$ )，可用电桥测得。

相应  $n_c/2$  和  $n_c/3$  速度下的每相需要串入的附加电阻分别为

$$R'_2 = R_2 - r_2 = r_2(s_2/s_c - 1),$$

$$R'_3 = R_3 - r_2 = r_2(s_3/s_c - 1)$$

附加电阻中的电流值应按负载时转子中的电流计算。若为短时负载，则视附加电阻的发热情况适当减小电阻功率。

### 十五、绕线型异步电动机机械回馈式串级调速的计算

异步电动机转子回路串联电阻调速，在低速运行段需接入大量的电阻，消耗很多电能。另外，它是有级调速。而异步电动机机械回馈式串级调速，在电机正常运行和调速过程中已切除全部起动电阻，因此能耗低，低速时效率高。另外，它是无级调速。该调速方式适用于拖动恒功率或恒转矩性质的负载。

异步电动机机械回馈式串级调速线路图如图 5—49 所示。

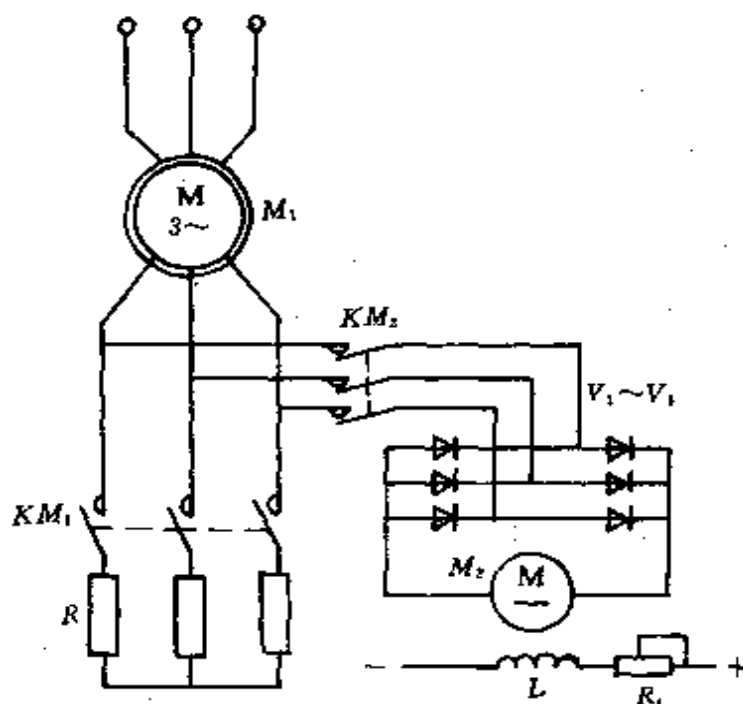


图 5—49 异步电动机机械回馈式串级调速线路图

### 1. 工作原理

交流电动机  $M_1$  和直流电动机  $M_2$  同轴拖动机械负载。

在主机  $M_1$  起动前,  $M_2$  的励磁回路接通电源(励磁变阻器  $R_f$  处在低阻值位置)。主回路接通电源时,  $KM_1$  闭合, 起动电阻  $R$  被接入,  $M_1$  起动至低速状态。然后  $KM_2$  闭合,  $KM_1$  断开,  $M_1$  仍保持在低速状态运行。调节  $R_f$ , 便可调节  $M_1$  的运行速度。

### 2. 直流电动机 $M_2$ 的选择

选择步骤如下:

(1) 按下式计算出供给整流器的相电压:

$$U_2 = \frac{sE_{20}}{\sqrt{3}} - R_2 I_2$$

式中:  $U_2$  —— 调速下限状态时  $M_1$  转子回路供给整流器的相电压(V);

$s$  —— 对应于调速下限状态的转差率;

$E_{20}$ —— $M_1$  转子绕组额定开路电势(V)；

$R_2$ —— $M_1$  转子绕组相电阻( $\Omega$ )；

$I_2$ ——调速下限状态下  $M_1$  转子负载电流(A)。

(2) 直流电动机额定电压的选择：

$$U_e \geq U_r = 2.34 \left( \frac{sE_{20}}{\sqrt{3}} - R_2 I_2 \right)$$

(3) 直流电动机电枢额定电流的选择：

$$I_e \geq I_r = 1.23 I_2$$

(4) 直流电动机额定容量的选择：

$$P_e = 2.87 \left( \frac{sE_{20} I_2}{\sqrt{3}} - R_2 I_2^2 \right) \times 10^{-3}$$

式中, $U_e$ 、 $I_e$ 分别为整流装置在调速下限状态下的输出直流电压和电流; $U_e$ 、 $I_e$ 、 $P_e$ 的单位分别为V、A、kW。

(5) 直流电动机额定转速的选择:直流电动机额定转速应选择与交流主电机  $M_1$  额定转速相同或接近。

如果此调速装置用于拖动负载转矩随转速上升而增加的设备(如风机、水泵等)时,则直流电动机的额定电流应按调速范围上限状态的主电机转子电流来计算选择,以防在高速运行状态下直流电动机被烧坏。

### 十六、直流电动机不同调速方法比较

直流电动机能在宽广范围内平滑地调速。当电枢回路内接入调节电阻  $R_f$  时,转速可按下式计算:

$$n = \frac{U - [I_a(R_2 + R_f) + \Delta U_b]}{C_e \phi}$$

式中符号同前。

由上式可知,直流电动机可以采用调节励磁电流、电枢端电压和电枢回路电阻等方法进行调速。不同调速方法的主要特点、性能和适用范围见表5—49。

表 5—49 直流电动机不同调速方法的主要特点、性能和适用范围

调速方法	调节励磁电流	调节电枢电压	调节电枢回路电阻
特性曲线	见图 5—8	见图 5—9	见图 5—10
主要特点	<p>1. <math>U =</math> 常值, 转速 <math>n</math> 随励磁电流 <math>I_f</math> 和磁通 <math>\phi</math> 的减小而升高</p> <p>2. 转速愈高, 换向愈困难, 电枢反应和换向元件中电流的去磁效应对电动机运行稳定性的影响愈大。最高转速受机械因素、换向和运行稳定性的限制</p> <p>3. 电枢电流保持额定值不变时, 转矩 <math>M</math> 与 <math>\phi</math> 成正比, <math>n</math> 与 <math>\phi</math> 成反比, 输入、输出功率及效率基本不变</p>	<p>1. <math>\phi =</math> 常值, 转速 <math>n</math> 随电枢端电压 <math>U</math> 的减少而降低</p> <p>2. 低速时, 机械特性的斜率不变, 稳定性好。由发电机组供电时, 最低转速受发电机剩磁的限制</p> <p>3. 电枢电流保持额定值不变时, <math>M</math> 保持不变, <math>n</math> 与 <math>U</math> 成正比, 输入、输出功率随 <math>U</math> 和 <math>n</math> 的降低而减小, 效率基本不变</p>	<p>1. <math>U =</math> 常值, 转速 <math>n</math> 随电枢回路电阻 <math>R</math> 的增加而降低</p> <p>2. 转速愈低, 机械特性愈软。采用此法调速时, 调速变阻器可作启动变阻器用</p> <p>3. 电枢电流保持额定值不变时, <math>M</math> 保持不变, 可作恒转矩调速, 但低速时, 输出功率随 <math>n</math> 的降低而减小, 而输入功率不变, 效率将随 <math>n</math> 的降低而降低, 经济性很差</p>
适用范围	适用于额定转速以上的恒功率调速	适用于额定转速以下的恒转矩调速	只适用于额定转速以下, 不需经常调速, 且机械特性要求较软的调速

## 十七、电阻器和频敏变阻器的计算

### 1. 电阻器计算

电阻器主要用于电动机的起动、制动和调速等。

(1) 电阻元件材料的性能：见表 5—50。

(2) 不同工作制下允许负载电流的计算：

$$I_t = \frac{I_c}{\sqrt{1 - e^{-\frac{t}{T}}}} = K_{11} I_c$$

$$I_c = \frac{\sqrt{1 - e^{-\frac{t}{T}}}}{\sqrt{1 - e^{-\frac{t}{T}}}} I_c = K_{12} I_c$$

式中： $I_t$ ——在通电时间为  $t$  秒的短时工作制下的允许负载电流 (A)；

$I_c$ ——长期工作制额定电流 (A)；

$I_c$ ——在通电持续率为  $\epsilon$  的反复短时工作制下的允许负载电流 (A)；

$K_{11}$ 、 $K_{12}$ ——过载系数，可由图 5—50 和图 5—51 查得；

$T$ ——发热时间常数 (s)。

### 2. 频敏变阻器计算

(1) 频敏变阻器的设计：

① 铁芯结构的选择：频敏变阻器由铁芯和绕组两部分组成，铁芯采用特厚的普通钢板或方钢，以获得较大的涡流损耗，达到理想的频繁特性。铁芯结构形式有迭片式、管式、方柱式，以及铁芯柱由方钢组成而上下磁轭则采用迭片的混合式等多种。



表 5-50 电阻元件材料的机械及物理性能

名称	牌号	比重 (g/mm <sup>3</sup> )	熔化 温度 (°C)	抗拉强度 (MPa)	20°C时的电阻率 $\rho$ ( $\Omega\text{mm}^2/\text{m}$ )	20°C时的电 阻温度系数 $\alpha$ ( $\times 10^{-5}/^\circ\text{C}$ )	平均热 容量 (J/g·°C)	对铜热 电势 ( $\mu\text{V}/^\circ\text{C}$ )	最高工 作温度 (°C)	附 注
康 铜	软	8.9	1260	392 ~ 588	0.44 ~ 0.5	$\approx 50$	0.41	- 43	500	耐腐蚀抗氧化 及机械性能均较 好
				$\geq 637$	0.46 ~ 0.52					
新康铜		8	970	392 ~ 539	0.45 ~ 0.52	$\approx 50$		0.3 ~ 0.5	500	抗氧化性能比 康铜差,价较廉
镍 铬	Ni80 Cr20	8.4	1400	637 ~ 785	截面 (mm <sup>2</sup> )	$\approx 70$	0.46	3.5 ~ 4	500	用于各种加热元 件及电阻元件
					电阻率					
					线状					
					$\geq 0.1$					
					$\geq 0.5$					
					$\geq 3$					
铁 铬 铝	Cr13 Al45	7.4	1480	588 ~ 735	带状	$\approx 120$			500	
					电阻率					
					线状					
					$\leq 0.8$					
					$\geq 0.9$					
					$\geq 3$					
					1.4	50			500	
灰铸铁	HT00				0.8 ~ 0.85	1000			350	铸造成栅片电 阻元件

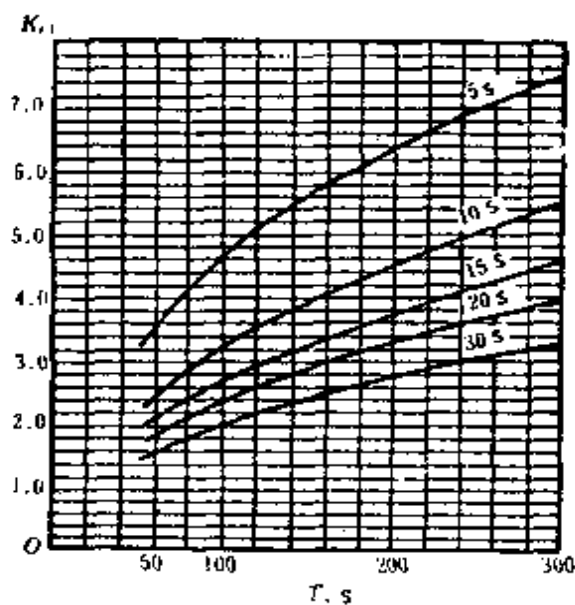


图 5—50 不同通电时间下短时工作制的  $K_{N1} = f(T)$  曲线(工作周期为 60s)

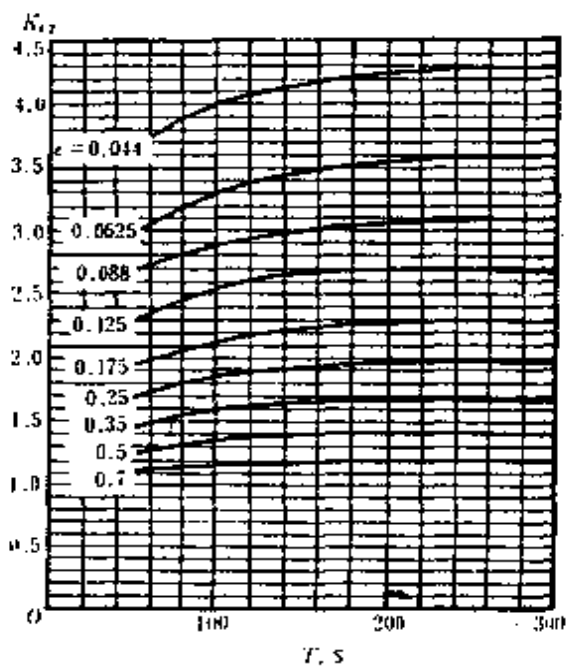


图 5—51 不同通电持续率下反复短时工作制的  $K_{N2} = f(T)$  曲线(工作周期为 60s)

② 电磁性能的计算：电源频率为 50Hz 时的变阻器单位重量铁芯柱损耗  $P_c$ 、磁通密度  $B$ 、铁芯功率因数  $\cos\varphi_c$  与磁场强度  $H$  之间的关系可按以下经验公式计算：

方柱式和混合式铁芯(铁芯厚度  $\delta > 40\text{mm}$ )

$$P_c = 0.39\delta B^2$$

$$H = \frac{354P_c}{B\cos\varphi_c} = 313 \sqrt{\delta} \sqrt{P_c}$$

式中： $P_c$ ——铁芯柱损耗(kW/kg)；

$H$ ——磁场强度(A/cm)；

$\delta$ ——铁芯柱宽度或厚度(cm)；

$B$ ——铁芯柱内平均磁通密度(T)；

$\cos\varphi_c$ ——铁芯功率因数，取 0.707。

迭片式和管式铁芯的电磁性能见图 5—52 和图 5—53 及表 5—51 和表 5—52。

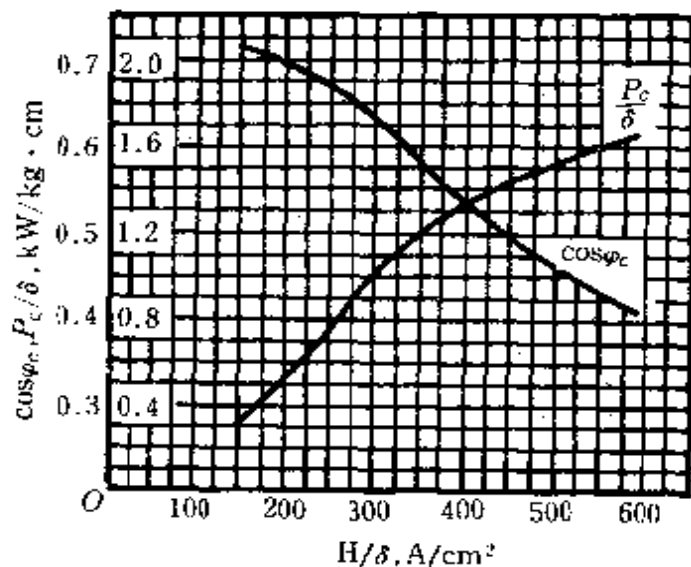


图 5—52  $\delta = 4 \sim 6\text{mm}$  的电磁性能曲线

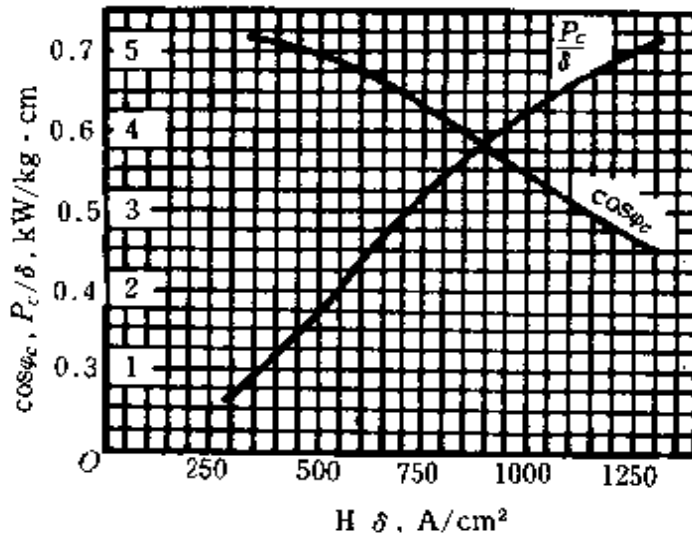


图 5 53  $\delta = 8 \sim 25mm$  的电磁性能曲线

表 5—51 适用于  $\delta = 4 \sim 6mm$

$B \times 10^4 (T)$	1.0	1.2	1.4	1.6	1.8	2.0	2.2	2.4
$\cos \varphi_c$	0.707	0.7	0.69	0.67	0.64	0.59	0.52	0.41
$\frac{P_c}{\delta} (kW/kg \cdot cm)$	0.283	0.407	0.555	0.725	0.917	1.13	1.37	1.63
$\frac{H}{\delta} (A/cm^2)$	141	172	211	240	281	340	414	585

表 5--52 适用于  $\delta = 8 \sim 25mm$

$B \times 10^4 (T)$	1.0	1.2	1.4	1.5	1.8	2.0	2.2	2.4	2.6	2.8	3.0
$\cos \varphi_c$	0.71	0.71	0.71	0.7	0.69	0.675	0.65	0.615	0.575	0.52	0.45
$\frac{P_c}{\delta} (kW/kg \cdot cm)$	0.565	0.814	1.11	1.45	1.83	2.26	2.74	3.26	3.82	4.43	5.08
$\frac{H}{\delta} (A/cm^2)$	282	338	394	458	522	592	678	780	904	1080	1330

③ 机械特性的计算：绕线型电动机的转子回路接入频敏变阻器的情况如图 5—54 所示。

图中  $R_s$  为频敏变阻器绕组的直流电阻； $R_r$  为频敏变阻器铁芯的等效串联电阻， $R_r = R \sqrt{s}$ ； $X_r$  为频敏变阻器铁芯的等效串联电抗， $X_r = X \sqrt{s} = R \sqrt{s} \operatorname{tg} \varphi_c$ 。 $\operatorname{tg} \varphi_c$  为转差率  $s = 1$  时铁芯功率因数角正切值。

频敏变阻器的机械特性决定于起动瞬间的起动转矩  $M_q$  和转子起动电流  $I_{2q}$ 。图 5—55 和图 5—56 分别为  $M_q^* = f(I_{2q}^*, \cos \varphi_c)$  和  $R_{dx} = f(I_{2q}^*, \cos \varphi_c)$  曲线， $R_{dx}$  为变阻器等效电阻。图中  $M_q^*$  和  $I_{2q}^*$  均为标么值。

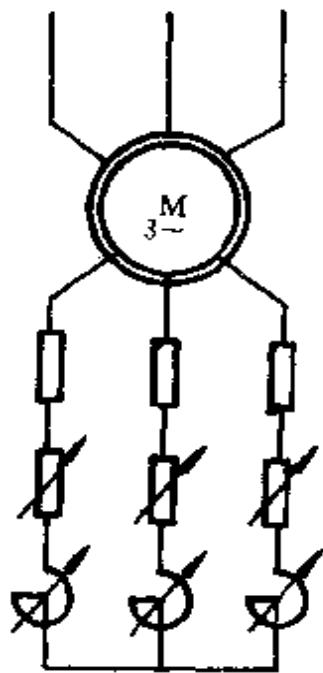


图 5—54 电动机转子接入频敏变阻器的电路图

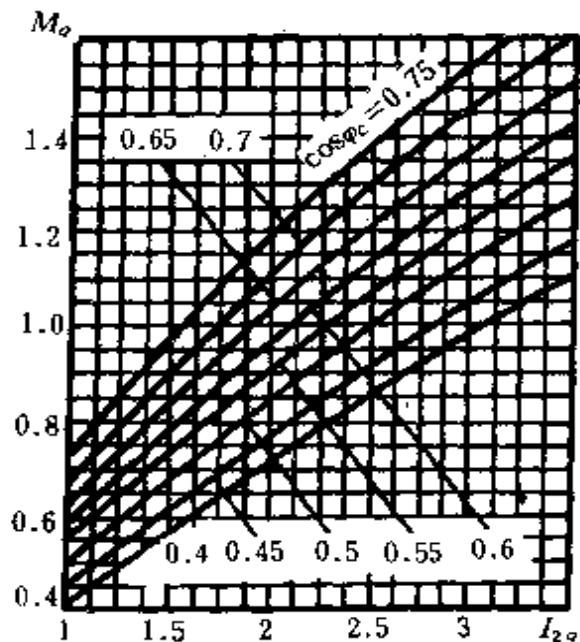


图 5—55  $M_q^* = f(I_{2q}^*, \cos \varphi_c)$  曲线

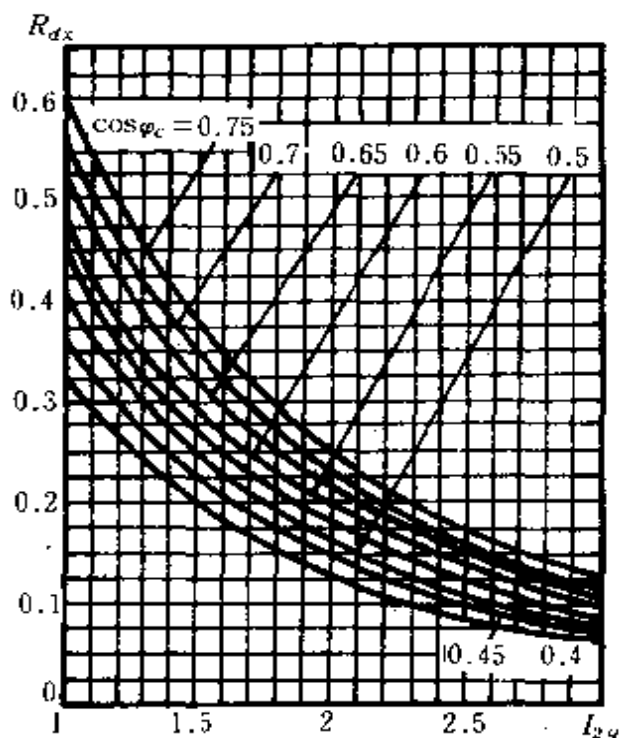


图 5—56  $R_{dx} = f(I_{2g}^*, \cos \varphi_c)$  曲线

④ 变阻器结构参数计算步骤:

第一,根据机械特性的要求,选定  $M_g^*$ 、 $I_{2g}^*$ ,由图 5—55 和图 5—56 中查得  $R_{dx}$ 、 $\cos \varphi_c$ ;也可根据发热要求,先选定  $I_{2g}^*$ 、 $\cos \varphi_c$ ,由图曲线中查得  $M_g^*$  和  $R_{dx}$ ,再校核机械特性。

第二,由变阻器的电磁性能曲线或计算,得  $P_c$ 、 $B$  及  $H$  值。

第三,计算铁芯柱高

$$h = \frac{1.08 I_{2g}^* R_{dx} P_c}{3 P_n r S}$$

式中: $h$ ——铁芯柱高(cm)

$P_n$ ——额定功率(kW);

$r$ ——钢材密度( $\text{kg}/\text{cm}^3$ ),  $r = 7.85 \times 10^{-3}$ ;

$S$ ——铁芯柱面积( $\text{cm}^2$ );

其它符号同前。

第四,计算绕组匝数

$$W = \frac{Hh}{I_{2q}^* I_{2c}}$$

式中:  $W$ ——绕组匝数(匝);

$I_{2c}$ ——转子额定电流(A)。

(2) 绕线型异步电动机用短时起动频敏变阻器的计算:

① 起动瞬间变阻器铁芯柱损耗为

$$P_c = 3.33 \frac{\tau_{ux}}{t_q}$$

式中:  $P_c$ ——铁芯柱损耗(kW/kg);

$\tau_{ux}$ ——铁芯允许温升(°C);

$t_q$ ——起动时间(s)。

校验:此值应与由电磁性能曲线查得的  $P_c$  相适应,否则应重新计算,直到相适应为止。

② 起动用的频敏变阻器的电流密度按下式选择:

$$\text{铜导线 } j = \sqrt{\frac{312\tau_{ux}}{t_q}}$$

$$\text{铝导线 } j = \sqrt{\frac{141\tau_{ux}}{t_q}}$$

式中:  $j$ ——电流密度(A/mm<sup>2</sup>),对于B级绝缘的绕组,  $j$ 可参见表5—53。

表 5—53 频敏变阻器电流密度参考值(A/mm<sup>2</sup>)

导线材质	负 载 类 型	
	轻 载	重 轻 载
铜	25 ~ 32	20 ~ 25
铝	16 ~ 20	12.5 ~ 15

频敏变阻器在各种不同接法下的绕组匝数和导线截面计算公式,列于表 5—54。

表 5—54 频敏变阻器在各种接法下绕组的计算公式

计算项目	单组星形接法	单组三角形接法	二组并联星形接法	二组串联星形接法
绕组匝数	$W = \frac{Hh}{I_{2q}^* I_{2c}}$	$W = \frac{\sqrt{3} Hh}{I_{2q}^* I_{2c}}$	$W = \frac{2Hh}{I_{2q}^* I_{2c}}$	$W = \frac{Hh}{I_{2q}^* I_{2c}}$
绕组导线截面 (mm <sup>2</sup> )	$q = \frac{I_{2q}^* I_{2c}}{j}$	$q = \frac{I_{2q}^* I_{2c}}{\sqrt{3} j}$	$q = \frac{I_{2q}^* I_{2c}}{2j}$	$q = \frac{I_{2q}^* I_{2c}}{j}$

注:表中  $I_{2q}^*$  为标么值。

(3) 绕线型异步电动机用反复短时起动频敏变阻器的计算:

① 反复短时起动时变阻器铁芯柱损耗为

$$P_c = \frac{36000K_c}{t_q z}$$

式中:  $P_c$ ——铁芯损耗(kW/kg);

$K_c$ ——散热系数(kW/kg);

$z$ ——每小时折合起动次数。

相应于 0、4、5 号铁芯的散热系数曲线如图 5—57 所示。

铁芯片数为

$$n = \frac{1.08 I_{2q}^* R_{dL} P_c}{3 P_c a \delta h}$$

式中:  $a$ ——铁芯柱宽度(cm);

$h$ ——铁芯柱高度(cm);

$\delta$ ——每片铁芯厚度(cm);

其它符号同前。



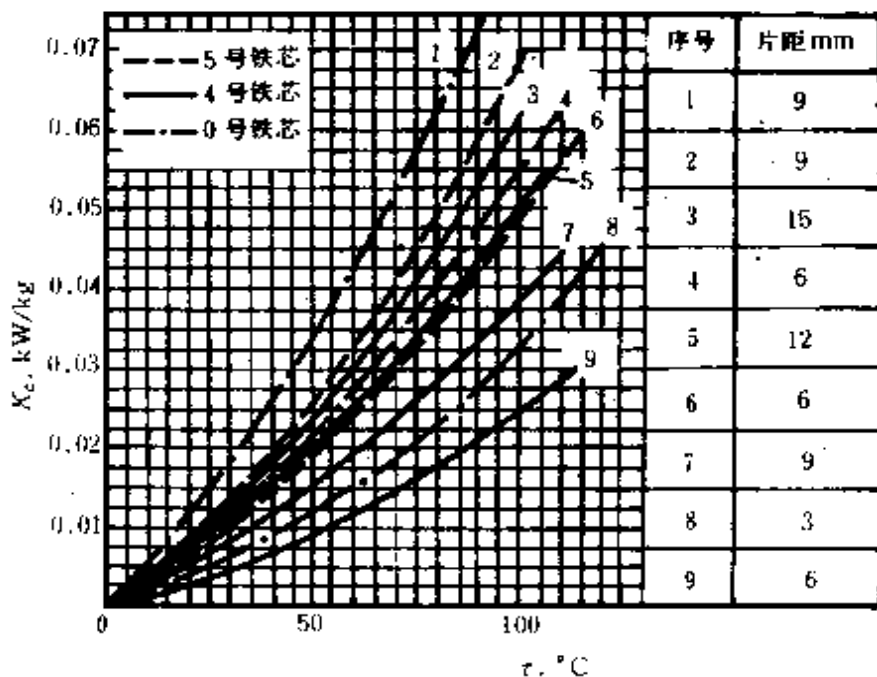


图 5—57 0、4、5 号铁芯散热系数

② 星形接法绕组导线截面的计算：

铜导线  $q = 0.08I_{2e} \sqrt{t_q z}$

铝导线  $q = 0.125I_{2e} \sqrt{t_q z}$

式中： $q$ ——导线截面( $\text{mm}^2$ )；

$I_{2e}$ ——转子额定电流(A)。

3. 管式频敏变阻器的计算

管式频敏变阻器的结构如图 5—58 所示。图中 1 为钢管做成的铁心，2 为钢板或槽钢做成的铁轭，3 为绕组。

(1) 钢管的选择：

电动机功率愈大，所选用的钢管直径愈大。通常取直径在 50mm 以上，管壁厚 6mm 以上。

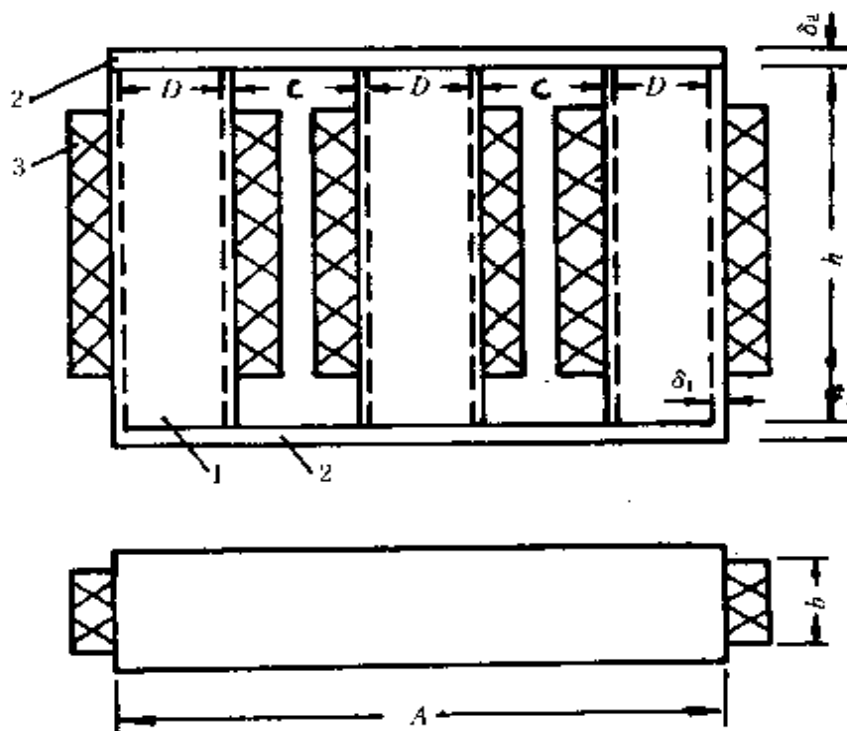


图 5—58 管式频敏变阻器结构图

(2) 钢管高度的计算：

$$h = \frac{C_1 P_e}{2D\delta_1^2}$$

式中： $h$ ——钢管高度(cm)；

$P_e$ ——电动机额定功率(kW)；

$C_1$ ——常数，见表 5—55；

$D$ ——钢管外径(cm)；

$\delta_1$ ——钢管壁厚(cm)。

(3) 绕组匝数和导线截面的计算：

$$W = C_2 \frac{\delta_1 h}{I_{2e}}, \quad q = C_3 I_2$$

式中： $W$ ——绕组匝数(匝)；

- $q$ ——导线截面( $\text{mm}^2$ );  
 $C_2、C_3$ ——常数,见表 5—55;  
 $I_{2e}$ ——转子额定电流(A)。

表 5—55 常数  $C_1、C_2、C_3$  值

常 数	负 载 类 型		
	轻 载	重 轻 载	重 载
$C_1$	4.3	8.6	8.6
$C_2$	692	390	292
$C_3$	0.05	0.08	0.10

(4) 窗口宽度计算:

$$C = 6 \frac{Wq}{h}$$

式中: $C$ ——窗口宽度(cm)。

(5) 铁轭厚度、宽度和长度的计算:

$$\delta_2 \geq \frac{3}{4} \delta_1, \quad B \geq D, \quad A \geq 3D + 2C$$

式中: $\delta_2、B、A$ ——分别为铁轭厚度、宽度和长度(cm)。

**例 5—21** 一台 JR 型绕线型异步电动机,额定功率为 180kW,转子额定电流为 398A,现欲用自制管式频敏变阻器重载启动,求变阻器各参数。

**解** 由于电动机是重载启动,查表 5—55 得  $C_1 = 8.6, C_2 = 292, C_3 = 0.10$

(1) 可选择直径为 80mm、管壁厚度为 10mm 的无缝钢管作铁芯。

(2) 钢管高度为

$$h = \frac{C_1 P_e}{2D\delta_1^2} = \frac{8.6 \times 180}{2 \times 8 \times 1^2} = 48.6(\text{cm}) \text{ 可取 } 49\text{cm}$$

(3) 绕组匝数为

$$W = C_2 \frac{\delta_1 h}{I_{2e}} = 292 \times \frac{1 \times 25}{398} = 18.3(\text{匝}), \text{取 } 20 \text{ 匝}$$

在具体绕制时多抽几个头,以作调整之用。

导线截面为

$$q = C_3 I_{2e} = 0.10 \times 398 = 39.8(\text{mm}^2), \text{取 } 40\text{mm}^2$$

(4) 宽口宽度为

$$C \geq 6 \frac{Wq}{h} = 6 \times \frac{20 \times 40}{49} = 98(\text{mm})$$

(5) 铁轭厚度为

$$\delta_2 \geq \frac{3}{4} \delta_1 = \frac{3}{4} \times 1 = 0.75(\text{cm}), \text{取 } 0.8\text{cm}$$

铁轭宽度为  $B \geq D = 80\text{mm} = 8\text{cm}$

铁轭长度为  $A \geq 3D + 2C = 3 \times 8 + 2 \times 9.8 = 43.6(\text{cm})$

## 第七节 电动机干燥计算

### 一、定子铁芯涡流干燥法的计算

定子铁芯的涡流干燥法亦称定子铁损干燥法,它是利用交变磁通在定子铁芯里产生磁滞和涡流损耗使电动机发热到必需的温度进行干燥,适宜干燥较大型的电动机,优点是耗电量较小,较经济。在干燥感应电动机时,须将转子取出。因为这些电动机的空气隙太小,不能安装励磁绕组。图 5—59 为定子尺寸图。

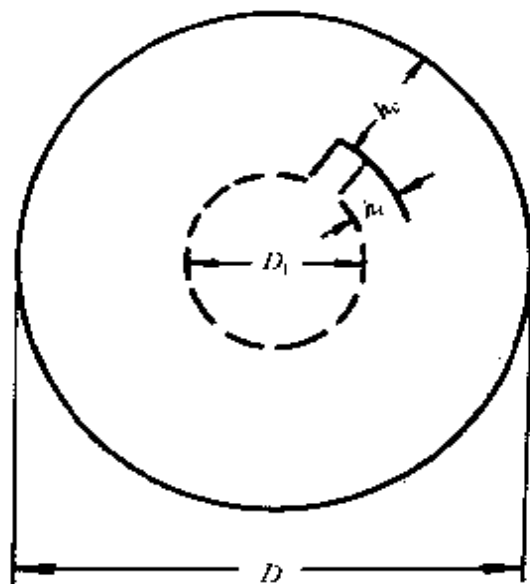


图 5—59 定子尺寸图

1. 定子铁芯尺寸的计算

$$\text{轭高} \quad h_c = \frac{D - D_1}{2} - h_i$$

$$\text{铁轭有效截面} \quad S_c = K_{Fe} l h_c$$

$$\text{铁轭中心直径} \quad D_{cp} = D - h_c$$

式中： $D$ ——定子铁芯外径(cm)；

$D_1$ ——定子铁芯内径(cm)；

$h_i$ ——定子槽深(cm)；

$l$ ——定子铁芯长度(cm)；

$K_{Fe}$ ——铁芯压装系数，一般为 0.92 ~ 0.95，硅钢片不涂漆时取较大值；对于漆绝缘钢片取 0.95；用纸绝缘的铁芯可取 0.9。

2. 励磁绕组匝数的计算

当电源频率为  $f = 50\text{Hz}$  时，

$$W = \frac{45U}{BS_e}$$

式中： $W$ ——励磁绕组匝数(匝)；

$U$ ——励磁绕组电源电压(V)；

$B$ ——定子铁芯磁通密度(T)，一般取 0.60 ~ 1.00。

### 3. 磁化电流和导线截面的选择

$$I = AW/W, \quad q = I_i/j, \quad AW = \pi D_{cp}aw$$

式中： $I_i$ ——磁化电流(A)；

$q$ ——导线截面(mm<sup>2</sup>)；

$AW$ ——磁化安匝(At)；

$aw$ ——定子铁芯单位长度所需安匝数(At/cm)，可参表 5—56 选用。

表 5—56 定子铁芯单位长度所需安匝数

磁通密度 $B$ (T)	$aw$ (At/cm)	
	合金钢	电机硅钢片
0.50	0.66 ~ 0.85	1.5
0.60	1 ~ 1.2	2.2
0.70	1.3 ~ 1.45	2.75
0.80	1.7 ~ 2	3.7
1.00	2.15 ~ 2.8	4.3 ~ 5.6

因为穿绕在铁芯内孔部分的导线温度比绕在外壳表面的导线温度高，所以导线的允许负荷电流应比正常时降低 30 ~ 50%。一般铜导线电流密度  $j$  取 1 ~ 2.3A/cm<sup>2</sup>。

上述计算结果仅作参考。励磁绕组的确实匝数，应在实际烘烤时视电动机的温升情况适当增减，以调节磁化电流。

烘烤时，须用木板将电动机密封起来，维持电动机温度在 80 ~ 90°C，待绕组绝缘温度升高至允许值后即可停止烘烤。

**例 5-22** 有一台电动机定子铁芯外径  $D$  为 85cm, 内径  $D_1$  为 60.5cm, 铁芯长度  $l$  为 31cm, 槽深  $h_c$  为 6.2cm, 现采用铁损法进行干燥, 试计算励磁绕组数值。

**解**

(1) 定子尺寸的计算:

$$\text{轭高 } h_c = \frac{D - D_1}{2} - h_c = \frac{86 - 60.5}{2} - 6.2 = 6.05(\text{cm})$$

$$\text{铁轭有效截面 } S_c = 0.93lh_c = 0.93 \times 31 \times 6.05 = 174(\text{cm}^2)$$

$$\text{铁轭中心直径 } D_{cp} = D - h_c = 85 - 6.05 = 79(\text{cm})$$

(2) 励磁绕组匝数的计算:

采用单相 220V、50Hz 电源, 磁通密度取  $B = 0.9\text{T}$ , 则绕组匝数为

$$W = \frac{45U}{BS_c} = \frac{45 \times 220}{0.9 \times 174} = 63.2(\text{匝}), \text{取 } 64 \text{ 匝}$$

(3) 磁化电流和导线选择:

查表 5-56, 选  $aw = 4\text{At/cm}$ , 则

$$\text{磁化安匝 } AW = \pi D_{cp} aw = \pi \times 79 \times 4 \approx 993(\text{At})$$

$$\text{磁化电流 } I_t = AW/W = 993/64 = 15.5(\text{A})$$

取  $j = 1.5\text{A/mm}^2$ , 则铜导线截面为

$$q = I_t/j = 15.5/1.5 = 10.3(\text{mm}^2)$$

可选用  $\phi 2.63$  的绝缘导线二根并绕 (实际截面为  $10.86\text{mm}^2$ ), 或用  $\phi 2.10$  的绝缘导线三根并绕 (实际截面为  $10.38\text{mm}^2$ )。

## 二、电机外壳涡流干燥法的计算

电机外壳涡流干燥法是将励磁绕组直接绕在定子机壳上, 在电动机机壳内形成涡流而产生热量实现干燥。可利用交流电焊机作为励磁电源。由于焊接变压器可以调节电流, 所以采用此种变压器作电源十分合适。该方法的计算公式如下:

$$\text{干燥电机所需功率 } P = \lambda F(t_1 - t_0)$$

单位面积上的功率损耗  $\Delta P = P/F_t$

励磁绕组的匝数  $W = UK/l$

励磁电流  $I = \frac{P \times 10^3}{U \cos \varphi}$

导线截面  $q = I/j$

式中： $P$ ——干燥电机所需功率(kW)；

$\lambda$ ——导热系数，对于未经预热的电机取  $12 \times 10^{-3} \text{kW/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$ ；  
对于已预热的电机取  $5 \times 10^{-3} \text{kW/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$ ；

$F$ ——机壳外表散热面积( $\text{m}^2$ )；

$t_1$ ——机壳的热态温度，可取  $90^\circ\text{C}$ ；

$t_0$ ——环境温度( $^\circ\text{C}$ )；

$F_t$ ——机壳表面上被励磁绕组覆盖的面积( $\text{m}^2$ )；

$U$ ——外加电源电压(V)；

$K$ ——变量，取决于  $\Delta P$ ，见表 5—57；

$l$ ——电机周长(m)；

$\cos \varphi$ ——功率因数，取  $0.5 \sim 0.7$ ；

$I$ ——励磁电流(A)；

$j$ ——电流密度( $\text{A/mm}^2$ )，铜导线取 4.5，铝导线取 3。

表 5—57 变量  $K$  与  $\Delta P$  的关系

$\Delta P$ (kW/m <sup>2</sup> )	$K$	$\Delta P$ (kW/m <sup>2</sup> )	$K$	$\Delta P$ (kW/m <sup>2</sup> )	$K$	$\Delta P$ (kW/m <sup>2</sup> )	$K$
0.1	4.21	1	1.85	1.8	1.49	2.8	1.27
0.3	2.76	1.2	1.72	2	1.44	3	1.24
0.5	2.3	1.4	1.63	2.2	1.39	3.25	1.2
0.7	2.06	1.5	1.6	2.4	1.35	3.5	1.18
0.9	1.9	1.6	1.55	2.6	1.31	4	1.12



**例5—23** 现用一台65V的电焊变压器作电源对电动机进行涡流干燥,已知电动机表面积 $F$ 为 $8\text{m}^2$ ,励磁绕组覆盖面积 $F_l$ 为 $4.8\text{m}^2$ ,环境温度 $t_0$ 为 $10^\circ\text{C}$ ,电机周长 $l$ 为 $4.2\text{m}$ ,试计算励磁绕组数值。

**解**

(1) 因电动机未经预热, $\lambda$ 取 $12 \times 10^{-3}\text{kW}/\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$ ,则干燥电动机所需功率为

$$P = \lambda F(t_1 - t_0) = 12 \times 10^{-3} \times 8 \times (90 - 10) = 7.68(\text{kW})$$

(2) 单位功率损耗为

$$\Delta P = P/F_l = 7.68/4.8 = 1.6(\text{kW}/\text{m}^2)$$

由表5—56可知,当 $\Delta P = 1.6$ 时, $K = 1.55$

$$W = UK/l = 65 \times 1.55/4.2 = 24(\text{匝})$$

(3) 励磁绕组的匝数为

$$W = UK/l = 65 \times 1.55/4.2 = 24(\text{匝})$$

(4) 励磁电流为

$$I = \frac{P}{U \cos \varphi} = \frac{7680}{65 \times 0.7} = 168.8(\text{A})$$

(5) 导线截面为

$$q = I/j = 168.8/3 = 56.3(\text{mm}^2)$$

可选用70或50 $\text{mm}^2$ 的铝芯导线作励磁绕组。

### 三、热风干燥法的计算

热风干燥法一般用电炉或蒸汽蛇形管等来加热。若以电炉加热为例,电炉所需功率为

$$P = 0.0167C_p Q(t_1 - t_0)$$

式中: $P$ ——电炉所需功率(kW);

$C_p$ ——空气的定压比热( $\text{kJ}/\text{m}^3 \cdot \text{k}$ ),这儿取1.3;

$Q$ ——每分钟通过烘房的热风量( $\text{m}^3$ ), $Q = 1.5q$ ;

- $q$ —— 烘房容积( $m^3$ );
- $t_1$ —— 进口热风温度( $^{\circ}C$ );
- $t_0$ —— 周围空气温度( $^{\circ}C$ )。

注意:进风口热风温度要逐步上升,最高温度不超过  $95^{\circ}C$ 。

#### 四、干燥温度和其它参数的检测

在干燥过程中,应定期检查绕组和铁芯的温度。为此,可在电机里埋设温度计、温度指示器或通过电阻来确定温度。干燥时绕组最热点的温度最大允许值见表 5—58。

表 5—58 干燥电机允许温度

测试位置	测试方法	最高允许温度( $^{\circ}C$ )
绕 组	温度计	70
	电阻法	90
	热电偶	80
排气口的空气	温度计	65

绕组的电阻随温度而变化是通过电阻值确定温度的依据。热态时绕组的温度可由第五节绕组温升计算中的方法计算。

在干燥过程中,应对所有温度计和温度指示器的读数、绝缘电阻  $R_{15}$  和  $R_{60}$  的数值进行记录。根据这些数据绘制出绕组温度对时间的变化曲线和绕组绝缘电阻对时间的变化曲线,即  $T = f(t)$ 、 $R_{60} = f(t)$  和  $R_{60}/R_{15} = f(t)$ 。

### 第八节 电动机绕组计算

#### 一、绕组的基本概念及展开图

##### 1. 三相异步电动机绕组的基本概念

(1) 绕组元件数  $s$ : 电动机绕组由很多线圈构成, 每一个线圈就是一个绕组元件。双层绕组的元件总数与定子槽数  $z$  相等, 即  $s = z$  单层绕组的元件总数是定子槽数的一半, 即  $s = z/2$ 。

(2) 极距  $\tau$ : 极距是指沿定子铁芯内圆, 每个磁极所占有的定子槽数, 即

$$\tau = \frac{z}{2p}$$

式中:  $z$ ——定子铁芯的总槽数;

$p$ ——电动机极对数。

(3) 线圈节距(跨距)  $y$ : 每个线圈的两个有效边, 分别嵌入铁芯的两个不同槽位中, 这两个边所间隔的槽数, 叫做线圈的节距(或称跨距)。如一边嵌在第 1 槽, 另一边嵌在第 5 槽, 则  $y = 5 - 1 = 4$ 。

① 整距绕组: 当线圈的节距等于极距时, 称为整距绕组, 即

$$y = \tau = \frac{z}{2p}$$

② 短距绕组:

$$y < \tau$$

短距绕组的节距一般采用  $y \approx \frac{5}{6}\tau$ , 以削弱 5、7 次谐波的影响。

③ 长距绕组:  $y > \tau$  一般很少采用。

(4) 每槽所占的电度角  $\alpha$ : 三相绕组对称分布在定子槽中, 各相在空间应相互间隔  $120^\circ$  电角度, 所以, 每槽所占的电角度应为

$$\alpha = \frac{2\pi p}{z}$$

式中符号同前。

(5) 相带  $q$ 、定子绕组每极每相槽数

$$q = \frac{\tau}{m} = \frac{z}{2pm}$$

式中： $m$ ——定子绕组相数。

一个极距  $\tau$  对应的电角度为  $180^\circ$ ，三相交流电  $m = 3$ ，所以相带占  $180^\circ/3 = 60^\circ$  电角度。按上述规律安排的绕组又称为  $60^\circ$  相带绕组。

若  $q$  为整数者，叫做整数槽绕组； $q$  为分数者，叫做分数槽绕组。

绕圈安放和联接时，往往是将一个相带内的  $q$  个元件串联为一组，称为极相组，俗称“联”。

2. 绕组安排的原则与展开图

三相绕组的分布、排列与联接，可用展开图来表示。现以三相四极 24 槽等元件式单层整距绕组为例说明绕组安排的原则和步骤。

(1) 各绕组在每个磁极下应均匀分布，以达到磁场的对称。

① 分极：按定子槽数  $z$  画出定子槽，并编上序号。按磁极数  $2p$  等分定子槽  $z$ ，磁极按  $S、N、S、N\dots$  交错排列，如图 5—60(b) 所示。

该例中  $z = 24, 2p = 4$ ，相数  $m = 3$ ，故

$$\text{每极槽数} = \frac{z}{2p} = \frac{24}{4} = 6(\text{槽})$$

② 分相：每个磁极下的槽数按均分成三个相带，每个相带占  $60^\circ$  电角度，每极每相槽数为

$$q = \frac{z}{2pm} = \frac{24}{2 \times 2 \times 3} = 2(\text{槽})$$

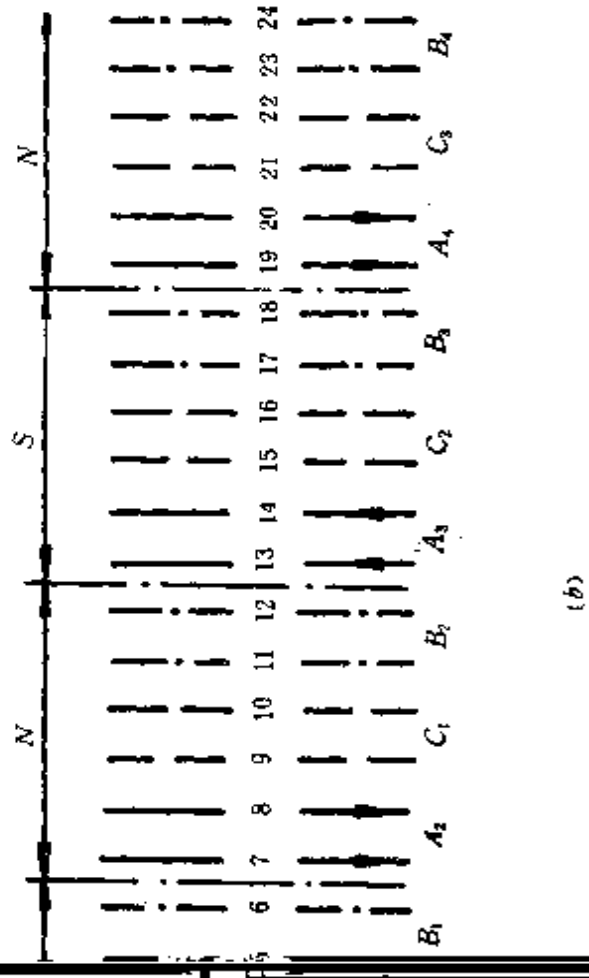
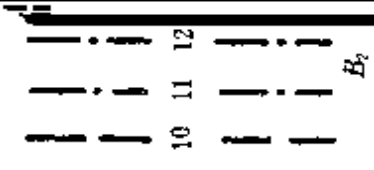


图 5-60 槽的分极及分相



槽的

(2) 画出各相绕组的电源引出线:绕组的起端或末端,彼此应间隔  $120^\circ$  电角度,如图 5—60 中  $U_1、V_1、W_1$  之间,或  $U_2、V_2、W_2$  之间各相隔  $120^\circ$  电角度。每槽所占电角度  $\alpha$  为

$$\alpha = \frac{2\pi p}{z} = \frac{360^\circ \times 2}{24} = 30^\circ$$

若  $A$  相的起端  $U_1$  在第 1 槽,则  $B$  相的起端  $V_1$  应在第 5 槽,  $C$  相的起端  $W_1$  应在第 9 槽。由于每极每相槽数为 2,故  $A$  相在各极相带的槽号是 1、2、7、8、13、14、19、20;  $B$  相在各极相带的槽号是 5、6、11、12、17、18、23、24;  $C$  相在各极相带的槽号是 9、10、15、16、21、22、3、4。可以看出,在每个磁极下,三相绕组的排列顺序是  $A、C、B$ ,如图 5—61 所示。

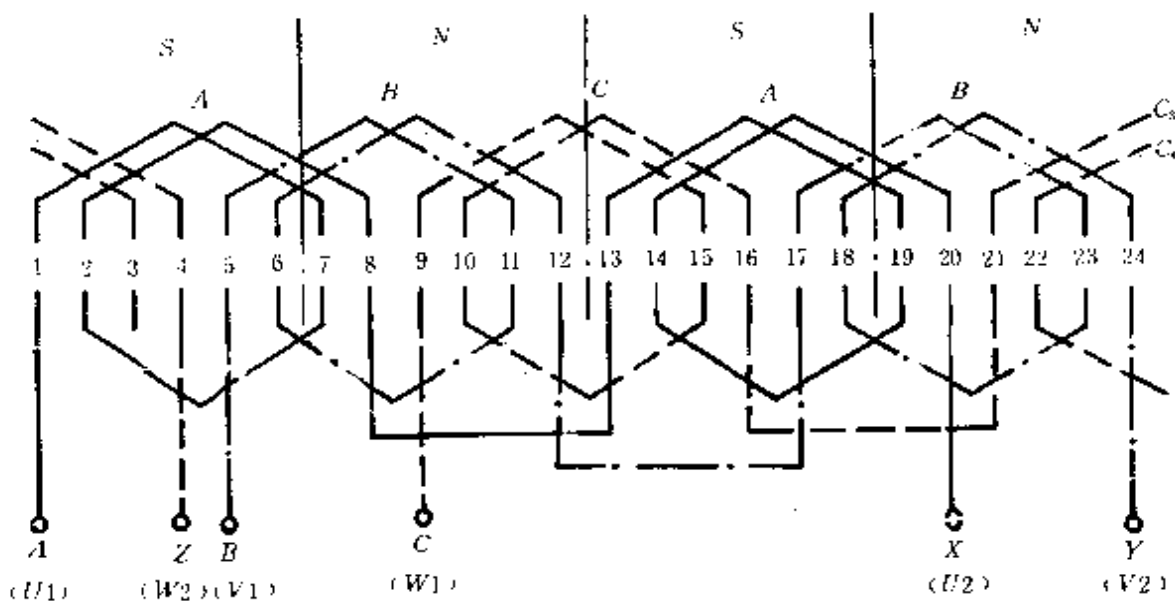


图 5—61 三相等元件式单层整距绕组展开图

(3) 标出电流方向:同一相绕组的各个有效边在同一磁极下电流方向应相同,而在相异磁极下电流方向应相反,见图 5—60(b)。应注意:

- ①  $A、B、C$  对应相带 ( $A_1、B_1、C_1、A_2、B_2、C_2$  等) 均应间隔

120°;

② 在一个磁极下各相带槽中电流方向相同。

(4) 确定绕组型式:绕组可分为单层绕组和双层绕组。单层绕组元件总数为定子槽数的一半,按节距的不同,又可分链式绕组、交叉链式绕组、同心式绕组、等元件式整距绕组等;双层绕组元件总数等于定子槽数,按元件的样式分布的不同,又可分为迭绕组和波绕组。

(5) 确定线圈节距  $y$ :采用等元件式单层整距绕组,其节距为

$$y = \tau = \frac{z}{2p} = \frac{24}{4} = 6 \text{ 槽}(1 \sim 7 \text{ 槽})$$

即一个元件的起端边若嵌在第 1 槽,则末端边应嵌在第 7 槽。根据线圈的节距,即可将两有效边联为一个元件。

(6) 顺电流方向将同相线圈串联:如图 5—61 所示,每相绕组均由两组线圈组成,顺着电流方向 A 相第一组线圈的尾(第 8 槽)与第二组线圈的头(第 13 槽)相联,这就联成 A 相绕组。同样可画出 B 相和 C 相绕组。最后剩下 6 个接线头,即 A 相绕组的  $U_1(A)$ 、 $U_2(X)$ ;B 相绕组的  $V_1(B)$ 、 $V_2(Y)$  和 C 相绕组的  $W_1(C)$ 、 $W_2(Z)$ 。

## 二、三相异步电动机定子绕组的计算

在修理铭牌失落或数据不全的电动机时,以及需要改变某些性能的电动机时,需要通过计算得出电动机的各种技术数据。

### 1. 定子绕组匝数计算

(1) 每相串联匝数:

$$W_1 = \frac{K_e U_e}{4.44 k_{ap} f \phi}$$

式中:  $W_1$  —— 每相串联匝数(匝);

$K_e$  —— 降压系数(又称电势系数),小型电动机取 0.86;中型电动机取 0.90;大型电动机取 0.91;

- $U_x$ ——相电压(V);
- $k_{dq}$ ——绕组系数;
- $f$ ——电源频率(Hz);
- $\phi$ ——每极气隙磁通(Wb)。

(2) 每极磁通:

$$\phi = \frac{B_g D_1 l}{p}$$

式中: $\phi$ ——每极磁通(Wb);

$B_g$ ——气隙磁通密度(T),应根据电动机的具体情况选取,如铁芯材料差、气隙大、极数少等应取小值;另外可根据电动机工作是否间歇、短时,通风冷却条件等情况,适当调整,参见表 5—1;

$D_1$ ——定子内径(cm);

$p$ ——电动机极对数;

$l$ ——定子铁芯长度(cm)。

定子、转子铁芯间的气隙应符合表 5—59 所给的范围。也可用以下经验公式计算:

$$\delta \approx 3(4 + 0.7 \sqrt{D_1 l}) \times 10^{-2}$$

式中: $\delta$ ——定、转子铁芯间的气隙(mm);

若气隙过大,应降低  $B_g$  值,以保证电动机的空载电流不致过大,功率因数不致过低。

(3) 绕组系数  $k_{dp}$ :

① 分布系数  $k_{d1}$ :  $k_{d1}$  是由于一个极相组的各个线圈分嵌在不同槽内引起的,  $k_{d1}$  的大小和每极每相槽数  $q$  有关。 $q$  越大,  $k_{d1}$  越小,在  $q > 6$  以后,  $k_{d1}$  趋于一个常数。 $k_{d1}$  值可由表 5—60 查得



三相异步电动机的气隙长度

表 5—59

		功 率 (kW)												
		0.2 以下	0.2 ~ 1.0	1.0 ~ 2.0	2.5 ~ 5	5 ~ 10	10 ~ 20	20 ~ 50	50 ~ 100	100 ~ 200	200 ~ 300	300 ~ 500		
		气 隙 $\delta$ (mm)												
2	0.25	0.3	0.35	0.4	0.5	0.65	0.8	1.0	1.25	1.5	2.0			
4, 6, 8	0.2	0.25	0.3	0.35	0.4	0.45	0.5	0.65	0.8	1.0	1.5	2.0	1.5	

表 5—60 分布系数  $k_{d1}$  值

每极每相槽数 $q$	1	2	3	4	5	6	7 以上
分布系数 $k_{d1}$	1.0	0.966	0.960	0.958	0.957	0.956	0.956

(2) 短距系数  $k_{p1}$ : 双层绕组的线圈都采用短距, 其节距  $y$  小于极距  $\tau$ 。  $y$  越小,  $k_{p1}$  也越小。  $k_{p1}$  值可由表 5—61 查得

(3) 绕组系数  $k_{dp}$ :

$$k_{dq} = k_{d1}k_{p1}$$

对于单层绕组, 当采用全距线圈时,  $k_{p1} = 1$ , 故  $k_{dp} = k_{d1}$ 。

(4) 每相串联导线根数:

$$N_1 = \frac{K_s U_s P \times 10^4}{2.22 k_{dp} f B_s D_1 l}$$

(5) 每槽导线根数: 每槽导线根数  $N$  与每相串联导线根数  $N_1$  之间有如下关系

$$N_1 = \frac{Nz}{ma}$$

经推算, 得

$$N = \frac{K_s U_s P_m a \times 10^4}{2.22 k_{dp} f B_s D_1 l z}$$

将  $f = 50\text{Hz}$ 、 $m = 3$  (三相异步电动机) 代入上式, 得

$$N = \frac{K_s U_s P a \times 10^4}{37 k_{dp} B_s D_1 l z}$$

式中:  $a$ ——电动机绕组并联支路数;

其它符号同前。

(6) 每个线圈的匝数  $W_y$ :

① 双层绕组: 由于每一槽中有上下两个线圈边, 故

$$W_y = N/2$$

整个电动机绕组的线圈总数等于槽数  $z$ , 每相线圈数为  $z/3$ 。

② 单层绕组:

$$W_y = N$$

整个电动机绕组的线圈总数等于  $z/2$ , 每相线圈数为  $z/6$ 。

按以上公式求得的线圈匝数, 在电动机气隙正常的情况下才适用。若气隙不在规定范围, 则需适当增加线圈匝数以减小空载电流, 使电动机的性能满足要求。

(7) 极对数的估算:

对于无铭牌的电动机, 极对数  $p$  可按下式估算:

$$p = 0.28 \frac{D_1}{h_c}$$

式中:  $h_c$ ——定子铁芯实际轭高(cm), 见图 5—59;

$$h_c = \frac{D - D_1}{2} - h_i$$

其它符号同前。

2. 额定功率的估算

(1) 估算方法一: 用定子铁芯尺寸来估算额定功率, 即

$$P_e = KD_1^3 l$$

式中:  $P_e$ ——电动机的额定功率(kW)

$K$ ——估算系数, 见表 5—62;

其它符号同前。

(2) 估算方法二: 用三相功率公式估算额定功率, 即

$$\begin{aligned} P_e &= 3U_x I_x \cos\varphi \eta \times 10^{-3} \\ &= \sqrt{3} U_l I_l \cos\varphi \eta \times 10^{-3} (\text{kW}) \end{aligned}$$

式中:  $U_x, U_l$ ——电动机额定相电压和线电压(V);

$I_x, I_l$ ——电动机额定相电流和线电流(A);

$\cos\varphi, \eta$ ——电动机的功率因数和效率, 可由同类电动机的技术数据中查得。

表 5—61

短 距 系 数

节距 $y$	每 极					
	24	18	16	15	14	13
1 ~ 25	1.000					
1 ~ 24	0.998					
1 ~ 23	0.991					
1 ~ 22	0.981					
1 ~ 21	0.966					
1 ~ 20	0.947					
1 ~ 19	0.924	1.000				
1 ~ 18	0.897	0.996				
1 ~ 17	0.866	0.985	1.000			
1 ~ 16	0.832	0.966	0.995	1.000		
1 ~ 15	0.793	0.940	0.981	0.995	1.000	
1 ~ 14	0.752	0.906	0.956	0.978	0.994	1.000
1 ~ 13	0.707	0.866	0.924	0.951	0.975	0.993
1 ~ 12		0.819	0.882	0.914	0.944	0.971
1 ~ 11		0.766	0.831	0.866	0.901	0.935
1 ~ 10		0.707	0.773	0.809	0.847	0.884
1 ~ 9			0.707	0.743	0.782	0.833
1 ~ 8				0.669	0.707	0.749
1 ~ 7						0.663
1 ~ 6						
1 ~ 5						
1 ~ 4						



表 5-62 估算系数  $K$  值

极 数		2	4	6	8
K	防护式	$28 \times 10^{-5}$	$14 \times 10^{-5}$	$8 \times 10^{-5}$	$5.4 \times 10^{-5}$
	封闭式	$16.8 \times 10^{-5}$	$8.4 \times 10^{-5}$	$4.8 \times 10^{-5}$	$3.24 \times 10^{-5}$

(3) 估算方法三：用额定线电流估算，即

$$P_e = \frac{I_e}{(1.8 \sim 2.2)}$$

小电机分母取大值，大电机分母取小值。

### 3. 导线截面的选择

(1) 根据额定功率选择导线截面：

① 根据估算出的额定功率  $P_e$ ，求出额定电流：

$$I_e = \frac{P_e \times 10^3}{\sqrt{3} U_e \eta \cos \varphi}$$

式中： $I_e$ ——电动机额定电流(A)；

$U_e$ ——电源额定线电压，即  $U_L$ (V)。

电动机绕组的相电流  $I_x$  为

星形联接时  $I_x = I_e$

三角形联接时  $I_x = I_e / \sqrt{3}$

② 定子导线截面：

$$q_1 = \frac{I_x}{anj}$$

式中： $q_1$ ——定子导线截面( $\text{mm}^2$ )；

- $a$ —— 并联支路数；
- $n$ —— 导线并绕根数；
- $j$ —— 定子电流密度(A/mm<sup>2</sup>)，铜导线一般可按表 5—63 选取或参照相近规格的电机技术数据中查得。

表 5—63 中小型电动机定子电流密度  $j$ (A/mm<sup>2</sup>)

型式 \ 极数	2		4	5	8
	密封式	4.0 ~ 4.5		4.5 ~ 5.5	
开启式	5.0 ~ 6.0		5.5 ~ 6.5		5.0 ~ 6.0

表中数据较适用新系列产品，对老产品应酌情减低 10 ~ 15%。一般功率大者取小值，功率小者取大值。

③ 导线直径选择原则：一般 5 号机座以下的电动机，单根导线的直径最好不超过  $\phi 1.25$ ；6 ~ 9 号机座的电动机单根导线的直径最好不超过  $\phi 1.68$ 。导线并绕根数  $n$  最好不超过 4 根。若所需导线总的截面过大，则可增加电动机并联支路数  $a$ 。

确定导线线规后，还应校验槽满率  $F_k$ 。校验槽满率的方法如下：

把实际槽形描印下来进行测量，如图 5—62 所示。槽楔厚度  $h$  可从拆下的实物量取，一般为 2 ~ 3.5mm。

槽内导线总面积(即槽有效面积)为

$$S_{zz} = S_s - S_i$$

式中： $S_s$ —— 槽面积(mm<sup>2</sup>)；

$S_i$ —— 槽绝缘占面积(mm<sup>2</sup>)。

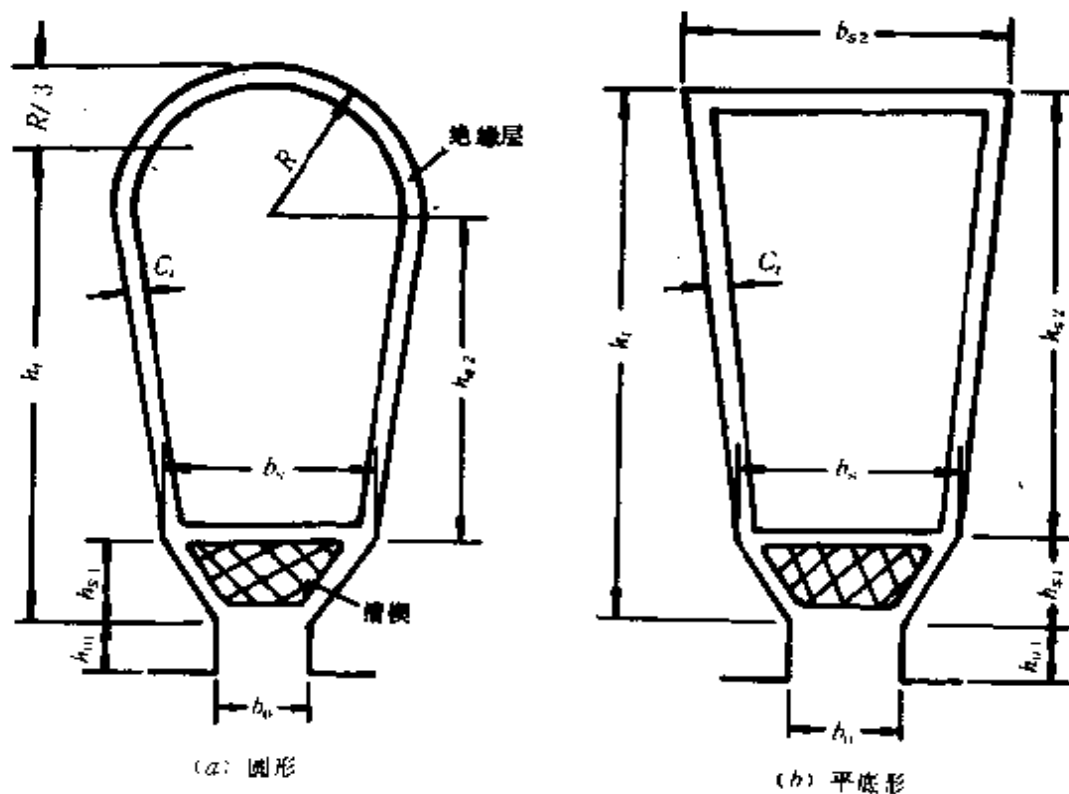


图 5—62 槽尺寸

对于图 5—62(a)所示圆底槽

$$S_s = \frac{2R + b_s}{2} (h_{s1} + h_{s2} - h) + \frac{\pi R^2}{2}$$

单层绕组  $S_i = C_i [2(h_{s1} + h_{s2}) + \pi R + b_s]$

双层绕组  $S_i = C_i [2(h_{s1} + h_{s2}) + \pi R + 2R + b_s]$

对于图 5—62(b)所示平底槽

$$S_s = \frac{b_{s1} + b_{s2}}{2} (h_{s1} + h_{s2} - h)$$

单层绕组  $S_i = C_i [2(h_{s1} + h_{s2}) + b_{s1} + b_{s2}]$

双层绕组  $S_i = C_i [2(h_{s1} + h_{s2}) + 2b_{s2} + b_{s1}]$

式中： $h$ ——槽楔厚度，一般取 2~4mm；



$C_i$ ——槽绝缘材料厚度(mm),可按电动机的工作电压和绝缘等级来确定,见表5-64和表5-65;或按下面数值估计;

A级绝缘,  $C_i=0.35\sim 0.45\text{mm}$ ;

B级绝缘,  $C_i=0.44\sim 0.50\text{mm}$ ;

E级绝缘, 1~2号机座,  $C_i=0.22\text{mm}$ ; 3~5号机座,  $C_i=0.27\text{mm}$ , 6~9号机座,  $C_i=0.42$ 。

表5-64 Y系列定子绕组槽绝缘规范 (mm)

外壳防护等级	中心高	槽绝缘形式及总厚度				槽绝缘均匀伸出铁芯二端长度
		DMDM	DMD+M	DMD	DMD+DMD	
IP44	80~112	0.25	0.25 (0.20+0.05)	0.25		6~7
	132~160	0.30	0.30 (0.25+0.05)			7~10
	180~280	0.35	0.35 (0.30+0.05)			12~15
	315	0.50			0.50 (0.20+0.30)	20
IP23	160~225	0.35	0.35 (0.30+0.05)			11~12
	250~280		0.40 (0.35+0.05)		0.40 (0.20+0.20)	12~15

注,0.25mmDMD其中间层薄膜厚度为0.07mm;D为聚脂纤维无纺布;M为6020聚酯薄膜。

表 5—65 J<sub>2</sub>、JO<sub>2</sub> 系列定子绕组槽绝缘规范 (mm)

机座号	绝缘材料及其厚度	总厚度
1~2	0.22 聚脂薄膜复合绝缘(一层)	0.22
3~5	0.27 聚脂薄膜复合绝缘(一层)。	0.27
6~9	0.27 聚脂薄膜复合绝缘+0.15 三聚氰胺醇玻璃丝漆布	0.42

槽有效面积  $S_{ux} = S_s - S_i$

槽满率  $F_k = \frac{nNd^2}{S_{ux}}$

式中： $n$ ——导线并绕根数；

$N$ ——每槽导线根数；

$d$ ——绝缘导线外径 (mm)。

槽满率  $F_k$  是表示导线在槽内填充程度的重要指标。 $F_k$  应控制在 0.60~0.75 范围内。小型异步电动机的  $F_k = 0.75 \sim 0.80$ 。若槽满率过高,会使嵌线困难,容易损伤绝缘。为了降低槽满率,可用适当减少槽楔厚度,或适当提高一些电流密度  $j$ ,使线径细点。

(2)根据铁芯槽形选择导线截面:对没有铭牌的电动机由于  $d = \sqrt{\frac{S_{ux} F_k}{nN}}$ ,所以只要得到上述参数,便可求出导线直径,从而确定导线截面。

①决定极数及绕组形式:极数  $2p$  与定子铁芯内、外径比  $D_1/D$  的关系见表 5—66。

绕组型式主要由每极每相槽数  $q$  及层数确定,  $q = \frac{z}{2pm}$ 。

表 5—66  $D_1/D$  与  $2p$  的关系

$D_1/D$	0.56	0.64	0.68	0.71
极数 $2p$	2	4	6	8 及以上

当定子外径  $D \leq 245\text{mm}$  时,采用单层绕组,常用节距见表 5—67。

表 5—67 根据不同相带  $q$  来选用绕组型式及节距  $y$

定子外径 $D$ (mm)	$D \leq 245$			$D > 245$			
	2	3	4	2	3	4	5
每极每相槽数 $q$							
绕组型式	单层 链式	单层 交叉式	单层 同心式	双层 迭绕	双层 迭绕	双层 迭绕	双层 迭绕
节距 $y$	1~6	2/1~9 1/1~8	1~12 2~11	1~6	1~8 1~9	1~11	1~13 1~14

②每槽导线根数为 
$$N \approx \frac{U_z 2pa \times 10^2}{K' z D_1 l B_g}$$

式中:  $U_z$ ——相电压,绕组 Y 接法时为 220V,  $\Delta$  接法时为 380V。可同时作两种计算,最后根据可能有的导线尺寸,决定一种接法;

$B_g$ ——气隙磁通密度(T),见表 5—1;

$K'$ ——系数,单层绕组的小电机取 0.85;双层绕组的大电机取 0.80。

算出的  $N$ ,单层绕组应取整数;双层绕组应取偶数。

③导线截面  $q_1$  的选择:有两种方法。

方法一是按槽满率  $F_k$  来求导线直径  $d = \sqrt{\frac{S_{wz} F_k}{nN}}$ , 修理电动机的  $F_k$  取 75% 为宜。

方法二是按填充系数  $K_q$  来求导线的截面  $q_1$ 。即先根据槽形尺寸算出槽楔下的槽面积  $S_s$ , 然后按下式算出槽内导线的总面积:

$$S = K_q S_s$$

式中:  $K_q$  ——填充系数, 见表 5—68,  $K_q$  值大, 槽的空间利用率高, 但增加嵌线难度。

表 5—68 填充系数  $K_q$  值

导线种类	$K_q$
双纱包圆线	0.32~0.35
单纱包圆线	0.38~0.40
漆包圆线	0.42~0.45

填充系数与槽满率定义不同, 而含义一样。

每根导线的截面  $q_1$  为

$$q_1 = S/N$$

(3) 额定电流计算: 计算出导线截面后, 便可求出额定电流。

先根据导线截面  $q_1$  来估算支路电流  $I_{\text{支}}$ :

$$I_{\text{支}} = q_1 j$$

式中:  $j$  ——电流密度 ( $A/mm^2$ ), 铜导线可由表 5—63 选取; 铝导线可由表 5—69 选取, 封闭式电机取小值, 四极以上电机取大值。

表 5—69 铝导线电动机定子外径  $D$  与电流密度  $j$  的关系

定子铁芯外径 $D$ (mm)	120~210	210~350	350~500
电流密度 $j$ ( $A/mm^2$ )	2.6~4.3	2.8~4.0	2.2~3.3

额定相电流  $I_x$  为

$$I_x = I_a = qja$$

式中： $a$ ——并联支路数，见表 5—70 或按  $2p/a$  必须是整数来选取。

表 5—70 并联支路数  $a$  与极数  $2p$  的关系

极数 $2p$	2	4	6	8	10	12
并联支路数 $a$	1、(2)	1、2、(4)	1、2、3、(6)	1、2、4、(8)	1、2、5、(10)	1、2、3、4、6、(12)

注：有( )的并联支路数只适用于双层绕组。

电动机额定电流  $I_e$  为

星形接法  $I_e = I_x$ ，三角形接法  $I_e = \sqrt{3} I_x$

### 三、单层交叉式绕组线模的计算

在计算线模之前，需记录下列数据：定子铁芯内径  $D_1$ 、定子铁芯长度  $l$ 、电机极对数  $p$ 、定子槽数  $z$ 、线圈节距  $y(y_1, y_2 \dots)$ 、绝缘导线外径  $d$ 、每个线圈的匝数  $W_y$ 、定子槽口宽度  $b_0$ 、定子槽高  $h_c$ 、定子内径表面到槽楔底侧的距离  $h_{01}$ 。以上单位均为 mm。

1. 每极槽数  $z_p = \frac{z}{2p}$

2. 各线圈的短距率(节距系数)

小线圈  $\beta_1 = \frac{y_1}{z_p} = \frac{2y_1 p}{z}$

$$\text{大线圈 } \beta_2 = \frac{2y_2 p}{z}$$

式中： $y_1、y_2$ ——大、小线圈的线圈节距。

3. 线圈跨距

$$\text{小线圈 } \tau_{y1} = \frac{\pi(D_1 + 2h'_1)}{2p} \beta_1$$

$$\text{大线圈 } \tau_{y2} = \frac{\pi(D_1 + 2h'_1)}{2p} \beta_2$$

式中： $h'_1 = \frac{1}{2}(h_1 + h_{01})$

4. 线圈端部长度

$$\text{小线圈 } l_{d1} = k\tau_{y1}$$

$$\text{大线圈 } l_{d2} = k\tau_{y2}$$

$$C = l_{d1} + l_{d2}$$

式中： $k$ ——系数，见表 5—71。

表 5—71

$k$  值表

极数 $2p$	2	4		6	8
绕组型式	单层同心式	交叉式	链式	链式	链式
跨距	1—12 2—11	2/1—9 1/1—8	1—6	1—6	1—6
$k$ 值	1.16	1.20	1.20	1.20	1.25

5. 线圈所占面积  $S = d^2 W_y$

6. 线模厚度  $b$  按表 5—72 选择。

表 5—72 线模厚度  $b$  值

极数	机座号	线模厚度 $b$ 值				
		1	2	3	4	5
2		7.5	8.5	9	10	12
4		7.5	8	8.5	9	10
6		—	8	8.5	9	10
8		—	—	—	9	10

7. 线模高度  $h_b = S/b$

通常  $b/h_b = 0.9 \sim 1.4$

8. 各线模宽度

小线圈

$$\tau_1 = \sqrt{\left(\frac{D_1 + h_t + h_{c1}}{2}\right)^2 + \left(\frac{D_1}{2}\right)^2} - 2\left(\frac{D_1 + h_t + h_{c1}}{2}\right)\frac{D_1}{2}\cos\theta_1$$

$$-b_0, \quad \theta_1 = \frac{2\pi}{z}y_1$$

大线圈

$$\tau_2 = \sqrt{\left(\frac{D_1 + h_t + h_{c1}}{2}\right)^2 + \left(\frac{D_1}{2}\right)^2} - 2\left(\frac{D_1 + h_t + h_{c1}}{2}\right)\frac{D_1}{2}\cos\theta_2$$

$$-b_0, \quad \theta_2 = \frac{2\pi}{z}y_2$$

9. 各线圈端部长度

$$\text{小线圈 } l'_{d1} = \frac{(\tau_1 + h_b)^2 - (\tau_2 + h_b)^2 + C^2}{2C}$$

$$\text{大线圈 } l'_{d2} = C - l'_{d1}$$

10. 线圈端部高度

$$\text{小线圈 } h'_{1} = \sqrt{\frac{3}{16} [l'^2_{d1} - (\tau_1 + h_b)^2]}$$

$$\text{大线圈 } h'_{2} = \sqrt{\frac{3}{16} [l'^2_{d2} - (\tau_2 + h_b)^2]}$$

11. 线模总长

$$\text{小线圈 } L_1 = l + 2F + 2 \left( h'_{1} - \frac{h_b}{2} \right)$$

$$\text{大线圈 } L_2 = l + 2F + 2 \left( h'_{2} - \frac{h_b}{2} \right)$$

式中:  $2F$ ——见表 5—73。

表 5—73

$2F$  值

极数	电机功率 (kW)	$2F$ 值			
		1 以下	1~3	3.5~4	4.5~15
2		20	20	30	30
4		20	25	30	30
6		20	22	24	30
8		20	22	24	30

12. 线模端部圆弧半径

$$\text{小线圈 } R_1 = \frac{2h'_{1} - h_b}{4} + \frac{2\tau_1^2}{16h'_{1} - h_b}$$

$$\text{大线圈 } R_2 = \frac{2h'_{2} - h_b}{4} + \frac{2\tau_2^2}{16h'_{2} - h_b}$$

13. 线圈总长

$$L'_2 = l + 2F + l_d,$$



$$l_d = \frac{1}{3} (2l'_{d2} + l'_{d1})$$

图 5—63 为单层交叉式绕组线模外形尺寸

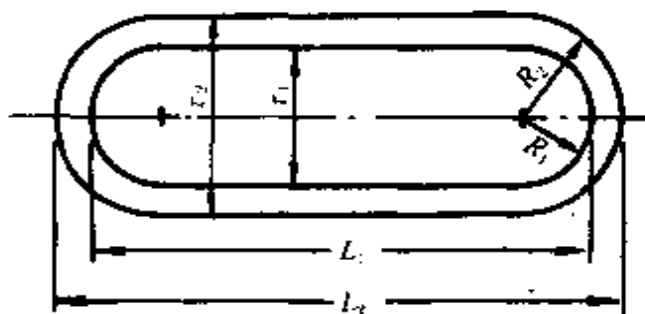


图 5—63 单层交叉式绕组线模外形尺寸

**例 5—24** 有一台无铭牌电动机,测得定子铁芯尺寸和旧绕组数据如下:铁芯内径  $D_1$  为 104mm,铁芯长  $l$  为 95mm,槽数  $z$  为 36,定子槽高  $h_1$  为 16.5mm,定子内径表面到槽楔底侧的距离  $h_{01}$  为 3.5mm,槽口宽度  $b_0$  为 2.5mm,极对数  $p$  为 2,每个线圈 43 匝,线径  $\phi 1.0/\phi 1.10$ ,试计算配单层交叉式绕组的线模尺寸。设线圈跨距为:2/1—9,1/1—8,即  $y_1=7, y_2=8$ 。

**解** 各线圈的短距率

$$\beta_1 = \frac{2y_1 p}{z} = \frac{2 \times 7 \times 2}{36} = 0.778$$

$$\beta_2 = \frac{2y_2 p}{z} = \frac{2 \times 8 \times 2}{36} = 0.889$$

$$h' = \frac{1}{2} (h_1 + h_{01}) = \frac{1}{2} (16.5 + 3.5) = 10(\text{mm})$$

各线圈跨距

$$\tau_1 = \frac{\pi(D_1 + 2h'_1)}{2p} \beta_1 = \frac{\pi(104 + 2 \times 10)}{4} \times 0.778$$

$$= 75.8(\text{mm})$$

$$\tau_2 = \frac{\pi(D_1 + 2h'_2)}{2p} \beta_2 = \frac{\pi(104 + 2 \times 10)}{4} \times 0.889$$

$$= 86.6(\text{mm})$$

线圈端部长度  $l_{d1} = k\tau_1 = 1.2 \times 75.8 = 91(\text{mm})$

$$l_{d2} = k\tau_2 = 1.2 \times 86.6 = 104(\text{mm})$$

$$C = l_{d1} + l_{d2} = 195(\text{mm})$$

线圈所占面积  $S = d^2 W_y = 1.1^2 \times 43 = 52(\text{mm}^2)$

由表 5-72 中取线模厚度  $b = 8.5\text{mm}$ , 则线模高度  $h_b = S/b = 52/8.5 = 6.12(\text{mm})$ 。

校验: 由于  $b/h_b = 8.5/6.12 = 1.39$ , 在  $b/h_b = 0.9 \sim 1.4$  之间, 所以合适。

线模宽度

$$\tau_1 = \sqrt{\left(\frac{D_1 + h_i + h_{01}}{2}\right)^2 + \left(\frac{D_1}{2}\right)^2 - 2\left(\frac{D_1 + h_i + h_{01}}{2}\right)\frac{D_1}{2}\cos\theta_1} - b_0$$

$$= \sqrt{\left(\frac{104 + 16.5 + 35}{2}\right)^2 + \left(\frac{104}{2}\right)^2 - 2\left(\frac{104 + 16.5 + 35}{2}\right)\frac{104}{2}\cos 70^\circ} - 2.5$$

$$= 63.6(\text{mm}), \text{取 } 64\text{mm}$$

$$\theta_1 = \frac{2\pi}{z} y_1 = \frac{360^\circ}{36} \times 7 = 70^\circ$$

$$\tau_2 = \sqrt{\left(\frac{104 + 16.5 + 3.5}{2}\right)^2 + \left(\frac{104}{2}\right)^2 - 2\left(\frac{104 + 16.5 + 3.5}{2}\right)\frac{104}{2}\cos 80^\circ}$$

$$- 2.5 = 71.5(\text{mm}), \text{取 } 72\text{mm}$$

$$\theta_2 = \frac{2\pi}{z} y_2 = \frac{360^\circ}{2} \times 8 = 80^\circ$$

线圈端部长度

$$l'_{d1} = \frac{(\tau_1 + h_b)^2 - (\tau_2 + h_b)^2 + C^2}{2C}$$

$$= \frac{(64 + 6.12)^2 - (72 + 6.12)^2 + 195^2}{2 \times 195}$$

$$= 94.3(\text{mm})$$

$$l'_{d2} = C - l'_{d1} = 195 - 94.3 = 100.7(\text{mm})$$

线圈端部高度

$$h'_{1} = \sqrt{\frac{3}{16} [l'_{d1}^2 - (\tau_1 + h_b)^2]}$$

$$= \sqrt{\frac{3}{16} [94.3^2 - (64 + 6.12)^2]} = 27.4(\text{mm})$$

$$h'_{2} = \sqrt{\frac{3}{16} [l'_{d2}^2 - (\tau_2 + h_b)^2]}$$

$$= \sqrt{\frac{3}{16} [100.7^2 - (72 + 6.12)^2]} = 27.4(\text{mm})$$

线模总长

查表 5—73, 取  $2F = 30\text{mm}$ , 则

$$L_1 = l + 2F + 2(h'_{1} - h_b/2)$$

$$= 95 + 30 + 2(27.4 - 6.12/2) = 173.7(\text{mm})$$

$$L_2 = l + 2F + 2(h'_{2} - h_b/2)$$

$$= 95 + 30 + 2(27.4 - 6.12/2) = 173.7(\text{mm})$$

取  $L_1 = L_2 = 174\text{mm}$

线模端部圆弧半径

$$R_1 = \frac{2h'_{11} - h_b}{4} + \frac{2\tau_1^2}{16h'_{11} - h_b}$$

$$= \frac{2 \times 27.4 - 6.12}{4} + \frac{2 \times 64^2}{16 \times 27.4 - 6.12}$$

$$= 31.18(\text{mm}), \text{取 } 31\text{mm}$$

$$R_2 = \frac{2 \times 27.4 - 6.12}{4} + \frac{2 \times 72^2}{16 \times 27.4 - 6.12}$$

$$= 36.28(\text{mm}), \text{取 } 36\text{mm}$$

$$l_d = \frac{1}{3}(2l'_{d2} + l'_{d1}) = \frac{1}{3}(2 \times 100.7 + 94.3) = 98.5(\text{mm})$$

$$l'_2 = l + 2F + l_d = 95 + 30 + 98.5 = 224.5(\text{mm})$$

线模图见图 5-63。其中  $\tau_1 = 64$ 、 $\tau_2 = 72$ 、 $L_1 = 174$ 、 $L_2 = 224.5$ 、 $R_1 = 31$ 、 $R_2 = 36$ ，以上单位均为 mm。

#### 四、单层链式绕组线模的计算

$$\text{线圈跨距 } \tau_y = \frac{\pi(D_1 + 2h'_i)}{2p} \beta, \quad h'_i = \frac{1}{2}(h_i + h_{o1})$$

线圈端部长度  $l_d = k\tau_y$ ， $k$  值查表 5-71。

线模高度  $h_b = S/b$

线模宽度

$$\tau_1 = \sqrt{\left(\frac{D_1 + h_i + h_{o1}}{2}\right)^2 + \left(\frac{D_1}{2}\right)^2 - 2\left(\frac{D_1 + h_i + h_{o1}}{2}\right)\frac{D_1}{2}\cos\theta - b_0}$$

$$\theta = \frac{2\pi}{z} y_1$$

$$\text{线圈端部高度 } h'_{11} = \sqrt{\frac{3}{16}[l_d^2 - (\tau_1 + h_b)^2]}$$

线模端部长度  $h''_1 = h'_1 - \frac{h_b}{2}$

线模总长  $L_1 = l + 2F + 2(h'_1 - h_b/2) = l + 2F + 2h'_1 - h_b$

线模端部圆弧半径  $R_1 = \frac{2h'_1 - h_b}{4} + \frac{\tau_1^2}{8h'_1 - 4h_b}$

单层链式绕组线模外形尺寸如图 5—64 所示。

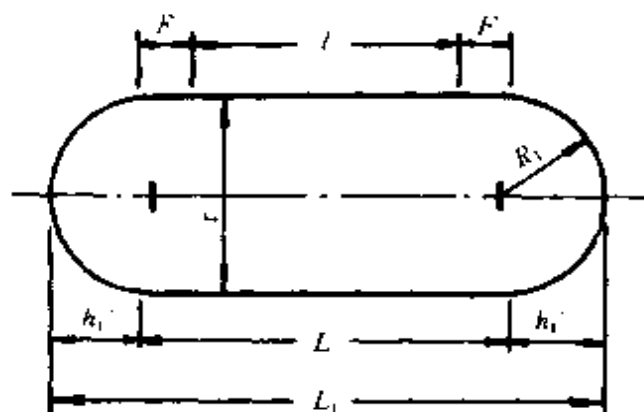


图 5-64 单层链式绕组线模外形尺寸

### 五、单层同心式绕组线模尺寸计算

同心式线圈由两个大小线圈套在一起组成。

小线圈跨距  $\tau_{y1} = \frac{\pi(D_1 + 2h'_{t1})}{2p} \beta_1$

大线圈跨距  $\tau_{y2} = \frac{\pi(D_1 + 2h'_{t2})}{2p} \beta_2$

$$h'_{t1} = \frac{1}{2}(h_t + h_{o1})$$

每极槽数  $z_p = \frac{z}{2p}$

线圈短距率:

小线圈  $\beta_1 = \frac{y_1}{z_p} = \frac{2y_1p}{z}$

大线圈  $\beta_2 = \frac{y_2}{z_p} = \frac{2y_2p}{z}$

线圈端部长度:

小线圈  $l_{d1} = k\tau_{y1}$

大线圈  $l_{d2} = k\tau_{y2}$

$k$  值查表 5-70。

各线模宽度:

小线圈

$$\tau_1 = \sqrt{\left(\frac{D_1 + h_c + h_{o1}}{2}\right)^2 + \left(\frac{D_1}{2}\right)^2 - 2\left(\frac{D_1 + h_c + h_{o1}}{2}\right)\frac{D_1}{2}\cos\theta_1} - b_0$$

$$\theta_1 = \frac{2\pi}{z}y_1$$

大线圈

$$\tau_2 = \sqrt{\left(\frac{D_1 + h_c + h_{o1}}{2}\right)^2 + \left(\frac{D_1}{2}\right)^2 - 2\left(\frac{D_1 + h_c + h_{o1}}{2}\right)\frac{D_1}{2}\cos\theta_2} - b_0$$

$$\theta_2 = \frac{2\pi}{z}y_2$$

要求  $\tau_2 \geq \tau_1 + 2h_b$ , 若不能满足, 则可适当放大  $\tau_2$ 。

线圈端部高度:

$$h'_1 = \sqrt{\frac{3}{16}[l_{d1}^2 - (\tau_1 + h_b)^2]}$$

$$h'_2 = \sqrt{\frac{3}{16} [l_{d2}^2 - (\tau_2 + h_b)^2]}$$

要求  $h'_2 \geq h'_1 + h_b$ , 若不能满足, 则需调整  $l_{d1}$  和  $l_{d2}$ 。

线模端部长度:

小线圈  $h''_1 = h'_1 - h_b/2$

大线圈  $h''_2 = h'_2 - h_b/2$

线模总长:

小线圈  $L_1 = l + 2F + 2(h'_1 - h_b/2) = L + 2h'_1 - h_b$

大线圈  $L_2 = l + 2F + 2(h'_2 - h_b/2) = L + 2h'_2 - h_b$

线模端部圆弧半径:

小线圈  $R_1 = \frac{2h'_1 - h_b}{4} + \frac{\tau_1^2}{8h'_1 - 4h_b}$

大线圈  $R_2 = \frac{2h'_2 - h_b}{4} + \frac{\tau_2^2}{8h'_2 - 4h_b}$

单层同心式绕组线模外形尺寸如图 5—65 所示。

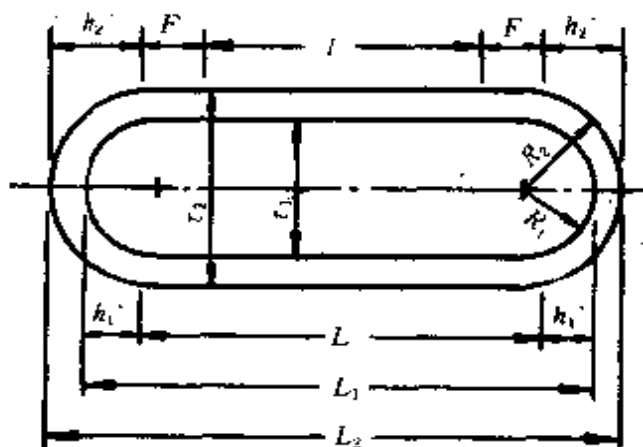


图 5—65 单层同心式绕组线模外形尺寸

## 六、单层交叉式、单层链式和单层同心式绕组线模的简易计算

单层交叉式、单层链式和单层同心式绕组线模如图 5—66 所示。

上述三种绕组线模可用以下公式简易计算。此方法突出主要尺寸,使用方便。

### 1. 计算公式

$$\tau = \frac{\pi(D_1 - h_t)}{z}(y - x)$$

$$L = l + l_f$$

$$R = \frac{\tau}{2} + (5 - 8)$$

式中:  $\tau$ ——线模宽度(mm);

$L$ ——线模长度(mm);

$D_1$ ——定子内径(mm);

$h_t$ ——槽深(mm);

$y$ ——跨距;

$x$ ——系数,2极电动机取 1.5,4极取 1.3~1.5,6极取 1~1.2;

$l$ ——铁芯长度(mm);

$l_f$ ——放长系数(mm),取 20~40,功率大者取大值;

$R$ ——线模端部圆弧半径(mm)。

### 2. 修正

为了使线模尺寸真正符合实际要求,应按以下方法修正:

计算出线模尺寸后,1:1画在硬质白纸上,用一条较粗的漆包线围一下。然后在被修电动机上试嵌,再做局部尺寸调整,以放得下为准。也可与拆下的旧线圈作对比适当修整。最后制



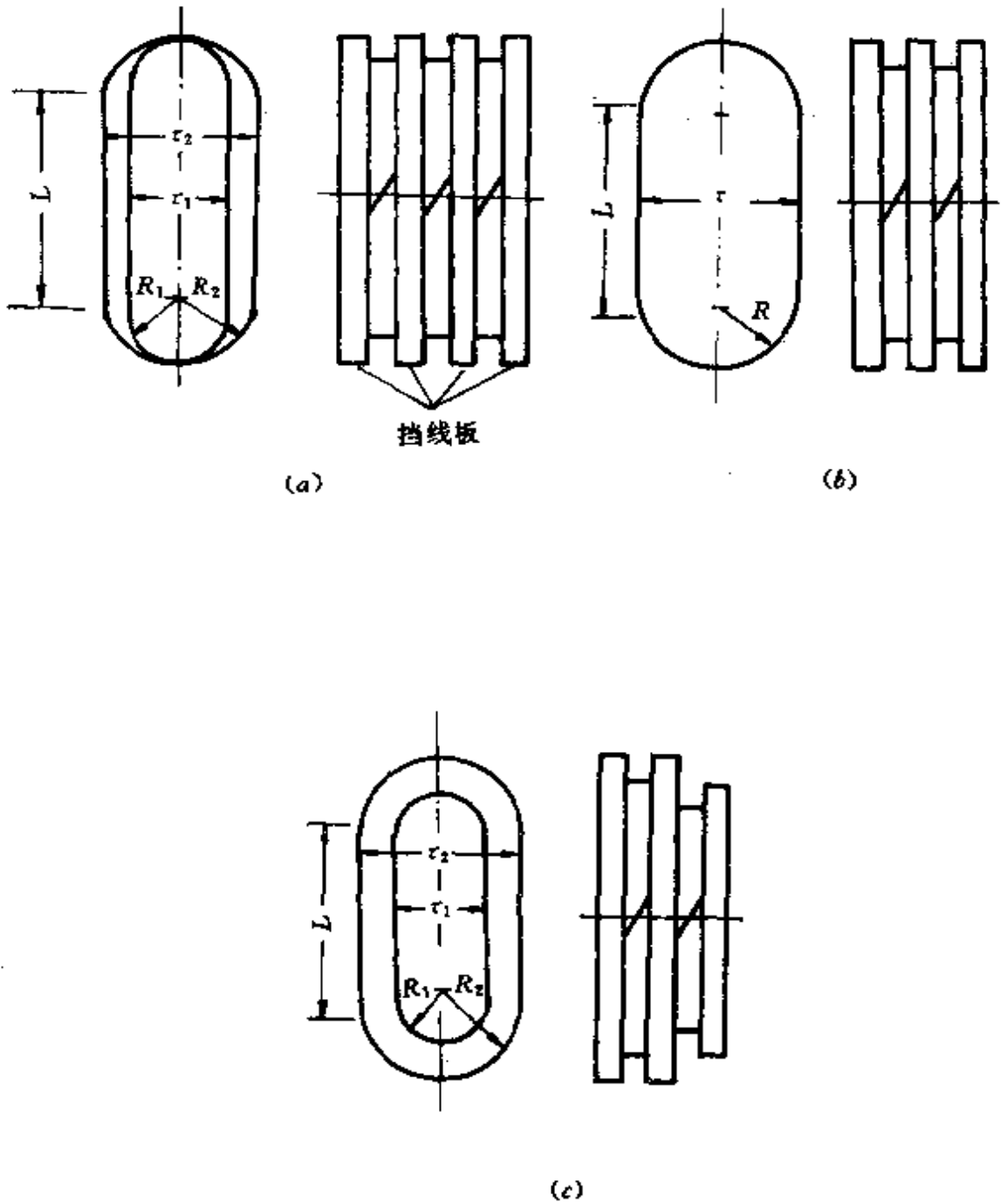


图 5—66 三种线模图  
(a)单层交叉式 (b)单层链式 (c)单层同心式

作线模。

### 3. 线模板和档线板的尺寸计算

线模板和档线板的厚度相同。两者的厚度与档线板各边按线模放大的原则如下：将嵌线槽面积  $S$  开平方，再凑到整数。小型电动机一般为  $8\sim 12\text{mm}$ 。

线槽面积  $S$  可按以下公式简略计算：

$$\text{图 5—62(a)} \quad S = 0.5(2R + b_s)h_{s2} + \pi R^2/2$$

$$\text{图 5—62(b)} \quad S = 0.5(b_{s1} + b_{s2})h_{s2}$$

例如，计算出的  $S = 89.5\text{mm}^2$ ， $\sqrt{S} = \sqrt{89.5} = 9.46(\text{mm})$ ，则线模板和档线板厚度可取  $10\text{mm}$ ，档线板各边放大  $10\text{mm}$ 。这时线模槽面积为  $10 \times 10 = 100(\text{mm}^2)$ ，比电动机槽面积  $89.5\text{mm}^2$  略大。

### 4. 核算槽满率

按本章第八节二、3(1)③项要求校核。

## 七、双层迭绕式绕组线模的简易计算

### 1. 线模宽度

$$\tau = \frac{\pi(D_1 + h_t)}{z}(y - K)$$

式中： $y$ ——线圈跨距；

$K$ ——校正系数，2极电动机取  $1.4\sim 2.0$ ，功率大者取大值；4、6、8、10极电动机不必校正，即  $K=0$ ；

其它符号同前。

### 2. 线模长度

$$L = l + l_f$$

式中： $l$ ——铁芯长度；

$l_f$ ——放长系数，见表 5—74。

表 5—74 放长系数  $L_f$  值

极 数	2	4	6	8	10
功率较大电动机	40~50	35~40	30~40		
功率较小电动机	25~35	25~30	25		

注：功率大者取大值。

### 3. 端部长度

$$C = \tau / M$$

式中： $M$ ——端部系数，见表 5—75。

表 5—75 端部系数  $M$  值

极 数	2	4	6	8	10
端部系数	1.30~1.58	1.56~1.66	1.60~1.70		

注：功率大者取偏小值；如考虑嵌线方便，可取偏小值，但以线圈端部不碰盖为准。

双层迭绕式绕组线模外形尺寸如图 5—67 所示。

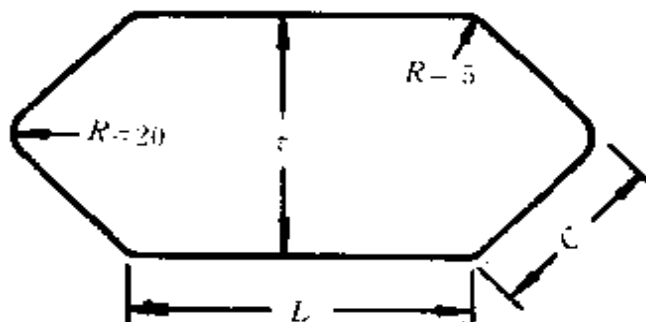


图 5 67 双层迭绕式绕组线模外形尺寸

上述计算较简单,但由于公式中的参数选择范围较大,故精度欠高。正确选用需要有一定的实际经验。在线模制作完成后,应先绕一联线圈试嵌。

### 八、单相异步电动机绕组重绕计算

#### 1. 无铭牌电动机主绕组匝数计算

计算前先确定电动机的额定电压和极数。若不知电动机的极数,可先任意假定极数,在计算中加以校验。

记录下列定子铁芯的尺寸(单位 mm):铁芯外径  $D$ 、铁芯内径  $D_1$ 、铁芯长度  $l$ 、槽数  $z$ 、齿宽  $b_{s2}$ 、定子槽形尺寸(见图 5—62)。

(1)主绕组匝数  $W_1$  计算:电压为 220V 的小功率电动机,主绕组串联总匝数  $W_1$ ,可按下列法计算:

先按下式算出每个极弧的面积  $S_i$ :

$$S_i = \frac{\pi D_1 l}{2p}$$

式中: $S_i$ ——每个极弧的面积( $\text{mm}^2$ )。

根据  $S_i$  查图 5—68 得  $W_1$ 。由于极对数  $p$  是假设的,故查得的  $W_1$  值能否满足要求,尚待进行磁路验算。

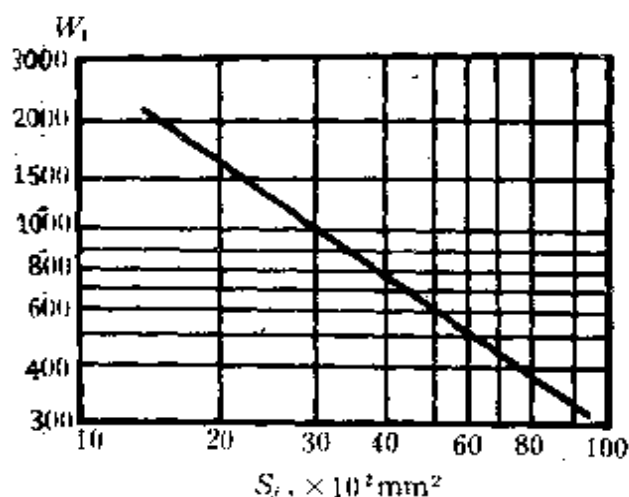


图 5-68  $W_1$  与  $S_c$  关系图

(2) 磁通密度计算: 在电源电压为 220V、频率为 50Hz 时, 定子轭部的磁通密度为

$$B_{c1} = \frac{10^6}{2S_{c1}W_1}, \quad S_{c1} = b_c l k_{fe}$$

式中:  $B_{c1}$ ——定子轭部的磁通密度(T);

$S_{c1}$ ——定子轭截面( $\text{mm}^2$ );

$b_c$ ——铁芯轭高(mm);

$k_{fe}$ ——铁芯压装系数, 对于厚 0.5mm 的硅钢片取 0.93。

齿部的磁通密度为(经验公式)

$$B_{d1} = \frac{1.57 \times 10^6}{S_{d1}W_1}, \quad S_{d1} = \frac{z}{2p} l b_i k_{fe}$$

式中:  $B_{d1}$ ——齿部的磁通密度(T);

$S_{d1}$ ——每极齿的总面积( $\text{mm}^2$ );

$b_i$ ——齿宽(mm);

其它符号同前。

由上面计算得的  $B_{c1}$  和  $B_{d1}$  值, 如超出表 5-76 中的范围, 说

明原先假定的极数不对,应重新选择极数,重复上述计算。如果  $B_{c1}$ 、 $B_{d1}$  值超出表中范围不大,则说明所选匝数  $W_1$  不完全合适,可另选匝数  $W'_1$ ,按下式重新校验磁通密度:

$$B'_{c1} = B_{c1} \frac{W_1}{W'_1}$$

表 5—76 小功率单相异步电动机磁通密度取值

定子铁芯	磁通密度允许值(T)	
	$2p=2$	$2p=4,6$
定子轭部 $B_{c1}$	1.10~1.40	1.00~1.30
定子齿部 $B_{d1}$	1.30~1.70	1.30~1.70

## 2. 有铭牌电动机主绕组匝数计算

电动机有铭牌,则额定功率、额定电压、极数等均已知。

(1) 主绕组串联总匝数可按下式计算:

$$W_1 = \frac{K_e U_e}{4.44 f \phi k_{dp}}$$

式中:  $W_1$  —— 主绕组串联总匝数(匝);

$K_e$  —— 降压系数,一般取 0.92 左右;

$U_e$  —— 电动机额定电压(V);

$\phi$  —— 每极气隙磁通(Wb);

$k_{dp}$  —— 绕组系数,集中绕组取 1;单、双层整距分布绕组取 0.9;正弦绕组取 0.78 左右。

单相电动机有其自身特点,一些参数的选取也和三相异步电动机有所不同。

(2) 磁通的估算:

$$\phi = \alpha_j \beta_s S_j \times 10^{-2} = \alpha_j \tau l B_s \times 10^{-2}$$

式中:  $\phi$  —— 磁通(Wb);

$\alpha_j$ ——有效极弧系数,它是定、转子间气隙中磁通密度平均值与最大值之比,约为 0.66~0.73。一般估算可取 0.67;

$B_g$ ——气隙磁通密度(T),1kW 以下的单相异步电动机,2 极时取 0.35~0.68;4 极时取 0.50~0.78;功率较小的电动机取较小值;

$S_j$ ——每个极弧面积( $\text{mm}^2$ ), $S_j = \tau l$ ;

$\tau$ ——极距(mm), $\tau = \frac{\pi D_1}{2p}$ ;

$l$ ——定子铁芯长(mm)。

### 3. 辅助绕组匝数计算

单相异步电动机的辅助绕组,有的只作起动用,在电动机启动后不参加运行;有的在启动后与主绕组一起参加长期运行。因而辅助绕组匝数的计算比较复杂,一般可根据主绕组匝数  $W_1$  和不同绕组的分配形式来估算辅助绕组的匝数  $W_2$ 。

(1)对于采用正弦绕组的电阻分相电动机,如 JZ、BO 型等,可取  $W_2 = (0.5 \sim 0.6)W_1$ 。辅助绕组导线截面约为主绕组导线截面的 1/3~1/4 左右。

(2)对于采用正弦绕组的电容分相电动机,如 JY、CO 型等,可取  $W_2 = (0.5 \sim 0.7)W_1$ 。辅助绕组导线截面约为主绕组导线截面的 0.5~1 倍。若槽面积足够大,系数可取 1,与主绕组导线截面相等。

(3)对于采用正弦绕组的电容电动机,如 JX、DO 型等,可取  $W_2 = W_1$ 。辅助绕组导线截面等于或接近于主绕组导线截面。

(4)对于采用单层同心式绕组的分相电动机,辅助绕组约占用 1/3 定子槽数。若无特殊要求,其匝数可取主绕组相同,但其截面为主绕组的 1/2 或更小。

#### 4. 导线截面的选择

在已知电动机功率的情况下,主绕组导线的截面可用下式计算:

$$q_1 = \frac{P_e \times 10^3}{U_e \cos \varphi \eta j} = \frac{I_e}{j}$$

式中: $q_1$ ——导线截面( $\text{mm}^2$ )

$P_e$ ——电动机额定功率(kW);

$I_e$ 、 $U_e$ ——电动机额定电流和额定电压(A、V);

$\cos \varphi$ ——电动机的功率因数,对电容电动机,因串联电容的辅助绕组长期运行,功率因数较高,可取 0.9~0.95;

$\eta$ ——电动机效率,取 0.5 左右;

$j$ ——电流密度,铜导线取 4.5~5.5(A/ $\text{mm}^2$ );若线槽较空,可适当将导线加粗。

#### 5. 绕组形式

电容起动型和电容运行电动机都采用分布绕组。一般工作绕组占用总槽数的 2/3,辅助绕组占 1/3。绕组形式有以下几种:

(1)单层同心式绕组:这是一种经常采用的绕组形式。对于分相电动机主绕组的总匝数是分布在总槽数 2/3 的槽中;辅助绕组分布在总槽数 1/3 的槽中,如图 5-69 所示。

对于电容运行电动机,由于辅助绕组在起动后不切断电源,所以辅助绕组与主绕组所占槽数基本相等。

单层绕组一般采用整距线组。

(2)双层绕组:为了有效地消除主、辅绕组中的三次及高次谐波影响,可采用双层绕组,一般采用缩短 1/3 极距的短距绕组。对于小型电动机,因定子内径小不易嵌线,很少采用双层绕组。



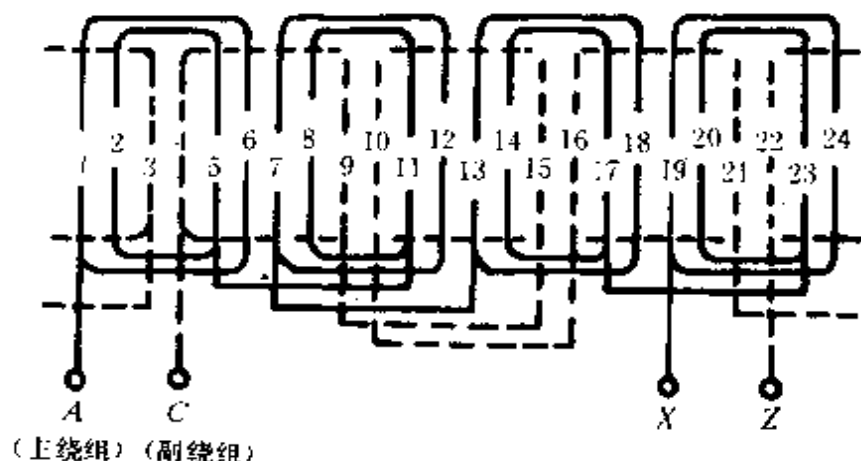


图 5—69 单层同心式绕组展开图

(3) 正弦绕组: 这种绕组可使磁势分布接近于正弦规律, 有利于消除或削弱各种高次谐波的影响, 改善和提高电动机的性能。因此被广泛地用于单相交流异步电动机中。

下面介绍一种简便的曲线计算法。

该方法是把正弦函数值的计算转换在函数的几何图形上(正弦曲线), 如图 5—70 所示。此曲线表示了每个极下的正弦磁势。横坐标代表各线圈节距  $y_n$  的一半的电角度  $\alpha_n$ , 纵坐标代表各电角度所对应的正弦函数值  $\sin\alpha_n$ 。这样, 只需查正弦函数曲线, 就能计算各线槽的线圈匝数。

正弦绕组每极下匝数分配应把每极匝数看作百分之百, 然后按各线圈节距一半的正弦值来计算各线圈匝数应占每极匝数的百分率, 最后得到各线圈的匝数。

**例 5—25** 有一台 2 极 18 槽单相异步电动机, 每极主绕组匝数为  $W_1$ , 试求各线槽的线圈匝数。

**解** 极距  $\tau = z/2p = 18/2 = 9$  槽

每极所占的电角度  $\alpha = 360^\circ/z = 360^\circ/18 = 20^\circ$

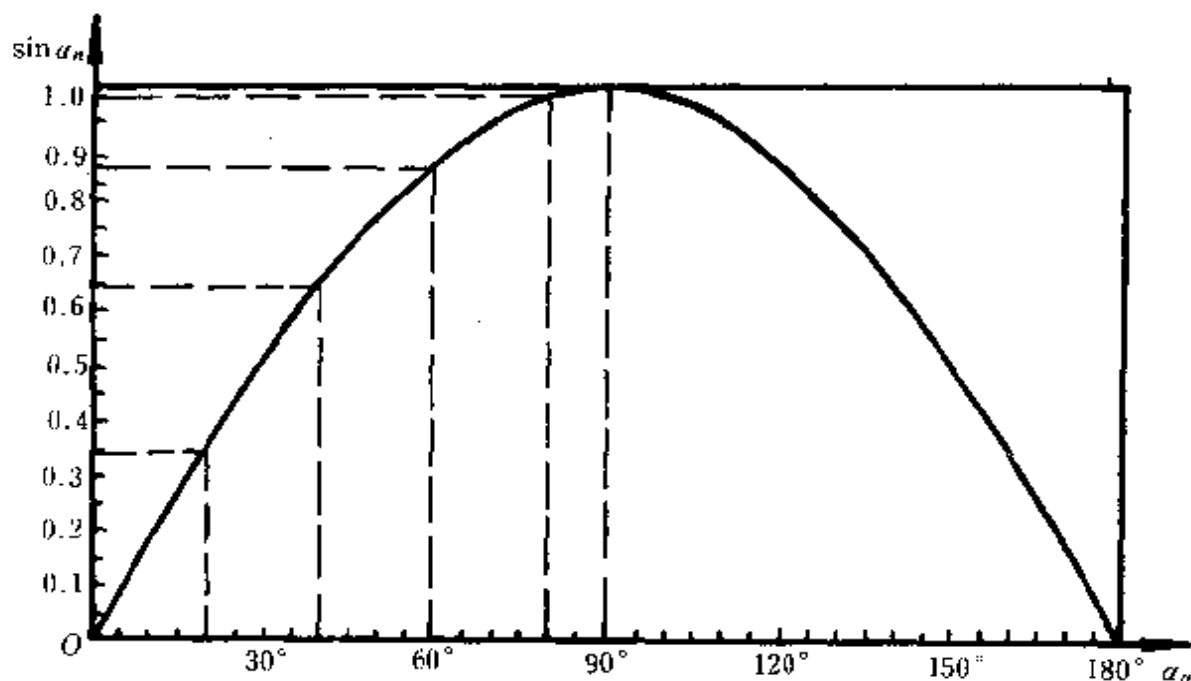


图 5-70 正弦曲线

如图 5-71 所示,主绕组两线圈组的轴线分别在 5、14 槽,在每个极下各线槽线圈节距  $y_n$  的一半所占的电角度  $\alpha_n = (y_n/2)\alpha_0$ 。

因此,线圈 4~6 槽电角度  $\alpha_1 = (y_1/2)\alpha = (2/2) \times 20^\circ = 20^\circ$ ,线圈 3~7 槽电角度  $\alpha_2 = (y_2/2)\alpha = (4/2) \times 20^\circ = 40^\circ$ 。同样可得到线圈 2~8 槽电角度  $\alpha_3 = 60^\circ$ ;线圈 1~9 槽电角度  $\alpha_4 = 80^\circ$ 。

从图 5-70 正弦曲线分别查得各线圈所对应的正弦函数值  $\sin \alpha_n$ :线圈 4~6 槽为 0.34;线圈 3~7 槽为 0.64;线圈 2~8 槽为 0.87;线圈 1~9 槽为 0.98。每极下主绕组线圈正弦值之和为

$$0.34 + 0.64 + 0.87 + 0.98 = 2.83$$

各线槽匝数占每极匝数的百分率为

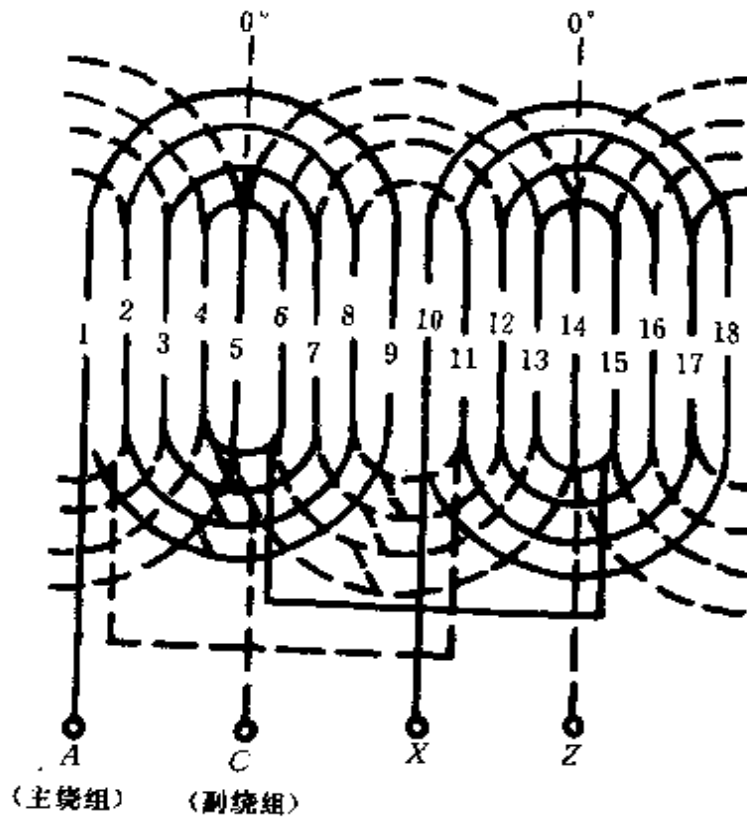


图 5—71 18 槽同心式正弦绕组展开图

线圈	$\frac{0.34}{2.83} \approx 12\%$ ,
4~6 槽	
线圈	$\frac{0.64}{2.83} \approx 22.6\%$ ,
3~7 槽	
线圈	$\frac{0.87}{2.83} \approx 30.7\%$ ,
2~8 槽	
线圈	$\frac{0.98}{2.83} \approx 34.6\%$ ,
1~9 槽	

因此,各线圈匝数分别为  $12\%W_1$ ,  $22.6\%W_1$ ,  $30.7\%W_1$ ,  $34.6\%W_1$ 。

用同样的方法也可算出辅助绕组在每极下匝数的分配(如图中虚线所示)。由于主绕组的轴线在第 5 槽,辅助绕组的轴线应与主绕组的轴线相隔  $90^\circ$  电角度,即相当于隔 4、5 槽在 9、5 槽

处。

### 九、三相异步电动机绕组重绕的简易计算

#### 1. 确定极数

$$2p = (0.35 \sim 0.4) \frac{zb_c}{h_c}$$

式中： $z$ ——定子槽数；

$b_c$ ——定子齿宽(mm)；

$h_c$ ——定子轭高(mm)。

#### 2. 电动机功率的估算

根据电动机的计算尺寸  $D_1^2 l$  和极数  $2p$ ，从图 5—72 和图 5—73 中查得对应的功率近似值  $P$ (kW)。其中  $D_1$  为定子铁芯内径(cm)， $l$  为定子铁芯长度(cm)。

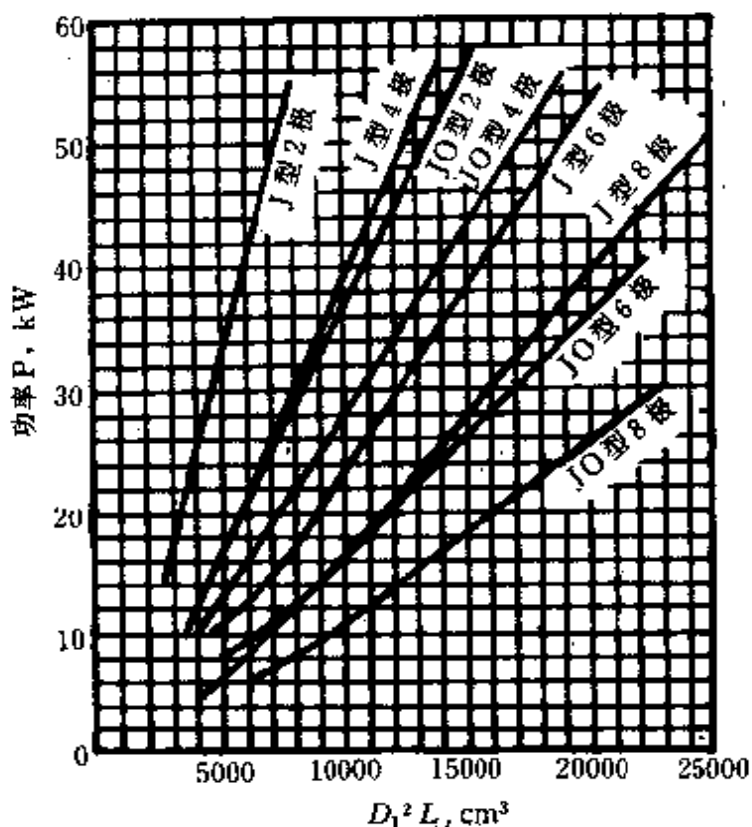
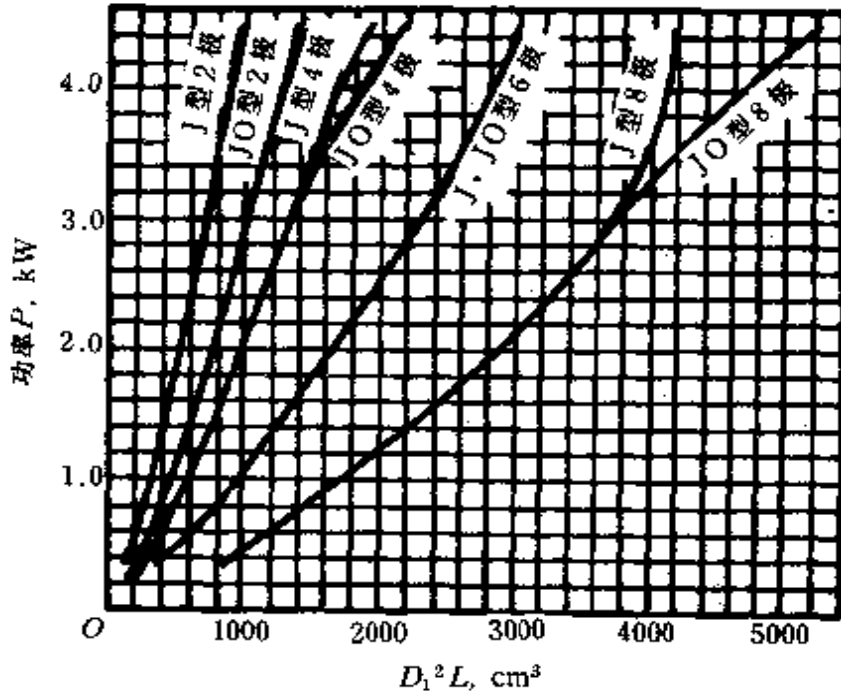
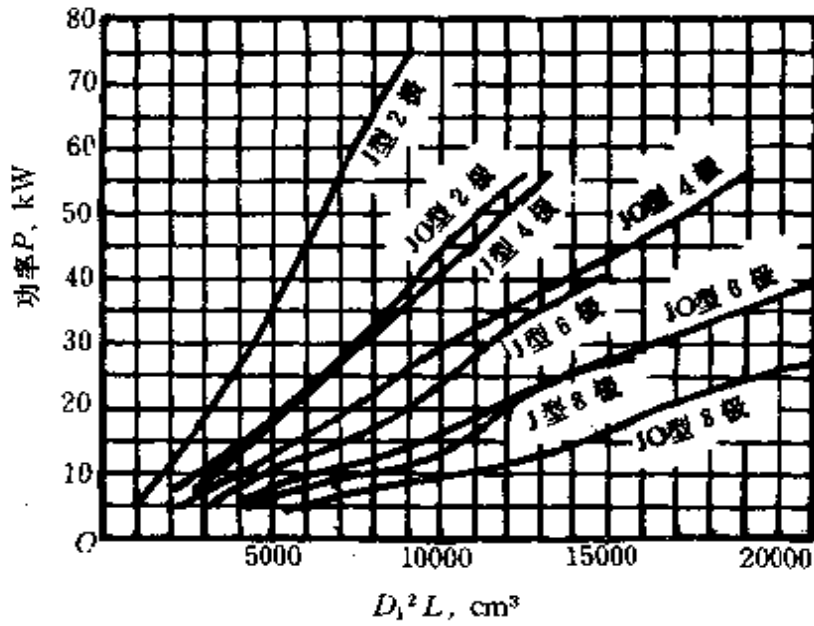


图 5—72 国产系列三相异步电动机  $D_1^2 l$  与功率的关系曲线



(a)

$D_1^2 L$  与功率的关系曲线



(b)

图 5—73 上海生产的三相异步电动机  $D_1^2 L$  与功率的关系曲线

### 3. 电动机的工作电流计算

$$I_l = \frac{P \times 10^3}{\sqrt{3} U_l \cos \varphi \eta}$$

式中： $I_l$ ——电动机的工作电流(A)；

$U_l$ ——电源线电压(V)；

其它符号同前。

$\cos \varphi$  与  $\eta$  可取由电动机性能数据表查得相近功率电动机的参考值。

### 4. 绕组计算

(1) 选定绕组型式。

(2) 确定每槽的有效导线数

$$N_s = \frac{90 U_x t p}{B_s D_1^2 l}, \quad t = \frac{\pi D_1}{z}$$

式中： $N_s$ ——每槽的有效导线数(根/槽)，双层绕组  $N_s$  为双数)；

$U_x$ ——电动机相电压(V)；

$t$ ——定子槽距(cm)；

$B_s$ ——气隙磁通密度(T)，见表 5—1。

(3) 导线截面的选择：

$$q_1 = \frac{I_x}{jan}$$

式中： $q_1$ ——导线截面( $\text{mm}^2$ )；

$I_x$ ——电动机相电流(A)，Y 接法时  $I_x = I_l$ ； $\Delta$  接法时  $I_x = I_l / \sqrt{3}$ ；

$j$ ——电流密度(A/ $\text{mm}^2$ )，见表 5—63 和表 5—69；

$a$ ——并联支路数，见表 5—70。

然后查标称线规表，确定绝缘导线外径  $d$ 。

(4)每槽实际导线数为:

$$N = aN_n。$$

(5)校验槽满率  $F_k$ :

$$F_k = \frac{nNd^2}{S_{ux}}, \quad S_{ux} = S_s - S_i$$

式中:  $S$ ——槽有效面积,即槽内导线总面积( $\text{mm}^2$ );

$S_s$ ——槽面积( $\text{mm}^2$ );

$S_i$ ——槽绝缘所占面积( $\text{mm}^2$ )。

槽满率要求见本节三相异步电动机定子绕组的计算。

**例 5—26** 有一台上海产三相鼠笼型异步电动机,测得定子铁芯数据如下:铁芯内径  $D_i$  为 229mm、外径  $D$  为 360mm、长度  $l$  为 180mm、定子槽数  $z$  为 48。定子槽形尺寸如图 5-74 所示。试配置适当绕组(要求 E 级绝缘)。

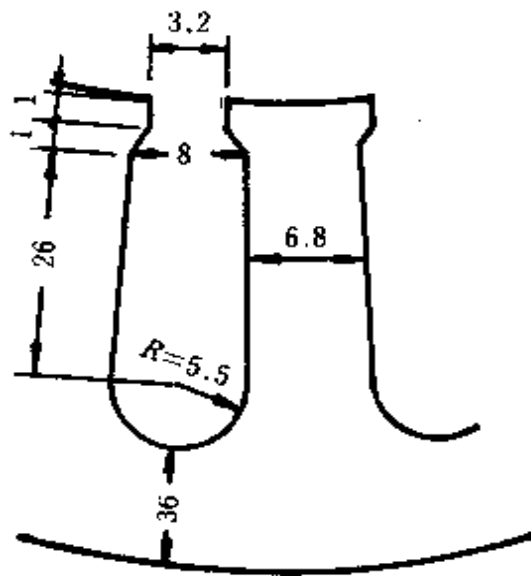


图 5—74 定子槽形尺寸(单位:mm)

**解** 由图得:  $R = 5.5$ 、 $b_0 = 3.2$ 、 $b_{11} = 6.8$ 、 $b_s = 8$ 、 $h_{s1} = 1$ 、 $h_{s2} = 26$ 、 $h_c = 36$ 。E 级绝缘,2 号机座,绝缘厚度  $C_i$  为 0.22,设槽楔厚度  $h$  为 3(单位:mm)。

(1)确定极数:

$$2p = (0.35 \sim 0.4) \frac{zb_{11}}{h_c} = (0.35 \sim 0.4) \frac{48 \times 6.8}{36}$$

$$\approx 3.6, \text{取 } 2p = 4$$

(2)电动机功率的估算:

$$D_1^2 l = 22.9^2 \times 18 = 9.44 \times 10^3 (\text{cm}^3)$$

查图 5-69(b), 取功率  $P = 28 (\text{kW})$

(3)取  $\cos\varphi = 0.90$ ,  $\eta = 0.895$ , 则电动机工作电流:

$$I_t = \frac{P \times 10^3}{\sqrt{3} U_t \cos\varphi \eta} = \frac{28 \times 10^3}{\sqrt{3} \times 380 \times 0.90 \times 0.895}$$

$$= 53.2 (\text{A})$$

(4)绕组计算:

①采用双层迭绕绕组。

②每槽有效导线数  $N_n$ :

设电动机为  $\Delta$  接法,  $U_x = U_t = 380 (\text{V})$

$$\text{定子槽距 } t = \frac{\pi D_1}{z} = \frac{\pi \times 22.9}{48} = 1.5 (\text{cm})$$

查表 5-1, 取气隙磁通密度  $B_g = 0.80 \text{T}$

$$N_n = \frac{90 U_x t p}{B_g D_1^2 l} = \frac{90 \times 380 \times 1.5 \times 2}{0.80 \times 9.44 \times 10^3}$$

$$\approx 13.6 (\text{根/槽})$$

由于是双层绕组, 故取  $N_n = 14$  根/槽

③导线截面的选择: 取电流密度  $j = 5.5 \text{A/mm}^2$ , 并联支路数  $a = 2$ , 导线并绕根数  $n = 2$ 。

$$I_x = I_t / \sqrt{3} = 53.2 / \sqrt{3} = 30.9 (\text{A})$$

$$q_1 = \frac{I_x}{jan} = \frac{30.9}{5.5 \times 2 \times 2} = 1.40 (\text{mm}^2)$$

查线规表得标准直径  $d_1 = 1.40 \text{mm}$  (截面积为  $1.539 \text{mm}^2$ ), 选取单纱漆包线  $d = 1.63 \text{mm}$  (外径)。

(5)校验槽满率:



$$\begin{aligned} \text{槽面积 } S_s &= \frac{2R+b_0}{2}(h_{s1}+h_{s2}-h) + \frac{\pi R^2}{2} \\ &= \frac{2 \times 5.5 + 3.2}{2}(1+26-3) + \frac{\pi \times 5.5^2}{2} \\ &= 217.9(\text{mm}^2) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{绝缘占面积 } S_i &= C_i [2(h_{s1}+h_{s2}) + \pi R + 2R + b_s] \\ &= 0.22 [2 \times 27 + \pi \times 5.5 + 2 \times 5.5 + 8] \\ &= 19.8(\text{mm}^2) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{槽内导线总面积 } S_{sx} &= S_s - S_i = 217.9 - 19.8 \\ &= 198.1(\text{mm}^2) \end{aligned}$$

$$\text{每槽实际导线数 } N = aN_n = 2 \times 14 = 28(\text{根/槽})$$

$$\text{槽满率 } F_s = \frac{Nnd^2}{S_{sx}} = \frac{28 \times 2 \times 1.63^2}{198.1} = 0.75$$

符合槽满率一般在 0.60~0.75 的范围。

该电动机绕组采用双层迭绕,用直径为 1.63mm 的导线双根并绕,支路数为 2,每只绕组为 7 匝。

### 十、罩极式电动机绕组重绕估算

在重绕失去铭牌的罩极式电动机时,可先记下定子内径  $D_1$ 、铁芯长度  $l$ 、铁芯轭高  $h_c$ ,以及磁极宽度  $b$  等参数(图 5-75)。

#### 1. 电动机功率的估算

电动机输入功率和输出功率可按下列公式估算:

$$P_{sr} = \frac{a_s D_1^2 l B_s A n_1}{5.5 \times 10^4}$$

$$P = P_{sr} \cos \varphi \eta, \quad \cos \varphi \eta = 0.46 \sim 0.55$$

式中:  $P_{sr}$  —— 电动机输入功率(VA);

- $P$ ——电动机输出功率(W);
- $a_j$ ——极弧系数,取 0.6~0.9;
- $D_1, l$ ——定子铁芯内径和长度(cm);
- $B_s$ ——气隙磁通密度(T),一般如台扇等小功率电动机取 0.18~0.35T;吊扇等较大电动机取 0.38~0.80T;
- $A$ ——线负荷(A/cm),取 60~130;
- $n_1$ ——同步转速(r/min)。

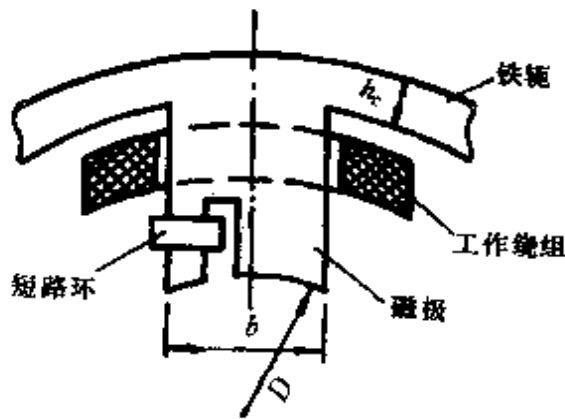


图 5—75 单极式电动机定子部分尺寸

## 2. 电动机电流估算

$$I = \frac{P_n}{K_c U_e}$$

式中: $I$ ——电动机电流(A);

$K_c$ ——降压系数,取 0.8~0.9;

$U_e$ ——电动机额定电压(V)。

## 3. 有效磁通估算

$$\phi = a_j \tau l B_s \times 10^{-4}$$

式中: $\phi$ ——有效磁通(Wb);

$\tau$ ——极距(cm)。

4. 主绕组每极匝数估算

$$W_1 = \frac{K_s U_s}{4.44 f \phi 2p}$$

式中： $W_1$ ——主绕组每极匝数(匝)；

$2p$ ——极数；

$f$ ——电源频率(Hz)。

5. 定子轭部磁通密度估算

$$B_{d1} = \frac{\delta \phi \times 10^4}{1.86 l h_c}$$

式中： $B_{d1}$ ——定子轭部磁通密度(T)；

$\delta$ ——主绕组漏磁系数，取 1.1~1.16；

$h_c$ ——定子轭高(cm)。

校验：用上式求得的轭部磁通密度不应超过 0.80~1.00T，如超过允许值时，应降低  $B_s$  重新计算。

6. 磁极铁芯磁通密度估算

$$B_{d1} = \frac{\delta \phi \times 10^4}{0.93 b l}$$

式中： $B_{d1}$ ——磁极铁芯磁通密度(T)；

$b$ ——磁极宽度(cm)，见图 5-75。

校验：用上式求得的磁极铁芯磁通密度应小于 0.80~1.00T，如超过允许值时，应降低  $B_s$  重新计算。

7. 导线截面的选择

$$q_1 = I / j$$

式中： $q_1$ ——导线截面(mm<sup>2</sup>)；

$j$ ——导线电流密度(A/mm<sup>2</sup>)，取 3~5。

导线直径可查线规表或按下式求得：

$$d = 1.13 \sqrt{q_1}$$

从而确定标称导线。

8. 校验槽满率  $F_k$

校验方法同三相异步电动机定子绕组计算中的校验方法。

十一、电容运转电动机绕组重绕计算

电容运转电动机的重绕计算基本上与分相电动机相同,但由于它的“两相”绕组同时投入运行,所以又有所不同。

1. 电动机输入功率的估算

估算输入功率  $P_r$  时,可取  $\cos\varphi\eta = 0.46 \sim 0.68$ ,也可由图 5—76 中选取。

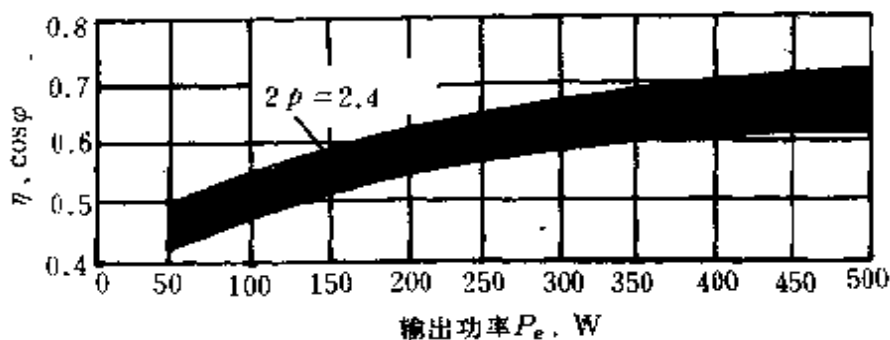


图 5—76 电容运转单相电动机电能效率曲线

2. 电动机电流计算

$$\text{输入电流 } I = \frac{P_r}{U_e} = \frac{P_e}{U_e \cos\varphi\eta}$$

$$\text{主绕组电流 } I_1 = \frac{P_r}{\sqrt{2}U_e} = \frac{I}{\sqrt{2}}$$

3. 定子绕组系数计算

“两相”全距单层绕组的绕组系数(主、副绕组系数相等)

为

$$K_w = \frac{0.707}{q \sin \frac{45^\circ}{q}}, \quad q = \frac{z}{2pm};$$

式中:  $q$ ——每极每相槽数;

其它符号同前。

“两相”短距双层绕组的绕组系数(主、副绕组系数相等)为

$$K_w = \frac{0.707}{q \sin \frac{45^\circ}{q}} \cdot \sin \left( 90^\circ \frac{y}{\tau} \right)$$

式中:  $y$ ——线圈节距(cm);

$\tau$ ——定子极距(cm)。

#### 4. 主、副绕组的计算

副绕组的变比系数一般取  $K = 0.87 \sim 1.7$ 。

副绕组导线直径  $d_2$  为

$$d_2 = d_1 / t$$

式中:  $d_1$ ——主绕组导线直径(mm);

$t$ ——导线直径比值系数,可取  $0.93 \sim 1.4$ ,一般取  $t = (1 \sim 0.75)K$ 。

5. 电容器的选择 同电容运转电动机的电容器计算。

## 十二、分相电动机和电容运转电动机的电容器计算

### 1. 分相电动机电容器计算

分相电动机起动电容器电容量可按以下经验公式计算:

$$C_q = \frac{35I_e \times 10^4}{2pfU_e \cos\varphi}$$

式中:  $C_q$ ——起动电容器的电容量( $\mu F$ );

$I_e$ ——电动机额定电流(A);

$p$ ——极对数;

$f$ ——电源频率(Hz);

$U_e$ ——电动机额定电压(V);

$\cos\varphi$ ——功率因数,可由图 5—77 中选取。

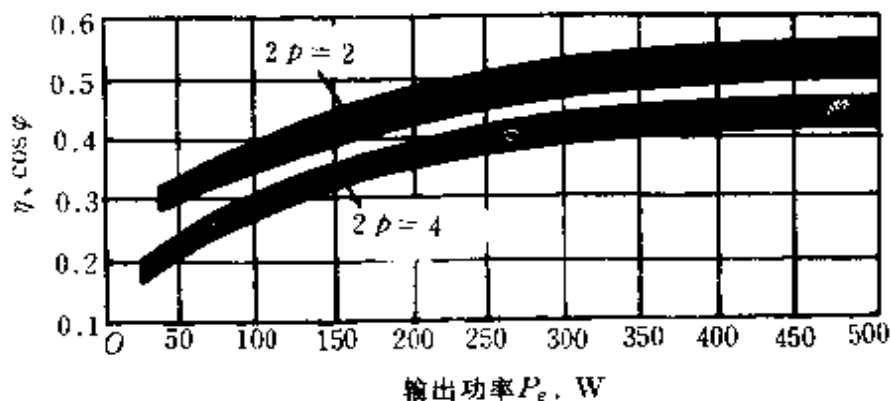


图 5-77 电阻、电容分相起动的分相电动机电效率曲线

起动电容器的耐压选择：

$$U_{cp} \geq \sqrt{2} U_c$$

初选后可实际试验，如果起动时降落在电容器上的电压过高，则应增加起动电容器的电容量或增加电容器的耐压值；如果起动电流过大，可减小起动电容器的电容量。

电容量的选择还可参考表 5-77 中数值。

表 5-77 电容器电容量参考值

电源电压 (V)	不同功率选用电容器的电容量 (μF)			
	100(W)	125(W)	200(W)	250(W)
220	15~20	26~37	26~37	37~51
110	90~117	115~145	130~165	145~200

## 2. 电容运转电动机电容器计算

(1) 运行电容器计算：可按以下经验公式计算：

$$C_g = \frac{12I_c \times 10^4}{2p f U_c \cos \varphi}$$

式中： $C_g$ ——运行电容器的电容量( $\mu\text{F}$ )；

其它符号同前。

可先从图 5-77 中查得电能效率，并设效率  $\eta = 0.55 \sim 0.75$ ，从而估算出  $\cos\varphi$ 。

运转电容器的耐压选择：

$$U_{cg} \geq (2 \sim 2.3)U_e$$

(2) 起动电容器计算：需要提高电容运转电动机的起动转矩时，可增设起动装置，并在运行电容器上并联一只起动电容器，改成双电容电动机。

起动电容器的电容量  $C_q$  可按下式计算：

$$C_q = (1.5 \sim 2.5)C_g$$

起动电容器的耐压选择

$$U_{cq} \geq \sqrt{2}U_e$$

通常运行电容器最好选用油浸密封型电容器，也可选用纸介或金属化纸介电容器。必须保证耐压要求。起动电容器由于是短时工作的，可选用电解电容器。

### 十三、电钻绕组重绕计算

先记录下原绕组等各项参数，然后按以下步骤计算：

1. 对于无铭牌的电钻(定、转子匝数均未知)

(1) 电动机额定电流  $I_e$ ：参照同类型规格电钻估计额定电流。

(2) 转子总导线根数：

$$N_{2z} = \frac{2\pi D_2 A}{I_e}$$

式中： $D_2$ ——转子铁芯外径(cm)；

$A$ ——线负荷，按电钻大小选择，一般为  $95 \sim 120\text{A/cm}$ ，功率大者取较大值。

(3) 转子元件匝数:

$$W_2 = \frac{N_{2z}}{2K}$$

式中:  $K$ ——换向片数。

(4) 转子每槽导线数:

$$N_2 = N_{2z} / z_2$$

式中:  $z_2$ ——转子槽数。

导线并绕数  $n = K / z_2$

(5) 转子导线截面:

$$q_2 = \frac{I_c}{2pj}$$

式中:  $p$ ——极对数;

$j$ ——转子导线电流密度 ( $A/mm^2$ ), 一般可取  $8 \sim 10$ 。

(6) 转子槽节距:

$$\text{单数槽 } y = 1 \sim \frac{z_2 + 1}{2}$$

$$\text{双数槽 } y = 1 \sim \frac{z_2}{2}$$

(7) 定子每极匝数:

$$\frac{W_1}{2p} = (0.2 \sim 0.3) \frac{N_{2z}}{2}$$

(8) 定子导线截面:

$$q_1 \approx 2q_2$$

**例 5—27** 有一无铭牌单相串励电钻为 2 极电动机, 已知转子铁芯外径  $D_2$  为 4.65cm, 长度  $l$  为 4.8cm, 转子槽数  $z$  为



14, 换向片  $K$  为 42, 试计算重绕参数。

解 (1) 额定电流  $I_e$ : 根据已知参数, 查产品目录知, 该电钻接近 13mm 规格, 220V, 额定电流为 1.8A, 估计  $I_e = 1.8A$ 。

(2) 线负荷  $A$  取  $105A/mm^2$ , 则转子总导线数:

$$N_{2z} = \frac{2\pi \times 4.65 \times 105}{1.8} = 1703(\text{根})$$

(3) 转子元件匝数:

$$W_2 = \frac{1703}{2 \times 42} = 20.3(\text{匝})$$

取整数 20 匝, 这时  $N_{2z}$  相应调整为 1678 根。

(4) 转子每槽导线数:

$$N_2 = 1678 / 14 = 119.8(\text{根}), \text{取 } 120 \text{ 根}$$

导线并绕数  $n = 42 / 14 = 3(\text{根})$

(5) 电流密度  $j$  取  $9A/mm^2$ , 则转子导线截面:

$$q_2 = \frac{1.8}{2 \times 1 \times 9} = 0.10(\text{mm}^2)$$

查线规表, 得标称直径  $d_1 = 0.35$  或  $0.38\text{mm}$  的高强度漆包线(绝缘导线外径分别为  $d = 0.41$  和  $0.44\text{mm}$ )。

(6) 转子槽节距:

$$z = 140 \text{ 为双数槽}, y = 1 \sim \frac{14}{2} = 1 \sim 7$$

(7) 定子每极匝数:

$$\frac{W_1}{2p} = (0.2 \sim 0.3) \frac{1678}{2} \approx 210 (\text{匝/极}), \text{系数取 } 0.25$$

(8) 定子导线截面:

$$q_1 \approx 2 \times 0.10 = 0.20 (\text{mm}^2)$$

查线规表, 得标称直径  $d_1 = 0.51\text{mm}$  (截面  $0.204\text{mm}^2$ ) 的高强度漆包线 (绝缘导线外径  $d = 0.58\text{mm}$ )

2. 定子或转子每极匝数和导线直径已知

(1) 转子绕组总匝数:

$$W_{2z} = \frac{W_{1z}}{0.4 \sim 0.6}$$

式中:  $W_{1z}$ 、 $W_{2z}$  —— 定子总匝数 (每极匝数  $\times$  极数) 和转子总匝数。

(2) 转子绕组元件匝数:

$$W_2 = W_{2z} / K$$

(3) 转子每槽导线数:

$$N_2 = \frac{2W_{2z}}{z}$$

式中:  $z$  —— 转子槽数。

导线并绕数  $n = K / z$  根

(4) 转子导线直径:

$$d_2 = \frac{d_1}{1.4 \sim 1.5}$$

式中:  $d_1$  —— 定子导线直径 (mm)。

注意: 当只知道转子每槽导线数和导线直径时, 同样可按上列公式计算, 只须将每槽导线数计算出转子总匝数后再计算。

配线后若转速过高, 可增加匝数; 转速过低, 可减少匝数。

**例 5—28** 有一单相串励电钻为 2 极电动机,已知转子槽数  $z_2$  为 9,换向片数  $K$  为 27,转子绕组全无数据,只有定子绕组每极 265 匝,定子导线直径  $d_1$  为 0.31mm,试计算重绕参数。

**解**

(1) 转子绕组总匝数:

$$W_{2z} = \frac{265 \times 2}{0.4 \sim 0.6} = 1134 (\text{匝}), \text{系数取 } 0.47$$

(2) 转子绕组元件匝数:  $W_2 = \frac{1134}{27} = 42 (\text{匝})$

(3) 转子每槽导线数:  $N_2 = \frac{1134 \times 2}{9} = 252 (\text{根})$

导线并绕数  $n = 27/9 = 3 (\text{根})$

(4) 转子导线直径:

$$d_2 = \frac{0.31}{0.4 \sim 1.5} = 0.214 (\text{mm}), \text{系数取 } 0.145$$

若槽内面积较大,导线直径宜大些为好,以免发热过甚,如取 0.23mm 的导线。

#### 十四、电扇绕组重绕计算

##### 1. 嵌线展开图

以 8 槽和 16 槽电容式台扇为例,其定子绕组嵌线方法如图 5—78(b)、(c)所示。其主、副绕组线圈数相同,各为 4 匝(抽头调速电机例外)。

##### 2. 电扇的主要技术参数

为了检修方便,将部分电扇的电机绕组的主要技术数据列于表 5—78 和表 5—79 中。

表 5—78

部分电扇绕组

类别	规格 (mm)	极 数	定子铁芯				主绕组	
			外径 (mm)	内径 (mm)	槽数	迭厚	线径 (mm)	匝数
电容式台扇	250	4	88	44.7	8	20	0.17	935×4
	250	4	78	44.5	16	20	0.15	1050×4
	300	4	88	44.7	8	26	0.17	634×4
	300	4	85.5	46.5	16	20	0.17	800×4
	350	4	88	44.7	8	32	0.23	560×4
	350	4	88.5	49	16	26	0.21	720×4
	400	4	88	44.7	8	32	0.23	530×4
	400	4	88	44.7	8	32	0.23	520×4
	400	4	88.5	49	16	35	0.23	570×4
	400	4	88.4	49	16	32	0.21	550×4
罩极式台扇	200	2	59	28		32	0.19	1270×4
	230	2	70	35		32	0.21	1100×4
	300	4	88	44.7		32	0.27	510×4
	400	4	108	51		32	0.47	450×4
电容式吊扇	900	14	118	20	28	23	0.23	380×14
	1200	18	134.75	70.5	36	25	0.27	280×18
	1400	16	139	20	32	25	0.29	245×16
	1400	18	134.75	70.5	36	25	0.27	270×18
吊极式吊扇	900	12	123.6	51	12	30	0.38	550×6

的主要技术数据

中间绕组		副绕组		线模尺寸 (mm)	跨距	绕组型式	调速方法
线径 (mm)	匝数	线径 (mm)	匝数				
0.15	(500+300)×2	0.15	1020×2	34×35	1~3	双层链形	抽头
0.15	550×4	0.15	1050×4	32×33	1~4	单层链形	抽头
		0.19	620×4	34×35	1~3	双层链形	电抗器
0.15	550×4	0.15	1100×4	32×35	1~4	单层链形	抽头
		0.19	790×4	32×47	1~3	双层链形	电抗器
		0.17	930×4	30×37	1~4	单层链形	电抗器
		0.17	890×4	34×47	1~3	双层链形	电抗器
0.19	560×2	0.17	1000×4	34×47	1~3	双层链形	抽头
		0.19	720×4	44×30 44×35	1~4	单层链形	电抗器
0.19	350×4	0.19	350×4	35×40	1~4	单层链形	抽头
				33×34			
				33×39			
				27×40			
				31×40			
		0.19	506×14	24×40	1~3		
		0.25	328×18	21.5×43	1~3		
		0.25	315×16	21.5×43	1~3		
		0.25	328×18	35×65	1~3		
				23×44			

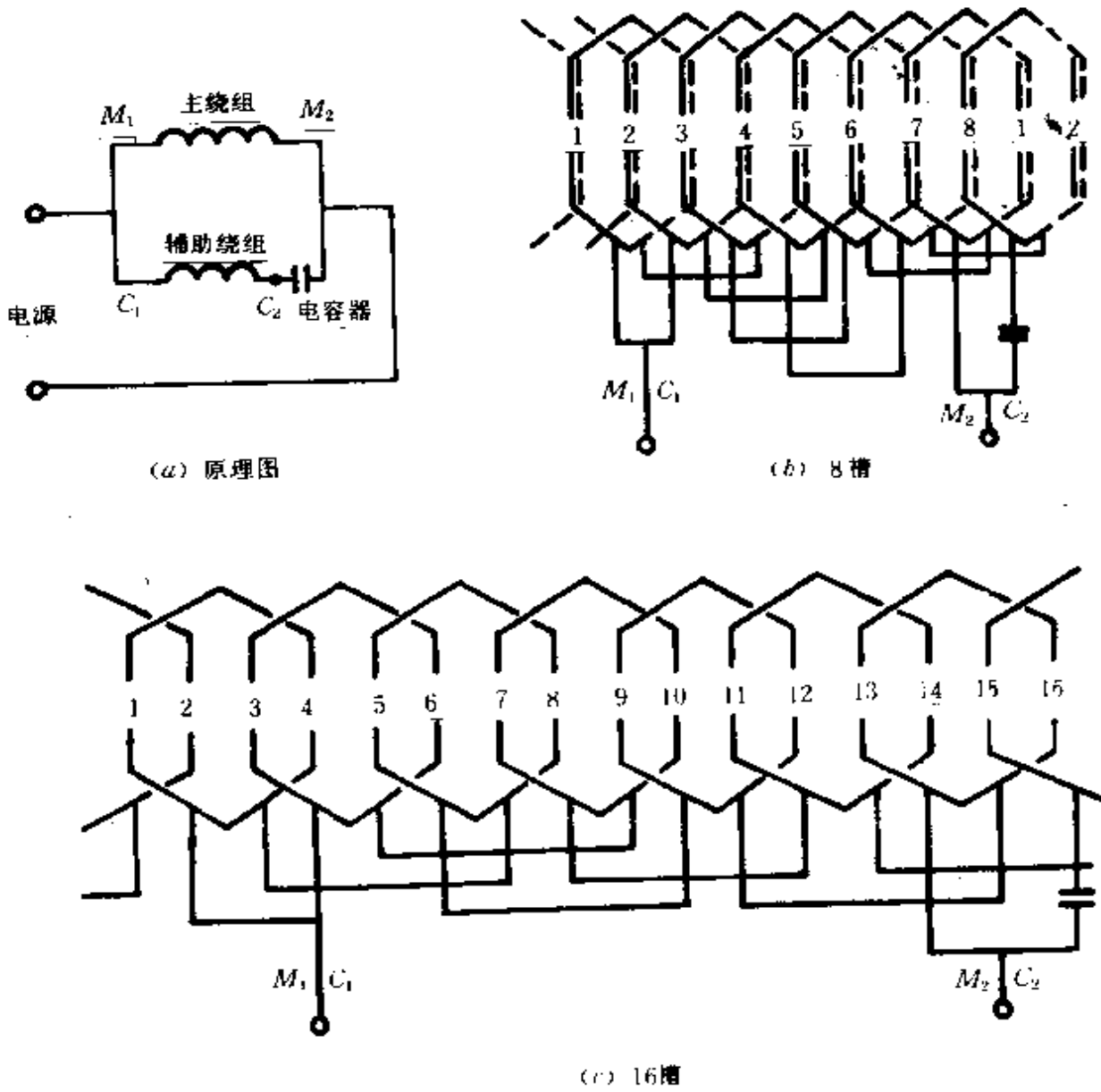


图 5—78 绕组嵌线展开图

表 5—79 部分电扇的数据

型式	类别	极数	规格 (mm)	功率 (W)	电流 (A)	转速 (r/min)	电容 ( $\mu$ F)	主绕组 电阻 ( $\Omega$ )	副绕组 电阻 ( $\Omega$ )
电容式	台扇	4	250	35	0.15	1300	1	330	470
			300	44	0.20	1280	1.5	270	340
			350	54	0.25	1280	1.2	165	350
			400	65	0.33	1260	1.2	150	470
	吊扇	14	900	50	0.24	380	1		
		18	1200	73	0.37	290	2		
		18	1400	80	0.40	280	2.4		
罩极式	台扇	2	200	32	0.19	2500			
			230	36	0.20	2300			
			250	36	0.22	2200		180	
	4	400	80	0.45	1280		45		
	吊扇	12	1200	70	0.48	380			

### 十五、钻石牌电钟绕线计算

电钟的动力来自一台小型同步电动机,现举例说明其计算方法。设一台电钟电动机所消耗的功率约为 2W,额定电压 220V,电流为 0.0091A,则绕组参数计算如下:

#### 1. 绕组导线截面 $q$ 的选择

$$q = \frac{I}{j} = \frac{0.0091}{4 \sim 5} = 0.00182 \sim 0.00228 (\text{mm}^2)$$

式中电流密度  $j$  取  $4 \sim 5 \text{A/mm}^2$ 。

查线规表,取直径为  $d_1 = 0.05 \text{mm}$  或  $0.06 \text{mm}$  (截面为  $0.00196 \text{mm}^2$  或  $0.00283 \text{mm}^2$ ) 的高强度漆包线,绝缘导线外径

为  $d=0.065\text{mm}$  或  $0.075\text{mm}$ 。

### 2. 绕组匝数的计算

先求出正常工作时的阻抗

$$X = \frac{U^2}{P} = \frac{220^2}{2} = 24200(\Omega)$$

$$\text{电感量为 } L = \frac{X}{\omega} = \frac{24200}{2\pi \times 50} = 77(\text{H})$$

按钻石牌电钟的铁片形状, 求出磁路长  $l$  为  $14.4\text{cm}$ , 空气隙  $\delta$  约为  $0.2\text{cm}$ , 铁芯截面  $S$  为  $0.6\text{cm}^2$ 。导磁率  $\mu$  选用  $2.011 \times 10^{-3}\text{T/A} \cdot \text{m}^{-1}$ , 空气的导磁率  $\mu_0$  为  $1.257 \times 10^{-6}\text{T/A} \cdot \text{m}^{-1}$ , 则磁阻  $R_m$  为

$$\begin{aligned} R_m &= \left( \frac{l}{S\mu} + \frac{\delta}{S\mu_0} \right) \times 1.257 \times 10^{-6} \\ &= \left( \frac{14.4}{0.6 \times 2.011 \times 10^{-3}} + \frac{0.2}{0.6 \times 1.257 \times 10^{-6}} \right) \\ &\quad \times 1.257 \times 10^{-6} \approx 0.0347(1/\text{mH}) \end{aligned}$$

代入公式

$$L = \frac{0.4\pi W^2}{R_m \times 10^8}$$

得线圈匝数

$$\begin{aligned} W &= \sqrt{\frac{LR_m \times 10^8}{0.4\pi}} = \sqrt{\frac{77 \times 0.0347 \times 10^8}{0.4\pi}} \\ &= 14600(\text{匝}) \end{aligned}$$

## 十六、导线代用、改压、改频、变更极数的计算

### 1. 电机导线代用计算

(1) 改变线圈导线的并绕根数计算: 当电动机绕组选用的导



线太粗时,需用几根导线并绕代替。5号机座以下的电动机,单根导线的直径最好不超过1.25mm;对于6~9号机座的电动机,最好不超过1.68mm。代用后要求并绕的几根导线的总截面应等于或接近于原导线的截面。

$$q' = q/n'$$

式中: $q'$ ——改用并绕后每根导线的截面( $\text{mm}^2$ );

$q$ ——原来导线的截面( $\text{mm}^2$ );

$n'$ ——改用导线的并绕根数。

导线直径可查线规表或按下式换算:

$$d = 1.13 \sqrt{q'}$$

线圈并绕的导线,应采用相同直径的导线。

用并联导线代替单根导线时须注意,并联根数一般不超过3~4根。过多的并绕根数,会造成嵌线困难。因此,必要时要新校验槽满率。对于高强度聚酯漆包圆铜线,如QZ或QQ型,槽满率应控制在75%左右;铝导线或单纱漆包圆铜线,可控制在75~80%之间;对于油性漆包线,如Q型或氧化膜铝线,可控制在65~70%之间。若达不到上述要求,可采用增加绕组的并联支路数来减少线圈的并绕根数。

(2)改变绕组并联支路数计算:

①绕组改变并联支路后的导线截面为

$$q' = q \frac{a}{a'}$$

式中: $q$ ——绕组原来导线截面( $\text{mm}^2$ );

$a$ ——绕组原来的并联支路数;

$a'$ ——绕组改变后的并联支路数。

②绕组改变并联支路后,为保持每相的串联匝数不变,需增加每槽导线数。改变前后电动机的每槽导线数的关系如下:

$$\frac{N}{a} = \frac{N'}{a'}$$

每槽导线数为  $N' = N \frac{a'}{a}$  根/槽

式中： $N、N'$  —— 绕组改变前后的每槽导线数；

$a、a'$  —— 绕组改变前后的并联支路数。

③ 改变并联支路数后还应满足： $2p/a =$  整数，否则并联支路数不能成立。

在改变  $a$  时，要考虑电动机极数和绕组型的限制。电动机允许最大并联支路数见表 5—80。

**例 5—29** 有一台 6 极电动机，绕组为一路星形双层迭绕，导线截面  $q$  为  $5.9\text{mm}^2$ ，每槽导线数  $N$  为 16 根/槽，试选择导线。

**解** 查线规表得最接近的标称导线截面是  $5.43$  和  $6.29\text{mm}^2$ ，直径分别是  $2.63\text{mm}$  和  $2.83\text{mm}$ ，由于线径过粗，嵌线困难，若改选  $\phi 1.12$  的导线，则需用 6 根并绕，并绕根数太多，不可取。现拟改为三路并联，以满足极数与并联支路数关系的条件。

$$2p/a = 6/3 = \text{整数}$$

绕组导线截面  $q'$  为

$$q' = q \frac{a}{a'} = 5.9 \times \frac{1}{3} = 1.966 (\text{mm}^2)$$

改变后的每槽导线数  $N'$  为

$$N' = N \frac{a'}{a} = 16 \times \frac{3}{1} = 48 (\text{根/槽})$$

采用双层迭绕，每个绕组为 24 匝，电动机绕组的接线方式不变。

表 5—80 各种绕组允许最大并联支路数

绕组型式		允许最大并联支路数 ( $a_{max}$ )
层数	端部连接方式	
单 层	同心式	$2p$ ( $q$ 为偶数) $p$ ( $q$ 为奇数)
	同心链式	$2p$ ( $q$ 为偶数) $p$ ( $q$ 为奇数)
	等节距元件链式	$2p$ ( $q$ 为偶数) $p$ ( $q$ 为奇数)
	交叉链式	$2p$ ( $q$ 为偶数) $p$ ( $q$ 为奇数)
双 层	60°相带整数槽	
	分数槽绕组	$2p/p'$ ( $p'$ 为分数 $q$ 约净后的分母)
	散布绕组	$2p$
	$\Delta$ -Y 混合绕组	$2p$ ( $q$ 为偶数) $p$ ( $q$ 为奇数)
单 双 层	波 绕	$2p/p'$ ( $p'$ 为分数 $q$ 约净后的分母)
	同 心 式	$2p$
	60°相带整数槽绕组	$2p$ (—相带单层槽数为偶数) $p$ (—相带单层槽数为奇数)

注:表中  $p$  为极对数。

**例 5—30** 有一台 Y(IP23)系列 37kW 三相异步电动机,已知并联支路数  $a$  为 2,并绕根数  $n$  为 2,采用线径为  $\phi 1.40$  的 QZ 型导线,要求分别改变  $n$  和  $a$ ,试选择导线。

**解**

(1)当  $a=2$  不变,改变  $n$  时,令  $n=3,4,5$ ,则代用导线直径分别有

$$n' = 3, \quad d' = \sqrt{\frac{n}{n'}} d = \sqrt{\frac{2}{3}} \times 1.40 = 1.14(\text{mm})$$

取标称导线  $\phi 1.16$

$$n' = 4, \quad d' = \sqrt{\frac{2}{4}} \times 1.40 = 0.99(\text{mm})$$

取标称导线  $\phi 1.00$

$$n' = 5, \quad d' = \sqrt{\frac{2}{5}} \times 1.40 = 0.885(\text{mm})$$

取标称导线  $\phi 0.90$

(2)当  $n=2$  不变,改变  $a$  时,令  $a=1,4,8$ ,则代用导线直径分别有

$$a' = 1, \quad d' = \sqrt{\frac{a}{a'}} d = \sqrt{\frac{2}{1}} \times 1.40 = 1.98(\text{mm})$$

取标称导线  $\phi 2.02$

$$a' = 4, \quad d' = \sqrt{\frac{2}{4}} \times 1.40 = 0.99(\text{mm})$$

取标称导线  $\phi 1.0$

$$a' = 8, \quad d' = \sqrt{\frac{2}{8}} \times 1.40 = 0.70(\text{mm})$$

取标称导线  $\phi 0.72$

(3) 改变绕组接线方式以适应绕组导线截面要求: 如果计算得的导线截面与标称导线相差较大时, 还可以采取改变绕组接线方式的办法来满足电源电压的要求。

当绕组由 Y 接法改为  $\Delta$  接法时

$$d_{\Delta} = 0.76d_Y, \quad W_{\Delta} = \sqrt{3}W_Y$$

当绕组由  $\Delta$  接法改为 Y 接法时

$$d_Y = 1.33d_{\Delta}, \quad W_Y = 0.58W_{\Delta}$$

式中:  $d_{\Delta}$ 、 $W_{\Delta}$  —— 绕组为  $\Delta$  接法时的导线直径和匝数;

$d_Y$ 、 $W_Y$  —— 绕组为 Y 接法时的导线直径和匝数。

例 5—31 JO<sub>2</sub>—72—6 型 22kW 三相异步电动机, 已知绕组为  $\Delta$  接法, 并绕根数  $n$  为 2, 并联支路数  $a$  为 2, 每联线圈为 14 匝, 双层绕组, 导线直径  $d$  为 1.2mm (QZ 型) 要求  $a$  和  $n$  保持不变的条件下, 只改变绕组接线方式, 试计算代用导线。

解 绕组由  $\Delta$  接法改为 Y 接法时

$$d_Y = 1.33d_{\Delta} = 1.33 \times 1.2 = 1.58\text{mm}, \text{取标称导线 } \phi 1.56$$

$$W_Y = 0.58W_{\Delta} = 0.58 \times 14 = 8.12 \text{匝}, \text{选 8 匝}$$

(4) 绕组接线方式和并联支路数同时改变的导线计算: 在选用代用导线过程中, 往往需要同时改变电动机绕组接线方式和绕组的并联支路数。这时改变后的导线直径和线圈匝数可按下列公式计算

$$d' = \xi_d d, \quad W' = \xi_w W$$

式中:  $d'$ 、 $W'$  —— 改变后的导线直径和线圈匝数;

$d$ 、 $W$  —— 电机原来的导线直径和线圈匝数;

$\xi_d$ 、 $\xi_w$  —— 电机导线线径系数和线圈匝数系数, 见表 5—

表 5-81 绕组改接后的线径系数  $\xi_2$  和线圈匝数系数  $\xi_1$

$\xi_2/\xi_1$	绕组改接前	一 路 星 接	二 路 星 接	三 路 星 接	四 路 星 接	五 路 星 接	六 路 星 接	八 路 星 接	十 路 星 接
	绕组改接后	一 路 星 接	二 路 星 接	三 路 星 接	四 路 星 接	五 路 星 接	六 路 星 接	八 路 星 接	十 路 星 接
1.0	1.0	1.41	1.73	2.0	2.24	2.24	2.83	3.16	
	1.0	0.50	0.33	0.25	0.20	0.17	0.125	0.10	
0.17	1.0	1.22	1.41	1.58	1.73	2.0	2.24	2.24	
	2.0	1.0	0.67	0.50	0.40	0.33	0.35	0.20	
0.58	1.0	1.15	1.29	1.41	1.63	1.83	1.83	1.83	
	3.0	1.50	1.0	0.75	0.60	0.50	0.38	0.30	
0.50	1.0	1.12	1.22	1.41	1.58	1.73	1.83	1.83	
	4.0	2.0	1.33	1.0	0.80	0.67	0.50	0.40	
0.45	1.0	1.09	1.26	1.41	1.58	1.73	1.83	1.83	
	5.0	2.5	1.67	1.25	1.0	0.83	0.63	0.50	
0.41	1.0	1.15	1.29	1.41	1.58	1.73	1.83	1.83	
	6.0	3.0	2.0	1.52	1.21	1.0	0.75	0.60	
0.35	1.0	1.07	1.22	1.41	1.58	1.73	1.83	1.83	
	8.0	4.0	2.67	2.0	1.6	0.33	1.0	0.80	
0.32	1.0	1.09	1.26	1.41	1.58	1.73	1.83	1.83	
	10	5.0	3.3	2.5	2.0	1.67	1.25	1.0	
0.77	1.0	1.32	1.52	1.69	1.86	2.15	2.41	2.41	
	1.73	0.86	0.68	0.43	0.35	0.29	0.22	0.17	
0.54	1.0	1.07	1.22	1.41	1.58	1.73	1.83	1.83	
	3.46	1.73	1.15	0.87	0.69	0.58	0.43	0.35	
0.44	1.0	1.07	1.22	1.41	1.58	1.73	1.83	1.83	
	5.19	2.59	1.73	1.30	1.04	0.87	0.65	0.52	
0.38	1.0	1.07	1.22	1.41	1.58	1.73	1.83	1.83	
	6.92	3.46	2.31	1.73	1.38	1.15	0.86	0.69	
0.34	1.0	1.07	1.22	1.41	1.58	1.73	1.83	1.83	
	8.65	4.33	2.88	2.16	1.73	1.44	1.18	0.86	
0.31	1.0	1.07	1.22	1.41	1.58	1.73	1.83	1.83	
	10.4	5.19	3.46	2.60	2.08	1.73	1.30	1.04	
0.27	1.0	1.07	1.22	1.41	1.58	1.73	1.83	1.83	
	1.38	6.88	4.64	3.44	2.80	2.32	1.73	1.38	
0.24	1.0	1.07	1.22	1.41	1.58	1.73	1.83	1.83	
	1.73	8.6	5.8	4.3	3.5	2.9	2.16	1.73	

(续表)

$E_d/E_w$	绕组改接前								
	一路角接	二路角接	三路角接	四路角接	五路角接	六路角接	八路角接	十路角接	
绕组改接后		一路星接	二路星接	三路星接	四路星接	五路星接	六路星接	八路星接	十路星接
1.0	1.32	1.86	2.28	2.63	2.92	3.23	3.78	4.16	
	0.58	0.29	0.19	0.15	0.12	0.10	0.07	0.06	
0.833	0.93	1.32	1.51	1.86	2.06	2.28	2.64	2.94	
	1.16	0.58	0.39	0.29	0.23	0.19	0.15	0.11	
0.667	0.76	1.08	1.32	1.52	1.70	1.86	2.15	2.14	
	1.73	0.87	0.58	0.43	0.35	0.29	0.22	0.17	
0.5	0.60	0.93	1.44	1.33	1.47	1.61	1.86	2.08	
	2.32	1.16	0.77	0.58	0.45	0.39	0.29	0.23	
0.333	0.59	0.83	1.32	1.18	1.32	1.44	1.67	1.86	
	2.89	1.44	0.96	0.72	0.58	0.48	0.36	0.29	
0.25	0.54	0.76	0.93	1.08	1.20	1.32	1.52	1.70	
	3.46	1.73	1.15	0.87	0.69	0.58	0.43	0.35	
0.167	0.47	0.66	0.81	0.93	1.04	1.14	1.32	1.47	
	4.6	2.72	1.52	1.20	0.95	0.79	0.58	0.46	
0.1	0.42	0.59	0.72	0.83	0.93	1.02	1.18	1.32	
	5.8	2.9	1.9	1.5	1.20	1.0	0.72	0.58	
0.077	1.0	1.41	1.73	2.0	2.24	2.45	2.83	3.16	
	1.0	0.50	0.33	0.25	0.20	0.17	0.15	0.10	
0.05	0.71	1.0	1.22	1.41	1.58	1.73	2.0	2.24	
	2.0	1.0	0.67	0.50	0.40	0.33	0.25	0.20	
0.033	0.58	0.82	1.0	1.15	1.29	1.41	1.63	1.83	
	3.0	1.50	1.0	0.75	0.60	0.50	0.38	0.30	
0.025	0.50	0.71	0.87	1.0	1.12	1.22	1.41	1.58	
	4.0	2.0	1.33	1.0	0.80	0.67	0.50	0.40	



(续表)

$\xi_a/\xi_w$	绕组改接前	一 路 角 接	二 路 角 接	三 路 角 接	四 路 角 接	五 路 角 接	六 路 角 接	八 路 角 接	十 路 角 接
	绕组改接后								
五路角接		0.45	0.63	0.78	0.90	1.0	1.10	1.27	1.41
		5.0	2.5	1.67	1.25	1.0	0.83	0.63	0.50
六路角接		0.41	0.58	0.71	0.82	0.91	1.0	1.15	1.29
		6	3	2	1.50	1.2	1.0	0.75	0.60
八路角接		0.35	0.50	0.61	0.71	0.79	0.87	1.0	1.12
		8	4	2.67	2	1.6	1.33	1.0	0.8
十路角接		0.32	0.45	0.58	0.63	0.71	0.78	0.90	1.0
		10	5	3.33	2.5	2.0	1.67	1.25	1.0

例 5—32 例 5—31 中,若要求改绕组接线为 Y 接法,同时又要改变并联支路数  $a$ ,试选择导线。

解 当  $a=1$  时,

$$d_{Y1} = \xi_{d1} d_{\Delta} = 1.86 \times 1.2 = 2.23(\text{mm}), \text{取标称导线 } \phi 2.10$$

$$W_{Y1} = \xi_{w1} W_{\Delta} = 0.29 \times 14 = 4.06(\text{匝}), \text{取 } 4 \text{ 匝}$$

当  $a=3$  时

$$d_{Y3} = \xi_{d3} d_{\Delta} = 1.08 \times 1.2 = 1.296(\text{mm}), \text{取标称导线 } \phi 1.29$$

$$W_{Y3} = \xi_{w3} W_{\Delta} = 0.87 \times 14 = 12.01(\text{匝}), \text{取 } 12 \text{ 匝}$$

当  $a=6$  时



$$d_{Y6} = \xi_{ds} d_{\Delta} = 0.76 \times 1.2 = 0.914(\text{mm}), \text{取标称导线 } \phi 0.9$$

$$W_{Y6} = \xi_{w6} W_{\Delta} = 1.73 \times 14 = 24.2(\text{匝}), \text{取 } 24 \text{ 匝}$$

(5)铜、铝线径的换算:

①以铜代铝:导线代用的原则是保持电机绕组铜损不变。在保持绕组匝数和节距不变的情况下,铜导线与铝导线的换算公式如下:

$$d_{Cu} = d_{Al} \sqrt{\frac{\rho_{Cu}}{\rho_{Al}}}$$

式中: $d_{Cu}$ 、 $d_{Al}$ ——裸铜线和裸铝线的直径(mm);

$\rho_{Cu}$ 、 $\rho_{Al}$ ——铜导线和铝导线的电阻率( $\Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$ ), A、E、B 级绝缘,  $\rho_{Cu} = 0.0219$ ; F、H 级绝缘,  $\rho_{Cu} = 0.0245$ ; A、E、B 级绝缘,  $\rho_{Al} = 0.0346$ ; F、H 级绝缘,  $\rho_{Al} = 0.0392$ 。

若以 A、E、B 级绝缘电阻率代入上式,则

$$d_{Cu} \approx 0.79d_{Al}$$

若以 F、H 级绝缘电阻率代入上式,则

$$d_{Cu} \approx 0.79d_{Al}$$

因此,不论何种绝缘,取  $d_{Cu} \approx 0.8d_{Al}$  即可。由于铜导线比铝导线直径细 0.8 倍,代用后引起槽满率下降。为了保证槽满率不变,在改用铜导线时,可直接按铝导线绝缘外径选用,这时绕组电阻将降低,即  $R_{Cu} = 0.63R_{Al}$ 。绕组铜耗降低 40% 左右,电动机效率可提高 2~4%。

②以铝代铜:可以用聚酯漆包圆铝导线代替双纱包或单纱漆包圆铜导线,以节约铜材。

QZL 型聚酯漆包圆铝导线属于 B 级绝缘,只要把槽绝缘改用 E 级或 B 级绝缘材料,就能使 A 级绝缘等级提高到 E 级或 B 级绝缘水平。若原电动机为 A 级绝缘,提高到 B 级绝缘时,铝导

线直径只要比原来铜导线直径大 1.1 倍即可。而槽绝缘也可由原来厚度为 0.6mm 降至 0.27mm 左右。通常能在不降低电动机功率的情况下直接改为铝导线。必要时重新校验一次槽满率。

## 2. 电动机改压计算

电动机可以由低压改为高压(500V 以上)使用,也可以由高压改为低压使用。对于前者,因受槽形及绝缘的限制,电动机功率会大大降低,所以一般不宜改压;对于后者,因槽绝缘可以减薄,可采用较大截面的导线,故电动机出力可有所提高。

(1)改变接法改压:当需要改变电动机的使用电压时,可改变接线(改变绕组每相串联线圈匝数)以满足电源电压要求。为了使电动机在改接前后的温升和各部磁通密度保持不变,导线电流密度和线圈每匝所承受的电压应不变动。具体计算步骤如下:

①计算改压前后的电压比  $U_i\%$ :

$$U_i\% = \frac{U'}{U} \times 100$$

式中: $U, U'$  —— 改压前、后电动机的使用电压(V)。

②查明电动机绕组是星形接法还是三角形接法,以及绕组的并联支路数  $a$ 。

③由表 5-79 中找出与计算出的电压比  $U_i\%$  最接近的  $U\%$ ,便可根据其它已知条件查出所要改变电压后应有的接法。

④改接后的绕组并联支路数  $a'$  与极数  $2p'$  关系应满足: $2p'/a' =$  整数。

⑤绕组改接后的电压变动不得超过  $\pm 5\%$ ,

即 
$$\frac{U_i\% - U\%}{U\%} \leq \pm 5\%$$

式中: $U\%$  —— 由表 5-82 选取的电压比。

表 5—82 三相绕组改变接线的电压比  
(原来绕组电压为 100%)

原绕组接线	电 压 比 $U\%$							
	绕组改接后接线							
	一路 星接	二路 星接	三路 星接	四路 星接	五路 星接	六路 星接	八路 星接	十路 星接
一路星接	100	50	33	25	20	16.6	12.5	10
二路星接	200	100	67	50	40	33	25	20
三路星接	300	150	100	75	60	50	38	30
四路星接	400	200	133	100	80	67	50	40
五路星接	500	250	167	125	100	83	63	50
六路星接	600	300	200	150	120	100	75	60
八路星接	800	400	267	200	160	133	100	80
十路星接	1000	500	333	250	200	167	125	100
一路角接	173	87	58	43	35	29	21.6	17.3
二路角接	346	173	115.5	87	69	58	43	35
三路角接	519	260	173	130	104	87.0	65	52
四路角接	693	346	231	173	138	115.5	87.5	69
五路角接	866	433	289	217	173	144	108	87.5
六路角接	1039	520	346	260	208	173	130	104
八路角接	1385	693	462	346	277	231	173	139
十路角接	1732	866	577	433	346	289	216	173

(续表)

原绕组接线	电 压 比 $U\%$							
	绕组改接后接线							
	一路角接	二路角接	三路角接	四路角接	五路角接	六路角接	八路角接	十路角接
一路星接	58	29	19.2	14.4	11.5	9.6	7.2	5.8
二路星接	115.5	58	38.4	29	23	19	14.4	11.5
三路星接	173	86.4	58	43	35	29	21.7	17.3
四路星接	231	115.5	77	58	46	38.4	29	23
五路星接	289	144	96	72	58	48	36	29
六路星接	346	173	115.5	86.4	69	58	43	35
八路星接	462	231	154	115.5	92	77	58	46
十路星接	577	289	192	144	115.5	96	72	58
一路角接	100	50	33.3	25	20	16.6	12.5	10
二路角接	200	100	69	50	40	33	25	20
三路角接	300	150	100	75	60	50	38	30
四路角接	400	200	133	100	80	67	50	40
五路角接	500	250	167	125	100	83	63	50
六路角接	600	300	200	150	120	100	75	60
八路角接	800	400	267	200	160	133	100	80
十路角接	1000	500	333	250	200	167	125	100

例 5—33 有一台 3kV、8 极、一路星接法的三相异步电动机,现要改在 380V 电源上使用,应如何改变绕组接线?

解

(1) 改接前后电压比为

$$U_i\% = \frac{380}{3000} \times 100 = 12.7$$

(2) 查表 5—82 中“原绕组接线”一栏,第一行的第七列得

“八路并联星接”项中的  $U\% = 12.5$  最为接近,可决定改接成八路并联星形接法。

(2)校验:改接后的  $a$  与  $2p$  关系:

$$2p/a = 8/8 = 1 = \text{整数, 满足要求。}$$

$$\text{又, } \frac{U_i\% - U\%}{U\%} = \frac{12.7 - 12.5}{12.5} = 1.6\%$$

改接后的电压误差未超过  $\pm 5\%$  的范围,因此满足要求。

(3)重绕绕组法改压:如果无法改变接线,或改接后绕组电压误差超过允许范围时,只得重绕绕组,以满足电源电压要求。

①重绕后绕组每槽导线数的计算:

$$N' = \frac{U'_e a'}{U_e a} N$$

式中: $N, N'$  —— 原绕组和新绕组的每槽导线数(根/槽);

$U_e, U'_e$  —— 原电源电压和重绕后电源电压(V);

$a, a'$  —— 原绕组和新绕组的并联支路数。

②重绕后导线截面计算:

$$q' = \frac{U_e n}{U'_e n'} q$$

式中: $q, q'$  —— 原绕组和新绕组的导线截面( $\text{mm}^2$ );

$n, n'$  —— 原绕组和新绕组的导线并绕根数。

**例 5—34** 有一台 380V、4 极三相异步电动机,绕组为一路三角形接线,现改在 220V 电源上使用,试进行改压计算。

**解**

(1)计算改压的电压比为

$$U_i\% = \frac{U}{U'} \times 100 = \frac{220}{380} \times 100 = 57.9$$

(2)查表 5—82 得最近的电压比是  $U\% = 58$ ,改接后为三路星形接线。

(3) 校验: 改接后的  $a$  与  $2p$  关系

$$2p/a = 4/3 \neq \text{整数}$$

故此种改接不能成立。再试选电压比  $U\% = 50$  的二路三角形接线校验

$$2p/a = 4/2 = 2 = \text{整数}$$

因此, 可改接为二路三角形接线。

改接后的电压误差为

$$\frac{U_j\% - U\%}{U\%} = \frac{57.9 - 50}{50} = 15.8\%$$

已超过  $\pm 5\%$  的允许范围, 故不能用改接方法来改压, 而必须重绕绕组。

(4) 重绕绕组计算: 绕组拆除时, 先记录下列数据:

槽数,  $z = 36$ , 每槽导线数  $N = 34$ , 导线直径  $d = 1.12\text{mm}$ , 并绕根数  $n = 1$ , 双层迭绕, 线圈节距  $y = 7$ 。

每槽导线数为

$$n' = \frac{U' a'}{U a} = \frac{220 \times 1}{380 \times 1} = 19.68 (\text{根/槽}), \text{取 } 20 \text{ 根/槽}$$

原绕组导线直径  $d = 1.12\text{mm}$ , 查线规表得标称截面  $q = 0.985\text{mm}^2$ 。

新绕组导线截面为

$$q' = \frac{U n}{U' n'} q = \frac{380 \times 1}{220 \times 1} \times 0.985 = 1.7 (\text{mm}^2)$$

查线规表, 可选取标称直径  $d_1 = 1.50\text{mm}$  的 QZ 型高强度漆包圆铜线 (绝缘外径  $d = 1.58\text{mm}$ )。

改压后, 新绕组的形式、接法和线圈节距均可保持不变。

### 3. 直流电动机改压计算

(1) 电枢绕组计算:

①电枢绕组总的有效导体根数

$$N'_{ax} = \frac{U'_e n'_e a}{U_e n_e a'} N_{ax}$$

式中： $N_{ax}$ 、 $N'_{ax}$ ——改压前、后电枢绕组总的有效导体根数（根）；

$U_e$ 、 $U'_e$ ——改压前、后的额定电压(V)；

$n_e$ 、 $n'_e$ ——改压前、后电动机额定转速(r/min)；

$a$ 、 $a'$ ——改压前、后电枢绕组并联支路对数。

②每槽导线根数：

$$N = N'_{ax} / z \text{ (应为偶数)}$$

式中： $z$ ——电枢铁芯槽数。

③每个电枢绕组的匝数：

$$W = N / 2$$

④绕组元件数：

$$S = K / z$$

式中： $K$ ——换向片数。

⑤导线截面  $q'$

$$q' = \frac{P_e q \times 10^3}{U'_e I_e} = \frac{U_e}{U'_e} q$$

式中： $P_e$ ——额定功率(kW)；

$I_e$ ——原来电动机额定电流(A)；

$q$ ——原来电枢绕组导线截面(mm<sup>2</sup>)。

(2)换向极绕组计算：

①换向极绕组匝数  $W'_h$ ：

$$W'_h = \frac{U'_e a'_h}{U_e a_h} W_h$$



式中： $a_h, a'_h$ ——原来和改制后换向极绕组并联支路对数；

$W_h$ ——原来换向极绕组匝数。

②如果不知原来换向极绕组匝数，可直接按下式计算：

$$W'_h = (1.15 \sim 1.3) \frac{N_{uz}}{8ap}$$

式中： $p$ ——极对数。

③绕组导线截面  $q'_h$ ：

$$q'_h = \frac{P_e q_h}{U'_e I_e} \quad \text{或} \quad q'_h = \frac{U_e}{U'_e} q_h$$

式中： $q_h$ ——原来换向极绕组导线截面 ( $\text{mm}^2$ )。

(3)并励绕组：为了维持改压前后主磁通不变，需要改绕并励绕组、改变其匝数和截面。

①导线截面  $q'_i$ ：

$$q'_i = \frac{U_e}{U'_e} q_i$$

式中： $q_i$ ——原来并励绕组导线截面 ( $\text{mm}^2$ )。

②绕组匝数  $W'_i$ ：

$$W'_i = \frac{q_i}{q'_i} W_i$$

式中： $W_i$ ——原来绕组的匝数。

对于他励绕组，可不必改动。

直流电动机改压重绕，由于换向过程复杂，应特别注意改压后的换向性能。如发现换向不理想，可根据具体情况调整换向极的气隙等。

#### 4. 电动机改频计算

国外有一些国家的电网使用频率为 60Hz 的电源。如何将 60Hz 的电动机改成用于 50Hz 电源上，可利用以下简化公式：



$$P_1 = \frac{5}{6} P_2$$

当额定电压  $U_{1r} = U_{2r}$  时,则需要按下式改变电流和导线截面:

$$I_1 = \frac{5}{6} I_2, \quad q_1 = \frac{5}{6} q_2$$

由于感应电势  $E \propto fW$ ,故

$$W_1 = \frac{6}{5} W_2$$

式中:  $P_1$ 、 $P_2$ ——用于 50Hz 和 60Hz 电源上的电动机额定功率 (kW);

$I_1$ 、 $I_2$ ——50Hz 和 60Hz 时的定子电流(A);

$q_1$ 、 $q_2$ ——50Hz 和 60Hz 时的电动机绕组导线截面积 ( $\text{mm}^2$ );

$W_1$ 、 $W_2$ ——50Hz 和 60Hz 时电动机绕组的每圈匝数 (匝)。

由以上关系式可见,不必改定子绕组型式,只需对绕组导线截面和每圈匝数稍加改变,就能使 60Hz 的电动机用在 50Hz 电源上。反之亦然。改频后的电动机,出力降低,但转矩不变。

如果要改频后电动机功率不变,则每槽导体数应按下式改变:

$$N_1 = \sqrt{6/5} \quad N_2 = 1.095 N_1$$

式中:  $N_1$ 、 $N_2$ ——50Hz 和 60Hz 每槽导体数(根)。

由于 60Hz 电动机改为 50Hz 用,导体截面积要相应减少 10%左右,所以槽满率符合要求。

### 5. 改变极数计算

改变电动机的极数,可以改变其转速,通常应用于鼠笼型异步电动机。对于绕线型异步电动机,改变极数还涉及到转子改制

问题,比较麻烦,一般很少采用。改极时应注意:改极前、后电动机极数不能相差过大,例如不宜将6极电动机改成2极,否则改后定子轭部磁通密度会显著增加;同样理由,也不宜将4极电动机改为10极。

(1)改极后,定、转子槽数  $z_1$  和  $z_2$  的配合应满足以下要求:

$$z_1 - z_2 \div \pm 2p, z_1 - z_2 \div 1 \pm 2p, z_1 - z_2 \div \pm 2 \pm 4p$$

式中: $p$ ——极对数。

否则,电动机可能发生强噪音,甚至不能转动。

鼠笼型异步电动机改极的经验数据见表5—83。

(2)线圈节距:

$$y' = \frac{p}{p'} y$$

式中: $y, y'$  ——改极前、后线圈节距(槽);

$p, p'$  ——改极前、后电动机的极对数。

(3)每槽导线数  $N'$  :

①极数改少时,每槽导线数应按定子轭部磁通密度的条件计算:

$$N' = \frac{1.44K_c U_r \times 10^2}{z_1 h_c l B_c k_{ap}}$$

式中: $K_c$ ——降压系数;

$U_r$  ——定子绕组相电压(V);

$z_1$  ——定子铁芯槽数;

$h_c$  ——定子铁芯轭高(cm);

鼠笼型电动机改极简单经验数据

表 5-83

技术指标 变化范围 改极	每相串联匝数	导线截面	功率	节距 极距
2 改为 4	$W_4 = (1.4 \sim 1.5)W_2$	$q_4 = (0.75 \sim 0.8)q_2$	$P_4 = (0.55 \sim 0.6)P_2$	0.9
4 改为 2	$W_2 = (0.7 \sim 0.75)W_4$	$q_2 = (1.2 \sim 1.27)q_4$	$P_2 = (1.3 \sim 1.4)P_4$	0.8
4 改为 6	$W_6 = (1.3 \sim 1.4)W_4$	$q_6 = 0.8q_4$	$P_6 = 0.7P_4$	0.85
6 改为 4	$W_4 = (0.75 \sim 0.85)W_6$	$q_4 = (1.15 \sim 1.2)q_6$	$P_4 = (1.25 \sim 1.3)P_6$	0.8
6 改为 8	$W_8 = (1.25 \sim 1.3)W_6$	$q_8 = 0.9q_6$	$P_8 = 0.8P_6$	0.85
8 改为 6	$W_6 = (0.8 \sim 0.95)W_8$	$q_6 = (1.1 \sim 1.15)q_8$	$P_6 = (1.2 \sim 1.25)P_8$	0.8

- $l$ ——定子铁芯长度(cm)；
- $B_{c1}$ ——铁芯轭部磁通密度(T)
- $k_{dp}$ ——绕组系数， $k_{dp} = k_{d1} k_{p1}$ ，见表 5-2 和表 5-3。

②极数改多时，每槽导线数为

$$N' = 0.95 \frac{p'}{p} N$$

式中： $N$ ——改极前每槽导线数(根/槽)。

(4)导线直径  $d'$ ：

$$d' = d \sqrt{\frac{N}{N'}}$$

式中： $d$ ——改极前绕组导线直径(mm)。

(5)电动机功率估算：

$$P'_e = \left(\frac{d'}{d}\right)^2 P_e \quad \text{或} \quad P'_e = \frac{q'}{q} P_e$$

式中： $P_e$ 、 $P'_e$ ——改极前、后电动机的功率(kW)。

**例 5-35** 有一台 10kW6 极三相鼠笼型异步电动机，额定电压  $U_e$  为 380V，电流  $I_e$  为 21.5 安，Y 形接线，现改为 4 极，试求新绕组数据。

**解** 拆除绕组时记录以下数据：定子槽数  $z_1$  为 36，转子槽数  $z_2$  为 44，每槽导线数  $N$  为 26，导线采用 QZ 型漆包线，直径  $d$  为 1.56mm，二根并绕，线圈节距  $y$  为 5，绕组一路  $\Delta$  形接线，双层迭绕，定子铁芯内径  $D_1$  为 21cm，长度  $l$  为 10.5cm，轭高  $h_c$  为 2.5cm。

(1)定、转子槽数的配合：

$$\text{因为 } z_1 - z_2 = 36 - 44 = -8 \begin{cases} \neq 2p = 4 \\ \neq 1 \pm 2 = 1 \pm 4 \\ \neq \pm 2 \pm 4 = \pm 2 \pm 8 \end{cases}$$

所以可以由 6 极改为 4 极。

(2) 新绕组计算:

$$\text{线圈节距 } y' = \frac{P}{p'} y = \frac{3}{2} \times 5 = 7.5 (\text{槽}), \text{可取 } 8 \text{ 槽}$$

$$\text{每极每相槽数 } q = \frac{z}{2pm} = \frac{36}{4 \times 3} = 3 (\text{槽})$$

$$\text{极距 } \tau = \frac{z}{2p} = \frac{39}{4} = 9.75 (\text{槽})$$

查表 5—2 和表 5—3, 得分布系数  $k_{d1} = 0.96$ , 短距系数  $k_{p1} = 0.985$ 。

$$\text{绕组系数 } k_{dp} = k_{d1} k_{p1} = 0.96 \times 0.985 = 0.945$$

(3) 每槽导线数: 因为是改少极数, 所以应按轭部磁通密度  $B_e$  计算。

$$\text{选降压系数 } k_e = 0.94, B_{c1} = 1.60 \text{T}, \text{原电动机相电压为 } U_x = U_1 / \sqrt{3} = 380 / \sqrt{3} = 220 (\text{V})$$

每槽导线数为

$$\begin{aligned} N &= \frac{1.44 k_e U_x \times 10^2}{z h_e l B_{c1} k_{dp}} \\ &= \frac{1.44 \times 0.94 \times 220 \times 10^2}{36 \times 2.5 \times 10.5 \times 1.60 \times 0.945} \\ &= 20.8 (\text{根/槽}), \text{取 } 20 \text{ 根/槽} \end{aligned}$$

(4) 新绕组导线直径:

$$d' = d \sqrt{\frac{N}{N'}} = 1.56 \sqrt{\frac{26}{20}} = 1.78(\text{mm})$$

查线规表,选用标称直径  $\phi 1.81$  的 QZ 型高强度漆包圆铜线(截面为  $2.57\text{mm}^2$ )。

(5)改极后电动机功率为

$$P_e' = P_e \left( \frac{d'}{d} \right)^2 = 10 \times \left( \frac{1.81}{1.56} \right)^2 = 13.5(\text{kW})$$

电动机改为 4 极后,绕组形式不变,即仍采用双层迭绕一路星形接线。

### 十七、电机转子扎线修理的计算

扎线必须牢固地扎住绕组,以防绕组在转子或电枢旋转时在离心力的作用下由槽内甩出。

扎线一般采用弹性极限为  $1569\text{MPa}$  的钢线。扎线绕在铁芯上和端接部分上。在扎绕时,拉力必须合适,拉力过大会损坏绕组,拉力过小又扎不牢。可根据表 5—84 列出的钢线拉力数据来计算用力。

表 5—84 钢丝强度和绑扎拉力

钢丝直径 (mm)	钢丝极限强度(N)			
	镀锡钢丝		无磁性钢丝	
	单位面积	全面积	单位面积	全面积
0.8	1765	892		
1.0	1765	1383	1471	
1.2	1765	1991		1157
1.5	1667	2942	1471	2609
2.0	1667	5286	1471	4609
0.8	343~539	294~490	294~441	392~588
1.0	539~785	490~785	441~686	537~883

(续表)

钢丝直径 (mm)	钢丝极限强度(N)			
	镀锡钢丝		无磁性钢丝	
	单位面积	全面积	单位面积	全面积
1.2	785~1177	735~1128	637~1030	981~1275
1.5	1226~1814	1128~1716	981~1618	1373~2010
2.0	2157~3236	2010~3089	343~1863	2452~2648

图 5—79 所示的扎线用设备使用很方便,在转动转子或电枢时并不需要用很大的力。

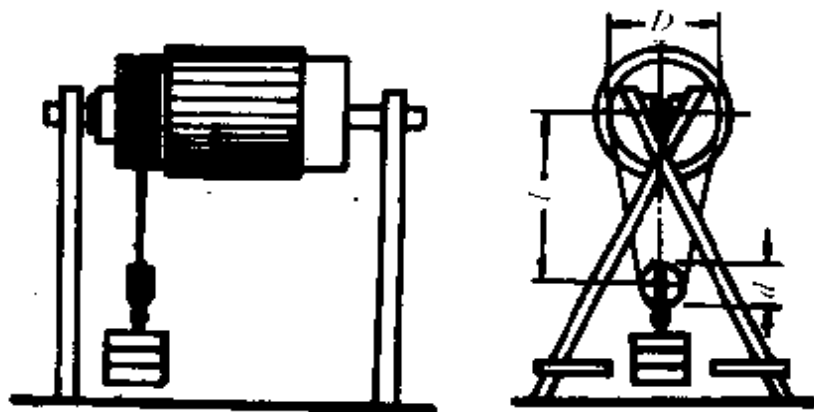


图 5 79 扎线用设备

## 第九节 磁放大器性能参数计算公式

### 一、磁放大器线路的类型

磁放大器实际上是可控饱和电抗器,与其它电路元件组合可实现放大和控制的功能。

磁放大器线路大致可分为以下四种类型：

1. 串联式饱和电抗器线路(图 5—80)。
2. 外反馈式线路(图 5—81)。
3. 自饱和式线路(图 5—82)。
4. 快速磁放大器线路(图 5—83)。

以上线路都是通过输入控制信号来控制铁心磁通的大小并改变其输出。

## 二、各种磁放大器的性能及计算公式

各种磁放大器的性能参数计算公式,见表 5—85。

表 5—85 各种磁放大器的性能

线路型式	电流放大系数 $K_i$	电压放大系数 $K_u$	功率放大系数 $K_p$	时间常数 $T_s$	性能系数 $M$
串联式饱和电抗器线路	$\frac{W_c}{W_z}$	$\frac{R_z}{R_c} \cdot \frac{W_c}{W_z}$	$\frac{R_z}{R_c} \cdot \frac{W_c}{W_z}$	$\frac{1}{4f} \frac{R_z}{R_c} \cdot \frac{W_c}{W_l}$	$4f$
外反馈式线路	$\frac{1}{1-\beta} \frac{W_c}{W_z}$	$\frac{1}{1-\beta} \frac{R_z}{R_c} \cdot \frac{W_c}{W_z}$	$\frac{1}{4f(1-\beta)} \left[ \frac{R_z}{R_c} \left( \frac{W_c}{W_z} \right)^2 + \beta^2 \frac{R_z}{R_l} \right]$	$\frac{1}{4f(1-\beta)} \times \left[ \frac{R_z}{R_c} \left( \frac{W_c}{W_z} \right)^2 + \beta^2 \frac{R_z}{R_f} \right]$	$\frac{4f}{1-\beta} \times \left[ 1 + \frac{R_c}{R_z} \left( \frac{W_f}{W_c} \right) \right]$



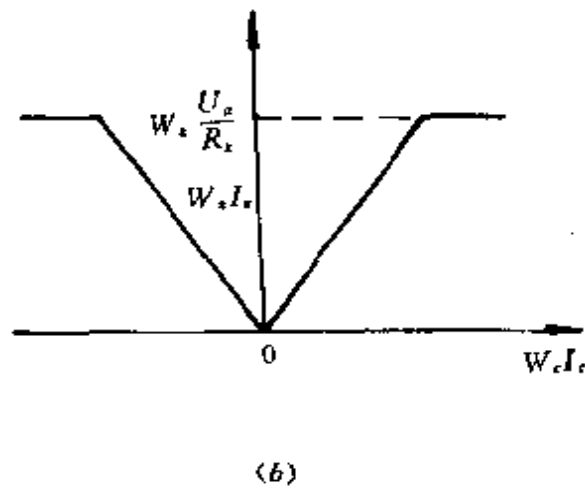
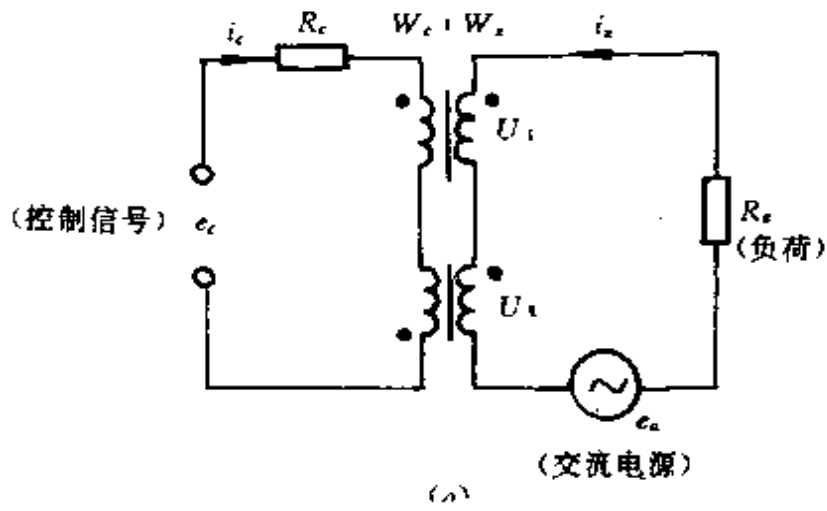
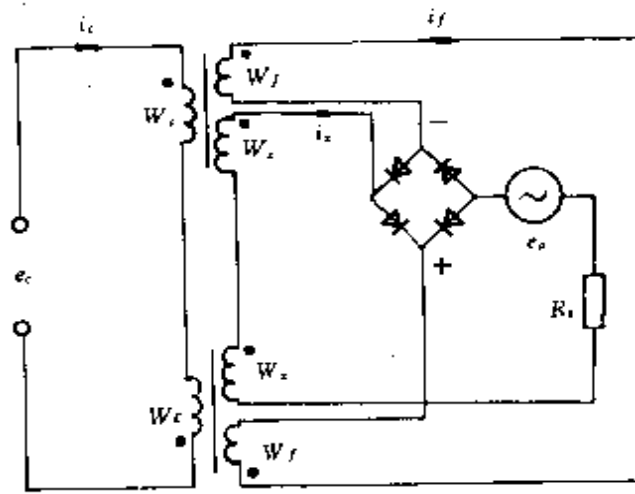
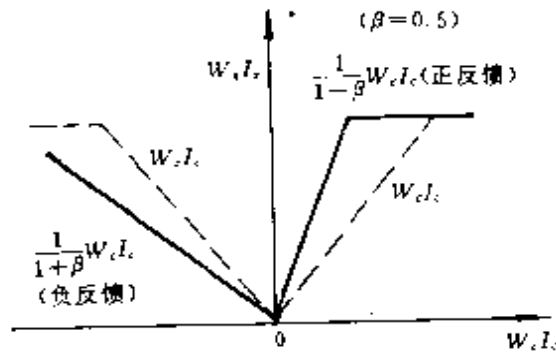


图 5-80 串联式饱和电抗器线路

(a)原理图 (b)控制特性曲线



(a)



(b)

图 5—81 外反馈式线路

(a)原理图 (b)控制特性曲线

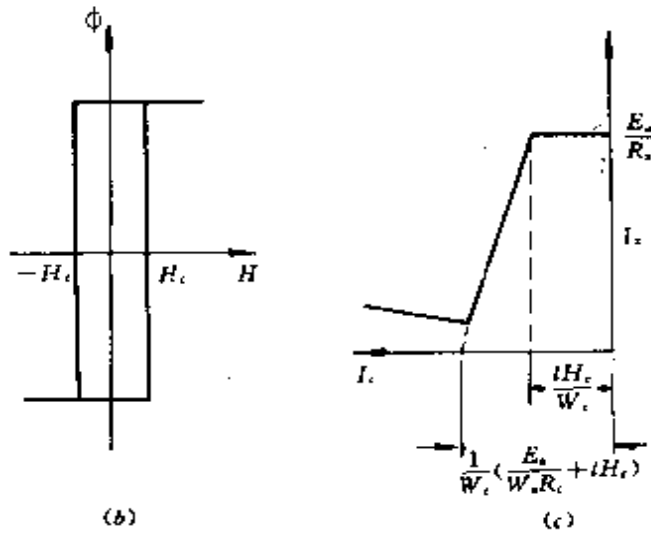
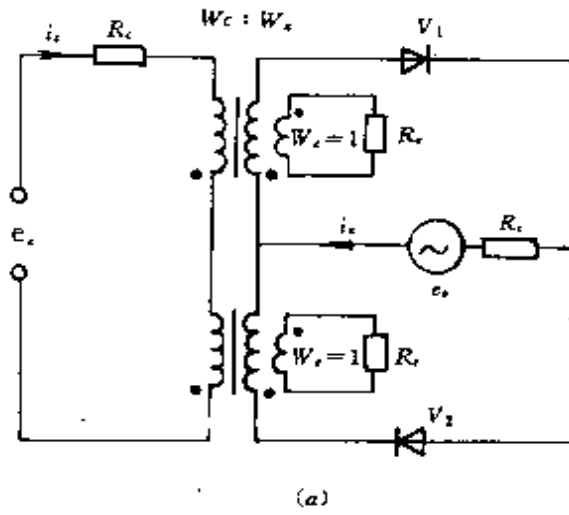


图 5—82 自饱和式线路

(a)原理图(当考虑涡流电阻  $R_e$  时) (b)直流磁滞曲线 (c)控制特性曲线

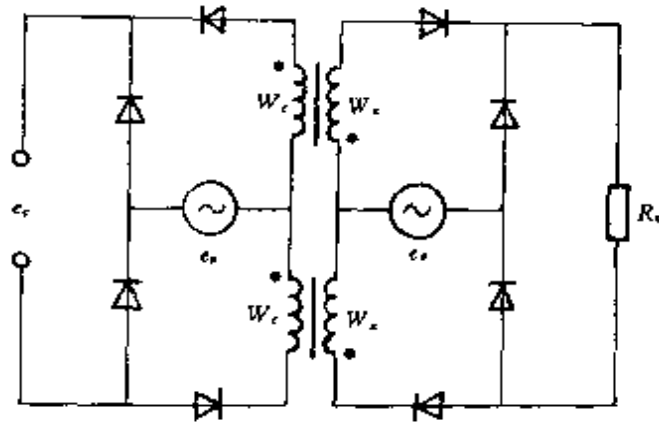


图 5—83 快速磁放大器线路

(续表)

线路型式	电流放大系数 $K_i$	电压放大系数 $K_u$	功率放大系数 $K_p$	时间常数 $T_s$	性能系数 $M$
自饱和式线路	$\frac{R_c}{R_z} W_c W_z$	$\frac{R_c}{R_z} W_c W_z$	$\frac{R_c^2}{R_z R_c} (W_c W_z)^2$	$\frac{1}{2f} \left( 1 + \frac{W_c^2 R_c}{R_z} \right)$	
快速磁放大器线路		$\frac{W_z}{W_c}$		$\frac{1}{2f}$	

注： $f$ ——电源频率(Hz)； $R_f$ ——反馈线圈电阻( $\Omega$ )。

$R_z$ ——负荷电阻( $\Omega$ )； $\beta$ ——反馈系数， $\beta = W_f / W_x$ 。

其它符号如图所示。

### 第十节 电动按摩器的设计

电动按摩器主要由线圈、铁芯和振动体等组成。当线圈中通入 50Hz 电流时，振动体每分钟发振 100 次。

#### 1. 铁芯的选择

电动按摩器通常采用如图 5—84 所示 E 型铁芯。线圈置于

中间芯柱上。电磁吸力可按下式计算(空气中):

$$F = 9.81 \left( \frac{B}{0.5} \right)^2 S$$

式中: $F$ ——电磁吸力(N);

$B$ ——磁通密度(T);

$S$ ——磁极表面积( $\text{cm}^2$ )。

电动按摩器的电磁吸力要求在8N以上。铁芯迭厚 $b$ 一般取大于18mm。

## 2. 线圈计算

确定了铁芯的规格和电磁吸力,便可按以下步骤计算线圈数据。

(1)气隙磁导 $G_s$ 为

$$G_s = \mu_0 \frac{ab}{100\delta} \quad (\text{H})$$

式中: $\mu_0$ ——空气导磁率(H/m),为 $1.2566 \times 10^{-6}$ ;

$a, b$ ——铁芯柱宽和迭厚(cm);

$\delta$ ——气隙平均长度(cm),一般取0.15~0.2。

(2)所需磁通 $\phi$ 为

$$\phi = 6 \sqrt{\frac{2FS}{9.81}} \times 10^{-5} \quad (\text{Wb}), \quad S = ab$$

式中: $F$ ——电磁吸力(N),一般取大于10。

(3)线圈匝数 $W$ 为

$$W = \frac{U}{4.44f\phi} \quad (\text{匝})$$

式中: $U$ ——电源电压(V);

$f$ ——电源频率(Hz)。

(4) 励磁电流  $I$  为

$$I = \frac{\phi}{\sqrt{2}WG_s} \text{ (A)}$$

(5) 导线直径  $d$  为

$$d = 1.12 \sqrt{\frac{I}{j}} \text{ (mm)}$$

式中： $j$ ——电流密度 ( $\text{A}/\text{mm}^2$ )，一般取 3~6。

3. 校验窗口面积

图 5—84 为铁芯与绝缘结构图。

$$\text{每层绕组匝数 } W_j = \frac{h - 2b_1}{d}$$

$$\text{绕组层数 } n = W/W_j$$

$$\text{线圈和绝缘等所占高度 } h' = b_2 + nd + (n-1)b_4 + b_3$$

若  $h' < C$ ，则线圈能放得下铁芯窗口，满足要求。式中各符号见图 5—84。

**例 5—36** 已知一 E 型铁芯，铁芯柱宽  $a$  为 1.8cm，迭厚  $b$  为 1.8cm，铁芯窗高  $h$  为 28cm，窗口宽  $c$  为 15cm；平均气隙  $\delta$  为 0.15cm，要求电磁吸力  $F$  为 10N，试计算电动按摩器的线圈数据。

**解**

(1) 气隙磁导：

$$\begin{aligned} G_\delta &= \mu_0 \frac{ab}{100\delta} = \frac{1.2566 \times 10^6 \times 1.8 \times 1.8}{100 \times 0.15} \\ &= 27 \times 10^{-8} \text{ (H)} \end{aligned}$$

(2) 所需磁通：

$$\phi = 6 \sqrt{\frac{2FS}{9.81}} \times 10^{-5} = 6 \sqrt{\frac{2 \times 10 \times 1.8 \times 1.8}{9.81}} \times 10^{-5} = 15.4 \times 10^{-5} (\text{Wb})$$

(3) 线圈匝数:

$$W = \frac{U}{4.44f\phi} = \frac{220}{4.44 \times 50 \times 15.4 \times 10^{-5}} = 6435 (\text{匝})$$

(4) 励磁电流:

$$I = \frac{\phi}{\sqrt{2}WG_s} = \frac{15.4 \times 10^{-5}}{\sqrt{2} \times 6435 \times 27 \times 10^{-8}} = 0.0627 (\text{A})$$

(5) 导线直径:

$$d = 1.12 \sqrt{\frac{I}{j}} = 1.12 \sqrt{\frac{0.0627}{5}} = 0.125 (\text{mm})$$

式中  $j$  取  $5\text{A}/\text{mm}^2$ 。

查线规表, 得标称线径  $\phi 0.13$ , 采用 QZ 型高强度漆包圆铜线, 绝缘导线外径为  $0.16\text{mm}$ 。

(6) 校验窗口面积:

$$\text{每层绕组匝数 } W_1 = \frac{28 - 2 \times 2}{0.16} = 150 (\text{匝/层})$$

绕组层数  $n = 6435 / 150 = 42.9$  (层), 取 43 层  
绕组和绝缘等所占高度

$$h' = 2 \times 0.5 + 43 \times 0.16 + 42 \times 0.1 + 2 \times 0.5 = 13.08 (\text{mm})$$

此值小于  $C = 15\text{mm}$ , 因此线圈能放入铁芯窗口。

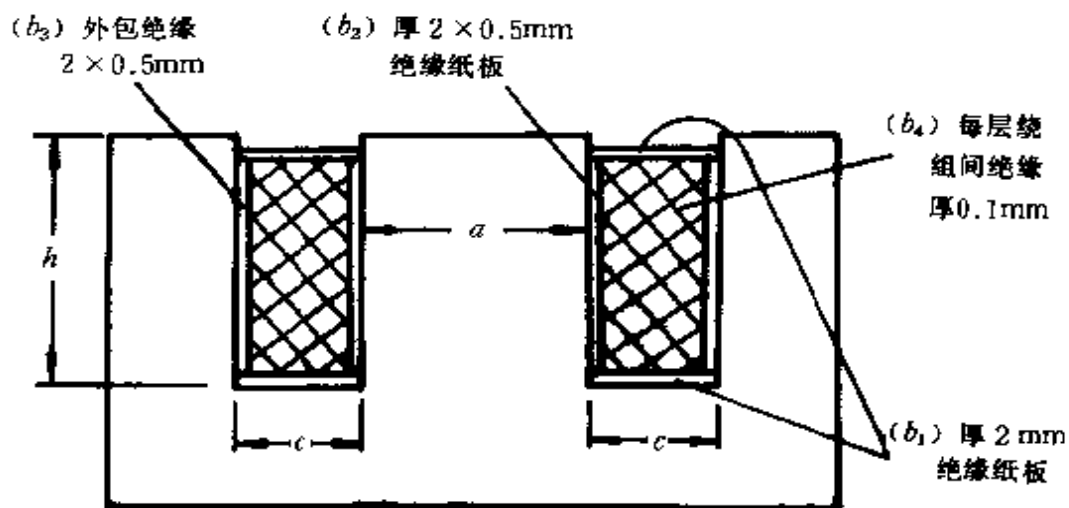


图 5—84 铁芯与绝缘结构图



---

---

## 第六章 短路电流计算

### 第一节 标么值及其计算

#### 一、标么值的基本概念

在电力系统及电机参数计算中,常常采用“标么制”(标么值),而不直接采用有各单位制(实际值)。采用标么值能使数字计算大为简化,概念明确,并能减少计算错误。

标么值,又称相对值或分数值,用公式表示为

$$\text{标么值} = \frac{\text{实际值(任意量纲)}}{\text{基准值(与实际值同量纲)}}$$

标么值没有单位。例如,实际值为 630kVA、1600kVA 的容量,当选定 1000kVA 为容量的基准值时,则其标么值分别为 0.63 及 1.6。

如果在计算电力系统短路电流时,已知系统中某一元件的电压为  $U$ ,三相容量为  $S = \sqrt{3}UI$ ,电流为  $I$ ,电抗为  $X$ (假设电阻  $R=0$ ),而所选定的基准电压、基准容量、基准电流及基准电抗分别为  $U_j$ 、 $I_j$ 、 $S_j$  和  $X_j$ ,则这一元件的各已知量的标么值分别为

$$U_{*,j} = \frac{U}{U_j}, \quad S_{*,j} = \frac{S}{S_j}, \quad I_{*,j} = \frac{I}{I_j} = I \frac{\sqrt{3}U_j}{S_j}$$
$$X_{*,j} = \frac{X}{X_j} = \frac{X}{U_j / \sqrt{3}I_j} = \frac{\sqrt{3}I_j X}{U_j} = X \frac{S_j}{U_j^2}$$

如果选取各元件自身的额定值( $U_n$ 、 $S_n$ 、 $I_n$ )为基准值时,则各量的标么值分别为

$$U_{*e} = \frac{U}{U_e}, \quad S_{*e} = \frac{S}{S_e}, \quad I_{*e} = \frac{I}{I_e}$$

$$X_{*e} = \frac{\sqrt{3} I_e X}{U_e} = \frac{S_e}{U_e^2} X$$

在计算电力系统短路电流时,若不特别说明,各元件的标么值总是相对于该元件的额定电压而言。如发电机、变压器、电抗器等铭牌上标明的标么值电抗,都是以该元件的额定值作基准值。

工程计算上通常先选定基准容量  $S_j$  和基准电压  $U_j$ , 与其相应的基准电流  $I_j$  和电抗  $X_j$ , 均可由这两个基准值导出。

### 二、电抗在不同基准值下的换算

当从某一基准值容量  $S_j$  的标么值化到另一基准值容量  $S$  的标么值时

$$X_{*s} = X_{*j} \frac{S}{S_j}$$

当从某一基准电压  $U_{1j}$  的标么值化到另一基准值电压  $U_{2j}$  的标么值时,

$$X_{*2} = X_{*1} \frac{U_{1j}^2}{U_{2j}^2}$$

当从已知系统短路容量或与该系统连接的遮断容量  $S_{sh}$  化到基准容量  $S_j$  的标么值时,

$$X_{*s} = \frac{S_j}{S_{sh}}$$

### 三、电抗标么值和有名值的变换

电抗标么值和有名值变换公式见表 6-1。

### 四、各类元件的电抗平均值

各类元件的电抗平均值见表 6-2。

表 6—1 电路元件阻抗标么值、有名值和短路容量的换算公式

序号	元件名称	标 么 值	有 名 值(Ω)	短路容量(MVA)	符 号 说 明
1	发电机 (或电动机)	$X_{*d} = \frac{X_d\%}{100} \cdot \frac{S_j}{S_c} - X_d' \frac{S_j}{S_c}$	$X_d' = \frac{X_d\%}{100} \cdot \frac{U^2}{S_c}$	$S_d = \frac{100S_c}{X_d}$	$S_b$ —发电机(电动机)或变压器的额定容量(MVA); 对于三绕组变压器, $S_c$ 指最大容量绕组的额定容量; $X_d'$ —发电机(电动机)的超瞬变电抗相对值;
2	变压器	$R_{*b} = P_d \frac{S_j}{S_c^2} \times 10^{-3}$ $X_{*b} = \sqrt{Z_b^2 - R_b^2}$ $Z_{*b} = \frac{U_d\%}{100} \cdot \frac{S_j}{S_c}$ 当电阻值允许忽略不计 $X_{*b} = \frac{U_d\%}{100} \cdot \frac{S_j}{S_c}$	$R_b = \frac{P_d}{3I_b^2} \times 10^{-3}$ $-\frac{P_d U^2}{S_c^2} \times 10^{-3}$ $X_b = \sqrt{Z_b^2 - R_b^2}$ $Z_b = \frac{U_d\%}{100} \cdot \frac{U^2}{S_c}$ 当电阻值允许忽略不计 $X_b = \frac{U_d\%}{100} \cdot \frac{U^2}{S_c}$	$S_d = \frac{100S_c}{U_d\%}$	$X_d\%$ —发电机(电动机)的超瞬变电抗百分数; $U_d\%$ —变压器阻抗电压百分数; $X_b\%$ —电抗器的电抗百分数

(续表)

序号	元件名称	标么值	有名值(Ω)	短路容量(MVA)	符号说明
3	电抗器	$X_{*k} = \frac{X_k\%}{100} \cdot \frac{U_c}{\sqrt{3} I_c} \cdot \frac{S_j}{U_p^2}$ $= \frac{X_k\%}{100} \cdot \frac{U_c}{I_c} \cdot \frac{I_j}{U_p}$	$X_k = \frac{X_k\%}{100} \cdot \frac{U_c}{\sqrt{3} I_c}$	$S_d = \frac{100 \sqrt{3} I_c U_p^2}{X_k\% U_c}$	$P_d$ —变压器短路损耗(kW); $U_c$ —额定电压(kV); $I_c$ —额定电流(kA); $U_p$ —元件所在级的平均额定电压(kV); $X, R$ —线路每相电抗值和电阻值(Ω); $S_{dx}$ —系统短路容量(MVA); $S_j$ —基准容量(MVA)
4	线路	$X_* = X \frac{S_j}{U_p^2}$ $R_* = R \frac{S_j}{U_p^2}$		$S_d = \frac{U_p^2}{X}$	
5	电力系统(已知短路容量 $S_{dx}$ )	$X_{*x} = \frac{S_j}{S_{dx}}$	$X_x = \frac{U_p^2}{S_{dx}}$	$S_d = S_{dx}$	

表 6—2 各类元件的电抗平均值

序号	元件名称	电 抗 平 均 值			备 注
		$X_d$ 或 $X_1$	$X_2$	$X_0$	
1	中容量汽轮发电机	$X_d = 12.5\%$	16%	6%	
2	有阻尼绕组的水轮发电机	$X_d = 20\%$	25%	7%	
3	无阻尼绕组的水轮发电机	$X_d = 27\%$	45%	7%	
4	同步调相机	$X_d = 16\%$	24%	8%	
5	大型同步电动机	$X_d = 20\%$	24%	8%	
6	异步电动机	$X_d = 20\%$	—	—	
7	1kV 三芯电缆	$X_1 = X_2 = 0.06(\Omega/\text{km})$		0.7( $\Omega/\text{km}$ )	
8	1kV 四芯电缆	$X_1 = X_2 = 0.066(\Omega/\text{km})$		0.17( $\Omega/\text{km}$ )	
9	6~10kV 三芯电缆	$X_1 = X_2 = 0.08(\Omega/\text{km})$		$X_0 = 3.5X_1 = 0.28(\Omega/\text{km})$	

(续表)

序号	元件名称	电 抗		平 均 值	备 注
		$X_1$ 或 $X_2$	$X_0$		
10	20kV 三芯电缆	$X_1 = X_2 = 0.11(\Omega/\text{km})$		$X_0 = 3.5X_1 = 0.38(\Omega/\text{km})$	
11	35kV 三芯电缆	$X_1 = X_2 = 0.12(\Omega/\text{km})$		$X_0 = 3.5X_1 = 0.42(\Omega/\text{km})$	
12	无避雷线的 架空输电线路	单回路		$X_0 = 3.5X_1 = 1.4(\Omega/\text{km})$	系每回路数值
13		双回路		$X_0 = 5.5X_1 = 2.2(\Omega/\text{km})$	
14	有钢质避雷 线的架空输电 线路	单回路	$X_1 = X_2 = 0.4(\Omega/\text{km})$	$X_0 = 3X_1 = 1.2(\Omega/\text{km})$	系每回路数值
15		双回路		$X_0 = 5X_1 = 2.0(\Omega/\text{km})$	
16	有良导体避 雷线的架空输 电线路	单回路		$X_0 = 2X_1 = 0.8(\Omega/\text{km})$	
17		双回路		$X_0 = 3X_1 = 1.2(\Omega/\text{km})$	

## 第二节 短路电流计算

### 一、短路电流的暂态过程

当电力系统发生三相短路时,负荷阻抗和部分线路阻抗被短路,短路点至电源之间回路的阻抗突然减小,所以电流突然增大。但短路回路中存在着电感,因此电流不能突变,而引起一个暂态过程。短路电流随时间而变化,最后达到稳态值。

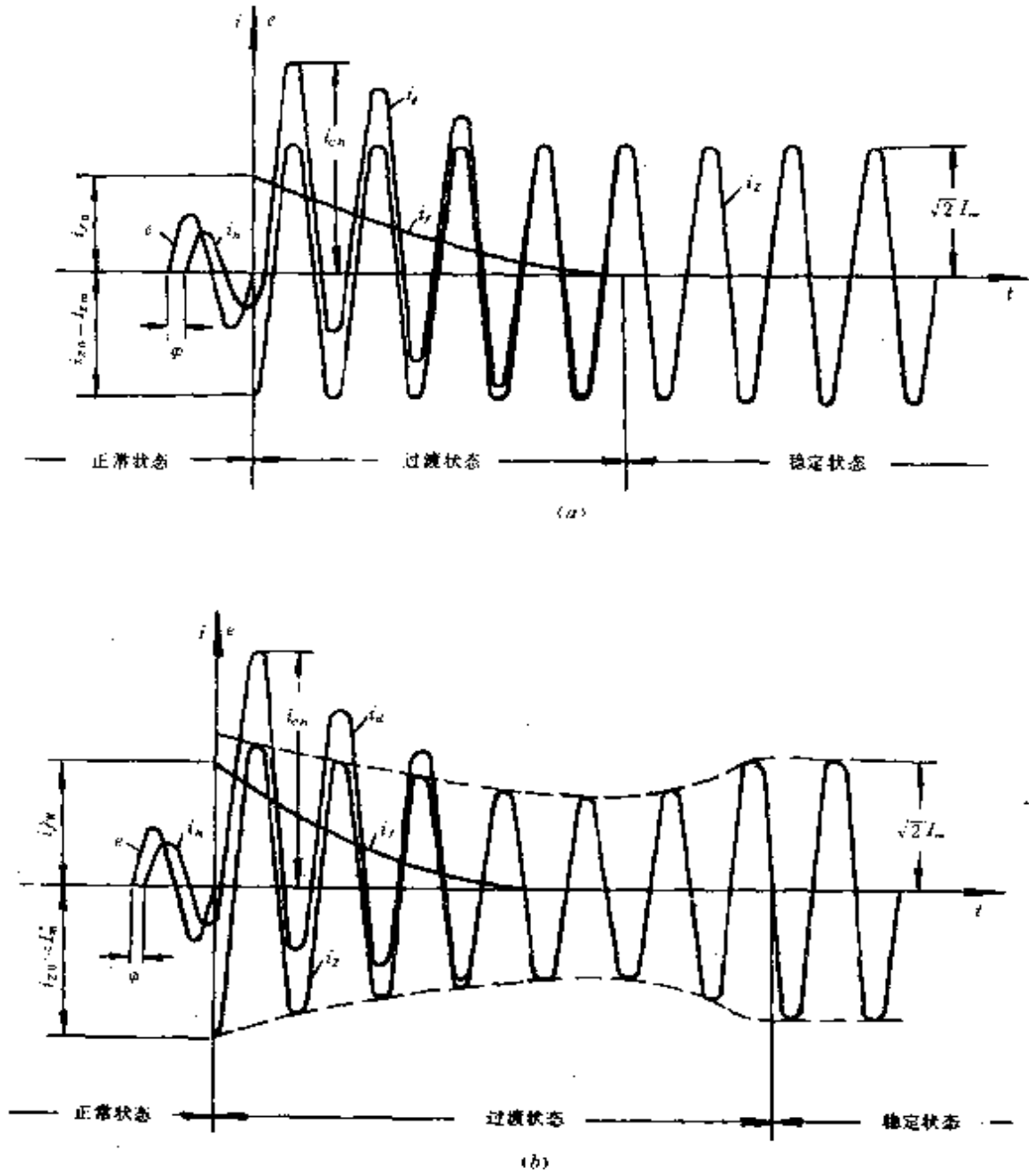
无限容量的电力系统和有限容量的电力系统的短路电流变化情况如图 6—1 所示。

无限容量电力系统,在该系统某处发生短路时,电源母线电压维持不变,即短路电流周期分量在整个过程不衰减。具体地说,如果电源部分的阻抗不超过短路电路总阻抗的 5~10%,则该系统可以认为是无限容量系统。

图 6—1 中  $e$  为发电机电动势,  $i_k$  为正常负荷电流,  $i_d$  为短路全电流,  $i_{ch}$  为短路冲击电流,  $i_z$  为短路电流周期分量,  $i_f$  为短路电流非周期分量,  $I_{zm}$  为短路电流周期分量最大值,  $I_m'$  为短路电流周期分量起始最大值(超瞬变短路电流最大值),  $I_\infty$  为稳态短路电流有效值,  $i_{z0}$  和  $i_{f0}$  为短路电流周期分量和非周期分量的起始值。

由图可见,短路全电流  $i_d$  由对称的周期分量  $i_z$  和不对称的非周期分量  $i_f$  两部分合成,即  $i_d = i_z + i_f$ 。周期分量  $i_z$  先开始衰减,然后逐渐增加到稳态值  $i_\infty$ 。非周期分量  $i_f$  按指数曲线衰减,其衰减时间常数  $T_f$  约为 0.05~0.2s。

在主要是电抗的高压电路中,非周期分量衰减的时间常数  $T_f$  的平均值约为 0.05s。非周期分量一般经  $4T_f$ ,即 0.2s 后已基本衰减完毕。在电阻较大的电路中(如低压电路),非周期分量衰减得更快。非周期分量衰减为零后,短路暂态过程结束,进入稳



6—1 短路电流变化示意图

(a)无限容量系统的短路电流 (b)发电机装有自动电压调整器的有限容量系统的短路电流



定状态。

1. 短路冲击电流  $i_{ch}$

短路冲击电流  $i_{ch}$ ，即短路全电流最大瞬时值，约发生在短路后半周波(0.01s)。

2. 超瞬变短路电流有效值  $I''$

超瞬变短路电流有效值  $I''$ ，即第一周期短路电流周期分量有效值，也就是时间  $t=0$  时短路电流周期分量有效值，也称次暂态短路电流周期分量有效值。

## 二、短路电流的计算方法和步骤

1. 短路电流计算的目的

计算短路电流是为了正确选择和校验电气设备，以及进行继电保护装置的整定计算。为此，通常需要计算下列各短路电流数值(均指三相短路电流值)：

(1)短路冲击电流  $i_{ch}$ ：用来校验电气设备和母线的动稳定。

(2)短路全电流最大有效值  $I_{ch}$ (第一周期短路全电流有效值)：用来校验电气设备和母线的动稳定。

(3)超瞬变短路电流有效值  $I''$ ：用来作继电保护的整定计算和校验断路器的断流量。

(4)短路后 0.2s 的短路电流周期分量有效值  $I_{0.2}$ ：用来校验断路器的断流量。

(5)稳态短路电流有效值  $I_{\infty}$ ：用来校验电气设备和载流部分的热稳定。

(6)超瞬变短路容量  $S''$ (次暂态短路容量)：用来校验断路器的遮断容量。

(7)短路后 0.2s 的短路容量  $S_{0.2}$ 。

2. 计算方法

计算短路电流，可以采用有各单位制(伏、安、欧)，也可以采用标么值(小数或百分数)。通常低压系统中宜采用有名值，高压

系统中宜采用标么值,这样会给计算带来方便。1kV 以上高压电路中,计算时一般不考虑电阻,而只须考虑电抗。

### 3. 计算步骤

(1)画出计算电路图:画出与计算短路电流有关的电气设备(元件)和连接线;注明各元件有关技术数据,如发电机额定容量和次暂态电抗,变压器额定容量和阻抗电压,电抗器额定电流和百分电抗,线路长度和每千米电抗值等。对于低压电路,除注明上述数据外,还应注明各元件的电阻值。

(2)画出等效电路图:先将各元件的电抗值(低压电路中还有电阻值)归算到同一基准值下,然后画出等效电路图。各元件的电抗用符号“—□—”表示,并在符号旁用一分式注明元件的顺序编号和电抗值。

(3)计算短路电路总阻抗:

①用有名值计算:先将处于不同电压等级下的元件阻抗归算到同一个电压等级下,对短路点将这些阻抗作成等效电路图,再进行电路简化计算(网络变换见第一章表 1—9),求出短路电路总阻抗。

将电压  $U_1$  下的阻抗值  $R_1$ 、 $X_1$  换算到另一电压  $U_2$  下的阻抗值  $R_2$ 、 $X_2$ ,计算公式如下:

$$R_2 = R_1 \frac{U_2^2}{U_1^2}, X_2 = X_1 \frac{U_2^2}{U_1^2}$$

②用标么值计算先将各元件的阻抗归算到同一基准值下( $S_j$  和  $U_j$ ),对短路点将这些阻抗作成等效电路图,再进行网络简化,求得总阻抗或总电抗。

从某一基准容量  $S_j$ (或基准电压  $U_j$ )下的电抗标么值换算到另一基准容量(或基准电压)下的电抗标么值,计算公式见第一节电抗在不同基准值下的换算。

注意:采用标么值计算短路电路的总阻抗时,仅将元件电抗

的有名值或相对值按同一基准容量  $S$ , 换算为标么值(不需要按照有名值计算那样作阻抗电压折算), 而基准电压采用各元件所在级的平均额定电压。

(4) 计算短路电流: 根据公式或图表计算出短路电流。

### 三、三相短路冲击电流、全电流最大有效值和三相短路容量的计算

三相短路冲击电流为  $i_{ch} = k_{ch} \sqrt{2} I''$

短路全电流最大有效值为  $I_{ch} = I'' \sqrt{1 + 2(k_{ch} - 1)^2}$

三相短路容量为  $S_d = \sqrt{3} U_p I''$

式中:  $I''$ ——超瞬变短路电流有效值(kA);

$k_{ch}$ ——短路电流冲击系数,  $k_{ch} = (1 + e^{-\frac{t}{T_f}})$ ;

$T_f$ ——非周期分量  $i_f$  的衰减时间常数(s)。

$k_{ch}$  值由电路中的电阻和电抗决定。因为  $T_f = \frac{X_\Sigma}{2\pi f R_\Sigma} = \frac{X_\Sigma}{31.4 R_\Sigma}$ ,  $X_\Sigma$  为假定短路电路没有电阻的条件下所求得的短路电路总电抗( $\Omega$ );  $R_\Sigma$  为假定短路电路没有电抗的条件下所求得的短路电路总电阻( $\Omega$ )。如电路只考虑电抗,  $R_\Sigma = 0$ ,  $T_f = \infty$ , 则  $k_{ch} = 2$ ; 如电路只考虑电阻,  $X_\Sigma = 0$ ,  $T_f = 0$ , 则  $k_{ch} = 1$ , 可见  $2 \geq k_{ch} \geq 1$ 。

在主要为电抗( $R_\Sigma = X_\Sigma/3$ )的高压电路中,  $T_f$  约为 0.05s, 可取  $k_{ch} = 1.8$ , 故有

$$i_{ch} = 1.8 \sqrt{2} I'' = 2.55 I'', I_{ch} = 1.52 I''$$

在主要为电阻( $R_\Sigma = X_\Sigma/3$ )的电路中, 发生短路时短路电流周期分量衰减较快, 可取  $k_{ch} = 1.3$ , 故有

$$i_{ch} = 1.3 \sqrt{2} I'' = 1.84 I'', I_{ch} = 1.09 I''$$

### 四、无限容量系统中高压网络短路电流的计算

在无限容量系统的网络中发生短路时,短路电流周期分量在整个短路过程不发生衰减,因此,  $I_z = I'' = I_{0.2} = I_\infty$ , 见图 6—1 (a)。

1. 用标么制计算三相短路电流周期分量  $I_z$

$$I_z = I_{*z} I_j = \frac{I_j}{X_{*js}}, \quad I_{*z} = S_{*d} = \frac{1}{X_{*js}}$$

$$\text{短路容量 } S_d = S_{*d} S_j = I_{*z} S_j = \frac{S_j}{X_{*js}}$$

式中:  $I_{*z}$ ——短路电流周期分量有效值的标么值;

$S_{*d}$ ——短路容量标么值;

$X_{*js}$ ——短路电路总电抗(计算电抗)标么值;

$I_j$ ——基准电流(kA);

$S_j$ ——基准容量(MVA)。

2. 用有各单位制计算三相短路电流周期分量

$$I_z = \frac{U_p}{\sqrt{3} Z_{js}} = \frac{U_p}{\sqrt{3} \sqrt{R_{js}^2 + X_{js}^2}}$$

式中:  $U_p$ ——短路点所在级的网路平均额定电压(kV), 该电压比线路额定电压高 5%, 按我国的电压标准,  $U_p$  有 0.23、0.4、6.3、10.5、37(kV)等;

$Z_{js}$ ——短路电路总阻抗( $\Omega$ );

$R_{js}$ ——短路电路总电阻( $\Omega$ );

$X_{js}$ ——短路电路总电抗( $\Omega$ )。

当  $R_{js} \leq X_{js}/3$  时,  $R_{js}$  可忽略不计。这时

$$I_z = \frac{U_p}{\sqrt{3} X_{js}}$$

**例 6—1** 图 6—2 为某厂的电力系统图, 其计算用技术数据标如图所示, 试计算各短路点三相短路时的稳态电流  $I_\infty$ 、短路冲击电流  $i_{ch}$  和超瞬变容量  $S''$ 。

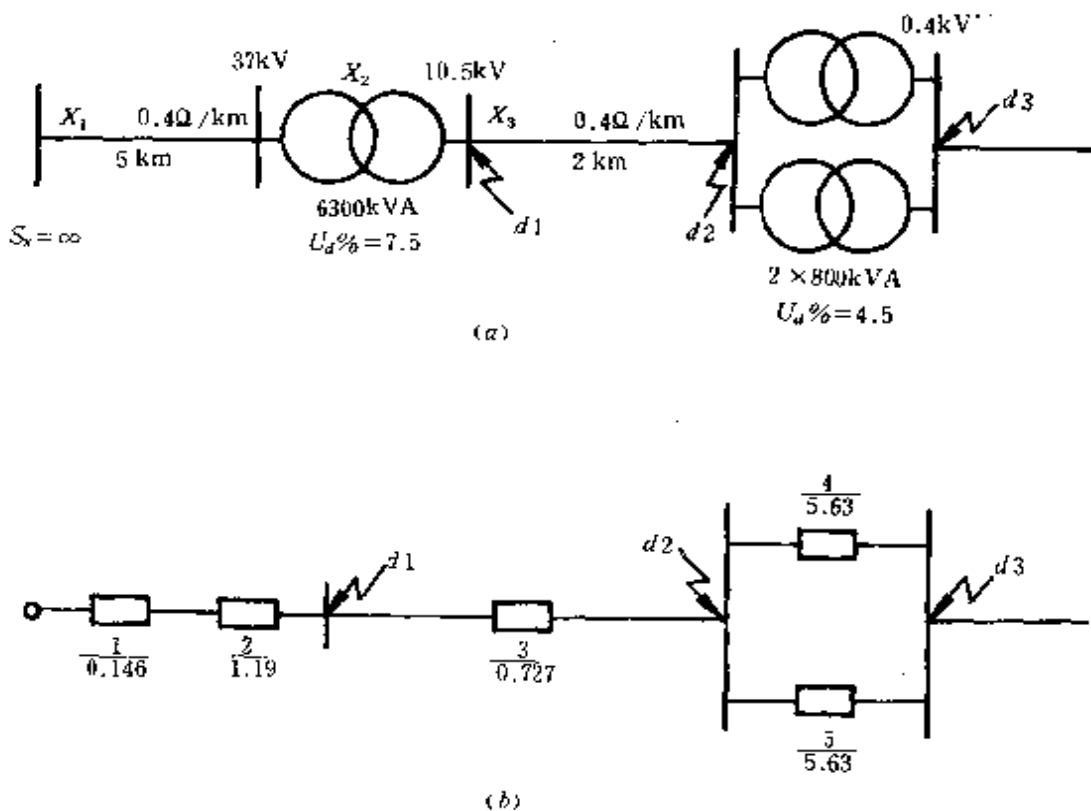


图 6-2 供给某厂的电力系统图  
(a)系统接线图 (b)等值电路图

解 设基准容量为  $S_j = 100\text{MVA}$ , 则各元件的电抗标么值如下(为了简便起见,略去阻抗标么值符号中的角注“\*”):

$$X_1 = X \frac{S_j}{U_j^2} = 0.4 \times 5 \times \frac{100}{37^2} = 0.146$$

$$X_2 = \frac{U_d\%}{100} \cdot \frac{S_j}{S_e} = \frac{7.5}{100} \times \frac{100}{6.3} = 1.19$$

$$X_3 = X \frac{S_j}{U_j^2} = 0.4 \times 2 \times \frac{100}{10.5^2} = 0.727$$

(1)  $d_1$  点短路:

$$\text{取 } U_j = 10.5\text{kV} \quad I_j = \frac{S_j}{\sqrt{3}U_j} = \frac{100}{\sqrt{3} \times 10.5} = 5.5(\text{kA})$$

$d_1$  点短路电路总电抗

$$X_{d_1\Sigma} = X_1 + X_2 = 0.146 + 1.19 = 1.336$$

稳态短路电流

$$I_{\infty d_1} = \frac{I_j}{X_{d_1\Sigma}} = \frac{5.5}{1.336} = 4.12(\text{kA})$$

$$I_{rd_1} = I_{\infty d_1} = 4.12(\text{kA})$$

冲击短路电流

$$i_{ch} = 2.55I_{rd_1} = 2.55 \times 4.12 = 10.51(\text{kA})$$

超瞬变短路容量

$$S_{d_1}^* = \frac{S_j}{X_{d_1\Sigma}} = \frac{100}{1.336} = 74.85(\text{MVA})$$

(2)  $d_2$  点短路:

$d_2$  点短路电路总电抗

$$\begin{aligned} X_{d_2\Sigma} &= X_1 + X_2 + X_3 = 0.146 + 1.09 + 0.727 \\ &= 2.063 \end{aligned}$$

稳态短路电流

$$I_{\infty d_2} = \frac{I_j}{X_{d_2\Sigma}} = \frac{5.5}{2.063} = 2.67(\text{kA})$$

冲击短路电流

$$i_{ch} = 2.55I_{rd_2} = 2.55 \times 2.67 = 6.81(\text{kA})$$

超瞬变短路容量

$$S_{d_2}^* = \frac{S_j}{X_{d_2\Sigma}} = \frac{100}{2.063} = 48.5(\text{MVA})$$

(3)  $d_3$  点短路

$$\text{取 } U_j = 0.4\text{kV} \quad I_j = \frac{100}{0.4 \sqrt{3}} = 144.3(\text{kA})$$

$d_3$  点短路电路总电抗

$$\begin{aligned} X_{d_3\Sigma} &= X_1 + X_2 + X_3 + X_4/2 \\ &= 0.146 + 1.19 + 0.727 + 5.63/2 \end{aligned}$$

$$=4.878$$

稳态短路电流

$$I_{\infty d_3} = \frac{I_j}{X_{d_3 \Sigma}} = \frac{144.3}{4.878} = 29.58(\text{kA})$$

冲击短路电流

$$i_{ch} = 2.55I_{\infty d_3} = 2.55 \times 29.58 = 75.43(\text{kA})$$

超瞬变短路容量

$$S_{d_3}^* = \frac{S_j}{X_{d_3 \Sigma}} = \frac{100}{4.878} = 20.5(\text{MVA})$$

### 五、有限容量系统中高压网络短路电流的计算

在有限容量系统网络中发生短路时,短路电流周期分量随时间而变化,见图 6—1(b)。其变化过程与发电机的电参数及电压自动调整装置的特性有关。

#### 1. 三相短路电流周期分量的计算

三相短路电流周期分量计算通常采用运算曲线法,也用以下公式计算超瞬变短路电流  $I''$ 。

对于汽轮发电机

$$I'' = \frac{E''}{\sqrt{3}(X_d'' + X_w)} \quad \text{或} \quad I'' = \frac{I_j}{X_{*d}'' + X_{*w}}$$

对于水轮发电机

$$I'' = \frac{KE''}{\sqrt{3}(X_d'' + X_w)} = \frac{KI_j}{X_{*d}'' + X_{*w}}$$

式中:  $I_j$ ——基准电流(kA);

$E''$ ——发电机超瞬变电势(kV),计算中可认为

$E'' \approx U_{ef} = U_p$ ;  $U_{ef}$  为发电机额定电压(kV);

$U_p$  为发电机平均额定电压(kV)。

$X_d''$ ——发电机超瞬变电抗( $\Omega$ );

$X_w$ ——自发电机出口至短路点间的短路电抗( $\Omega$ );

$X_{*d}'', X_{*w}$ ——以发电机额定总容量  $S_{N\Sigma}$  为基准容量的  $X_d''$



和  $X_w$  的标么值；

$K$ ——考虑到水轮发电机的超瞬变电抗  $X_d'$  值比较大而引入的计算系数，见表 6—3。

表 6—3 水轮发电机的计算系数  $K$  值

发电机型式	$X''_{d'} + X_w = X_{js}$ 为下列各值时								
	0.2	0.27	0.3	0.4	0.5	0.75	1	1.5	$\geq 2$
无阻尼绕组	—	1.16	1.14	1.1	1.07	1.05	1.03	1.02	1
有阻尼绕组	1.11	1.07	1.07	1.05	1.03	1.02	1	1	1

2. 采用运算曲线法计算短路电流的步骤

(1) 按下式求出短路电路的计算电抗  $X_{js}$ ：

$$X_{js} = X_{\Sigma} \frac{S_{e\Sigma}}{S_j}$$

式中： $X_{\Sigma}$ ——短路回路总电抗；

$S_{e\Sigma}$ ——电源的总额定容量；

$S_j$ ——基准容量，与  $S_{e\Sigma}$  同单位。

(2) 根据  $X_{js}$  和短路时间  $t$ ，查运算曲线中的三相短路电流周期分量标么值。具体步骤如下：

① 先找出代表该时间短路电流的那根曲线（见图 6—3、图 6—4）。

② 在横坐标上找出对应于所计算的短路电路  $X_{js}$  的数值的一点，则其对应的纵坐标值就是所求的某时刻的短路电流的标么值  $I_{*zt}$ 。

③ 按下式求出  $t$  时的三相短路电流（周期分量）的有效值  $I_{zt}$ ：

$$I_{zt} = I_{*zt} I_{e\Sigma}, \quad I_{e\Sigma} = \frac{S_{e\Sigma}}{\sqrt{3} U_p}$$



式中： $I_{\Sigma}$ ——计算电路上所有发电机额定总电流(kA)；

$U_p, S_{\Sigma}$ ——同前。

(3)在时间  $t$  时的短路容量  $S_d$  可按下式计算：

$$S_d = \sqrt{3} U_p I_{\Sigma}$$

### 3. 使用运算曲线的注意事项

(1)运算曲线横座标  $X_{*s}$  是以发电机额定总容量  $S_{\Sigma}$  为基准容量的短路电流总电抗的标么值。

(2)运算曲线纵座标  $I_{*s}$  为所求三相短路电流周期分量有效值的标么值,即  $I_{*s} = I_s / I_{\Sigma}$  ( $I_{\Sigma}$  为发电机额定总电流)。

(3)图 6—3 和图 6—4 的运算曲线分别按汽轮发电机励磁线圈时间常数  $T_l$  为 7s 和水轮发电机的  $T_l$  为 5s 编制的。当实际发电机的时间常数  $T'_l$  与上述值相差较大时,则查曲线时所采用的短路时间应按下式进行修正,用  $t'$  去查曲线。

$$t' = t \frac{T_l}{T'_l}$$

式中： $T_l$ ——标准型发电机的时间常数(7s 或 5s)；

$T'_l$ ——实际发电机的时间常数(s)。

(4)当  $X_{*s} \geq 3$  时,应按无限容量系统计算。

(5)在电网中,如果有同步调相机或同步电动机,当它连接于一点的总容量超过 1000kVA 时,应将其视为附加电源,和计算发电机短路电流的方式一样进行计算,同步调相机所供给的短路电流可用具有自动电压调整器的汽轮发电机的运算曲线;而同步电动机应采用具有自动电压调整器、有阻尼的水轮发电机的运算曲线,但用下式:

$$t' = t \frac{5}{T_l}$$

式中： $T_l$ ——同步电动机当定子开路时的励磁线圈时间常数,其平均值为 2.5s。

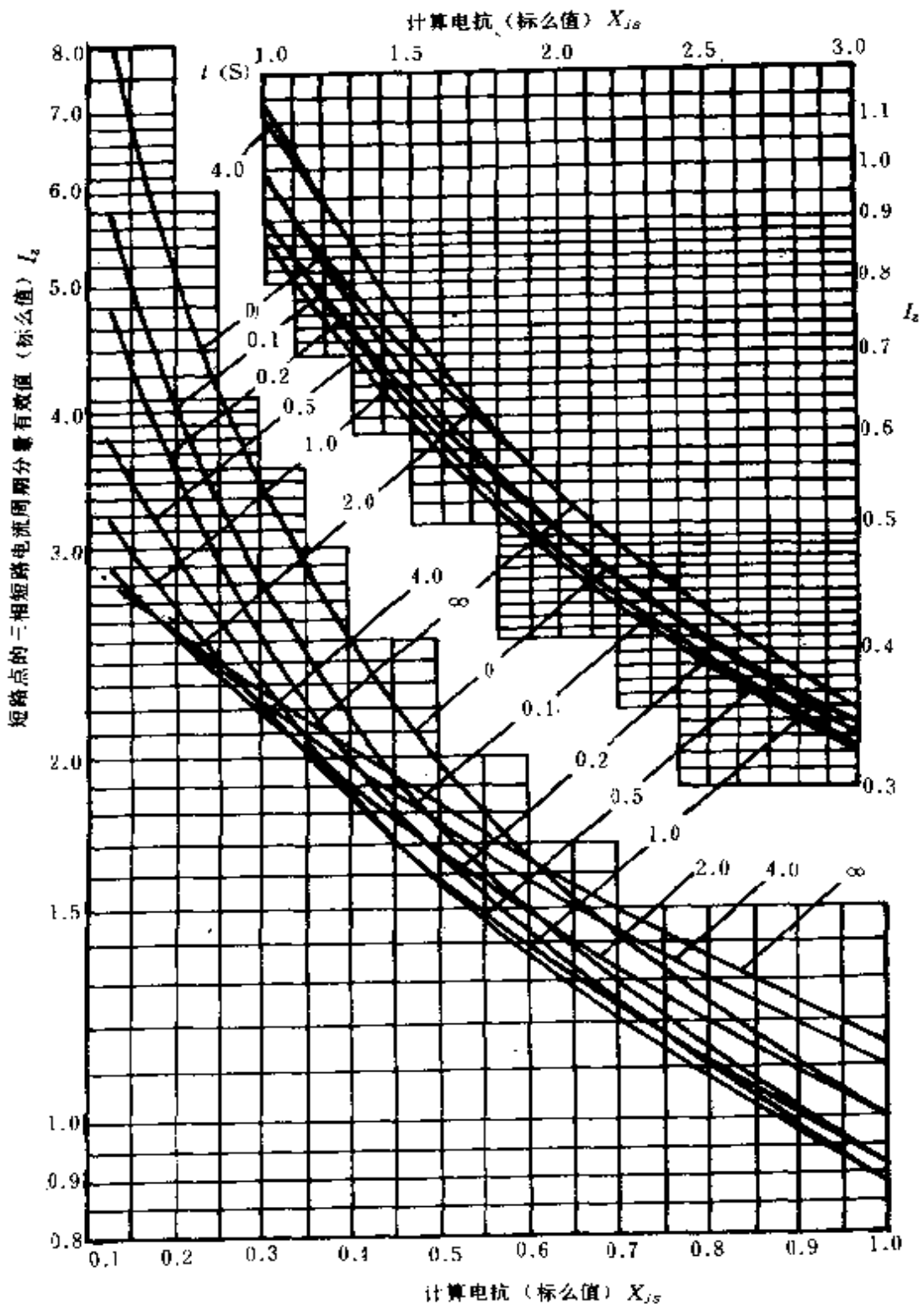


图 6 3 具有自动电压调整器的标准型汽轮发电机短路电流运算曲线

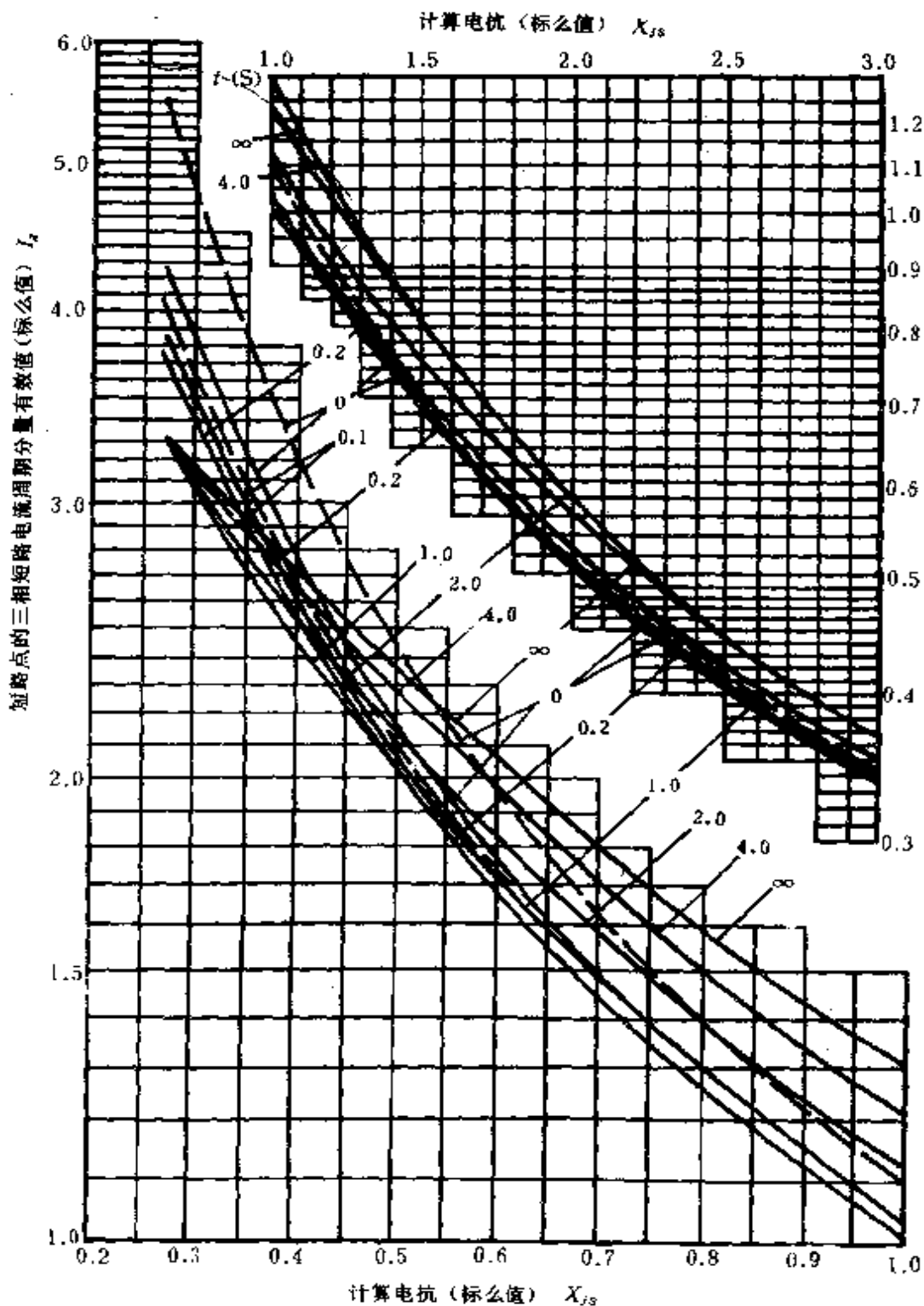


图 6—4 具有自动电压调整器的标准型水轮发电机短路电流运算曲线

此外,曲线的横座标(即计算电抗标么值,  $X_{\Sigma}$ )应增加 0.07。若  $t \leq 0.1s$ , 应查虚线; 若  $t > 0.1s$ , 则查实线。

**例 6-2** 图 6-5 为某发电系统电路图, 其计算用技术数据如图所示, 发电机为有自动电压调整器的汽轮发电机, 试计算在  $d_1$  和  $d_2$  点发生三相短路时的  $I''$ 、 $S''$ 、 $i_{ck}$  和  $I_{\infty}$ 。

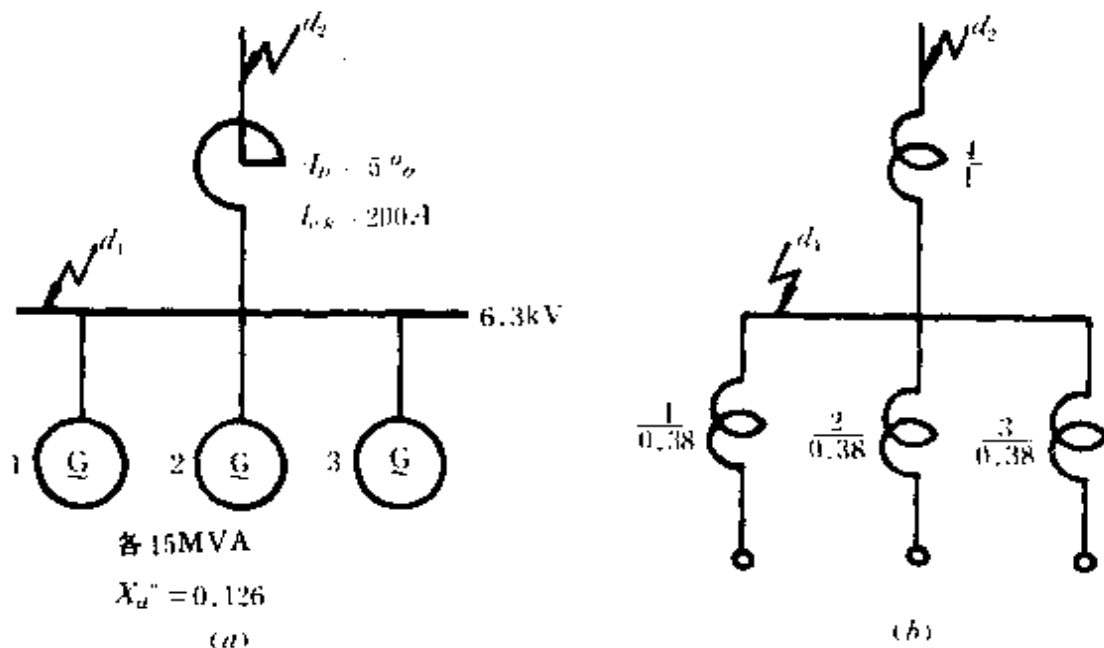


图 6-5 某发电系统计算电路图及等值电路图

**解** 设基准容量为  $S_j = S_{e\Sigma} = 3 \times 15 = 45$  (MVA)  
 这样选取基本容量, 可直接求出短路电路的计算电抗。  
 设基准电压为  $U_j = U_p = 6.3$  (kV)  
 基准电流为

$$I_j = I_{e\Sigma} = \frac{S_j}{\sqrt{3}U_j} = \frac{45}{\sqrt{3} \times 6.3} \approx 4.1 \text{ (kA)}$$

各元件的电抗按所取基准条件归算的标么值为

$$\text{发电机 } X_1 = X_2 = X_3 = X''_d \frac{S_j}{S_{ef}} = 0.126 \times \frac{45}{15} = 0.38$$

$$\text{电抗器 } X_4 = \frac{X_k \% I_{e\Sigma}}{100 I_{ck}} = 0.05 \cdot \frac{4.1}{0.2} \approx 1$$

画作等值电路图如图 6—5(b)所示。

(1)  $d_1$  点短路:

$$X_{*jsd_1} = X_1/3 = 0.38/3 = 0.126$$

由图 6—3 中  $t=0$  的曲线上查得, 当  $X_{*jsd_1} = 0.126$  时,  $I'' = 8$ , 则

$$I'' = I'' I_{eZ} = 8 \times 4.1 = 33(\text{kA})$$

$$S'' = I'' S_{eZ} = 8 \times 4.5 = 360(\text{MVA})$$

$$i_{ch} = 1.9 \sqrt{2} I'' = 2.7 I'' = 2.7 \times 33 = 89(\text{kA})$$

在发电机出口母线短路,  $K_{ch}$  取 1.9 计算。

从  $t=\infty$  的曲线上查得  $I_{*\infty} = 2.75$ , 则

$$I_{\infty} = I_{*\infty} I_{eZ} = 2.75 \times 4.1 = 11.3(\text{kA})$$

(2)  $d_2$  点短路: 基准条件的取法同  $d_1$  点。

$$X_{*jsd_2} = \frac{0.38}{3} + 1 = 1.1$$

$t=0$  时, 由曲线查得  $I'' = 0.9$ , 则

$$I'' = 0.9 \times 4.1 = 3.7(\text{kA})$$

$$S'' = 0.9 \times 4.5 = 40(\text{MVA})$$

$$i_{ch} = 2.55 \times 3.7 = 9.4(\text{kA})$$

$t=\infty$  时, 由曲线查得  $I_{*\infty} = 1.02$ , 则

$$I_{\infty} = 1.02 \times 4.1 = 4.2(\text{kA})$$

## 六、变压器低压侧短路时折算到高压侧穿越电流的计算

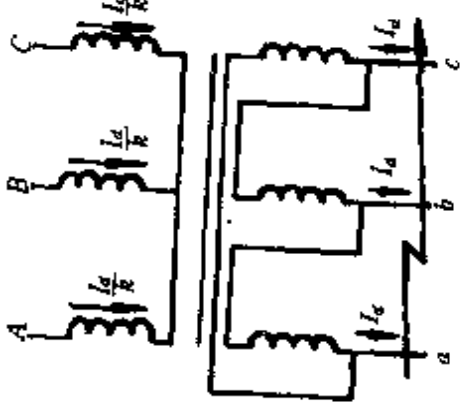
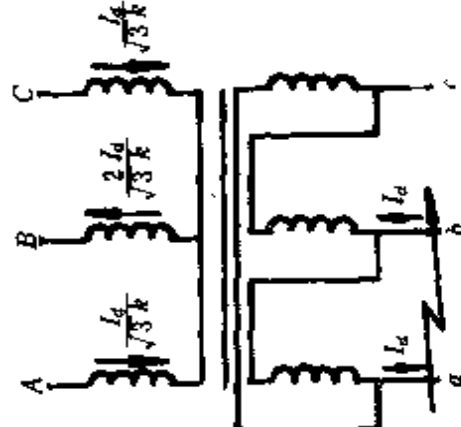
变压器低压侧短路时折算到高压侧穿越电流的换算关系, 见表 6—4。

## 七、异步电动机反馈电流计算

在短路点附近接有大于 1000KW 或总容量大于 1000kW (高压) 或大于 20kW (低压) 的异步电动机时, 在计算短路冲击电流和短路全电流时, 应将其作为附加电源来考虑。但在异步电动机与短路点通过变压器连接或计算不对称短路时, 可以不考



(续表)

联结组标号	三相短路	两相短路	单相短路
Yd11			

注： $I_d$ ——短路电流； $k$ ——变压器变比。

考虑异步电动机对短路冲击电流和短路全电流的影响。

电动机反馈电流的计算如下：

当电动机端发生三相短路时，其反馈电流可按下式计算：

$$i_{chd} = \sqrt{2} \frac{E''_{*d}}{X''_{*d}} k_{chd} I_{ed}$$

式中： $E''_{*d}$ ——电动机超瞬变电势标么值，约为 0.9；

$X''_{*d}$ ——电动机超瞬变电抗值，可取 0.17~0.2。如果已知电动机起动电流，则可按下式求得：

$$X''_{*d} = 1 / I_{*qd} ; I_{*qd} = I_{qd} / I_{ed} ;$$

$I_{ed}$ ——电动机额定电流(kA)；

$I_{qd}$ ——电动机起动电流(kA)；

$k_{chd}$ ——由异步电动机馈送的短路电流冲击系数，可由图 6—6 查得。当粗略估算时，对于 3~6kV 厂用电动机取 1.4~1.6；对于 380V 厂用电动机取 1。

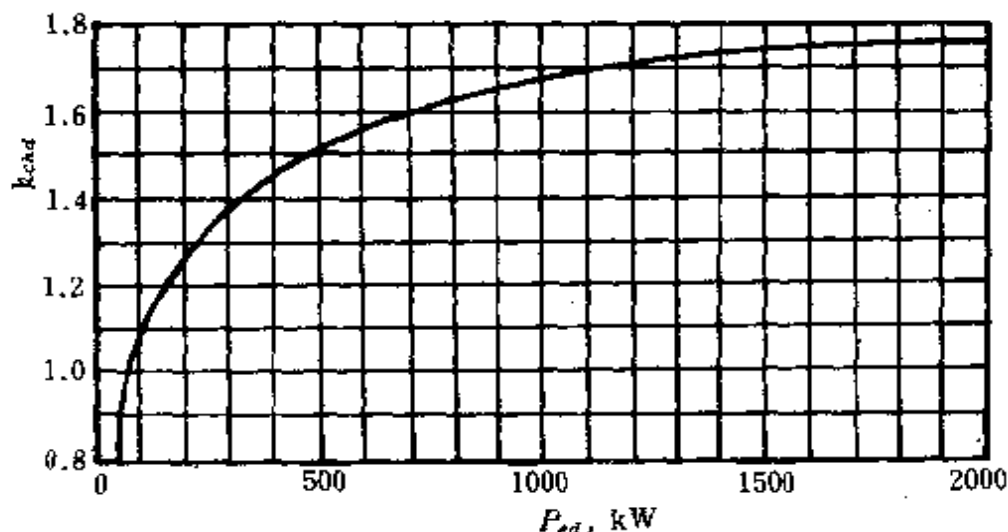


图 6—6 异步电动机功率  $P_{ed}$  与冲击系数  $k_{chd}$  的关系

上述的  $X''_{*d}$  是指以电动机额定容量  $S_{ed}$  为基准的标么值。



考虑异步电动机反馈电流后的短路冲击电流  $i_{ch}$  为

$$i_{ch} = i_{chx} + i_{chd}$$

式中:  $i_{chx}$ ——由系统送到短路点去的短路冲击电流(kA)。

短路全电流最大有效值  $I_{ch}$  为

$$I_{ch} = \sqrt{(I_x' + I_d')^2 + 2[(k_{chx} - 1)I_x' + (k_{chd} - 1)I_d']^2},$$

$$k_{qd}' = \frac{\sum(k_{qd}P_{ed})}{\sum P_{ed}};$$

式中:  $I_x'$ ——由系统送到短路点去的超瞬变短路电流(kA);

$I_d'$ ——由异步电动机送到短路点去的超瞬变短路电流(kA),单台或多台同规格电动机时,  $I_d' = 0.9k_{qd}I_{ed}$ ;

多台时,  $I_d' = 0.9k_{qd}'\sum I_{ed}$ ;

$k_{qd}'$ ——等效电动机起动电流倍数;

$P_{ed}$ ——异步电动机额定功率(kW)。

由于异步电动机反馈电流衰减很快,因此当计算瞬时  $t > 0.01s$  的短路电流时可以忽略不计。

**例6—3** 某厂供电系统如图6—7所示,在10kV母线上接有一台1000kW大型异步电动机,其它计算用技术数据标于图上,试计算10kV母线上的短路电流。

**解** 取基准容量  $S_j = 10MVA$ , 则

$$I_j = \frac{S_j}{\sqrt{3}U_j} = \frac{10}{\sqrt{3} \times 10} = 0.58(\text{kA})$$

变压器电抗

$$X_{,b} = \frac{U_d\%}{100} \cdot \frac{S_j}{S_r} = \frac{7.5}{100} \times \frac{10}{5.6} = 0.134$$

因为是无限大容量系统,所以由系统送到短路点去的超瞬变短路电流为

$$I_x' = I_{xx} = I_j / X_{,b} = 0.58 / 0.134 = 4.33(\text{kA})$$

电动机额定容量

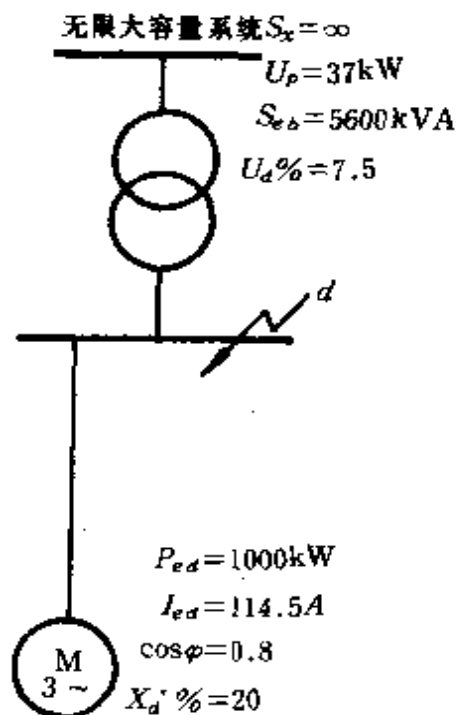


图 6-7 某厂供电系统图

$$S_{ed} = \frac{P_{ed}}{\cos\varphi} = \frac{1000}{0.8} = 1250\text{kVA} = 1.25(\text{MVA})$$

电动机超瞬变电抗标么值为

$$X_{*d}'' = \frac{X_d'\%}{100} \cdot \frac{S_j}{S_{ed}} = 0.2 \times \frac{10}{1.25} = 1.6$$

$k_{chd}$ 由图 6—6 查得为 1.7,则由电动机送到短路点  $d$  的短路冲击电流为

$$\begin{aligned} i_{chd} &= \sqrt{2} \frac{E'}{X_{*d}''} k_{chd} I_{ed} = \sqrt{2} \times \frac{0.9}{1.6} \times 1.7 \times 0.1145 \\ &= 0.155\text{kA} \end{aligned}$$

短路点  $d$  总的短路冲击电流为

$$\begin{aligned} i_{ch} &= i_{chr} + i_{chd} = k_{chr} \sqrt{2} I_x + i_{chd} \\ &= 1.8 \sqrt{2} \times 4.33 + 0.155 = 11.17(\text{kA}) \end{aligned}$$

短路全电流最大有效值为

$$I_{ch} = \sqrt{(I_x'' + I_d'')^2 + 2[(k_{chx} - 1)I_x'' + (k_{chd} - 1)I_d'']^2}$$

$$= \sqrt{(4.33 + 0.618)^2 + 2[(1.8\sqrt{2} - 1) \times 4.33 + (1.7 - 1) \times 0.618]^2}$$

$$= \sqrt{24.5 + 101.5} = 11.2(\text{kA})$$

其中  $I_d'' = 0.9k_{qd}I_{ed} = 0.9 \times 6 \times 114.5 = 618.3\text{A} = 0.618(\text{kA})$

(取电动机起动电流倍数  $k_{qd} = 6$ )

### 八、1KV 及以下低压配电网短路电流的计算

#### 1. 电路中各元件阻抗的计算

如果低压配电网中的变压器容量不超过供电电源容量的 5% (一般企业均如此), 允许认为在短路时降压变压器的高压侧电压不变和低压侧短路电流不衰减, 可以按无限容量系统来计算。

低压配电网在计算短路电流时一般均需计入电阻 (只有当  $R_x \leq X_x/3$  时, 可不计电阻); 另外, 还需要考虑长度 10m 以上的电缆、母线、多匝电流互感器的一次线圈 (300/5A 以下)、自动开关的过电流线圈、刀形开关和自动开关接点等的电抗影响。

为了计算方便, 电压单位用 V、阻抗单位用  $\text{m}\Omega$ 、电流单位用 kA、容量单位用 kVA。

(1) 系统电抗的计算: 如果不知道系统阻抗, 只有原绕组方面的短路容量或高压断路器的额定断流容量  $S_{dn}$  (MVA) 时, 则系统阻抗可近似按下式计算:

$$X_{xj} = S_j / S_{dn} \quad \text{或} \quad X_{xj} = U_j^2 / S_{dn}$$

式中:  $X_{xj}$ ——系统阻抗 ( $\text{m}\Omega$ );

$S_j$ ——基准容量 (MVA);

$U_j$ ——基准电压 (kV), 一般取平均线电压, 即  $U_j = U_p$ 。

(2) 变压器每相阻抗的计算:

$$R_{\bullet\bullet} = R_b \frac{S_c}{U_i^2} = \frac{P_d}{3I_i^2} \cdot \frac{S_c}{U_i^2} = \frac{P_d}{S_c}$$

$$R_b = \frac{R_{*b} U_e^2}{S_e} = \frac{P_d U_e^2}{S_e^2}$$

式中： $R_b$ ——变压器每相电阻(m $\Omega$ )，

$P_d$ ——变压器短路损耗(kW)；

$I_e$ ——变压器二次额定电流(kA)；

$S_e$ ——变压器额定容量(kVA)；

$U_e$ ——变压器二次额定电压(V)。

由变压器阻抗标么值  $Z_{*b} = \frac{U_d\%}{100}$ ，求得变压器电抗为

$$X_{*b} = \sqrt{Z_{*b}^2 - R_{*b}^2} = \sqrt{\left(\frac{U_d\%}{100}\right)^2 - \left(\frac{P_d}{S_e}\right)^2}$$

$$X_b = \frac{X_{*b} U_e^2}{S_e}$$

式中： $X_b$ ——变压器每相电抗(m $\Omega$ )

$U_d\%$ ——变压器阻抗电压百分数。

(3) 铝、铜母线阻抗计算：

$$R = \frac{l}{\gamma S} \times 10^3, \quad X = 0.1445l \lg \frac{4D_j}{h}$$

式中： $R$ 、 $X$ ——母线电阻和电抗(m $\Omega$ )；

$l$ ——母线长度(m)；

$\gamma$ ——母线电导率(m/ $\Omega \cdot \text{mm}^2$ )；

$S$ ——母线截面(mm $^2$ )；

$D_j$ ——母线相间几何均距(mm)；

$h$ ——母线宽度(mm)。

母线阻抗值，见附录 7。

(4) 电线、电缆阻抗值：见附录 1~附录 6。

(5) 自动开关、电流互感器的阻抗值：见表 6—5~表 6—7。

## 2. 短路电流计算

(1) 三相短路电流周期分量  $I''$  的计算：

$$I'' = \frac{U_p}{\sqrt{3}Z} = \frac{U_p}{\sqrt{3}\sqrt{R_\Sigma^2 + X_\Sigma^2}}$$

式中： $U_p$ ——平均线电压，一般为 400V；

$R_\Sigma$ 、 $X_\Sigma$ ——每相的总电阻和总电抗(mΩ)。

低压电网一般以三相短路为最大，并与中性点是否接地无关。如在一相或两相上装有电流互感器(穿心式互感器除外)，从而使短路电流不对称时，仍可按上式计算。但式中的  $R_\Sigma$  和  $X_\Sigma$  采用没有电流互感器那一相的总阻抗。如  $I''$  用来校验电流互感器稳定性时，可用下式决定短路电流周期分量计算值：

表 6—5 自动开关过电流线圈的阻抗(mΩ)

线圈的额定电流(A)	50	70	100	140	200	400	600
电 阻(65°C 时)	5.5	2.35	1.3	0.74	0.36	0.15	0.12
电 抗	2.7	1.3	0.86	0.55	0.28	0.1	0.094

表 6—6 自动空气开关及开关触头的接触电阻(mΩ)

额定电流(A)	50	70	100	140	200	400	600	1000	2000	3000
自动空气开关	1.3	1.0	0.75	0.65	0.6	0.4	0.25	—	—	—
刀 开 关	—	—	0.5	—	0.4	0.2	0.15	0.08	—	—
隔 离 开 关	—	—	—	—	—	0.2	0.15	0.08	0.03	0.02

表 6—7 电流互感器一次线圈(二次线圈开路时)阻抗(mΩ)

型号	变流比	5/5	7.5/5	10/5	15/5	20/5	30/5	40/5	50/5	57.5/5	100/5	150/5	200/5	300/5	400/5	500/5	600/5	750/5
LQG —0.5	电阻	600	266	150	66.7	37.5	19.6	9.4	6	2.66	1.5	0.667	0.575	0.166	0.125		0.04	0.04
	电抗	4300	2130	1200	532	300	133	75	48	21.3	12	5.32	3	1.33	1.03		0.3	0.3
O—49Y	电阻	480	213	120	53.2	30	13.3	7.5	4.8	2.13	1.2	0.532	0.3	0.133	0.075		0.03	0.03
	电抗	3200	1420	800	355	200	88.8	50	32	14.2	8	3.55	2	0.888	0.73		0.22	0.2
LQC—1	电阻		300	170	75	42	20	11	7	3	1.7	0.75	0.42	0.2	0.11	0.05		
	电抗		480	270	120	67	30	17	11	4.8	2.7	1.2	0.67	0.3	0.17	0.07		
LQC—3	电阻		130	75	33	19	8.2	4.8	3	1.3	0.75	0.33	0.19	0.88	0.05	0.02		
	电抗		120	70	30	17	8	4.2	2.8	1.2	0.7	0.3	0.17	0.08	0.04	0.02		

$$I'' = \frac{U_F}{\sqrt{(2R_\Sigma + R_{1h})^2 + (2X_\Sigma + X_{1h})^2}}$$

式中： $R_{1h}$ 、 $X_{1h}$ ——电流互感器的电阻和电抗(mΩ)。

(2) 短路全电流最大有效值及短路冲击电流的计算：在低压配电网中，由于电阻较大，短路电流非周期分量比高压网络衰减快得多。例如在容量 1000kVA 以下的变压器后面短路，短路电流非周期分量衰减时间约不超过 0.03s。因此，一般只有在变压器出线的母线、中央配电盘发生短路时，才在短路第一周期内考虑非周期分量。

① 短路冲击电流为

$$i_{ch} = \sqrt{3} k_{ch} I_d$$

该电流即为由系统送到短路点去的短路冲击电流  $i_{chx}$ 。

式中： $k_{ch}$ ——冲击系数，可按回路中  $X_\Sigma/R_\Sigma$  的比值，从图 6—8 中查得。

当短路点附近连接有单位容量为 20kW 以上的异步电动机时，需考虑其反馈电流。这时短路点总短路冲击电流为

$$i_{ch} = i_{chx} + i_{chd}$$

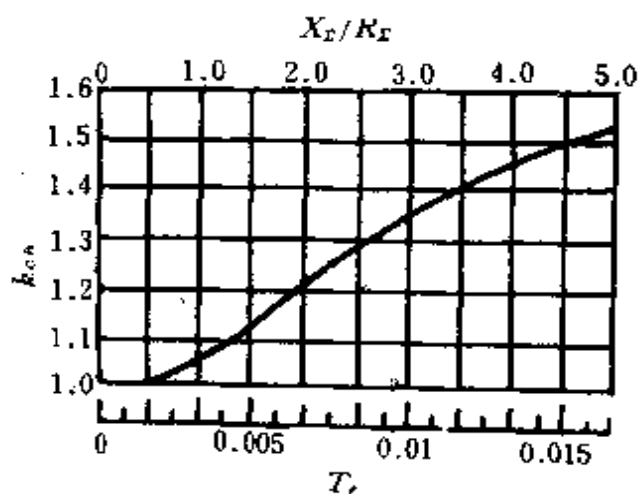


图 6—8  $k_{ch}$  与  $X_S/R_S$  (或  $T_f$ ) 的关系曲线

①短路全电流最大有效值  $I_{ch}$ :

$$\text{当 } k_{ch} > 1.3 \text{ 时 } I_{ch} = I'' \sqrt{1 + 2(k_{ch} - 1)^2}$$

$$\text{当 } k_{ch} \leq 1.3 \text{ 时 } I_{ch} = I'' \sqrt{1 + 50T}$$

同样,当接有 20kW 以上的异步电动机时,还需考虑反馈超瞬变短路电流  $I_d$ 。

(3)不同电缆长度的归算:在短路计算中,常常会遇到从变压器到短路点间由两种不同规格的电 缆组成,此时应归算到同一截面,其电缆计算长度可近似地按下式计算:

$$L_{\mu} = L_1 + L_2 \frac{S_1 \rho_2}{S_2 \rho_1}$$

式中:  $L_1, L_2$  —— 两种截面电缆的长度(m);

$S_1, S_2$  —— 两种电缆截面( $\text{mm}^2$ );

$\rho_1, \rho_2$  —— 两种电缆的电阻率( $\Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$ )。

铜导线与铝导线的电阻率比为  $\rho_{Cu} \rho_{Al} \approx 0.6$ 。

**例 6—4** 某供电系统如图 6—9 所示。已知母线的几何均距  $D_j$  为 400mm,有关计算用技术数据标于图上,试计算  $d$  点三相短路的短路冲击电流和短路全电流最大有效值。

**解** 全部阻抗均以电压  $U_j = 400\text{V}$  为基准计算。

(1)变压器阻抗:

$$R_b = \frac{P_d U_c^2}{S_c^2} = \frac{5.8 \times 400^2}{400^2} = 5.8 (\text{m}\Omega)$$

$$\begin{aligned} X_b &= X_{*b} \frac{U_c^2}{S_c} = \sqrt{\left(\frac{U_d \%}{100}\right)^2 - \left(\frac{P_d}{S_c}\right)^2} \cdot \frac{U_c^2}{S_c} \\ &= \sqrt{\left(\frac{4}{100}\right)^2 - \left(\frac{5.8}{400}\right)^2} \times \frac{400^2}{400} = 14.96 (\text{m}\Omega) \end{aligned}$$

(2)各段母线阻抗:

$$R_1 = \frac{L_1}{\gamma S_1} \times 10^3 = \frac{5 \times 10^3}{32 \times 360} = 0.434 (\text{m}\Omega)$$



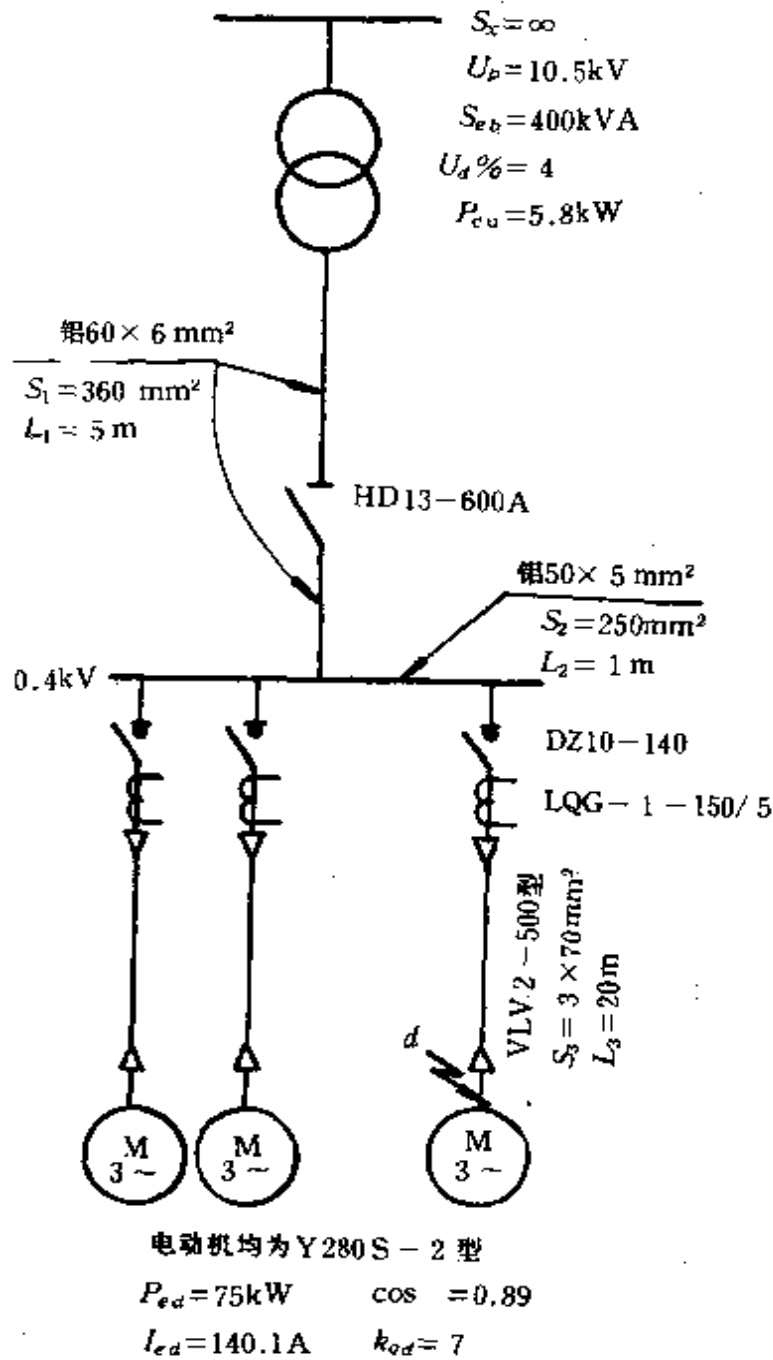


图 6-9 某供电系统图

$$R_2 = \frac{1 \times 10^3}{32 \times 250} = 0.125 (\text{m}\Omega)$$

$$R_3 = R_0 L_3 = 0.538 \times 20 = 10.76 (\text{m}\Omega)$$

其中  $R_0$  值由附录 5 查得。

$$\begin{aligned} X_1 &= L_1 \left( 0.1445 \lg \frac{2\pi D_j + h}{\pi b + 2h} + 0.01884 \right) \\ &= 5 \times \left( 0.1445 \lg \frac{4\pi \times 400 + 60}{\pi \times 6 + 2 \times 60} + 0.01884 \right) \\ &= 1.01 (\text{m}\Omega) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} X_2 &= 1 \times \left( 0.1445 \lg \frac{2\pi \times 400 + 50}{\pi \times 5 + 2 \times 50} + 0.01884 \right) \\ &= 0.21 (\text{m}\Omega) \end{aligned}$$

$$X_3 = x_0 L_3 = 0.069 \times 20 = 1.38 (\text{m}\Omega)$$

其中  $x_0$  值由附录 5 查得(说明:  $x_0$  为单位电抗,即附录 5 中的  $X_1$ ,而不是零序电抗)。

(3)自动开关 DZ10—140A 线圈阻抗及触头电阻查表 6—5 和表 6—6 得

$$R_{zk} = 0.74 \text{m}\Omega, X_{zk} = 0.55 \text{m}\Omega, R_{kk} = 0.65 \text{m}\Omega$$

隔离开关 HD13—600A 触头接触电阻查表 6—6 得  $R_{fk} = 0.15 \text{m}\Omega$

电流互感器 LQG1—150/5A 阻抗查表 6—7 得  $R_{lh} = 0.667 \text{m}\Omega, X_{lh} = 5.32 \text{m}\Omega$

(4)不计及电流互感器阻抗时:短路回路总阻抗为

$$\begin{aligned} R_{\Sigma} &= R_b + R_1 + R_2 + R_3 + R_{fk} + R_{zk} + R_{kk} \\ &= 5.8 + 0.434 + 0.125 + 10.76 + 0.15 + 0.55 + \\ &\quad 0.65 \\ &= 18.47 (\text{m}\Omega) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} X_{\Sigma} &= X_b + X_1 + X_2 + X_3 + X_{zk} \\ &= 14.96 + 1.01 + 0.21 + 1.38 + 0.55 \\ &= 18.11 (\text{m}\Omega) \end{aligned}$$

由系统送到短路点的三相短路电流周期分量(超瞬变短路电流)为

$$I_x'' = \frac{U_p}{\sqrt{3} \sqrt{R_\Sigma^2 + X_\Sigma^2}} = \frac{400}{\sqrt{3} \sqrt{18.47^2 + 18.11^2}} \\ = 8.93(\text{kA})$$

(5) 计及电流互感器阻抗时：三相短路电流周期分量为

$$I_x'' = \frac{U_p}{\sqrt{(2R_\Sigma + R_{1h})^2 + (2X_\Sigma + X_{1h})^2}} \\ = \frac{400}{\sqrt{(2 \times 18.47 + 0.667)^2 + (2 \times 18.11 + 5.32)^2}} \\ = 7.13(\text{kA})$$

(6) 由系统送到短路点的短路冲击电流为

$$i_{chx} = \sqrt{2} k_{chx} I_x'' = \sqrt{2} \times 1.05 \times 8.93 = 13.26(\text{kA})$$

其中  $k_{chx} = 1.05$  是根据  $X_\Sigma/R_\Sigma = 18.11/18.47 = 0.98$ ，由图 6—8 中查得。

异步电动机的反馈冲击电流为

$$i_{chd} = \sqrt{2} \frac{E_{*d}''}{X_{*d}''} k_{chd} I_{ed} \\ = \sqrt{2} \frac{0.9}{0.185} \times 1 \times 0.1401 \times 2 = 1.93(\text{kA})$$

所以总短路冲击电流为

$$i_{ch} = i_{chx} + i_{chd} = 13.26 + 1.93 = 15.19(\text{kA})$$

(7) 短路全电流最大有效值  $I_{ch}$ ：

由异步电动机送到短路点去的超瞬变短路电流为

$$I_d' = 0.9 k_{gd} I_{ed} = 0.9 \times 7 \times 0.28 = 1.76(\text{kA})$$

因此短路全电流最大有效值为

$$I_{ch} = \sqrt{(I_x'' + I_d')^2 + 2[(k_{chx} - 1)I_x'' + (k_{chd} - 1)I_d']^2} \\ = \sqrt{(7.13 + 1.76)^2 + 2[(1.05 - 1) \times 7.13 + 0]^2} \\ = 8.9(\text{kA})$$

## 九、高压电网不对称短路电流的计算

不对称短路计算一般采用对称分量法，即将短路电网分解

成正、负、零序网络,然后进行计算。

1. 序网的构成

(1)正序网络:它与前面所述的三相短路时的网络相同。

(2)负序网络:它所构成的元件与正序网络相同,只是用负序阻抗  $X_2$  代替正序阻抗  $X_1$  即可。

① 对于变压器、电抗器等不旋转元件:

$$X_2 = X_1$$

② 对于旋转电机:其负序阻抗可查产品目录,若无此数据时可参表 6—2。另外也可按下式计算:

对于汽轮发电机及有阻尼线圈的水轮发电机

$$X_2 = \frac{X'_d + X''_q}{2} \approx (1 \sim 1.22) X'_d$$

对于无阻尼线圈的水轮发电机

$$X_2 = \sqrt{X'_d X'_q} \approx 1.45 X'_d$$

(3)零序网络:它由元件的零序阻抗构成。设备的零序阻抗可查产品目录,若无此数据时可参见表 6—2。若发电机或变压器的中性点是经阻抗接地的,则须将该阻抗值增加 3 倍后再列入零序网络。

① 如果在回路中有变压器:则零序电流只有在一定条件下才能由变压器一侧感应到另一侧。变压器的零序阻抗  $X_0$  见表 6—8。

②电抗器:  $X_0 = X_1$ 。

③架空线及高压电缆电抗:见表 6—2 和表 2—5~表 2—7,或查手册资料。

2. 计算方法

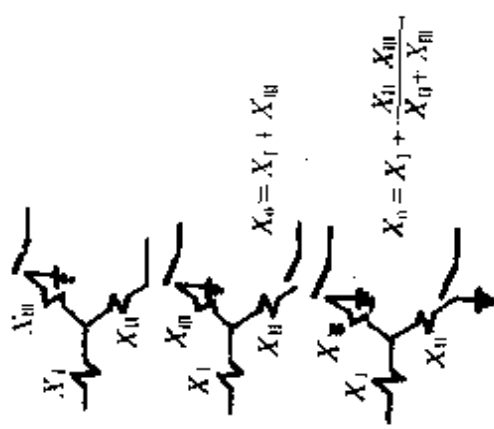
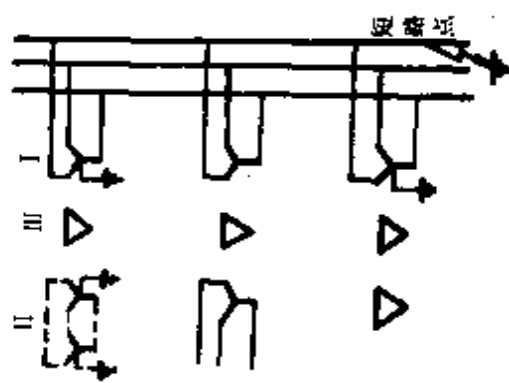
经验表明,任何一种不对称短路电流绝对值都可以用下面的公式表示:

$$I_d^{(n)} = m^{(n)} I_{d1}^{(n)}, \quad I_{d1}^{(n)} = \frac{E}{X_{1\Sigma} + X_{\Delta}^{(n)}} = \frac{E}{X_{\Sigma}^{(n)}}$$

表 6-8 变压器的零序电抗

双 卷 变 压 器		器	
等 值 阻 抗	接 线 图	接 线 图	图 示 接 线
<p>三个单相或壳式三相四柱</p> <p><math>X_0 = X_1</math></p>			
<p>三相三柱式</p> <p><math>X_0 = X_1 + X_{0n}</math></p>			
<p><math>X_0 = \infty</math></p>			
<p><math>X_0 = X_1 + 3Z</math></p>			
<p><math>X_0 = X_1 + Z/3</math></p>			

(续表)

三 卷 变 压 器	接 线 图
<p>等值阻抗(三个单相或三相)</p>  $X_0 = X_1 + X_2 + X_3$ $X_0 = X_1 + X_2 + X_3 + \frac{X_1 X_2 X_3}{X_1 + X_2 + X_3}$	

注:

- ①  $X_1$ 、 $X_2$ 、 $X_3$  为三卷变压器等值星形各支的正序电抗。
- ② 直接接地的自耦变压器与  $Y_0/Y_0/\Delta$  接线的等值回路是一样的。

式中： $m^{(n)}$ ——比例系数，其值与短路的类型有关，见表 6—11；  
 $I_{d1}^{(n)}$ ——所求某种类型短路的正序电流绝对值；  
 $E$ ——电源的综合电势；  
 $X_{1\Sigma}$ ——短路电路的正序电抗；  
 $X_{\Delta}^{(n)}$ ——需引入正序网络的附加电抗，其值与短路类型有关，决定短路电路的负序电抗  $X_{2\Sigma}$  和零序电抗  $X_{0\Sigma}$ 。各种短路时的  $X_{\Delta}^{(n)}$  和  $m^{(n)}$  值见表 6—9。

表 6—9 各种短路时的  $X_{\Delta}^{(n)}$  与  $m^{(n)}$  值

短路类型	表示短路类型的上角标(n)	$X_{\Delta}^{(n)}$	$m^n$
三相短路	(3)	0	1
两相短路	(2)	$X_{2\Sigma}$	$\sqrt{3}$
单相短路	(1)	$X_{2\Sigma} + X_{0\Sigma}$	3
两相接地短路	(1.1)	$\frac{X_{2\Sigma}X_{0\Sigma}}{X_{2\Sigma} + X_{0\Sigma}}$	$\sqrt{3} \sqrt{1 - \frac{X_{2\Sigma}X_{0\Sigma}}{(X_{2\Sigma} + X_{0\Sigma})^2}}$

说明：在计算不对称短路电流时，若同时出现三相短路电流的符号  $I''$ 、 $i_{ch}$ 、 $I_{ch}$ 、 $I_{\infty}$  时，为了便于区分比较，在这些量的右上角加注“(3)”，例如  $I''^{(3)}$ 、 $i_{ch}^{(3)}$ 、 $I_{ch}^{(3)}$  和  $I_{\infty}^{(3)}$ 。

不对称短路时各相电流、电压矢量的计算公式见表 6—10 所示。

下面介绍几种实用的计算方法。

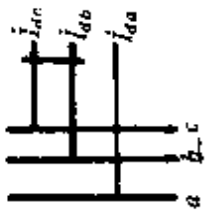
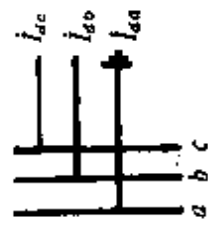
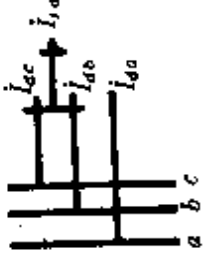
(1) 计算法：当计算不要求十分精准时，可认为  $X_2 \approx X_1$ ，利用下列近似公式计算：

① 单相短路超瞬变电流  $I^{(1)''}$  为

$$I^{(1)''} = 3 \frac{I_j}{2X_{*1\Sigma} + X_{*0\Sigma}}$$

② 两相短路超瞬变电流  $I^{(2)''}$  为

表 6-10 不对称短路各相电流、电压计算公式汇总表

序 号	短路处的待求量	短 路 种 类		
		二 相 短 路	单 相 短 路	二 相 接 地 短 路
1	a 相正序电流			
	$I_{a1} = \frac{E_{a\Sigma}}{j(X_{1\Sigma} + X_{2\Sigma})}$			
2	a 相负序电流	$-I_{a1}$	$I_{a1}$	$-I_{a1} \frac{X_{0\Sigma}}{X_{2\Sigma} + X_{0\Sigma}}$
	$I_{a2} =$			
3	零序电流	$0$	$I_{a1}$	$-I_{a1} \frac{X_{2\Sigma}}{X_{2\Sigma} + X_{0\Sigma}}$



(续表)

序号	短路处的待求量		短路种类		
			二相短路	单相短路	三相接地短路
4	$I_a =$	0	$3I_{a1}$	0	
5	$I_b =$	$-j\sqrt{3}I_{a1}$	0	$\left(a^2 - \frac{X_{2\Sigma} + aX_{0\Sigma}}{X_{2\Sigma} + X_{0\Sigma}}\right)I_{a1}$	
6	$I_c =$	$j\sqrt{3}I_{a1}$	0	$\left(a - \frac{X_{2\Sigma} + a^2X_{0\Sigma}}{X_{2\Sigma} + X_{0\Sigma}}\right)I_{a1}$	
7	$U_{a1} =$	$jX_{2\Sigma}I_{a1}$	$j(X_{2\Sigma} + X_{0\Sigma})I_{a1}$	$j\left(\frac{X_{2\Sigma}X_{0\Sigma}}{X_{2\Sigma} + X_{0\Sigma}}\right)I_{a1}$	
8	$U_{a2} =$	$jX_{2\Sigma}I_{a1}$	$-jX_{2\Sigma}I_{a1}$	$j\left(\frac{X_{2\Sigma}X_{0\Sigma}}{X_{2\Sigma} + X_{0\Sigma}}\right)I_{a1}$	
9	$U_0 =$	0	$-jX_{0\Sigma}I_{a1}$	$j\left(\frac{X_{2\Sigma}X_{0\Sigma}}{X_{2\Sigma} + X_{0\Sigma}}\right)I_{a1}$	
10	$U_a =$	$2jX_{2\Sigma}I_{a1}$	0	$3j\left(\frac{X_{2\Sigma}X_{0\Sigma}}{X_{2\Sigma} + X_{0\Sigma}}\right)I_{a1}$	
11	$U_b =$	$-jX_{2\Sigma}I_{a1}$	$j[(a^2 - a)X_{2\Sigma} + (a^2 - 1)X_{0\Sigma}]I_{a1}$	0	
12	$U_c =$	$-jX_{2\Sigma}I_{a1}$	$j[(a - a^2)X_{2\Sigma} + (a - 1)X_{0\Sigma}]I_{a1}$	0	

注:  $a$  为算子,  $a = e^{j120^\circ} = \frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2}$ 。

$$I^{(2)''} = \sqrt{3} \frac{I_j}{2X_{*1\Sigma}} = \frac{\sqrt{3}}{2} I^{(3)''} = 0.866 I^{(3)''}$$

短路冲击电流  $i_{ch}^{(2)}$  为

$$i_{ch}^{(2)} = 0.866 i_{ch}^{(3)}$$

短路全电流最大有效值  $I_{ch}^{(2)}$  为

$$I_{ch}^{(2)} = 0.866 I_{ch}^{(3)}$$

③ 稳态短路电流  $I_{\infty}^{(2)}$ : 两相短路稳态电流  $I_{\infty}^{(2)}$  与三相短路稳态电流  $I_{\infty}^{(3)}$  的比值关系视短路点与电源的距离远近而定:

在发电机出口处发生短路时,  $I_{\infty}^{(2)} = 1.5 I_{\infty}^{(3)}$

在远距离点短路(即  $X_{*j} > 3$ )时, 因为  $I_{\infty} = I''$ , 故  $I_{\infty}^{(2)} = 0.866 I_{\infty}^{(3)}$

一般估算:

$$X_{*j} > 0.6 \text{ 时, } I_{\infty}^{(2)} < I_{\infty}^{(3)}$$

$$X_{*j} \approx 0.6 \text{ 时, } I_{\infty}^{(2)} = I_{\infty}^{(3)}$$

$$X_{*j} < 0.6 \text{ 时, } I_{\infty}^{(2)} > I_{\infty}^{(3)}$$

(2) 查运算曲线法: 如果两相短路的短路点距电源较近, 则可用  $X_{*j}^{(2)} = 2X_{*j}^{(3)}$  去查运算曲线。当发电机出口发生两相短路时, 其电流稳态值仍可利用运算曲线求解, 但此时  $X_{*j}^{(2)} = X_d' + X_2$ , 其中  $X_d'$  为发电机次暂态电抗,  $X_2$  为发电机负序电抗(均为标么值), 可由表 6—2 中查得平均值。

利用  $X_{*j}^{(2)}$  从运算曲线中查得的  $I_{*zt}$  是正序电流标么值, 而故障点的总短路电流  $I_{*zt}^{(2)}$  为

$$I_{*zt}^{(2)} = \sqrt{3} I_{*zt}^{(3)}, \quad I_{*zt}^{(2)} = \sqrt{3} I_{*zt}^{(3)} I_e$$

需要指出, 不对称短路处正序电压相当大, 在计算不对称短路的冲击电流时, 可忽略异步电动机反馈电流的影响。

### 十、1KV 以下低压电网不对称短路电流的计算

#### 1. 计算公式

(1) 两相短路电流: 由于低压电网距发电机的电气距离很

远,降压变压器容量远比发电机电源容量为小,因此,可认为  $Z_2 \approx Z_1$ ,两相短路电流可按下式计算:

$$I^{(2)''} = 0.866 I^{(3)''}$$

(2)单相短路电流:可按下列公式计算:

公式一

$$I^{(1)''} = \frac{3U_p}{\sqrt{2Z_{1\Sigma} + Z_{0\Sigma}}} = \frac{3U_p}{\sqrt{(2R_{1\Sigma} + R_{0\Sigma})^2 + (2X_{1\Sigma} + X_{0\Sigma})^2}}$$

公式二

$$I^{(1)''} = \frac{U_p}{\sqrt{3} Z_{x1\Sigma}} = \frac{U_p}{\sqrt{3} \sqrt{R_{x1\Sigma}^2 + X_{x1\Sigma}^2}}$$

式中:  $U_p$ ——低压网络平均额定线电压(V);

$R_{1\Sigma}, R_{2\Sigma}, R_{0\Sigma}$ ——短路电路各元件正序、负序和零序总电阻 (mΩ);

$X_{1\Sigma}, X_{2\Sigma}, X_{0\Sigma}$ ——短路电路各元件正序、负序和零序总电抗 (mΩ);

$Z_{1\Sigma}, Z_{2\Sigma}, Z_{0\Sigma}$ ——短路电路各元件正序、负序和零序总阻抗 (mΩ);

$R_{x1\Sigma}, X_{x1\Sigma}, Z_{x1\Sigma}$ ——短路电路相零回路电阻、电抗和阻抗 (mΩ)。

## 2. 电路元件阻抗的计算

如上所述,低压网络内所有元件的负序阻抗等于正序阻抗,等于相阻抗,即  $Z_2 = Z_1$ 。

对于三相四线制低压网络

$$Z_0 = Z_{0r} + 3Z_{0l}$$

$$Z_{x1\Sigma} = \frac{Z_{1\Sigma} + Z_{2\Sigma} + Z_{0\Sigma}}{3}$$

$$R_{x1\Sigma} = \frac{R_{1\Sigma} + R_{2\Sigma} + R_{0\Sigma}}{3} = \frac{2R_{1\Sigma} + R_{0\Sigma}}{3}$$

$$X_{x1\Sigma} = \frac{X_{1\Sigma} + X_{2\Sigma} + X_{0\Sigma}}{3} = \frac{2X_{1\Sigma} + X_{0\Sigma}}{3}$$

(1) 高压侧系统阻抗: 高压系统的有效电阻可以忽略不计, 只考虑高压系统的电抗。国产配电变压器一般为  $Yyn^0$  连接, 当变压器低压侧发生单相短路时, 无零序电流通过高压侧, 所以高压侧零序阻抗为  $Z_0 \approx \infty$ 。

归算到低压侧的高压系统正序电抗有名值可按表 6—1 中的有关公式计算。

(2)  $Yyn_0$  型变压器的阻抗:  $Z_2 \approx Z_1$ , 可按表 6—1 中有关公式计算;  $Z_0$  比  $Z_1$  大得多, 需通过实测得到。

表 6—11 列出了常用电力变压器的各序阻抗和相零阻抗值。

(3) 电流互感器和开关的阻抗: 电流互感器一次线圈和自动开关过电流线圈的阻抗, 以及开关触头的接触电阻由制造厂提供, 也可参见表 6—5~表 6—7。

这些元件的  $Z_0 = Z_1$ 。

(4) 三相四线制配电线路的阻抗:

① 正序(或负序)阻抗: 导线、电缆和母线的阻抗见附录 1~附录 7。

② 线路零序阻抗计算:

$$Z_0 = |\dot{Z}_{0x} + 3\dot{Z}_{0l}|$$

$$= \sqrt{(R_{0x} + 3R_{0l})^2 + (X_{0x} + 3X_{0l})^2}$$

$$Z_{0l} = \sqrt{R_{0l}^2 + X_{0l}^2}$$

$$Z_{0x} = \sqrt{R_{0x}^2 + X_{0x}^2}$$

式中:  $Z_{0x}$ ——相线的零序阻抗;

表 6-11 10(6)/0.4kV 和 35/0.4kV 三相双绕组铝线电力变压器的  
阻抗平均值(mΩ)(归算到 400V 侧)

电 压 (kV)	容 量 (kVA)	- 阻抗电压 $U_d\%$ (%)	电 阻			电 抗		
			正、负序 $R_1, R_2, R$	零 序 $R_0$	相 零 $R_{af}$	正、负序 $X_1, X_2, X$	零 序 $X_0$	相 零 $X_{af}$
10(6)/0.4	20	4	237.33			214.63		
	30		147.56			154.02		
	40		101.00			124.04		
	50		77.01			102.17		
	63		58.45			83.07		
	80		43.33			67.23		
	100		31.13	312	124.75	54.12	425	177.75
	125		25.94			44.12		
	150		19.17	240	92.78	35.09	318	129.39
	200		14.80	204		26.37	268	108.25
250	11.10	162		23.82	216	87.88		

(续表)

电 压 (kV)	容 量 (kVA)	阻抗电压 $U_d\%$ (%)	电 阻			电 抗			
			正、负序 $R_1, R_2, R$	零 $R_0$	相 $R_d$	正、负序 $X_1, X_2, X$	零 $X_0$	相 $X_d$	零
10(6)/0.4	315	4	8.49	122		18.45	174		70.30
	400		6.33			14.96			
	500		4.91	58	22.61	11.82	110	44.55	
	630	3.95	40	15.97	10.73	84	35.15		
	800	2.97	36	13.98	8.50	60	25.67		
	1000	2.32	34	12.87	6.82	46	19.88		
35/0.4	1250	4.5	1.76	30	11.17	38	16.32		
	1600	1.26	24	8.84	4.32	32	13.55		
	50	77.87			192.83				
	100	6.5	40.53		95.77				
	125		31.23		77.12				

(续表)

电 压 (kV)	容 量 (kVA)	阻抗电压 $U_d\%$ (%)	电 阻			电 抗		
			正、负序 $R_1, R_2, R$	零 序 $R_0$	相 零 $R_d$	正、负序 $X_1, X_2, X$	零 序 $X_0$	相 零 $X_d$
35/0.4	160		22.92			60.82		
	200		17.20			49.07		
	250		12.76			39.59		
	315		9.76			31.55		
	400		7.10			25.01		
	500	6.5	5.41			20.09		
	630		3.99			16.02		
	800		3.04			12.64		
	1000		2.29			10.15		
	1250		1.77			8.14		
	1600		1.26			6.38		

$Z_{0l}$ ——零线的零序阻抗；

$R_{0x}、X_{0x}$ ——相线的零序电阻和电抗( $\Omega$ )；

$R_{0l}、X_{0l}$ ——零线的零序电阻和电抗( $\Omega$ )。

注意：在计算  $X_{0x}$  和  $X_{0l}$  时，线路电抗计算公式中的几何均距  $D$  改为  $D_0$  代替，即

$$D_0 = \sqrt[3]{D_{an}D_{bn}D_{cn}}$$

式中： $D_{an}、D_{bn}、D_{cn}$ ——分别为相线  $A、B、C$  中心至零线  $N$  中心的距离(mm)。

③ 线路相零阻抗的计算：单相短路电路中任一元件(配电变压器、线路等)的相零阻抗  $Z_{xl}$  均可按下式计算：

$$Z_{xl} = \sqrt{R_{xl}^2 + X_{xl}^2}, \quad R_{xl} = \frac{1}{3}(R_1 + R_2 + R_0)$$

$$X_{xl} = \frac{1}{3}(X_1 + X_2 + X_0)$$

式中： $R_{xl}$ ——元件的相零电阻；

$X_{xl}$ ——元件的相零电抗；

$R_1、X_1$ ——元件的正序电阻和电抗；

$R_2、X_2$ ——元件的负序电阻和电抗；

$R_0、X_0$ ——元件的零序电阻和电抗。

④ 线路阻抗的数据：各种形式配电线路的正、负序电阻、电抗见附录 1~附录 7。线路的零序电阻  $R_0$ 、零序电抗  $X_0$ 、相零电阻  $R_{xl}$  和相零电抗  $X_{xl}$  可从这些表中给出的相线和零线的零序电阻  $R_{0x}$  和零序电抗  $X_{0l}$  按下列公式求得：

$$R_0 = R_{0x} + 3R_{0l}, \quad X_0 = X_{0x} + 3X_{0l}$$

$$R_{xl} = \frac{1}{3}(R_1 + R_2 + R_{0x} + 3R_{0l})$$

$$X_{xl} = \frac{1}{3}(X_1 + X_2 + X_{0x} + 3X_{0l})$$

⑤ 钢导体的阻抗：几种常用规格的钢导体在不同电抗下



的零序阻抗,可查图 6-10、图 6-11 和表 6-12、表 6-13。

**例 6-5** 某低压供电系统如图 6-12 所示。变压器为 SL<sub>7</sub>-800KVA、10/0.4KV, Y<sub>yn0</sub> 接线, U<sub>d</sub>% = 4.5, P<sub>d</sub> 为 9.9kW, 高压电源为无限大容量电源, 变压器高压侧短路容量为 S<sub>dx</sub> 为 100MVA 安, 其它计算用技术数据标于图上, 试求:

- (1) 在 d<sub>1</sub> 处短路的三相短路电流。
- (2) 在 d<sub>2</sub> 处短路的三相短路电流。
- (3) 在 d<sub>2</sub> 处两相和单相短路的短路电流。

**解** 用有名制计算

(1) 各元件阻抗的计算:

高压系统的电抗

$$X_1 = \frac{U_s^2}{S_{dx}} = \frac{400^2}{100 \times 10^3} = 1.6 (\text{m}\Omega)$$

高压系统的电阻可忽略不计。

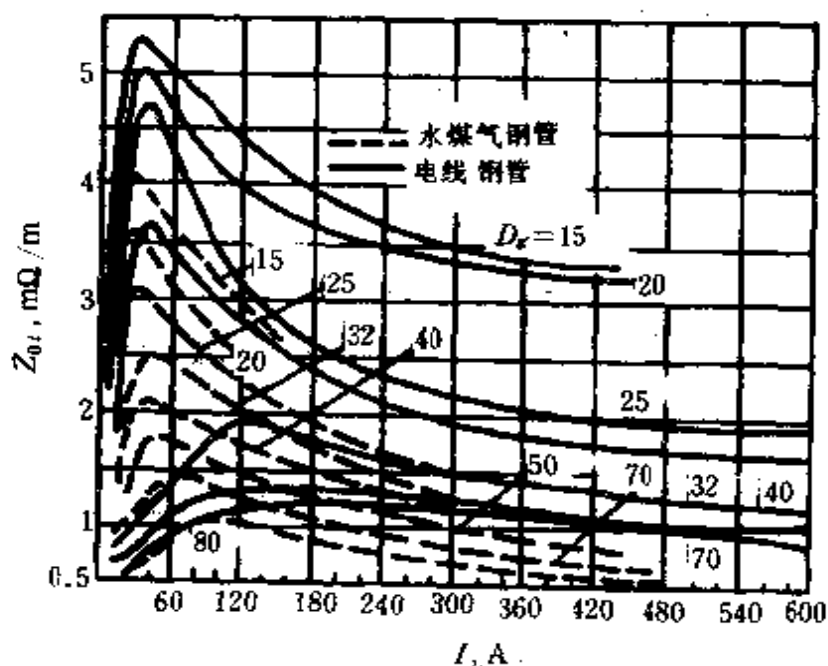


图 6-10 不同直径的水煤气钢管和电线钢管零序阻抗与电流的关线曲线

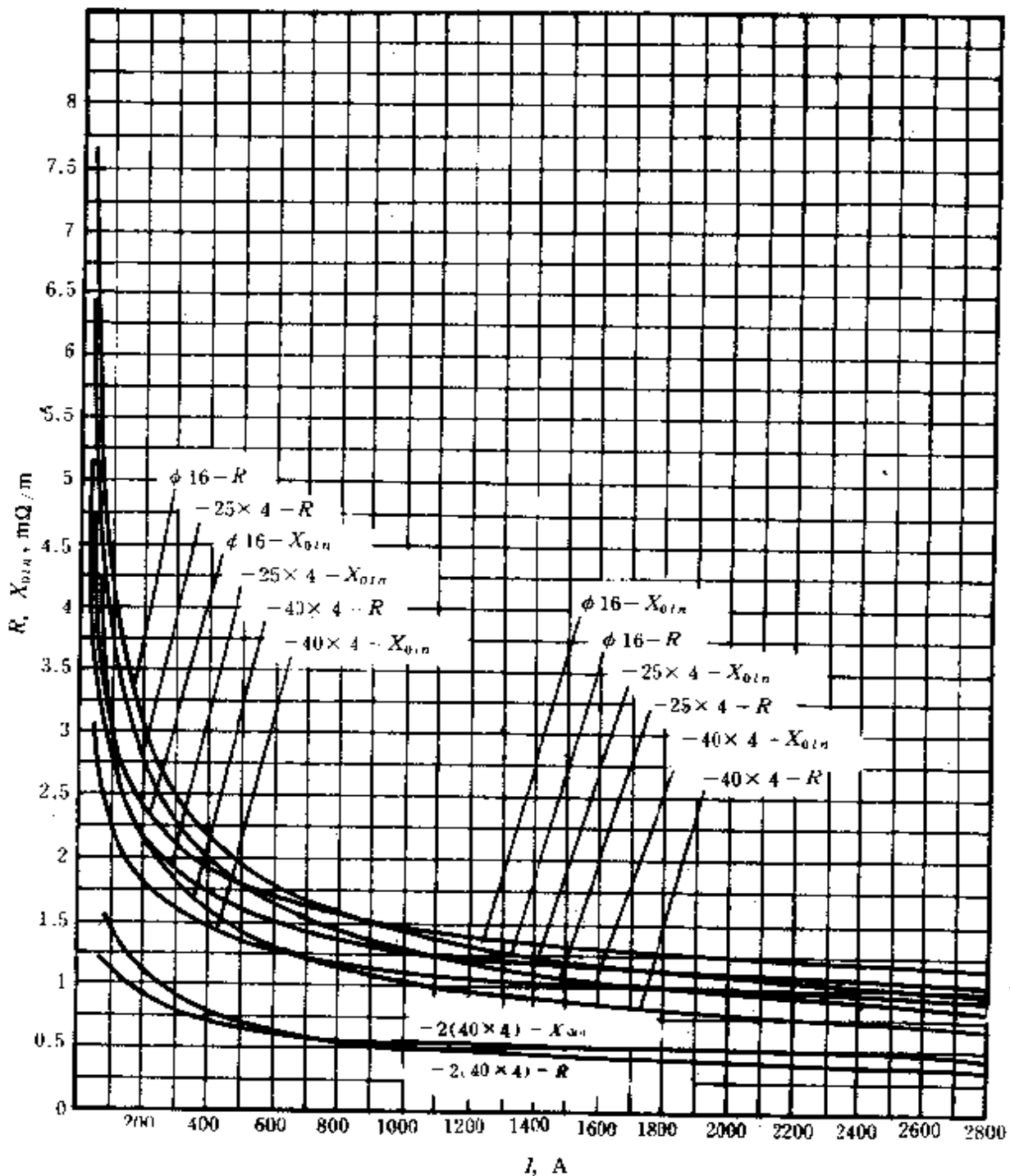


图 6-11 扁钢及圆钢的交流电阻  $R$  和零序内感抗  $X_{0ln}$  与通过电流的关线曲线

表 6—12 扁钢作为零线时的零序外感抗  
 $X_{0lx}$  (mΩ/m)

扁钢规格 a×b (mm)	扁钢至相线的几何均距 $D_0$ 为下值(mm)时						
	300	600	1500	2500	3500	4500	6000
25×4	0.240	0.284	0.342	0.374	0.395	0.411	0.429
40×4	0.214	0.258	0.315	0.348	0.369	0.384	0.402

表 6—13 角钢、方钢、钢轨作为零线  
时的零序阻抗

钢材规格	计算时 采用的 电流值 (A)	零序 电阻 $R_0$ (mΩ/m)	零序 内感抗 $X_{0lx}$ (mΩ/m)	钢导体至相线的几何均距 $D_0$ 为 下值(mm)时的零序外感抗 $X_{0lx}$ (mΩ/m)				
				300	600	1500	2700	4500
角钢 40×40×5(mm)	600	0.58	0.41	0.175	0.128	0.278	0.314	0.346
方钢 60×60(mm)	800	0.41	0.25	0.151	0.195	0.252	0.290	0.319
70×70(mm)	960	0.36	0.21	0.144	0.186	0.244	0.280	0.312
80×80(mm)	1200	0.29	0.17	0.133	0.177	0.235	0.273	0.304
钢轨 38(kg/m)	800	0.39	0.24	0.136	0.179	0.237	0.274	0.306
43(kg/m)	960	0.34	0.20	0.124	0.167	0.225	0.262	0.294
50(kg/m)	1200	0.28	0.15	0.106	0.149	0.208	0.244	0.276

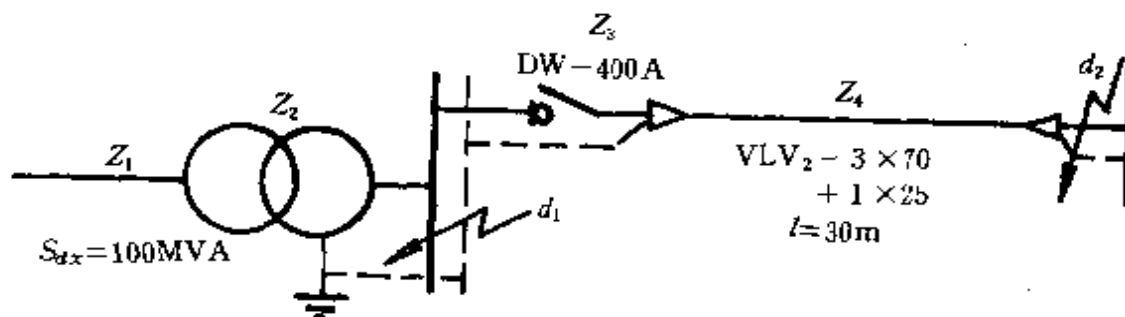


图 6—12 某低压供电系统图

变压器阻抗

$$Z_2 = \frac{U_s\%}{100} \cdot \frac{U_s^2}{S_c} = \frac{4.5 \times 400^2}{100 \times 800} = 9 (\text{m}\Omega)$$

$$R_2 = \frac{P_d U_s^2}{S_c^2} = \frac{9.9 \times 400^2}{800^2} = 2.48 (\text{m}\Omega)$$

$$X_2 = \sqrt{Z_2^2 - R_2^2} = \sqrt{9^2 - 2.48^2} = 8.65 (\text{m}\Omega)$$

自动开关接触电阻,查表 6—6 得  $R_3 = 0.4 \text{m}\Omega$

自动开关线圈阻抗,查表 6—5 得

$$R'_3 = 0.15 \text{m}\Omega, X'_3 = 0.1 \text{m}\Omega$$

电缆相线阻抗,查附录 5 得

$$R_4 = 30 \times 0.538 = 16.14 (\text{m}\Omega), X_4 = 30 \times 0.079 = 2.34 (\text{m}\Omega)$$

(2) 短路电路总阻抗计算:

$d_1$  点短路的总阻抗

$$R_x = R_1 + R_2 = 0 + 2.48 = 2.48 (\text{m}\Omega)$$

$$X_x = X_1 + X_2 = 1.6 + 8.65 = 10.25 (\text{m}\Omega)$$

$$Z_x = \sqrt{R_x^2 + X_x^2} = \sqrt{2.48^2 + 10.25^2} = 10.55 (\text{m}\Omega)$$

$d_2$  点短路的总阻抗

$$R_x = R_1 + R_2 + R_3 + R'_3 + R_4$$

$$=0+2.48+0.4+0.15+16.14=19.17(\text{m}\Omega)$$

$$X_2 = X_1 + X_2 + X_3 + X_4$$

$$=1.6+8.65+0.1+2.34=12.69(\text{m}\Omega)$$

$$Z_2 = \sqrt{R_2^2 + X_2^2} = \sqrt{19.17^2 + 12.69^2} = 21.74(\text{m}\Omega)$$

(3) 短路电流计算:

①  $d_1$  点三相短路:

$$I_d^{(3)} = \frac{U_e}{\sqrt{3} Z_2} = \frac{400}{\sqrt{3} \times 10.55} = 21.92(\text{kA})$$

因  $\frac{X_2}{R_2} = \frac{10.25}{2.48} = 4.13$ , 从图 6-8 查得  $k_{ch} = 1.47$ , 故

$$i_{ch} = \sqrt{2} K_{ch} I^{(3)} = \sqrt{2} \times 1.47 \times 21.92 = 45.56$$

(kA)

$$I_{ch} = I_d^{(3)} \sqrt{1 + 2(k_{ch} - 1)^2}$$

$$= 21.92 \sqrt{1 + 2(1.47 - 1)^2} = 26.32(\text{kA})$$

②  $d_2$  点三相短路:

$$I_d^{(3)} = \frac{U_e}{\sqrt{3} Z_2} = \frac{400}{\sqrt{3} \times 21.74} = 10.64(\text{kA})$$

因  $\frac{X_2}{R_2} = \frac{19.17}{12.69} = 1.51$ , 从图 6-8 查得  $k_{ch} = 1.12$ , 故

$$i_{ch} = \sqrt{2} k_{ch} I_d^{(3)} = \sqrt{2} \times 1.12 \times 10.64$$

$$= 16.85(\text{kA})$$

$$I_{ch} = I_d^{(2)} \sqrt{1 + 2(k_{ch} - 1)^2} \approx I_d^{(3)} = 10.64(\text{kA})$$

③  $d_2$  点两相短路:

$$I_d^{(2)} = 0.866 I_d^{(3)} = 0.866 \times 10.64 = 9.21(\text{kA})$$

$$i_{ch}^{(2)} = 0.866 i_{ch}^{(3)} = 0.866 \times 16.85 = 14.59(\text{kA})$$

$$I_{ch}^{(2)} = 0.866 I_{ch}^{(3)} = 0.866 \times 10.64 = 9.21(\text{kA})$$

④  $d_2$  点单相短路:

各元件的零序阻抗如下：

高压系统  $Z \approx 0$  (因无零序电流通过)

变压器 查表 6—11 得  $R_{02} = 36\text{m}\Omega, X_{02} = 60\text{m}\Omega$

自动开关触头 查表 6—6 得  $R_{03} = R_3 = 0.4\text{m}\Omega$

自动开关线圈 查表 6—5 得  $R'_{04} = R'_4 = 0.15\text{m}\Omega, X'_{04} = X'_4 = 0.1\text{m}\Omega$

电缆线路 查附录 5 得

相线  $R_{0x} = R_5 = 30 \times 0.538 = 16.14(\text{m}\Omega)$

$X_{0x} = 30 \times 0.079 = 2.37(\text{m}\Omega)$

零线  $R_{0l} = 30 \times 1.507 = 45.21(\text{m}\Omega)$

$X_{0l} = 30 \times 0.127 = 3.81(\text{m}\Omega)$

线路的零序电阻

$$\begin{aligned} R_{05} &= R_{0x} + 3R_{0l} = 16.14 + 3 \times 45.21 \\ &= 151.77(\text{m}\Omega) \end{aligned}$$

线路的零序电抗

$$X_{05} = X_{0x} + 3X_{0l} = 2.37 + 3 \times 3.81 = 13.8(\text{m}\Omega)$$

$d_2$  点单相短路时短路电路的相零回路阻抗为

$$\begin{aligned} R_{x1\Sigma} &= \frac{1}{3}(R_{1\Sigma} + R_{2\Sigma} + R_{0\Sigma}) \\ &= \frac{1}{3}[19.17 + 19.17 + (36 + 0.4 + 0.15 \\ &\quad + 151.77)] \\ &= 75.55(\text{m}\Omega) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} X_{x1\Sigma} &= \frac{1}{3}(X_{1\Sigma} + X_{2\Sigma} + X_{0\Sigma}) \\ &= \frac{1}{3}[12.69 + 12.69 + (60 + 0.1 + 13.8)] \\ &= 33.09(\text{m}\Omega) \end{aligned}$$

$$Z_{x1\Sigma} = \sqrt{R_{x1\Sigma}^2 + X_{x1\Sigma}^2} = \sqrt{75.55^2 + 33.09^2}$$

$$=82.48(\text{m}\Omega)$$

$d_2$  点单相短路电流为

$$I_d^{(1)} = \frac{U_e}{\sqrt{3} Z_{x\Sigma}} = \frac{400}{\sqrt{3} \times 82.48} = 2.8(\text{kA})$$

### 十一、中性点不接地系统接地电流的计算

1. 发生金属性接地时,故障相对地电压降为零,而两健全相对地电压升高  $\sqrt{3}$  倍,但相间电压保持不变。

2. 流过故障点的电流是线路对地电容引起的电容电流,一般数值不大。

3. 单相接地电容电流的计算

(1) 电缆线路单相接地电容电流  $I_c$ :

$$6\text{kV 电缆线路 } I_c = \frac{95 + 2.84S}{2200 + 6S} U_e L$$

$$10\text{kV 电缆线路 } I_c = \frac{95 + 1.44S}{2200 + 0.23S} U_e L$$

另外,  $I_c$  还可按下式作近似估算:

$$I_c = 0.1 U_e L$$

式中:  $S$ ——电缆芯线的标称截面 ( $\text{mm}^2$ );

$U_e$ ——线路额定线电压 (kV);

$L$ ——线路长度 (km)。

(2) 架空线路单相接地电容电流  $I_c$ :

$$\text{无架空地线单回路 } I_c = 2.7 U_e L \times 10^{-3}$$

$$\text{有架空地线单回路 } I_c = 3.3 U_e L \times 10^{-3}$$

另外,  $I_c$  还可按下式作近似估算:

$$I_c = \frac{U_e L}{350}$$

双回线电容电流为单回线的 1.3~1.6 倍。

由于变电而增加的接地电容电流值可按表 6—14 粗略估算

表 6—14 由于变电而增加的接地电容电流值

网络额定电压(kV)	6	10	15	35	60	110
线路电容附加值(%)	18	16	15	13	12	10

架空线路和电缆线路每千米单相接地电容电流的平均值，见表 6—15。

表 6—15 架空线路和电缆线路每千米单相接地电容电流的平均值(A/km)

电压 (kV)	电缆线路,当芯线截面为下列各值(mm <sup>2</sup> )时											架 空 线 路	
	10	16	25	35	50	70	95	120	150	185	240	单回路	双回路
6	0.33	0.37	0.46	0.52	0.59	0.71	0.82	0.89	1.1	1.2	1.3	0.013	0.017
10	0.46	0.52	0.62	0.69	0.77	0.90	1.0	1.0	1.3	1.4	1.6	0.0256	0.035
35	—	—	—	—	—	3.7	4.1	4.4	4.8	5.2	—	有架空线 0.078	有架空线 0.102
												无架空线 0.091	无架空线 0.110



## 第七章 高、低压电器

### 第一节 电气设备的选用

#### 一、高海拔地区电气设备的选用

高海拔地区,因空气稀薄,会使电工产品的散热效率降低;同时因气压降低和大气密度的减少,会使空气绝缘强度降低。

气压、温度与海拔高度的关系见表 7—1。

表 7—1 气压、温度与海拔高度的关系

海拔高度 H (m)	-2000 (矿井中)	0	1000	2000	3000	4000	5000
气平均气压 (Pa)	127989	101325	89992	79460	699994	61461	53995
最低气压 (Pa)	—	—	83993	71994	63995	55995	47996
最高气温 (°C)			40	35	30	25	20

因此除设计专用高原型电工产品外,在使用上必须采取下列一些措施:

#### 1. 降低产品额定容量使用

(1)温升超过产品额定温升值:如果随海拔增高而增加的产品温升值接近于高原气温随海拔增高而降低的递减值(每增 100m 约降低 0.5°C)时,则温升问题即能得到补偿。如果温升超过产品额定温升值,则应降低额定容量使用。对于电阻器,可按

海拔每超过 100m 降低额定电流的 0.5% 使用；对于电机类产品，可按绝缘极限允许工作温度每超过 1°C 降低额定容量 1% 使用。

各类电工产品在高原地区使用时因空气稀薄影响散热效率而使温升增高的修正值见表 7—2。

电工产品在高原使用时温升

表 7—2 增高的修正值

产 品 种 类		每超过 100m 时的 温升增高修正值	说 明
电 机		0.5°C	参见 GB755—65
		1%	适用于所有绝缘等级的风冷电机
控制微电机		0.2°C	推 荐 值
变 压 器	油浸自冷	0.4%	参见 GB1094—71
	干式自冷	0.5%	
	油浸风冷	0.6%	
	干式风冷	1.0%	
低 压 电 器		0.4°C	推荐值(不适用于电阻器)
高 压 电 器		0.3%	参见 GB763—74

注：

①表中未列出的电工产品，可参考结构相类似的产品的数值修正，或通过实际低气压试验确定。

②表中的%为产品额定温升的百分值。

(2)分断能力不足：高海拔会使在大气中灭弧的高、低压电器的分断能力降低。当分断能力不能合格时，应选用额定容量高

一级的产品。

(3)直流电机换向火花不合格:直流电机在低湿度(如低于 $3\text{g}/\text{m}^3$ )和低气压的高原环境中使用,如换向火花不合格,应选用换向性能好的电机或采取措施减小换向火花等级,甚至降低容量使用。

### 2. 降低额定电压等级使用

通常,可按海拔每增高 $100\text{m}$ ,空气绝缘强度大约降低 $1\%$ 来考虑。按照规定,当高压开关设备安装地点的海拔高度超过 $1000\text{m}$ 时,其外绝缘在干燥状态下的冲击和工频试验电压,应乘以系数 $K$

$$K = \frac{1}{1.1 - \frac{H}{1000}}$$

式中: $H$ ——海拔高度( $\text{m}$ ), $H < 3500\text{m}$ ;

$1.1$ ——常数,对干式变压器,则取 $1.05$ 。

外绝缘在淋雨状态下的试验电压,则应再乘以 $0.76$ 。

当按上式计算值进行试验而不合格时,则应加强绝缘措施,甚至选用额定电压高一级的同类产品。

### 3. 现场调整动作值使用

高海拔地区会使热继电器的动作时间缩短,因此,必要时应对其进行相应气压条件下的试验,或在现场调试整定电流。

### 4. 关于电工产品额定电流值

电工产品的额定电流值,由于温度随海拔高度的升高而增加,但因气温随海拔高度升高而降低,两者基本可以补偿。所以在实际使用中,额定电流值可以保持不变(电阻器除外)。

## 二、有火灾和爆炸危险场所电气设备的选用

### 1. 火灾危险场所和爆炸危险场所的划分

(1)火灾危险场所的划分:按可燃物质的状态,划分为

H-1、H-2 和 H-3 级：

①H-1 级：是指有可燃液体的火灾危险场所。可燃液体如柴油、润滑油、变压器油等。

②H-2 级：是指有悬浮状或堆积状的可燃粉尘或可燃纤维，其不可能形成爆炸性混合物，但有火灾危险的场所。可燃粉尘如煤粉、焦炭粉、面粉和合成树脂等；可燃纤维如棉、麻、丝、木质纤维等。

③H-3 级：是指有固体状可燃物质的火灾危险场所。可燃固体物质如煤、木材、布、纸等。

(2) 爆炸危险场所的划分：划分为二类五级。

① 有气体或蒸汽爆炸性混合物的爆炸危险场所为第一类，划分为 Q-1、Q-2 和 Q-3 三级：

Q-1 级，是指在正常情况下能形成爆炸性混合物，即达到爆炸浓度的场所。

Q-2 级，是指在正常情况下不能形成爆炸性混合物，而仅在不正常情况下（设备事故损坏、误操作、维护不当、检修设备等）能形成爆炸性混合物的场所。

Q-3 级，是指在不正常情况下，整个空间形成爆炸性混合物的可能性较小的场所。

② 有粉尘或纤维爆炸混合物的爆炸危险场所为第二类，划分为 G-1、G-2 两级：

G-1 级，是指在正常情况下能形成爆炸性混合物的场所。

G-2 级，是指在正常情况下不能形成爆炸性混合物，而仅在不正常情况下能形成爆炸性混合物的场所。

(3) 爆炸危险场所的区域范围划分：

① 非开敞的建筑物内部，一般以室为单位划定范围，对于 Q-1 级建筑物通向露天的门、窗外 3m 以内的空间范围，可降低为 Q-2 级；对于 Q-2 级建筑物通向露天的门、窗外 1m 以内的

空间范围,可降低为 Q—3 级。

② 对可燃气体、易燃液体和闪点低于或等于场所环境温度的可燃液体贮罐,一般在离设备外壳 3m 以内的空间为有爆炸危险场所区域范围。

③ 对易燃液体注送站,一般以注送口外水平距离 15m、垂直距离 7.5m 以内的空间为爆炸危险场所的区域范围。

## 2. 易燃、易爆物品的种类

(1) 易燃、易爆物品按照其物化性质的分类:

① 爆炸性物质:这类物质在受热、摩擦、碰击或与某些物质接触后,能发生强烈的爆炸,如炸药、焰火药等。

② 易燃和可燃液体:这类物质容易挥发,能引起火灾与爆炸,如汽油、酒精、煤油、苯、柴油、重油、植物油等。

③ 易燃和助燃气体:这类物质受热、碰击或遇到火花时能发生燃烧和爆炸,如氢、一氧化碳、甲烷、乙烯等属易燃气体;氧、氯等属助燃气体。

④ 遇水燃烧物质:如钾、钠、电石、锌粉、生石灰等。

⑤ 自然物质:这类物质当温度升高到其自然点时便能自行燃烧,如黄磷、油布、油纸等。

⑥ 易燃固体和可燃固体:这类物质燃点很低,极易燃烧,甚至爆炸,如硝化纤维素、红磷、沥青、松香、硫黄、镁粉等。

⑦ 氧化剂:这类物质本身并不会燃烧,但有强烈的氧化能力;当与某些危险物品接触时能促使危险品分解,引起燃烧和爆炸,如硝酸盐、氯酸盐、过氧化物等。

(2) 爆炸性混合物按传爆间隙和自燃温度的分类:见表 7—3。所谓传爆间隙是指爆炸混合物在设备内部爆炸后,爆炸物所能通过设备向外传播的最小间隙。

表 7-3 按传播爆炸间隙和自燃温度的分级和分组举例

按传播爆炸危险性分组的级别 $\delta$ (mm)	按自燃温度 $t(^{\circ}\text{C})$ 分组的组别				
	a ( $t > 450$ )	b ( $300 < t \leq 450$ )	c ( $200 < t \leq 300$ )	d ( $135 < t \leq 200$ )	e ( $100 < t \leq 135$ )
1 ( $\delta > 1.0$ )	甲烷、氯、醋酸	丁醇、醋酸酐	环己烷	—	—
2 ( $0.6 < \delta \leq 1.0$ )	乙烷、丙烷、丙酮、苯乙烯、氯乙烷、苯、氟苯、甲醇、甲苯、一氧化碳、醋酸乙酯	丁烷、乙醇、丙烯、醋酸丁酯、醋酸戊酯	己烷、戊烷、庚烷、辛烷、癸烷、硫化氢、汽油	乙醛、乙醚	—
3 ( $0.4 < \delta \leq 0.6$ )	城市煤气	环氧乙烷、环氧丙烯、丁二烯、1,4-二氧基己烷、乙烯	异戊二烯	—	—
4 ( $\delta \leq 0.4$ )	水煤气、氢	乙炔	—	—	二硫化碳

注：级别或组别越高越危险。



(3) 爆炸性混合物按最小引爆电流的分类,见表 7—4。

表 7—4 防爆安全火花型电气设备防爆性能标志举例

最小引爆电流 $i$ (mA) 级别	防爆性能 标 志	爆 炸 性 混 合 物
I ( $i > 120$ )	HI (KH)	甲烷、乙烷、丙烷、汽油、环己烷、异己烷、甲醇、乙醇、乙醛、丙酮、醋酸、醋酸甲酯、丙烯酸甲酯、苯、一氧化碳、氨
II ( $70 < i \leq 120$ )	HI	乙烯、丁二烯、丙烯腈、二甲醚、乙醚、二丁基醚、环丙烷
III ( $i \leq 70$ )	III	氢、乙炔、二硫化碳、城市煤气、水煤气、焦炉煤气、氧化乙烯

注:

① 表内  $i$  为试验最小引爆电流 (mA), 是指按直流电压 24V、电感 100mH 的感性回路上的试验值;

② 表中防爆性能标志一栏括号中的“KH”示矿用防爆安全火花型电气设备。

③ 级别越高越危险。

### 3. 火灾危险场所电气设备的选型

正常运行时有火花的外壳表面温度较高的电气设备,应尽量远离可燃物质。在有火灾危险的场所选用电气设备时,应根据场所等级、电气设备的种类和使用条件,按表 7—5 进行选择。

### 4. 爆炸危险场所电气设备的选型

在有爆炸危险的场所选用电气设备时,应根据爆炸危险场所的类别、等级和电火花形成的条件,并结合爆炸性混合物的危险性,按表 7—6 进行选择。

表 7-5 火灾危险场所电气设备选型

电气设备 及其使用条件	场所等级		可燃液体 (H-1级)	悬浮状、堆积状可 燃粉尘或可燃纤维 (H-2级)	固体状可燃物质 (H-3级)
	固定安装	移动式			
电 机	固定安装	移动式	防溅式 <sup>①</sup>	封闭式	防滴式 <sup>②</sup>
	移动式	固定安装	封闭式	封闭式	封闭式
电器和仪表	固定安装	移动式	防水型、防尘型、 充油型、保护型 <sup>③</sup>	防尘型	开启式
	移动式	固定安装	防水型、防尘型	防尘式	保护型
照明灯具	固定安装	移动式	保护型	防尘型 <sup>④</sup>	开启型
	移动式	固定安装	防尘型	防尘型	保护型
配 电 装 置	固定安装	移动式	防尘型	防尘型	保护型
	移动式	固定安装	防尘型	防尘型	保护型
接 线 盒	固定安装	移动式	防尘型	防尘型	保护型
	移动式	固定安装	防尘型	防尘型	保护型

注：  
 ①电机正常运行时有火花的部件(如滑环)应装在全封闭的罩子内；  
 ②正常运行时有火花的部件(如滑环)的电机最低应选用防溅型；  
 ③正常运行时有火花的设备，不宜采用保护型；  
 ④照明灯具的玻璃罩应用金属网保护；  
 ⑤可燃纤维火灾危险场所，固定安装时，允许采用普通荧光灯。



表 7—6 电气设备按爆炸危险场所的危险程度选型举例

场所等级	有可燃气体、易燃液体的场所			有可燃粉尘、纤维的场所		
	正常情况下能达到爆炸浓度的场所 (Q-1级) <sup>①</sup>	事故或检修时才能达到爆炸浓度的场所 (Q-2级)	事故或检修时不易在整个区域达到爆炸浓度的场所 (Q-3级)	正常情况下能达到爆炸浓度的场所 (G-1级)	事故或检修时才能达到爆炸浓度的场所 (G-2级)	
电气设备及其使用条件	电机	隔爆型、防爆通风充气型	任意一种防爆类型	封闭式 <sup>②③</sup>	任意一级隔爆型、防爆通风充气型	封闭式 <sup>④</sup>
		隔爆型、防爆充油型、防爆通风充气型、防爆安全火花型	任意一种防爆类型 <sup>⑤</sup>	防尘型、防水型 <sup>⑥</sup>	任意一级隔爆型、防爆通风充气型、防爆充油型	防尘型
		隔爆型、防爆通风充气型、防爆安全火花型	除防爆充油型外任意一种防爆类型	除防爆充油型外任意一种防爆类型、防水型	任意一级隔爆型、防爆通风充气型	防尘型
电器和仪表	固定安装	隔爆型、防爆通风充气型、防爆安全火花型	除防爆充油型外任意一种防爆类型	除防爆充油型外任意一种防爆类型、防水型	任意一级隔爆型、防爆通风充气型	防尘型
		隔爆型、防爆通风充气型、防爆安全火花型	除防爆充油型外任意一种防爆类型	除防爆充油型外任意一种防爆类型、防水型	任意一级隔爆型、防爆通风充气型	防尘型
		隔爆型、防爆通风充气型、防爆安全火花型	除防爆充油型外任意一种防爆类型	除防爆充油型外任意一种防爆类型、防水型	任意一级隔爆型、防爆通风充气型	防尘型
移动式	移动式	隔爆型、防爆通风充气型、防爆安全火花型	除防爆充油型外任意一种防爆类型	除防爆充油型外任意一种防爆类型、防水型	任意一级隔爆型、防爆通风充气型	防尘型
		隔爆型、防爆通风充气型、防爆安全火花型	除防爆充油型外任意一种防爆类型	除防爆充油型外任意一种防爆类型、防水型	任意一级隔爆型、防爆通风充气型	防尘型
		隔爆型、防爆通风充气型、防爆安全火花型	除防爆充油型外任意一种防爆类型	除防爆充油型外任意一种防爆类型、防水型	任意一级隔爆型、防爆通风充气型	防尘型
携带式	携带式	隔爆型、防爆通风充气型、防爆安全火花型	除防爆充油型外任意一种防爆类型	除防爆充油型外任意一种防爆类型、防水型	任意一级隔爆型、防爆通风充气型	防尘型
		隔爆型、防爆通风充气型、防爆安全火花型	除防爆充油型外任意一种防爆类型	除防爆充油型外任意一种防爆类型、防水型	任意一级隔爆型、防爆通风充气型	防尘型
		隔爆型、防爆通风充气型、防爆安全火花型	除防爆充油型外任意一种防爆类型	除防爆充油型外任意一种防爆类型、防水型	任意一级隔爆型、防爆通风充气型	防尘型

(续表)

场所等级 电气设备 及其使用条件	有可燃气体、易燃液体的场所		有可燃粉尘、纤维的场所	
	正常情况下能达到爆炸浓度的场所 (Q-1级)①	事故或检修时才能达到爆炸浓度的场所 (Q-2级)	事故或检修时不易达到爆炸浓度的场所 (Q-3级)	正常情况下能达到爆炸浓度的场所 (G-1级)
照明灯具	固定安装及移动式	任意一种防爆类型	防尘型	任意一级隔爆型
	便携式②	隔爆型	隔爆型、防爆安全型	任意一级隔爆型
变 压 器		任意一种防爆类型	防 尘 型	任意一级隔爆充油型、防爆通风机充气型
		隔爆型、防爆通风机充气型	防 尘 型	任意一级隔爆充油型、防爆通风机充气型
通 讯 电 器		任意一种防爆类型	密 封 型	任意一级隔爆充油型、防爆通风机充气型
		隔爆型、防爆通风机充气型	密 封 型	任意一级隔爆充油型、防爆通风机充气型
配 电 装 置		任意一种防爆类型	密 封 型	任意一级隔爆通风机充气型
		隔爆型、防爆通风机充气型	密 封 型	任意一级隔爆通风机充气型

注：①正常情况下，连续或经常存在爆炸性混合物的地点(例如贮存易燃液体的贮罐或工艺设备内的上部空间)，不宜设置电气设备，但为了测量、保护或控制的要求，可装设防爆安全火花型电气设备；  
 ②事故排除风机电机应选用任意一种防爆类型；  
 ③电机正常运行时有火花的花的部件(例如滑环)应采用下列类型之一的罩子，即防爆通风机充气型乃至封闭式等；  
 ④正常运行时不发生火花的花的部件和按工作条件发热不会超过80℃的电器和仪表，可选用防尘型；  
 ⑤事故排除风机电机的控制设备(如按钮)应选用任意一种防爆类型；  
 ⑥照明灯具的玻璃罩应有金属网保护。

三、电气设备发热计算

1. 载流导体允许温度及温升

载流导体在长期通过额定工作电流及短时通过短路电流时,各部分允许温度及温升见表 7—7 和表 7—8

表 7—7 高压电器的允许温升

序号	电器各部分名称	最大允许发热温度(°C)			在环境温度为 + 40°C 时的允许温升(°C)		
		在空气中	在油中	在 SF <sub>6</sub> 中	在空气中	在油中	在 SF <sub>6</sub> 中
1	不与绝缘材料接触的载流和不载流的金属部分:						
	(1) 经常受机械作用的:						
	铜	110	90	(110)	70	50	(70)
	铜镀银	120	90	(120)	80	50	(80)
	铝	100	90	(100)	60	50	(60)
	钢,铸铁及其它	110	90	(110)	70	50	(70)
(2) 不经常受机械作用的:							
铜或铜镀银	145	90		105	50		
铝	135	90		95	50		
2	与绝缘材料接触的载流和不载流的金属部分,以及由绝缘材料制成的零件,当绝缘材料等级为						
	Y	85		(85)	45		(45)
	A	100	90	(100)	60	50	(60)
	E	100	90	(100)	70	50	(70)
	B、F、H 和 C	110	90	(110)	70	50	(70)
3	最上层变压器油						
	(1) 作为灭弧介质时		80			40	
	(2) 只作为绝缘介质时		90			50	

(续表)

序号	电器各部分名称	最大允许发热温度(°C)			在环境温度为 + 40°C 时的允许温升(°C)		
		在空气中	在油中	在 SF <sub>6</sub> 中	在空气中	在油中	在 SF <sub>6</sub> 中
4	接触连接						
	(1) 用螺栓、螺纹、铆钉或其它能保证紧固连接方法压紧的铜、铜铝或其合金制造的接触连接:						
	铜或铝(包括紧铜带)无镀层	80	85	(85)	40	45	(45)
	铜或铝镀(搪)锡	90	90	(90)	50	50	(50)
	铜镀银	105	90	(105)	60	50	(65)
	铜镀银厚度大于 50μm 或镀银片	120	90	(120)	80	50	(80)
	(2) 用弹簧压紧的铜或铜合金、银或银合金制成的接触连接:						
	铜或铜合金* 无镀层	75	80	(80)	35	40	(40)
铜或铜合金* 镀银	105	90	(105)	65	50	(65)	
银或银合金* 铜镀银厚度大于 50μm 或镀银片	120	90	(120)	80	50	(80)	
5	铜编织线软连接	75	80		35	40	
6	起弹簧作用的金属零件	见注 3					

注:

① 经常受机械作用的铝,最大允许发热温度取 100°C;不经常受机械作用的铜、铝最大允许发热温度可以适当提高,但应比绝缘零件允许发热温度低 10°C,且不得高

于表中 1 项(2) 所规定之值。

②“\*”所指铜合金和银合金是指铜基与银基合金均不包括粉末冶金制作。

③ 最大允许温度不应达到丧失材料弹性,对纯铜此温度为 75°C。

④ 具有银铜层的接触连接,若工作时,此接触面将会被电弧烧灼或者在进行机械强度试验后,镀银层被擦掉的,则其发热温度按没有银层时处理。

⑤ 粉末冶金制件接触连接的允许发热温度,由制造厂在各种产品技术条件中加以规定。

⑥ 在 SF<sub>6</sub> 中的最大允许发热温度及温升,作为推荐使用值。

SF<sub>6</sub> 指六氟化硫气体。

⑦ 高压电器规定使用环境温度不高于 +40°C,海拔不超过 1000m。用于高海拔地区的户外电器,应按海拔高度的不同而降低规定使用环境温度,如 2000m 为 35°C;3000m 为 30°C;4000m 为 25°C。用于高于 1000m(不超过 4000m)的地区时,其温升按每 100m 增加 3%。用于低于 +40°C 环境时,每低于 1°C 允许增加额定的 1% 负荷,但最大不得超过额定的 20%;用于高于 +40°C(不高于 +50°C)的环境中,每增高 1°C 应减少额定 20% 负荷。

表 7—8 低压电器零部件的极限允许温升

不同材料和零部件名称		极限允许温升(°C)		备注
		长 期 工作制	间断长期或反 复短时工作制 <sup>①</sup>	
绝缘线圈 及包有绝 缘材料的 金属导体	A 级绝缘	65	80	电压线圈 <sup>②</sup> 及多层电 流线圈用电阻法测 量,金属导体用热电 偶法测量
	E 级绝缘	80	95	
	B 级绝缘	90	105	
	F 级绝缘	115	130	
	H 级绝缘	140	155	
各 类 触 头 或 插 头 <sup>③</sup>	铜及铜基合金 自力式触头 <sup>④</sup> 、 插头,无防蚀层	35		
	铜及铜基合金 他力式触头 <sup>⑤</sup> 、 插头,无防蚀层	45	65	

(续表)

不同材料和零部件名称		极限允许温升(°C)		备注
		长 期 工作制	间断长期或反 复短时工作制 <sup>①</sup>	
各 类 触 头 或 插 头 <sup>②</sup>	铜及铜基合金 他力式插头、触 头,有厚度6~ 8um的银防蚀 层	80	—	
	铜及铜合金他 力式插头、触 头,有厚度6~ 8um的银防蚀 层	60	—	
	银及银基合金 触头	以不伤害邻部为限 <sup>③</sup>		
与 外 部 连 接 线 的 端 头	接线端头有锡 (或银)防蚀 层,当指明引入 导体为铝也有 锡(或银)防蚀 层时	35		热电偶法测量
	接线端头为铜 及铜基合金材 料,无防蚀层的 当指明引入导 体为铜或有防 蚀层的铝时	45		
	接线端头为铜 及铜基金合材 料,有银防蚀 层,当指明引入 导体为铜也有 银防蚀层时	80,还应不伤害相邻部件 为限 <sup>③</sup>		

(续表)

不同材料和零部件名称		极限允许温升(°C)		备注
		长 期 工作制	间断长期或反 复短时工作制 <sup>①</sup>	
产 品 内 部 的 导 体 连 接 处 <sup>②③</sup>	铝材与铝材, 铜材与铝材紧固接合处, 二者均有锡防蚀层	55		热电偶法测量
	铝材与铝材、铜材与铝材紧固接合处, 二者均有银防蚀层	60		
	铜材与铜材, 紧固接合处无防蚀层	45		
	铜材与铜材紧固接合处, 二者均有银防蚀层	60		
	铝材与铜材紧固接合处, 二者均有银防蚀层			
	铝材与铝材, 铝材与铜材、铜材与铜材焊接的导体	以不伤害相邻部件为限 <sup>④</sup>		

(续表)

不同材料和零部件名称		极限允许温升(°C)		备注	
		长 期 工作制	间断长期或反 复短时工作制 <sup>①</sup>		
其 它	浸入有机绝缘油中工作的部件		60	温度计法或热电偶等法 测量	
	操作时手 接触的部 件	金属材料	15		
		绝缘材料	25		
	起弹簧作用的部件		以不伤害材料的性质且不伤害相邻部件为限 <sup>⑤</sup>		
	电阻元件		由所用材料决定,且不伤害相邻部件为限 <sup>⑦</sup>		

① 主要用于间断长期工作制或反复短时工作制的电器,如用于长期工作制时,其线圈温升按间断长期或反复短时工作允许温升值考核。

② 对有主弧触头的电器,其弧触头的温升以及熔断器触刀,触座的温升由产品标准或产品技术条件另行规定。

③ 自力式触头指由触头(包括触桥)材料本身产生弹力作接触压力的触头。

④ 他力式触头指依靠其他弹性材料产生接触压力触头。

⑤ 如相邻部件为绝缘材料,则极限允许温升按表中相应等级线圈的极限允许温升。

⑥ 电压线圈的温升是指额定工作电压下的稳定值。

⑦ 高发热元件(如电阻元件、熔断器、热元件等)连接处的极限允许温升由产品标准或产品技术条件另行规定。

⑧ 与发热部件相邻近的绝缘材料耐热等级低于A级(如热塑性、塑料)时,则其极限允许温升为该材料连续耐热温度为40°C之差。



表 7—9 短路时电器载流导体的允许温度

载流导体		短路时允许温度(°C)			
		铜	黄铜	铝	钢
未绝缘		300	300	200	400
外包绝缘等级	Y	200	200	200	200
	A	250	250	200	250
	B 和 C	300	300	200	400

注：触头接触点处的温度不受上表限制，但要求短路电流通过后不出现妨碍触头正常动作和正常通流能力。

### 2. 载流导体的热损耗 $P$ 的计算

$$P = K_{jf} I^2 R = K_{jf} K_{ij} I^2 R$$

式中： $K_{jf}$ ——附加损耗系数， $K_{jf} = K_{ij} K_{lj}$ ；

$K_{jf}$ ——集肤效应系数，见图 7—1 ~ 图 7—3；

$K_{lj}$ ——邻近效应系数，见表 7—10。

图 7—1 为槽形导体的  $K_{jf}$ 。图 7—2 为矩形截面铜导体的  $K_{jf}$ ，其中， $A = h \times b$ 。图 7—3 为实心 and 空心圆截面导体的  $K_{jf}$ ，其中， $f$  为频率(Hz)； $R$  为 1cm 长导体的电阻( $\Omega$ )。

### 3. 载流导体散热功率计算

载流体的散热有传导、对流和辐射三种方式。

(1) 热传导散热功率计算：

$$P_g = -\lambda \frac{dt}{dx}$$

式中： $P_g$ ——单位时间内经过单位面积的散热功率( $w/cm^2$ )；

$\lambda$  —— 传热系数，见表 7—13；

$dt/dx$ ——单位长度上的温度变化( $^{\circ}\text{C}/\text{cm}$ )。

(2) 热对流散热功率计算:

$$P_i = \alpha_i F (t - t_0) = \alpha_i F \tau$$

式中: $P_i$ ——热对流散热功率(W);

(3) 热辐射散热功率计算:

$$P_f = 5.7\epsilon [(\frac{t}{1000})^4 - (\frac{t_0}{1000})^4]$$

式中: $p_f$ ——热辐射散热功率(W);

$\epsilon$ ——辐射系数,见表 13—25;

其它符号同前。

#### 4. 用牛顿公式计算稳态散热功率和温升

牛顿公式是将传导、对流和辐射三种散热方式合并起来,用一个公式进行稳态热计算。它适用于在气体和液体介质中载流导体和线圈稳定温升的计算。

$$P = K_T F \tau$$

$$\tau = t - t_0$$

式中: $P$ ——散热功率(W);

$K_T$ ——综合传热系数( $\text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{K}$ ),见表 7—14;

$F$ ——有效散热面积( $\text{m}^2$ );

其它符号同前。

式中: $\alpha_s$ ——散热系数( $\text{W}/^{\circ}\text{C} \cdot \text{cm}^2$ ),见表 7—11 和表 7—12,供参考;

$F$ ——有效散热面积( $\text{cm}^2$ );

$t$ ——物体表面温度( $^{\circ}\text{C}$ );

$t_0$ ——周围介质温度( $^{\circ}\text{C}$ );

$\tau$ ——温升( $^{\circ}\text{C}$ )。

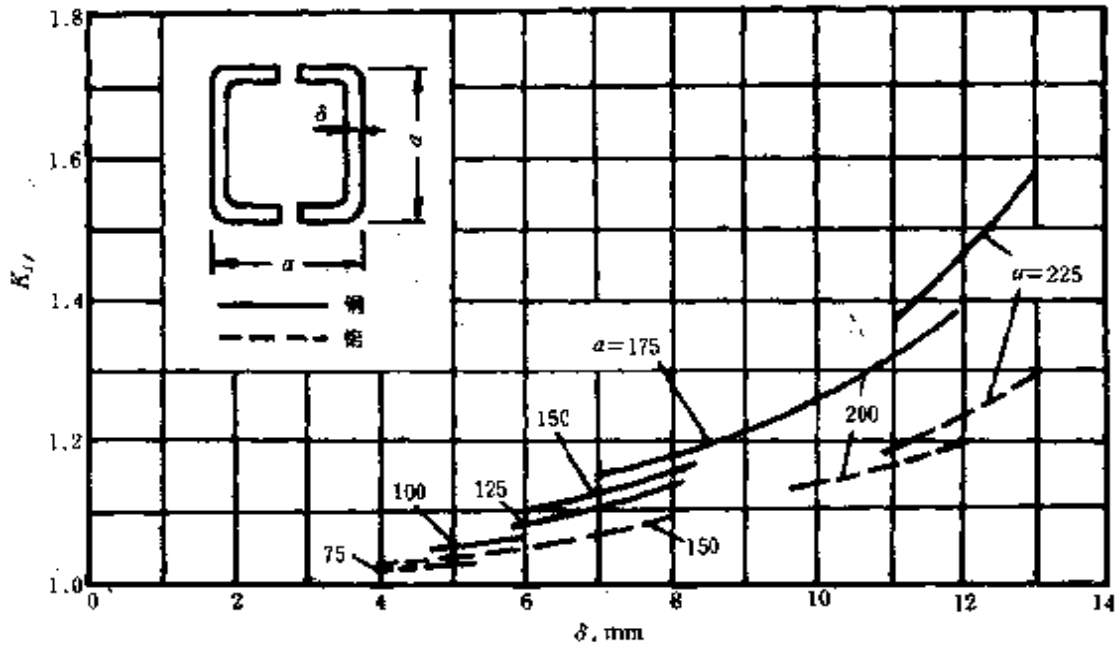


图 7—1 槽形导体的  $K_{jf}$

表 7—10 两平行圆截面铜导线的  $K_{jf}$

直径 (cm)	导体轴线间的距离(cm)							
	2.5	5	7.5	10	12.5	15	17.5	20
	$K_{jf}$							
2.5	1.20	1.05	1.02	1.01	1.00	—	—	—
5.0	—	1.50	1.20	1.09	1.07	1.05	1.03	1.01
7.5	—	—	1.80	1.40	1.14	1.10	1.08	1.05

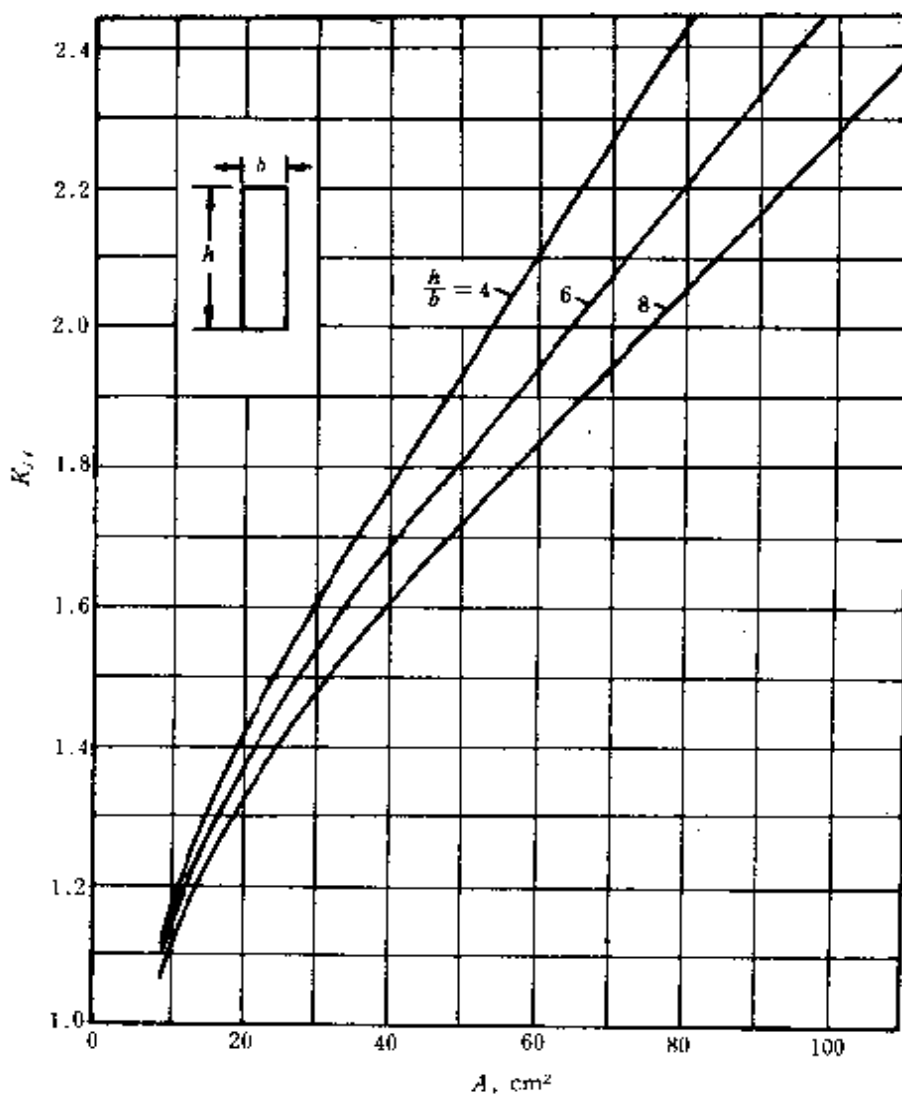


图 7·2 矩形截面铜导体的  $K_{Jf}$

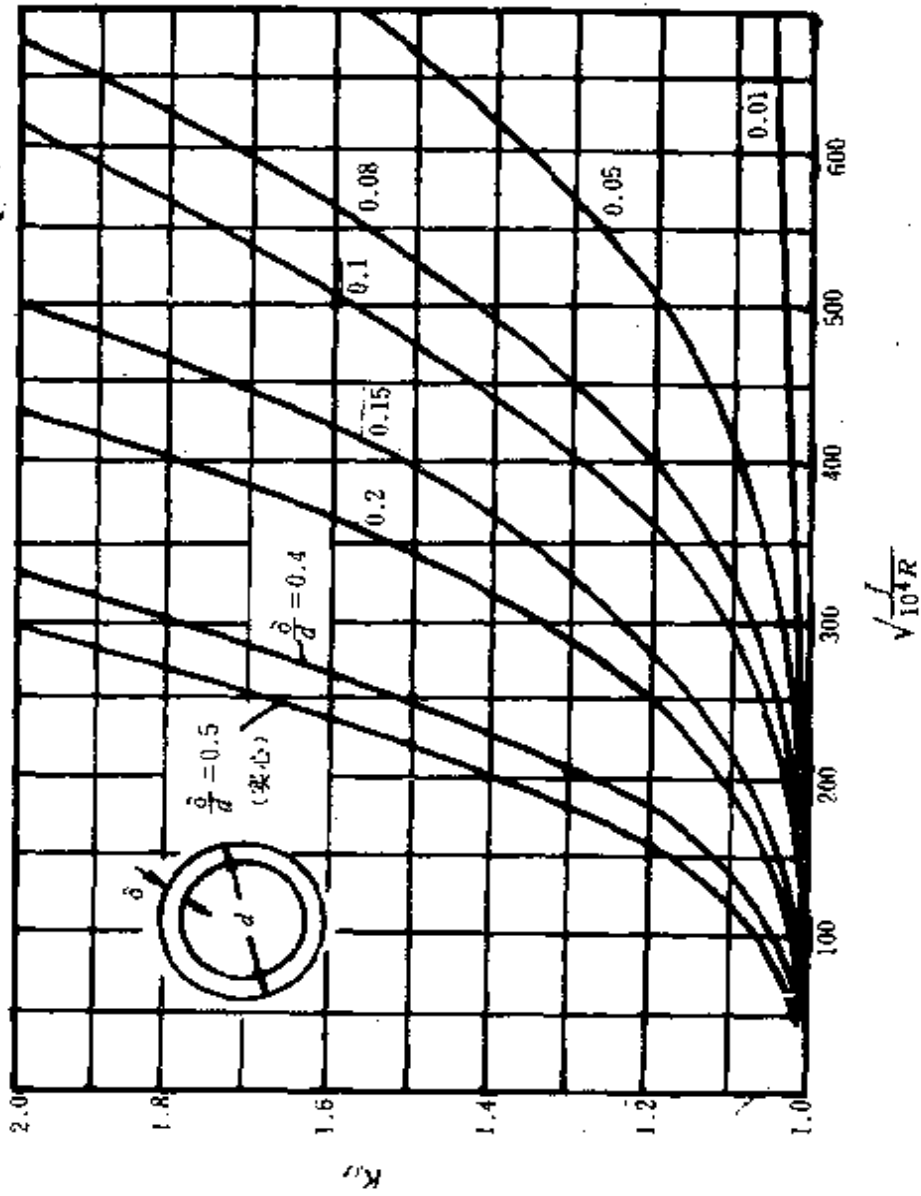


图 7-3 实心 and 空心圆截面导体的  $K_d$

表 7—11 在空气中自然冷却的散热系数  $a_s$

发 热 物 体 特 征		$a_s$ (W/cm <sup>2</sup> · °C)
水平放置的圆铜棒 或铜管	外径 1 ~ 2.5cm	$(1.3 \sim 1.1) \times 10^{-3}$
	2.5 ~ 4cm	$(1.1 \sim 0.95) \times 10^{-3}$
	4 ~ 6cm	$(1.1 \sim 0.9) \times 10^{-3}$
矩形铜母线(铜板)	平 放	$(0.7 \sim 0.85) \times 10^{-3}$
	直 放	$(0.8 \sim 0.95) \times 10^{-3}$
指形触头(在不利的散热条件下)		$0.6 \times 10^{-3}$
铝 母 线		$(0.7 \sim 0.9) \times 10^{-3}$
软连接铜带		$1.3 \times 10^{-3}$
槽形铜母线	仅外表面散热	$(1.0 \sim 1.2) \times 10^{-3}$
	内外表面散热	$(0.6 \sim 0.8) \times 10^{-3}$
钢或铸铁		$(1.0 \sim 1.4) \times 10^{-3}$
涂漆的导体表面		$(1.2 \sim 1.6) \times 10^{-3}$
纸质绝缘线圈		$(1.0 \sim 1.25) \times 10^{-3}$

表 7—12 强迫通风下的散热系数

风 速 $v$ (m/s)	$a_s$ (W/cm <sup>2</sup> · °C)
$\leq 5$	$(6.5 + 4v) \times 10^{-4}$
$> 5$	$8v^{0.8} \times 10^{-4}$

表 7—13 常用材料的热传导系数  $\lambda$

材料		比重 $\gamma$ (g/cm <sup>3</sup> )	传热系数 $\lambda$ (W/cm <sup>2</sup> ·°C)	比热容 $C$ (J/g·°C)
铝		2.7	2.04	0.9
石墨		1.9 ~ 2.3	0.155	0.83
纯铁		7.8	0.5	0.472
电解铜		8.9	3.86	0.39
镍		8.8	0.58	0.46
镍铬		8.15	—	—
黄铜		8.4 ~ 8.7	0.64	0.362
锡		7.3	0.65	0.23
银		10.5	4.2	0.23
石棉		2.1 ~ 2.8	0.0014 ~ 0.0023	0.82
纸		1.3	0.008	0.91
漆布带		—	0.00146	—
云母板		—	0.0012	—
电木胶板		—	0.0014	—
绝缘 底板	未涂漆	—	0.00178	—
	涂漆	—	0.00138	—
棉布	未浸漆	—	0.00071	—
	浸漆	—	0.00114	—
	浸油	—	0.0009	—

表 7—14 综合传热系数  $K_T$  值

表面及其特性	$K_T$ (W/m <sup>2</sup> ·K)	注
水平圆筒棒, 直径 1 ~ 6cm	9 ~ 13	较大的数值对应较小的直径
紫铜扁平母线, 以狭边直立	6 ~ 9	
复以绝缘漆的生铁或钢表面	10 ~ 14	
瓷质圆柱体浸于油箱中	50 ~ 150	
用纸绝缘的线圈	10 ~ 12.5	
叠片束	10 ~ 1.25	
	70 ~ 90	置于油内
康铜或铜镍合金(丝状或带状)所制的螺旋, 垂直放置	20	相当于导线总表面的 $K_T$
垂直管状烧釉电阻	20	指管状物外表面的 $K_T$
有槽瓷柱体上具有镍铬或康铜丝所缠的线圈	23	指不考虑槽时的圆柱体外表面的 $K_T$
由康铜或镍铬合金丝或所缠线圈制成的成型电阻元件	10 ~ 14	丝状导线的全部表面的 $K_T$
螺旋状生铁电阻	10 ~ 13	指螺旋全部表面的 $K_T$
具有平板外箱的油变阻器	15 ~ 18	指外箱侧表面的 $K_T$



#### 四、电气设备动稳定和热稳定校验

##### 1. 电气设备动稳定校验

电气设备动稳定校验的目的是校验短路电流通过电气设备时是否会因电动力而损坏。电气设备满足动稳定的条件是：

$$i_{\max} \geq i_{\text{ch}}^{(3)}$$

式中： $i_{\max}$ ——电动稳定电流，即由制造厂规定的最大允许电流(kA)；

$i_{\text{ch}}^{(3)}$ ——三相短路冲击电流(kA)。

用额定电流为60A及以下的熔断器保护的电气设备，可以不校验动稳定度。

##### 2. 电气设备热稳定校验

电气设备热稳定校验的目的是校验短路电流通过电气设备时是否会使其过热而损坏，甚至烧毁。电气设备满足热稳定的条件是：

$$I_t^2 t_g \geq I_{\infty}^2 t_j$$

式中： $I_t$ ——由制造厂给出的给定时间 $t_g$ 秒内的热稳定电流(kA)；

$t_g$ ——给定时间(s)，通常是1、5或10s；

$I_{\infty}$ ——三相短路电流稳态有效值(kA)；

$t_j$ ——假想时间(s)，根据短路延续时间 $t$ 求得，即 $t = t_b + t_{jd}$ ；

$t_b$ ——装置中故障元件的主要继电保护的動作时间(s)；

$t_{jd}$ ——断路器的断路时间(s)。

当保护装置为速动时，短路延续时间 $t$ 可按以下范围估算；

对于快速及中速动作的断路器 $t = 0.11 \sim 0.16s$

对于低速动作的断路器 $t = 0.18 \sim 0.26s$

当缺乏该断路器分闸时间数据时，可按以下平均值估算；

对于快速及中速动作的断路器 $t = 0.15s$

对于低速动作的断路器  $t = 0.20s$

用熔断器保护的电气设备,可以不校验热稳定度。

### 五、电器接触头压力及接触电阻的计算

#### 1. 电器触头压力的测算

电器触头压力可用弹簧称准确地测定出来(图 7-4)。如果测定值符合按下列公式的计算值,则表明触头压力合适。

$$F_z = 0.221I_c, F_c = 0.5F_z$$

式中:  $F_z$ ——触头终压力(N);

$F_c$ ——触头初压力(N);

$I_c$ ——额定电流(A)。

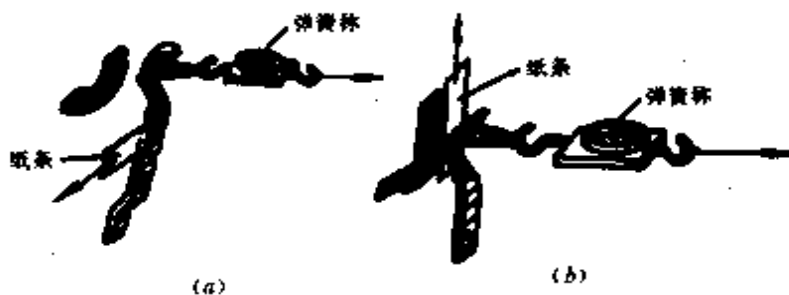


图 7-4 触头初压力和终压力的测定

(a) 初压力测定 (b) 终压力测定

#### 2. 电器触头接触电阻 $R_c$ 的计算

(1) 计算公式:

$$R_c = \frac{K}{(F/9.81)^n} \times 10^{-3}$$

式中:  $K$ ——与触头材料的物理化学性质及接触表面情况有关的系数,见表 7-15;

$n$ ——与接触形式、压力范围和实际接触面的数目等因素有关的指数,对于点接触  $n = 0.5$ ;线接触  $n = 0.7 \sim 0.75$ ;高压下的面接触  $n = 0.8 \sim 1$ ;

$F$ ——接触压力(N)。

上式表明,接触电阻仅与压力、接触形式、材料及表面情况等因素有关,而与触头大小无关。由表 7—15 可知,应力求避免铝铜接触。

表 7—15 系 数  $K$  值

接 触 材 料		$K$
铜—铜	线、面接触	0.08 ~ 0.14
	点 接 触	0.15 ~ 0.19
铜—铜(表面镀锡)		0.07 ~ 0.10
银—银		0.06
铜—银		0.06
铝—铝		0.127
铝—铜		0.98
铝—黄铜		1.95
黄铜—黄铜(清除了氧化层)		0.07
黄铜—铜(清除了氧化层)		0.038

(2) 触头接触电阻随温度的增加而增加的关系:

$$\text{对长期负载 } R_c = R_{c0} \left(1 + \frac{2}{3} \alpha \tau\right)$$

$$\text{对短时负载 } R_c = R_{c0} \left[1 + \frac{1}{5} \ln(1 + \alpha \tau)\right]$$

式中： $R_c$ ——触头在温度上升  $\tau^\circ\text{C}$  时的接触电阻( $\Omega$ )；

$R_{c0}$ ——触头在室温下的接触电阻( $\Omega$ )；

$\alpha$ ——触头材料的电阻温度系数( $1/^\circ\text{C}$ )；

$\tau$ ——触头温升( $^\circ\text{C}$ )。

触头在稳定热状态下，其接触点对表面的最大温升  $\tau$  为

$$\tau = \mu^2 / 8\lambda\rho$$

式中： $\mu$ ——触头电压降(V)

$\lambda$ ——导热系数( $\text{W}/\text{cm} \cdot ^\circ\text{C}$ )；

$\rho$ ——电阻率( $\Omega \cdot \text{cm}$ )。

(3) 常用触头材料的种类与特性：见表 7-16。

## 六、电气设备电流密度的选择

### 1. 母线电流密度的选择

当母线较长，未计及接触电阻所引起的发热及其它原因所引起轴向热传导时，母线的电流密度可按图 7-5 ~ 图 7-7 选择

2. 套管、少油断路器和户内隔离开关电流密度的选择(见表 7-17)。

3. 固定接触连接处的视在电流密度(见表 7-18)。

当固定接触连接处采用其它材料时，视在电流密度的换算

$$j = j_{Cu} \sqrt{\frac{\gamma}{\gamma_{Cu}}}$$

式中： $j_{Cu}$ 、 $j$ ——铜和其它材料时的视在电流密度( $\text{A}/\text{mm}^2$ )；

$\gamma_{Cu}$ 、 $\gamma$ ——铜和其它材料的导电率( $\text{km}/\Omega \cdot \text{mm}^2$ )，见第二章第一节。

当用螺栓连接时，接触面上单位面积的压力及螺栓允许的最大工作力可按表 7-19 选用。

表 7—16 常用触头材料的物理性能

分 类	材料名称及代表符号	密度 (g/cm <sup>3</sup> )	布氏硬度 (MPa)		熔化 温度 (°C)	导热系数 (W/°C·cm)	电阻率 (μΩ·cm) 20°C时	抗弯强度 (MPa)		附 注
			软态	硬态				软 态	硬 态	
纯金属	铜 Cu	8.95	392	804	1083	3.8	1.72	245	431	
	银 Ag	10.50	255		960	4.16	1.60	118~157	637	很少单独使用
复 合 材 料	银钨 Ag-W70	14.80		1765			3.4			
	铜	12.00	1030	1275			3.00	559		
			1128	1569		3.50	588			
	钨	14.00	1569	1961			4.10	637		
			1765	2157		5.20	686			
	银碳化钨 Ag-WC60	12.90					5.5			
合 金	黄铜 H62(硬)	8.60	1373~1471			1.1~1.15	7.1	约 667		化学成分按 重量百分比铍 0.5 ~0.7, 铜 0.1~0.2, 余为铜。用于真空 开关中
	铜铍 CuBe0.7	8.9~9.0	441~510				1.8~2.1	19.6~21.6		

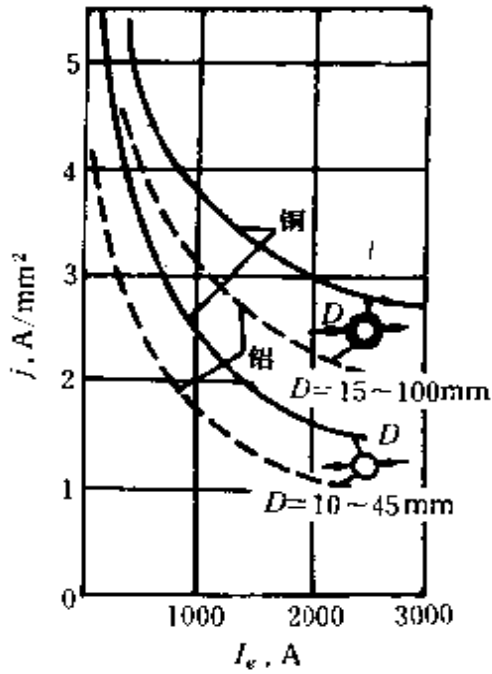


图 7—5 在空气中铜、铝导电杆的电流密度  $j$  与额定电流  $I_e$  关系

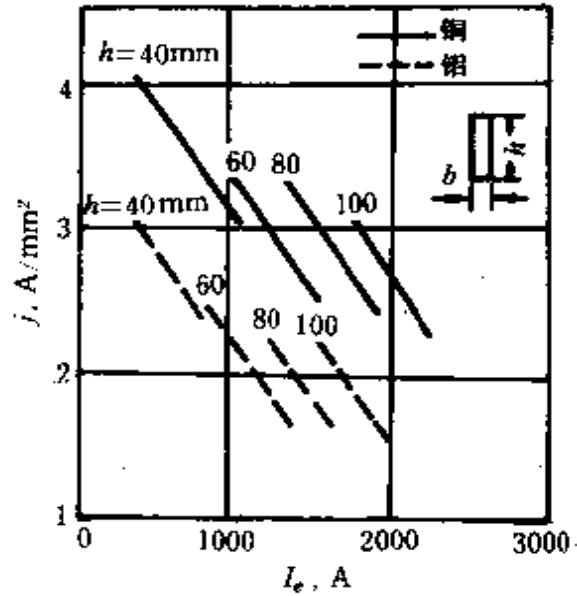


图 7—6 在空气中矩形截面铜、铝母线的电流密度  $j$  与额定电流  $I_e$  关系

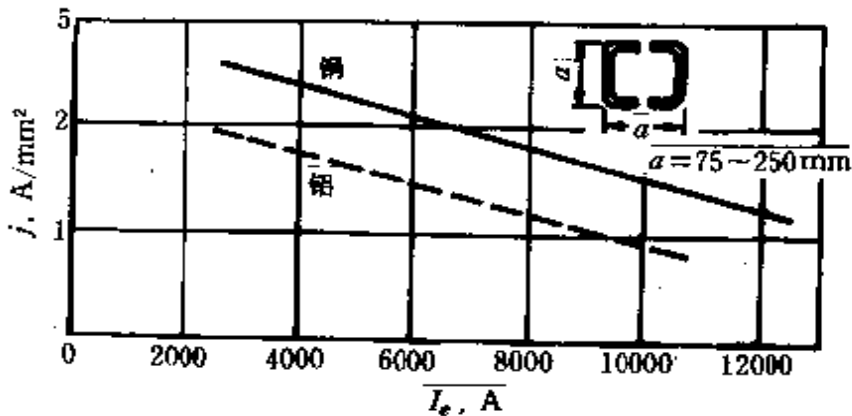


图 7—7 在空气中槽形母线的电流密度  $j$  与额定电流  $I_e$  关系

表 7—17 常用电流密度的参考值

载流导体	材 料	额定电流范围 (A)	电流密度 (A/mm <sup>2</sup> )
在充油套管内的圆截面导体	铜	200 ~ 4000	2.5 ~ 1.5
纯瓷套管内的矩形或圆形截面导体	铜	200 ~ 3000	3.3 ~ 1.5
	铝	200 ~ 3000	2 ~ 1
少油断路器的动触头导电杆	铜或铜镀银	600 ~ 1250	3.3 ~ 2.4 <sup>①</sup>
	铜包银	1500 ~ 2000	4 ~ 3 <sup>②</sup>
户内隔离开关的动触头闸刀	铜	400 ~ 1000	2.2 ~ 1.8 <sup>③</sup>
		> 1000 ~ 2000	1.8 ~ 1.1 <sup>③</sup>

- ① 当电器内部发热量较小,而油温较低时,可选较大电流密度。
- ② 可选用较高的电流密度,但应加导电杆的轴向热传导及触头的散热能力。
- ③ 表中所列为触头部分的电流密度,导电杆可比此数值增大 30%。

表 7—18 固定接触连接所选用的视在电流密度


额定电流 I (A)	固定接触连接(铜—铜,面接触)处的视在电流密度 $j_{Cu}$ (A/mm <sup>2</sup> )	图 例
< 200	0.31	 <p>视在接触面积  <math display="block">S = \frac{I}{j_{Cu}} = bl(\text{mm}^2)</math></p>
200 ~ 2000	$0.31 - 1.65(I - 200) \times 10^{-4}$	
> 2000	0.12	

表 7—19 固定接触连接处,单位视在接触面所选用的压力及螺栓允许的最大工作力

接触连接材料	铜(搪锡)	铜、黄铜、青铜 (未搪锡)	铝	铜(搪锡)	铜(未搪锡)
压 力 (MPa)	4.90 ~ 9.81	5.88 ~ 11.77	24.52	9.81 ~ 14.71	58.84
螺 栓 规 格		M8	M10	M12	M16
最大工作力 (N)	材料 A3	4119	6619	9561	19221
	材料 A4	4413	7257	10444	20300

### 七、电气设备的绝缘、绝缘材料及有关计算

#### 1. 配电装置带电体间的最小空气绝缘距离

屋内、外配电装置的允许距离见表 7—20。

表 7—20 屋内、外配电装置的允许距离(cm)

屋 外 配 电 装 置							
额定电压(kV)	10 及以下	20	35	60	110	154	220
1. 不同相的导体间及带电部分至接地部分间(A)	20	30	40	60	100	140	200
2. 带电部分至网状遮栏	25	30	40	60	100	140	200
3. 带电部分至栅栏(B)	100	100	100	125	175	200	250
4. 无遮栏裸导体至地面高度	300	300	300	325	375	460	450
5. 需要不同时停电检修的无遮栏裸导体间:							
① 水平距离	200	200	200	250	300	350	400
② 垂直距离	100	100	100	125	175	200	250



(续表)

屋 内 配 电 装 置							
额定电压(kV)	1~3	6	10	20	35	60	110
1. 不同相的导体间及带电部分至接地部分间	2.5	10	12.5	18	29	46	80
2. 带电部分至无孔遮栏	10.5	13	15.5	21	32	49	83
3. 带电部分至网状遮栏	17.5	20	22.5	28	39	56	90
4. 带电部分至栅栏	50	50	50	70	80	100	130
5. 无遮栏裸导体至地(楼)板高度	250	250	250	275	275	300	350
6. 需要不同时停电检修的无遮栏裸导体间	200	200	200	220	220	250	300
7. 架空线至地面	450	450	450	475	475	550	550
8. 架空线至屋顶	275	275	275	275	275	375	375

## 2. 绝缘电阻最低安全值

电气设备的绝缘好坏,关系到其能否安全可靠运行。电气设备绝缘电阻最低安全值如下:

(1) 即  $1M\Omega$  的定则(经验判断法):据实践经验认为:1000V 以下的工业电气设备可以用  $1M\Omega$  的定则为绝缘电阻的最低允许值。额定电压在 1000V 以上的设备,  $1M\Omega$  的定则可解释为“最低每 1000V 不得低于  $1M\Omega$ ”。

(2) 旋转交流电机:

① 1000kVA 以上的旋转交流电机:最低安全绝缘电阻允许值见图 7—8。这些曲线的计算公式为

$$R_1 = K_s K_a \frac{U_e + 3600}{\frac{S_e}{30} + 200}$$

式中:  $R_1$ ——定子绕组的最低安全绝缘电阻(M $\Omega$ ),以 500V 兆欧表加压 1min 后所测得的数值(测量是将所有额

- 定电压相同的线圈连接在一起而进行的)；
- $U_e$ ——电机的额定电压(V)，图中所示为13.8kV的交流电机。对于其它额定电压的电机， $R_i$ 的数值应以图中左上角曲线所示的电压修正系数乘之；
- $S_e$ ——电机的额定视在功率(kVA)；
- $K_v$ ——电机的速度系数，图中曲线5已将此系数考虑在内；
- $K_i$ ——绝缘等级系数，图中所示均为B级绝缘， $K_i = 1$ ，如为A级绝缘则  $K_i = 0.1$ ；
- $\alpha$ ——绕组温度系数，绘于图右上角如A及B所示(曲线A系用于复合绝缘的电机)。

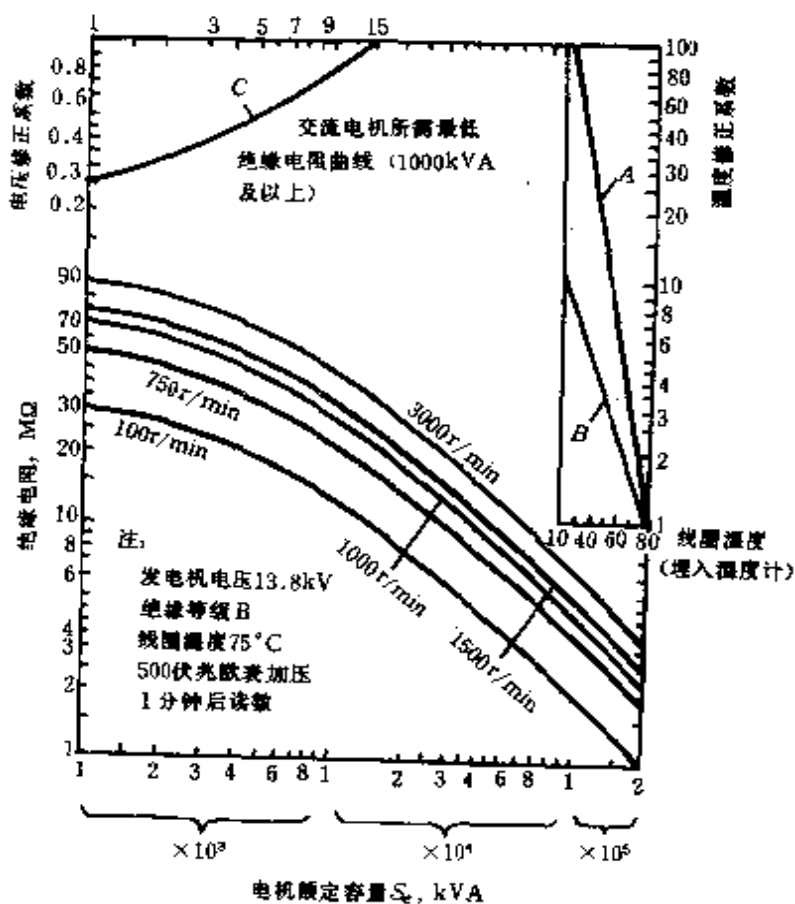


图 7—8 旋转交流电机最低安全绝缘电阻判断标准

② 1000kVA 以下的旋转交流电机;可用下式计算:

$$R = \frac{U_e + 1000}{1000}$$

式中: $R$ ——最低绝缘电阻(M $\Omega$ ),用 500V 兆欧表加压 1min 后的测定值;

$U_e$ ——电机的额定电压(V)。

(3) 旋转直流电机:其绝缘电阻通常会低于交流电机。其电枢最低绝缘电阻可按下式计算:

$$R = 30 \frac{n_e + 300}{P_e + 1000}$$

式中: $R$ ——电枢最低绝缘电阻(M $\Omega$ ),用 500V 兆欧表加压 1min 后的测定值,绕组温度为 20 $^{\circ}$ C;

$n_e$ ——电机额定转速(r/min);

$P_e$ ——电机额定功率(kW)。

(4) 变压器:油浸式变压器或电压调整器的绝缘电阻受绝缘油的情况影响非常明显。如无可靠数据时,可按下式估算:

$$R = \frac{CU_e}{\sqrt{S_e}}$$

式中: $R$ ——绕组对地或绕组对绕组的最低绝缘电阻(M $\Omega$ );

$C$ ——以 20 $^{\circ}$ C 为测量标准温度时的系数,对有油枕的油浸变压器  $C = 1.5$ ;对于干式或沥青胶充填的变压器  $C = 30$ ;

$U_e$ ——变压器绕组的额定电压(V);

$S_e$ ——变压器的额定容量(kVA)。

上式适用于单相变压器,若为三相变压器三相绕组同时测量时,则公式中的  $U_e$  为每一相绕组的额定电压,即在三角形接法中用相间电压,在星形接法中用相电压。

注意:通常所测得某一绕组对地(不测量的绕组接地)的绝

缘电阻较用上述求得的数值为小,这是由于上式计算的绝缘电阻是在变压器的绝缘油为无水份、无酸、无油垢且套管及接头均处于良好的状态下的值。

(5) 套管:户外油开关等的套管(连绝缘配件在内)应具有10000MΩ以上(20°C时)的绝缘电阻值,才能可靠运行。测量时,油箱内的绝缘油质应良好,套管引线拆开,套管上部瓷裙擦试干净,并且兆欧表“G”的屏蔽线应接好。

### 3. 绝缘的吸收比要求

绝缘(介质)的吸收比,能反映设备绝缘的好坏。通常可用手摇型兆欧表或电动型兆欧表测试。

(1) 用手摇型兆欧表测试:按正常方法连接好测试线路,连续摇转兆欧表1min,记录15s与60s的绝缘电阻值,两者读数之比( $R_{60}/R_{15}$ ),即为介质吸收比。吸收比越大说明被测设备的绝缘越好。通常吸收比( $R_{60}/R_{15}$ )大于1.3时,表示电机没有严重受潮情况。

(2) 用电动型兆欧表测试:连续摇转10min,记录1min与10min的读数。对于大容量且重要的电机,可每分钟记录一次,以便绘成介质吸收比曲线。

(3) 测量结果的判断:若在测量过程中绝缘电阻有明显增加,则表示被测设备绝缘性能良好;若在测量过程中绝缘电阻增加甚微或没有增加,则表示设备绝缘劣化或受潮、不清洁。表7—21所列吸收比可用于判别一般绝缘物受潮或积垢等情况时参考。

温度对吸收比略有影响,温度升高,吸收比会有所下降。因此测取吸收比宜在10~40°C温度范围内。

表 7—21 介质吸收比所示的绝缘情况

绝 缘 情 况	$R_{60^{\circ}}/R_{15^{\circ}}$ (手摇型)	$R_{10^{\circ}}/R_{1^{\circ}}$ (电动型)
不 良	1.1 以下	1.5 以下
可 疑	1.1 ~ 1.3	1.5 ~ 2
尚 佳	1.3 ~ 1.6	2 ~ 3
良 好	1.6 ~ 2	3 ~ 4
优 越	2 以上	4 以上

变压器绕组的绝缘电阻没有规定最低允许值。对投入运行前的变压器，绕组的绝缘电阻应不低于制造厂所测值的70%（换算到同一温度时）。一般来说，绝缘良好的变压器在温度为10~40℃时  $R_{60^{\circ}}/R_{15^{\circ}} \geq 1.3$ 。

测量时变压器的温度与上次测量时记录的温度不相同，则应换算到同一温度后再作比较。换算系数  $K_R$  列于表 7—21。

表 7—22  $K_R$  值与温差关系

温度差, $t_2 - t_1$ (°C)	5	10	15	20	25	30	35
( $K_R$ )	1.2	1.5	1.8	2.3	2.8	3.4	4.1

例如， $R_{60^{\circ}}$  为 520MΩ，前一次测量温度为 30℃，后一次测量温度为 20℃，则二次测量的温差为  $t_2 - t_1 = 30 - 20 = 10^{\circ}\text{C}$ ，由表 7—22 查得  $K_R = 1.5$ ， $R_{60^{\circ}}$  换算到 20℃ 时的绝缘电阻应为  $520 \times 1.5 = 780\text{M}\Omega$ 。

#### 4. 绝缘体介质损失角正切值的要求

绝缘体介质损失角的正切值  $\text{tg}\delta$ ，是判断绝缘情况比较灵敏的一种方法。 $\text{tg}\delta$  的意义：一个完全的介质（绝缘体）在加入交流电压时，其充电电流  $I_C$  超前，与外加电压  $U$  成直角相位差。实际的绝缘体并非理想的绝缘体，因此，除充电电流外尚有损失电流

$I_c$  存在, 损失电流与外加电压是同相位的, 其相互关系如图 7—9 所示。

由图 7—9 可知,  $I_c = U\omega C, I_r = U/R$ , 则  
介质损失角正切为

$$\operatorname{tg}\delta = \frac{I_r}{I_c} = \frac{1}{\omega CR}$$

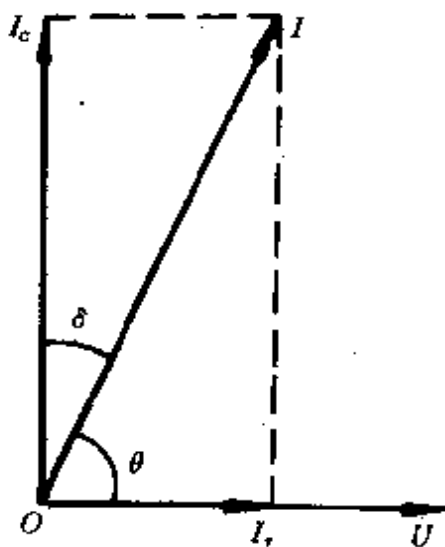


图 7—9 介质中电流电压矢量图

损失功率为

$$P = UI_r = U^2\omega C \operatorname{tg}\delta$$

若在该试验电压与频率下已知电流值  $I$ , 则可依照下列关系求出电容量

$$C = I \sin\theta / U\omega \approx I / U\omega$$

或由介质损失角的正切值求取  $C$  值:

$$C = \frac{1}{\omega R \operatorname{tg}\delta}$$

表 7—23 为一些电气设备的绝缘  $\operatorname{tg}\delta$  参考值, 该数值在试验时作为粗略的指示范围是很有用处的。

表 7—24 为一些绝缘物质的相对介电常数  $K$  与频率为 50Hz 的  $\text{tg}\delta$ 。

### 5. 绝缘材料的耐热等级及允许温升

(1) 绝缘材料的耐热等级：按国家标准，分成七级，即 Y、A、E、B、F、H、C 等级。各级绝缘材料的最高允许温升列于表 7—25。

表 7—23 一些电气设备的绝缘  $\text{tg}\delta$  参考值

电 气 设 备	在 20°C 时的绝缘 $\text{tg}\delta$ 百分比不超过下列数值
充 油 式 变 压 器	
110kV 及以上	2.5
35 ~ 100kV	3.5
35kV 及以下	4.5
油 断 路 器	0.5 ~ 2.0
电 压 互 感 器	
35kV 以上	2.5
35kV 及以下	3.5
电 流 互 感 器	
110kV ~ 220kV	2.0
35kV 及以下	2.5
套 管	
充油或胶纸式	
110kV 及以上	2.0
35kV 及以下	3.0
油浸纸电容式	1.0
充 胶 式	2.0
胶纸充胶或充油式	
220kV 及以上	1.5
110kV	2.0
35kV 及以上	2.5
电 容 器	0.5



表 7—24 一些物质的相对介电常数  $K$  与频率为 50Hz 的  $\text{tg}\delta$

物 质 名 称	$K$	在 20°C 时的 $\text{tg}\delta$ 百分比
空 气	1.0	0
油	2.2	0.5
纸	4.3	0.5
瓷	5.8	2.0
天然橡胶	2.7	0.003
水	81	100

表 7—25 绝缘材料的耐热等级及允许温升

绝缘等级	允许温度 (°C)	允 许 温 升 (°C)	
		用电阻法测量的 电压线圈的平均 温升	用温度计或热偶法测量的 线圈表面温升或密接绝缘 体的导体、金属件的温升
Y	90	70	50
A	105	85	65
E	120	100	80
B	130	110	90
F	155	135	115
H	180	160	140
C	> 180	> 160	> 140

注：环境温度以 40°C 为基准。

① Y 级绝缘材料：未浸渍的棉纱、丝、纸等天然有机纤维，再生纤维素，苯胺树脂，尿素树脂，及其它经过试验能用在此温度范围内的各种材料。

② A 级绝缘材料：浸渍过的棉纱、丝、纸等天然有机纤维、漆纸、漆布、纤维素醋酸盐、塑料片，漆包线用聚酰胺，聚乙烯醇缩甲醛，及其它经过试验能用在此温度范围内的各种材料。

③ E 级绝缘材料：漆包线用聚氨基甲酸酯和环氧树脂、纤



纤维素三醋酸盐、苯二甲酸聚乙烯介质,及其它经过试验能用在此温度范围内的各种材料。

④ B级绝缘材料:玻璃纤维、石棉、紫虫胶、沥青、油改性合成树脂、云母与合成树脂的组材料,及其它经过试验能用在此温度范围内的各种材料。

⑤ F级绝缘材料:玻璃纤维、石棉、云母与耐热性好的合成树脂的组材料,及其它经过试验能用在此温度范围内的各种材料。

⑥ H级绝缘材料:玻璃纤维、石棉、云母与硅树脂的组材料,硅橡胶,及其它经过试验能用在此温度范围内的各种材料。

⑦ C级绝缘材料:单独使用的云母、陶瓷、玻璃、石英等,或者与类似胶的无机粘合剂组合构成的材料,及其它一切经过试验能用于高于H级绝缘温度范围的各种材料。

绝缘材料的允许温升是电器产品最基本的质量指标之一。

(2) 电器产品部件允许温升:见表7—26。

该表为日本工业标准对触头、内部电连接零部件、接线端子等允许温升的规定值,供参考。这些规定值与IEC有关标准大致相当。

### 6. 绝缘材料寿命与温度的关系

绝缘材料寿命与温度的关系可以用蒙托辛格氏(Montsinger)法则说明:

$$\tau = Ae^{-mt}$$

式中: $\tau$ ——绝缘材料寿命(年);

$A, m$ ——由材料决定的系数;

$t$ ——温度( $^{\circ}\text{C}$ )。

蒙托辛格氏在1930年以棉漆布(A级绝缘材料)的抗张强度为基准进行实验,测其温度与寿命的关系,依上述实验公式

表 7-26 电器产品部件允许温升

零部件材料及情况			允许温升(°C)	
			工业用电器	家用电器
触头	自力式 铜基合金		40、45	25、30、35
	他力式	铜及铜基合金	长期工作制	30、40、45
			8小时工作制	65
		银及银基合金、镀银		65、75
内部电连接	螺钉螺栓紧固	铜及铜基合金	50	—
		铜及铜基合金镀银、镀锡、镀镍	65	—
	弹 簧 压 紧	铜及铜基合金	45	—
		铜及铜基合金镀锡或镀镍	55	—
		铜及铜基合金镀银	65	—
	与熔断器连接的部分		60	50
接线端	与绝缘导线连接		65	30、50
	铜及铜基合金		50	40
	铜及铜基合金镀锡、镀镍或镀银		65	—
与绝缘零部件接触的导体或金属件			以绝缘材料的允许温升为限	
手动操作部件	金 属 的		15	—
	绝 缘 的		30	—
电器附属的电阻元件			180	—
油浸式电器	油 面		60	—
	与油接触的零部件		65	—

可知,寿命减为一半,则其温度差  $\Delta t$  为

$$\Delta t = \frac{0.693}{m}$$

由实验得  $m = 0.088$ , 则  $\Delta t \approx 8^{\circ}\text{C}$ , 这就是一般称为 A 级绝缘材料的  $8^{\circ}\text{C}$  法则。即当温度上升  $8^{\circ}\text{C}$  时其寿命减低为原来的一半。由各种绝缘材料的实验证明, 结果一致。手工纸、压纸板也在  $8^{\circ}\text{C}$  附近, 其抗张强度及各种机械特性与  $8^{\circ}\text{C}$  法则一致。

B 级绝缘材料  $\Delta t$  为  $10^{\circ}\text{C}$ ;

H 级绝缘材料  $\Delta t$  为  $12^{\circ}\text{C}$ 。

### 八、母线选择及计算

配电装置的母线截面是按经济电流密度或按正常工作时的最大长期负荷电流选择, 并按短路条件校验其热稳定性和机械强度。

#### 1. 母线选择的计算:

##### (1) 按持续工作电流选择:

$$I_{\text{ux}} \geq I_g$$

式中:  $I_{\text{ux}}$ —— 相应于某一周围环境温度与母线放置方式下, 长期允许的电流值(A), 见表 7—27 和表 7—28;

$I_g$ —— 工作电流(A), 对于发电机电路,  $I_g = 1.05I_{\text{ef}}$  ( $I_{\text{ef}}$  为发电机额定电流); 对于电力变压器,  $I_g = (1.3 \sim 1.4)I_{\text{eb}}$  ( $I_{\text{eb}}$  为变压器额定电流)。

当实际环境温度不是  $25^{\circ}\text{C}$  时, 应乘以温度校正系数  $K$ , 当母线接头为螺栓连接时, 可由表 7—29 查得; 当母线接头是利用超声波搪锡搭接时, 其载流能力可比螺栓连接增加 13%。

表 7—27 单条矩形母线载流量

母线截面 (mm <sup>2</sup> )	最大允许持续电流(A)					
	25°C		35°C		40°C	
	平放	竖放	平放	竖放	平放	竖放

铝母线 LMY

15 × 3	156	165	138	135	127	134
20 × 3	204	215	180	190	166	175
25 × 3	252	265	219	230	204	215
30 × 4	347	365	309	325	285	300
40 × 4	456	480	404	425	375	395
40 × 5	518	540	452	475	418	440
50 × 5	632	665	556	585	518	545
50 × 6	703	740	617	650	570	600
60 × 6	826	870	731	770	680	715
60 × 8	975	1025	855	900	788	830
60 × 10	1100	1155	960	1010	890	935
80 × 6	1050	1150	930	1010	860	935
80 × 8	1215	1320	1060	1155	985	1070
80 × 10	1360	1480	1190	1295	1105	1200
100 × 6	1310	1425	1160	1260	1070	1160
100 × 8	1495	1625	1310	1425	1210	1315
100 × 10	1675	1820	1470	1595	1360	1475
120 × 8	1750	1900	1530	1675	1420	1550
120 × 10	1905	2070	1685	1830	1620	1760

(续表)

母线截面 (mm <sup>2</sup> )	最大允许持续电流(A)					
	25°C		35°C		40°C	
	平放	竖放	平放	竖放	平放	竖放

铜母线 TMY

15 × 3	200	210	176	185	162	171
20 × 3	261	275	233	245	214	225
25 × 3	323	340	285	300	271	285
30 × 4	451	475	394	415	366	385
40 × 4	593	625	522	550	484	510
40 × 5	665	700	588	551	551	580
50 × 5	816	860	721	760	669	705
50 × 6	906	955	797	840	735	775
60 × 6	1069	1125	940	990	873	920
60 × 8	1251	1320	1101	1160	1016	1070
60 × 10	1395	1475	1230	1295	1133	1195
80 × 6	1360	1480	1195	1300	1110	1205
80 × 8	1553	1690	1361	1480	1260	1370
80 × 10	1747	1900	1531	1665	1417	1540
100 × 6	1665	1810	1557	1592	1356	1475
100 × 8	1911	2080	1674	1820	1546	1685
100 × 10	2121	2310	1865	2025	1720	1870
120 × 8	2210	2400	1940	2110	1800	1955
120 × 10	2435	2650	2152	2340	1996	2170

(续表)

母线截面 (mm <sup>2</sup> )	最大允许持续电流(A)					
	25°C		35°C		40°C	
	平放	竖放	平放	竖放	平放	竖放

钢母线 TMY

20 × 3	62	65	52	55	48	50
25 × 3	76	80	67	70	62	65
30 × 3	90	95	76	80	71	75
40 × 3	119	125	104	110	95	100
50 × 3	147	155	128	135	119	125
60 × 3	176	185	152	160	138	145
70 × 3	204	215	176	185	161	170
80 × 3	233	245	199	210	180	190
90 × 3	253	275	223	242	206	224
100 × 3	281	305	246	268	229	249
20 × 4	67	70	59	52	54	57
25 × 4	81	85	71	75	65	69
30 × 4	95	100	81	85	76	80
40 × 4	124	130	104	110	100	105
50 × 4	157	165	133	140	124	130
60 × 4	185	195	157	165	147	155
70 × 4	207	225	179	195	166	180
80 × 4	240	260	202	220	189	205
90 × 4	267	290	230	250	212	230
100 × 4	295	320	253	275	234	255

表 7—28 多条矩形母线载流量

母线截面 (mm <sup>2</sup> )	最大允许持续电流(A)					
	25°C		35°C		40°C	
	平放	竖放	平放	竖放	平放	竖放
铝母线 LMY						
2(60 × 6)	1282	1350	1126	1185	1035	1090
2(60 × 8)	1596	1680	1460	1480	1291	1360
2(60 × 10)	1910	2010	1682	1770	1558	1640
2(80 × 6)	1500	1630	1320	1433	1222	1330
2(80 × 8)	1876	2040	1651	1795	1520	1650
2(80 × 10)	2237	2410	1950	2120	1809	1965
2(100 × 6)	1780	1935	1564	1700	1450	1578
2(100 × 8)	2200	2390	1930	2100	1794	1950
2(100 × 10)	2630	2860	2300	2500	2130	2315
2(120 × 8)	2440	2650	2140	2330	1985	2160
2(120 × 10)	2945	3200	2615	2840	2410	2620
3(60 × 6)	1582	1720	1390	1510	1280	1390
3(60 × 8)	2005	2180	1766	1920	1624	1765
3(60 × 10)	2520	2650	2215	2330	2050	2160
3(80 × 6)	1930	2100	1695	1845	1575	1712
3(80 × 8)	2410	2620	2118	2300	1970	2140
3(80 × 10)	2870	3120	2530	2725	2330	2530
3(100 × 6)	2300	2500	2030	2200	1880	2040
3(100 × 8)	2800	3050	2480	2680	2290	2490
3(100 × 10)	3350	3640	2935	3190	2715	2950
3(120 × 8)	3110	3380	2730	2970	2530	2750
3(120 × 10)	3770	4100	3320	3610	3090	3350
4(100 × 10)	3820	4150	2260	3650	3130	3400
4(120 × 10)	4275	4650	3765	4090	3505	3810

(续表)

母线截面 (mm <sup>2</sup> )	最大允许持续电流(A)					
	25°C		35°C		40°C	
	平放	竖放	平放	竖放	平放	竖放

铜母线 TMY

2(60 × 6)	1650	1740	1452	1530	1340	1410
2(60 × 8)	2050	2160	1503	1900	1660	1750
2(60 × 10)	2430	2560	2140	2250	1985	2090
2(80 × 6)	1940	2110	1705	1855	1580	1720
2(80 × 8)	2410	2620	2117	2515	1950	2120
2(80 × 10)	2850	3100	2575	2735	2345	2550
2(100 × 6)	2270	2470	2000	2170	1855	2015
2(100 × 8)	2810	3060	2470	2690	2290	2490
2(100 × 10)	3320	3610	2935	3185	2735	2970
2(120 × 8)	3130	3400	2750	2995	2550	2770
2(120 × 10)	3770	4100	3330	3620	3090	3360
3(60 × 6)	2060	2240	1810	1970	1670	1815
3(60 × 8)	2565	2790	2255	2450	2080	2260
3(60 × 10)	3135	3300	2750	2900	2560	2690
3(80 × 6)	2500	2720	2200	2390	2040	2215
3(80 × 8)	3100	3370	2730	2970	2530	2750
3(80 × 10)	3670	3990	3230	3510	2990	3250
3(100 × 6)	2920	3170	2565	2790	2370	2580
3(100 × 8)	3620	3930	3180	3460	2945	3200
3(100 × 10)	4280	4650	3735	4060	3450	3750
3(120 × 8)	3995	4340	3515	3820	3260	3540
3(120 × 10)	4780	5200	4230	4600	3920	4260
4(100 × 10)	4875	5300	4290	4670	4000	4350
4(120 × 10)	5430	5900	4770	5190	4450	4840



表 7—29 温度校正系数  $K_t$  值

实际环境温度 (°C)	母线最高允许温度为 70°C					
	-5	0	5	10	15	20
$K_t$	1.29	1.24	1.20	1.15	1.11	1.05

实际环境温度 (°C)	母线最高允许温度为 70°C					
	25	30	35	40	45	50
$K_t$	1.00	0.94	0.88	0.81	0.74	0.67

(2) 按经济电流密度选择:

$$S = I_g / j_e$$

式中:  $S$ ——经济截面 ( $\text{mm}^2$ );

$j_e$ ——经济电流密度 ( $\text{A}/\text{mm}^2$ ), 1956 年电力部颁发的经济电流密度, 见表 2—39;

$I_g$ ——同前。

(3) 按电晕电压校验: 对 35kV 及以上电压的母线应按电晕电压校验:

$$U_{ij} \geq U_g$$

式中:  $U_{ij}$ ——临界电晕电压 (kV),

$$U_{ij} = 84K m_r \delta r \left( 1 + \frac{0.301}{\sqrt{\delta r}} \right) \lg \frac{a}{r}$$

$K$ ——三相导线等边三角布置时为 1; 水平布置时为 0.96;

$m_r$ ——导线表面粗糙系数, 管形母线及单股导线  $m_r = 0.98 \sim 0.93$ ; 多股绞线  $m_r = 0.87 \sim 0.83$ ;

$\delta$ ——空气相对密度, 见表 7—30;

$r$ ——导线半径(cm),矩形母线为四个角的曲率半径;  
 $a$ ——相间距离(cm);  
 $U_g$ ——工作电压(kV)。

表 7—30 不同海拔高度的  $\delta$  值

海拔高度(m)	$\delta$	海拔高度(m)	$\delta$
100	1.000	1600	0.833
200	0.977	1800	0.814
400	0.955	2000	0.796
600	0.933	2200	0.778
800	0.912	2400	0.760
1000	0.892	2600	0.742
1200	0.872	2800	0.725
1400	0.852	3000	0.709

注:表中  $\delta$  值按海平面处标准气温 25°C,海拔每增加 100m 温度减少 0.5°C 计。

(4) 按短路热稳定校验:

$$S \geq \frac{I_{\infty}}{C} \sqrt{t_j K_{jf}}$$

式中: $S$ ——所选导体截面(mm<sup>2</sup>);

$C$ ——与导线材料及发热温度有关的系数,见表 7—31;

$K_{jf}$ ——集肤效应系数,可由表 7—32 查得。

表 7—31 系数 C 值

母线材料		最大允许温度(°C)	C 值
铜		320	175
铝		220	97
铜	不直接与设备连接	420	66
	直接与设备连接	320	62

表 7—32 矩形母线集肤效应系数  $K_{jf}$  值

母线截面 (mm <sup>2</sup> )	$K_{jf}$		母线截面 (mm <sup>2</sup> )	$K_{jf}$	
	铜	铝		铜	铝
60 × 6	≈ 1	≈ 1	2(80 × 10)	1.3	1.14
60 × 8			2(100 × 8)	1.3	1.14
60 × 10			2(100 × 10)	1.42	1.2
80 × 6	2(120 × 10)		1.42	1.24	
80 × 8	1.1		3(80 × 8)	1.44	1.22
80 × 10	1.14	3(100 × 10)	1.6	1.28	
100 × 6	1.1	3(100 × 8)	1.5	1.28	
100 × 8	1.14	3(100 × 10)	1.7	1.4	
100 × 10	1.14	1.1	3(120 × 10)	1.78	1.47
120 × 10	1.18	1.1	4(100 × 10)	2.0	1.62
2(80 × 6)	1.15	1.1			
2(80 × 8)	1.27	1.12	4(120 × 10)	2.1	1.7

(5) 按短路动稳定校验:

$$\sigma_{ux} \geq \sigma$$

式中:  $\sigma_{ux}$ ——母线允许应力(Pa), 铜为 137MPa, 铝为 49 ~ 69MPa, 钢为 98MPa;

$\sigma$ ——短路时母线中的应力(Pa)。

① 单条母线的机械应力: 三相母线位于同一平面时, 母线中产生的最大机械应力为

$$\sigma = 172.6 \frac{l^2}{aW} i_{ch}^2 \beta$$

式中:  $i_{ch}$ ——短路冲击电流(kA);

$l$ ——跨距(cm);

$a$ ——相间距离(cm);

$W$ ——母线截面系数(cm<sup>3</sup>), 可按表 7—33 中的公式计算;

$\beta$ ——振动系数, 对于一般母线,  $\beta \approx 1$ , 对于重要母线, 如大型变电站和发电厂母线, 需计算确定。

② 多片矩形母线的机械应力:

$$\sigma = \sigma_{x-x} + \sigma_x, \sigma_x = \frac{F_x l_c^2}{2hb^2}$$

$$\text{每相两片时 } F_x = 225\lambda \frac{i_{ch}^2}{b}$$

$$\text{每相三片时 } F_x = 80.4(\lambda_{12} + \lambda_{13}) \frac{i_{ch}^2}{b}$$

式中:  $\sigma_{x-x}$ ——相间作用应力(Pa), 其计算公式同单条母线;

$\sigma_x$ ——同相各条母线间相互作用应力(Pa);


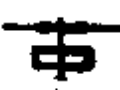




$l_c$ ——衬垫中心线间距离(cm);

$h, b$ ——矩形母线宽度和厚度(cm);

$F_x$ —— 母线片间作用力(Pa);

$\lambda$ —— 母线形状系数(角码 12、13 分别指第 1、2 片和第 1、3 片母线),可由图 7—10 中查得。

表 7—33 不同形状和布置的矩形母线的截面系数  $W$  值

母线布置方式及其截面形状	截 面 系 数 $W$
	0.167bh <sup>2</sup>
	0.167hb <sup>2</sup>
	0.333bh <sup>2</sup>
	1.44hb <sup>2</sup>
	0.5bh <sup>2</sup>
	3.3hb <sup>2</sup>

## 2. 母线损耗计算

主要有变压器低压侧出线及变电所配电母线的损耗。

由于母线的电阻和电抗计算较复杂,为方便起见,常用母线的电阻和电抗可查附录 7。

- (1) 三相制母线损耗计算:

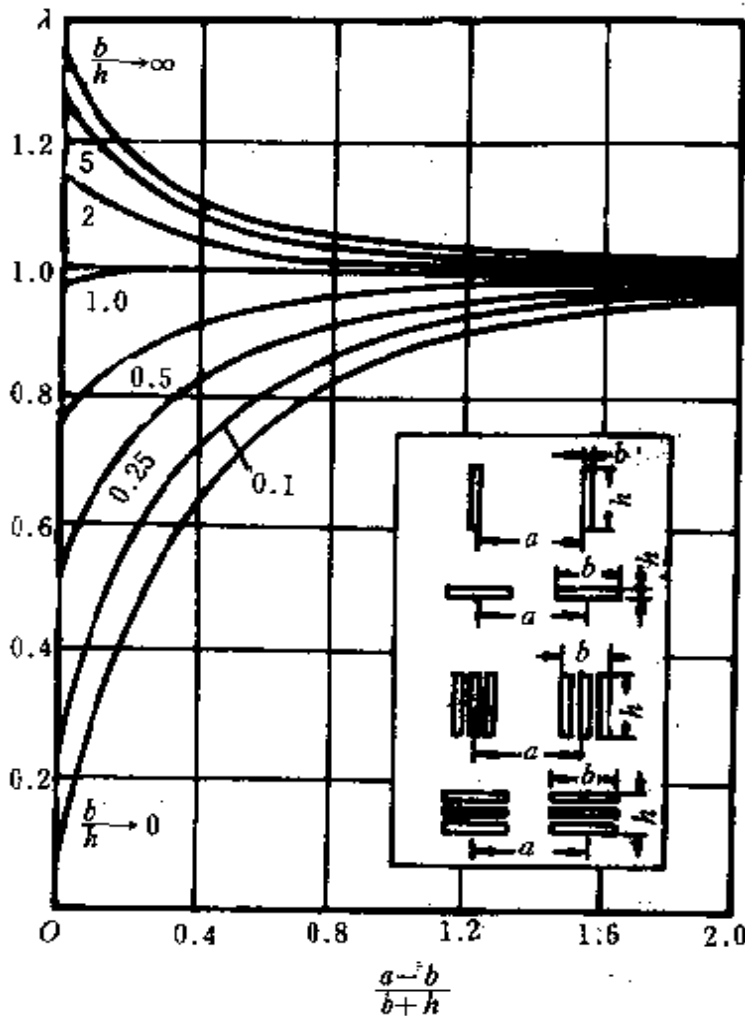


图 7-10 矩形截面母线的形状

有功损耗  $P = 3I_{jf}^2 R \times 10^{-3}$

无功损耗  $Q = 3I_{jf}^2 X \times 10^{-3}$

$$I_{jf} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (I_{Ai} + I_{Bi} + I_{Ci})^2}{3n}}$$

式中： $P$ 、 $Q$ —— 母线有功损耗和无功损耗(kW、kVar)；

$I_{jf}$ —— 三条相线中电流均方根值(A)；

$n$ ——测试次数；

$R, X$ ——母线的电阻和电抗( $\Omega$ )。

(2) 三相四线制母线线损计算：

① 三相负荷完全对称，则零线中无电流，线损计算方法与三相三线制完全一样。

② 三相负荷不平衡，零线电流较大，则四条线路应分开计算，即：

$$P = [(I_{A_{jf}}^2 + I_{B_{jf}}^2 + I_{C_{jf}}^2)R + I_{0_{jf}}^2 R_0] \times 10^{-3}$$

也可按下式计算：

$$P = (3I_{jf}^2 R + I_{0_{jf}}^2 R_0) \times 10^{-3}$$

式中  $I_{A_{jf}}, I_{B_{jf}}, I_{C_{jf}}$ ——分别为 A、B、C 相线中电流均方根值(A)；

$I_{0_{jf}}$ ——零线中电流均方根值(A)；

$R_0$ ——零线等值电阻( $\Omega$ )。

$I_{jf}$ ——三条相线中电流均方根值(A)，求法同三相制母线情况。

单位长度的相—零回路电抗可查表或按下式计算：

$$x_0 = 0.145 \lg \frac{D_{x0}}{r_x} + 0.145 \lg \frac{D_{x0}}{r_0}$$

式中： $D_{x0}$ ——三相四线制“相—零”回路的几何均距(cm)， $D_{x0} = \sqrt[3]{D_{A0} D_{B0} D_{C0}}$ ， $D_{A0}, D_{B0}, D_{C0}$ 分别为三根相线距零线的距离(cm)；

$r_x$ ——相线的有效半径(cm)；

$r_0$ ——零线的有效半径(cm)。

对于圆导线  $r_x, r_0 \approx 0.39d$  ( $d$  为导线直径)；

对于矩形母线  $r_x, r_0 = 0.2236(a+b)$  ( $a, b$  为矩形母线的宽和厚)；

对于角钢  $r_0 = 0.0886c + 0.177h$  ( $c, h$  为其宽和厚)。

设三相四线制母线长为  $l$ , 则“相—零”回路电抗为

$$X = x_0 l$$

无功损耗为

$$Q = 3I_{\Sigma}^2 X \times 10^{-3}$$

## 2. 母线受力计算

(1) 两母线之间的电动力的一般计算公式:

$$F = k_c \lambda i_1 i_2 \times 10^{-7}$$

式中:  $F$ ——两母线之间的电动力(N);

$i_1, i_2$ ——母线1及2通过的电流(A), 在交流电路里  $i$  为瞬时值;

$k_c$ ——母线1与2间的回路系数, 见表7—34;

$\lambda$ ——形状系数, 见图7—10, 当母线截面的周长与母线间的距离相比甚小, 如  $\frac{a-b}{b+h} > 2$  时,  $\lambda \approx 1$ ; 通常配电装置中各相母线间的距离达几百毫米或更大, 可取  $\lambda = 1$ 。

在空间媒介的磁导率为常数时, 可用迭加原理计算多根载流导体间的电动力。

(2) 三相短路时母线所受最大电动力  $F_{\max}$ : 在实际计算中最常遇到的母线布置方式是三相导体平行布置在同一平面内。此时, 三相短路时, 中间相受到的电动力最大, 可按下式计算:

$$F_{\max} = 17.26 \lambda i_{ch}^2 \frac{l}{a} \times 10^{-2}$$

式中:  $F_{\max}$ ——母线承受最大电动力(N);

$i_{ch}$ ——三相短路冲击电流(kA);

$l$ ——母线跨距(cm);

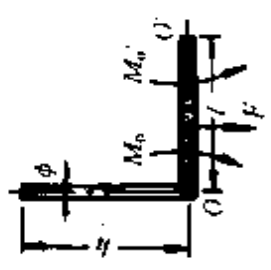
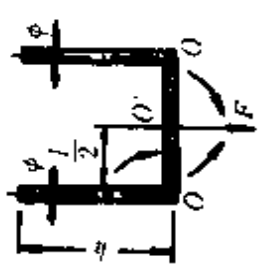
$a$ ——相邻两相母线中心线之间的距离(cm);



表 7-34 回路系数  $k_c$  及电动力矩的计算公式

序号	载流导体简图	电动力 作用线段	回路系数 $k_c$	对某点之力矩 $M$	注
1		$l$	$2 \frac{l}{a}$	—	无限长平行导体
2		$l$	$\frac{2l}{a} [\sqrt{1 + (\frac{a}{l})^2} - \frac{a}{l}]$ 如果 $\frac{a}{l} < 0.2$ , 则为 $\frac{2l}{a} (1 - \frac{a}{l})$	—	端部不齐的有限 长平行导体
3		$l_1$	$\frac{l_1}{a} \sqrt{1 + (\frac{a}{l_1})^2} - \frac{a}{l_1}$ $+ \sqrt{(\frac{l_1}{l_2})^2 + (\frac{a}{l_2})^2}$ $- \sqrt{(1 - \frac{l_1}{l_2})^2 + (\frac{a}{l_2})^2}$	—	一端不齐的有限 长平行导体
4		$l$	0	对 0 点之力矩 $M_0 = i^2 (1.75 - 3 \frac{r}{l}$ $+ \ln \frac{r}{l-r}) \times 10^{-5} \text{N} \cdot \text{m}$	导体为圆截面, 在两导体中流过同一 电流 $i$

续表

序号	载流导体简图	电力作用线段	回路系数 $k_c$	对某点之力矩 $M$	注
5		$l$	<p>当 <math>h \geq l</math> 时</p> $K_c = \ln \frac{l}{r} + 0.25$ <p>当 <math>h</math> 为有限长时</p> $K_c = \ln \frac{2b}{1 + \sqrt{1 + C_2}} + 0.25$ <p>(<math>b = \frac{l}{r}, C = \frac{l}{h}</math>)</p>	<p>当 <math>h \geq l</math> 时, 对 <math>O</math> 点之力矩</p> $M_0 = i^2(l - r) \times 10^{-5} \text{N} \cdot \text{m}$ <p>当 <math>h \geq l</math> 时, 对 <math>O'</math> 点之力矩</p> $M_0' = i^2[(l - \ln \frac{l}{r}) - (l - r)] \times 10^{-5} \text{N} \cdot \text{m}$	同上
6		$l$	<p>当 <math>h \geq l</math> 时</p> $K_c = 2(\ln \frac{l}{r} + 0.25)$ <p>当 <math>h</math> 为有限长时</p> $K_c = 2(\ln \frac{2b}{1 + \sqrt{1 + C_2}} + 0.25)$ <p>(<math>b = \frac{l}{r}, C = \frac{l}{h}</math>)</p>	<p>当 <math>h \geq l</math> 时, 对 <math>O</math> 点之力矩</p> $M_0 = i^2[(\ln \frac{l - r}{r} + 0.25) + r] \times 10^{-5} \text{N} \cdot \text{m}$ <p>作用在 <math>\frac{l}{2}</math> 导体上, 对 <math>O'</math> 点之力矩, 当 <math>h \geq l</math> 时,</p> $M_0' = i^2 \frac{l}{2} (\ln \frac{l}{4r} + \frac{2r}{l} + 0.25) \times 10^{-5} \text{N} \cdot \text{m}$	同上

$\lambda$ ——同前。

**例 7—1** 某配电装置中的三相母线水平布置在同一平面内,母线为矩形截面,其尺寸为  $60 \times 6\text{mm}$ ,长度  $l$  为  $2.5\text{m}$ ,相邻两相母线中心线之间的距离  $a$  为  $35\text{cm}$ ,通过母线的三相短路冲击电流  $i_{ch}$  为  $52\text{kA}$ ,试计算该配电装置中各相母线间的最大电动力。

**解** 相邻两相母线间的空间距离为  $(a - b) = 350 - 6 = 344(\text{mm})$ ;母线截面的周长为  $2(b + h) = 2 \times (6 + 60) = 132(\text{mm})$ ,前者大于后者,所以可取形状系数  $\lambda = 1$ 。

将各数值代入公式,得最大电动力(中间相)为

$$F_{\max} = 17.26 \times 1 \times 52^2 \times \frac{250}{35} \times 10^{-2} = 3333.6(\text{N})$$

### 九、电流互感器的选用

电流互感器根据额定电压、额定原边电流、额定副边电流、装置种类、构造型式、准确度级、副边负载等条件选择;并进行动稳定和热稳定校验。

#### 1. 电流互感器的额定电压

$$U_e \geq U_g$$

式中: $U_e$ ——电流互感器的额定电压(V);

$U_g$ ——电流互感器的工作电压(V)。

#### 2. 电流互感器的一次额定电流

电流互感器的一次额定电流不应低于额定值的 50%,即

$$I_{1e} \geq I_x$$

式中: $I_{1e}$ ——电流互感器一次额定电流(A);

$I_x$ ——电流互感器的工作电流(A)。

#### 3. 准确等级

电能计量用的电流互感器的准确度等级应不低于 0.5 级。

#### 4. 电流互感器动稳定校验

$$K_d \sqrt{2} I_{1e} \geq i_{ch}$$

式中： $K_d$ ——动稳定倍数，由产品目录给出；

$i_{ch}$ ——三相短路冲击电流(A)。

### 5. 电流互感器热稳定校验

$$(K_t I_{1e})^2 t_g = I_{\infty}^2 t_j$$

式中： $K_t$ ——热稳定倍数，由产品目录给出；

$t_g$ ——给定时间(s)；

$I_{\infty}$ ——三相稳态短路电流有效值(A)；

$t_j$ ——假想时间(s)，根据短路持续时间  $t$  求得。

### 6. 电流互感器二次额定电流

电流互感器二次额定电流，应根据二次回路中所带负载电流的大小来选择。

选择电流互感器时，为了满足其准确度要求，需将在 0.5 级以下的二次额定容量  $S_{2e}$  与其负载容量  $S_2$  进行比较，应满足

$$S_{2e} \geq S_2, S_2 = I_{2e}^2 Z_2, Z_2 = \Sigma Z_m + R_L + R_c;$$

式中： $I_{2e}$ ——电流互感器二次额定电流(A)，通常为 5A；

$Z_2$ ——电流互感器外接负载总阻抗( $\Omega$ )；

$\Sigma Z_m$ ——所有仪表串联线圈的总阻抗( $\Omega$ )；

$R_L$ ——二次导线电阻( $\Omega$ )；

$R_c$ ——接头的接触电阻，一般取 0.05 ~ 0.1 $\Omega$ 。

若电流互感器所接二次侧仪表已经确定，则  $R_L$  可由下式算出：

$$R_L = \frac{S_2 - I_{2e}^2 (\Sigma Z_m + R_c)}{I_{2e}^2}$$

导线的计算长度  $L$  决定于计量仪表和电流互感器间接连的长度，并与接线方式有关。电流互感器的四种接线方式如图 7—11 所示。

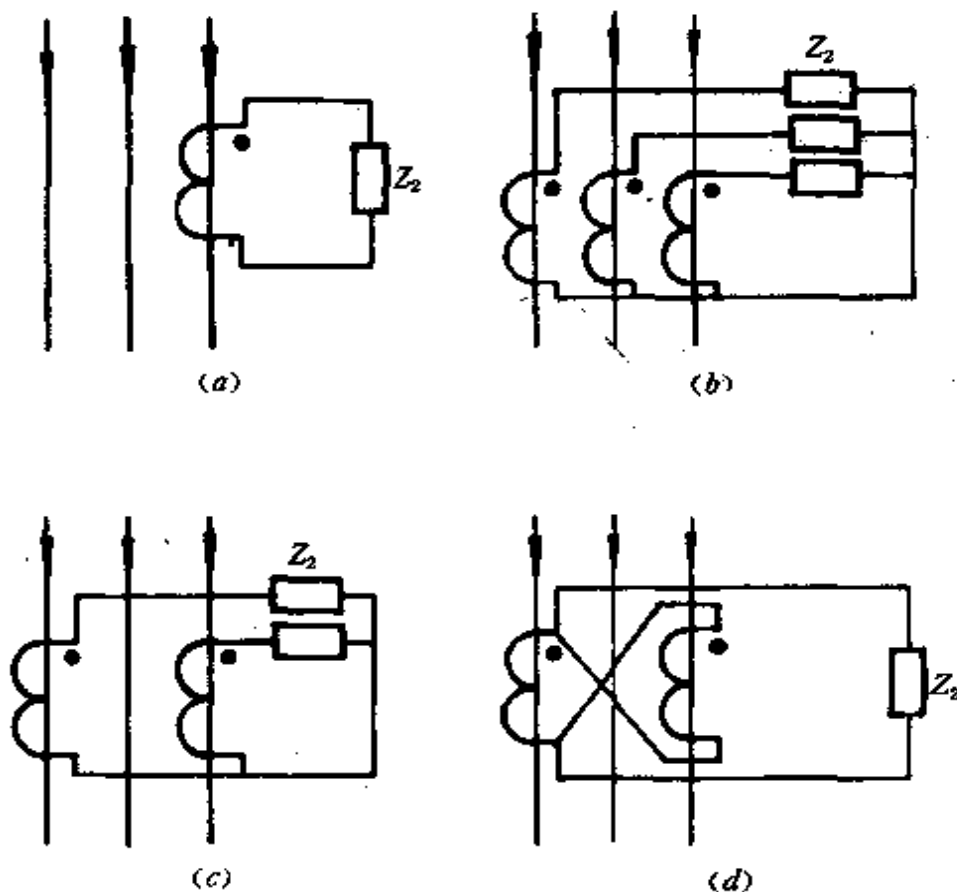


图 7—11 电流互感器的接线方式

(a) 单相接线 (b) 三相四线接线

(c) 不完全星形接线 (d) 差流接线

图(a),  $L = 2L_1$ , 其中  $L_1$  为连接线一端的长度; 图(b),  $L = L_1$ ; 图(c),  $L = \sqrt{3}L_1$ 。

电流互感器在不同接线方式下的负载阻抗及导线的计算长度, 见表 7—35。

常用测量与计量仪表串联线圈的负载, 见表 7—36。

常用继电器的串联线圈的负载, 见表 7—37。

例 7—2 某厂进线电流互感器为 LGF 型, 准确度为 0.5

级,二次额定容量  $S_{2e}$  为 15VA,用作电度计量,其上接有 1T1 型电流表、1D1 型有功功率表、DS1 型有功电度表、DX1 型无功电度表各一只,互感器至主控室的导线长  $L_1$  为 50m,电流互感器采用三相星形连接,试选择铜芯连线的截面。

解 将电流互感器的二次侧负载列于表 7—38 中。

表 7—35 电流互感器二次阻抗计算公式

序号	接 线 方 式	二次阻抗公式	二次导线 计算长度
1	单相电流互感器	$Z_2 = \Sigma Z_m + 2R_l + R_c$	$2L_1$
2	不完全星形(V形)	$Z_2 = \Sigma Z_m + \sqrt{3} R_l + R_c$	$\sqrt{3} L_1$
3	三相星形(Y形)	$Z_2 = \Sigma Z_m + R_l + R_c$	$L_1$
4	两 相 差 流	$Z_2 = \sqrt{3} (\Sigma Z_m + 2R_l) + R_c$	$2 \sqrt{3} L_1$
5	三相三角形(△形)	$Z_2 = 3(\Sigma Z_m + R_l) + R_c$	$3L_1$

表 7—36 常用测量与计量仪表串联线圈的负载

序号	仪表名称	型 号	二次线圈负载		串联线圈 总 数
			(Ω)	(VA)	
1	电 流 表	1T1—A	0.12	3	1
2	有功功率表	1D1—W	0.058	1.45	2
3	无功功率表	1D1—V <sub>ar</sub>	0.058	1.45	2
4	有功—无功功率表	1D1—W <sub>var</sub>	0.06	1.5	2
5	有功电度表	DS1	0.02	0.5	2
6	无功电度表	DX1	0.02	0.5	3
7	功率因数表	1D1—cosφ			2

表 7—37 常用继电器的串联线圈的负载

序号	继电器名称	型 号	一个线圈的负载		备注
			(Ω)	(VA)	
1	距离保护装置	LH—11		不大于 10VA/相	
2	高周波保护装置	GCH—1		不大于 25VA/相	
3	电流继电器	DL—11/0.01 ~ DL—11/0.05 DL—12/0.01 ~ DL—12/0.05 DL—13/0.01 ~ DL—13/0.05	0.0032	0.08	
4	电流继电器	DL—11/0.2 ~ DL—11/6 DL—12/0.2 ~ DL—12/6 DL—13/0.2 ~ DL—13/6	0.004	0.1	
5	电流继电器	DL—11/10 DL—12/10 DL—13/10	0.006	0.15	负 载 为 在 第 一 整 定 电 流 值 时 消 耗 的 总 功 率
6	电流继电器	DL—11/20 DL—12/20 DL—13/20	0.01	0.25	
7	电流继电器	DL—11/50 DL—12/50 DL—13/50	0.04	1	
8	电流继电器	DL—11/100 DL—12/100 DL—13/100	0.1	2.5	

(续表)

序号	继电器名称	型 号	一个线圈的负载		备注
			(Ω)	(VA)	
9	差动继电器	BCH-1		不大于 8.5BA/相	
10	差动继电器	BCH-2		不大于1 4VA/相	
11	电流继电器	GL-20		不大于1 5VA	
12	接地继电器	DD-11/40	80 20		线圈 串联 线圈 并联
13	接地继电器	DD-11/50	52 13		线圈 串联 线圈 并联
14	接地继电器	DD-11/60	36 9		线圈 串联 线圈 并联
15	负序电流继电器	DL-2		18	

表 7--38 电流互感器二次侧各相负载

仪表名称	电流互感器二次侧负载(VA)		
	A 相	B 相	C 相
电 流 表	—	1.73	—
有功功率表	2.5	—	2.5
有功电度表	2	—	2
无功电度表	2	1.16	2
共 计	6.5	2.89	6.5



可见最大一相负载为  $\Sigma Z_m I_{2e}^2 = 6.5 \text{VA}$ , 二次线截面应按此负载选择。

由于  $I_{2e} = 5 \text{A}$ , 设接触电阻  $R_c = 0.1 \Omega$ , 二次导线电阻在满足给定准确度等级(0.5级)条件下, 其允许值为

$$\begin{aligned} R_L &= \frac{S_{2e} - \Sigma Z_m I_{2e}^2 - R_c I_{2e}^2}{I_{2e}^2} \\ &= \frac{15 - 6.5 - 0.1 \times 5^2}{5^2} = 0.24(\Omega) \end{aligned}$$

因为是三相星形接线, 查表 7—35,  $L = L_1 = 50 \text{m}$ , 故铜导线截面为

$$S = \rho \frac{L}{R_L} = 0.018 \frac{50}{0.24} = 3.75(\text{mm}^2)$$

查线规表, 取导线截面  $4.0 \text{mm}^2$ 。

**例 7—3** 某厂变电所的出线电压为  $10 \text{kV}$ , 出线容量为  $1200 \text{kVA}$ , 已知  $I_{\infty}$  为  $4.5 \text{kA}$ ,  $i_{ch}$  为  $16.4 \text{kA}$ , 假想时间  $t_j$  为  $2.2 \text{s}$ , 试选择电流互感器, 电流互感器采用不完全星形接线, 如图 7—12。

**解** 有功电度计量用电流互感器的准确度应取 0.5 级。

工作电流为

$$I_g = \frac{S}{\sqrt{3} U_e} = \frac{1200}{\sqrt{3} \times 10} = 69.3(\text{A})$$

因此, 暂选用  $100 \text{A}$ 、 $10 \text{kV}$ 、 $\text{LQJ—10—0.5/3—100}$  型电流互感器。其 0.5 级铁芯的额定负荷为  $0.4 \Omega$ , 其额定容量为

$$S_{2e} = I_{2e}^2 Z_2 = 5^2 \times 0.4 = 10(\text{VA})$$

由于测量仪表二次线圈负载未超过  $S_{2e} = 10 \text{VA}$  (见表 7—39), 故电流互感器额定容量满足要求。

由表 7—39 可见, A 相负载为最大  $\Sigma Z_m I_{2e}^2 = 4 \text{VA}$ 。

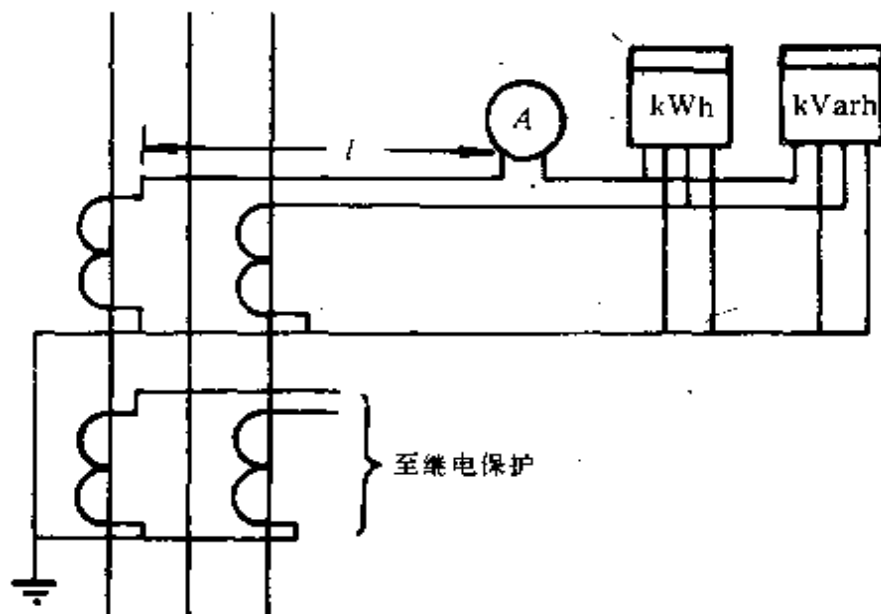


图 7-12 所联测量仪表的接线图

表 7-39 测量仪表二次线圈负载

仪表名称	二次线圈负载(VA)	
	A 相	C 相
电 流 表	3	—
有功电度表	0.5	0.5
无功电度表	0.5	0.5
共 计	4	1

电流互感器至测量仪表间连接导线的截面

$$R_L \leq \frac{S_{2e} - \sum Z_m I_{2e}^2 - R_c I_{2e}^2}{I_{2e}^2}$$

$$= \frac{10 - 4 - 0.1 \times 5^2}{5^2} = 0.14(\Omega)$$

其中接触电阻  $R_c$  取  $0.1\Omega$ 。

· 电流互感器至测量仪表间连接导线长约 6m, 采用铜芯电

缆。因为电流互感器采用不完全星形接线,查表 7—35 得  $L = \sqrt{3} L_1 = \sqrt{3} \times 6(\text{m})$ 。连接导线的截面为

$$S = \rho \frac{L}{R_L} = 0.018 \frac{\sqrt{3} \times 6}{0.14} = 1.34(\text{mm}^2)$$

按允许最小截面取  $2.5\text{mm}^2$ 。

计算数据如下:

工作电压  $U_g = 10\text{kV}$

工作电流  $I_g = 69.3\text{A}$

冲击短路电流  $i_{ck} = 16.4\text{kA}$

热稳定校验  $I_{\infty}^2 t_j = 4.5^2 \times 2.2 = 44.6$

所以,选定的电流互感器为 LQJ—10—0.5/3—100,其参数如下:

额定电压  $U_{1e} = 10\text{kV}$

额定电流  $I_{1e} = 100\text{A}$

动稳定校验  $K_d \sqrt{2} I_{1e} = 225 \times 1.41 \times 0.1 = 31.8\text{kA}$

热稳定校验  $(K I_{1e})^2 t = (90 \times 0.1)^2 \times 1 = 81$

因此,所选电流互感器满足要求。

### 十、电压互感器的选用

电压互感器根据额定电压、装置种类、构造型式、准确度级、副边负载等条件选择。

#### 1. 一次额定电压

电压互感器一次额定电压应大于接入的被测电压的 0.9 倍,小于接入的被测电压的 1.1 倍;二次电压按表 7—40 选择。

#### 2. 准确等级

电能计量用的电压互感器的准确度等级应选择 0.5 级。

#### 3. 额定容量

表 7—40 电压互感器二次电压的选择

线圈	二次线圈		接零序电压滤波器的三次线圈 (辅助二次线圈)	
	接入一次 线电压	接入一次 相电压	在中性点直 接接地系统	在中性点与地绝缘或 经消弧线圈接地系统
二次电压(V)	100	$100/\sqrt{3}$	100	100/3

额定容量应满足

$$S_{2e} \geq S_2,$$

$$S_2 = \sqrt{(\sum S_i \cos \varphi_{2i})^2 + (\sum S_i \sin \varphi_{2i})^2} \\ \sqrt{(\sum P_i)^2 + (\sum Q_i)^2}$$

式中： $S_{2e}$ ——电压互感器给定准确度等级的二次额定容量，即额定容量(VA)；

$S_2$ ——电压互感器二次负载的容量总和(VA)；

$S_i, P_i, Q_i, \varphi_{2i}$ ——分别为互感器二次侧连接各仪表的视在、有功、无功容量和功率因数角。

电压互感器各种接线每相负荷的计算公式见表 7—41 和表 7—42。

#### 4. 校验二次回路电压降

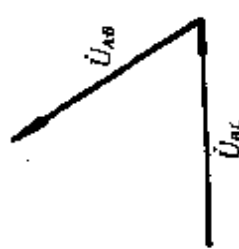
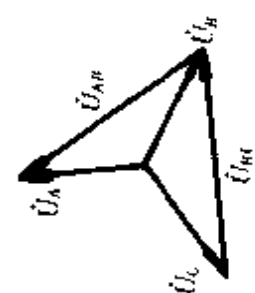
根据计费电度表管理制度规定，从电压互感器到电度表的二次电压回路的电压降不得超过 0.5%，因此还要校验二次回路的电压降。

常用仪表和继电器消耗功率及功率因数见表 7—43 和表 7—44；常用型号的电压互感器的二次负载见表 7—45。

#### 5. 电压互感器极限容量范围

电压互感器在各级规定的误差范围内和在下述的二次极限

电压互感器 V 形接线时每相负载的计算

矢量图	相别	名称	负载
	AB	有功	$P_{AB} = S_{AB} \cos \varphi_{AB}$
		无功	$Q_{AB} = S_{AB} \sin \varphi_{AB}$
	BC	有功	$P_{BC} = S_{BC} \cos \varphi_{BC}$
		无功	$Q_{BC} = S_{BC} \sin \varphi_{BC}$
	AB	有功	$P_{AB} = \sqrt{3} S_{AB} \cos(\varphi_{AB} + 30^\circ)$
		无功	$Q_{AB} = \sqrt{3} S_{AB} \sin(\varphi_{AB} + 30^\circ)$
	BC	有功	$P_{BC} = \sqrt{3} S_{BC} \cos(\varphi_{BC} - 30^\circ)$
		无功	$Q_{BC} = \sqrt{3} S_{BC} \sin(\varphi_{BC} - 30^\circ)$

(续表)

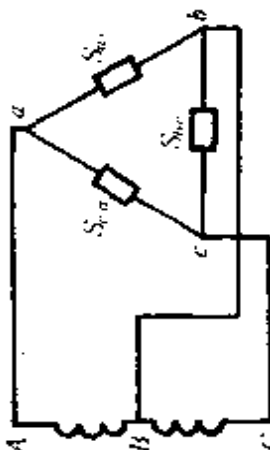
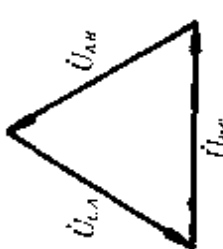
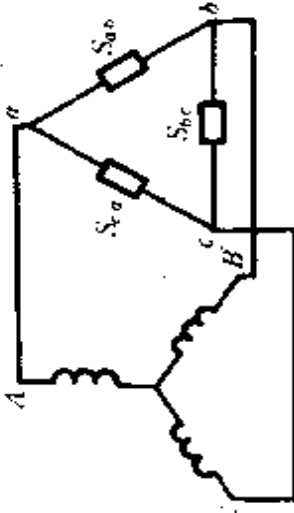
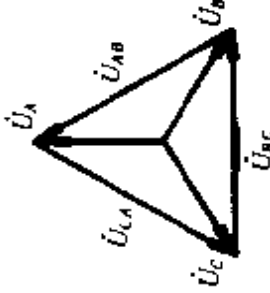
接线图	矢量图	相别	名称	负载
		AB	有功	$P_{AB} = S_{ab}\cos\varphi_{ab} + S_{ca}\cos(\varphi_{ca} + 60^\circ)$
			无功	$Q_{AB} = S_{ab}\sin\varphi_{ab} + S_{ca}\sin(\varphi_{ca} + 60^\circ)$
		BC	有功	$P_{BC} = S_{bc}\cos\varphi_{bc} + S_{ca}\cos(\varphi_{ca} - 60^\circ)$
			无功	$Q_{BC} = S_{bc}\sin\varphi_{bc} + S_{ca}\sin(\varphi_{ca} - 60^\circ)$

表 7—42 电压互感器 Y 形接线时每相负载的计算

接线图	矢量图	相别	名称	负载
		A	有功	$P_A = S_a \cos\varphi_a$
			无功	$Q_A = S_a \sin\varphi_a$
		B	有功	$P_B = S_b \cos\varphi_b$
			无功	$Q_B = S_b \sin\varphi_b$
		C	有功	$P_C = S_c \cos\varphi_c$
			无功	$Q_C = S_c \sin\varphi_c$

(续表)

接线图	矢量图	相别	名称	负载
		A	有功	$P_A = \frac{1}{\sqrt{3}} [S_{ab} \cos(\varphi_{ab} - 30^\circ) + S_{ca} \cos(\varphi_{ca} + 30^\circ)]$
			无功	$Q_A = \frac{1}{\sqrt{3}} [S_{ab} \sin(\varphi_{ab} - 30^\circ) + S_{ca} \sin(\varphi_{ca} + 30^\circ)]$
		B	有功	$P_B = \frac{1}{\sqrt{3}} [S_{ab} \cos(\varphi_{ab} + 30^\circ) + S_{bc} \cos(\varphi_{bc} - 30^\circ)]$
			无功	$Q_B = \frac{1}{\sqrt{3}} [S_{ab} \sin(\varphi_{ab} + 30^\circ) + S_{bc} \sin(\varphi_{bc} - 30^\circ)]$
		C	有功	$P_C = \frac{1}{\sqrt{3}} [S_{bc} \cos(\varphi_{bc} + 30^\circ) + S_{ca} \cos(\varphi_{ca} - 30^\circ)]$
			无功	$Q_C = \frac{1}{\sqrt{3}} [S_{bc} \sin(\varphi_{bc} + 30^\circ) + S_{ca} \sin(\varphi_{ca} - 30^\circ)]$



(续表)

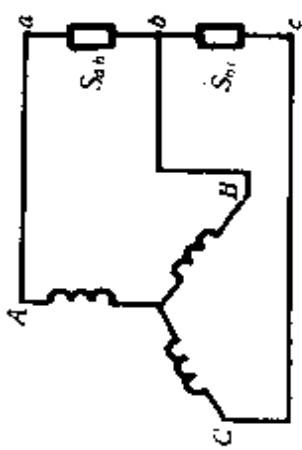
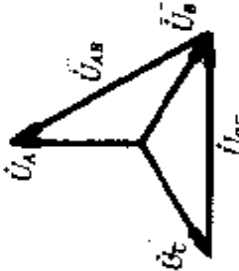
接线图	矢量图	相别	名称	负载
		A	有功	$P_A = \frac{1}{\sqrt{3}} S_{ab} \cos(\varphi_{ab} - 30^\circ)$
			无功	$Q_A = \frac{1}{\sqrt{3}} S_{ab} \sin(\varphi_{ab} - 30^\circ)$
		B	有功	$P_B = \frac{1}{\sqrt{3}} [S_{ab} \cos(\varphi_{ab} + 30^\circ) + S_{bc} \cos(\varphi_{bc} - 30^\circ)]$
			无功	$Q_B = \frac{1}{\sqrt{3}} [S_{ab} \sin(\varphi_{ab} + 30^\circ) + S_{bc} \sin(\varphi_{bc} - 30^\circ)]$
		C	有功	$P_C = \frac{1}{\sqrt{3}} S_{bc} \cos(\varphi_{bc} + 30^\circ)$
			无功	$Q_C = \frac{1}{\sqrt{3}} S_{bc} \sin(\varphi_{bc} + 30^\circ)$

表 7—43 常用仪表和继电器消耗功率及功率因数

序号	仪表、继电器名称	型 号	电压 (V)	cosφ	功率 (VA)	备注
1	电 压 表	1T1—V	100	1	4.5	} 系指一个 线圈(2个线 圈为 1.5V)
2	有功功率表	1D1—W	100	1	07.5	
3	无功功率表	1D1—Var	100	1	0.75	
4	有功—无功功率表	1D1—Wvar	100	1	0.75	
5	功率因数表	1D1—cosφ				
6	有功电度表	DS1	100	0.38	1.5	当 30V 时
7	无功电度表	DX1	100	0.38	1.5	DJ—131/60
8	电压继电器	DJ—131/60CN	60		2.5	CN 除外
9	电压继电器	DJ—100 系列			1	

表 7—44 常用继电器所消耗的功率

序号	继电器等名称	型 号	电压	cosφ	功率 (VA)	备 注
1	距离保护装置	LH—11	100		不大于 18	每相的消耗 每相的消耗
2	高周波保护装置	GCH—1	100		不大于 25	
3	电压继电器	DJ—111/60	60		1	当 30V 时
4	电压继电器	DJ—111/200	200		1	
5	电压继电器	DJ—111/400	400		1	
6	电压继电器	DJ—131/60	60		1	
7	电压继电器	DJ—131/200	200		1	
8	电压继电器	DJ—131/400	400		1	
9	电压继电器	DJ—131/60N	60		2.5	
10	电压继电器	DJ—122/48	48		1	

(续表)

序号	继电器等名称	型号	电压	$\cos\varphi$	功率 (VA)	备注
11	电压继电器	DJ-122/160	160		1	
12	电压继电器	DJ-122/320	320		1	
13	功率继电器	GG-11	100		35	最大灵敏角为 30 度
14	功率继电器	GG-11	100		25	最大灵敏角为 45 度
15	功率继电器	GG-12	100		15	最大灵敏角为 70 度
16	零序电流互感器	LXH-2	110		20	励磁线圈数据
17	零序电流互感器	LXH-4	110		45	励磁线圈数据
18	零序电流互感器	LXH-7	110		50	励磁线圈数据
19	零序电流互感器	LXH-12	110		70	励磁线圈数据
20	零序电流互感器	LXHM-1	110		20	励磁线圈数据
21	零序电流互感器	LXHM-2	110		25	励磁线圈数据
22	零序电流互感器	LXHM-3	110		30	励磁线圈数据

表 7-45 一些常用型号的电电压互感器二次负载

型号	额定变化 (V/V)	不同准确度时的负载 (VA)			最大容量 (VA)
		0.5 级	1 级	3 级	
JDJ-6	3000/100	30	50	120	240
JDJ-6	6000/100	50	80	240	400
JDJ-10	10000/100	80	150	320	640
JSJW-6	6000/100/100/3	80	150	320	640
JSJW-10	10000/100/100/3	120	200	480	960
JDZ-6	3000/100	30	50	100	200

在额定电压下，电压互感器的二次负载不得超过表 7-45 所列的数值。

(续表)

型 号	额定变比 (V/V)	不同准确度时的负载 (VA)			最大容量 (VA)
		0.5级	1级	3级	
JDZ-6	6000/100	50	80	200	300
JDZ-10	10000/100	80	15	300	500
JDZJ-6	$\frac{3000}{\sqrt{3}} / \frac{100}{\sqrt{3}} / \frac{100}{\sqrt{3}}$	40	60	150	300
JDZJ-6	$\frac{6000}{\sqrt{3}} / \frac{100}{\sqrt{3}} / \frac{100}{\sqrt{3}}$	40	60	150	300
JDZJ-10	$\frac{10000}{\sqrt{3}} / \frac{100}{\sqrt{3}} / \frac{100}{\sqrt{3}}$	40	60	150	300
JDJJ-35	$\frac{35000}{\sqrt{3}} / \frac{100}{\sqrt{3}} / \frac{100}{\sqrt{3}}$	150	250	600	1200
JCC-110	$\frac{110000}{\sqrt{3}} / \frac{100}{\sqrt{3}} / \frac{100}{\sqrt{3}}$	—	500	1000	2000

容量范围及一次电压范围内,不应超过表 7-46 规定的数值。

表 7-46 电压互感器各级规定的误差限值

准确度等级	最大电压误差 (%)	最大角误差 分
0.2	± 0.2	± 10
0.5	± 0.5	± 20
1	± 1	± 40
3	± 3	没有规定

注:

① 电压误差  $\Delta U\% = \frac{kU_2 - U_1}{U_2} \times 100$ ,  $k$  为电压互感器变比,  $U_1$ 、 $U_2$  为电压互感器一、二次线圈电压。

② 角误差指一、二次电压相位间的角度差。

二次极限容量范围为

$$0.25\left(\frac{U_1}{U_e}\right)^2 S_e \text{ 到 } \left(\frac{U_1}{U_e}\right)^2 S_e$$

一次电压范围为

$$0.9U_e \text{ 到 } 1.1U_e$$

式中： $U_1$ ——一次电压(V)；

$U_e$ ——额定电压(V)；

$S_e$ ——额定容量(VA)。

**例 7-4** 某厂变电所采用三相户内式电压互感器为 JSJW-10 型，准确度等级为 0.5 级，三相额定容量  $S_e$  为 120VA，该电压互感器到各仪表及指示灯的距离为 60m，已知二次负荷电流为 0.6A， $\cos\varphi = 1$ ，试选择连接导线的截面和计算电压互感器二次电压降及角误差。

**解**

(1) 互感器二次额定电流为

$$I_{2e} = \frac{S_e}{\sqrt{3}U_{2e}} = \frac{120}{\sqrt{3} \times 100} = 0.697(\text{A})$$

该电流大于工作电流  $I_x = 0.6\text{A}$ ，所以互感器具有 0.5 级准确度。

(2) 连接导线截面计算：设连接导线的电阻为  $R\Omega$ 。根据规程规定：互感器二次侧允许电压降为 0.5%，即

$$\Delta U_{cb} = \frac{2RI_x \cos\varphi + RI_x \sin(30^\circ + \varphi)}{U_{2e}} = 0.5\%$$

$$\frac{2R \times 0.6 \times 1 + 0.6R \sin(30^\circ + 0^\circ)}{100} = 0.5\%$$

解上式得  $R = 0.333\Omega$

导线截面为

$$S = \rho \frac{L}{R} = 0.018 \frac{60}{0.333} = 3.24(\text{mm}^2)$$

取标称截面为  $4\text{mm}^2$  的铜导线。

这时电阻为

$$R = 0.018 \frac{60}{4} = 0.27(\Omega)$$

电压降为

$$\begin{aligned} \Delta U_{ab} &= \frac{2 \times 0.27 \times 0.6 \times 1 + 0.27 \times 0.6 \times 0.5}{100} \\ &\approx 0.4\% \end{aligned}$$

角误差为

$$\begin{aligned} \beta &= \text{tg}^{-1} \frac{2RI_c \sin\varphi - RI_c \cos(30^\circ - \varphi)}{U_{2e}} \\ &= \text{tg}^{-1} \frac{0 - 0.27 \times 0.6 \times 0.866}{100} = -4.8' \end{aligned}$$

**例 7-5** 某厂变电所  $3\text{kV}$  进线母线上欲装二只单相电压互感器,接成  $V$  形接线,负荷为有功电度表、无功电度表和有功功率表各二只,无功功率表一只,以及电压表二只,试选择电压互感器。

**解**

(1) 将所有仪表的消耗功率等数据列入表 7-47 中。

(2) 由表 7-47 得电压互感器最大一相负载为

$$\begin{aligned} S_{AB} &= S_{BC} = S_{ab} = S_{ba} = \sqrt{P_{ab}^2 + Q_{ab}^2} \\ &= \sqrt{9.03^2 + 5.72^2} = 10.68(\text{VA}) \end{aligned}$$

由表 7-45 查得准确度为 0.5 级的 JDJ-6 型电压互感器,其额定容量为  $30\text{VA}$ ,因此能满足仪表所需的要求。

所有仪表的有关数据

表 7-47

仪表名称	仪表中 电压线 圈数	仪表数目	每只线圈的功率 (VA)		仪表的 $\cos\phi_2$	仪表的 $\sin\phi_2$	AB 相		BC 相	
			每只仪表	小 计			$P_{Ab}(W)$	$Q_{Ab}(W)$	$P_{Bc}(W)$	$Q_{Bc}(W)$
有功电度表 DS1	2	2	1.5	3	0.38	0.952	1.14	2.86	1.14	2.86
无功电度表 DX1	2	2	1.5	3	0.38	0.952	1.14	2.86	1.14	2.86
有功功率表 1D1	2	2	0.75	1.5	1	0	1.5	0	1.5	0
无功功率表 1D1	2	1	0.75	0.75	1	0	0.75	0	0.75	0
电压表 1T1	1	2	4.5	9	1	0	4.5	—	4.5	—
总 计							9.03	5.72	9.03	5.72

## 第二节 高压电器的选用

### 一、高压电器规范的选择条件

1. 高压电器的允许工作条件和工作电流的计算,见表 7—48 和表 7—49;计算用周围空气温度见表 7—50。

2. 电气设备动稳定和热稳定校验,见本章第一节电气设备发热计算。

3. 短路电流电动力计算,见本章第一节母线选择及计算。

4. 高海拔地区电气设备的选择,见本章第一节。

### 二、高压绝缘子及穿墙套管的选用

#### 1. 高压绝缘子的选用

高压绝缘子需根据所用场合(如是否耐污秽等)选择其类型,然后按装置或线路的额定电压,以及按内部过电压、泄漏距离、大气过电压等进行选择。

(1) 按额定电压选择:绝缘子能在超过其额定电压一定值时可靠地工作;35kV 及以下的绝缘子可超过 15%;110kV 和 220kV 的绝缘子可超过 10%。因为电气装置最多是在超过其额定电压的 5~10% 的电压下工作,所以按额定电压选择绝缘子时,只需满足下式要求即可

$$U_s \geq U_{ezh}$$

式中: $U_s$ ——绝缘子的额定电压(kV);

$U_{ezh}$ ——电气装置的额定电压(kV)。

(2) 按承受内部过电压的作用选择:

$$U_s = \frac{1.15K_n U_{ez}}{0.977K} < U_{es}$$

式中: $U_s$ ——绝缘子串湿放电电压(kV);



表 7-48 高压电器的允许工作条件

项 目	设 备		绝 缘 子		断 路 器	电 流 互 感 器	电 压 互 感 器	变 压 器	电 抗 器	熔 断 器	电 力 电 容 器
	支 柱	穿 墙									
最高工作电压	3 ~ 35kV		1.15U <sub>e</sub>		1.1U <sub>e</sub>						
最大工作电流	110kV		1.1U <sub>e</sub>								
	低于 t <sub>e</sub> 时	—	每低于 1°C 可加 0.5% 至 0.2I <sub>e</sub> 止			—	—	按 1% 及 3% 制	I <sub>e</sub>	I <sub>e</sub>	—
高于 t <sub>e</sub> 时	—	$I_e \sqrt{(75-t)/(75-t_e)}$			—	—	$I_e \frac{t-t_e}{100}$	同电流互感器	—	—	—
环境温度 (°C)	额定 t <sub>e</sub>	—	40	40	40	40	40	40	40	40	25
	最高	—	40	40	40	40	40	40	40	40	40
	最低	—	— 40	— 40	— 30	— 30	— 30	— 30	— 30	— 40	— 40

(续表)

项 目	设 备		绝 缘 子		断 路 器	电 流 互 感 器	电 压 互 感 器	变 压 器	电 抗 器	熔 断 器	电 力 电 容 器	
	支 柱	穿 墙	隔 离 开 关	穿 墙								
短 路 情 况	动 稳 定	0.6I <sub>st</sub>		i <sub>gr</sub>	K <sub>d</sub> ≥ $\frac{i_{ch}}{\sqrt{2}I_c}$	—	—	—	i <sub>gr</sub>	—	—	
	热 稳 定	—	I <sub>th</sub> t <sub>h</sub>			—	—	—	I <sub>∞</sub> t <sub>h</sub>	—	—	—
	短 路 容 量	—	—	S <sub>ch</sub> 或 S <sub>n</sub>		—	—	—	I <sub>∞</sub> < 25I <sub>c</sub> I < 900 I ≤ K <sub>f</sub> <sup>2</sup>	—	I <sup>n</sup> 或 I <sub>ch</sub>	—

注:

- ① 环境温度的选取,对于不同地点各有不同,详见表 7-50。
- ② 上表仅为一般允许条件,不包括个别设备的特殊要求,如互感器须满足准确度要求,电抗器须限制用户的短路容量,变压器须考虑年平均温度等。
- ③ 表中  $K_f = \frac{I_{\infty}}{I_c}$ , K<sub>d</sub> 为动稳定倍数; i<sub>ch</sub>, I<sup>n</sup>, I<sub>∞</sub>, I<sub>ch</sub> 见第六章。
- ④ U<sub>c</sub>, I<sub>c</sub> 为设备的额定电压和电流。
- ⑤ i<sub>gr</sub> 为设备极限通过电流峰值。

表 7—49 电器持续工作电流的计算

回路名称	计算工作电流	备 注
发电机同步调相机	$I_g = 1.05I_e = \frac{1.05P_e}{\sqrt{3} U_e \cos\varphi_e}$	当发电机冷却气体温度低于额定值时,允许提高电流为每低 1°C 加 0.5%,必要时应按此计算 $I_g$
三相变压器	$I_g = 1.05I_e = \frac{1.05S_e}{\sqrt{3} U_e}$	1.考虑 $I_g = 1.05I_e$ ,系根据在 95% $U_e$ 以上时其容量不变 2.带负荷调压变压器应按可能的最低电压计算 3.当变压器按照“3%”制及“1%”制允许过负荷,必要时应配合计算 $I_g$
母线联络开关	$I_g$ 一般等于该段母线上最大一台发电机或一组变压器的计算电流	
母线分段电抗器	$I_g = I_e$	分段电抗器的选择须考虑在一台发电机事故掉闸时,仍能保证该段母线的负荷
主母线	按潮流分布情况计算	
馈线回路	$I_g = \frac{P}{\sqrt{3} U_e \cos\varphi}$	1. $P$ 应包括线路损耗,且应考虑事故时转移过来的负荷 2. 当回路中装有电抗器时, $I_g$ 一般按电抗器的 $I_e$ 计算
电动机回路	$I_g = \frac{P_{ed}}{\sqrt{3} U_e \cos\varphi_e}$	可由产品目录查出

注:表中各量的单位为,  $I$  用 A;  $U$  用 kV;  $P$  用 kW;  $S$  用 kVA。

表 7—50 计算用周围空气温度

序号	装置地点及配电装置型式	计算用温度
1	屋外配电装置	当地的月平均最高气温
2	发热量较小的屋内配电装置,如 35、110kV 屋内配电装置	当地的月平均最高气温
3	发热量较大的屋内配电装置,如大容量的 6~10kV 配电装置	通风设计时采用的最高室温
4	在主厂房内的配电装置,如发电机出线小间、厂用配电装置、厂用变压器小间等	通风设计时采用的最高室温
5	电 缆 隧 道	当地的月平均最高气温

注:如无法取得通风设计时的最高室温,则可按月平均最高气温加 5°C 计算。

$U_{cr}$ —— 额定相电压(kV);

$K_0$ —— 内过电压倍数,见表 7—51;

$K$ —— 空气密度系数,海拔  $\leq 500\text{m}$  取 0.96;海拔为 501~1000m 取 0.925;海拔  $\geq 1000$  时,每升高 100m 降低 1%。

$U_w$ —— 绝缘子串的额定湿放电电压(kV),见表 7—52。

表 7—51 各级电压电网内过电压倍数

电 压 (kV)	$K_0$
35(非直接接地)	4
60(非直接接地)	4
110(非直接接地)	4
110(直接接地)	3
220(直接接地)	3

表 7—52 绝缘子串的湿放电电压

片 数	湿放电电压 $U_w$ (kV) (有效值)	
	X—4.5	X—1—4.5
1	52.7	51
2	96	84.4
3	132	132.5
4	176	160.5
5	230	201
6	258	244
7	301	308.4
8	353	348.1
9	403	359
10	446.1	401.5
11	501.3	430
12	548.5	470
13	578	497
14	626	538.2
15	641	572.5
16	665	608
17	695	634.5
18	724	674

(3) 按正常工作电压下泄漏距离选择;

$$n = \frac{\lambda U_e}{\lambda_0}$$

式中:  $n$ ——绝缘子串片数;

$\lambda$ ——要求的最小单位泄漏距离(mm/kV),见表 7—53;

$\lambda_0$ ——每片绝缘子的泄漏距离(mm),见表 7—54;

$U_e$ ——电网额定电压(kV)。

(4) 按大气过电压作用下不闪络选择:一般只要满足承受内部过电压作用的要求,同时接地电阻值也满足规程要求,便能满足该要求。

按以上条件选择的绝缘子片数,考虑到绝缘子老化,需增加绝缘子片数;35 ~ 220kV 高压,直线杆增加 1 片,耐张杆增加 2 片;330kV 高压,直线杆增加 1 ~ 2 片,耐张杆增加 2 ~ 3 片。

### 2. 高压支持绝缘子及穿墙套管的选择

表 7—53 各类污秽地区绝缘子串要求具有的单位泄漏距离

污秽等级	污 秽 情 况	每千伏线电压所需单位泄漏距离 (nm/kV)
0	一般地区	1.6
1	空气污秽的工业区附近;重雾地区;炉烟污秽地区	2.2 ~ 2.5
2	空气污秽较严重的地区,沿海地带及盐场附近;空气污秽地区附近又有重雾的地带;距化学性污染源 300m 以外的地区	2.6 ~ 3.2
3	导电率很高的空气污秽地区(如大化工厂冶金厂附近);大发电厂烟囱附近且附近有冷水塔时;严重的盐雾侵袭地区;距化学性污染源 300m 以内的地区	3.8

表 7—54 各种悬式绝缘子的平均泄漏距离

型 式	制 造 厂	平均泄漏距离 (mm)	备 注
X—4.5	大连电瓷厂	295.3	一般地区使用
X—1—4.5	大连电瓷厂	291.9	一般地区使用
	醴陵电瓷厂	293.2	
	苏州电瓷厂	281.6	
	西安电瓷厂	272.2	
XSR—4.5	大连电瓷厂	455	用于污秽地区较好

高压支持绝缘子及穿墙套管需根据所用场所(如户内、户外、是否耐污秽等)选择其类型,然后按电压、电流选择,按短路动稳定和热稳定进行校验。

(1) 按电压选择支持绝缘子和穿墙套管:

$$U_e \geq U_g$$

式中:  $U_e$ ——绝缘子或套管的额定电压(kV);

$U_g$ ——绝缘子或套管的工作电压(kV)。

(2) 按持续允许电流选择穿墙套管:

$$I_e \geq I_g$$

式中:  $I_e$ ——穿墙套管的额定电流,即持续允许电流(A);

$I_g$ ——穿墙套管的工作电流(A)。

当周围环境温度高于 + 40°C 但不超过 + 60°C 时,套管的持续允许电流应按下式计算:

$$I_{zw} = I_e \sqrt{\frac{80 - t}{40}}$$

式中:  $t$ ——周围实际环境温度(°C)。

对于母线型穿墙套管,不按持续电流来选择,只需其型式与母线尺寸相配合即可。

(3) 按短路动稳定校验支持绝缘子和穿墙套管:应满足下式要求:

$$P \leq 0.6P_{ux}$$

式中: $P_{ux}$ ——绝缘子抗弯破坏负荷(N);

$P$ ——在短路时作用于绝缘子的力(N)。

实际计算可利用图 7—13 ~ 图 7—16 所示的曲线校验。

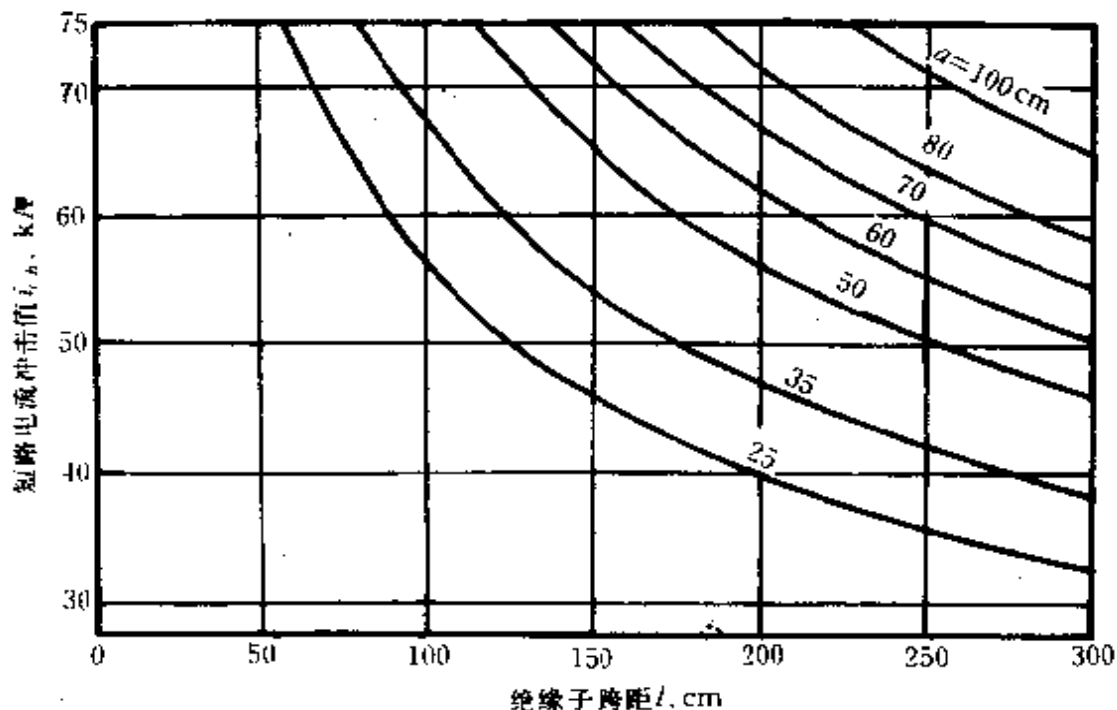


图 7—13 支持绝缘子及穿墙套管动稳定校验曲线(一)

① 图 7—13 为支持绝缘子及穿墙套管动稳定校验曲线(一),图中允许弯曲荷重为 2206N。

该图适用于以下型号的支持绝缘子:

ZA—6  $l_{max} = l$ (母线平放)  $l_{max} = 0.647l$ (母线竖放)

ZA—10  $l_{max} = l$ (母线平放)  $l_{max} = 0.690l$ (母线竖放)



ZA--35  $l_{max} = l$ (母线平放)  $l_{max} = 0.826l$ (母线竖放)

ZPA--6  $l_{max} = l$ (母线平放)  $l_{max} = 0.610l$ (母线竖放)

ZPB--10  $l_{max} = 1.33l$ (母线平放)

$l_{max} = 0.865l$ (母线竖放)

该图适用的穿墙套管是 CA—6,10  $l_{max} = 2l - 38$

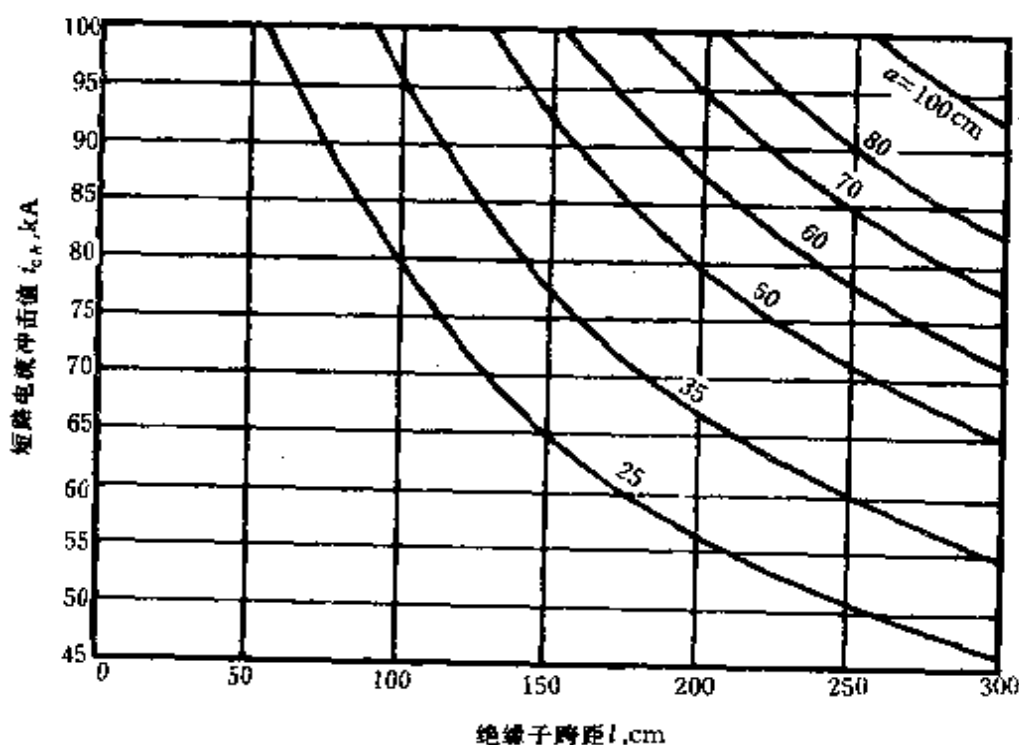


图 7—14 支持绝缘子及穿墙套管动稳定校验曲线(二)

② 图 7—14 为支持绝缘子及穿墙套管动稳定校验曲线(二) 图中允许弯曲荷重为 4413N。

该图适用于以下型号的支持绝缘子：

ZB—6  $l_{max} = l$ (母线平放)  $l_{max} = 0.666l$ (母线竖放)

ZB—10  $l_{max} = l$ (母线平放)  $l_{max} = 0.710l$ (母线竖放)

ZB—35  $l_{max} = l$ (母线平放)  $l_{max} = 0.834l$ (母线竖放)

该图适用于以下型号的穿墙套管：

CB—6,10  $l_{max} = 2l - 47$

CB—35	$l_{max} = 2l - 107$
CWB—6,10	$l_{max} = 2l - 65$
CWB—35	$l_{max} = 2l - 110$

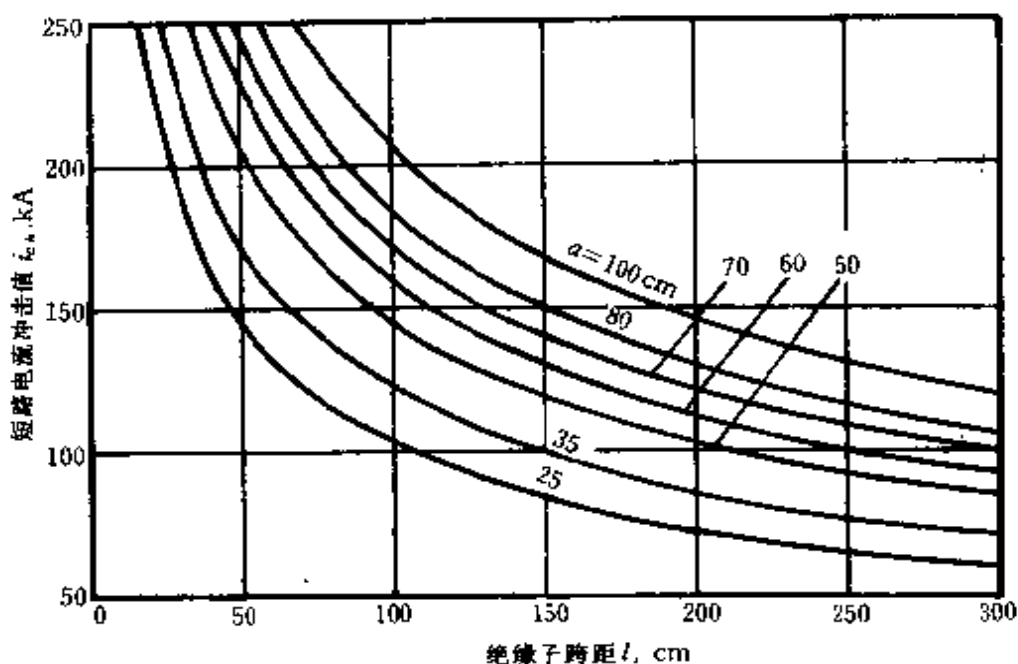


图 7-15 支持绝缘子及穿墙套管动稳定校验曲线(三)

③ 图 7—15 为支持绝缘子及穿墙套管动稳定校验曲线(三) 图中允许弯曲荷重为 7355N。

该图适用于以下型号的支持绝缘子：

ZC—10  $l_{max} = l$ (母线平放)  $l_{max} = 0.710l$ (母线竖放)

ZPC—35  $l_{max} = l$ (母线平放)  $l_{max} = 0.795l$ (母线竖放)

该图适用于以下型号的穿墙套管：

CC—6  $l_{max} = 2l - 59$

CC—10  $l_{max} = 2l - 69$

CWC—10  $l_{max} = 2l - 73$

CWC—20  $l_{max} = 2l - 92$

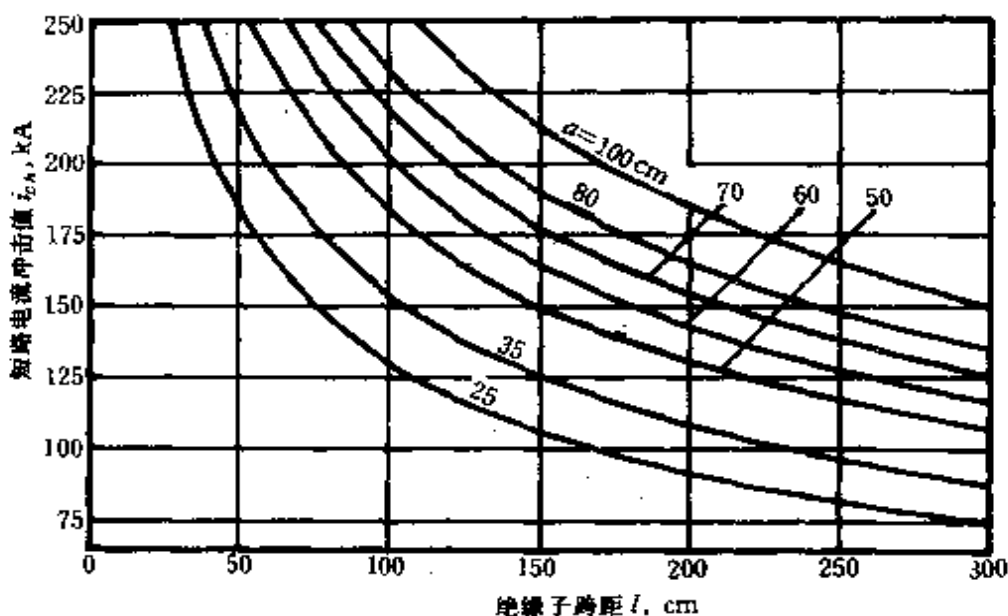


图 7-16 支持绝缘子及穿墙套管动稳定校验曲线(四)

④ 图 7-16 为支持绝缘子及穿墙套管动稳定校验曲线(四)  
图中允许弯曲荷重为 11768N

该图适用于以下型号的支持绝缘子:

ZD-10  $l_{\max} = l$  (母线平放)  $l_{\max} = 0.715l$  (母线竖放)

ZD-20  $l_{\max} = l$  (母线平放)  $l_{\max} = 0.781l$  (母线竖放)

ZPD-10  $l_{\max} = l$  (母线平放)  $l_{\max} = 0.610l$  (母线竖放)

ZPD-35  $l_{\max} = l$  (母线平放)  $l_{\max} = 0.775l$  (母线竖放)

该图适用于以下型号的穿墙套管:

CMD-10  $l_{\max} = 2l - 48$

CME-10  $l_{\max} = 3l - 48$

CMF-10  $l_{\max} = 4l - 49$

CME-20  $l_{\max} = 3l - 73$

#### 4. 按短路时热稳定校验穿墙套管

按短路时热稳定校验穿墙套管与校验断路器的方法相同, 应保证热稳定电流计算值小于套管的保证值。

### 三、高压断路器的选用

高压断路器能在有负荷的情况下接通和断开电路,在供电系统中发生短路故障时,能迅速切断短路电流。

高压断路器应按装置种类、构造型式、额定电压、额定电流、断路电流或断流容量来选择,然后作短路时动稳定和热稳定校验。

#### 1. 按额定电压选择

$$U_c \geq U_g$$

式中:  $U_c$ ——断路器的额定电压(kV);

$U_g$ ——断路器的工作电压,即线路额定电压(kV)。

#### 2. 按额定电流选择

$$I_c \geq I_g$$

式中:  $I_c$ ——断路器的额定电流(A);

$I_g$ ——断路器的工作电流(A)。

#### 3. 按额定断路电流或断流容量选择

$$I_{dn} \geq I''(\text{或 } I_{0.2}), S_{dn} \geq S''(\text{或 } S_{0.2})$$

$$S'' = \sqrt{3} U_p I_z = \frac{S_j}{X_{.z}}$$

式中:  $I_{dn}$ 、 $S_{dn}$ ——断路器在额定电压下的断路电流和断流容量(kA、MVA),可由产品目录查得;

$I''(\text{或 } I_{0.2})$ ——安装地点发生三相短路时的次暂态短路电流(或0.2s短路电流)(kA);

$S''(\text{或 } S_{0.2})$ ——三相短路容量(MVA);

$U_p$ ——电流  $I_z$  所在电压级的平均额定电压(kV);

$I_z$ ——三相短路电流周期分量有效值(kA);

$S_j$ ——基准容量(MVA);

$X_{.z}$ ——电抗标么值。

当断路器安装在低于额定电压的电路中时,其断流容量按

下式计算：

$$S_{dn(U)} = S_{dn} \frac{U}{U_c}$$

4. 按短路电流的动稳定和热稳定校验

校验方法见本章第一节电气设备发热计算。

常用高压断路器的技术数据见表 7—55。

表 7—55 两种高压断路器的技术数据

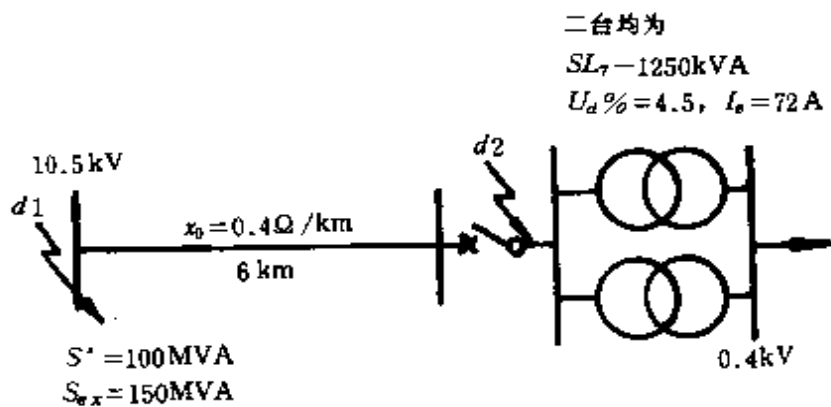
主要技术数据	多油户外式 DW1—35 型	少油户内式 SN1—10 型
1. 额定电压	35kV	10
2. 额定电流	600A	400
3. 额定短路电流	6.6kA	20
4. 断流容量	400MVA	200
5. 动稳定电流(即极限通过电流峰值)	17.3kA	52
6. 10 秒钟热稳定电流	7.1kA	14
7. 油开关重量(不带油)	965kg	150
8. 油重	300kg	5
9. 操作机构型号	CS2—X	CS2 或 CD2

**例 7—6** 某厂变电所高压供电系统如图 7—17 所示。已知系统额定容量为 150MVA, 在  $d_1$  点三相短路时短路容量  $S''$  为 100MVA, 继电器动作时间  $t_b$  为 2s, 断路器分闸时间  $t_{fd}$  为 0.15s(假定), 其它计算用技术数据标于图上, 试选择变电所高压侧断路器。

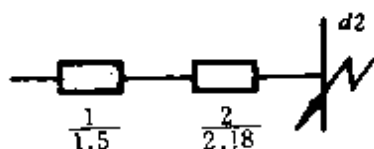
**解**

(1) 计算短路电流: 设基准容量  $S_j = 150\text{MVA}$ , 则

$$X_1 = S_{ex}/S'' = 150/100 = 1.5$$



(a)



(b)

图 7-17 某厂高压供电系统图

(a) 供电系统图 (b) 等效电路图

$$X_2 = \frac{X}{U_p^2} = \frac{0.4 \times 6 \times 100}{10.5^2} = 2.18$$

$$I_{\infty} = \frac{1}{X_{\Sigma}} = \frac{1}{1.5 + 2.18} = 0.272$$

$$I_j = \frac{S_j}{\sqrt{3} U_p} = \frac{150}{\sqrt{3} \times 10.5} = 8.26 (\text{kA})$$

$$I_z = I'' = I_{\infty} = 0.272 \times 8.26 = 2.25 (\text{kA})$$

$$i_{ch} = 2.55 I'' = 2.55 \times 2.25 = 5.74 (\text{kA})$$

$$S'' = \frac{S_j}{X_{\Sigma}}$$

$$= \frac{150}{1.5 + 2.18} = 40.8 (\text{MVA})$$

(2) 计算假想时间  $t_j$  和  $I_{\infty}^2 t_j$ : 短路电流通过断路器的时间为

$$t = t_b + t_{jd} = 2 + 0.15 = 2.15(s)$$

短路电流周期分量假想时间为

$$t_j = t + 0.05 = 2.15 + 0.05 = 2.2(s)$$

$$I_{\infty}^2 t_j = 2.25^2 \times 2.2 = 11.14$$

(3) 根据短路参数, 查高压断路器技术数据, 可选用 SN1—10 型断路器。

计算数据如下:

$$\text{工作电压 } U_x = 10\text{kV}$$

$$\text{工作电流 } I_g = 144\text{A}$$

$$\text{短路电流 } I_s = 2.25\text{kA}$$

$$\text{短路容量 } S'' = 40.8\text{MVA}$$

$$\text{短路冲击电流 } i_{sh} = 5.74\text{kA}$$

$$\text{热稳定校验 } I_{\infty}^2 t_j = 11.14$$

所以, 选定的断路器为 SN1—10, 其参数如下:

$$\text{额定电压 } U_x = 10\text{kV}$$

$$\text{额定电流 } I_r = 400\text{A}$$

$$\text{额定断路电流 } I_{dn} = 20\text{kA}$$

$$\text{断流容量 } S_{dn} = 200\text{MVA}$$

$$\text{动稳定电流 } i_{max} = 52\text{kA}$$

$$\text{热稳定校验 } I_s^2 t = 14^2 \times 10 = 1960$$

因此, 所选断路器满足要求。

#### 四、高压隔离开关的选用

##### 1. 高压隔离开关的选择

高压隔离开关的选择, 除不考虑按额定断路电流或断流容量选择外, 其余与高压断路器的选择条件相同。

**例 7—7** 试选择例 7—6 中的变电所 10kV 侧隔离开关。

**解** 查高压隔离开关的技术数据, 可选用 GN2—10/400

型隔离开关。

计算数据如下：

工作电压  $U_e = 10\text{kV}$

工作电流  $I_e = 144\text{A}$

短路冲击电流  $I_{ch} = 5.74\text{kA}$

热稳定校验  $I_{\infty}^2 t_j = 8.86$

所以，选定的隔离开关为 GN2 10/400，其参数如下：

额定电压  $U_e = 10\text{kV}$

额定电流  $I_e = 400\text{A}$

动稳定电流  $I_{max} = 30\text{kA}$

热稳定校验  $I_t^2 t = 12^2 \times 4 = 576$

因此，所选隔离开关满足要求。

### 2. 高压隔离开关电动操作机构电动机功率的计算

$$P = \frac{Mn_e}{9555}, \quad M = \frac{k_1 M_{max}}{k_2 k_3}$$

式中： $P$ ——电动机功率(kW)

$n_e$ ——电动机额定转速(r/min)；

$M$ ——电动机输出力矩(N·m)；

$M_{max}$ ——操作过程中需要的最大输出力矩(N·m)；

$k_1$ ——安全系数，考虑破冰等取  $k_1 > 2$ ；

$k_2$ ——减速装置传动比；

$k_3$ ——电动机过载倍数，考虑短时工作，单相串激电动机

$k_3 > 2$ ，三相异步电动机  $k_3 = 1.8$ ，直流电动机  $k_3$

$= 1.5$ 。

### 五、高压负荷开关的选择

负荷开关的性能处于隔离开关和油开关(断路器)之间，它可以切断较大的负荷电流，但它不能切断短路电流，所以大多数情况下要和高压熔断器共同配合使用，后者用于切断短路电流。



高压负荷开关应按装置种类、构造型式(如户内、户外、是否带熔断器)、额定电压、额定电流等条件来选择,然后作短路时动稳定和热稳定校验。

### 六、高压熔断器的选用

高压熔断器用于高压输电线路、变压器及电流互感器等电气设备过载及短路保护

高压熔断器应按装置种类、构造型式(如户内、户外、固定型或自动跌落式、有限流作用或无限流作用)、额定电压、额定电流、额定断路电流或断流容量等条件来选择,并满足熔断器的特性—动作选择性。

#### 1. 按额定电压选择

$$U_e \geq U_g$$

式中: $U_e$ —熔断器的额定电压(kV);

$U_g$ —熔断器的工作电压,即线路额定电压(kV)。

充满石英砂且有限流作用的熔断器,应按 $U_e = U$ ( $U$ 为电网电压)来选择。如10kV的这种熔断器不可以用在6kV的电网,更不能用于高于其额定电压的电路内。

#### 2. 按额定电流选择

$$I_e \geq I_{ej} \geq I_g$$

式中: $I_e$ 、 $I_{ej}$ —熔断器和熔体的额定电流(A)。

在投入空载变压器、静止电容器时,还要避免正常的冲击电流引起熔断器的误动作。

#### 3. 按额定断路电流或断流容量选择

$$I_{dn} \geq I''(\text{或 } I_{0.2}), S_{dn} \geq S''(\text{或 } S_{0.2})$$

式中: $I_{dn}$ 、 $S_{dn}$ —熔断器在额定电压下的断路电流和断流容量(kA、MVA),可由产品目录查得;

$I''$  或  $(I_{0.2})$ ——安装地点发生三相短路时的次暂态短路电流(或 0.2s 短路电流)(kA);

$S''$ (或  $S_{0.2}$ )——三相短路容量(MVA)。

当熔断器铭牌上注有最初半周期内短路全电流的最大有效值时(进口的熔断器有这种可能),  $I_{dn} \geq I_{ch}$  或  $S_{dn} \geq S_{ch}$

#### 4. 所选熔断器应满足特性 - 动作选择性

(1) 熔断器熔体的熔断时间和电流关系曲线  $t = f(I)$  由制造厂提供。保护特性的选择应保证满足装设回路中前后保护动作时间的配合,即满足保护动作选择性的要求;同时,熔断器熔体的保护特性曲线必须处于被保护元件热特性曲线之下,这样才能起到保护作用。

要使熔断器的工作具有选择性,即在电路中最可能发生最大可能的短路电流的情况下,只有离短路点最近的熔断器熔断,必须满足如下条件:

$$S_1/S_2 \geq \alpha$$

式中:  $S_1$ 、 $S_2$ ——上级和下级熔断器熔体截面;

$\alpha$ ——为保证熔断器工作选择性的上、下级熔体的最小截面比,见表 7—56。

用表 7—56 换算变压器高低压侧熔体的工作选择性时,高压熔体的截面应乘上变比  $k$ ,即满足  $kS_1/S_2 \geq \alpha$ 。

(2) 高压熔断器熔体熔断时间应符合下述规定:

① 当通过熔体的电流为其额定电流的 130% 时,经过 1h 以上熔断;为 150% 时,经过 10 ~ 15min 熔断;为 200% 时,须在 1min 以内熔断。

② 保护电压互感器的熔断器只需按工作电压和断流容量

表 7—56 保证熔断器工作选择性的最小截面比  $\alpha$  值

最小截面比 $\alpha$ 上级熔断器 下级熔断器	有充填物的封闭式熔断器(下级)		无充填物的封闭式熔断器(下级)					
	下 级 熔 体 材 料							
	铜	银	锌	铝	铜	银	锌	铝
铜	1.55	1.33	0.55	0.2	1.15	1.03	0.4	0.15
银	1.73	1.55	0.62	0.23	1.33	1.15	0.46	0.17
锌	4.5	3.95	1.65	0.6	3.5	3.06	1.2	0.44
铝	12.5	10.8	4.5	1.65	9.5	8.4	3.3	1.2

上级熔体材料  
铜 银 锌 铝

进行选择,并应满足当通过熔体电流为 0.6 ~ 1.8 安范围时,其熔断时间不超过 1min。

③ 应注意当熔体长时间通过额定电流时,其最热点的温度,铜材料不应超过 250°C;锌及铝材料不应超过 200°C;铅材料不应超过 150°C。所以,熔体的额定电流最好取其最小熔断电流的 75%。

(3) 高压熔断器的时间—电流特性曲线:图 7—18 为 RN1 型限流式熔断器的时间—电流特性曲线;图 7--19 为 6 ~ 35kV 跌落式熔断器用熔丝的时间—电流特性曲线。

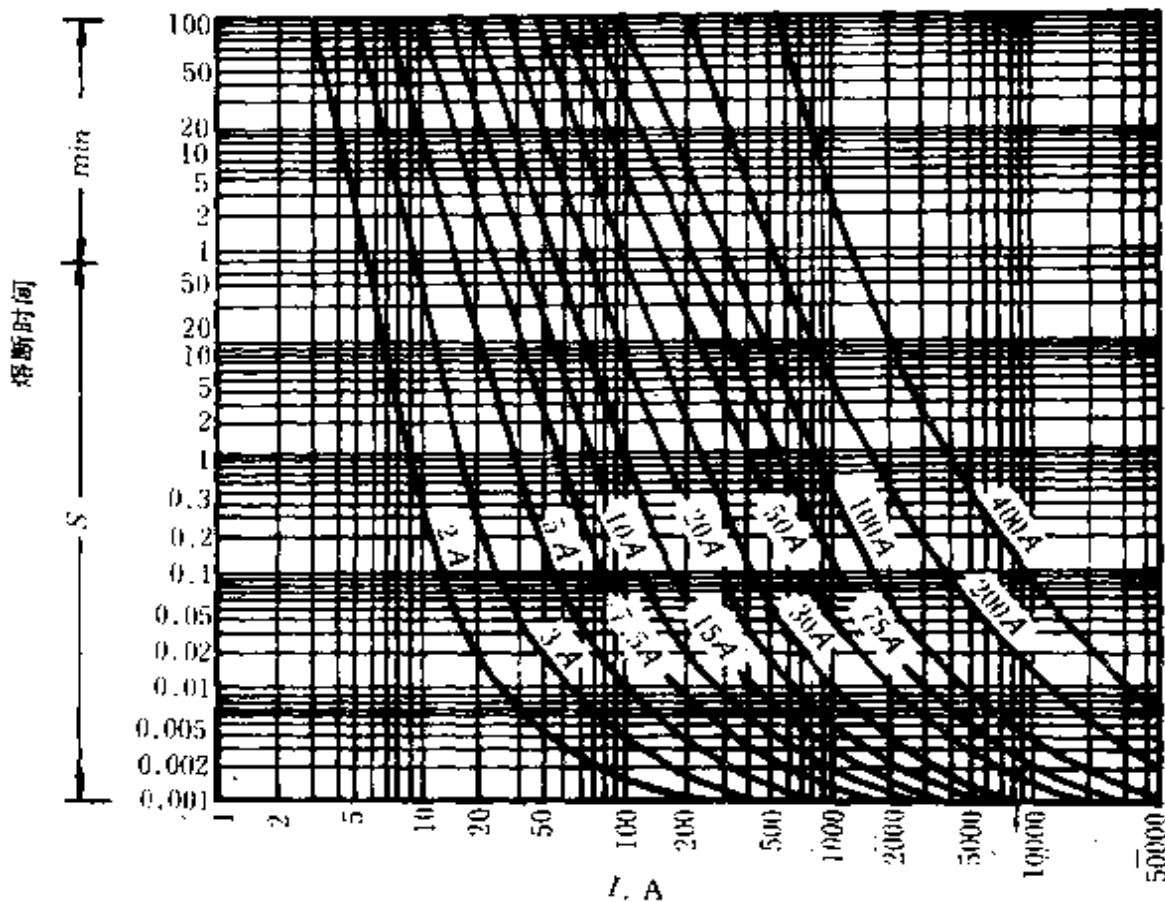


图 7-18 RN1 型限流式熔断器的时间—电流特性曲线

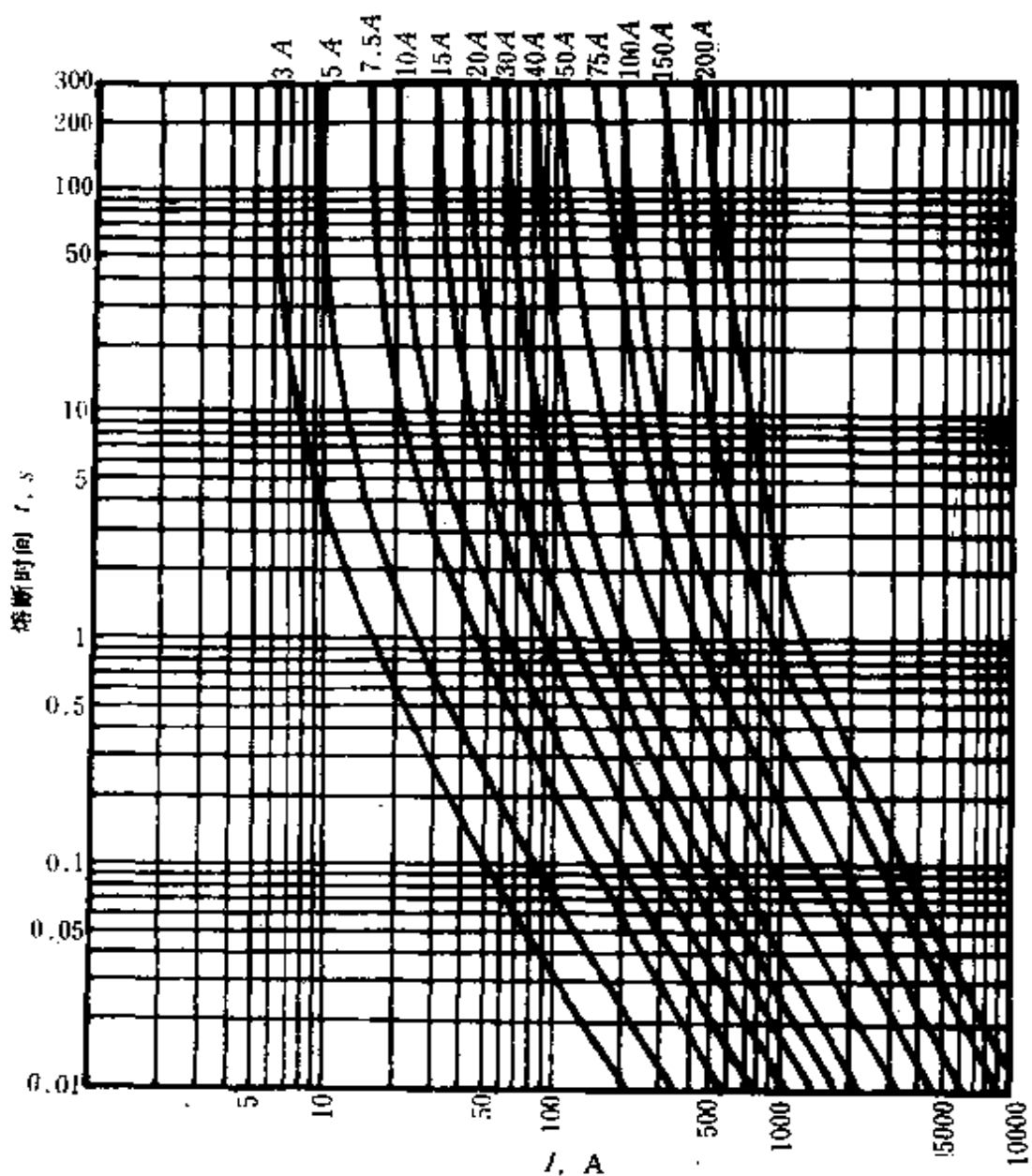


图 7—19 6 ~ 35kV 跌落式熔断器用熔丝的时间—电流特性曲线

### 第三节 低压电器的选用

#### 一、低压电器规范的选择条件

低压电器规范的选择条件,见表 7—57。

低压电器的选择条件

表 7—57

设备名称	选择条件		额定电压不小于回路工作电压	额定电流不小于回路计算工作电流	设备遮断电流不小于短路电流	设备动热稳定保证值不小于计算值	按回路启动情况选择
	公式	条件					
刀闸及组合开关			$U_n \geq U_B$	$I_n \geq I_g$	$I_{sh} \geq I''$ 或 $I_{ch}$		
熔断器			✓	✓	✓	✓	✓
	自动空气开关	DZ	✓	✓	$\geq I_{ch}$		✓
DW					$\geq I''$		
交流接触器及磁力起动器			✓	按电动机容量或电流选等级及型号		✓	

注:

① 低压设备的动热稳定及最大断流能力见产品技术数据,当采用电源变压器为 560kVA8% 或 320kVA5.5% 及以下时,缺乏技术资料时的刀闸(200A 及以上)、组合开关、接触器,可不校验动热稳定。

② 国产熔断器极限遮断电流系指超瞬变短路电流有效值  $I''$ ,如用  $I''$  校验后,可不用短路全电流最大有效值  $I_{ch}$  校。

## 二、自动开关的选用及计算

自动开关也称自动空气断路器,它能在供电系统中发生过载、短路和欠电压等情况下,自动切断电路,也可用于不频繁地起动电动机或接通、分断电路。

自动开关的分类见表 7—58;自动开关类型及适用场合见表 7—59;常用自动开关的性能及技术数据见表 7—60。

### 1. 一般选用条件

- (1) 自动开关的额定电压  $\geq$  线路额定电压;
- (2) 自动开关的额定电流  $\geq$  线路计算负荷电流;
- (3) 自动开关的脱扣器额定电流  $\geq$  线路计算负荷电流;
- (4) 自动开关的极限通断能力  $\geq$  线路中最大短路电流;
- (5) 线路末端单相对地短路电流不小于 1.25 倍的自动开关瞬时(或短延时)脱扣整定电流;
- (6) 自动开关欠电压脱扣器额定电压等于线路额定电压。

### 2. 配电用自动开关的选用原则

(1) 长延时动作电流整定值为导线允许载流量的 0.8 ~ 1 倍。

(2) 3 倍长延时动作电流整定值的可返回时间不小于线路中最大起动电流的电动机的起动时间;

(3) 短延时动作电流整定值不小于  $1.1(I_{jx} + 1.35kI_{edm})$ ,  $I_{jx}$  为线路计算负荷电流; $k$  为电动机的起动电流倍数; $I_{edm}$  为最大一台电动机额定电流;

(4) 短延时时间按被保护对象的热稳定校验;

(5) 无短延时时,瞬时电流整定值不小于  $1.1(I_{jx} + k_1kI_{edm})$ 。 $k_1$  为电动机起动电流的冲击系数,取 1.7 ~ 2。

如有短延时时,则瞬时电流整定值不小于 1.1 倍的下级开关进线端计算短路电流值。

### 3. 电动机保护用自动开关的选用



表 7—58 自动开关按保护特性及用途分类

分类名称	电流种类及范围	保 护 特 性		主要用途	
配 电 用 自 动 开 关	交流 200 ~ 5000A	选择型	二段保护	瞬时,短延时	电源总开关和 负荷近端支路开 关
			三段保护	瞬时,短延时及长 延时	
		非选择型	限流型	长延时,瞬时	支路近端开关和 支路末端开关
			一般型		
	直流 600 ~ 5000A	快速型	正向	保护硅整流设备	
			双向		
一般型	长延时	保护一般直流设备			
	瞬 动				
电 动 机 保 护 用 自 动 开 关	交流 60 ~ 600A	直接起动	过流脱扣器瞬动倍数 (8 ~ 15) $I_n$	保护鼠笼型电 动机	
		间接起动	过流脱扣器瞬动倍数 (3 ~ 8) $I_n$	保护鼠笼型和 绕线型电动机	
		限流式	过流脱扣器瞬动倍数 12 $I_n$	可装于变压器 近端	
照 明 用 自 动 开 关	交流 5 ~ 50A	过载长延时 短路瞬时(单极)		照明电路开关 信号二次回路	
漏 电 保 护 自 动 开 关	交流 5 ~ 200A	30mA, 1/10s 分断		保护人身安全 及防止漏电引起 火灾	
特 殊 用 途 的 自 动 开 关	交流 直流	瞬 动		灭磁开关 闭合开关	



表 7—59 自动开关类型和适用场合

类别	产品系列		适用场合
塑料外壳式	DZ5 系列	DZ(B)5 型(单极)	主要作开关板控制线路及照明线路的过载和短路保护
		DZ5—20 型(3极)	作电动机和其它电气设备的过载及短路保护,也可作小容量电动机不频繁的起停操作和线路转换之用
		DZ5—50 型(3极)	与 DZ5—20 相同,但容量比 DZ5—20 大一级,并可用于交流 500V 及以下电路中
		DZ10 系列	在低压交直流线路中,作不频繁接通和分断电路用;该开关具有过载和短路保护装置,用以保护电气设备、电机和电缆不因过载或短路而损坏
		DZ6、DZ12、DZ13 型	主要用于照明线路,作线路过载和短路保护,以及作线路不频繁分断和接通之用
		DZ13 系列	作为配电、电动机、照明线路的过载和短路保护及晶闸管交流侧的短路保护,也可用作线路不频繁转换及电动机不频繁起动
		S060 系列	该系列为引进技术小型开关,适用于交流 50、60Hz,电压 415V 及以下的线路,用于照明线路、电动机过载和短路保护
框架式	DW5 系列		有配电用和保护电动机用两种,分别作配电线路电源设备和电动机的过载、短路和欠电压保护;在正常条件下,也可分别用于电路的不频繁转换和电动机的不频繁起动
	DW10 系列		用于低压交直流配电线路;作过载、短路及欠电压保护,在正常条件下,也可用于不频繁转换电路之用

(续表)

类别	产品系列	适用场合	
框架式	DW15 系列	用于交流电压至 1140V, 电流至 1500A 的电路作配电和电动机保护, 有配电用开关和保护电动机用开关两种。分别用作配电线路电源设备和电动机的过载、短路及欠电压保护; 在正常条件下, 也可分别用于电路不频繁转换和电动机不频繁起动	
	新系列	用作主变压器和电路配电开关, 额定电流可达 4000A, 具有选择性保护	
直流快速	DS7 ~ DS9 系列 DS10 系列 DS11, DS12 系列	单向动作单 双向均可动作双 双向动作	用于大容量直流机组、硅整流供电装置和晶闸管整流装置等直流供电线路作过载、短路和逆流保护
限流式	DW × 15 系列 框架式	具有快速断开和限制短路电流上升的特点, 适用于可能发生特大短路的低压网络, 作配电和保护电动机之用; 在正常条件下, 也可用于线路不频繁转换和电动机不频繁起动	
	DZ × 1C 系列 塑料外壳式	在集中配电、变压器并联运行或采用环形供电时, 在要求高分断能力的分支线路中, 作为线路和电源设备的过载、短路和欠电压保护; 在正常条件下, 也可作线路的不频繁转换之用	
漏电保护	DZ15L 型	适用于电源中性点接地的电路, 作漏电保护, 也可作线路和电动机的过载及短路保护, 还可用于线路不频繁转换和电动机不频繁起动	
	DZ5—20L 型	与 DZ15L 相同, 但容量比 DZ15L 小一级, 额定电流仅 20A, 且无 4 极触头	

表 7—60 常用自动开关的性能及技术数据

类型	型号	额定 电流 (A)	机械寿命 电寿命 (万次)	过电流脱 扣器范围 (A)	通断能力						备注	
					交 流			直 流				
					电压 (V)	电流(kA) (有效值)	cosφ	电压 (V)	电流 (kA)	时间常数 (s)		
万 能 式	DW10	200	1/0.5	100 ~ 200	10				10			电 动 操 作
		400		100 ~ 400	15			15				
		600		400 ~ 600	15			15				
		1000	0.5/0.25 0.2/0.1	400 ~ 1000	20	380	0.4	440	20	0.01		
		1500		1000 ~ 1500	20			20				
		2500		1000 ~ 2500	30			30				
		4000		2000 ~ 4000	40			40				
		DW5	400	200 ~ 400	20					40		
1000	400 ~ 1000		40			0.4	440	40	0.01			
1500	1000 ~ 1500		40					40				

(续表)

类型	型号	额定 电流 (A)	机械寿命 电寿命 (万次)	过电流脱 扣器范围 (A)	通断能力								备注		
					交流				直流						
					电压 (V)	电流(kA) (有效值)	cosφ	电压 (V)	电流 (kA)	时间常数 (s)					
万能式		200	2/1	100 ~ 200	380	25/0.4	0.35								
					660	10	0.3								
	DW15	400	1/0.5	200 ~ 400	380	25/0.8	0.35								
					660	15	0.3								
			600	1/0.5	300 ~ 600	1140	10	0.3							
						380	30/12	0.35							操 电 动 导 作 半 脱 扣 体 器
塑壳式	DZ10	100	1/0.5	15 ~ 20 25 ~ 50	380	7						7			
		250	0.8/0.4	60 ~ 100		9						9			
	600	0.7/0.2	100 ~ 250 200 ~ 600		12	0.4		220			12				
					30						20				
					50						50				
		DZ5	10	2/1.2	0.5 ~ 10 0.15 ~ 20	单相 220 单相 220	1								
		25	5/5	10 ~ 50	380	2	0.7	220				1.2			
		20			380	1.2									
		50			380	1.2									能 断 的 电 峰 通 力 流 值

(续表)

类型	型号	额定电流 (A)	机械寿命 电寿命 (万次)	过电流脱扣器范围 (A)	通断能力						备注
					交流			直流			
					电压 (V)	电流 (kA) (有效值)	$\cos\varphi$	电压 (V)	电流 (kA)	时间常数 (s)	
直流快速	DS7-10/15	1000	0.2/	1000 ~ 2000				1500	20	$2 \times 10^6$	单向动作
	DS7-20/15	2000	0.2/	2000 ~ 4000			1500	20	$2 \times 10^6$		
	DS7-30/15	3000	0.2/	3000 ~ 6000			1500	20	$2 \times 10^6$		
	DS8-3/8	300	0.2/	200 ~ 500			750	10	$2 \times 10^6$	单向动作	
	DS8-6/8	600	0.2/	500 ~ 1200			750	10	$2 \times 10^6$		
	DS8-6/15	600	0.2/	500 ~ 1200			1500	10	$2 \times 10^6$		
	DS11	6000	0.2/	4800 ~ 9600			750	55	$10 \times 10^6$	双向动作	
	DS10	1000	2000	0.2/				825	80	$5 \times 10^6$	不包括电容器重量
								1500	50	$3 \times 10^6$	
825								80	$5 \times 10^6$		
3000								1500	50	$3 \times 10^6$	
								825	80	$5 \times 10^6$	
								1500	50	$3 \times 10^6$	

- (1) 长延时电流整定值等于电动机额定电流；
- (2) 6 倍长延时电流整定值的可返回时间  $\geq$  电动机实际启动时间；
- (3) 鼠笼型瞬时整定电流为 8 ~ 15 倍脱扣器额定电流；绕线型瞬时整定电流为 3 ~ 6 倍脱扣器额定电流。

#### 4. 照明用自动开关的选用

- (1) 长延时电流整定值不大于线路计算负荷电流；
- (2) 瞬时电流整定值等于 6 倍的线路计算负荷电流。

#### 5. 与相邻电器保护特性配合的要求

- (1) 长延时特性低于被保护对象(电缆、电线、电动机、变压器)的允许过载特性；
- (2) 短延时脱扣器与一次侧过电流保护继电器的配合级差,视不同保护继电器而定；
- (3) 过电流脱扣器保护特性低于一次侧熔断器的熔化特性；
- (4) 上级自动开关的保护特性和下级自动开关的保护特性不能相交；
- (5) 上级自动开关短延时整定电流不小于 1.2 倍下级自动开关的短延时或瞬时(或下级无短延时)整定电流；
- (6) 上级自动开关瞬时整定电流不小于自动开关的延时通断能力不小于 1.1 倍下级自动开关进线处的短路电流；
- (7) 具有短延时的自动开关如带欠压脱扣器,则欠压脱扣器必须是延时的,其延时时间不小于短路延时时间。

**例 7—8** 某供电系统如图 7—20 所示,已知变压器容量  $S_0$  为 630kVA,额定电流  $I_0$  为 910A,阻抗电压  $U_d\%$  为 4.5;线路负荷  $I_L$  为 320A,电动机额定功率  $P_{ed}$  为 45kW,额定电流  $I_{ed}$  为 85.4A,起动电流倍数  $k$  为 6.5;短路电流计算结果标于图上,试选择开关  $Q_1$ 、 $Q_2$  和  $Q_3$ 。

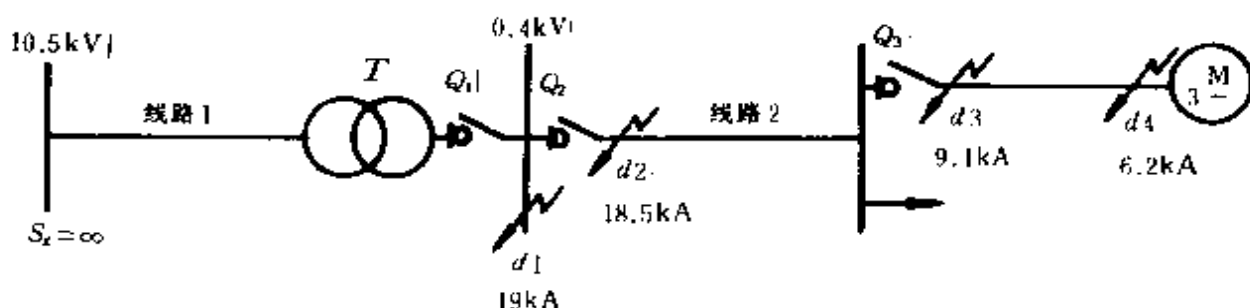


图 7—20 供电系统图

解

(1) 选择自动开关  $Q_3$ :按电动机保护用自动开关选用。查产品目录,  $DW_5-400A$  能满足要求(没有更小的型号)。因电动机额定电流为  $85.4A$ ,所以脱扣器额定电流选用  $100A$ 。

长延时动作电流整定在  $100A$ ,瞬时动作电流整定在  $12 \times 85.4 = 1025A$ ,取  $1200A$ ,此值小于  $I_{de} = 6.2kA$ 。

6 倍长延时动作电流整定值的可返回时间取  $3s$ 。

(2) 选择自动开关  $Q_2$ :按配电用自动开关选用。由于线路负荷电流为  $I_{L2} = 320A$ ,短路电流为  $I_s = 18.5kA$ ,而开关  $Q_2$  的延时通断能力应大于  $11.2kA$ ,查产品目录,可采用  $DW_5-400A$  自动开关,其额定电流为  $400A$ ,瞬时通断能力为  $20kA$ ,延时通断能力为  $10kA$ 。脱扣器额定电流用  $300A$ 。

短延时取  $0.2s$ ,动作电流整定值为  $1.2 \times 1200 = 1440A$ ,取  $1500A$ 。

3 倍长延时动作电流整定值时可返回时间取  $8s$ (结合图 7—21 确定)。

瞬时动作电流可整定在  $10kA$ 。

(3) 选择自动开关  $Q_1$ :由于变压器额定电流为  $910A$ ,故选用  $DW_5-1000A$  自动开关。查产品目录可知,其延时通断能力

为 20kA, 瞬时通断能力为 40kA, 可满足  $I_{d1} = 19\text{kA}$  的要求。

瞬时动作电流整定值取 18kA。

短延时取 0.4s, 动作电流整定值  $\geq 1.1(I_{ix} + 1.35kI_{edm}) = 1.1 \times (910 + 1.35 \times 6.5 \times 85.4) \approx 1825\text{A}$ , 取 2000A。

3 倍长延时动作电流整定值时的可返回时间取 15s (结合图 7-21 确定)。

各级自动开关的选定汇于表 7-61 中, 它们的保护特性配合曲线见图 7-21。

表 7—61 各级自动开关的参数

自动开关符号	额定电流 (A)	长延时动作 整定电流 (A)	短延时动作 整定电流 (A)	瞬时动作 整定电流 (A)
$Q_1$	1000	1000	2000	1800
$Q_2$	400	300	1500	—
$Q_3$	400	100	—	1200

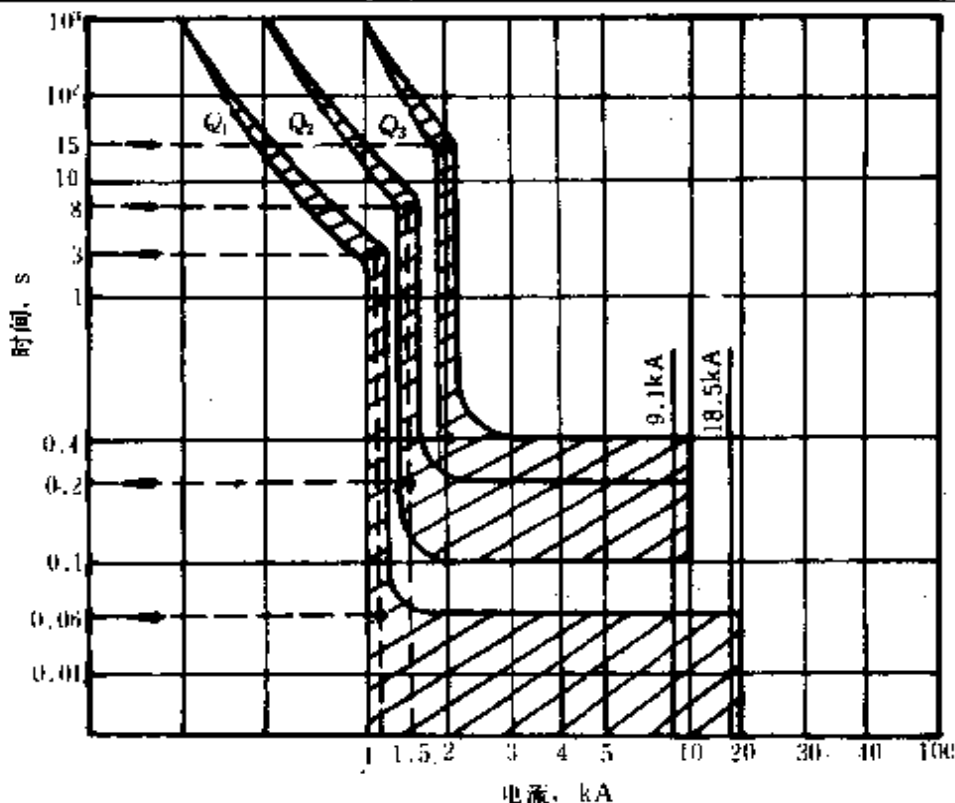


图 7—21 自动开关保护特性配合曲线



### 6. $S_{060}$ 型导线保护开关的选用

$S_{060}$  型导线保护开关,又称小型断路器,分 L 型——导线保护用(过载、短路保护);G 型——电动机保护用(过载、短路保护及不频繁起动)。脱扣器额定电流:L 型有 6、10、16、20、25 及 32A 等 6 种;G 型除上述 6 种外,还有 40A。

#### (1) $S_{050}$ 型保护开关的选用:

① 保护开关的额定电压不小于线路额定电压;  
② 保护开关的额定电流不小于线路计算负荷电流;  
③ 脱扣器的动作电流不大于照明线路允许长期负荷电流乘以允许短路时过载电流的倍数(导线保护用);

④ 脱扣器的动作电流大于电动机的起动电流(电动机保护用);

⑤ 保护开关的极限分断能力不小于安装处可能出现的最大短路电流;当不能满足时,应加装具有相应极限分断能力的熔断器;

⑥ 保护并关,根据环境温度不同,所能通过的最大电流的修正曲线,如图 7—22 ~ 图 7—26 所示;

⑦ 当环境温度为  $20^{\circ}\text{C}$ ,并关并列靠紧安装时,其所能通过的最大电流应按图 7—24 进行修正;

⑧ 控制白炽灯的选用曲线见图 7—25,额定电压为 220V,选用时要结合相应的保护特性;

⑨ 控制荧光灯的选用曲线见图 7—26,横轴 6—40 指 G 型开关,6—32 指 L 型开关。

#### (2) $S_{060}$ 型保护开关的技术指标:

① 极限分断能力  $I_f$ :单极的,交流 240/415V,50、60Hz,  $\cos\varphi = 0.8 \sim 0.9$  时,  $I_f \geq 3000\text{A}$ ;多极的,交流 415V,50、60Hz,  $\cos\varphi = 0.8 \sim 0.9$  时,  $I_f \geq 3000\text{A}$ 。

② 操作频率:按脱扣器额定电流  $I_n$  分,  $I_n \leq 20\text{A}$ , 240 次/h;

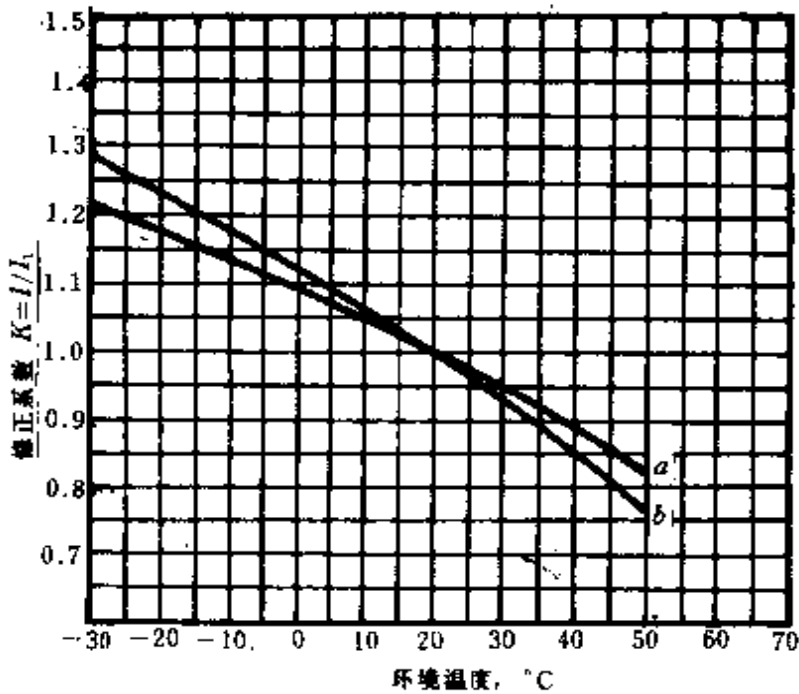


图 7-22 L 型导线保护开关修正曲线  
(a)L16 ~ L32 (b)L6 ~ L10

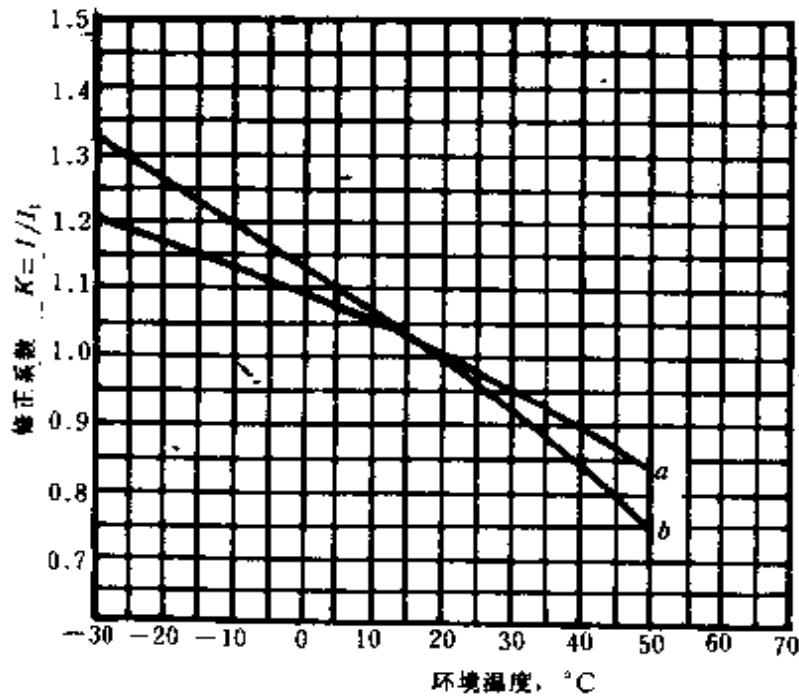


图 7-23 G 型导线保护开关修正曲线  
(a)G6 ~ G40 多极 (b)G6 ~ G40 单极

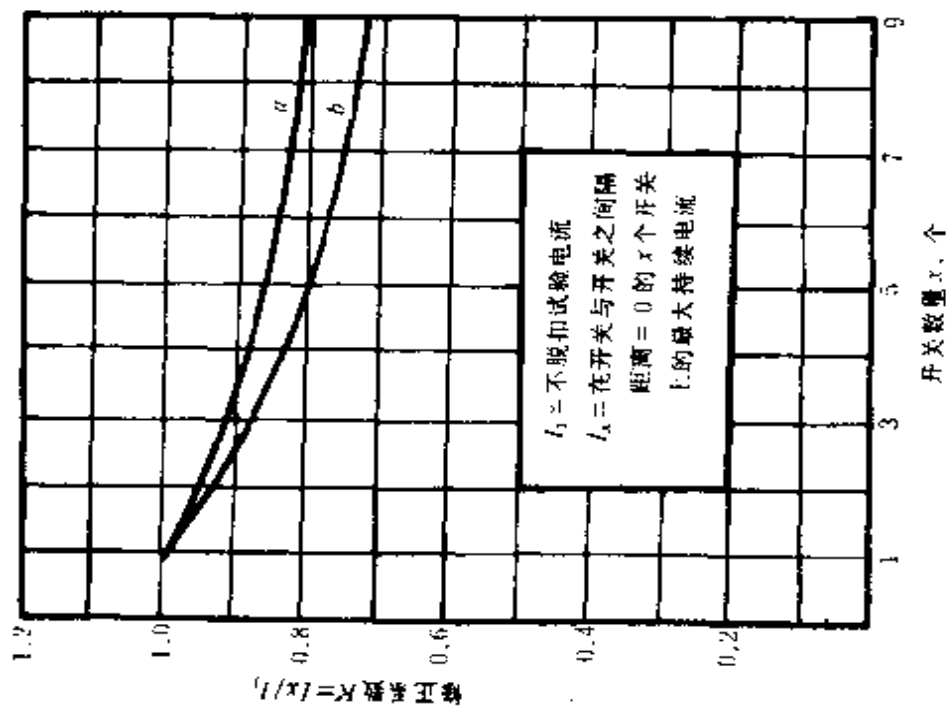


图 7-24 环境温度修正曲线

(a) L6~L12 (b) L16~L32; G6~G40

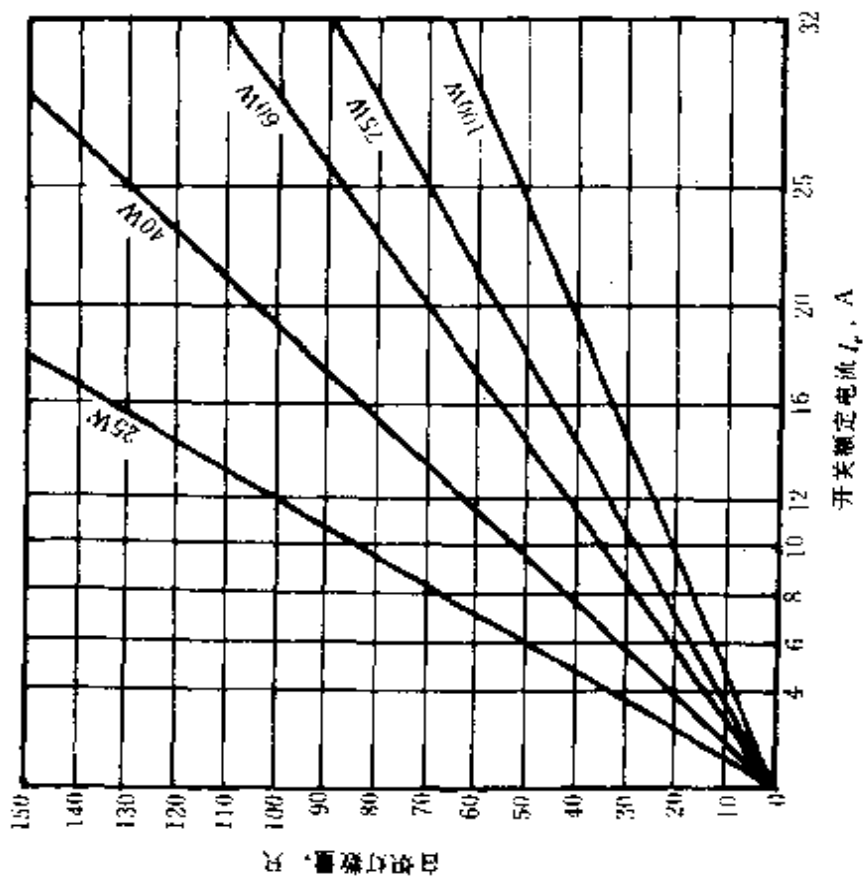


图 7 25 导线保护开关控制白炽灯选用曲线

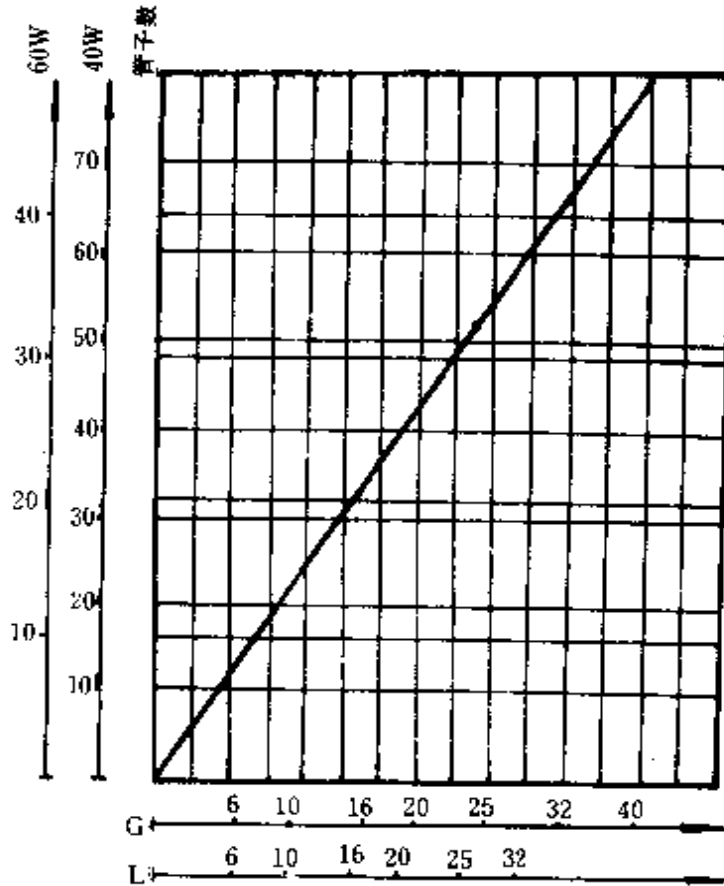


图 7 26 导线保护开关控制荧光灯选用曲线

$I_e \geq 25A, 120 \text{ 次/h}$ 。

③机械寿命:1000次(包括电寿命次数)。

④电寿命:按脱扣器额定电流  $I_e$  分,  $I_e \leq 20A$ , 不小于 8000 次;  $I_e \geq 25A$ , 不小于 6000 次。

⑤最大工作电压:交流 440V, 频率 50、60Hz。

⑥接线端子最大截面:10mm<sup>2</sup>。

⑦保护特性:L 型见表 7—62,G 型见表 7—63。

### 7. 自动开关与熔断器的配合使用

自动开关和熔断器作保护具有各自的优缺点,因此常常将两者串联起来使用。这样可达到既能自动操作又有较高分断能

表 7-62  $S_{060}$  导线保护开关 I 型保护特性

脱扣特性	脱扣器 额定电流 (A)	热 脱 扣			磁 脱 扣	
		脱扣器额定电流倍数				
L6 L10	6 10	$1.5 I_e$	$1.9 I_e$	$3.38 I_e$	$3.6 I_e$	$5.25 I_e$
L16 L20 L25	16 20 25	$1.4 I_e$	$1.75 I_e$	$3.15 I_e$	$3.35 I_e$	$4.9 I_e$
L32	32	$1.3 I_e$	$1.6 I_e$	$2.92 I_e$	$3.12 I_e$	$4.55 I_e$
起始状态		冷态	热态	冷态	冷态	冷态
动作时间		$>1h$	$<1h$	$1s \leq t < 60s$	$\geq 0.1s$	$<0.1s$

注：动作时间： $1s \leq t < 120s$ 。

表 7-63  $S_{060}$  导线保护开关 G 型保护特性

脱扣特性	脱扣器 额定电流 (A)	热 脱 扣		磁 脱 扣	
		脱扣器额定电流倍数			
G6~G40	6~40	$1.05 I_e$	$1.35 I_e$	$5 I_e$	$10 I_e$
起始状态		冷态	热态	冷态	热态
动作时间		$>1h$	$<1h$	$>0.5s$	$<0.5s$

表 7—64 脱扣器额定电流与不脱扣电流的关系

额定电流 $I_e$ (A)	6	10	16	20	25	32	40
不脱扣试验电流 $I_1$ (A)	9	15	22.4	28	35	41.5	52

力的目的。当过载或短路电流较小时,保护由自动开关担任,而当有较大的短路电流时,保护则由熔断器担任,熔断器作为自动开关的后备保护。

图 7—27 为自动开关与熔断器特性的配合图。图中  $I_s$  为交接电流,它相应于熔断器熔断特性上限与自动开关保护特性下限交点的电流值。当短路电流大于  $I_s$  时,必须保证熔断器在自动开关之前分断。为达到此目的,自动开关最好具有短延时(如 0.1s)的特性。

熔断器应尽可能装在自动开关的电源侧,以确保安全。

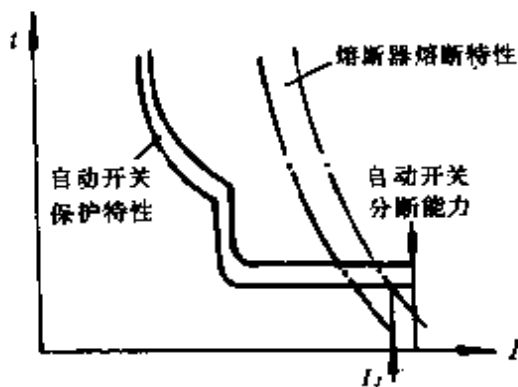


图 7—27 自动开关与熔断器特性的配合

### 8. 自动开关损耗计算

自动开关具有过电流线圈,同时开关触头具有接触电阻,因此当电流通过时会产生功率损耗。其损耗功率按下列公式计算

$$\Delta P = 3I^2(R_c + R_r), \Delta Q = 3I^2X$$

式中:  $\Delta P$ 、 $\Delta Q$  —— 自动开关的有功和无功损耗(W、Var);

$I$  ——通过开关的电流(A);

$R_c$  ——开关触头接触电阻( $\Omega$ ),见表 6—6;

$R_c, X$  ——电流线圈的电阻和电抗( $\Omega$ ),可由表 6—5。

### 三、刀开关和转换开关的选用

#### 1. 刀开关及带熔断器式刀开关的选用

刀开关主要用作隔离电源,但不能切断故障电流,只能承受故障电流引起的电动力和热效应。刀开关的选择如下:

(1)按额定电压选择:

$$U_r \geq U_g$$

式中: $U_r$  ——刀开关的额定电压(V);

$U_g$  ——刀开关的工作电压,即线路额定电压(V)。

(2)按额定电流选择:

$$I_r \geq I_g$$

式中: $I_r$  ——刀开关的额定电流(A);

$I_g$  ——刀开关的工作电流,即为所控制负载的电流总和(A),如果电路中有电动机, $I_g$  应按电动机的起动电流来计算。

(3)按动稳定和热稳定校验:计算方法同本章第一节电气设备发热计算。

HD、HS 系列低压刀开关主要技术数据见表 7—65。

带熔断器式的刀开关,有胶盖刀开关、负荷开关(铁壳开关)及刀熔开关等。选用条件基本上与刀开关相同。

#### 2. 转换开关的选用

转换开关可供几种电源或负载转换之用,它的选用较简单,只要根据电压、电流、控制功率、通断能力、电寿命等技术数据就可确定。

转换开关的电寿命取决于不同的使用条件,正常电寿命可达几万次,当使用条件恶化时,电寿命将显著降低。

转换开关的机械寿命,如 HZ<sub>5</sub> 系列,40A 以下等级为 100 万次,60A 为 10 万次,允许操作频率为 120 次/h。

表 7—65 低压刀开关主要技术数据

额定电流 (A)	分断能力 A		在交流 380V 和 60% 额 定电 流 时刀 开 关 的 电 寿 命 (次)	电动稳定性电流峰值		·秒钟 热稳定 性电 流 (kA)
	交流 380V cosφ— 0.7	直流 220V T=0.01		中央手 柄式 (kA)	杠杆操 作式 (kA)	
200	200	200	1000	20	30	10
400	400	400	1000	30	40	20
600	600	600	500	40	50	25
1000	1000	1000	500	50	60	30
1500	—	—	—	—	80	40

#### 四、熔断器的选用

熔断器通常作短路保护用,若作过载保护,则可靠性不高。熔断器的保护特性必须与被保护设备的过载特性有良好的配合。熔断器的额定电压应与相应的电网电压相配。

##### 1. 熔断器熔体的选择

熔断器熔体电流的选择应按正常工作电流、起动尖峰电流确定,并按短路电流校验其动作灵敏性。

(1) 按正常工作电流选择:

$$I_{er} \geq I_g$$

式中:  $I_{er}$ ——熔体的额定电流(A);

$I_g$ ——熔体的工作电流(线路计算电流)(A)。

(2) 按起动尖峰电流选择: 见下面介绍的各类设备的熔断器



选用。

(3)按短路电流校验动作灵敏性:

$$\frac{I_{d\min}}{I_{cr}} \geq K_r$$

式中: $I_{d\min}$ ——被保护线段最小短路电流(A),在中性点接地系统中为单相接地短路电流 $I_d^{(1)}$ ;在中性点不接地系统中为两相短路电流 $I_d^{(2)}$ ;

$K_r$ ——熔断器动作系数,一般为4;在Q—1、Q—2、G—1级爆炸危险的场所,取5。

RT0系列和RM系列熔断器的主要技术数据见表7—66和表7—67。

表7—66 RT0系列有填料熔断器主要技术数据

额定电压(V)	熔断器额定电流(A)	熔体额定电流(A)	分断能力(kA)
交流 380	50	5,10,15,20,30	交流 50( $\cos\varphi \leq 0.2$ )
	100	30,40,50,60,80,100	
	200	80,100,120,150,200	
	400	150,200,250,350,400	
	600	350,400,450,500,550,600	
直流 440	1000	700,800,900,1000	直流 25( $T \leq 15ms$ )
交流 660	100	30,60,80,100	$\cos(\varphi \leq 0.3)$
	200	100,120,160,200	
交流 1140	200	30,60,80,100,120,160,200	

表 7—67 无填料熔断器主要技术数据

型 号	额定电压 (V)	熔断器 额定电流 (A)	熔体电流 (A)	分断能力	
				(kA)	$\cos\varphi$
RM7	交流 220	15	2, 2.5, 3, 4, 5, 6, 10, 15	1.5	0.8
	交流 380	15	6, 10, 15	2	0.7
		60	15, 20, 25, 30, 40, 50, 60	5	0.5
		100	60, 80, 100	20	0.35
	直流 440	200	100, 120, 150, 200	20	0.35
		400	200, 250, 300, 350, 400	20	0.35
		600	400, 450, 500, 550, 600	20	0.35
RM10	交流 380	15	6, 10, 15	1.5	0.8
		60	15, 20, 25, 35, 45, 60	3.5	0.7
		100	60, 80, 100	10	0.35
		200	100, 125, 160, 200	10	0.35
		350	200, 225, 260, 300, 350	10	0.35
		600	350, 430, 500, 600	10	0.35
		1000	600, 700, 850, 1000	12	0.35

2. 各类设备的熔断器选用

(1) 单台电动机回路熔体的选择:

$$I_{er} \geq \frac{I_{qd}}{\alpha}$$

式中:  $I_{er}$  —— 熔体额定电流(A);

$I_{qd}$  —— 电动机的起动电流(A);

$\alpha$  —— 计算系数, 决定于起动状况和熔断器特性, 见表 7—68(或表 7—69)。

表 7—68 系数  $\alpha$  值

熔断器型号	熔体材料	熔体额定电流 (A)	$\alpha$ 值	
			电动机轻起动	电动机重起动
RT0	铜	50 及以下	2.5	2
		60~200	3.5	3
		200 以上	4	3
RM10	锌	60 及以下	2.5	2
		80~200	3	2.5
		200 以上	3.5	3
RL1	铜、银	60 及以下	2.5	2
		80~100	3	2.5
RC1A	铅、铜	10~200	3	2.5

注: ①该表系根据熔断器特性曲线分析而得。

②轻载起动时间按 6~10s 考虑, 重载起动时间按 15~20s 考虑。

表 7—69 系数  $\alpha$  值

起动时间(s)	$\alpha$ 值
3s 以下	2.86~4
3~8s	2~2.5
8s 或起动频繁或带反接制动者	1.67~2

(2) 配电线路熔体的选择:

$$I_{er} \geq \frac{I_{qd1} + I_{g(n-1)}}{\alpha}$$

式中:  $I_{qd1}$  —— 线路中起动电流最大一台电动机的起动电流 (A);

$I_{g(n-1)}$  —— 除起动电流最大的一台电动机以外的线路工作 (计算) 电流 (A);

$\alpha$  —— 同前。

(3) 照明线路熔体的选择:

$$I_{er} \geq \frac{I_z}{\alpha_m}$$

式中:  $\alpha_m$  —— 计算系数, 决定于电光源起动状况和熔断器特性, 见表 7—70。

表 7—70 计算系数  $\alpha_m$  值

熔断器型号	熔体材料	熔体额定电流 (A)	$\alpha_m$ 值		
			白炽灯、荧光灯、卤钨灯、金属卤化物灯	高压汞灯	高压钠灯
RL1	铜、银	$\leq 60$	1	0.59~0.77	0.67
RC1A	铅、铜	$\leq 60$	1	0.67~1	0.91

(4) 变压器高低压熔体的选择:

① 容量为 160kVA 的变压器, 其高压熔体按 2~3 倍额定电流选用; 容量为 160kVA 以上的变压器, 高压熔体按 1.5~2 倍额定电流选用。

② 变压器低压熔体可按其额定电流或过负荷 20% 选用。

常用保护三相电力变压器的熔体选择见表 7—71。

(5) 静电电容器组熔体的选择:

$$I_{er} \geq (1.5 \sim 2)I_{ec}$$

式中:  $I_{ec}$  —— 电容器组的额定电流(A)。

当熔体过细时还需考虑机械强度的要求, 一般不低于 5A。

(6) 变电站直流系统的各级熔体的选择: 熔断器的额定电压应与相应的回路的额定电压相配。其熔体选择如下:

① 直流电动机回路:

$$I_{er} = I_{qd}/K$$

式中:  $I_{qd}$  —— 直流电动机起动电流(A), 一般为 2.5~3 倍额定电流;

$K$  —— 配合系数, 一般取 3。

② 控制信号回路:

$$I_{er} = I_{max}/K$$

式中:  $I_{max}$  —— 最大负载电流(A);

$K$  —— 配合系数, 一般取 1.5。

直流 220V 时, 控制、信号回路熔断器配置, 见表 7—72。

③ 开关合闸回路: 按开关额定合闸电流的 0.25~0.3 倍来选择。其上一级合闸总电源的保险, 应按两个开关同时动作合闸来考虑保险的大小。

### 3. 快速熔断器的选用

快速熔断器主要用作硅整流元件、可控硅元件及其成套装置内部过电流保护。

表 7—71 变压器高低压熔体选择表

变 压 器 容 量 (kVA)	熔体额定电流选择值(A)							
	低压侧电压(V)				高压侧电压(kV)			
	120	220	380	500	3	6	10	35
5	25	15	10	—	3	2	—	—
10	50	25	15	—	5	3	2	—
20	100	50	30	25	10	5	3	—
30	150	80	50	30	15	7.5	5	—
50	250	125	80	50	20	10	7.5	3
63	300	150	100	80	20	10	7.5	3
80	400	200	125	100	30	15	10	5
100	500	250	150	125	40	20	15	5
125	2×300	300	200	150	50	30	20	7.5
160	2×400	400	250	175	75	40	20	7.5
200	2×500	500	300	250	75	40	30	10
250	3×400	2×350	400	300	75	40	30	10
315	3×500	3×300	500	350	100	50	40	15
400	4×400	3×400	2×300	500	100	50	40	15
500	—	—	—	—	150	75	50	20
630	—	—	—	—	150	75	50	20
800	—	—	—	—	200	100	75	30
1000	—	—	—	—	300	150	100	30
1250	—	—	—	—	300	150	100	30
1600	—	—	—	—	400	200	150	40

表 7—72 熔断器配置表

名 称	熔断器 型式	熔断器额定 电 流 (A)		用 途
		熔管	熔丝	
控制回路	R1	10	6	油开关
控制回路	RM10	15	5	空气开关
信号回路	R1	10	6	
有公用保护保险	RM10	25	15	
中央信号(预告)回路	RM10	25	15	
公用设备回路	R1	10	10	
隔离刀闸闭锁回路	R1	10	4	适用屋内配电装置
	RM10	15	6	适用屋外配电装置
母线隔离刀闸闭锁回路	R1	10	6	适用屋内装置
	RM10	15	6	适用屋外装置

(1)用于小容量变流装置

$$I_{cr} = 1.57I_F$$

式中： $I_{cr}$  ——快速熔断器额定电流有效值(A)；

$I_F$  ——可控硅正向平均电流(A)。

经验表明，当  $I_F \leq 200A$ ，且系统短路电流小于 4kA 时，按上式选用能达到可靠保护。

(2)用于大容量变流装置：大容量变流装置，桥臂由几个并联支路组成，每一支路由硅元件与快速熔断器组成。当一臂中有元件损坏产生短路时，与该元件串联的熔断器应迅速熔断切除故障，如要保护其他臂硅元件，应满足下式要求：

$$m \geq \frac{1}{K_i} \sqrt{\frac{A_r}{A_k}}$$

式中： $m$  —— 并联支路数；

$K_i$  —— 动态均流系数，一般取 0.5 ~ 0.6；

$A_r$  —— 熔断器最大熔断  $\int i^2 dt (A^2 \cdot s)$ ；

$A_k$  —— 硅元件浪涌  $\int i^2 dt (A^2 \cdot s)$ 。

RS0, RS3 系列快速熔断器主要技术数据见表 7-73。

### 五、熔断器的级间配合

#### 1. 熔断器级间配合计算

为满足选择性保护的要求，上下级熔断器应根据其保护特性曲线上的数据及其实际误差来选择。若两熔断时间的匹配裕度以 10% 来考虑，则应满足下式要求：

$$t_1 \geq \left( \frac{1.05 + \delta\%}{0.95 - \delta\%} \right) t_2$$

式中： $t_1$  —— 对应于故障电流值，从特性曲线查得的上一级熔断器的熔断时间；

$t_2$  —— 对应于故障电流值，从特性曲线查得的下一级熔断器的熔断时间；

$\delta\%$  —— 熔断器熔断时间误差，见产品目录，当没有给出时，一般可按 50% 考虑。

#### 2. 熔断器级间配合表

经过对熔断器保护特性曲线的分析比较，并考虑熔断时间的误差，绘制出熔断器级间配合表，见表 7-74。按表选择熔断器，即能满足选择性保护的要求。例如在短路电流为 2kA 时，熔体电流 40A 的上一级至少应为 80A；50A 的上一级至少应为 100A 等等。

#### 3. 几种常用熔断器的保护特性曲线



表 7 73 快速熔断器主要技术数据

系列型号	额定电压 (V)	熔断器 额定电流 (A)	熔体额定电流 (A)	极限分 断能力 (kA)	cosφ
RS0	500	50	30,50	50	0.3
		100	50,80,100		
		200	150,200		
		350	320		
		500	400,480		
	750	350	320,350		
RS3	500	50	10,15,20,30,40, 50	50	0.3
		100	80,100		
		250	150,200		
		320	250,300,320		
	750	200	150,200		
		300	200,300		
		350	320,350		

表 7—74 熔断器级间配合表

熔断器 额定电流 (A)	熔体额定 电流 (A)	短路电流(周期分量有效值)(kA)				
		1.0	2.0	4.0	6.0	10~25
100/30	30					
100/40	40					
100/50	50					
100/60	60					
100/80	80					
100/100	100					
200/120	120					
200/150	150					
200/200	200					
400/250	250					
400/300	300					
100/350	350					
400/400	400					
600/450	450					
600/500	500					
600/550	550					
600/600	600					

- (1)RT0 系列 380V 保护特性曲线:如图 7—28 所示。
- (2)RM7 系列 380V 保护特性曲线:如图 7—29 所示。
- (3)RS0 系列 500V 保护特性曲线:如图 7—30 所示。
- (4)RS3 系列 500V 保护特性曲线:如图 7—31 所示。

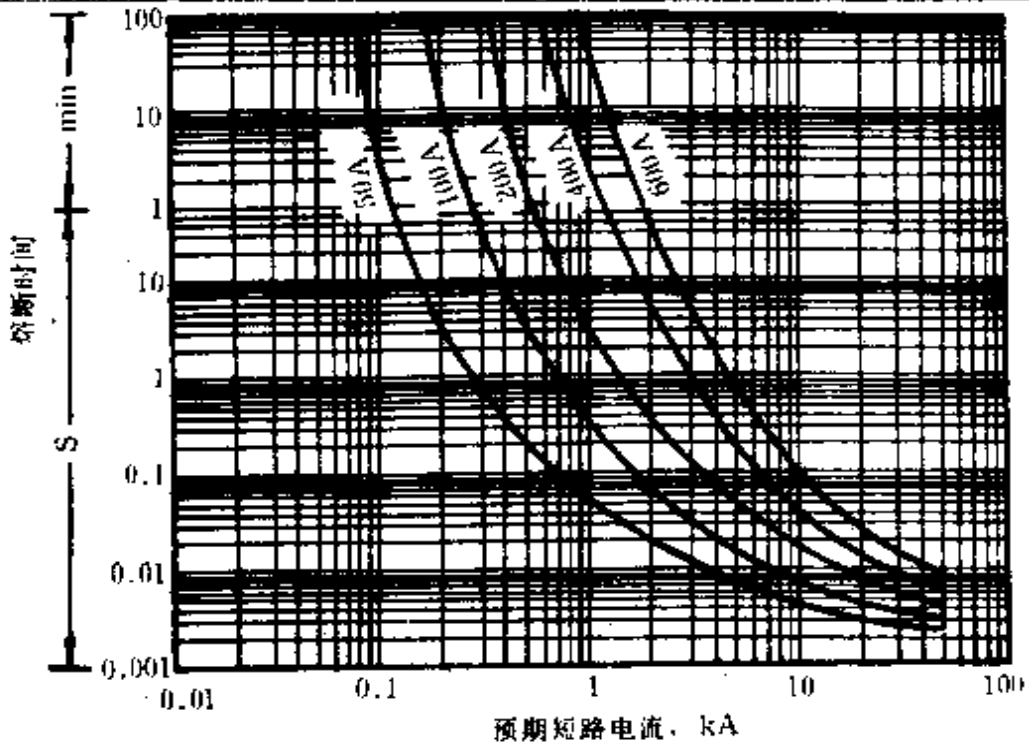


图 7-28 RT0 系列 380V 保护特性曲线

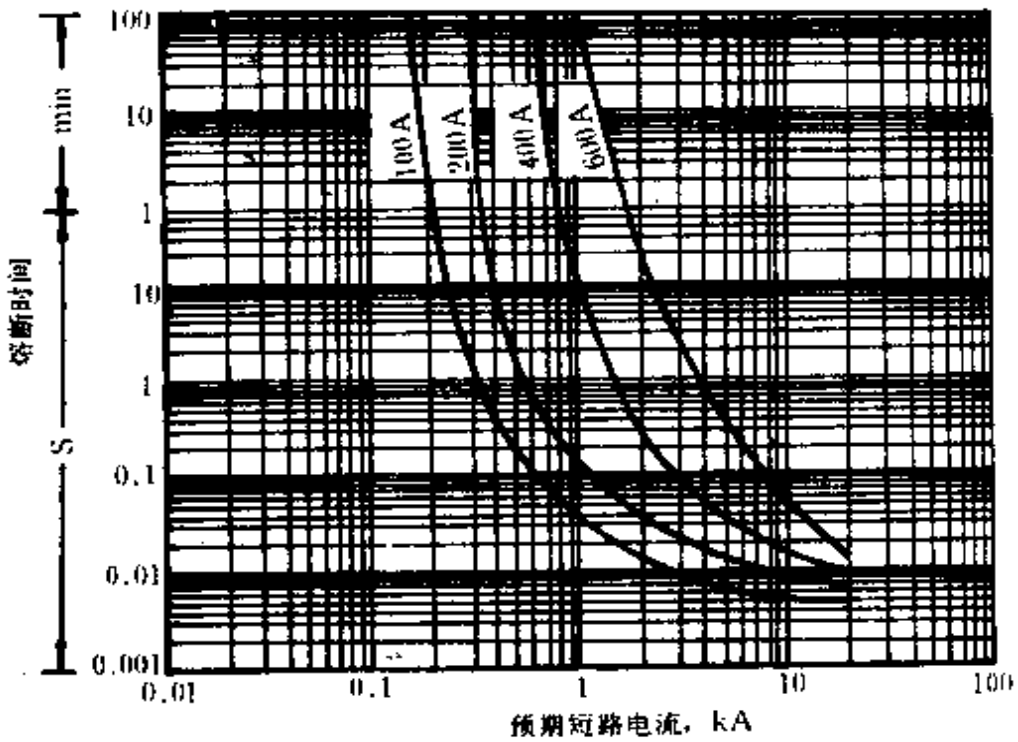


图 7-29 RM7 系列 380V 保护特性曲线

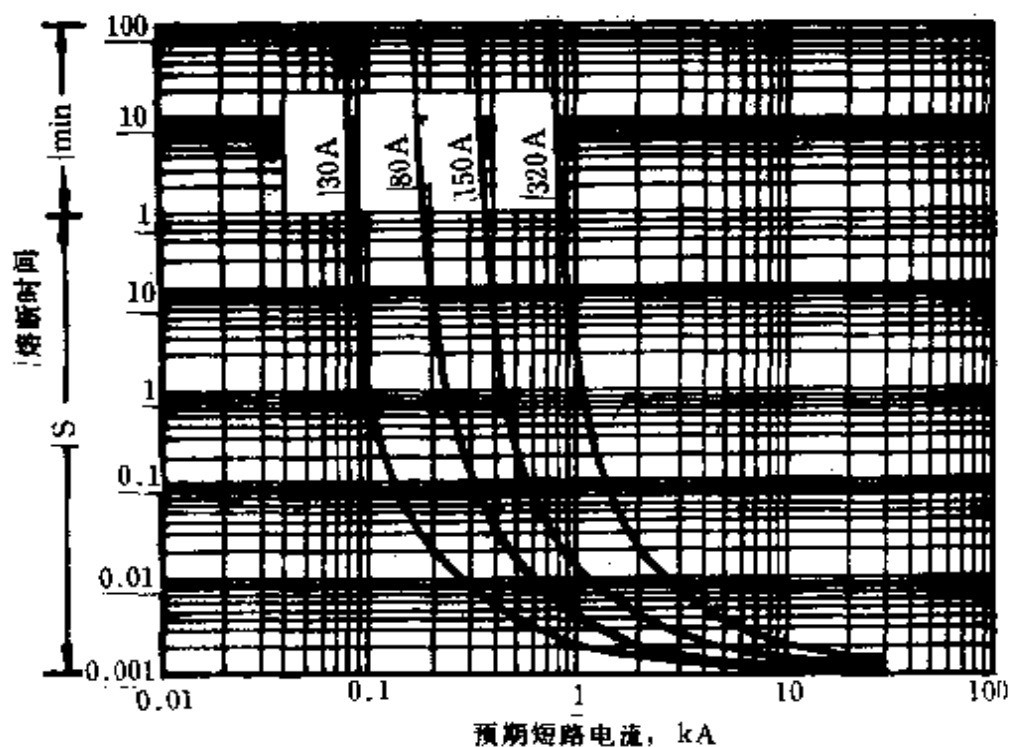


图 7-30 RS0 系列 550V 保护特性曲线

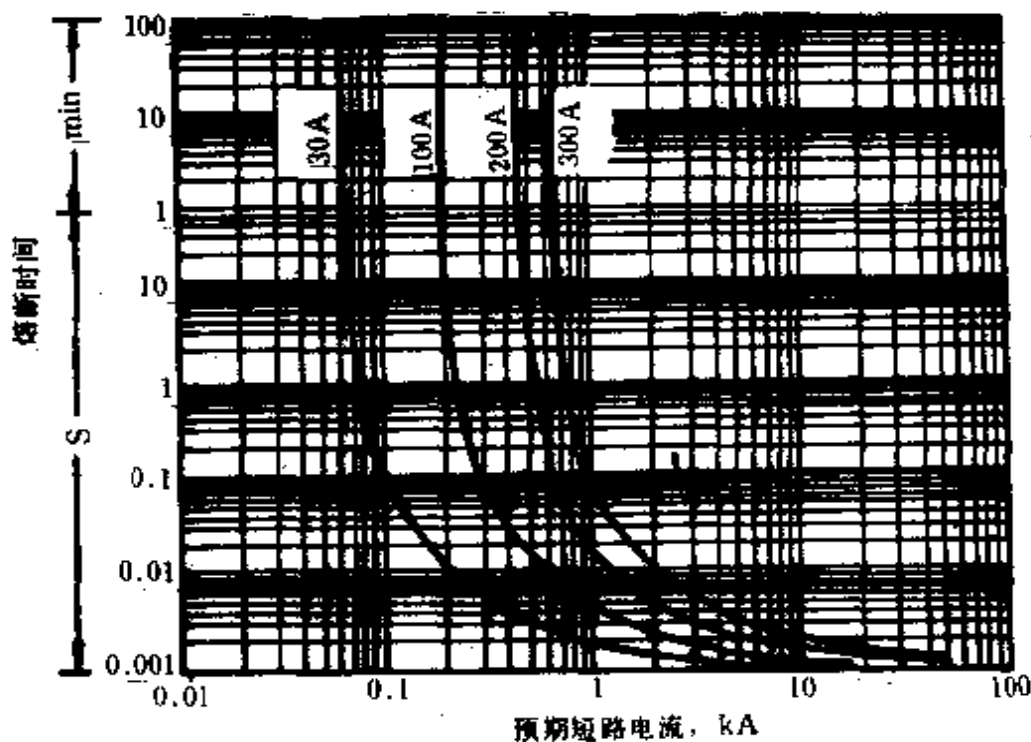


图 7-31 RS3 系列 500V 保护特性曲线

## 六、热继电器的选用及计算

### 1. 热继电器的选用

热继电器主要用作过载保护,最常用于交流电动机的过载保护,应根据电动机的工作环境、起动情况及负载性质来选用。

(1)长期工作或间断长期工作电动机保护用热继电器的选用:

①按电动机的起动时间选择:一般热继电器在  $6I_e$  下的可返回时间与动作时间有如下关系( $I_e$  为热元件的额定电流):

$$t_f = (0.5 \sim 0.7)t_d$$

式中: $t_f$ ——热继电器在  $6I_e$  下的可返回时间(s);

$t_d$ ——热继电器在  $6I_e$  下的动作时间(s)。

按电动机的启动时间,选取  $6I_e$  下具有相应可返回时间的热继电器,见表 7-76。

②按电动机的额定电流选择:

$$I_z = (0.95 \sim 1.05)I_{ed}$$

式中: $I_z$ ——热继电器整定电流(A);

$I_{ed}$ ——电动机额定电流(A)。

③按断相保护要求选择:对于星形接法电动机,采用 3 极热继电器即可;对于三角形接法电动机,应采用带断相运转保护装置的热继电器。

热继电器的特性见表 7-75~表 7-77。

电动机在运行中缺相,可能是电动机输入端直接断相(如熔体熔断)或者是  $\Delta$  接线电动机内部断相(如绕组内部开路或星三角起动器的某触头接触不良引起),如图 7-32 所示。

缺相时流过电动机的电流、热继电器中的电流以及热继电器保护情况,见表 7-78。

表 7-75 热继电器控制触头的通断能力

触头种类		常闭触头		常开触头	
		220	380	220	380
工作电压(V)		220	380	220	380
额定电流(A)		5		1.5	
通断能力 (A)	分断 $\cos\varphi=0.2$	3	2		
	接通 $\cos\varphi=0.2$			5	5

表 7-76 三极动作特性

序 号	整定电流	动作时间		试验条件
1	$1.0I_e$	不动作		冷态
2	$1.2I_e$	$<20\text{min}$		热态
3	$1.5I_e$	$<3\text{min}$		热态
4	$6.0I_e$	可返回时间 $t_f$	$\geq 3\text{s}$ $\geq 5\text{s}$ $\geq 8\text{s}$	冷态
5	三极热继电器如二极通电,则本表第 2 栏规定的整定电流允许升高 10%			

注:当试验地点海拔高度  $h \leq 1000$  米时,试验的周围空气温度为  $40^\circ\text{C}$ 。

表 7—77 断相保护动作特性

序 号	整定电流		动作时间	试验条件
	任意 2 极	第 3 极		
1	$1.0 I_e$	$0.9 I_e$	不动作	冷 态
2	$1.15 I_e$	0	$< 20\text{min}$	热态 (以序 1 电流加热稳定后开始)

注：同表 7—76 注。

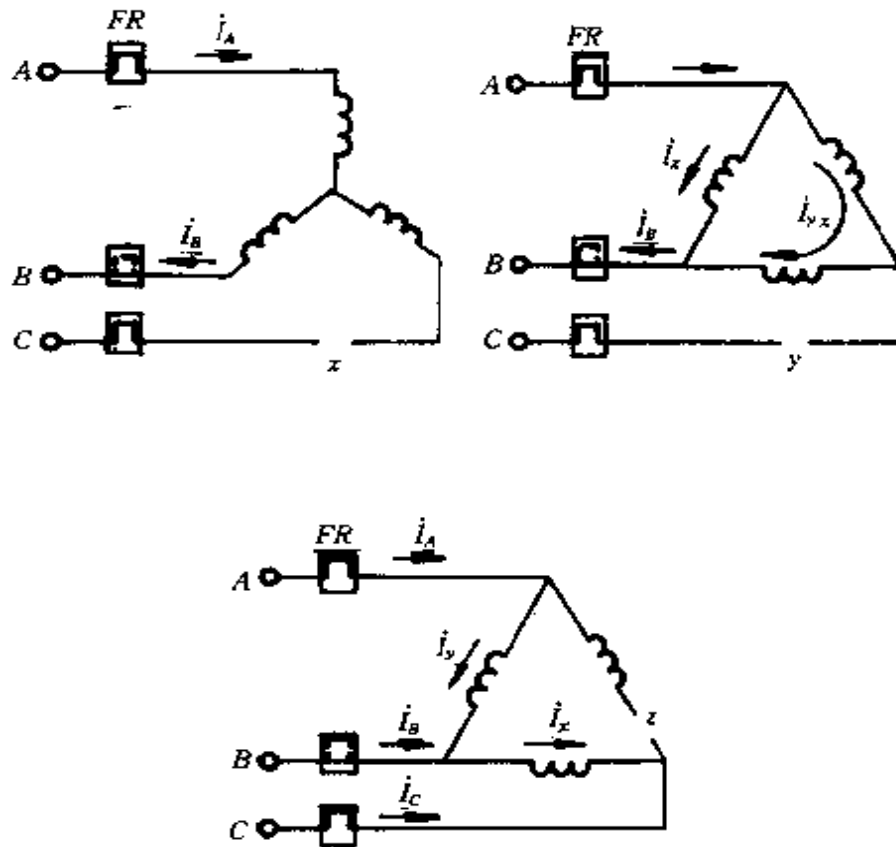


图 7—32 各种缺相情况

表 7—78 对于各种缺相情况热继电器保护能力

序号	电动机接线方式	负载率 (%)	动作条件 (参图)	线电流的最大值 (对额定线电流的百分数) (%)	电动机绕组电流的最大值 (对额定相电流的百分数) (%)	流过热继电器的电流 (对整定电流的百分数) (%)			热继电器能否动作		
						2 元件	3 元件	2 元件	3 元件	带断相保护器	
1	Y, Δ	100	正常三相	100	100	100	100	不动作	不动作	不动作	不动作
2	Y	100	x 点断路	173	173	173	173	能	能	能	能
3	Δ	100	y 点断路	173	200	173	173	能	能	能	能
4	Δ	100	z 点断路	150	150	87	150	不	不	能	能
5	Δ	80	z 点断路	120	120	69	120	不	尚	能	能
6	Δ	85	y 点断路	147	170	147	147	能	能	能	能
7	Δ	78	y 点断路	135	156	135	135	能	能	能	能
8	Δ	66	y 点断路	114	132	114	114	不	不	不	不

注:热继电器能否动作根据表 7—71、表 7—72,即缺相时,2 热元件热继电器按 132%,3 热元件按 120%,带断相保护器按 115%来决定。



(2)反复短时工作电动机保护用热继电器的选用:可根据电动机的起动参数和通电持续率按图 7—33 查得热继电器用于该电动机的每小时允许操作次数。图中所选用符号意义见表 7—79。

该图所求的每小时允许操作次数仅用于 JR0 系列同类参数的双金属片式热继电器。要求操作频率较高时,可选用带速饱和电流互感器的热继电器。

**例 7—9** 已知  $k_q = 6.5$ ,  $k_d = 0.9$ ,  $t_1 = 1.2s$ ,  $k_z = 1$ ,  $TD = 40\%$ , 求热继电器用于该电动机的每小时允许操作次数。

**解**

(1)在  $k_q/k_d$  轴上取  $k_q/k_d = 6.5/0.9 = 7.2$  ( $a$  点), 在  $t_1$  轴上取  $t_1 = 1.2s$  ( $b$  点), 连接  $ab$ 。

(2)在  $k_z/k_d$  轴上取  $k_z/k_d = 0.9/0.9 = 1$  ( $c$  点), 连接  $mc$ 。

(3)在  $TD$  轴上取  $TD = 40\%$  ( $d$  点), 作  $de$  平行于  $mc$ , 交  $k_z/k_d$  轴于  $e$  点。

(4)过  $e$  作  $ef$  平行于  $ab$ , 在  $Z$  轴上交于  $f$  点, 得  $Z = 45$  次/h。

因此热继电器用于该电动机的每小时允许操作次数为 45 次/h。

## 2. 热继电器主要技术参数

(1)控制触头通断能力:见表 7—75。

(2)动作特性:见表 7—76 和表 7—77。

(3)温度补偿范围:一般为  $+40 \sim -25^\circ\text{C}$ 。

(4)热元件的热稳定性:热元件额定电流大于 100A 时通以 8 倍整流电流, 小于或等于 100A 时通以 10 倍整定电流, 热继电器应能可靠动作 5 次而不损坏。

(5)控制触头寿命:一般用途的热继电器为 1000 次。

(6)复位时间:自动复位时间不大于 5min, 手动复位时间不

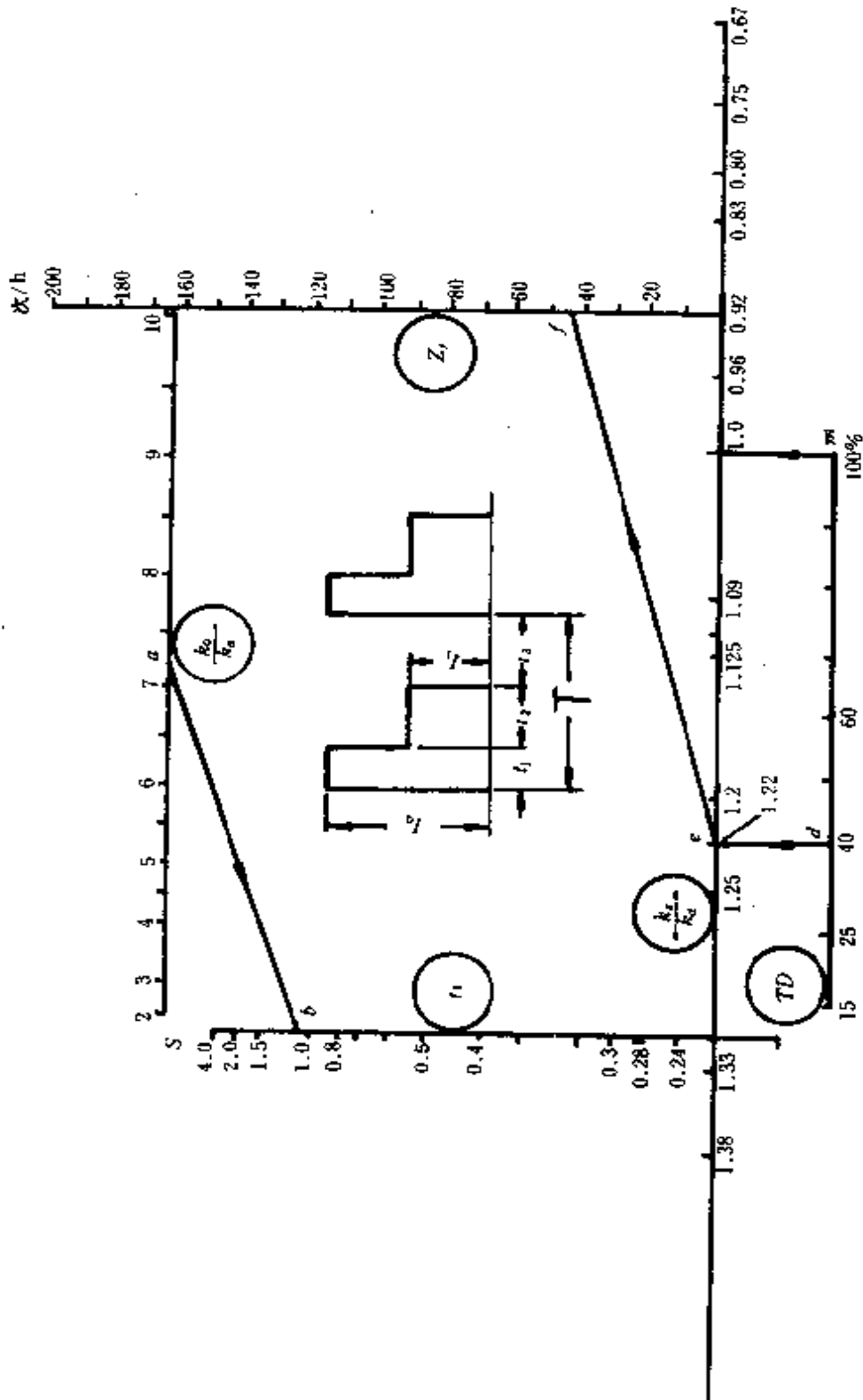


图 7-33 双金属片式热继电器反复短时工作每小时允许操作次数选用图

表 7—79 热继电器反复短时工作选用图符号表

序号	符号	意义	计算式
1	$k$	选用系数	0.8 ~ 0.9
2	$k_0$	电动机起动电流倍数	$k_0 = I_0 / I_{ed}$
3	$k_d$	电动机负载电流倍数	$k_d = I_1 / I_{ed}$
4	$t_1$	电动机起动时间(s)	
5	$I_{ed}$	电动机额定电流(A)	
6	$TD$	通电持续率(%)	$TD = \frac{t_1 + t_2}{t_d} \times 100\%$
7	$I_z$	热继电器整定电流(A)	
8	$k_z$	热继电器整定电流倍数	$k_z = I_z / I_{ed}$
9	$I_0$	电动机起动电流(A)	
10	$I_1$	电动机负载电流(A)	

注：选用图中取  $k = 0.9$ 。

大于 2min。

(7) 电流调节范围：约 66 ~ 100% 左右，最大为 50 ~ 100%。

### 3. 热继电器双金属片的自由行程和有效行程的计算

(1) 双金属片的自由行程计算：如图 7—34 所示，当没有外力作用时，可按下式计算一端固定的双金属片的自由弯曲行程  $\Delta f_i$ ：

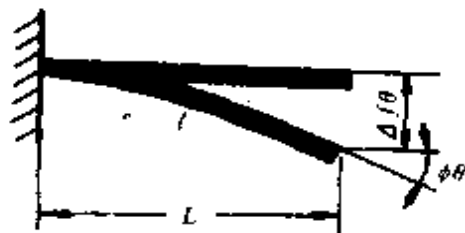


图 7—34 一端固定的双金属片的弯曲

$$\Delta f_i = \frac{K(t - t_0)L^2}{\delta}$$

偏转角  $\varphi$  :

$$\varphi = \frac{2K(t - t_0)l}{\delta}$$

式中:  $K$  —— 比弯曲 ( $\times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ );

$L$  —— 双金属片的有效长度 (mm);

$l$  —— 双金属片的实际长度 (mm);

$\delta$  —— 双金属片的厚度 (mm);

$t$  —— 双金属片的动作温度 ( $^{\circ}\text{C}$ );

$t_0$  —— 双金属片的周围环境温度 ( $^{\circ}\text{C}$ )。

双金属片动作温度不应超过其线性温度范围的上限温度,如 5J11、5J18、5J101 型不应超过  $180^{\circ}\text{C}$ ; 5J16 型不应超过  $200^{\circ}\text{C}$ 。

双金属片的行程,一般在最小刻度电流位置时,尽可能不小于  $0.8\sim 1\text{mm}$ 。

(2) 双金属片的有效行程计算: 双金属片要与电阻元件夹持在一起组成热元件,这时双金属片的实际行程(即有效行程)  $\Delta f_{uz}$  为

$$\Delta f_{uz} = \eta \Delta f_i$$

式中:  $\eta$  —— 双金属热元件的弯曲系数,复合式可取  $0.7\sim 0.9$ 。

### 七、接触器的选用及计算

接触器是电力拖动和自动控制系统中应用最广的电器。

#### 1. 交流接触器的选用

交流接触器应按使用类别,工作电压、容量,工作制及操作

频率、电寿命等进行选用。

(1)按使用类别选用:交流接触器可分为轻任务(一般任务)和重任务两类。轻任务接触器如 CJ8、CJ10 等系列;重任务接触器如 CJ12、CJ15、CJ20 系列。交流接触器的使用类别如下:

①AC-1 系列:无感或微感负载、电阻炉、钨丝灯;

②AC-2 系列:绕线型电动机的起动、反接制动与反向、密接通断;

③AC-3 系列:鼠笼型电动机的起动、运转中分断;

④AC-4 系列:鼠笼型电动机的起动、反接制动与反向、密接通断。

交流接触器不同使用类别的操作条件,见表 7-80。

用于 AC-1 类负载时,所选接触器的额定电流与负载电流相近。

用于 AC-2、AC-3 类负载时,可选用 CJ8、CJ10、CJ20 系列。

用于 AC-2 类负载时,如电动机功率大于 20kW,可选用 CJ12、CJ15、CJ20 系列,其额定电流与负载电流相近。

用于 AC-4 类负载时,可选用 CJ12、CJ15、CJ20 系列,按适当降低接触器的控制容量来选用。

代换产品 CJ20 系列交流接触器的性能及技术数据,见表 7-80。

(2)按降低接触容量选用:对于动作频繁且重载工作的接触器,如行车、机床用接触器,可降容使用,以免接触器触头损坏。这时接触器的工作电流可按以下经验公式计算:

$$I_c = \frac{P_c}{1.3K_c U_c} \times 10^3$$

表 7-80 交流接触器不同使用类别的操作条件

验证各使用类别额定接通与分断能力的接通与断开条件									
使用类别	额定工作电流 (A)	接 通			断 开			$f_{\Sigma}$ (kHz)	$\gamma^{(2)}$
		$I/I_c$	$U/U_c$	$\cos \varphi \pm 0.05$	$I_c/I_c$	$U_c/U_c$	$\cos \varphi \pm 0.05$		
AC-1	全部值	1.5	1.1	0.95	1.5	1.1	0.95	—	—
AC-2	全部值	4	1.1	0.65	4	1.1	0.65	—	—
AC-3	$I_c \leq 17$	10	1.1	0.65	8	1.1	0.65	$2000 \times I_c^{0.2} \times U_c^{-0.8}$	1.1
	$17 < I_c \leq 100$	10	1.1	0.35	8	1.1	0.35		
	$I_c > 100$	8 <sup>(3)</sup>	1.1	0.35	6 <sup>(4)</sup>	1.1	0.35		
AC-4	$I_c \leq 17$	12	1.1	0.65	10	1.1	0.65	$2000 \times I_c^{0.2} \times U_c^{-0.8}$	1.1
	$17 < I_c \leq 100$	12	1.1	0.35	10	1.1	0.35		
	$I_c > 100$	10 <sup>(5)</sup>	1.1	0.35	8 <sup>(3)</sup>	1.1	0.35		

各使用类别电寿命的接通与断开条件

使用类别	额定工作电流 (A)	接 通			断 开			$f$ (kHz)	$\gamma$
		$I/I_c$	$U/U_c$	$\cos \varphi$	$I_c/I_c$	$U_c/U_c$	$\cos \varphi$		
AC-1	全部值	1	1	0.95	1	1	0.95	—	—
AC-2	全部值	2.5	1	0.65	2.5	1	0.65	—	—
AC-3	$I_c \leq 17$	6	1	0.65	1	0.17	0.65	$2000 \times I_c^{0.2} \times U_c^{-0.8}$	1.1
	$I_c > 17$	6	1	0.35	1	0.17	0.35		
AC-4	$I_c \leq 17$	6	1	0.65	6	1	0.65	$2000 \times I_c^{0.2} \times U_c^{-0.8}$	1.1
	$I_c > 17$	6	1	0.35	6	1	0.35		

注:

$I_c$ ——额定工作电流;  $U$ ——接通前电压;  $U_c$ ——额定工作电压;

$U_r$ ——恢复电压;  $I$ ——接通电流;  $I_c$ ——分断电流。

①  $f$  指暂态恢复电压的振荡频率; ②  $\gamma$  过振荡系数, 其误差为  $\pm 0.05$ ;

③  $I$  或  $I_c$  的最小值为 1000A; ④  $I_c$  的最小值为 800A;

⑤  $I$  的最小值为 1200A。

表 7—81 CJ20 系列交流接触器可控鼠笼型异步电动机功率

接触器型号	额定电流 (A)	可控鼠笼型异步电动机最大功率(kW)					备注
		220V	380V	500V	600V		
CJ20—5	5	1.2	2.2	2.2	—		
CJ20—10	10	2.2	4.0	4.0	—		
CJ20—20	20	5.5	10	10	—	只限额定电压下使用	
CJ20—40	40	11	20	20	20		
CJ20—60	60	17	30	30	30		
CJ20—100	100	29	50	50	—		
CJ20—150	150	47	75	75	—		

式中： $I_c$ ——接触器的工作电流(A)；

$P_c$ ——被控电动机的额定功率(kW)；

$U_c$ ——被控电动机的额定电压(V)；

$K_c$ ——交流接触器的负载系数，见图 7—35，其值取决于接触器分断不同电流时的操作频率。

如果按上式计算的结果大于接触器额定值的 20% 以上时，应选高一级的接触器。

图 7—35 中，曲线 1 是在额定转速或接近额定转速时分断情况下的  $K_c$  与操作频率的关系；曲线 2 是有 10% 分断起动电流的情况；曲线 3 是有 50% 分断起动电流的情况。

(3) 降容使用对电寿命的影响：接触器降容使用后，电寿命提高可由图 7—36 得：

$$k\% = \frac{I_s}{I_c} \times 100$$

式中： $I_s$ ——接触器实际分断的电流；

$I_c$ ——接触器的额定电流。

图中  $V$  表示电寿命提高的倍数。

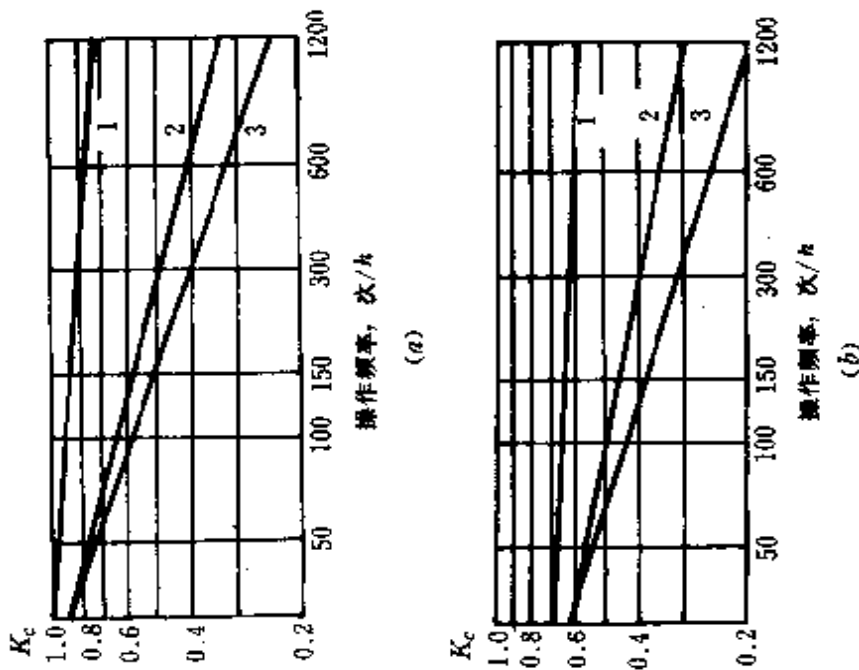


图 7-35 分断不同电流时不同操作频率下的接触器  
负荷系数

(a) 额定电压为 220~380V (b) 额定电压为

500V

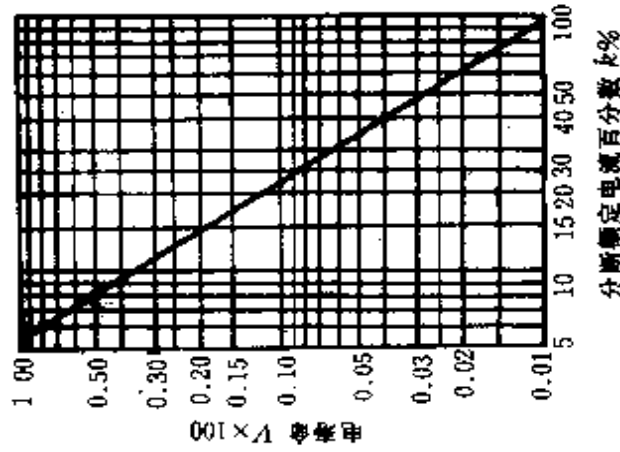


图 7-36 分断额定电流百分数与电寿命的关系



**例 7--10** 已知一 CJ20 系列接触器, 额定电流为 40A, 实际分断电流为 26A, 用于 AC—3 类负载, 试确定在这种情况下使用的电寿命。

**解**  $k \% = \frac{I_s}{I_c} \times 100 = \frac{26}{40} \times 100 = 65$

查图 7—36, 得  $V = 1.8$

CJ20 系列接触器在 AC—3 类负载的电寿命为 100 万次, 降容使用后的电寿命为  $1.8 \times 100 = 180$  万次。

(4) 工作制与操作频率对电寿命的影响: 对于长期工作制, 宜选用银或银基合金触头的接触器。当选用铜触头的接触器时, 则应降容一半以下使用。

对于反复短时工作制, 接触器的额定工作电流应不小于等效发热电流。

反复短时工作制的负荷图如图 7—37 所示。

等效发热电流  $I_{dx}$  可按下式计算:

$$I_{dx} = \sqrt{\frac{1}{T} \int i^2 dt} = \sqrt{\frac{I_q^2 t_q + I_c^2 t_c}{T}}$$

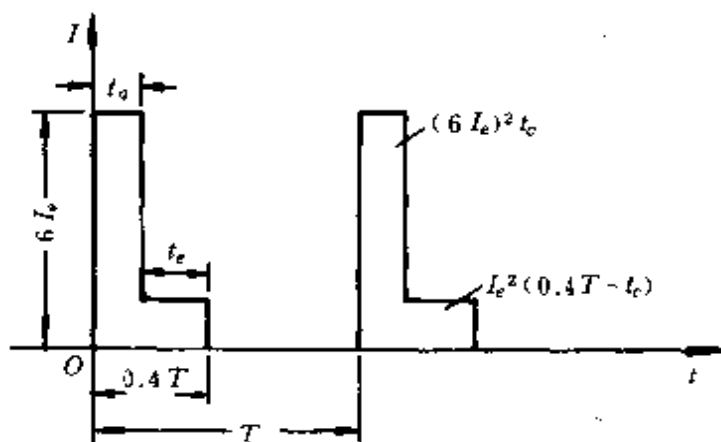


图 7--37 反复短时工作制的负荷图

式中： $I_q$  ——电动机起动电流(A)；

$I_e$  ——电动机额定电流(A)；

$T$  ——每一操作循环的全周期(s)；

$t_q$  ——电动机起动时间(s)；

$t_e$  ——电动机在额定转速下的工作时间(s)， $t_e = T \times TD - t_q$ ； $TD$ 为通电持续率(%)， $TD = \frac{T_i}{T} \times 100\%$ ； $T_i$ 为触头闭合通电时间(s)。

对于普通鼠笼型异步电动机，等效发热电流可按下列式计算：

$$I_{dec} = I_e \sqrt{\frac{35t_q + 0.4T}{T}}$$

(5) AC—3、AC—4 两种工作制混合时对电寿命的影响：产品技术条件中所订的 AC—3 类负载的电寿命为 60 万次，是理想状态下得出的。实际使用中会混有一定比例的 JK4 类负载。因此电寿命将明显降低。

例如，CJ20—40A 接触器控制 13kW 电动机，若为 AC—3 类负载，则电寿命如例 7—10 计算可得约 180 万次。

当 AC—4 类负载分别占下列比例时，试验表明，电寿命降至值如下：10%时为 150 万次；20%时为 100 万次；30%时为 70 万次；40%时为 50 万次；50%时为 50 万次，100%时为 20 万次。

(6)按接触器通断能力选择：接触器主触头的接通与分断能力，在 1.05 倍的额定电压，功率因数为 0.35，每次通电时间不大于 0.2s，每次操作间隔 6~12s 的情况下：

①150A 及以下的接触器，能承受接通 12 倍额定电流 100 次，分断 10 倍额定电流 20 次；

②250A 及以上的接触器，能承受接通 10 倍额定电流 100 次，分断 8 倍额定电流 25 次。

各类接触器触头的接通与分断能力可由产品目录中查得。

## 2. 直流接触器的选用

直流接触器的选用条件与交流接触器基本相同。

(1)按使用类别选用:直流接触器的使用类别如下:

- ①DC—1 系列:无感或微感负载、电阻炉、钨丝灯。
- ②DC—2 系列:起动和运转中断开并励直流电动机。
- ③DC—3 系列:并励电动机的起动、反接制动与反向、点动。
- ④DC—4 系列:起动和运转中断开串励直流电动机。
- ⑤DC—5 系列:串励电动机的起动、反接制动与反向、点动。

直流接触器不同使用类别的操作条件,见表 7—82。

当额定电流  $I_n > 600\text{A}$  时,其试验电流由产品技术条件规定。

表中非正常操作条件指接通与分断能力试验条件,试验时的通电时间应不少于 4T,时间间隔为 5~10s 能承受通、断各 25 次操作。

(2)按接触器通断能力选择:直流接触器的通断能力见产品目录。

(3)机械寿命和电寿命:1000A 以下者,机械寿命为 500~1000 万次,电寿命为 50~100 万次;1000A 及以上者,机械寿命为 20~100 万次,电寿命为 1~10 万次。

(4)直流接触器的选用原则:见表 7—83。

## 3. 交流接触器有功损耗的估计

(1)CJ—100 型:有功损耗为 15kWh/月;

(2)CJ—150 型:有功损耗为 20kWh/月;

(3)CJ—250~300 型:有功损耗为 65kWh/月;

(4)CJ—400~600 型:有功损耗为 100kWh/月。

表 7—82 直流接触器不同使用类别的操作条件

相应于使用类别的接通与分断条件

使用类别	接通			分断		
	$I/I_e$	$U/U_e$	$L/R(\text{ms})$	$I/I_e$	$U/U_e$	$L/R(\text{ms})$
DC—1	—	—	—	—	—	—
DC—2	4	1.1	2.5	4	1.1	2.5
DC—3	4	1.1	2.5	4	1.1	2.5
DC—4	4	1.1	15	4	1.1	15
DC—5	4	1.1	15	4	1.1	15

相应于使用类别验证电寿命的试验条件

使用类别	接通			分断		
	$I/I_e$	$U/U_e$	$L/R(\text{ms})$	$I/I_e$	$U/U_e$	$L/R(\text{ms})$
DC—1	1	1	1	1	1	1
DC—2	2.5	1	2	1	0.1	7.5
DC—3	2.5	1	2	2	1	2
DC—4	2.5	1	7.5	1	0.3	7.5
DC—5	2.5	1	7.5	7.5	1	7.5

注：

$I_e$ ——额定工作电流；

$U$ ——接通前电压；

$U_e$ ——额定工作电压；

$I$ ——接通或分断电流；

$L/R$  为时间常数。

表 7—83 直流接触器的选用原则

回路类别	负载性质	选用产品类别	产品容量
主回路	DC—1,DC—3	具有二常开或二常闭主触头产品	按产品额定工作电流选用
	DC—5		按产品额定工作电流的30~50%选用
能耗回路	DC—3,DC—5	具有一常闭主触头产品	按产品额定工作电流选用
起动回路	DC—3,DC—5	具有一常开主触头产品	按产品额定工作电流选用
动力制动回路	DC—2~DC—4	具有二常开主触头产品	按产品额定工作电流选用
高电感回路	电磁铁	具有二常开主触头产品	选用比回路电流大一级电流等级的产品

### 八、交、直流接触器线圈重绕计算

当线圈烧毁,且又无法查找线圈的线径和匝数时,应量取线径,按下列公式近似计算线圈的匝数。

#### 1. 交流(50Hz)接触器线圈重绕计算

(1)线圈匝数的估算:

$$W = \frac{45U}{BS}$$

式中:W —— 线圈匝数(匝);

U —— 工作电压(V);

B —— 铁芯磁通密度,一般取 1.1~1.4T,硅钢片含硅量较高或铁芯温升较低时,可选较高值;反之选较低值;

S —— 铁芯截面(cm)。

为了计算方便,可根据铁芯中极(山字形)或边形(门字形)截面面积,由图 7—38 查得绕组每匝电压,绕组电压除以该值得绕组匝数。

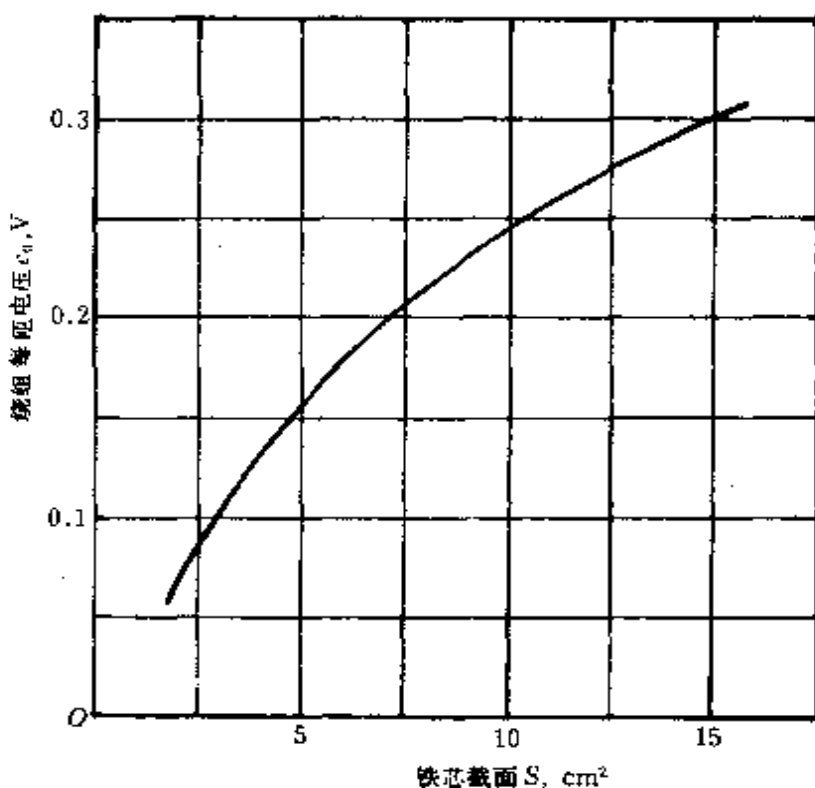


图 7—38 绕组每匝电压  $e_0$  与铁芯截面  $S$  的关系

铁芯窗口面积  $Q$  与其填充系数  $K_0$  的关系如图 7—39 所示。对于有骨架的线圈  $K_0$  取较小值, 无骨架的线圈  $K_0$  取较大值。 $K_0$  乘  $Q$  即为线圈的铜线总截面积  $A_2$ , 然后根据匝数确定铜导线的截面或直径  $d$ 。

根据所选定的导线计算线圈填充系数  $K_L$ 。 $K_L$  与导线标号及线径  $d$  的关系如图 7—40 所示, 并以此校验上述计算值。若两者相近, 则所选导线合适, 能绕下; 否则应重新计算, 直到所选的导线符合图 7—42 的关系。

**例 7—11** 已知 CJ10—150 型交流接触器, 采用山形铁芯, 线圈有骨架, 尺寸如图 7—41 所示, 试计算电压为 380V 时的线圈数据。

**解** 由图 7—41 得铁芯中极截面为

$$S = 3.4 \times 3.4 = 11.56 (\text{cm}^2)$$

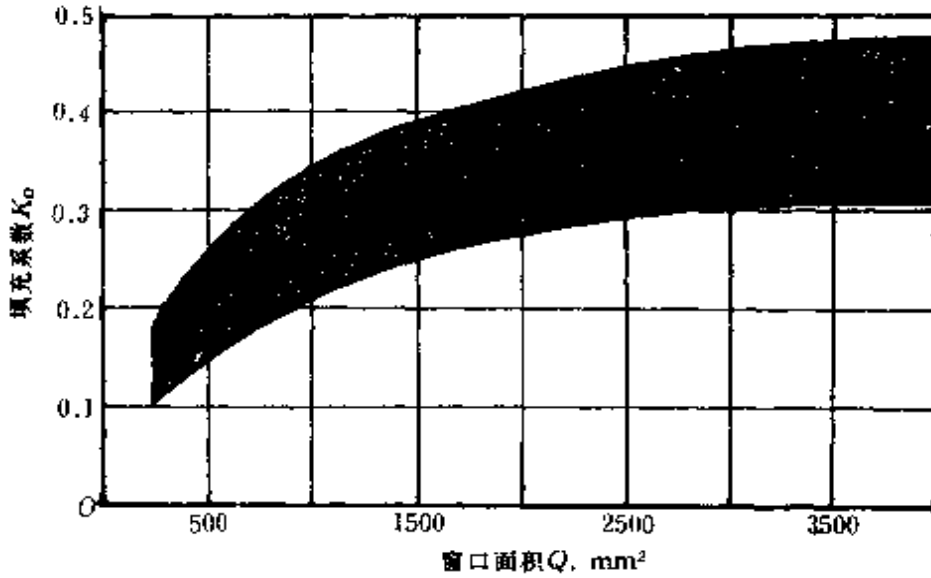


图 7-39 铁芯窗口面积  $Q$  与填充系数  $K_0$  的关系

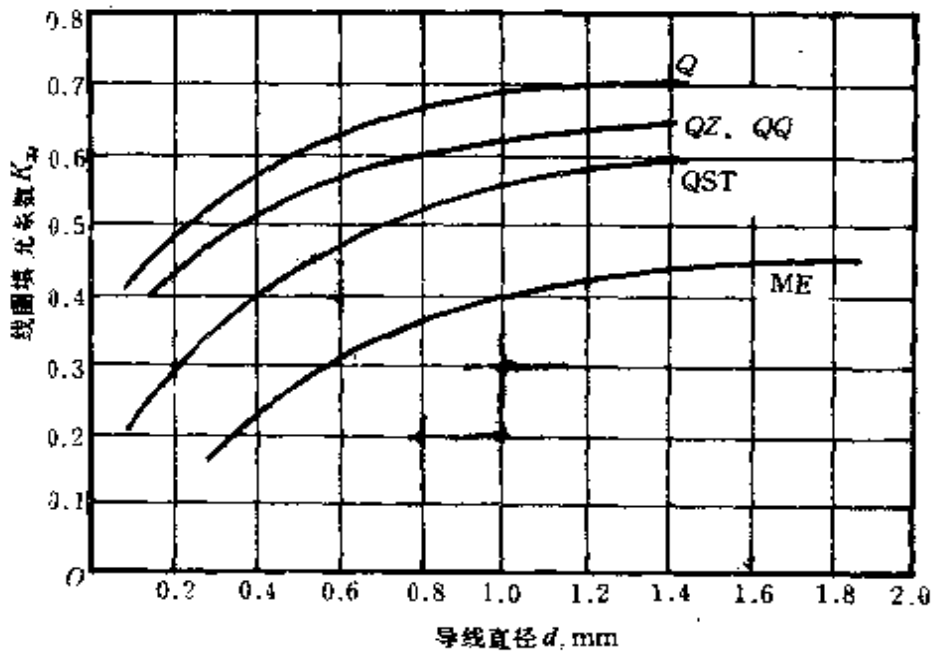


图 7-40 线圈填充系数  $K_n$  与导线标号

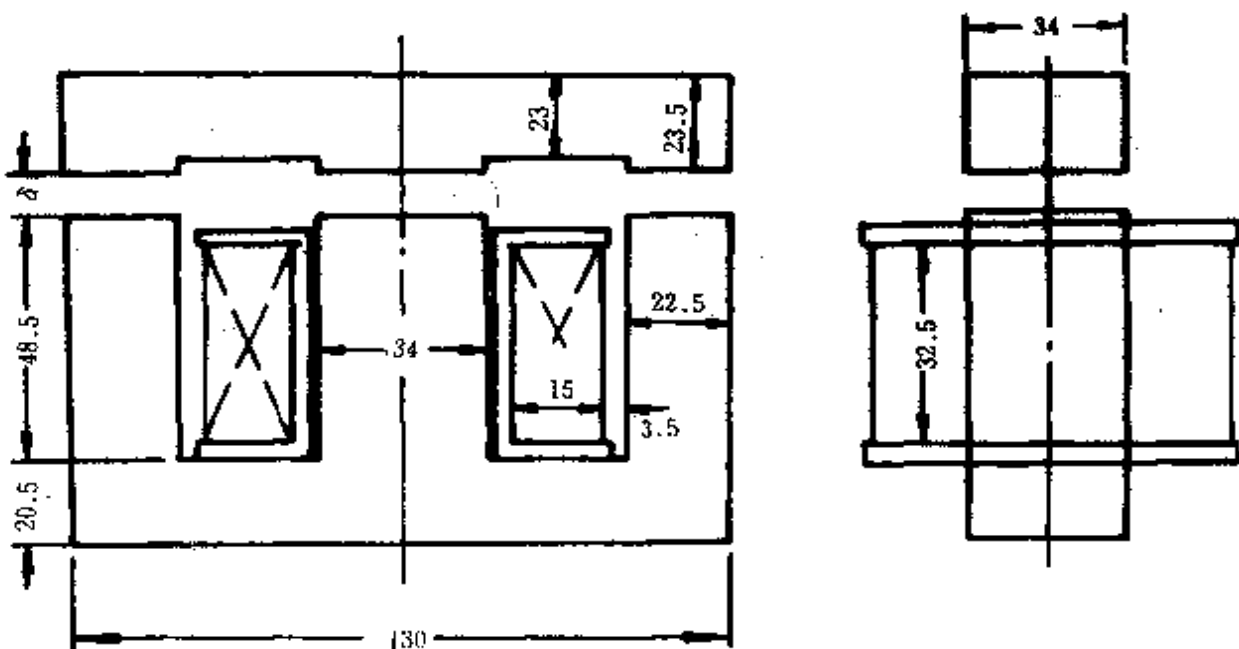


图 7-41 CJ10-150 型交流接触器有关尺寸

铁芯窗口面积为

$$Q = \left( \frac{130 - 34 - 22.5 \times 2}{2} \right) \times 48.5 = 1236.8 (\text{mm}^2)$$

线圈横截面为

$$A_1 = 15 \times 32.5 = 487.5 (\text{mm}^2)$$

由图 7-40 查得  $e_0 = 0.272\text{V}$ , 则 380V 时的匝数为

$$W = U/e_0 = 380/0.272 = 1400 (\text{匝})$$

由图 7-39 查得  $K_Q = 0.23 \sim 0.375$ , 因有骨架, 故取小值,

$K_Q = 0.23$ 。

铜线总面积为

$$A_2 = K_Q Q = 0.23 \times 1236.8 = 284 (\text{mm}^2)$$

导线直径为

$$d = \sqrt{\frac{A_2}{\frac{\pi}{4} W}} = \sqrt{\frac{284 \times 4}{3.14 \times 1400}} = 0.507 (\text{mm})$$

查线规表, 选用 QZ 漆包线,  $\phi = 0.51$ 。



绕组填充系数为

$$K_r = \frac{A_2}{A_1} = \frac{\pi \left(\frac{0.51}{2}\right)^2 \times 1400}{487.5} = 0.539$$

由图 7—40 查得 QZ 漆包线, 当  $\phi=0.51$  时的  $K_r=0.558$ 。修理时宜取较小值, 取  $K_r=0.53$ , 此值较上述计算值小, 因此应重新估算。

重新估算匝数可由下式求得:

$$W = \frac{A_1 K_r}{\pi \left(\frac{d}{2}\right)^2} = \frac{487.5 \times 0.53}{\pi \left(\frac{0.51}{2}\right)^2} = 1250 (\text{匝})$$

因此可采用线径为 0.51mm 的 QZ 型漆包线, 绕 1250 匝。

(2) 线圈的绕制方法: 如图 7—42 所示。绕制后应将接触器在 85% 的额定电压下试验吸合是否良好。若好, 再测吸合时线圈中的电流, 若电流密度约为  $2\sim 3\text{A}/\text{mm}^2$  (长期工作制) 或  $3\sim 5\text{A}/\text{mm}^2$  (反复短时工作制) 时, 线圈能经济安全运行。若发现吸力不足, 应适当减少匝数; 如电流密度过高, 即温升过高 (A 级绝

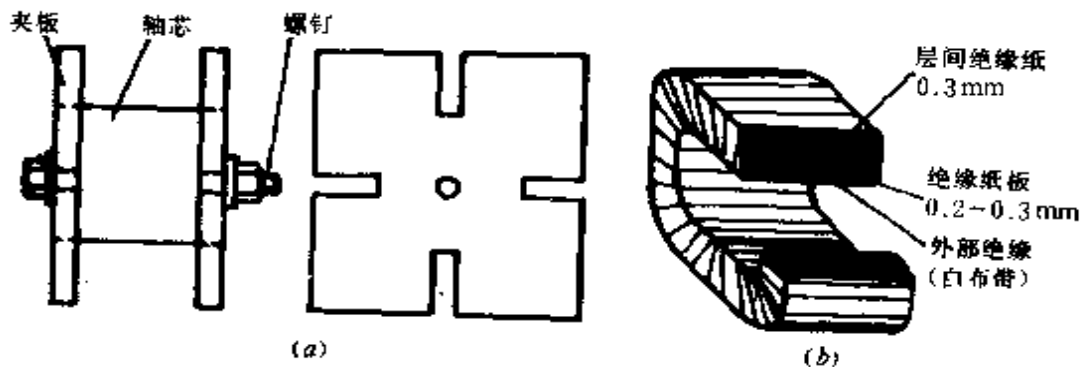


图 7—42 线圈的绕制

(a) 绕制用木框; (b) 线圈外形结构

缘的线圈用温度计测量其表面温升不得超过 65°C), 则应适当增加匝数; 如温升过高但吸力裕度又不大时, 则应保持匝数不变而适当增大线径。

绕制的线圈应放入 105~110°C 的烘箱内烘三小时左右, 冷却至 60~70°C, 浸 1010 沥青漆或 1032 聚氰胺醇酸等绝缘漆, 再放入 110~120°C 的烘箱内烘干, 冷却至常温即可使用。

### 2. 直流接触器线圈重绕计算

先测出线径和线圈的外形尺寸(图 7—43), 按下式估算线圈匝数:

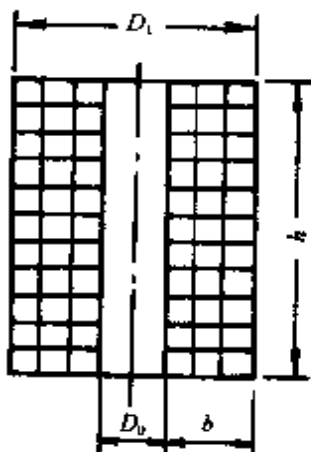


图 7—43 线圈横截面

$$W = \frac{K_Q A}{\frac{\pi}{4} d^2}, A = hb = h \frac{D_1 - D_0}{2}$$

式中:  $K_Q$  —— 填充系数, 一般为 0.3~0.5, 线径轻细或层间垫绝缘时应取低值;

$A$  —— 线圈横截面 ( $\text{mm}^2$ );

$d$  —— 绝缘导线外径 ( $\text{mm}$ )。

电流密度选取同交流接触器。

### 九、交、直流接触器改压计算

在保证吸力、温升、工作制不变的情况下,进行换算。

#### 1. 交流接触器改压换算

$$W_2 = W_1 \frac{U_2^2}{U_1^2}, \quad d_2 = d_1 \sqrt{\frac{U_1}{U_2}}$$

式中:  $W_1$ 、 $W_2$  ——原线圈和改压后线圈的匝数;

$d_1$ 、 $d_2$  ——原线圈和改压后线圈导线的直径(mm);

$U_1$ 、 $U_2$  ——原线圈和改压后线圈的额定电压(V)。

对于交流串联励磁线圈,则可按下列公式换算:

$$W_2 = W_1 \frac{I_1}{I_2}, \quad d_2 = d_1 \sqrt{\frac{I_2}{I_1}}$$

式中:  $I_1$ 、 $I_2$  ——原线圈和改压后线圈的电流(A)。

**例 7—12** 已知接触器线圈电压为 220V, 3520 匝, 导线直径为 0.19mm, 现欲改用在 24V 电源上, 试求改绕的参数。

**解**  $W_2 = W_1 \frac{U_2}{U_1} = 3520 \times \frac{24}{220} = 384(\text{匝})$

$$d_2 = d_1 \sqrt{\frac{U_1}{U_2}} = 0.19 \times \sqrt{\frac{220}{24}} = 0.575(\text{mm}) \quad \text{查}$$

线规表, 取标称直径为 0.57mm 的漆包线。

#### 2. 直流接触器改压计算

$$d_2 = d_1 \sqrt{\frac{U_1}{U_2}}, \quad W_2 = W_1 \left(\frac{d_1}{d_2}\right)^2$$

$$R_2 = \frac{W_2}{W_1} \left(\frac{d_1}{d_2}\right)^2 R_1$$

式中:  $R_1$ 、 $R_2$  ——20°C 时, 原线圈和改压后线圈的直流电阻(Ω);

其它符号同前。

### 3. 直流接触器改变通电持续率的换算

导线直径换算

$$d_2 = d_1 \sqrt[4]{\frac{TD_1}{TD_2}}$$

式中： $TD_1$ 、 $TD_2$  ——原线圈和改绕后线圈的通电持续率。

线圈  $W_2$  和直流电阻  $R_2$  的换算仍按上述公式计算。

## 十、交流接触器短路环计算

### 1. 短路环电阻的计算

$$R = (0.2 \sim 0.4) \frac{2\pi f \mu_0 (S_1 + S_2)}{\delta}$$

$$S_1/S_2 \approx 1/2 \sim 1/3$$

式中： $R$  ——短路环电阻( $\Omega$ )；

$S_1$  ——铁芯端面没有被短路环包围的面积( $\text{cm}^2$ )；

$S_2$  ——铁芯端面被短路环包围的面积( $\text{cm}^2$ )；

$\mu_0$  ——空气磁导率( $\text{H/cm}$ )， $\mu_0 = 0.4\pi \times 10^{-8}$ ；

$\delta$  ——短路环所包围的铁芯截面与衔铁之间的空气隙( $\text{cm}$ )。

### 2. 短路环导体截面的计算

当短路环所包围的截面确定后，便可算出短路环所包围的面积，这样，就可按下式求出短路环导体的截面：

$$S = \rho \frac{L}{R}$$

式中： $S$  ——短路环导体截面( $\text{mm}^2$ )；

$\rho$  ——短路环导体的电阻率( $\Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$ )；

$L$  ——短路环所包围的面积周长( $\text{m}$ )；

$R$  ——短路环电阻( $\Omega$ )。

然后便可进一步确定短路环的尺寸。

### 十一、交流接触器和电磁铁直流无声运行元件的选择

交流接触器和电磁铁改为直流运行,可消除振动和噪声、延长使用寿命、节约电能。通常适用于长期或间断长期工作制的场合,而不适用于频繁操作的场合。

#### 1. 交流接触器直流无声运行元件的选择

交流接触器直流无声运行的几种典型线路,如图 7—44 所示。

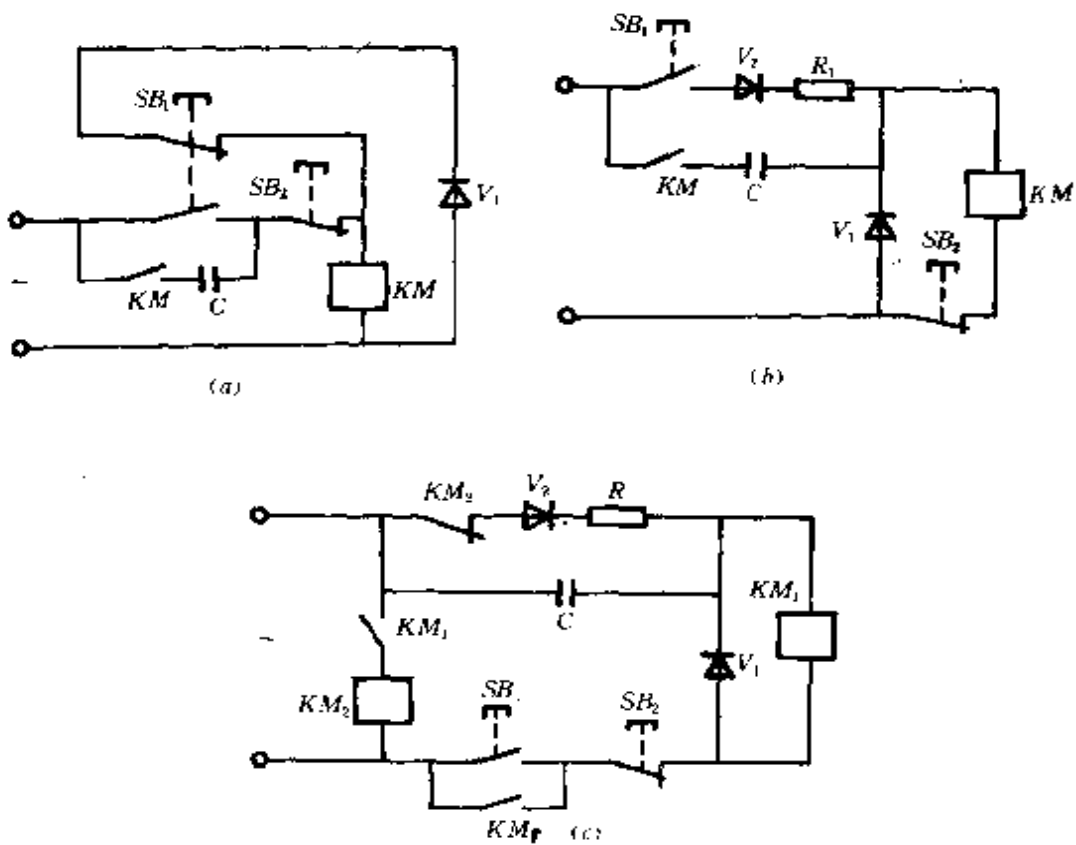


图 7-44 交流接触器直流无声运行线路

(1) 电容选择:

$$C = (6.5 \sim 8)kI, U_c \geq 2U_m$$

式中： $C$  —— 电容量( $\mu\text{F}$ )；

$U_c$  —— 电容器耐压(V)；

$k$  —— 经验系数，当电源电压为 380V 时  $k = 1$ ；220V 时  $k = 1.73$ ；127V 时  $k = 3$ ；

$I$  —— 通过线圈的直流电流(A)；

$U_m$  —— 电源电压的峰值(V)。

对于较大电流等级的接触器，宜取电容量  $C$  的下限；反之取上限。 $C$  的电容量尽量取小值。通常可由试验决定，只要在起动机能可靠吸合即可。

(2) 二极管选择：二极管  $V_1$ 、 $V_2$  的额定电流可按线圈的直流电流选用； $V_2$  的反向电压可按二倍电源电压的峰值  $2U_m$  选用（在断开交流线路时，二极管所承受的电压不超过  $1.5U_m$ ）。 $V_1$  的反向电压可按电源电压选取。例如，接触器的额定电压为 380V，则  $V_1$  和  $V_2$  的额定电压分别为 800V 和 400V。

不同容量的接触器各元件参数选取可参表 7—84。

表 7—84 交流接触器直流运行元件参数的选取

型 号	$R$		$C$ ( $\mu\text{F}$ )	$V_1$ (A)	$V_2$ (A)
CJ1—600/3	4.8 $\Omega$	50W	30	5	5
CJ1—300/3	8 $\Omega$	15W	10	1	1
CJ1—150/2	10 $\Omega$	5W	10	1	1
CJ10—150	15 $\Omega$	2W	2	0.3	0.3
CJ10—100	15 $\Omega$	1W	2	0.3	0.3
CJ12—600/3	5 $\Omega$	25W	10	5	5
CJ12—400	8 $\Omega$	15W	10	1	1
CJ12—250	15 $\Omega$	5W	4	1	1

## 2. 交流电磁铁直流无声运行元件的选择

交流电磁铁与交流接触器的工作原理相同,只是交流电磁铁吸力和损耗较大而已。

交流电磁铁直流无声运行的线路,如图 7-45 所示。

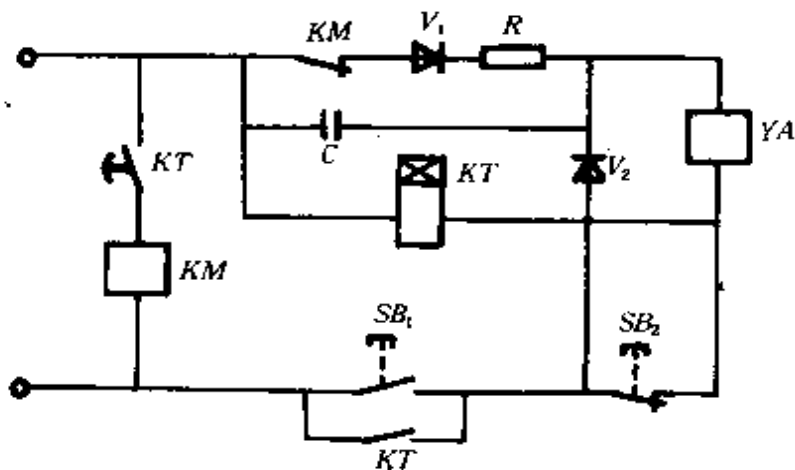


图 7-45 交流电磁铁直流运行线路

(1) 工作原理:按下起动按钮  $SB_1$ ,时间继电器  $KT$  和交流电磁铁  $YA$  立即吸合并通过  $KT$  的瞬时常开触点自锁。当  $KT$  延时闭合常开触点闭合时,中间继电器  $KM$  吸合, $KM$  常闭触点断开,电磁铁  $YA$  投入正常的直流运行状态。

(2) 各元件参数选取:可参见表 7-85。

## 3. 无声节能接触器直流线圈的计算

上述介绍的交流接触器无声节电技术都采用外加电容等外附式方式。这里介绍的是一种从接触器本身着手改造的无声节能方式。其原理电路如图 7-46 所示。

表 7--85 交流电磁铁直流运行各元件参数的选取

型 号	电压 (V)	吸力 (N)	保持电流(A)		C ( $\mu$ F)	D <sub>1</sub> (A)	D <sub>2</sub> (A)	R ( $\Omega$ )
			交流	直流				
MQ1--5151	380	245	1.05	1	6	3	3	12
MQ2--15	380	147	0.84	0.78	5	3	3	12
MQ1--5131	380	78	0.28	0.23	1.5	1	1	12
MQ1--5121	380	49	0.21	0.15	1	1	1	30
MQ2--5102	380	29	0.36	0.30	2	1	1	30
MQ2--5111	380	29	0.165	0.135	1	1	1	12
MQ1--5101	380	15	0.11	0.085	0.5	0.5	0.5	12
MZD1--100	380	—	0.72	0.53	4	3	3	12
MZD1--200	380	—	3	2.6	1.6	5	5	10
MZD1--300	380	—	4	3.4	20	5	5	3
MQ1--5141	380	147	1	0.8	5	3	3	10
MQ1--5141	220	147	2.2	1.9	20	5	5	3
MQ1--6121	220	49	0.4	0.38	4	1	1	10
MQ1--5121	220	49	0.44	0.36	4	1	1	5
MQ1--5111	220	29	0.385	0.36	4	1	1	5
MQ1--5101	220	15	0.23	0.18	2	1	1	5
MQ1--5102	220	29	0.88	0.66	8	3	3	5

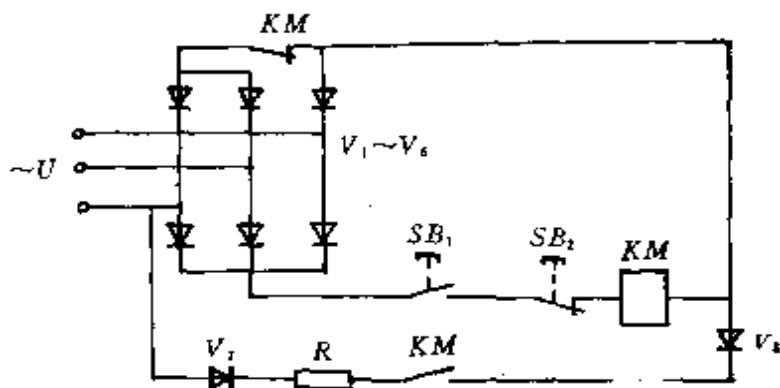


图 7—46 无声节能接触器接线图



(1)工作原理:当按下起动按钮  $SB_1$ ,接触器  $KM$  两端就有一个三相全桥整流电压  $U_1$  输出( $U_1 = 1.35U_{\sim}$ ),在衔铁闭合过程中,其常闭触点断开,线圈  $KM$  两端工作电压变为二相正半波与另一相负半波组合的整流方式输出直流电压  $U_2$  ( $U_2 = 0.5U_{\sim}$ ),待衔铁完全闭合后,按下停止按钮  $SB_2$ ,线圈两端的电压降低到二相半波整流方式所产生的直流电压  $U_3$  ( $U_3 = 0.45U_{\sim}$ )。

由于线圈的电阻不变,故相应的线圈工作电流  $I_1 = 3I_3$ ,相应的磁势  $(I_1W)^2 = 9(I_3W)^2$ ,实际上,衔铁吸合所需吸力要比衔铁闭合后保持闭合所需吸力的比值远大于 9 倍,故在整流二极管  $V_7$  后面串联一只限流电阻  $R$ ,使接触器  $KM$  的工作电流更小,二极管  $V_8$  起续流作用。

(2)直流线圈匝数的计算:

$$W = U_z / j\rho l, \quad U_z = IR_c$$

式中:  $W$  —— 线圈匝数(匝);

$U_z$  —— 经整流后输出的直流电压(V);

$I$  —— 线圈电流(A);

$j$  —— 电流密度(A/mm<sup>2</sup>);

$R_c$  —— 线圈电阻( $\Omega$ );

$\rho$  —— 导线电阻率( $\Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$ );

$l$  —— 线圈平均每匝长度(m)。

(3)导线线径的计算:

$$d = 1.12 \sqrt{\frac{K_Q S}{W}}$$

式中:  $d$  —— 导线的直径(mm);

$K_Q$  —— 线圈填充系数;

$S$  —— 线圈骨架窗口面积( $\text{mm}^2$ );

$W$  —— 线圈匝数(匝)。

(4)校验:根据计算得的线径  $d$ , 选择标准线径的导线。制成后进行验证。若吸力不足, 则适当增大线径, 并相应减少匝数(否则窗口放不下); 若吸力过大, 则应减小线径。

由于无声节能接触器的工作电流非常小, 线圈温升不必校验。

无声节能接触器可利用 CJ10 系列、CJ12 系列等交流接触器的铁心、框架改制。经测定, 与原交流接触器相比, 有功节电率在 90% 以上, 且机械寿命和电寿命、操作频率等都不受影响。

## 十二、电磁铁的基本公式及计算

### 1. 磁路基本计算公式

$$B = \mu H, \quad \phi = \Delta IW, \quad \Sigma \phi = 0$$

$$IW = \Sigma Hl, \quad \Delta = \mu S/l$$

$B$  —— 磁通密度(T);

$\phi$  —— 磁通(Wb);

$IW$  —— 励磁安匝(A);

$\Delta$  —— 磁导(H);

$l$  —— 磁路的平均长度(m);

$S$  —— 与磁通垂直的截面积( $\text{m}^2$ );

$H$  —— 磁场强度(A/m);


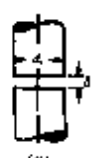

$\mu$  —— 导磁率(H/m), 空气中的导磁率等于真空中的导磁率  $\mu_0 = 0.4\pi \times 10^{-6}$  H/m。

### 2. 电磁铁气隙磁导的计算

电磁铁气隙磁导的常用计算公式列于表 7-86 中。表中长


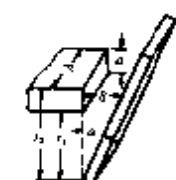
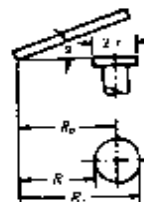
度单位用 cm, 空气中的导磁率  $\mu_0$  为  $0.4\pi \times 10^{-8} \text{H/cm}$ 。

表 7—86 气隙磁导的计算公式

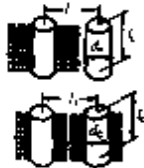

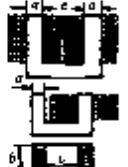
编号	几何图形	磁极形状	磁导 (H)
1		两平行	$G_{\delta} = \mu_0 \frac{a^2}{\delta} (\delta/a \leq 0.2)$
		矩形平面	$G_{\delta} = \mu_0 \left[ \frac{a^2}{\delta} + 0.58a + \frac{0.14a}{\ln(1.05 + \frac{\delta}{a})} \right]$
2		两平行	$G_{\delta} = \mu_0 \frac{\pi d_c^2}{4\delta}$ $(\delta/d_c \leq 0.2)$
		圆形平面	$G_{\delta} = \mu_0 \left( \frac{\pi d_c^2}{4\delta} + 0.58d_c \right)$
		锥形表面	$G_{\delta} = \mu_0 \left( \frac{\pi d_c^2}{4\delta \sin^2 \alpha} - \frac{0.157d_c}{\sin^2 \alpha} + 0.75d_c \right)$

工  
作  
磁  
通  
的  
磁  
导



(续表)

	编号	几何图形	磁极形状	磁导 (H)
工 作 磁 通 的 磁 导	3		两不平 行平面	$G_{\delta} = \mu_0 \frac{b}{a} \ln \frac{r_2}{r_1}$ <p><math>a</math>——弧度</p>
	4		矩形铁 芯和衔 铁	$G_{\delta} = \frac{\mu_0 b}{a} \ln \frac{r_2}{r_1}$ <p><math>a</math>——弧度</p> <p>或</p> $G_{\delta} = \mu_0 \frac{ab}{\delta}$ <p><math>\delta</math>——气隙平均长度</p>
	5		圆形铁 芯和衔 铁	$G_{\delta} = \frac{2\pi R_0 \mu_0}{a} \times$ $\left( 1 - \sqrt{1 - \frac{r^2}{R_0^2}} \right)$ <p><math>a</math>——弧度</p> <p>或 <math>G_{\delta} = \frac{2\pi R_0^2 \mu_0}{\delta} \times \left( 1 - \sqrt{1 - \frac{r^2}{R_0^2}} \right)</math></p> <p><math>\delta</math>——气隙平均长度</p>

(续表)

	编号	几何图形	磁极形状	磁导 (H)
漏磁通的比较磁导	6		两平行 圆柱体	$g = \frac{G_{\delta}}{l}$ $= \frac{\pi\mu_0}{\ln \frac{l_1 + \sqrt{l_1^2 - d_c^2}}{d_c}}$ 或当 $l_1 > 4d_c$ 时 $g = \frac{\pi\mu_0}{\ln \frac{2l_1}{d_c}}$
	7		圆柱体 与平面	$g = \frac{G_{\delta}}{l}$ $= \frac{2\pi\mu_0}{\ln \frac{l_1 + \sqrt{l_1^2 - (d_c/2)^2}}{d_c/2}}$ 或当 $l_1 > 2d_c$ 时 $g = \frac{2\pi\mu_0}{\ln \frac{4l_1}{d_c}}$
	8		口形磁 路铁芯 之间	$g = \frac{G_{\delta}}{l}$ $= \mu_0 \left( \frac{b}{c} + \frac{2a}{c + \frac{\pi a}{2}} \right)$

(续表)

编号	几何图形	磁极形状	磁导 (H)
9		山形磁路铁芯柱之间	$g = \frac{G_{\delta}}{l}$ $= 2\mu_0 \left( \frac{b}{c} + \frac{a}{c + \frac{\pi a}{4}} \right)$
10		两同心圆柱体	$g = \frac{G_{\delta}}{l}$ $= \frac{2\pi\mu_0}{\ln \frac{2c + d_c}{d_c}}$

### 3. 电磁铁吸力基本计算公式

(1) 计算气隙较小时的吸力为

$$F = 0.392 \frac{\phi^2}{S} \times 10^{10}$$

式中:  $F$  —— 电磁铁吸力(N);

$\phi$  —— 磁极端面磁通(Wb);

$S$  —— 磁极表面的总面积( $\text{cm}^2$ )。

(2) 计算气隙较大时的吸力为

$$F = 0.392 \frac{\phi^2}{S(1 + \alpha\delta)} \times 10^{10}$$

式中:  $\alpha$  —— 修正系数, 约为 3~5;

$\delta$  ——气隙长度(cm)。

上式适用于直流和交流电磁铁的吸力计算。交流时,用磁通有效值代入,所得的吸力为平均值。

**例 7—13** 某磁路如图 7—47 所示。已知气隙  $\delta$  为 0.04cm,铁芯截面  $S$  为  $4.4\text{cm}^2$ ,线圈磁势  $IW$  为 1200 安匝。试求在气隙中所产生的磁通和作用在衔铁上的总吸力。

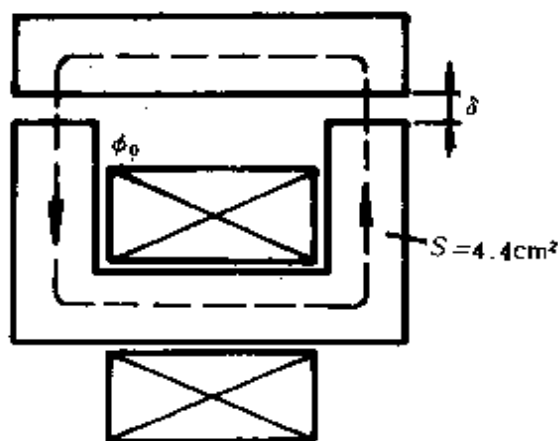


图 7—46 门形磁路

**解**

(1) 一个磁极端面上的气隙磁导为

$$G_{\delta 1} = \frac{\mu_0 S}{\delta} = \frac{\mu_0 \times 4.4}{0.04} = 110\mu_0$$

由于两个气隙是串联的,所以总磁导为

$$\begin{aligned} G_{\delta} &= \frac{1}{2} G_{\delta 1} = 55\mu_0 = 55 \times 0.4\pi \times 10^{-8} \\ &= 68.75 \times 10^{-8} (\text{H}) \end{aligned}$$

(2) 气隙中所产生的磁通为

$$\begin{aligned} \phi_{\delta} &= IW G_{\delta} = 1200 \times 68.75 \times 10^{-8} \\ &= 8.25 \times 10^{-4} (\text{Wb}) \end{aligned}$$

(3) 总吸力为

$$F = 2 \times 0.392 \frac{\phi_0^2}{S_c} \times 10^{10}$$

$$= 2 \times 0.392 \times \frac{8.25^2}{4.4} \times 10^2 = 1213(\text{N})$$

式中乘 2 是因为总吸力是由两个气隙共同作用所产生的。

#### 4. 电磁铁吸力的近似计算

(1) 拍合式电磁铁(图 7—48): 直流拍合式电磁铁吸

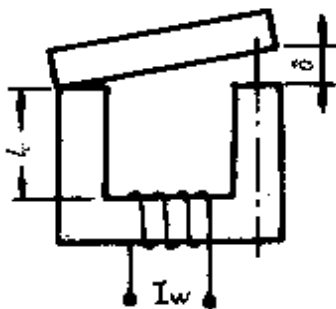


图 7—48 拍合式电磁铁

$$F = 62.8(IW)^2 \frac{S}{\delta^2} \times 10^{-8}$$

式中:  $F$  —— 电磁铁吸力(N)。

交流拍合式电磁铁吸力有如下三种情况:

① 当供给励磁线圈的是数值不变的电流时, 吸力最大值和平均值为

$$F_m = 62.8(I_m W)^2 \frac{S}{\delta^2} \times 10^{-8}$$

$$F_0 = \frac{F_m}{2} = 31.4(I_m W)^2 \frac{S}{\delta^2} \times 10^{-8}$$

式中:  $F_m$  —— 吸力最大值(N);

$F_0$  —— 吸力平均值(N);

$I_m$  —— 励磁电流最大值(A);



$W$  ----- 线圈匝数。

②当供给电磁铁线圈的是恒定的交流电压时(线圈集中在底铁上),吸力最大值和平均值为

$$F_m = 1.96 \left( \frac{U}{fW} \right)^2 \frac{S}{\left( S + \frac{l_c g \delta}{\mu_0} \right)^2} \times 10^4$$

$$F_0 = \frac{F_m}{2} = 0.98 \left( \frac{U}{fW} \right)^2 \frac{S}{\left( S + \frac{l_c g \delta}{\mu_0} \right)^2} \times 10^4$$

式中: $U$  —— 电磁铁线圈上的电压有效值(V);

$f$  —— 电源频率(Hz);

$IW$  —— 励磁线圈的总磁势(A);

$S$  —— 电磁铁极面面积( $\text{cm}^2$ )

$l_c$  —— 铁芯长度(cm);

$g$  —— 单位长度漏磁导,按表 7—86 中第 6 项公式计算;

$\delta$  —— 气隙长度(cm);

$\mu_0$  —— 空气的导磁率(H/cm),为  $0.4\pi \times 10^{-8}$ 。

③线圈分布在铁芯柱一侧上时,吸力平均值为

$$F_0 = 9.81 \left( \frac{U}{fW} \right)^2 \frac{S}{\left( S + \frac{1}{3\mu_0} l_c g \delta \right)^2} \times 10^7$$

(2) 门形电磁铁(图 7—49):直流门形电磁铁吸力为

$$F = 31.4 (IW)^2 \frac{S}{\delta^2} 2 \times 10^{-8}$$

式中: $F$  —— 电磁铁吸力(N)。

交流门形电磁铁吸力有如下三种情况:

①当供给线圈的是恒定的交流电流时,吸力最大值为

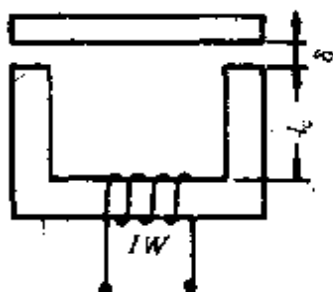


图 7-49 门形电磁铁

$$F_m = 31.4(I_m W)^2 \frac{S}{\delta^2} \times 10^{-8}$$

②当供给电磁铁线圈的是恒定的交流电压时(线圈集中在底铁上),吸力最大值和平均值为

$$F_m = 3.9 \left( \frac{U}{fW} \right)^2 \frac{S}{\left( S + \frac{2l_c g \delta}{\mu_0} \right)^2} \times 10^8$$

$$F_0 = \frac{F_m}{2} = 1.95 \left( \frac{U}{fW} \right)^2 \frac{S}{\left( S + \frac{2l_c g \delta}{\mu_0} \right)^2} \times 10^8$$

③当线圈分布在铁芯柱一侧时,吸力平均值为

$$F_0 = 1.95 \left( \frac{U}{fW} \right)^2 \frac{S}{\left( S + \frac{2}{3\mu_0} l_c g \delta \right)^2} \times 10^8$$

式中符号同前。注意,所有门形电磁铁的吸力计算公式中,S均指一个极面的面积。

(3)螺管式电磁铁(图 7-50):直流螺管式电磁铁吸力为

$$F = 62.8(IW)^2 \left[ \frac{\pi r^2}{\delta^2} + \frac{g}{\mu_0} \left( \frac{z}{l_c} \right)^2 \right] \times 10^{-8}$$

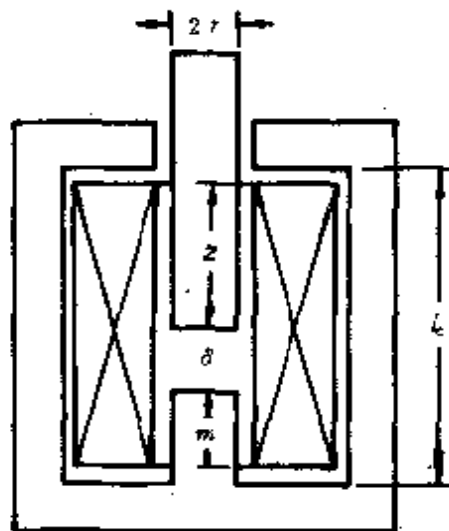


图 7—50 螺管式电磁铁

式中符号见图 7—50。比磁导  $g$  可按表 7—86 中第 10 项所列的公式计算。交流螺管式电磁铁吸力有如下两种情况：

①当线圈中的励磁电流是大小不变的交流电流时，吸力最大值为

$$F_m = 62.8(I_m W)^2 \left[ \frac{\pi r^2}{\delta^2} + \frac{g}{\mu_0} \left( \frac{z}{l_c} \right)^2 \right] \times 10^{-8}$$

②当给定的是最大值不变的电压时，吸力最大值和平均值为

$$F_m = 19.6 \left( \frac{U}{fW} \right)^2 \frac{\frac{\pi r^2}{\delta^2} + \frac{g}{\mu_0} \left( \frac{z}{l_c} \right)^2}{\left[ \frac{\pi r^2}{\delta} + \frac{g}{\mu_0} \frac{z^3 + m^2}{3l_c^2} \right]^2} \times 10^7$$

$$F_0 = 9.8 \left( \frac{U}{fW} \right)^2 \frac{\frac{\pi r^2}{\delta^2} + \frac{g}{\mu_0} \left( \frac{z}{l_c} \right)^2}{\left[ \frac{\pi r^2}{\delta} + \frac{g}{\mu_0} \frac{z^3 + m^3}{3l_c^2} \right]^2} \times 10^7$$

式中符号同前。

(4) 没有外壳的螺管式电磁铁(图 7—51):吸力大小与衔铁位置有关。吸力最大值相对于衔铁约在  $x/l_k \approx 40\%$  的位置;衔铁在  $40\% < x/l_k < 80\%$  位置范围内,吸力几乎保持不变;在  $x/l_k > 80\%$  的位置,吸力开始减小。当衔铁全部进入线圈后吸力等于零。

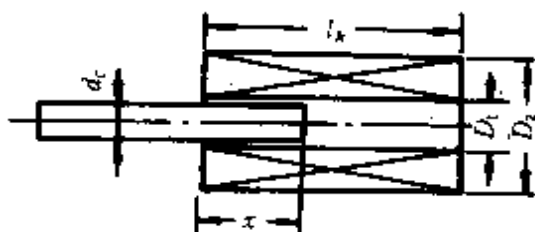


图 7—51 没有外壳的螺管式电磁铁

若  $D_2 \gg d_c$  及  $l_k \gg D_2$ , 则吸力最大值为

$$F_m \approx (15.4 \sim 17.3)IW \frac{\pi d_c^2}{4l_k} \times 10^{-3}$$

式中符号同前。

(5) 山形电磁铁(图 7—52):山形电磁铁的吸力计算,可按照门形电磁铁的吸力计算公式,即可把山形电磁铁看成两个门

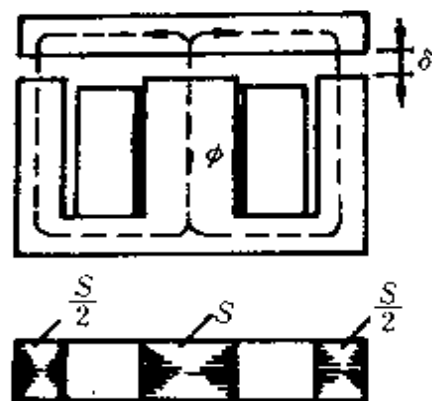


图 7 52 山形电磁铁

形电磁铁并联而成,每一个门形电磁铁的磁极表面为 $\frac{S}{2}$ ,合并后总面积为 $\frac{S}{2} + \frac{S}{2} = S$ ,所以可按门形电磁铁计算。不过当线圈分布在中心柱上时,其吸力平均值仍可按门形当线圈分布在铁芯柱一侧时的公式计算,只是式中的比磁导 $g$ 值,应按表7—86中第9项公式代入。

(6)E形电磁铁(图7—53):衔铁闭合在某一位置时的吸力为

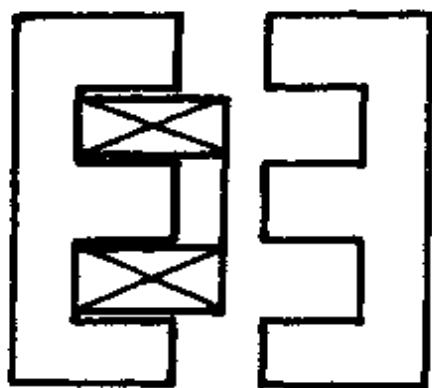


图7—53 E形电磁铁

$$F = 62.8(IW)^2 \left[ \frac{S}{(2\delta)^2} + \frac{g}{\mu_0} \left( \frac{z}{l_k} \right)^2 \right] \times 10^{-8}$$

式中: $F$ ——电磁铁吸力(N);

$S$ ——E形铁芯中心柱与两边柱铁芯截面积之和( $\text{cm}^2$ );

$\delta$ ——中心柱空气隙长度(cm);

$l_k$ ——励磁线圈的高度(cm);

$z$ ——衔铁伸入线圈的长度(cm)。

(7)三相交流电磁铁(图7—54):作用在铁芯上的合力为

$$F = F_1 + F_2 + F_3 = 62.8 \times \frac{3}{2} (I_m W)^2 \frac{S}{\delta^2} \times 10^{-8}$$

式中: $F$ ——作用在铁芯上的合力(N);

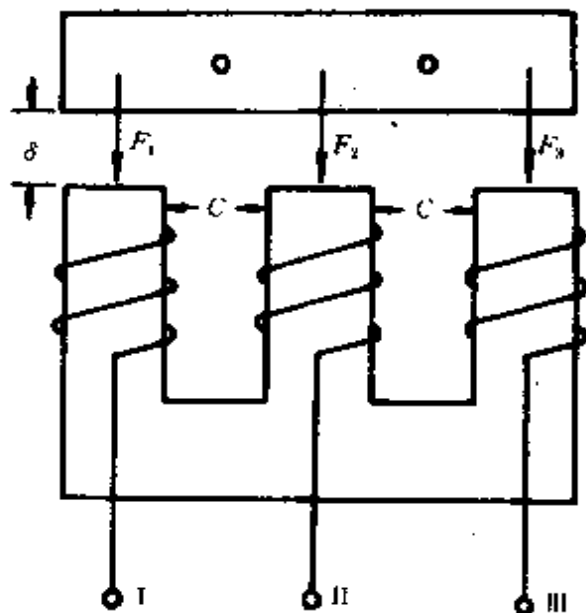


图 7—54 三相交流电磁铁

$S$  —— 铁芯柱截面积( $\text{cm}^2$ )；

$\delta$  —— 气隙长度( $\text{cm}$ )；

$I_m$  —— 电流最大值( $\text{A}$ )；

$W$  —— 每相匝数。

三相交流电磁铁常作为制动电磁铁。

### 十三、电磁铁的选用及计算

#### 1. 电磁铁的选用

电磁铁应按机械负荷要求，即工作行程、操作频率、工作方式、转矩、通电持续率( $TD\%$  值)等进行选用。

(1) 交、直流电磁铁的比较，见表 7—87。

(2) 通电持续率  $TD\%$  的计算：

$$TD\% = \frac{nt}{T} \times 100$$

式中： $n$  —— 在一个循环周期内通电次数；

表 7—87 交、直流电磁铁的比较

项 目	直 流	交 流	说 明
铁 芯	圆柱体	迭片	交流有铁耗,防剩磁的气隙直流的比交流的长
振动噪声	无	有	交流有脉动电磁吸力 $F$ 而直流无
机械强度	强	弱	交流迭压成型,机械强度弱
起动电流	$0 \rightarrow I_c$ (小)	$nI_c \rightarrow I_c$ (大)	交流电抗比气隙近似反比
吸合时间	慢	快	直流时间常数大,磁通建立缓慢
吸力特性	陡	平坦	见图 7—55
操作频率	高	低	交流铁芯机械强度弱,起动电流大,线圈温度高
线圈形状	细 长	扁 平	采用扁平线圈,改善交流电磁铁特性配合

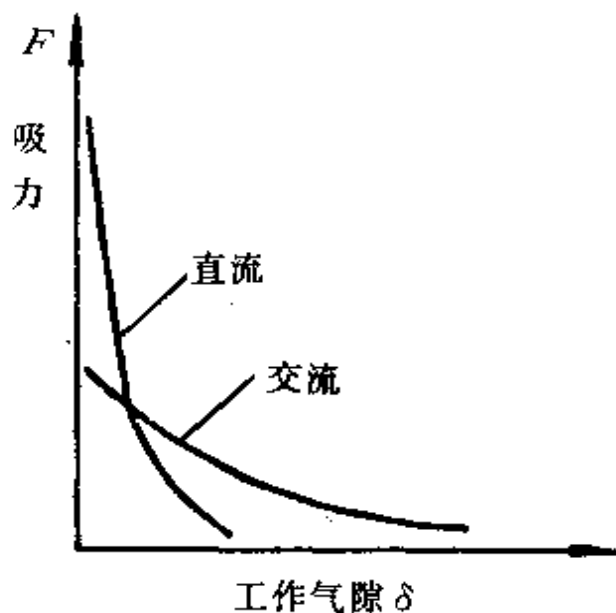


图 7—55 交、直流  $F = f(\delta)$  特性比较

$t$  —— 每次通电时间(min);

$T$  —— 电磁铁工作的一个循环周期(min)。

例如,某制动装置工作历时 1h,在这一循环过程中电磁铁通电 100 次,每次通电持续时间为 1.8min,以后循环动作,则通电持续率为

$$TD\% = \frac{100 \times 1.8}{60} \times 100 = 30$$

(3)衔铁作直线运动的制动电磁铁的选用:气隙为  $h$  时的电磁铁吸力  $F$  可由下式确定:

$$FhK \geq N\epsilon \frac{1}{\eta}$$

式中: $F$  —— 电磁铁的吸力(N);

$h$  —— 衔铁行程(cm);

$N$  —— 制动瓦块压在刹车轮上的压力(N);

$\epsilon$  —— 瓦块与刹车轮之间的空隙(cm),参见表 7-88;

$\eta$  —— 制动装置中杠杆系统的效率,对一般销钉连杆装置取 0.9~0.95;

$K$  —— 衔铁行程利用系数约 0.8~0.85,

$$K = \frac{\text{调整好的衔铁行程}}{\text{衔铁最大行程}}$$

表 7-88 刹轮直径与对应空隙距离

刹车轮直径 $D$ (mm)	100	200	300	400	500	600	700	800
空隙距离 $\epsilon$ (mm)	0.6	0.8	1.0	1.25	1.25	1.5	1.5	1.5

当制动转矩已知时,可按一定的刹车轮直径求  $N$ 。上式左边为欲选择行程  $h$  和吸力  $F$ (即确定适合的电磁铁),适当选取公式中的有关参数,便可满足上式条件。



制动瓦块在刹车轮上的压力  $N$  为

$$N = \frac{2M_{zh}}{fD}$$

式中： $M_{zh}$  ——转动力矩 ( $N \cdot m$ )，一般取  $M_{zh} = 1.75 \sim 2.5M_e$ ，

对于低压电动机取  $1.75M_e$ ，高速电动机取  $2.5M_e$ ；

$M_e$  ——电动机的额定转矩 ( $N \cdot m$ )；

$f$  ——摩擦系数，见表 7—89；

$D$  ——刹车轮直径 ( $m$ )。

按制动力矩  $M_{zh}$  选择刹车轮尺寸，见表 7—90。

(4) 衔铁作旋转运动的制动电磁铁的选用：

$$\varphi MK \geq N \epsilon \frac{1}{\eta_i}$$

式中： $M$  ——制动电磁铁在最大转角  $\varphi$  下的转矩 ( $N \cdot cm$ )；

其它符号同前。

表 7—89 瓦块材料的摩擦系数  $f$

瓦块材料	$f$ (干燥)	$f$ (潮湿)
钢	0.15~0.2	0.1~0.15
生铁	0.15~0.2	0.1~0.15
木	0.3~0.4	0.25~0.3
兰令皮	0.4~0.5	0.3~0.4

表 7—90 按制动力矩选择刹车轮尺寸表

制动力矩 (N·m)	226	412	706	1324	2746	4021	8189
刹车轮直径 (mm)	150	225	300	400	500	600	700
刹车轮宽 (mm)	80	100	125	140	150	160	190
刹车轮飞轮力矩 (N·m)	1.18	11.3	31.4	109.8	245.2	—	—

**例 7—14** 已知卷扬机的电动机参数为：串励直流电动机，电压 220V，功率 40kW，转速 980r/min，效率  $\eta$  为 0.85，通电持续率 TD% 为 25，试选择用弹簧瓦块抱闸作卷扬机构的制动装置的制动电磁铁。

**解**

(1) 制动力矩  $M_{zh}$  的确定：由于该电动机属低压电动机，取  $M_{zh} = 1.75M_e$  而

$$M_e = 9555 \frac{1.1P_e}{n} \eta = 9555 \times \frac{1.1 \times 40}{980} \times 0.85 = 364.8(\text{N} \cdot \text{m})$$

$$M_{zh} = 1.75M_e = 1.75 \times 364.8 = 638.4(\text{N} \cdot \text{m})$$

(2) 刹车轮直径选择和刹车轮压力计算：查表 7—90 可选择刹车轮直径  $D = 300\text{mm}$ ，瓦块与刹车轮间空隙取 1.0mm。

为了产生 638.4N·m 制动力矩，制动瓦块压在刹车轮的  
压力为

$$N = \frac{2M_{zh}}{fD} = \frac{2 \times 638.4}{0.45 \times 300} = 9457.5(\text{N})$$

式中，摩擦系数  $f$  查表 7—89 取 0.45（瓦块上所用材料为兰令

皮)。




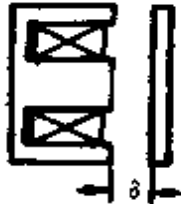


(3) 电磁铁的吸力  $F$  与衔铁行程  $h$  的计算: 取  $K = 0.85, \eta = 0.95$ , 则

$$Fh \geq \frac{N_s}{K\eta} = \frac{9457.5 \times 1.0}{0.85 \times 0.95} = 11712(\text{N} \cdot \text{m})$$

### 2. 直流电磁铁结构型式的选择

大量的研究资料表明, 结构因数  $K_s$  和电磁铁型式之间的关系, 见表 7—91。按表选择的电磁铁型式是最经济的。

表 7—91 结构因数与电磁铁型式的关系

结构因数 $K_s$	电磁铁型式	结构因数 $K_s$	电磁铁型式
$< 0.5$	无档铁螺管式电磁铁 	51.7~291	具有平面柱挡铁的螺管式电磁铁 
5.8~12.5	具有圆锥形( $\alpha = 60^\circ$ )挡铁的螺管式电磁铁 	$> 291$	衔铁为平板形的盘式电磁铁 
12.5~51.6	具有圆锥形( $\alpha = 45^\circ$ )挡铁的螺管式电磁铁 	8.1~81.4	拮合式电磁铁 

$$K_s = \frac{\sqrt{F}}{\delta}$$

式中： $F$  —— 电磁铁吸力(N)；

$\delta$  —— 衔铁行程(cm)。

**例 7—15** 欲设计一个电磁铁，已知额定工作行程  $\delta$  为 0.9cm，在该行程时吸力  $F$  为 120N，问应采用何种型式电磁铁最经济？

**解** 结构因数  $K_s = \sqrt{120}/0.9 = 12.2$ ，查表 7—91 可知，采用具有圆锥形( $\alpha = 60^\circ$ )档铁的螺管式电磁铁最经济。

### 3. 交流电磁铁的基本计算公式

(1) 电势公式：

$$E = 4.44fWSB_m$$

式中： $E$  —— 线圈中的感应电势(V)；

$f$  —— 电源频率(Hz)；

$W$  —— 线圈匝数；

$S$  —— 铁芯截面( $\text{cm}^2$ )；

$B_m$  —— 铁芯中磁通密度最大值(T)。

衔铁处在最大行程时， $E \approx (0.96 \sim 0.98)U$ ；工作气隙  $\delta$  最小，衔铁在闭合位置时，则  $E \approx U$ 。由于线路电压可能发生波动，电源电压  $U$  可能降低至最小值，即  $U = 0.85U_0$  ( $U_0$  为线路额定电压)。

(2) 吸力公式：

$$F = 19.6B_m^2S$$

式中： $F$  —— 电磁铁吸力(N)；

$B_m$  —— 工作气隙中磁通密度最大值(T)，一般可取 0.20 ~ 1.00；

$S$  —— 铁芯截面(cm)。

(3)线圈匝数公式

$$W = \frac{E}{4.44f\phi_{mc}}, \phi_{mc} = \sigma B_m S, E \approx 0.96U。$$

式中： $\phi_{mc}$  —— 铁芯中磁通最大值(Wb)；

$\sigma$  —— 漏磁系数，约为 1.3~2.5。

(4)导线直径经验计算公式：

①线圈电压为 220V 时：

$$d = 0.12 \sqrt{F}$$

式中： $d$  —— 铜导线直径(mm)；

$F$  —— 电磁铁吸力(N)。

从而可查线规表，得绝缘导线外径  $d'$ 。

②线圈电压不是 220V 而是  $U_2$  时：

$$d_2 = d_1 \sqrt{\frac{U_1}{U_2}} = 0.12 \sqrt{F} \sqrt{\frac{220}{U_2}} = 1.78 \sqrt{\frac{F}{U_2}}$$

式中： $d_1, d_2$  —— 线圈电压为 220V 时和  $U_2$  时的铜导线直径(mm)；

$F$  —— 同前。

(5)线圈厚度和高度的计算公式：

$$b_k = d' \sqrt{\frac{W}{\beta}}, \quad l_k = \beta b_k$$

式中： $b_k$  —— 线圈厚度(cm)；

$l_k$  —— 线圈高度(cm)；

$\beta$  —— 线圈高度与厚度比，见表 7—92；其它符号同前。

#### 十四、交、直流电磁铁线圈的简单计算

当电磁铁工作参数(如电压、电流、通电持续率、频率)改变时，都需要重新换一个线圈，这时在磁路系统和线圈骨架都已确

定的条件下,线圈参数要作相应的改变。

表 7—92 线圈高度与厚度之比  $\beta$  值

电磁铁型式		$\beta$ 值	
		直流电磁铁	交流电磁铁
拍合式	带极靴	4~6	2
	不带极靴	5~7	
U 型	带极靴	5~7	2
	不带极靴	6~8	
盘 式		2~4	1~2
装甲螺管式		7~8	3~4

1. 线圈匝数和导线直径的计算

(1) 直流电磁铁改变电压线圈电压的换算:

$$\text{导线直径 } d_2 = d_1 \sqrt{\frac{U_1}{U_2}}$$

$$\text{线圈匝数 } W_2 = W_1 \left(\frac{d_1}{d_2}\right)^2$$

$$\text{线圈电阻 } R_2 = \frac{W_2}{W_1} \left(\frac{d_1}{d_2}\right)^2 R_1$$

式中:  $d_1, d_2$  —— 改压前和改压后的导线直径(mm);

$d_1, d_2$  —— 改压前和改压后的绝缘导线外径(mm);

$W_1, W_2$  —— 改压前和改压后线圈的匝数;

$R_1, R_2$  —— 改压前和改压后线圈的电阻( $\Omega$ )。

(2) 直流电磁铁改变通电持续率的换算: 当电源电压不变,

而仅改变通电持续率时

$$\text{导线直径 } d_2 = \sqrt{\frac{TD_1}{TD_2}} d_1$$

$$\text{线圈匝数 } W_2 = W_1 \left( \frac{d_1}{d_2} \right)^2$$

$$\text{线圈电阻 } R_2 = \frac{W_2}{W_1} \left( \frac{d_1}{d_2} \right)^2 R_1$$

式中： $TD_1$ 、 $TD_2$  ——改绕前和改绕后的通电持续率；

其它符号同前。

注意：如果选用的是标准线规中邻近较大的直径，则线圈发热和吸力都将较原来线圈时略大；反之，则发热和吸力都将略小。

(3) 交流电磁铁改变电压线圈电压的换算：

$$\text{导线直径 } d_2 = d_1 \sqrt{\frac{U_1}{U_2}}$$

$$\text{线圈匝数 } W_2 = W_1 \frac{U_2}{U_1}$$

(4) 电磁铁电流线圈的换算：当通过电磁铁电流线圈的电流值（交流或直流）改变时，为了保持电磁吸力不变，安匝数  $IW$  应保持不变，故线圈匝数为

$$W_2 = W_1 \frac{I_1}{I_2}$$

为了保持换算后线圈温升不变，电流密度应保持不变，故导线直径为

$$d_2 = d_1 \sqrt{\frac{I_2}{I_1}}$$

式中： $I_1、I_2$  —— 改绕前和改绕后电流线圈的电流(A)；

$W_1、W_2$  —— 改绕前和改绕后电流线圈的匝数；

$d_1、d_2$  —— 改绕前和改绕后电流线圈的直径(mm)。

(5)各种情况的线圈换算表：为了方便与明显起见，将各种情况的线圈换算关系列于表 7—93。表中角码“1”表示标准产品的电气参数；“2”表示换算后产品的有关线圈数据。

例如，欲将 110V 的交流继电器改为 100V，则  $\frac{U_2}{U_1} = \frac{110}{100} = \alpha = 1.1$ ，由表 7—93 中序号 6 查得线圈匝数为  $W_2 = \alpha W_1 = 1.1W_1$ ；导线直径为  $d_2 = \alpha^{-\frac{1}{2}}d_1 = \frac{1}{\sqrt{1.1}}d_1$ ；线圈电流为  $I_2 = \alpha^{-1}I_1 = \frac{1}{1.1}I_1$ ；电阻为  $R_2 = \alpha^0 R_1 = R_1$ 。

### 2. 校验线圈能否放入铁芯窗口

$$Q_k = \frac{W_k^2}{f_k} \leq Q$$

式中： $Q_k$  —— 线圈的截面积(mm<sup>2</sup>)；

$Q$  —— 铁芯窗口面积(mm<sup>2</sup>)；

$q$  —— 导线截面积(mm<sup>2</sup>)；

$f_k$  —— 线圈填充系数，见表 7—94。

### 3. 线圈的温升校验

$$\tau = \frac{P}{aS_r} = \frac{I^2 R}{aS_r} = \frac{U^2}{RaS_r} \leq \tau_{u2}$$

其中， $S_r = S_u + \eta_m S_n$

式中： $\tau$  —— 线圈的温升(°C)；

$\tau_{u2}$  —— 线圈的允许温升(°C)；

$P$  —— 线圈的功率损耗(W)；



表 7-93 线圈换算表

序号	线圈种类	要改变的参数	保持条件	变化参数比	匝数比 $W_2/W_1$	圆线直径比 $d_1/d_2$	扁线截面比 $q_2/q_1$	电阻比 $R_2/R_1$	电流比 $I_2/I_1$	变换后某些特性的变化		
										温升	吸力特性	线圈骨架
1	直流电压线圈	$U$	$F_1 = F_2$ $\tau_1 = \tau_2$ $f_{k1} = f_{k2}$	$\frac{U_2}{U_1} = a$	$a$	$a^{-\frac{1}{2}}$	$a^{-1}$	$a^2$	$a^{-1}$	基本不变	基本不变	有余量
2	直流电压线圈	$TD$	$U_1 = U_2$ $\tau_1 = \tau_2$ $f_{k1} = f_{k2}$	$\frac{TD_1}{TD_2} = a$	$a^{-\frac{1}{2}}$	$a^{\frac{1}{4}}$	$a^{\frac{1}{2}}$	$a^{-1}$	$a$	$a > 1$ $\tau_2 > \tau_1$	$u > 1, F_2 > F_1$ $u < 1, F_2 < F_1$	$a > 1$ , 有余量 $a < 1$ , 略小
3	直流电流线圈	$TD$	$I_1 = I_2$ $\tau_1 = \tau_2$ $f_{k1} = f_{k2}$	$\frac{TD_1}{TD_2} = a$	$a^{\frac{1}{2}}$	$a^{-\frac{1}{4}}$	$a^{\frac{1}{2}}$	$a$	$a^0$	$a > 1$ $\tau_2 > \tau_1$	$u > 1, F_2 > F_1$ $u < 1, F_2 < F_1$	$u < 1$ , 略小
4	直流电流线圈	$I$	$F_1 = F_2$ $f_{k1} = f_{k2}$	$\frac{I_2}{I_1} = a$	$a^{-1}$	$a^{\frac{1}{2}}$	$a$	$a^{-2}$	$a$	基本不变	基本不变	$u > 1$ , 有余量

(续表)

序号	线圈种类	要改变的参数	保持条件	变化参数比	匝数比 $W_2/W_1$	圆线直径比 $d_1/d_2$	扁线截面比 $q_2/q_1$	电阻比 $R_2/R_1$	电流比 $I_2/I_1$	变换后某些特性的变化		
										温升	吸力特性	线圈骨架
5	交流电流线圈	$I$	$F_1 = F_2$ $f_{k1} = f_{k2}$	$I_2/I_1 = a$	$W_2/W_1 = a^{-1}$	$d_1/d_2 = a^{1/2}$	$q_2/q_1 = a$	$R_2/R_1 = a^2$	$I_2/I_1 = a$	基本不变	$a > 1, F_2 > F_1$ $a < 1, F_2 < F_1$	$a > 1$ , 有少量
6	交流电压线圈	$U$	$F_1 = F_2$ $\tau_1 = \tau_2$ $f_{k1} = f_{k2}$	$U_2/U_1 = a$	$W_2/W_1 = a$	$d_1/d_2 = a^{-1/2}$	$q_2/q_1 = a^{-1}$	$R_2/R_1 = a^0$	$I_2/I_1 = a^{-1}$	温升下降	基本不变	有少量
7		$f$	$U_1 = U_2$ $\tau_1 = \tau_2$ $f_{k1} = f_{k2}$	$f_2/f_1 = a$	$W_2/W_1 = a^{-1}$	$d_1/d_2 = a^{1/2}$	$q_2/q_1 = a$	$R_2/R_1 = a^{-2}$	$I_2/I_1 = a$	基本不变	$a > 1, F_2 > F_1$ $a < 1, F_2 < F_1$	$a > 1$ , 有少量 $a < 1$ , 不够用

注:  $f_k$ ——线圈填充系数;  $F$ ——吸力;  $\tau$ ——线圈温升。

表 7—94 珐琅漆包绝缘导线的线圈填充系数  $f_k$

裸导线 直径 (mm)	手动送线绕制				自动送线绕制	
	圆筒框套	矩形框套	矩形框套 每层垫纸	矩形框套每 两层垫纸	圆筒框套 每层垫纸	矩形框套 每层垫纸
0.05	—	—	—	0.3	—	—
0.10	0.440	0.420	0.285	0.35	0.38	0.36
0.15	0.495	0.475	—	0.39	—	—
0.20	0.535	0.515	0.350	0.425	0.48	0.44
0.25	—	—	—	0.460	—	—
0.30	—	—	0.385	—	0.54	0.37
0.40	—	—	0.410	—	0.57	0.53

$U$  —— 线圈工作电压(V),取额定电压的 1.05 或 1.1 倍  
值;

$R$  —— 线圈电阻( $\Omega$ ),铜导线的电阻率  $\rho$  见表 7—95;

$\alpha$  —— 线圈的散热系数( $W/cm^2 \cdot ^\circ C$ ),见表 7—96;

$S_r$  —— 线圈的散热表面积( $cm^2$ );

$S_w$  —— 线圈外表面面积( $cm^2$ );

$S_n$  —— 线圈内表面面积( $cm^2$ );

$\eta_m$  —— 经验系数,在 0 ~ 2.4 范围内,可按以下经验估计:  
金属骨架的线圈,  $\eta_m = 1.7$ ; 无骨架线圈,  $\eta_m = 0.9$   
~ 1; 直接绕在铁芯上的线圈  $\eta_m = 2.4$ 。

若结果不满足上式条件,则说明所选取的电流密度太大,应减小电流密度,使导线截面适当放大些,重新计算,直到温升合格为止。

温升校验时用到的线圈导线电阻  $R$ 、线圈内表面面积  $S_n$  和外表面面积  $S_w$  可按下法计算:

表 7—95 铜导线的电阻率  $\rho$  值

工作温度 (°C)	电阻率 $\rho$ ( $\Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$ )	工作温度 (°C)	电阻率 $\rho$ ( $\Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$ )
20	$\rho_{20} = 0.01754$	90	$\rho_{90} = 0.02236$
35	$\rho_{35} = 0.01857$	105	$\rho_{105} = 0.02339$
40	$\rho_{40} = 0.01991$	120	$\rho_{120} = 0.02443$

表 7—96 线圈的散热系数  $\alpha$  值的经验数据

线圈温升 (°C)	$\alpha \times 10^{-4} (\text{W}/\text{cm}^2 \cdot \text{°C})$	
	A 类 当线圈到铁芯柱之间的 热传导良好时	B 类 当线圈到铁芯柱之间 热传导不良时
40	11.00	9.84
45	11.20	10.01
50	11.41	10.19
55	11.62	10.37
60	11.80	10.54
65	12.04	10.72
70	12.25	10.99
75	12.46	11.17
80	12.68	11.35
85	12.89	11.52

注：表中 A 类一般适用于直流电磁铁的线圈，B 类适用于交流。

甲乙丙甲乙丙甲

当已知线圈的内径  $D_1$  和外径  $D_2$  时,则线圈的电阻  $R$  为

$$R = \rho \frac{L}{S} = \frac{\rho \pi D_p W}{\frac{\pi}{4} d^2}, D_p = D_1 + b_k$$

式中:  $D_p$  —— 线卷的平均直径(m);

$b_k$  —— 线圈厚度(m);

$d$  —— 线圈导线直径(mm)。

线圈内表面面积  $S_n = \pi D_1 l_k$

线圈外表面面积  $S_w = \pi D_2 l_k$

式中:  $l_k$  —— 线圈高度。

**例 7-16** 已知直流电磁铁线圈的工作电压为 48V,匝数为 6000 匝,线圈高度为 50mm,导线为 QZ 聚酯漆包圆铜线,直径为 0.20mm 绝缘导线外径为 0.23mm。现欲改为在 110V 电压下工作,保持原来电磁力不变,试计算改绕参数。

**解** (1)改绕后的导线直径为

$$d_2 = d_1 \sqrt{\frac{U_1}{U_2}} = 0.20 \times \sqrt{\frac{48}{110}} = 0.132(\text{mm})$$

查线规表,取导线直径  $d_2$  为 0.14mm、绝缘导线外径  $d_2$  为 0.165mm 的圆铜漆包线。

(2)改绕后线圈的匝数为

$$W_2 = W_1 \left(\frac{d_1}{d_2}\right)^2 = 6000 \times \left(\frac{0.20}{0.14}\right)^2 = 12244(\text{匝})$$

(3)原线圈厚度为

$$b_1 = \frac{W q_1}{l_k f_k} = \frac{6000 \times \frac{\pi}{4} \times 0.20^2}{50 \times 0.545} = 6.92(\text{mm}), \text{取 } 7\text{mm}。$$

式中:线圈填充系数取  $f_{k1} = 0.545$ 。

(4)改绕后线圈厚度为

$$b_2 = \frac{W_2 q_2}{l_k f_{k2}} = \frac{12240 \times \frac{\pi}{4} \times 0.14^2}{50 \times 0.505} = 7.46(\text{mm}), \text{取 } 7.5\text{mm}$$

式中,取  $f_{k2} = 0.505$ 。

(5)线圈温升校验(略)。

### 十五、直流线圈的简捷设计

对于常用的电磁式继电器和接触器可以利用诺模图(图7—56)进行简捷设计。利用它可以很快地确定线圈的尺寸、线圈匝数、线径和电阻等。图7—56的线圈计算图是假定电源电压为额定值的1.05倍时,线圈稳定温升为 $+70^{\circ}\text{C}$ 所作出的,如果线圈温升只允许 $65^{\circ}\text{C}$ ,则按该计算图求得的线圈匝数 $W$ 应增加5~7%左右,线圈温升合格。

#### 1. 第一类设计

已知安匝数 $IW$ 、线圈工作电压 $U$ 、线圈高度与厚度比 $\beta$ (见表7—92),求线圈的尺寸参数的计算步骤:

(1)确定线圈厚度 $b_k$ 、高度 $l_k$ 及线圈窗口面积 $b_k l_k$ :把已知的 $IW$ 和 $\beta$ 值放到相应标号的 $IW(1)$ 及 $\beta$ 座标线上,用直尺连接这两点,连线与座标线 $b_k$ 、 $l_k$ 、 $b_k l_k$ 的交点就是所求的相应值。

(2)求出 $20^{\circ}\text{C}$ 时平均匝长的电阻值 $R_{p20}$ :把已知的 $U$ 及 $IW$ 放到相应的 $U$ 座标线及 $IW(2)$ 座标线上,连接这两点,即可在座标线 $R_{p20}$ 上找到 $20^{\circ}\text{C}$ 时平均匝长电阻值 $R_{p20}$ 。

(3)求导线直径 $d$ :根据铁芯尺寸及骨架的结构确定线圈内径 $D_1$ ,求出绕组平均直径: $D_p = D_1 + b_k$ 。连接 $D_p$ 与 $R_{p20}$ ,在 $d$ 座标线上即可找到导线直径 $d$ 。查线规表,得绝缘导线外径 $d'$ 。

(4)确定线圈匝数 $W$ :连接 $d'$ 和 $b_k l_k$ 两点,在座标线 $W$ 上即可找到线圈匝数 $W$ 。

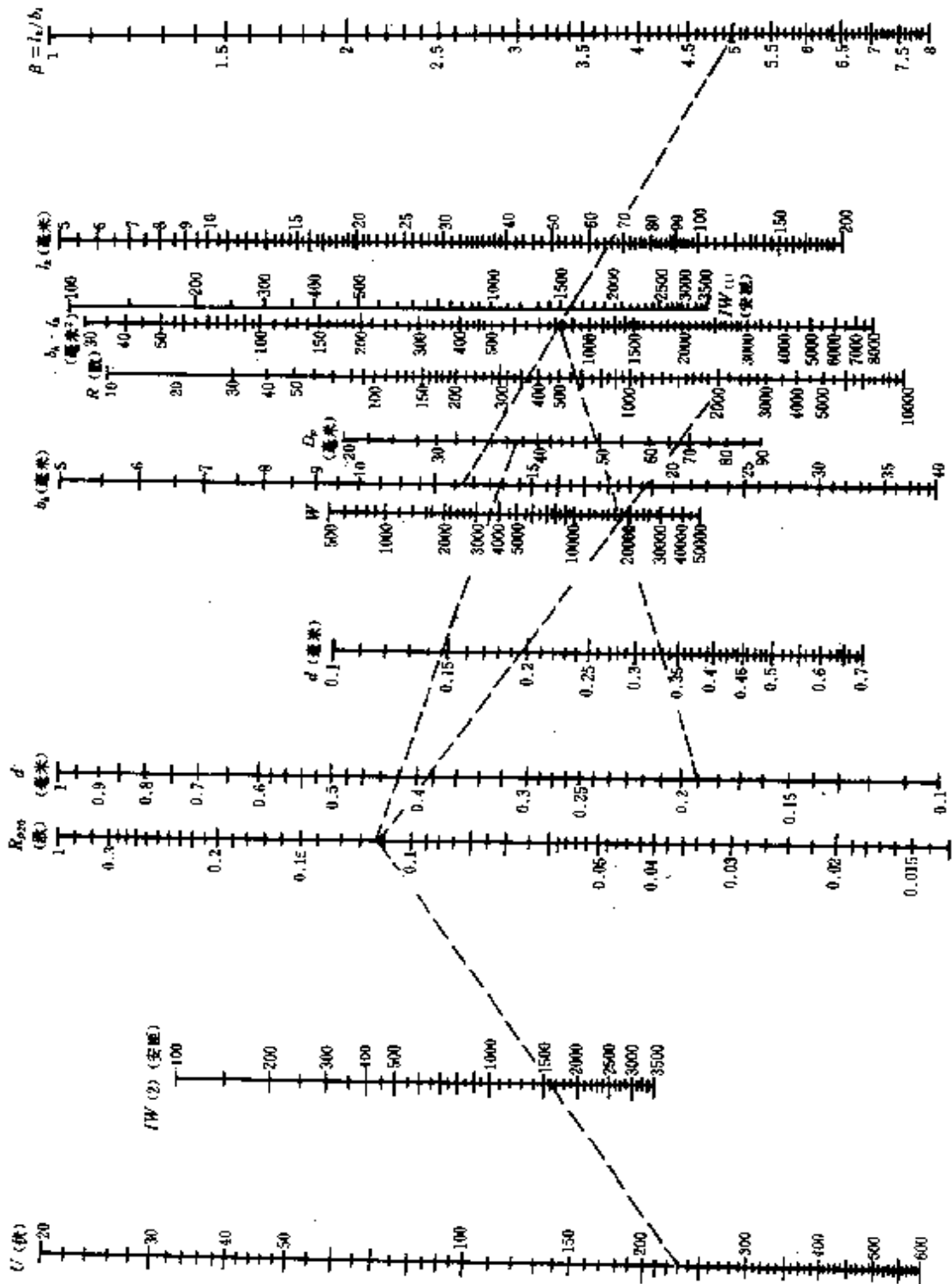


图 7-56 直流线圈的计算图

(5) 求线圈总电阻  $R$ : 连接  $W$  和  $R_{p20}$  两点, 在座标线  $R$  上即可找到  $20^{\circ}\text{C}$  时线圈总电阻  $R$  值。

把上述计算步骤简单地归纳如下: 由  $IW_{(1)}$  与  $\beta$  决定  $b_k, l_k, b_k l_k$ ; 由  $U$  与  $IW_{(2)}$  决定  $R_{p20}$ ; 由  $R_{p20}$  与  $D_p$  决定  $d$ ; 由  $d'$  与  $b_k l_k$  决定  $W$ ; 由  $W$  与  $R_{p20}$  决定  $R$ 。

### 2. 第二类设计

已知线圈尺寸、任意标号直径的导线, 求线圈的匝数及电阻的计算步骤:

- (1) 由  $d'$  与  $b_k l_k$  决定  $W$ ;
- (2) 由  $d$  与  $D_p$  决定  $R_{p20}$ ;
- (3) 由  $R_{p20}$  与  $W$  决定  $R$ 。

### 3. 第三类设计

已知线圈尺寸、电源电压, 求温升为  $70^{\circ}\text{C}$  时线圈的数据的计算步骤:

- (1) 由  $b_k$  与  $\beta$  决定  $IW_{(1)}$ ;
- (2) 由  $IW_{(2)}$  与  $U$  决定  $R_{p20}$ ;
- (3) 由  $R_{p20}$  与  $D_1$  决定  $d$ ;
- (4) 由  $d'$  与  $b_k l_k$  决定  $W$ ;
- (5) 由  $W$  与  $R_{p20}$  决定  $R$ 。

### 4. 第四类设计

已知原有线圈的尺寸及数据, 求线圈工作电压改变(不改变原有线圈尺寸)时新线圈的参数的计算步骤:

- (1) 先按下式求出新线圈的平均电阻  $R_{p20(2)}$ :

$$R_{p20(2)} = \frac{U_2}{U_1} R_{p20(1)}$$

式中:  $R_{p20(1)}$  —— 原线圈的平均电阻( $^{\circ}\text{C}$ )。

- (2) 由  $R_{p20}$  (指  $R_{p20(2)}$ ) 与  $D_p$  决定  $d$ ;
- (3) 由  $d'$  与  $b_k l_k$  决定  $W$ ;



(4) 由  $W$  与  $R_{p20}$  决定  $R$ 。

**例 7—17** 已知一直流接触器所需励磁安匝  $IW$  为  $1600\text{At}$ , 电源额定电压  $U_e$  为  $220\text{V}$ , 当电压为  $1.05U_e$  时其稳定温升为  $65^\circ\text{C}$ 。又铁芯直径为  $20\text{mm}$ , 试设计该线圈的尺寸及参数。

**解** 先按表 7—92 选取线圈高度与厚度比  $\beta = 5$ 。

(1) 连接  $IW_{(1)} = 1600\text{At}$  和  $\beta = 5$  两点, 可在  $b_k, l_k, b_k l_k$  座标线上求得  $b_k = 12.7\text{mm}$ ,  $l_k = 65\text{mm}$ ,  $b_k l_k = 825\text{mm}^2$ 。

(2) 连接  $U = 1.05U_e = 232\text{V}$  与  $IW_{(2)} = 1600\text{At}$ , 即可在  $R_{p20}$  座标线上找到  $R_{p20} = 0.112\Omega$ 。

(3) 已知铁芯直径为  $20\text{mm}$ , 考虑线圈骨架的厚度, 取线圈内径  $D_1 = 24\text{mm}$ , 故线圈平均直径为

$$D_p = D_1 + b_k = 24 + 12.7 = 36.7(\text{mm})$$

连接  $R_{p20} = 0.112\Omega$  与  $D_p = 36.7\text{mm}$  两点, 可在  $d$  座标线上求得导线直径  $d = 0.148\text{mm}$ 。查线规表, 得绝缘导线外径  $d' = 0.19\text{mm}$  (采用 QQ 型)。

(4) 连接  $d' = 0.19\text{mm}$  和  $b_k l_k = 825\text{mm}^2$  两点, 可在  $W$  座标线上求得线圈匝数  $W = 17000$  匝。由于图 7—56 是假设温升为  $+70^\circ\text{C}$  所作出的, 现线圈温升只允许  $65^\circ\text{C}$ , 因此匝数  $W$  应增加  $5 \sim 7\%$ , 取  $6\%$ , 线圈匝数为  $W = 1.06 \times 17000 = 18020$  (匝)。

(5) 连接  $W = 18020$  匝和  $R_{p20} = 0.112\Omega$  两点, 可在  $R$  座标线上求得  $20^\circ\text{C}$  时线圈总电阻  $R = 2100\Omega$ 。

### 十六、交流线圈的简捷设计

已知磁路系统尺寸和铁芯截面  $S$ 、线圈工作电压 (电源电压)  $U_e$ 、电磁铁工作制, 求线圈匝数及导线直径的计算步骤:

1. 由铁芯截面积  $S$  和工作制的  $TD\%$  值, 查图 7—57 中曲线, 求出线圈每伏的匝数  $W$ 。

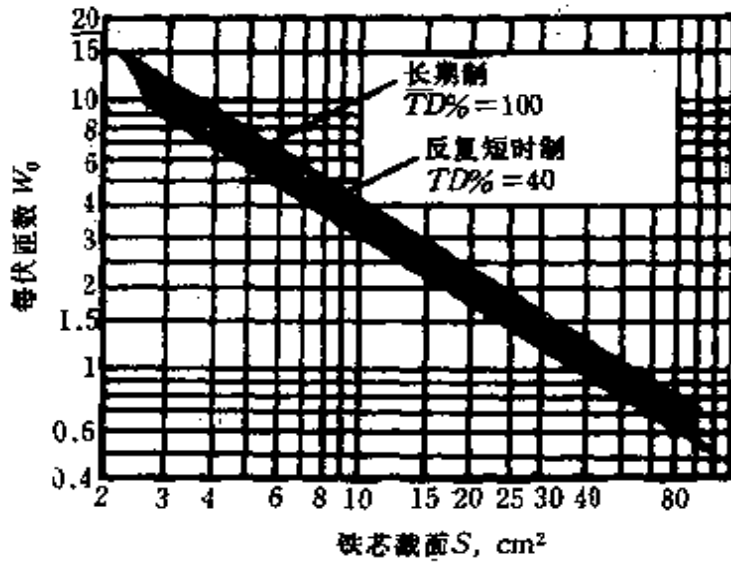


图 7—57 求线圈匝数的曲线

2. 由电源电压  $U_e$  求出线圈的匝数

$$W = U_e W_0$$

3. 根据已知的磁路系统结构尺寸, 算出铁芯窗口面积

$$Q = hC$$

式中:  $Q$  —— 铁芯窗口面积 ( $\text{mm}^2$ );

$h$  —— 铁芯窗口高度 ( $\text{mm}$ );

$C$  —— 铁芯窗口宽度 ( $\text{mm}$ ).

线圈在铁芯窗口中所占的截面积为

$$Q_k = K_0 Q$$

式中:  $K_0$  —— 窗口填充系数 (它和线圈填充系数  $f_k$  值不同), 可由图 7—58 查得。

图 7—58 为求填充系数  $K_0$  的曲线。

4. 求导线直径  $d$

先按下式计算出单位截面的匝数  $W'_0$

$$W'_0 = W / Q_k$$

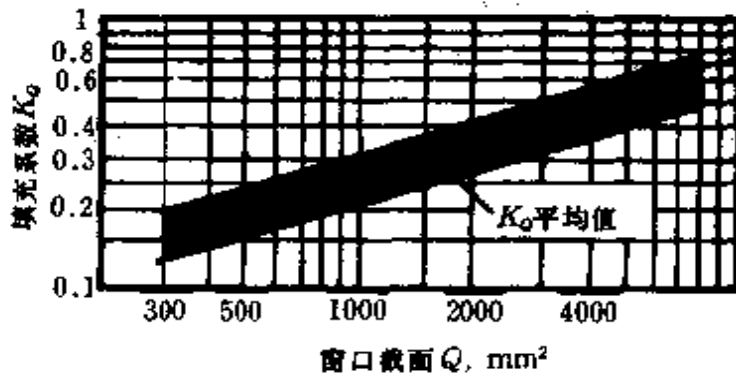


图 7—58 求填充系数  $K_0$  的曲线

再由图 7—59 查出对应的线圈导线直径。图 7—59 中,  $Q$  表示油性漆包线;  $QSR$  表示单丝漆包线。

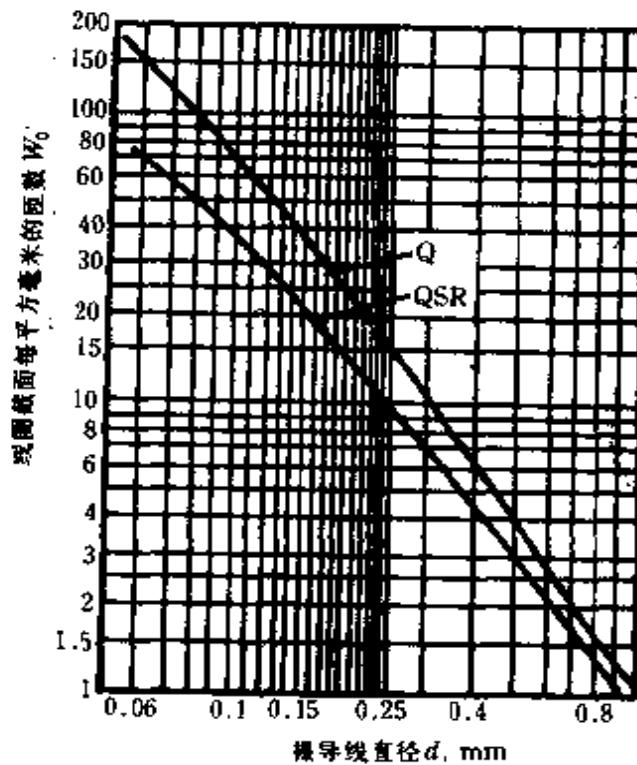


图 7-59 求线圈导线直径的曲线

**例 7-18** 已知某电磁铁线圈工作电压  $U_e$  为 220V, 铁芯截面  $S$  为  $4.2\text{cm}^2$ , 铁芯窗口高度  $h$  为 32mm, 宽度  $C$  为 28mm, 线圈的工作制为  $TD=80\%$ , 试求线圈的参数。

**解** (1) 由  $S=4.2\text{cm}^2$  和  $TD=80\%$ , 查图 7-57 曲线, 得对应的每伏匝数  $W_0=8.2$

(2) 线圈匝数为

$$W = U_e W_0 = 220 \times 8.2 = 1804 (\text{匝}), \text{取 } 1800 \text{ 匝}$$

(3) 由铁芯窗口面积  $Q = 32 \times 28 = 896 (\text{mm}^2)$ , 查图 7-58 中曲线, 得对应的窗口填充系数  $K_Q = 0.24$ , 因此线圈的截面积为

$$Q_s = K_Q Q = 0.24 \times 896 = 215 (\text{mm}^2)$$

(4) 求线圈导线直径  $d$ :

$W_0' = \frac{W}{Q_s} = \frac{1800}{215} = 8.4$ , 采用 Q 型漆包线, 在图 7-59 中查出对应的线圈导线直径为  $d = 0.27 \text{ mm}$ 。

(5) 温升校验(略)

### 十七、操作机构合闸电磁铁的计算

#### 1. 线圈安匝数的计算

$$IW = \frac{Ud^2}{4\rho D_p} \times 10^{-4}$$

式中:  $I$  —— 线圈的稳态电流(A);

$W$  —— 线圈匝数(匝);

$U$  —— 电源电压(V);

$d$  —— 线圈导线直径(mm);

$\rho$  —— 导线电阻率( $\Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$ );

$D_p$  —— 线圈的平均直径(cm)。

### 2. 线圈改绕计算

若要在线圈外形尺寸不变的条件下,增大线圈的安匝数,以提高输出力时,可保留原线圈的部分匝数,只拆除另一部分加以重绕,将留下的部分原线圈与新绕的线圈并联,如图 7—60 所示。

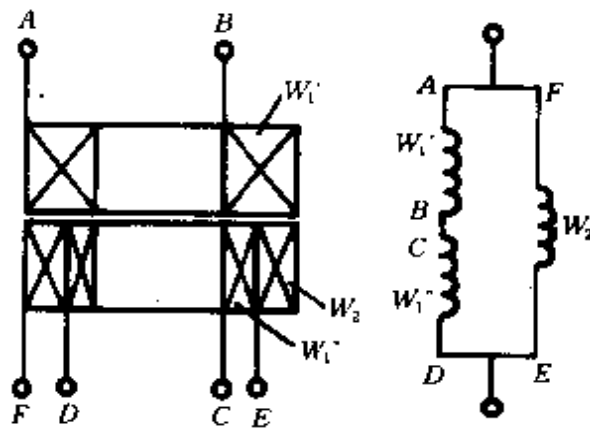


图 7—60 线圈改绕的结构及接线图

拆除后保留的匝数  $W_1$  为

$$W_1 = W_1' + W_1'' \approx \frac{IW}{IW + \Delta(IW)} W$$

应拆掉的匝数  $W_2$  为

$$W_2 = W - W_1$$

式中:  $W$  —— 原线圈匝数;

$\Delta(IW)$  —— 需增大的安匝数。

新绕线圈导线直径为

$$d = 200 \sqrt{\frac{\rho D_p \Delta(IW)}{U}}$$

应绕匝数  $W_2'$  为

$$W_2' = \frac{f_k Q_1}{\frac{\pi}{4} d^2}$$

式中： $f_k$  ——新绕线圈部分的填充系数；

$Q_1$  ——拆掉部分的窗口面积( $\text{cm}^2$ )。

### 3. 温升校验

合闸线圈为短时工作时，铜导线温升可按下式计算：

$$\tau = 0.0066 \left( \frac{4I}{\pi d^2} \times 80\% \right)^2 t \leq \tau_{ux}$$

式中： $\tau$  ——铜导线的温升( $^{\circ}\text{C}$ )；

$\tau_{ux}$  ——线圈的允许温升( $^{\circ}\text{C}$ )；

$d$  ——导线直径(mm)；

$t$  ——通电时间(s)；

$I$  ——同前。

设计时应考虑连续几次操作，线圈的温升不应超过允许温升。

## 十八、保护继电器和时间继电器的选用

### 1. 过电流继电器的选用

过电流继电器应按以下条件选用：

(1)按电流种类选择继电器的型式。

(2)继电器额定电流  $I_{jn}$  不小于电动机额定电流  $I_{de}$ 。

(3)继电器动作电流整定值  $I_{jd}$ ：

$$I_{jd} = (1.1 \sim 1.3) I_0$$

式中： $I_0$  ——电动机起动电流最大值(A)。

继电器动作电流应留有一定的上下限调整范围。

### 2. 堵转保护用过电流继电器的选用

重复短时运转的鼠笼型异步电动机，可采用过电流继电器

与延时继电器组成堵转保护环节,实现电动机过载保护。其延时时间略大于电动机的起动时间,其整定值应使继电器在电动机长期过载或堵转时动作,而在电流接近额定电流时应释放。通常采用的高返回系数的过电流继电器,有 JL14—JG、JL15 型。

### 3. 过电压保护继电器的选用

过电压保护继电器通常用于直流发电机端电压保护。选用条件如下:

(1)当控制系统过电压时,加于继电器线圈的电压不应超过继电器额定电压值。

(2)继电器动作电压整定值  $U_{jd}$  :

$$U_{jd} = (1.1 \sim 1.15)U_e$$

式中:  $U_e$  —— 线路额定电压(V)。

对于 JT3 系列直流电压继电器,其额定线圈电压  $U_{je}$  为 220V 时,吸合动作电压约为  $(0.3 \sim 0.5)U_{je}$ ,当用于 220V 线路上作过电压保护时,继电器线圈必须串接附加电阻  $R_f$ ,以达到既能保护线路过电压,又不使加于继电器的电压超过其额定电压而遭损坏。

假定吸引电压为继电器线圈额定电压的 40%,则

$$0.4U_{je} = (1.1 \sim 1.15)U_e \frac{R_j}{R_j + R_f}$$

$$R_f = (2.75 \sim 2.9) \frac{U_e}{U_{je}} R_j - R_j$$

式中:  $R_f$  —— 附加电阻( $\Omega$ );

$U_e$  —— 控制系统线路的额定电压(V);

$U_{je}$  —— 继电器线圈的额定电压(V);

$R_j$  ——继电器线圈的额定电阻( $\Omega$ )。

#### 4. 失磁保护继电器的选用

失磁保护继电器通常用于直流电动机失磁保护。选用条件如下：

- (1) 继电器额定电流  $I_{je}$  不小于电动机额定励磁电流  $I_{le}$ 。
- (2) 继电器的释放电流整定值  $I_{jf}$ ：

$$I_{jf} = (0.8 \sim 0.85)I_{lmin}$$

式中： $I_{lmin}$  ——电动机的最小励磁电流(A)。

继电器的释放电流应留有一定的上下限调整范围。

#### 5. 欠电压继电器的选用

欠电压继电器通常用于交流电动机欠压保护。

可按线路电压选择欠电压继电器。一般控制系统对释放电压值无特殊要求。

#### 6. 时间继电器的选用

(1) 在动作较频繁的场所，可选用电磁式时间继电器，如 JS3、JT3 型。

(2) 在延时精度要求不高的场合，可选用空气式延时继电器（得电延时）。

(3) 在延时精度要求较高的场合，可选用晶体管式（如 JJS1 型）或电动式时间继电器（如 JS10 型）。

(4) 在动作频率较高的场合，可选用晶体管式时间继电器。

(5) 长延时（以分或小时计），可选用电动式时间继电器。

(6) 在多尘或有潮气的场合，可选用水银式时间继电器、封闭式时间继电器或防潮型时间继电器。

各类时间继电器性能比较，见表 7-97。

### 十九、继电器加速与延缓电路

当需要继电器动作或释放得以加速或延缓时，可采取改变线路结构、参数及外加一些元件等办法。



表 7--97 各类时间继电器性能比较

类 别	延时范围	精度(%)	环境温度 (°C)	参考型号	备 注
电 磁 式	10ms~2s	±10	-20~40	JRB、JR-2	
	0.1~10s	±2	-20~40	DS-110、DS-120	
机械式	0.5s~数h	±2	-10~40	JS-10、JS-11	直流产品制造困难
电 热 式	0.5~100s				
	1~200s	±10	-55~85	JF-7F、JE-10M	
阻 尼 式	0.4~180s	±10		JS-7、JSK-1	
	0.25~20s			JSS	
晶 体 管 式	10ms~600s	±4	-10~50		低压直流困难
	10ms~60s	±5	-20~50	JS-12、JSB-3	特殊要求可用于 -55~85°C
计 数 式	0.1~9999s	±1位	0~40	JSSB	

1. 加速继电器动作(触动)时间电路

(1)加速电路一:如图 7—61 所示。

图中:  $I_e$  为继电器的额定电流;  $I_{dz}$  为继电器的动作电流(下同)。

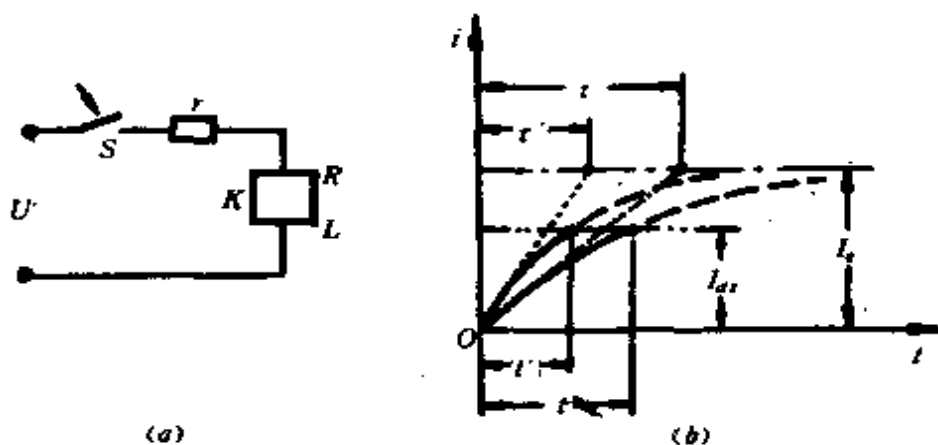


图 7—61 加速电路一  
(a) 原理电路 (b) 电流变化规律

① 条件:  $I_e = \frac{U}{R} = \frac{U'}{R+r} = \text{常数}$

② 时间常数:  $\tau = \frac{L}{R}; \tau' = \frac{L}{R+r}$

③ 储备系数:  $K = I_e/I_{dz}$

④ 动作触动时间:  $t = \tau \ln \frac{K}{K-1}; t' = \tau' \ln \frac{K}{K-1}$  能使动作时间减少到 10ms 左右。

⑤ 改进系数:  $\xi = 1 - \frac{t'}{t} = \frac{r}{R+r}$

(2) 加速电路二:如图 7—62 所示。

① 条件:  $I_e = \frac{U}{R} = \frac{U'}{R+r} = \text{常数}$

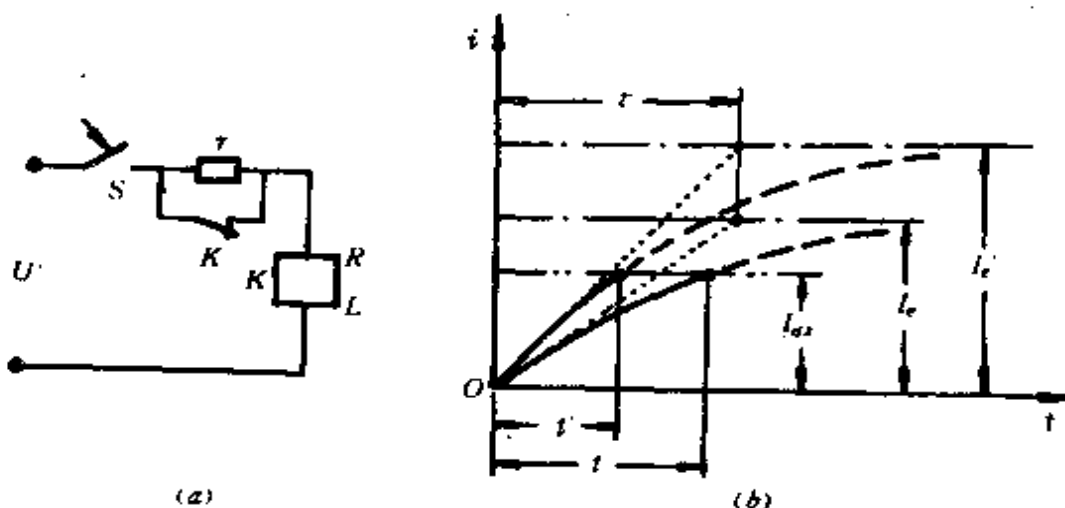


图 7—62 加速电路二  
(a) 原理电路 (b) 电流变化规律

$$I_e = \frac{U'}{R}; K = \frac{I_e}{I_{d2}}; K' = \frac{I_e}{I_{d1}}$$

② 时间常数:  $\tau = L/R$  (动作时)

③ 动作触动时间:  $t = \tau \ln \frac{K}{K-1}; t' = \tau \ln \frac{K'}{K'-1}$

④ 改进系数:  $\xi = 1 - \frac{t'}{t} = 1 - \frac{\ln \frac{K'}{K'-1}}{\ln \frac{K}{K-1}}$

(3) 加速电路三: 如图 7—63 所示。

① 条件:  $I_e = \frac{U}{R} = \frac{U'}{R+r} = \text{常数}$

② 电流变化规律:

$$i^* = \frac{i}{I_e} = 1 - A^0 e^{-\frac{t}{\tau}} \sin(\gamma + \varphi) \quad (a^2 < b)$$

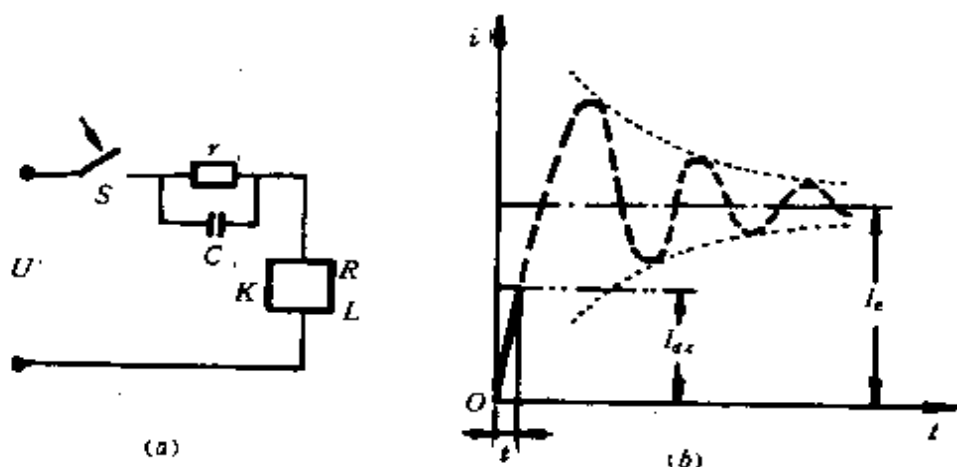


图 7—63 加速电路三  
(a)原理电路 (b)电流变化规律

其中  $\gamma = \omega t, \omega^* = \omega \tau = \sqrt{b - a^2} / 2$

$$\frac{\beta}{\omega} = \frac{1 + \lambda_0}{2\omega^*}, A^0 = \frac{\sqrt{\lambda(1 + \lambda)}}{\omega^*}$$

$$\varphi = \text{tg}^{-1} \frac{2\omega^*}{\lambda_c - \lambda - 1}$$

$$a = 4\lambda(1 + \lambda), b = (1 + \lambda_c)^2$$

$$\lambda = r/R, \tau = L/R, \lambda_c = \tau/rc$$

$r/R$  比值越大及  $C$  越大, 加速作用越显著。但不应使电路发生振荡。

元件选择:

$$C = \frac{L}{Rr} \times 10^{-6}, E = \frac{R + r}{R} U$$

式中:  $C$  —— 电容( $\mu\text{F}$ );

$r$  —— 电阻( $\Omega$ );

$R, L$  —— 线圈电阻和电感( $\Omega, \text{H}$ );

$U_e$  —— 线圈额定工作电压( $\text{V}$ );

$E$  —— 电源电压( $\text{V}$ )。

2. 延缓继电器动作(触动)时间电路

(1) 延缓电路一:如图 7—64 所示。

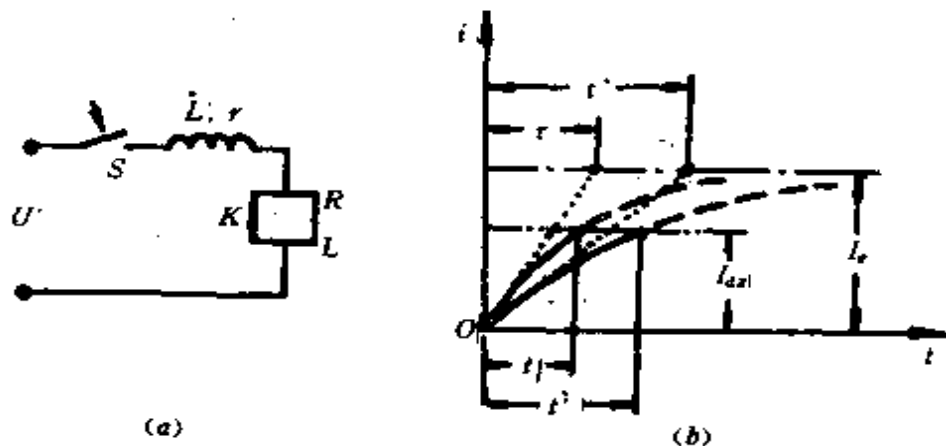


图 7 -64 延缓电路一  
(a) 原理电路 (b) 电流变化规律

- ① 条件:  $I_c = \frac{U}{R} = \frac{U'}{R+r} = \text{常数}$
- ② 时间常数:  $\tau = \frac{L}{R}, \tau' = \frac{L+L'}{R+r}$
- ③ 动作触动时间:  $t = \tau \ln \frac{K}{K-1}; t' = \tau' \ln \frac{K}{K-1}$
- ④ 延迟系数:  $\xi = \frac{t'}{t} - 1 = \frac{\tau'}{\tau} - 1$

(2) 延缓电路二:如图 7—65 所示。

- ① 条件:  $I_c = \frac{U}{R} = \frac{U'}{R+r} = \text{常数}$
- ② 电流变化规律:

$$i^* = \frac{i}{I_c} = 1 - e^{-\frac{\beta}{\omega} \gamma} (\text{ch} \gamma + A \text{sh} \gamma) \quad (\text{当 } a^2 > b)$$

$$= 1 - A^0 e^{-\frac{\beta}{\omega} \gamma} \sin(\gamma + \varphi) \quad (\text{当 } a^2 < b)$$

其中

$$\frac{\beta}{\omega} = \frac{1 + \lambda + \lambda'(1 + \lambda)}{2(1 + \lambda')\omega^*}$$

$$A = \frac{1 + \lambda - \lambda'(1 + \lambda)}{2(1 + \lambda')\omega^*}$$

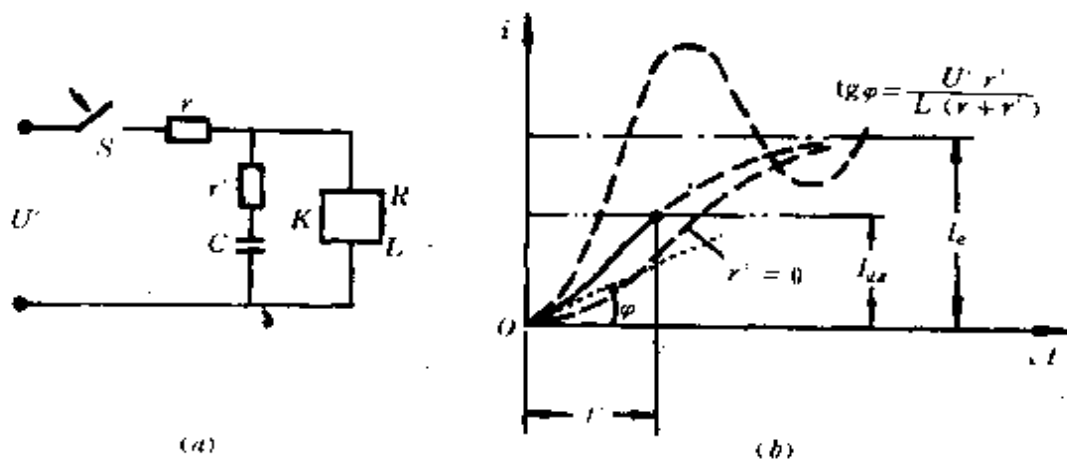


图 7—65 延缓电路二  
(a) 原理电路 (b) 电流变化规律

$$A^0 = \frac{\sqrt{(\lambda_c - \lambda)(1 + \lambda)}}{(1 + \lambda')\omega^*}$$

$$\omega^* = \omega\tau = \frac{\sqrt{|a^2 - b|}}{2(1 + \lambda')}$$

$$\varphi = \text{tg}^{-1} \frac{2(1 + \lambda')\omega^*}{1 + \lambda_c - \lambda'(1 + \lambda)}$$

$$a = 1 + \lambda_c + \lambda'(1 + \lambda), b = 4\lambda(1 + \lambda)(1 + \lambda')$$

$$\lambda' = r'/r, \lambda = r/R, \lambda_c = \tau/rc, \tau = L/R$$

阻容式电路的参数对加速,延缓作用的影响,如图 7—66 所示。图 7—66(a) 中的电路应满足以下条件:

$$(2\lambda + 1) - 2\sqrt{\lambda(\lambda + 1)} < \lambda_c < (2\lambda + 1) + 2\sqrt{\lambda(\lambda + 1)}$$

其中  $\lambda = \frac{r}{R}, \lambda_c = \frac{1}{RrC}$

图 7—66 中,  $t$  为有加速与延缓电路的继电器的动作触动时间,  $t_0$  为没有加速与延缓电路的继电器的固有动作触动时间。

图 7—66(b) 中,  $C^* = CR^2/L$ , 曲线  $t/t_0(\lambda)$  是按  $r' = 0$ , 储备系数  $K = 2$  的条件绘制的。

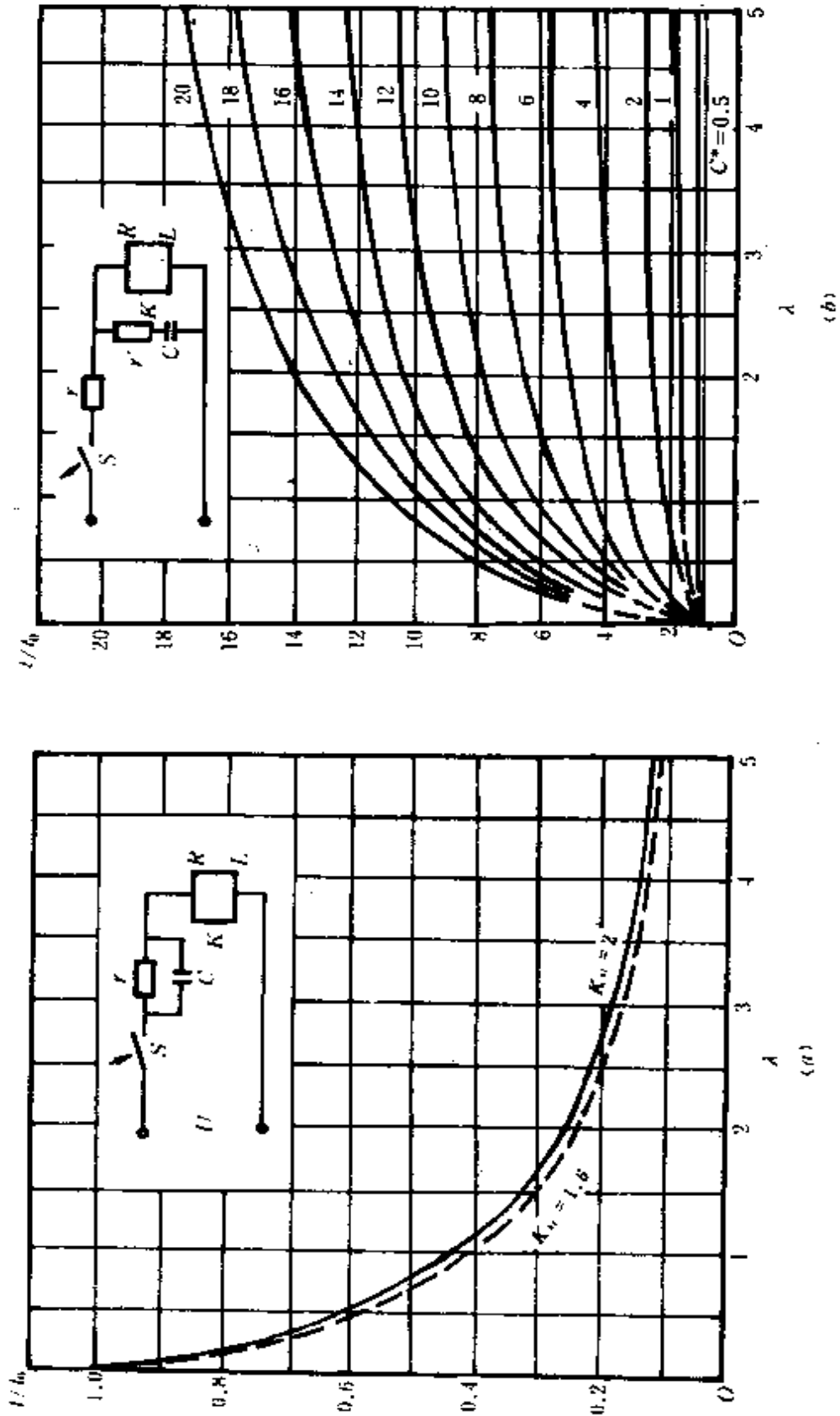


图 7-66 阻容加速与延缓电路

### 3. 继电器延缓释放电路

(1) 延缓释放电路一:如图 7—67 所示。

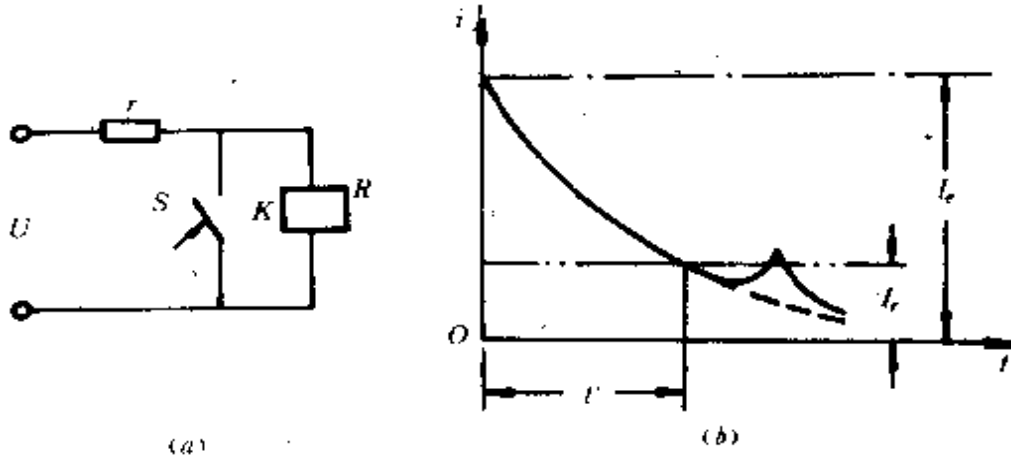


图 7—67 延缓释放电路  
(a) 原理电路 (b) 电流变化规律

基本关系

$$I_r = \frac{U'}{R + r}$$

电阻元件功率  $P = U'^2 / r$

(2) 延缓释放电路二:如图 7—68 所示。

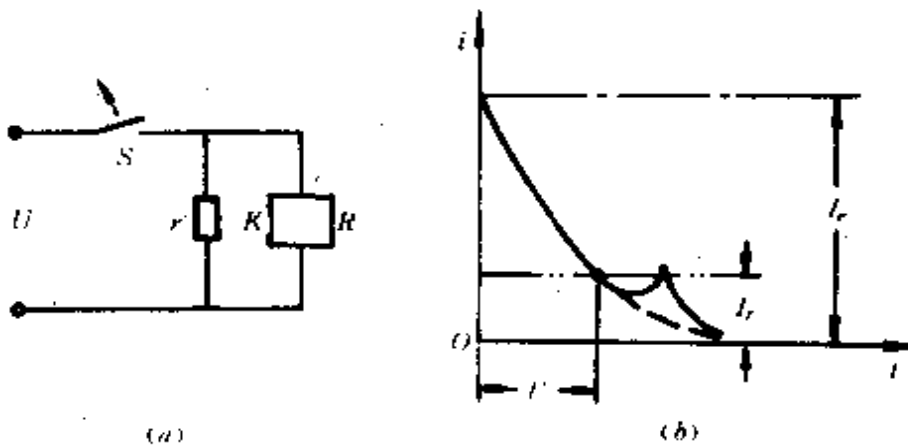


图 7—68 延缓释放电路二  
(a) 原理电路 (b) 电流变化规律



基本关系  $I_c = U/R$

电阻元件功率  $P = U^2/r'$

(3) 延缓释放电路三:如图 7—69 所示。该电路对于不同线圈规格,阻尼效果差异很大,因此不适宜于多种规格的继电器。

(4) 延缓释放电路四:如图 7—70 所示。该电路是将阻尼绕组和工作绕组装在同一铁芯上,其动作延时较稳定,延时不长(0.04s 左右),其返回时间较长(1s 左右),但要保持终止气隙为零且稳定,否则变差很大。

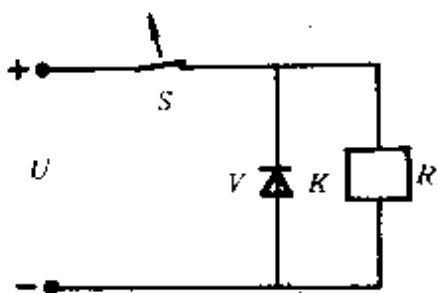


图 7—69 延缓释放电路三

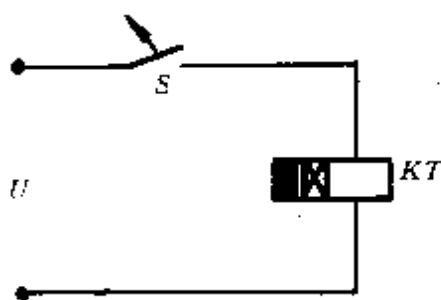


图 7—70 延缓释放电路四

## 二十、继电器熄火花电路

继电器是感性负荷,当断开时在触头处会产生过电压,从而引起火花放电。这不但会加速触头损坏,还会产生一种高频信号,严重干扰无线电通信,因此常采用熄火花电路。

### 1. 常用熄火花电路

(1) 熄火花电路一:如图 7—71 所示。

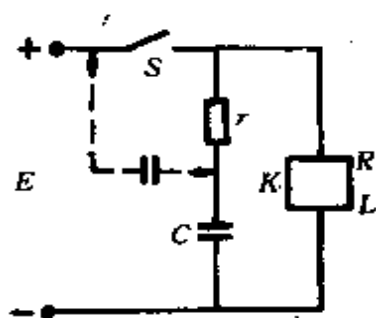
① 参数选择:可按下列经验公式计算:

$$C = 0.1I^2$$

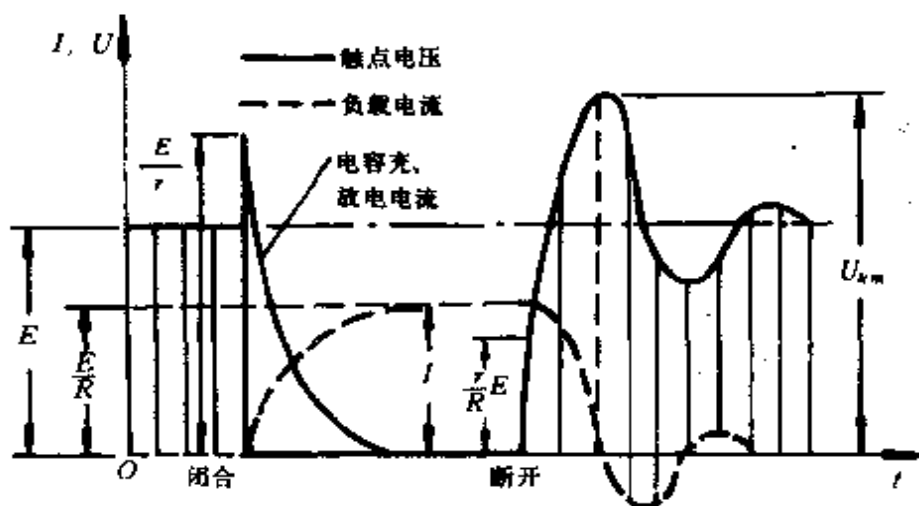
$$r = E/[10I(1 + 50/E)]$$

式中:  $C$  —— 电容器电容量( $\mu\text{F}$ );

$r$  —— 电阻( $\Omega$ )。



(a)



(b)

图 7-71 熄火花电路一

(a) 原理电路 (b) 电流、电压变化规律

② 电容击穿电压应大于过电压  $U_{km}$ 。

③  $U_{km}$  应小于最小击穿电压  $U_d$ ，并留适当的裕度(以下均同)。

该电路的特点：电源极性接反时，电路仍能正常工作。触头 S 闭合时，电阻  $r$  无损耗。

当  $r = 0$  时，过电压下降幅度大，释放时间延长也多，但在闭合触头时会造成过大的放电电流而使触头工作不利。下面的电路三和四对继电器的延时作用较小。

(2) 熄火花电路二：如图 7-72 所示。

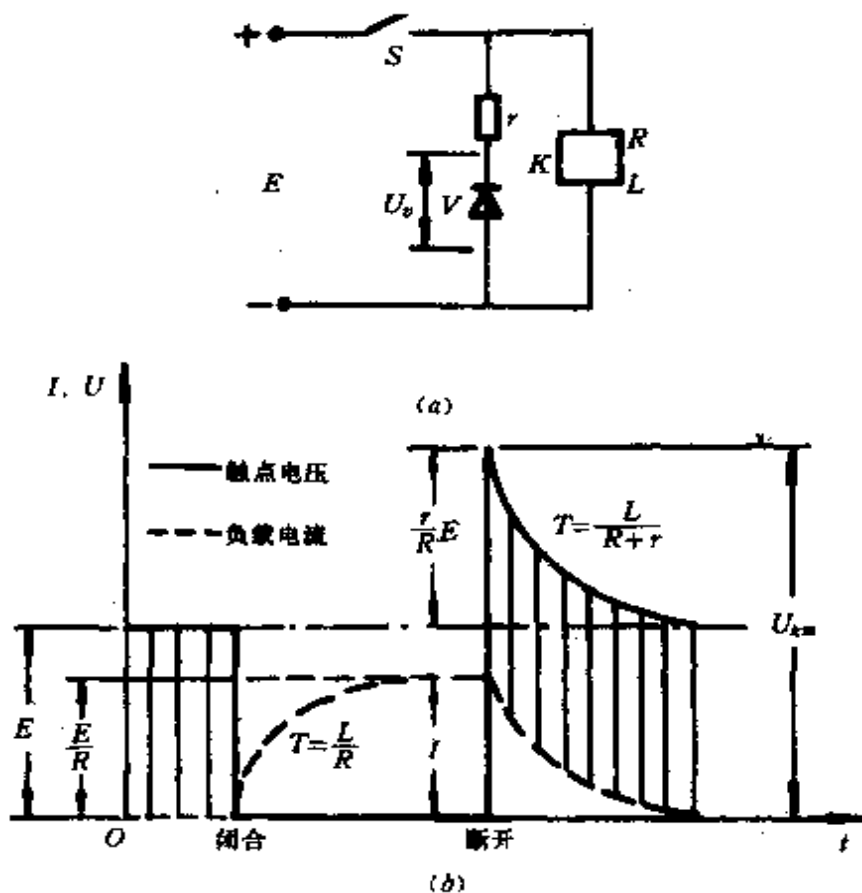


图 7—72 熄火花电路二

(a) 原理电路 (b) 电流、电压变化规律

① 参数选择:

$$r < (U_{km} - E - U_v) / I$$

式中:  $I = E/r$

② 二极管选择, 反向击穿电压大于  $E$ , 正向电流大于  $E/r$ 。

③ 若负荷是继电器线圈, 则此继电器将有一定的释放延时。

有时也将电阻  $r$  略去不用。

该电路的特点: 熄火花效果好。但电源极性接反时, 将造成电源短路。触头  $S$  断开时, 负载电流下降缓慢, 当负载为另一继电器线圈时, 将使该继电器释放时间增加。

(3) 熄火花电路三: 如图 7—73 所示。

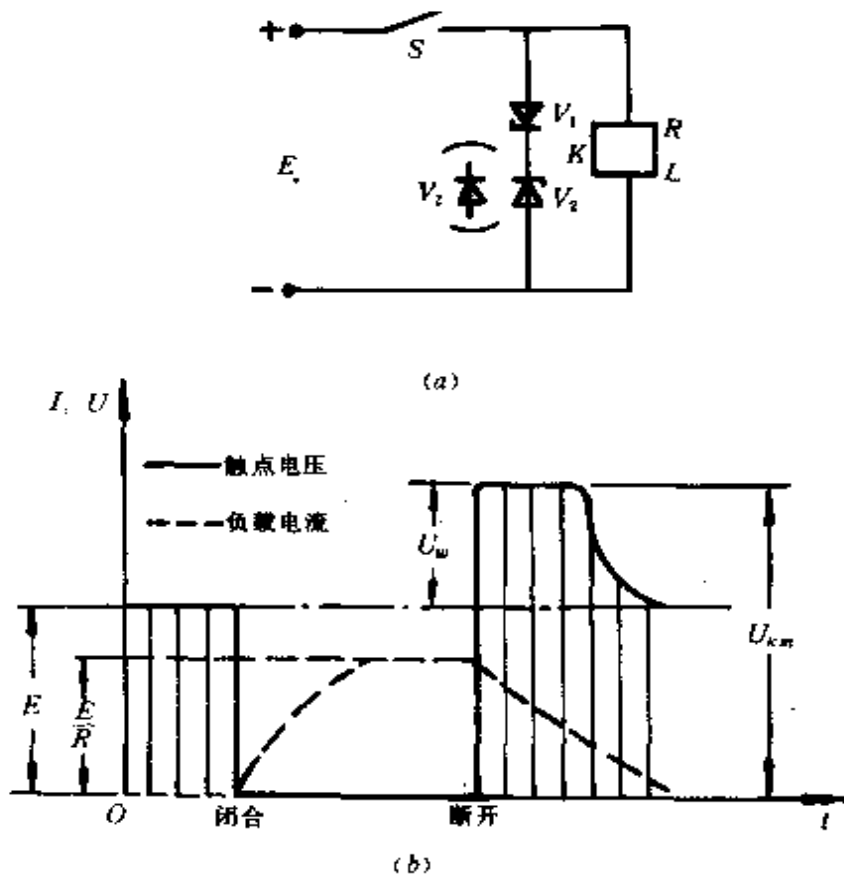


图 7-73 熄火花电路三  
(a) 原理电路 (b) 电流、电压变化规律

① 二极管选择：当采用二只稳压管时按以下两个条件选择稳压值：

$$U_w > E \text{ 及 } U_w < U_{im} - E$$

式中： $U_w$ ——稳压管的稳压值。

当采用一只稳压管和一只二极管时，二极管反向击穿电压大于  $E$ ，正向电流大于  $E/r$ 。

② 该电路的特点：熄火花效果较好。触头  $S$  断开时，负载电流下降较快，当负载为另一继电器线圈时，继电器释放时间也不会过长。

(4) 熄火花电路四：如图 7—74 所示。

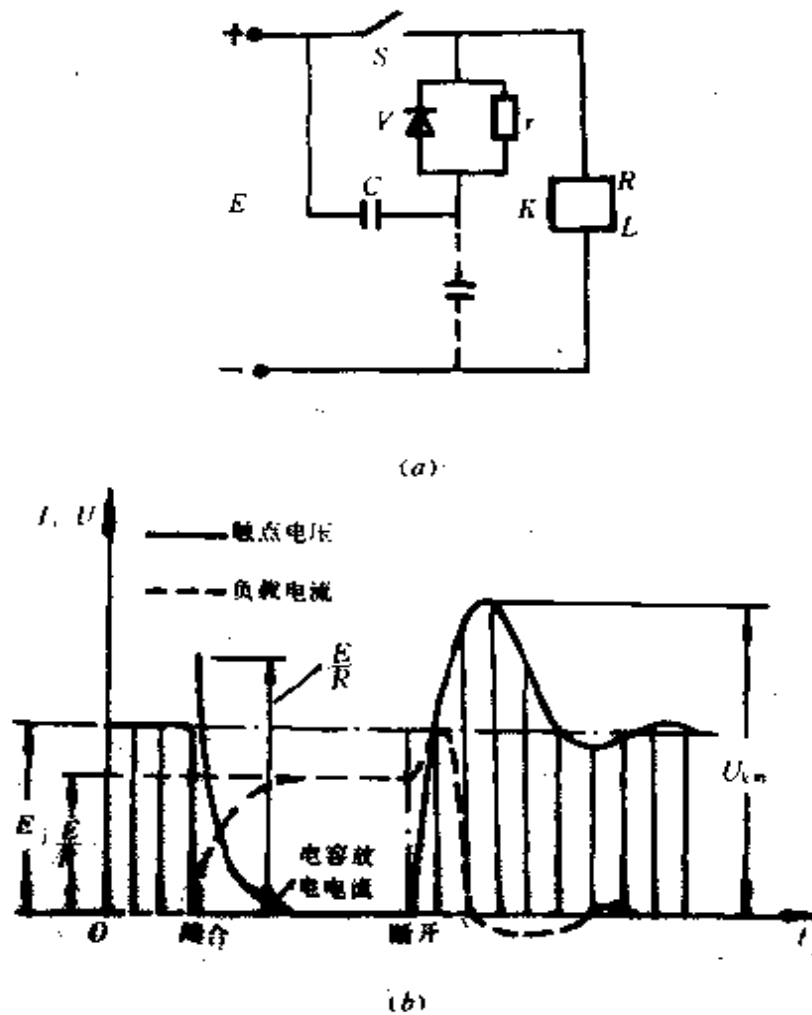


图 7-74 熄火花电路四

(a) 原理电路 (b) 电流、电压变化规律

① 触头  $K$  刚断开时, 其间隙压降为二极管正向压降, 约  $0.3 \sim 1V$ , 不产生火花与电弧。

② 电容量的选择, 应使电容电压上升速度均不能击穿逐渐拉开的间隙, 可按下式选取:

$$C \geq 0.01EI(1 + 0.5\tau)$$

式中:  $C$  的单位为  $\mu F$ ;  $\tau = L/R$  为负载时间常数, 单位为  $ms$ 。

③ 电容的击穿电压小于  $U_{im}$ 。

④ 电阻值由放电电流限制值决定。其下限按下面要求选

取：

下限值  $r_{\min}$  可根据触头回路电压按每伏  $0.5 \sim 1\Omega$  选取。同时还应满足下式要求：

$$r_{\min} \geq 2 \sqrt{L/C}$$

(5) 熄火花电路五：如图 7—75 所示。

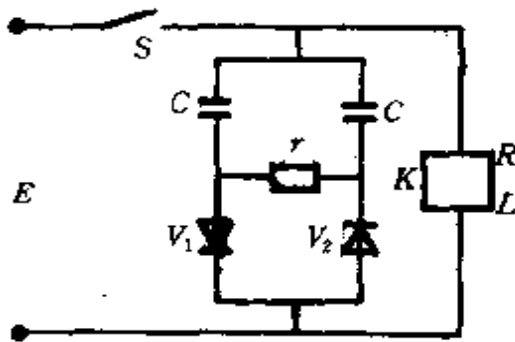


图 7—75 熄火花电路五

① 二极管反向击穿电压大于  $(3.5 \sim 4)E$ 。

② 电容的工作电压大于  $(1.5 \sim 2)E$ 。

(6) 熄火花电路六：如图 7—76 所示。

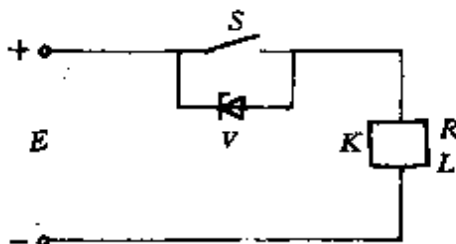


图 7—76 熄火花电路六

稳压管的稳压值  $U_w > E$ 。

该电路的特点：熄火花效果好。当电源极性接反时，无法将电路切断。

(7) 熄火花电路七：如图 7—77 所示。

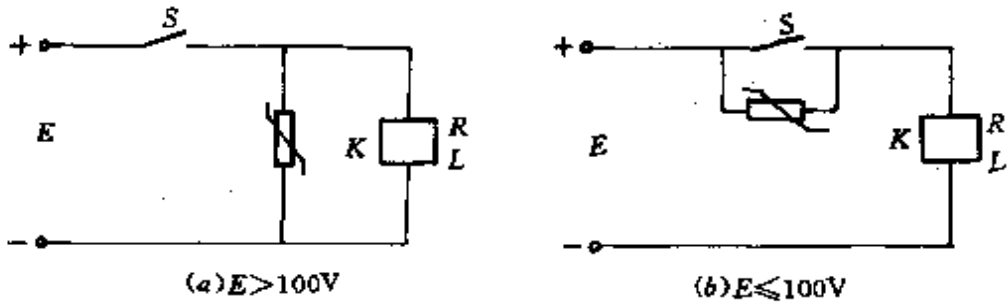


图 7—77 熄火花电路七

氧化锌压敏电阻参数的选择由下列公式确定：

$$U_{1mA} > 1.3E$$

$$\alpha > \frac{IgI + 3}{U_k / U_{1mA}}$$

式中： $U_{1mA}$ ——压敏电阻的标称电压(V)，当  $E$  较小时或继电器动作频繁时，可取  $U_{1mA} = (1.5 \sim 2.5) E$ ；

$E$ ——电源电压(V)；

$\alpha$ ——非线性系数，MY31 型压敏电阻的  $\alpha = 35 \sim 60$ ；

$I$ ——继电器工作电流(A)；

$U_k$ ——触头击穿电压，对于银触头取 300V。

该电路的特点：熄火花效果较好。

(8)熄火花电路八：如图 7—78 所示。

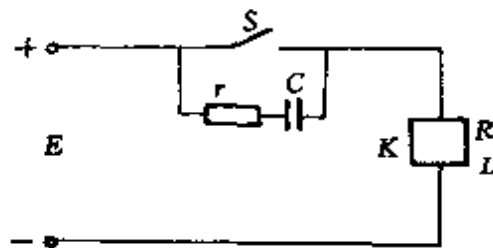


图 7—78 熄火花电路八

- ① 电容  $C$  可按每安负载电流至少  $1\mu F$  选取。
- ② 电阻  $r$  值不宜过大或过小。

$R$ 、 $C$  值的最终确定要靠试验。若选择不当，易产生振荡。

该电路的特点：熄火花效果较好。电源极性接反时，电路仍能正常工作。触头  $S$  闭合瞬间，电容  $C$  向触头放电形成较大的冲击电流。

2. 熄火花电路效果示例(表 7—98、表 7—99)

表 7—98 熄火花电路效果示例

熄火花电路类型	过电压峰值 (V)	释放时间 (ms)
无熄火花电路	950	1.5
并联电容 $0.22\mu F$	120	1.55
并联首尾相接的二个 60V 稳压管	190	1.7
并联二极管与 $470\Omega$ 电阻	80	5.4
并联压敏电阻	64	2.7

注：采用直流 28V 密封继电器。

表 7—99 齐纳电压对熄火花效果影响示例

熄火花电路	额定齐纳电压 (V)	过电压峰值 (V)	释放时间 (ms)
无熄火花电路	—	1600	3.8
并联首尾相	75	70	4.8
接的二个稳	35	42	6.0
压二极管	18	18	8.8

注：采用直流 26.5V、 $225\Omega$  小型继电器。



### 二十一、交流接触器用于远距离控制的导线长度计算

当交流接触器用于远距离控制的导线长度超过一定限度时,由于控制线路上的电压降及控制线回路间分布电容的影响,有可能造成失控。如 220V 交流接触器,当控制线长度超过 200m 时,就可能失控。因此在设计控制电路时,应计算每一接触器控制导线的长度及分布电容是否超过临界值。当超过时应采取消除电容效应措施。

#### 1. 临界电容的计算

临界电容与接触器的释放电压及释放电流有关。如果用线圈额定电压及额定吸持功率表示临界电容的近似计算式如下:

$$C \approx 500P_e/U_e^2$$

式中:  $C$  —— 临界电容( $\mu\text{F}$ );

$P_e$  —— 接触器额定视在吸持功率(VA);

$U_e$  —— 线圈额定电压(V)。

#### 2. 控制线路临界长度的计算

根据临界电容可求得控制线路临界长度的计算公式。

(1) 用按钮控制(三芯电缆)[图 7—79(a)]:

$$L = \frac{833P_e}{U_e^2} \times 10^3$$

(2) 用手动开关控制(双芯电缆)[图 7—79(b)]:

$$L = \frac{1666P_e}{U_e^2} \times 10^3$$

式中:  $L$  —— 临界长度(m);

其它符号同前。

注意:上式计算时,要考虑电源电压波动的因素。如 220V 电源,在计算临界长度时,应用 242V(电压波动+10%)代入。

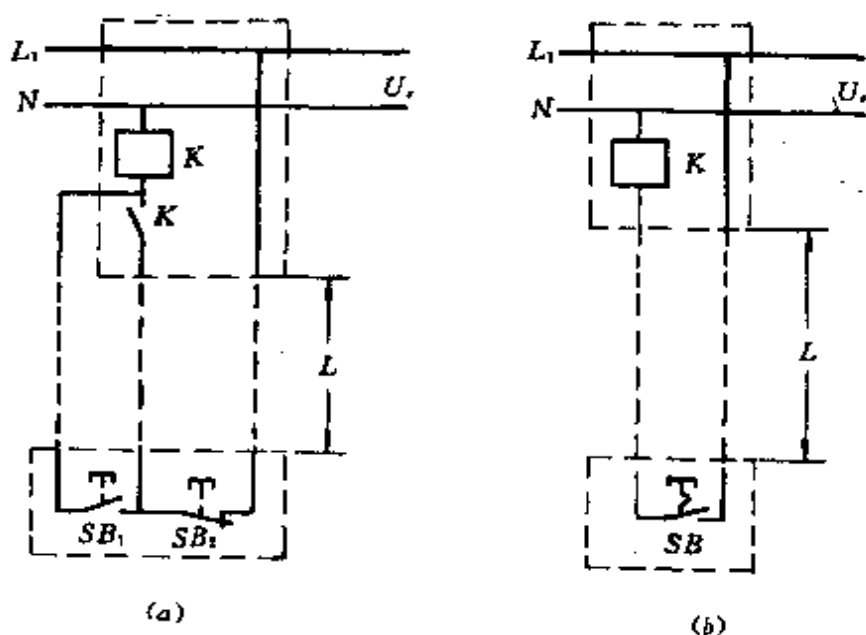


图 7—79 交流接触器远控示意图

(a) 三芯控制电缆 (b) 二芯控制电缆

### 3. 防止导线分布电容引起接触器误动作的措施

当控制导线长度超过临界值,释放信号发出后接触器不能释放时,必须采取防分布电容干扰措施。这些措施有:

(1)采用直流控制。

(2)采用低压控制。但要注意,采用低控制电压后,线圈起动电流要增大,控制线路压降也增大。

(3)接触器线圈并联附加负荷。这样能使线圈电流减少并保持其压降低于吸持电压,使接触器能可靠释放。

①并联电阻负荷;电阻参数可按下列公式选择:

$$R = 1000/C_L, C_L = 1000I_c/2\pi fU_e$$

$$P = U_e^2/R$$

式中:  $R$  —— 并联电阻的电阻值( $\Omega$ );

$P$  —— 电阻的功率(W);

$C_L$  —— 控制线路电容( $\mu\text{F}$ );

$I_c$  —— 实际测量所得的控制线路的杂散电流(mA);

$U_e$  —— 线圈额定电压(V)。

一般并联电阻的损耗应小于 10W。

②并联阻容负荷：此法是将电阻和电容串联，然后并联在接触器线圈上。并联阻容负荷损耗较小。电容和电阻的参数可按下列公式选择：

$$C = 0.45C_L, R = 100\Omega$$

$$P = R(2\pi fU_c C \times 10^{-6})^2$$

式中： $C$  —— 电容( $\mu\text{F}$ )；

$P$  —— 电阻的功率(W)，当  $U_c = 220\text{V}$ 、 $f = 50\text{Hz}$ 、 $R = 100\Omega$  时， $P = 0.5C^2$ 。

(4)接触器释放时将线圈短路。此方法动作可靠，但需要增加一根控制线，如图 7—80 所示。

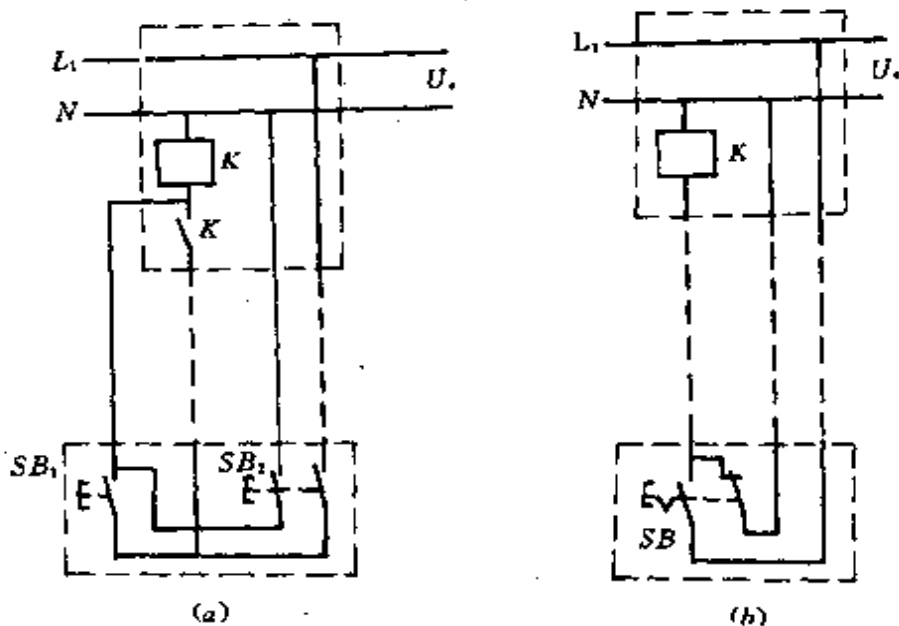


图 7—80 接触器释放时线圈短路接线图

(a) 按钮控制 (b) 手动开关控制

(5)选用较大容量的接触器。因为线圈额定功率较大的接触器，容许控制回路临界电容及长度均较大。

### 二十二、60Hz 的低压电器用于 50Hz 电源上的影响分析

我国电力网均使用 50Hz 频率的电源，而国外有一些国家使用 60Hz 电源。由国外购进的使用 60Hz 频率电源的低压电器

要用于我国电源,其结果如何?

1. 铁芯中磁通及磁通密度的变化

如果忽略线圈电阻的压降,则有以下关系式:

$$U = E = 4.44fW\phi_m \times 10^8$$

式中: $U$ ——电源电压(V);

$E$ ——感应电势(V);

$f$ ——电源频率(Hz);

$W$ ——电磁铁线圈匝数(匝);

$\phi_m$ ——铁芯磁通最大值(Wb)。

可见,当  $U$ 、 $W$  不变时,有如下关系:

$$\phi_{m1}/\phi_{m2} = f_2/f_1 = 60/50 = 1.2$$

当忽略漏磁通时,铁芯的磁通密度为

$$B = \frac{\phi_m}{S} \times 10^4$$

式中: $B$ ——磁通密度(T);

$S$ ——铁芯截面积( $\text{cm}^2$ )。

因此,有如下关系式:

$$B_1/B_2 = \phi_{m1}/\phi_{m2} = 6/5 = 1.2$$

式中: $B_1$ 、 $B_2$ ——50Hz 和 60Hz 时的磁通密度(T);

$\phi_{m1}$ 、 $\phi_{m2}$ ——50Hz 和 60Hz 时的磁通最大值(Wb)。

可见,50Hz 时的磁通是 60Hz 时的 1.2 倍;50Hz 时的磁通密度也是 60Hz 时的 1.2 倍。

2. 电磁吸力的变化

当气隙较小时,其吸力为

$$F = 0.392 \frac{\phi_g^2}{S_g} \times 10^{10}$$

式中: $F$ ——电磁铁吸力(N);

甲  
乙  
丙  
丁  
戊  
己  
庚  
辛  
壬  
癸

$\phi_\delta$  —— 磁极端面磁通(Wb);

$S_\delta$  —— 磁极表面的总面积( $\text{cm}^2$ )。

如果不考虑漏磁通,则  $\phi_\delta \approx \phi_m$ , 故

$$F_1/F_2 = (\phi_{m1}/\phi_{m2})^2 = (6/5)^2 = 1.44$$

式中:  $F_1$ 、 $F_2$  —— 50Hz 和 60Hz 时的电磁吸力(N)。

可见,50Hz 时的吸力是 60Hz 时的 1.44 倍。

### 3. 线圈电流的变化

若不考虑涡流和磁滞损耗的影响,则

$$IW = \frac{\phi_m}{\sqrt{2}} \left( \frac{1}{G_l} + \frac{1}{G_\delta} \right)$$

式中:  $I$  —— 电流(A);

$G_l$ 、 $G_\delta$  —— 铁芯磁导和气隙磁导(H/cm);

$W$ 、 $\phi_m$  —— 同前。

由此得

$$I_1/I_2 = \phi_{m1} \left( \frac{1}{G_{l1}} + \frac{1}{G_\delta} \right) / \left[ \phi_{m2} \left( \frac{1}{G_{l2}} + \frac{1}{G_\delta} \right) \right]$$

式中:  $I_1$ 、 $I_2$  —— 50Hz 和 60Hz 时的电流(A);

$G_{l1}$ 、 $G_{l2}$  —— 50Hz 和 60Hz 时的铁芯磁导(H/cm)。

如果铁芯工作在磁化曲线的线性段,铁芯磁导率  $\mu$  值基本不变,由  $G_l = \mu S/l$  可知, $G_{l1}$  与  $G_{l2}$  基本相等,则

$$I_1/I_2 = \phi_{m1}/\phi_{m2} = 6/5 = 1.2$$

可见,50Hz 时线圈电流为 60Hz 时的 1.2 倍,说明 60Hz 的低压电器直接用于 50Hz 电源上,肯定容易发热过载。

### 4. 磁系统损耗的变化

(1)线圈电阻损耗:线圈电阻损耗可用下式计算:

$$P = I^2R$$

式中:  $P$  —— 线圈电阻损耗(W);

$I$  —— 线圈中的电流(A);

$R$  —— 线圈电阻( $\Omega$ )。

如果忽略频率改变时铁耗变化对线圈电流有功分量的影响,则

$$P_1/P_2 = (I_1/I_2)^2 = (6/5)^2 = 1.44$$

式中:  $P_1$ 、 $P_2$  —— 50Hz 和 60Hz 时的线圈电阻损耗(W)。

可见,50Hz 时线圈电阻损耗为 60Hz 时的 1.44 倍。

(2) 涡流损耗的变化: 涡流损耗可按式计算:

$$P_e = k_e f^2 B^2 V$$

$$P_{e1}/P_{e2} = (f_1 B_1 / f_2 B_2)^2 = (50 \times 6)^2 / (60 \times 5)^2 = 1$$

可见,50Hz 时和 60Hz 的铁芯涡流损耗相同。

(3) 磁滞损耗的变化: 磁滞损耗可按式计算:

$$P_h = k_h f B^2 V$$

$$P_{h1}/P_{h2} = f_1 B_1^2 / f_2 B_2^2 = (50/60)(6/5)^2 = 1.2$$

可见,50Hz 时的磁滞损耗为 60Hz 时的 1.2 倍。

### 5. 铁芯的发热和温升变化

电器电磁系统的发热功率  $P_z$  为

$$P_z = I^2 R + P_e + P_h$$

根据前面分析,60Hz 的电器用于 50Hz 电源上时,线圈电阻损耗增加为原来的 1.44 倍;涡流损耗不变;磁滞损耗为原来的 1.2 倍,所以总发热功率较 60Hz 时有所增加。

线圈的发热温升可按式计算:

$$\tau = P_z / (K_T F)$$

式中:  $K_T$  —— 表面散热系数;

$F$  —— 线圈散热面积。

由于 50Hz 时的  $P_z$  有所增加,所以温升也有所增加。

## 第八章 继电保护

### 第一节 基础知识

#### 一、电流互感器与电流继电器的接线方式及计算

##### 1. 电流互感器与电流继电器的常用接线方式(图 8-1)

各种接线方式的接线系数  $K_{jr}$  由下式计算:

$$K_{jr} = I_j / I_2$$

式中:  $I_j$  —— 实际流入继电器的电流(A);

$I_2$  —— 电流互感器的二次电流(A)。

对于两种星形接线,在正常运行与相间短路时,  $I = I_2$ ,故  $K_{jr} = 1$ ;对于两相电流差接线,在正常运行与三相短路时,  $I_j = \sqrt{3} I_2$ ,故  $K_{jr}^{(3)} = \sqrt{3}$ ;AC 两相短路时,  $I_j = 2I_2$ ,  $K_{jr}^{(2)} = 2$ ;AB 和 BC 两相短路时,  $I_j = I_2$ ,  $K_{jr}^{(2)} = 1$ 。

2. 不同接线方式下在各种故障时的电流分配和矢量图(表 8-1 ~ 表 8-5)。

利用这些图也可计算接线系数  $K_{jw}$  图中  $I_{j1}$ 、 $I_{j2}$ 、 $I_{j3}$  分别为流入继电器的 1、2、3 的电流。单相接地电流最小值  $I_{d.min}^{(1)}$ 。

保护装置的最小灵敏系数见表 8-4。

当保护装置的灵敏度不能满足要求时,需采取补救措施,如过流保护加装低电压起动等。后备保护的灵敏度不能达到要求时,可适当降低要求,如缩短后备保护作用的范围等。另外还可以采用无选择性动作而用自动重合闸弥补等。

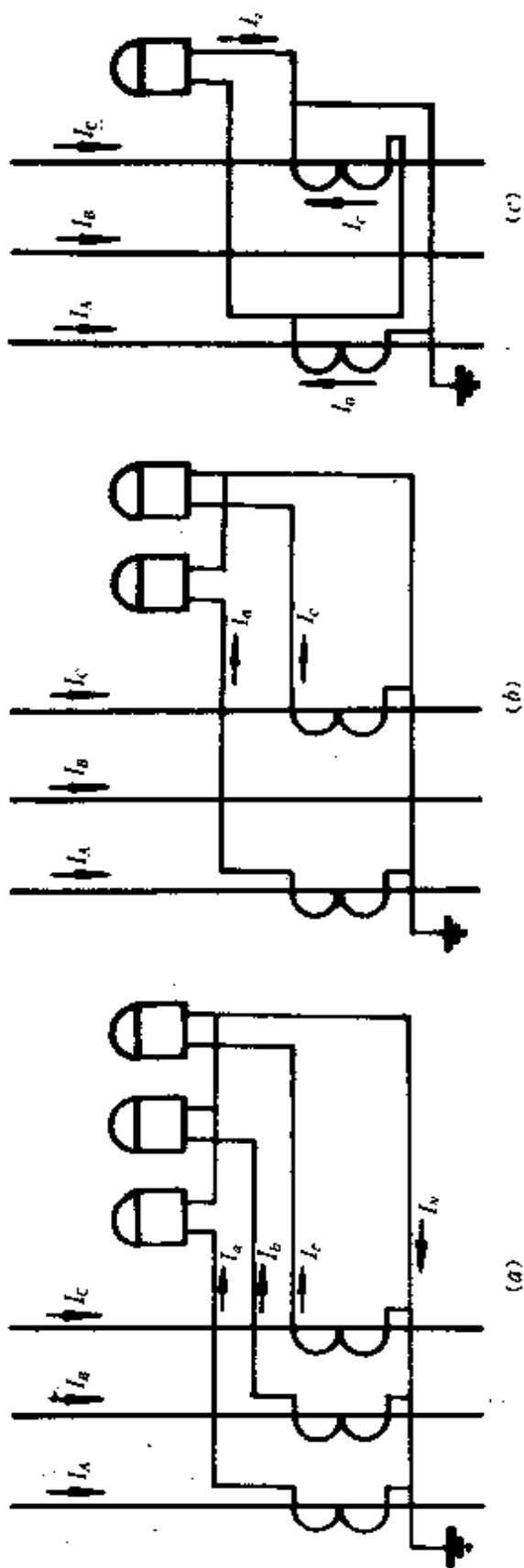
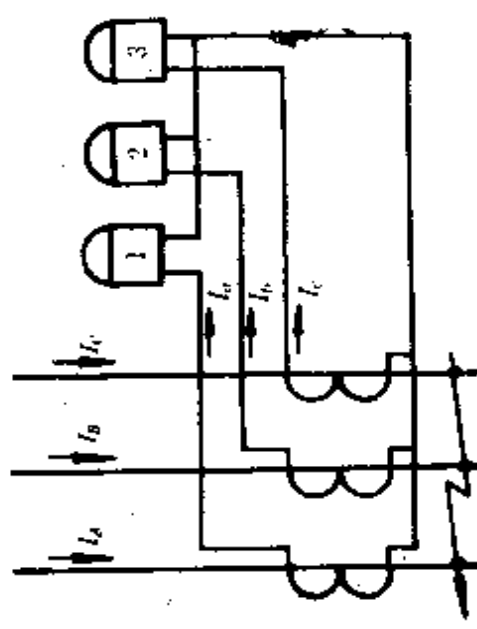
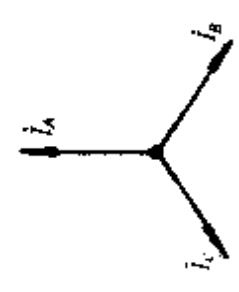
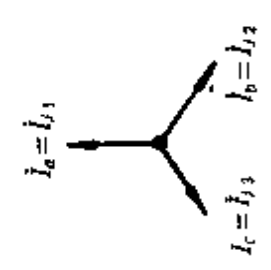


图 8—1 电流互感器和电流继电器的接线方式  
(a) 完全星形接线 (b) 不完全星形接线 (c) 两相电流差接线



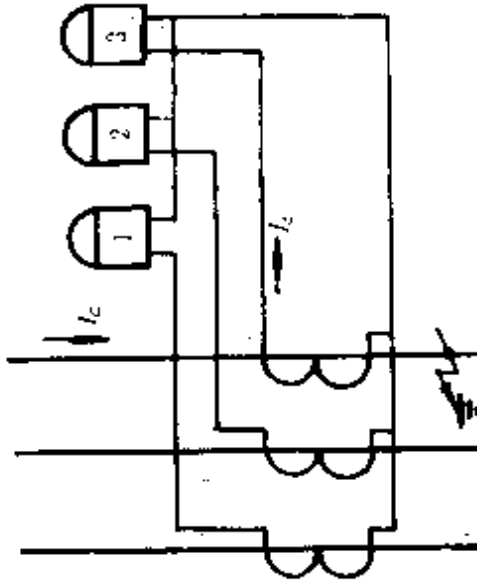
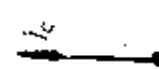
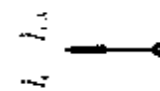
表 8-1 互感器与继电器星形接线在各种故障时的电流分配和矢量图

故障种类	接线图	电流矢量图	
		一次回路	二次回路
三相短路			

(续表)

故障种类	接线图	电流矢量图	
		一次回路	二次回路
两相短路 (A, B相)			

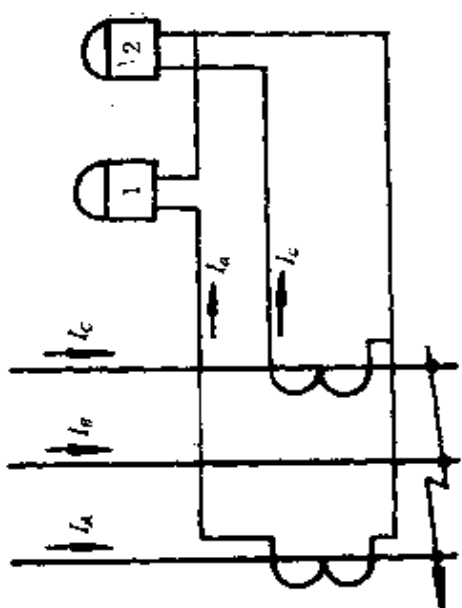


(续表)

故障种类	接线图	电流矢量图	
		一次回路	二次回路
中性点接地的电网 单相接地			

(续表)

故障种类	接线图	电流矢量图	
		一次回路	二次回路
<p>单相供电的中 心点不接地的 电网中两点接 地</p>			

表 8--2 互感器与继电器不完全星形接线路在各种故障时的电流分配和矢量图

故障种类	接线图	电流矢量图	
		一次回路	二次回路
三相短路			

(续表)

故障种类	接线图	电流矢量图	
		一次回路	二次回路
两相短路 (A、B相)			

(续表)

故障种类	接线图	电流矢量图	
		一次回路	二次回路
两相短路 (A、C相)			

(续表)

故障种类	接线图	电流矢量图	
		一次回路	二次回路
单方供电的中性 点不接地的电网 中两点接地			



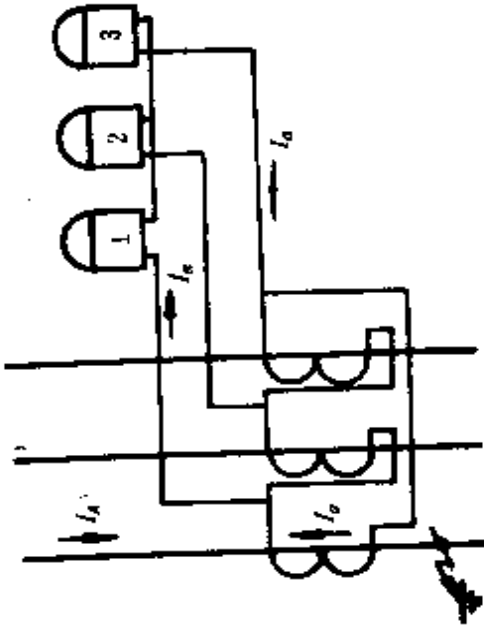
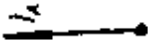
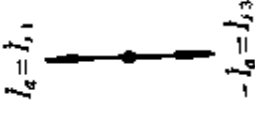
表 8—3 互感器接成三角形而继电器接成星形在各种故障时的电流分配和矢量图

故障种类	接线图	电 流 矢 量 图	
		一次回路	二次回路
三相短路			

(续表)

故障种类	接线图	电流矢量图	
		一次回路	二次回路
两相短路			

(续表)

故障种类	接线图	电流矢量图	
		一次回路	二次回路
中性点接地的电网中的单相接地			

(续表)

故障种类	接线图	电流矢量图	
		一次回路	二次回路
单相供电的中 性点不接地的电 网 中两点接地			

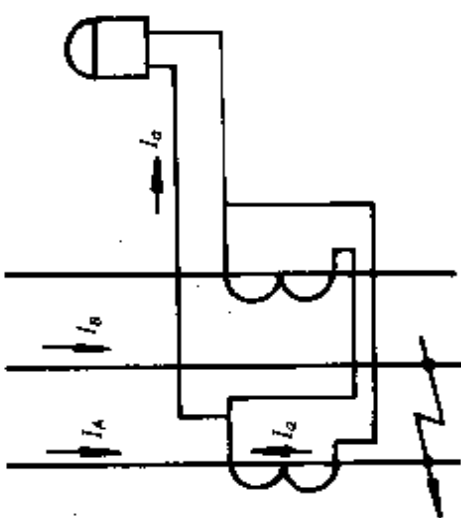
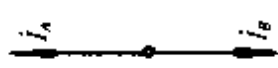

表 8—4 常用保护设备和线路的最小灵敏系数  $K_m$

保护分类	保 护 类 型	组 成 元 件	灵敏系数	备 注
主 保 护	变压器、线路和电动机速断保护	电流元件	2.0	按保护安装处短路计算
	变压器、线路和电动机纵差动保护	差电流元件	2.0	
	带或不带方向的电流或电压保护	电流和电压元件 零序或负序方向元件	1.3~1.5 2.0	50km 以下线路不小于 1.5
后 备 保 护	远后备保护	电流、电压及阻抗元件	1.2	按相邻电力设备和线路末端短路计算(短路电流应为阻抗元件精确工作电流 2 倍以上)
		零序或负序方向元件	1.5	
近 后 备 保 护	近后备保护	电流、电压及阻抗元件	1.3~1.5	按线路末端短路计算
		零序或负序方向元件	2.0	

表 8--5 接于两个不同相的互感器和一个继电器在各种故障时的电流分配和矢量图

故障种类	接线图	电 流 矢 量 图	
		一次回路	二次回路
三相短路			

(续表)

故障种类	接线图	电流矢量图	
		一次回路	二次回路
两相短路 (A、B相)			

(续表)

故障种类	接线图	电流矢量图	
		一次回路	二次回路
两相短路 (A、C相)	<p>The diagram shows a three-phase system with phases A, B, and C. A fault is indicated between phases A and C. Currents are labeled as <math>I_A</math>, <math>I_C</math>, and <math>I_B = I_A - I_C</math>.</p>	<p>The primary circuit current vector diagram shows two vectors, <math>I_A</math> and <math>I_C</math>, originating from the same point.</p>	<p>The secondary circuit current vector diagram shows three vectors: <math>I_a</math>, <math>I_c</math>, and <math>I_{ac} = -I_b</math>.</p>



灵敏度校验所选用的短路电流值,应从正常的最小运行方式和各种故障类型进行计算。对于非正常的很少发生的运行方式,可不考虑。

## 二、继电保护灵敏度要求

继电保护灵敏度用灵敏系数  $K_m$  表示,用作评定保护的灵敏性,对于过电流继电器,定义为:

$$K_m = I_{d\cdot\min} / I_{dz}$$

式中:  $I_{d\cdot\min}$ ——被保护区末端最小短路电流(A);

$I_{dz}$ ——保护装置一次侧动作电流(A)。

对多相短路保护,  $I_{d\cdot\min}$  取两相短路电流最小值  $I_{d\cdot\min}^{(2)}$ ; 对 6 ~ 10kV 中性点不接地系统的单相短路保护,取单相接地电容电流最小值  $I_{c\cdot\min}$ ; 对 380/220V 中性点接地系统的单相短路保护取单相接地电流最小值  $I_{d\cdot\min}^{(1)}$ 。

## 第二节 线路继电保护计算

### 一、电力线路继电保护计算

#### 1. 保护方式的选择

(1) 电压为 380V 的低压配电线路,可采用熔断器或自动空气开关保护。

(2) 6 ~ 35kV 的辐射线路或单电源直配线路,可采用电流速断作主保护,过电流保护作为后备保护。

(3) 35kV 的电源联络线路和环状网络,为保证保护动作的选择性,可采用方向过电流保护或简单的距离保护。

(4) 对于 35kV 及以下的架空线路,应装设自动重合闸。由熔断器作保护的线路可采用跌落式重合闸熔丝。对于装设熔断器以及保护采用交流操作的线路,可用重锤式或弹簧式重合闸装置;对于保护采用直流操作的线路,可用由 DH—1 或 DH—2

型重合闸继电器构成的电气重合闸装置。

2. 电力线路继电保护动作电流的整定(表 8—6)

表 8—6 6 ~ 10kV 线路继电保护整定计算

保护装置名称	保护装置的整定值	保护装置动作时限(s)	备注
过电流保护	保护装置的过电流整定值 $I_{dz1} = K_k K_{jr} \frac{I_{k3}}{K_{k' n_l}}$	应较相邻元件的过电流保护大一个时限阶段, 一般大 0.5 ~ 0.75	$K_k$ — 可靠系数, 用于过电流保护时, DL 型继电器为 1.2, GL 型为 1.3; 用于电流速断保护时, DL 型为 1.2, GL 型为 1.5; 用于单相接地保护时, 瞬时取 4 ~ 5, 有时限取 1.5 ~ 2。
瞬时电流速断保护	整定值 $I_{dz2} = K_k K_{jr} \frac{I_{d2(3)}^{(1)max}}{n_l}$		$K_{jr}$ — 接线系数, 接于相电流时取 1, 接于相电流差时取 $\sqrt{3}$ $K_k$ — 继电器返回系数, 取 0.85 $n_l$ — 电流互感器变比 $I_{d0}$ — 线路过负荷电流(最大电流)(A)
带时限电流速断保护	整定值 $I_{dz3} = K_k K_{jr} \frac{I_{d3(3)}^{(3)max}}{n_l}$ 或 $I_{dz3} = K_{ph} K_{jr} \frac{I_{dz3}}{n_l}$	应较相邻元件的电流速断保护大一个时限阶段, 一般大 0.5 ~ 0.75	$I_{d3(3)}^{(3)max}$ — 最大运行方式下线路末端三相短路超瞬变电流(A) $K_{ph}$ — 配合系数, 取 1.1 $I_{dz3}$ — 相邻元件的电流速断保护的一次动作电流(A) $I_{d3(3)}^{(3)max}$ — 最大运行方式下相邻元件末端三相短路稳态电流(A)
单相接地保护	保护装置的一次动作电流 $I_{dz} \geq K I_{cz}$ 和 $I_{dz} \leq \frac{I_{c\Sigma} - I_{cz}}{1.25}$		$I_{cz}$ — 被保护线路外部发生单相接地故障时, 从被保护元件流出的电容电流(A) $I_{c\Sigma}$ — 电网的总单相接地电容电流(A)

3. 灵敏度校验

(1) 过电流保护的灵敏系数:

$$K_m^{(2)} = K_{mzd} \frac{I_{d2 \cdot \min}^{(3)}}{I_{dz}} \geq 1.5$$

式中： $K_{mzd}$ ——相对灵敏系数，见表 8—7。

表 8—7 各种故障的相对灵敏系数  $K_{mzd}$

故障类型		中性线上接入 电流继电器的 不完全星形接 线	完全星 形接 方式	不完全星形 接线方式	两相电流差 接线方式
线路上保护装置安装处发生故障					
三相短路	A—B—C	1	1	1	1
二相短路	A—B	$\frac{\sqrt{3}}{2}$	$\frac{\sqrt{3}}{2}$	$\frac{\sqrt{3}}{2}$	0.5
	B—C				1
	C—A				1
在 $Y_{no}$ 接线变压器后发生故障					
三相短路	A—B—C	1	1	1	1
二相短路	A—B	$\frac{\sqrt{3}}{2}$	$\frac{\sqrt{3}}{2}$	$\frac{\sqrt{3}}{2}$	0.5
	B—C				1
	C—A				1
单相短路	A	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	$\frac{1}{3}$
	C			$\frac{1}{3}$	0
	B			$\frac{1}{3}$	0
在 $Y_{d11}$ 接线变压器后发生故障					
三相短路	A—B—C	1	1	1	1
二相短路	A—B	1	1	0.5	0
	B—C			1	$\frac{\sqrt{3}}{2}$
	C—A			1	$\frac{\sqrt{3}}{2}$

$$K_{mzd} = \frac{\text{某种故障时的灵敏系数}}{\text{三相短路故障时的灵敏系数}}$$

$I_{dz}$ ——保护装置一次动作电流，

$$I_{dz} = I_{dxj} \frac{n_l}{K_{jx}}$$

$I_{d2\cdot\min}^{(3)}$ ——最小运行方式下线路末端三相短路稳态电流。

(2) 电流速断保护灵敏系数：

$$K_m^{(2)} = K_{mzd} \frac{I_{d1\cdot\min}^{(3)}}{I_{dz}} \geq 2$$

式中： $I_{d1\cdot\min}^{(3)}$ ——最小运行方式下线路始端三相短路超瞬变电流；

其它符号同前。

(3) 带时限电流速断保护灵敏系数：与瞬时电流速断保护相同。

**例 8—1** 试选择 10kV 架空线路的保护。线路如图 8—2 所

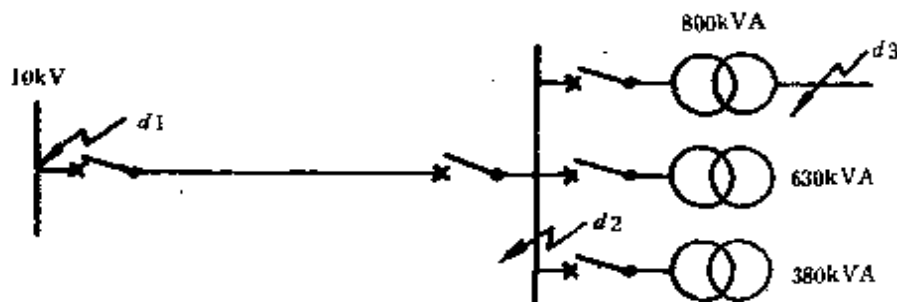


图 8—2 某供电线路图

示，已知考虑电动机起动时的线路过负荷电流  $I_{gh}$  为 300A。最大运行方式下，线路始端 ( $d_1$ ) 三相短路超瞬变电流  $I_{d1\cdot\max}^{(3)}$  为 6500A，线路末端 ( $d_2$ ) 三相短路超瞬变电流  $I_{d2\cdot\max}^{(3)}$  为 2020A，变压器低压侧 ( $d_3$ ) 三相短路过电流时流过高压侧超瞬变电流  $I_{d3\cdot\max}^{(3)}$  为 810A。最小运行方式下，相应的电流值如下： $I_{d1\cdot\min}^{(3)}$  为 5600A， $I_{d2\cdot\min}^{(3)}$  为 1980A， $I_{d3\cdot\min}^{(3)}$  为 750A。

**解**

(1) 保护装置的选择:根据系统情况可装设两台瞬时电流速断保护 DL-11/10 型继电器和两只带时限过电流保护 DL-11/10 型继电器。

(2) 保护装置整定计算:

① 瞬时电流速断保护:动作电流  $I_{dzj}$  应避开线路末端三相短路电流。

$$I_{dzj} = K_k K_{jc} \frac{I_{d2 \cdot \max}^{(3)}}{n_l} = 1.3 \times 1 \times \frac{2020}{400/5} \\ = 32.8(\text{A}), \text{取 } 33\text{A}$$

保护装置的一次动作电流为

$$I_{dz} = I_{dzj} \frac{n_l}{K_{ix}} = 33 \times \frac{400/5}{1} = 2640(\text{A})$$

保护装置的灵敏系数为

$$K_m^{(2)} = K_{\max d} \frac{I_{d1 \cdot \min}^{(3)}}{I_{dz}} = 0.87 \times \frac{5600}{2640} = 1.85 < 2$$

可见,瞬时电流速断保护不能满足灵敏系数要求,故应装设带时限电流速断保护。

② 带时限电流速断保护:

保护装置动作电流为

$$I_{dzj} = K_k K_{jc} \frac{I_{d3 \cdot \max}^{(3)}}{n_l} = 1.3 \times 1 \times \frac{810}{80} \\ = 13.2(\text{A}), \text{取 } 15\text{A}$$

保护装置一次动作电流为

$$I_{dz} = I_{dzj} \frac{n_l}{K_{ix}} = 15 \times \frac{80}{1} = 1200(\text{A})$$

保护装置的灵敏系数为

$$K_m^{(2)} = K_{\max d} \frac{I_{d1 \cdot \min}^{(3)}}{I_{dz}} = 0.87 \times \frac{5600}{1200} = 4.1 > 2$$

满足要求。

保护装置动作时限取 0.5s。

(3) 过电流保护:动作电流应避开线路最大负荷电流(考虑

电动机起动),并与下级变压器过电流保护装置的动作电流相配合。

① 按避开过负荷电流条件计算保护装置的动作电流  $I_{dzj}$ :

$$I_{dzj} = K_k K_{jz} \frac{I_{gh}}{K_h n_l} = 1.2 \times 1 \times \frac{300}{0.85 \times 80} = 5.3(\text{A})$$

② 按与下级变压器过电流保护装置的动作电流相配合条件计算保护装置的动作电流:变压器过电流保护装置的动作电流(计算方法见变压器继电保护) $I'_{dzj}$ :

$$I'_{dzj} = K_{gh} \frac{I_{cb}}{n_l} = 4 \times \frac{46}{150/5} = 6.1(\text{A})$$

式中: $K_{gh}$ ——过负荷系数,取4;

$I_{cb}$ ——最大一台变压器的额定电流(A);

$n_l$ ——变压器过电流保护用电流互感器变比。

线路过电流保护装置的动作为

$$I_{dzj} = K_k I'_{dzj} \frac{n_l}{n_l} = 1.2 \times 6.1 \times \frac{30}{80} = 2.7(\text{A})$$

由于前者计算结果大于后者,故按前者计算结果整定,取6A。

保护装置一次动作电流为

$$I_{dz} = I_{dzj} \frac{n_l}{K_{jz}} = 6 \times \frac{80}{1} = 480(\text{A})$$

保护装置的灵敏系数

在线路末端发生两相短路故障时

$$K_m^2 = K_{\text{mxd}} \frac{I_{d2\cdot\text{min}}^{(3)}}{I_{dz}} = 0.87 \times \frac{1980}{480} = 3.6 > 1.5$$

在变压器后发生三相短路故障时

$$K_m^{(3)} = K_{\text{mxd}} \frac{I_{d3\cdot\text{min}}^{(3)}}{I_{dz}} = 0.87 \times \frac{750}{480} = 1.4 > 1.2$$

因此满足要求。

保护装置的动作时限应与配电变压器(800kVA)的GL型继电器的反时限部分相配合,取1.2s。

## 二、小接地电流系统的接地保护计算

6 ~ 35kV 供电网络为中性点不接地系统,属小接地电流系统。单相接地保护装置一次动作电流的整定应满足以下两个条件:

### 1. 保护装置一次动作电流

$$I_{dz} = K_k I_{cz}$$

式中: $K_k$ ——可靠系数,瞬时过电流继电器为 4 ~ 5;带时限过电流继电器为 1.5 ~ 2;

$I_{cz}$ ——当被保护线路外的其它线路(元件)发生单相接地故障时,被保护线路流向故障点的电容电流(A)。

### 2. 灵敏度要求

被保护线路故障时,保护装置应可靠地动作,并满足灵敏度要求,即

$$K_m^{(1)} = \frac{I_{c\Sigma} - I_{cz}}{I_{dz}} \geq 1.25 \sim 1.5$$

式中: $I_{c\Sigma}$ ——全系统总的电容电流(A);

1.25 和 1.5——分别适用于电缆线路和架空线路。

当保护装置不能满足灵敏度要求时,可采用带短时限过电流继电器,其延时一般为 0.5 ~ 1s。

上述的  $I_{c\Sigma}$  和  $I_{cz}$  最好按实测数据,若无实测数据时,可按第六章第二节中性点不接地系统接地电流的计算公式计算。

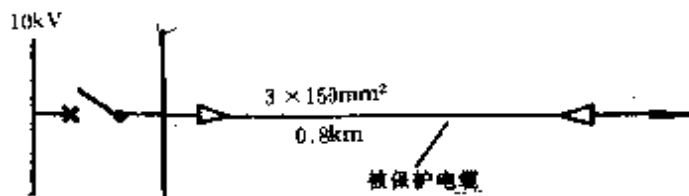


图 8—3 某 10kV 电缆线路

**例 8—2** 某 10kV 供电线路如图 8—3 所示。试选择  $3 \times 150\text{mm}^2$  电缆的单相接地保护。已知全系统总的电容电流  $I_{c\Sigma}$  为 13A。



**解**

(1) 求电缆单相接地电容电流,查表 6—15 得 10kV150mm<sup>2</sup> 电缆的单位长度电容电流为  $I_0 = 1.3\text{A}$ ,因此

$$I_{cx} = n l I_0 = 3 \times 0.8 \times 1.3 = 3.1(\text{A})$$

(2) 保护装置一次动作电流为

$$I_{dx} = K_k I_{cx} = 4 \times 3.1 = 12.4(\text{A})$$

(3) 灵敏度校验:

$$K_n^{(1)} = \frac{I_{c\mathcal{L}} - I_{cx}}{I_{dx}} = \frac{13 - 3.1}{12.4} = 0.8 < 1.25$$

因此改用带时限过电流继电器,这时

$$I_{dx} = K_k I_{cx} = 2 \times 3.1 = 6.2(\text{A})$$

$$K_n^{(1)} = \frac{13 - 3.6}{6.2} = 1.6 > 1.25$$

满足要求。

采用 LJ 型零序电流互感器及 DL-11/20 型过电流继电器, 动作电流取 6A,短延时 0.5s。

### 三、直流绝缘监视装置中的电流继电器起动值的计算

一般直流绝缘监视装置,如图 8—4 所示。图中  $SA_1$ 、

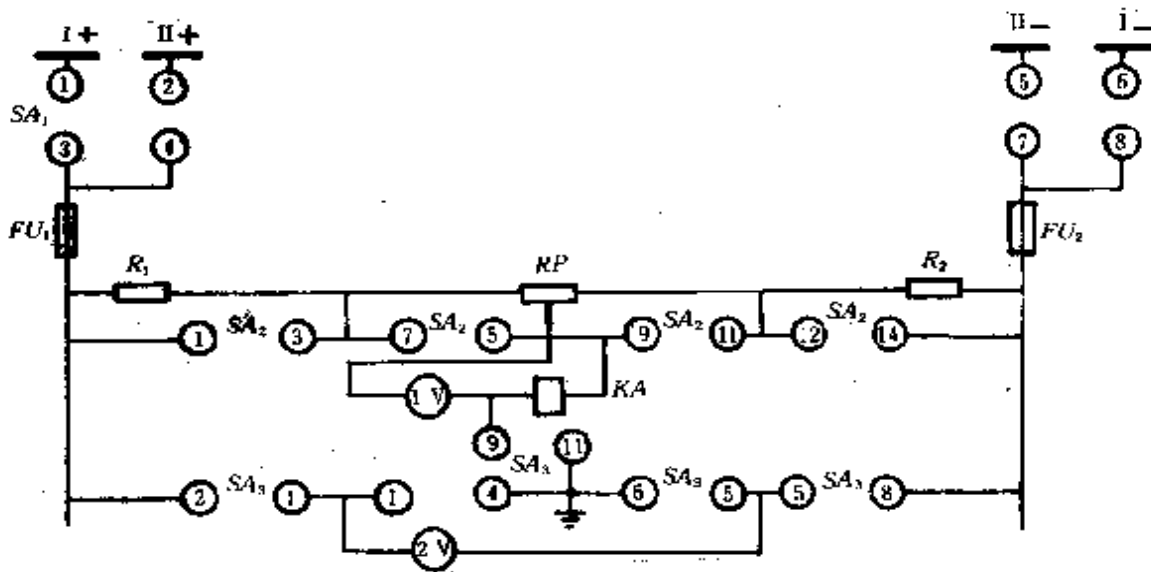


图 8—4 直流绝缘装置接线图



$SA_2$  为信号回路转换开关;  $SA_3$  为测量转换开关;  $KA$  为电流继电器的信号监视继电器。由图可见, 在正常时开关  $SA_2$  的接点 5—7 和 9—11 及  $SA_3$  的接点 9—11 在接通的位置, 表计 1V 指示零。当直流系统发生接地故障时, 则直流正负极对地的绝缘电阻失去平衡, 此时继电器  $KA$  开始有接地电流通过; 使  $KA$  动作, 接点闭合, 正极电源电流经熔断器通过接点发出信号。

1. 电流继电器动作电流计算

$$I_{dz} = \frac{U_e(R_+ - R_-)}{(2R_l + R)(R_+ + R_-) + 2R_+ R_-}$$

式中:  $I_{dz}$ —— 电流继电器动作电流(A);

$U_e$ —— 直流母线电压额定值(V);

$R_l$ —— 电流继电器内阻( $\Omega$ );

$R$ —— 装置桥接电阻, 一般为  $1K\Omega 50W$ ;

$R_+$ 、 $R_-$ —— 正负极对地绝缘电阻( $\Omega$ ),  $U_e = 110V$  系统,  $R_+$ 、 $R_-$  不小于  $10^5\Omega$ ;  $U_e = 220V$  系统;

$R_+$ 、 $R_-$  不小于  $2 \times 10^5\Omega$ 。

2. 正负极的绝缘电阻计算

正负极的绝缘电阻可根据电压表的指示按下式计算:

$$R_+ = R_y \left( \frac{U_0 - U_-}{U_+} - 1 \right)$$

$$R_- = R_y \left( \frac{U_0 - U_+}{U_-} - 1 \right)$$

式中:  $R_y$ —— 电压表内阻( $\Omega$ );

$U_0$ —— 测量时母线电压(V);

$U_-$ —— 负极对地电压(V);

$U_+$ —— 正极对地电压(V)。

### 第三节 变压器及母线断路器继电保护计算

#### 一、工厂电力变压器继电保护计算

##### 1. 6 ~ 10kV 配电变压器保护方式的选择

(1) 容量在 400kVA 及以下的配电变压器,一般采用高压熔断器保护。

(2) 容量在 400 ~ 750kVA 配电变压器,当高压侧装设断路器时,应装设电流速断保护装置作为变压器的主保护,过电流保护装置作为后备保护。但是当过电流保护装置动作时间小于或等于 0.5s 时,也可不装电流速断保护装置。

(3) 容量在 400kVA 以上的车间内变压器,除装设上述保护装置外,还要装设瓦斯保护装置。

(4) 容量在 800kVA 及以上的配电变压器,应装设电流速断保护装置作为变压器的主保护,过电流保护装置作为后备保护。但是当过电流保护装置动作时间小于或等于 0.5s 时,也可不装电流速断保护装置。

另外,800kVA 及以上的变压器应装设瓦斯保护装置;1000kVA 及以上的变压器还应装设温度保护装置。

(5) 变压器低压侧可装设单相接地保护。

2. 电力变压器继电保护动作电流的整定,见表 8-8

##### 3. 灵敏度校验

(1) 过电流保护的灵敏度校验:

$$K_m^{(2)} = K_{m.d} \frac{I_{d2\cdot\min}^{(3)}}{I_{dz}} \geq 1.5$$

式中:  $K_{m.d}$ ——相对灵敏系数,见表 8-7;

$I_{d2\cdot\min}^{(3)}$ ——最小运行方式下变压器低压侧三相短路稳态电流(A);

$I_{dz}$ ——保护装置一次动作电流(A),

(2) 电流速断保护的灵敏度校验:

表 8—8 6 ~ 10 kV 配电变压器继电保护整定计算

保护装置名称	保护装置的整定值	保护装置动作时限(s)	备注
过电流保护	保护装置的过电流整定值 $I_{dzj} = K_A K_{jz} \frac{K_{gh} I_{gb}}{K_{hnl}}$	比由变压器供电的线路保护装置的最大时限大一时限阶段,一般取 0.5 ~ 0.7s	$K_A$ —可靠系数,用于过电流保护时,DL 型继电器为 1.2, GL 型为 1.3;用于电流速断保护时,DL 型为 1.3;GL 型为 1.5;用于低压侧单相接地保护时,(在变压器中性线上装设的)取 1.2
电流速断保护	整定值 $I_{dzj} = K_A K_{jz} \frac{I_{d2}^{(3)max}}{n_1}$	0	$K_{jz}$ —接线系数,接于相电流时取 1,接于相电流差时取 $\sqrt{3}$
瓦斯保护	按油流速度整定 0.6 ~ 1.2m/s	0	$K_h$ —返回系数,取 0.85.
低压侧单相接地保护(利用高压侧三相式过电流保护)	同过电流保护	同过电流保护	$n_1$ —电流互感器变比 $I_{gh}$ —过负荷系数,约为 4 $I_{cb}$ —变压器额定电流(A) $I_{d2}^{(3)max}$ —最大运行方式下变压器低压侧三相短路时,流过高压侧(保护安装处)的超瞬变电流(A)
低压侧单相接地保护(采用在低压侧中性线上装设专用的零序保护)	整定值 $I_{dzj} = K_A \frac{0.25 I_{cb}}{n_1}$ 并与低压出线上的零序保护相配合 $I_{dzj} = K_{ph} \frac{I_{dzf}}{n_1}$	动作时时限一般取 0.5s	$K_{ph}$ —配合系数,取 1.1 $I_{dzf}$ —低压分支线上零序保护的过电流

$$K_m^{(2)} = K_{mzd} \frac{I_{d1}^{(3)min}}{I_{dz}} \geq 2$$

式中:  $I_{d1}^{(3)min}$ ——最小运行方式下变压器高压侧三相次暂态短路电流(A)。

(3) 低压侧单相接地保护(利用高压侧三相式过电流保护)的灵敏度校验:

$$K_m = \frac{I_{d2 \cdot \min}^{(1)}}{I_{dz}} \geq 2$$

式中： $I_{d2 \cdot \min}^{(1)}$ ——最小运行方式下变压器低压侧母线或母干线末端单相接地短路时，流过高压侧（保护安装处）的稳态电流， $I_{d2 \cdot \min}^{(1)} = \frac{2I_{d22 \cdot \min}^{(1)}}{3K}$ ；

$I_{d22 \cdot \min}^{(1)}$ ——最小运行方式下变压器低压侧母线或母干线末端单相接地稳态短路电流(A)；

$k$ ——变压器变比。

(4) 低压侧单相接地保护（采用在低压侧中性线上装设专用的零序保护）的灵敏度校验：

$$K_m = \frac{I_{d22 \cdot \min}^{(1)}}{I_{dz}} \geq 2$$

**例 8—3** 有一台  $Yy_{n0}$  结线的  $SL_7-800kVA$  车间配电变压器，试选择变压器的保护。已知变压器高压侧额定电流为 42A，过负荷系数为 3。设系统电源容量为无穷大，稳态短路电流等于超瞬变短路电流。最小运行方式下，高压侧三相短路电流  $I_{d1 \cdot \min}^{(3)}$  为 3150A，低压侧三相短路电流归算到高压侧的电流  $I_{d2 \cdot \min}^{(3)}$  为 724A。最大运行方式下，低压侧三相短路电流归算到高压侧的电流  $I_{d2 \cdot \max}^{(3)}$  为 832A。最小运行方式下，低压侧母线单相接地短路电流  $I_{d22 \cdot \min}^{(1)}$  为 6700A。

**解**

(1) 保护装置的选择：

① 过电流保护兼作电流速断保护：由两个 GL—11 型继电器和两个变比为 150/5 的电流互感器组成。

② 低压侧单相接地保护：由一个 GL—11 型继电器和一个变比为 300/5 的电流互感器组成。

③ 瓦斯保护。

(2) 保护整定计算：

① 过电流保护：动作电流应躲过可能出现的过负荷电流。

$$I_{dzj} = K_k K_{jz} \frac{K_{gh} I_{cb}}{K_h n_l} = 1.3 \times 1 \times \frac{3 \times 42}{0.85 \times 30} = 6.4(\text{A}), \text{取 } 7\text{A}$$

保护装置的一次动作电流为

$$I_{dz} = I_{dzj} \frac{n_l}{K_{jz}} = 7 \times \frac{30}{1} = 210(\text{A})$$

灵敏度校验

$$K_m^{(2)} = K_{mxd} \frac{I_{d2\cdot\min}^{(3)}}{I_{dz}} = 0.87 \times \frac{724}{210} = 3.0 > 1.5$$

满足要求。保护装置的動作时限取 0.5s(指 10 倍動作電流時的動作時間)。

② 電流速斷保護：動作電流應躲過低壓側短路時，流過保護裝置的最大短路電流。

$$I_{dzj} = K_k K_{jz} \frac{I_{d2\cdot\max}^{(3)'}}{n_l} = 1.5 \times 1 \times \frac{832}{30} = 41.6(\text{A})$$

瞬動電流倍數為  $41.6/7 = 5.9$ ，取 6 倍。

$$K_m^{(2)} = K_{mxd} \frac{I_{d2\cdot\min}^{(3)'}}{I_{dz}} = 0.87 \times \frac{3150}{210 \times 6} = 2.2 > 2$$

滿足要求。

③ 低壓側單相接地保護：若利用高壓側三相式過電流保護兼作單相接地保護，則

$$K_m^{(1)} = \frac{I_{d2\cdot\min}^{(1)}}{I_{dz}} = \frac{2}{3} \cdot \frac{I_{d22\cdot\min}^{(1)}}{I_{dz} k} = \frac{2}{3} \times \frac{6700}{210 \times 10/0.4} = 0.85 < 2$$

不滿足要求。

若裝設專用零序過電流保護，則動作電流

$$I_{dzj} = K_k \frac{0.25 I_{cb}}{n_l} = 1.2 \times \frac{0.25 \times 1156}{60} = 5.8(\text{A}), \text{取 } 5\text{A}$$

保護裝置的一次動作電流

$$I_{dz} = I_{dzj} n_l = 5 \times 60 = 300(\text{A})$$

### 灵敏度校验

$$K_m^{(1)} = \frac{I_{d22}^{(1)\cdot\min}}{I_{dz}} = \frac{6700}{300} = 22.3 > 2$$

保护装置的动作时限采用 0.5s

## 二、小型电力变压器保护计算

### 1. 瞬时脱扣器脱扣电流的整定

小型电力变压器常用自动开关作为低压侧的总开关。当变压器低压侧供电网路发生短路故障时,自动开关瞬时脱扣器动作,使开关跳闸,切断电源,从而达到过电流保护的目。

(1) 脱扣器的整定电流计算:脱扣器的整定电流应躲过配电网路上的尖峰电流(包括电动机起动电流)。

$$I_{dzj} = (3 \sim 4)I_{2e}$$

式中:  $I_{dzj}$ ——自动开关瞬时过电流脱扣器动作电流整定值(A);

$I_{2e}$ ——变压器低压侧额定电流(A)。

### (2) 灵敏度校验:

$$I_{d22}^{(3)\cdot\min} > 1.3I_{dzj}$$

式中:  $I_{d22}^{(3)\cdot\min}$ ——系统最小运行方式下,低压侧三相短路电流值(A)。

如果不能满足上述要求,则应对系统布局作出安排,如增设零序保护或限制最大电动机容量等。

(3) 自动开关瞬时脱扣动作时间对变压器温升的影响:低压侧三相短路的情况下,变压器绕组达到的平均温度  $\theta$  可按下列式计算:

$$\theta = \theta_0 + \alpha j^2 t \times 10^{-3}$$

式中:  $\theta_0$ ——短路时起始温度,等于最高气温与在额定使用条件下变压器极限温升之和( $^{\circ}\text{C}$ );

$\alpha$ —— $\frac{1}{2}(\theta_0 + \theta_{ux})$  的函数,可按表 8—9 选用;

$\theta_{ux}$ ——绕组短路时允许最大平均温度(°C)；

$j$ ——短路时的电流密度(A/mm<sup>2</sup>)；

$t$ ——短路持续时间(s)。

表 8—9  $\alpha$  与  $\frac{1}{2}(\theta_0 + \theta_{ux})$  的关系

$\frac{1}{2}(\theta_0 + \theta_{ux})$	$\alpha$ 值		$\frac{1}{2}(\theta_0 + \theta_{ux})$	$\alpha$ 值	
	铜绕组	铝绕组		铜绕组	铝绕组
140	7.41	16.5	220	8.99	—
160	7.8	17.4	240	9.38	—
180	8.2	18.3	260	9.78	—
200	8.59	19.1			

由于瞬时脱扣时间一般不超过 0.02s,因此不会对变压器造成影响。例如,一台 SJL—630kVA 变压器,10/0.4kV, $U_d\%$  为 4.5, $\theta_0 = 105^\circ\text{C}$ ,铝绕组  $\theta_{ux}$  为  $200^\circ\text{C}$ ,由表 8—9 查得  $\alpha = 17$ ,低压侧铝导线截面积  $q$  为  $382.8\text{mm}^2$ 。假定系统为无穷大电源,系统阻抗为零,三相短路电流为  $I_d^{(3)} = \frac{100I_{zc}}{U_d\%} = \frac{100 \times 808}{45} = 18 \times 10^3(\text{A})$ ,故变压器低压侧自动开关出口三相短路时的电流密度为  $j = I_d^{(3)}/q = 8 \times 10^3/382.8 = 47(\text{A}/\text{mm}^2)$ , $t = 0.02\text{s}$ ,因此

$$\theta = 105 + 17 \times 47^2 \times 0.02 \times 10^{-3} = 105.75(^\circ\text{C})$$

可见影响很小。

经计算,若持续时间超过 2.5s,变压器绕组的平均温度(最



高气温下) 才会超过  $200^{\circ}\text{C}$ 。

### 2. 旁路熔丝保护的计算

对于容量较小, 保护系统要求不高的变压器, 也可以采用旁路熔丝作过电流保护。保护装置线路如图 8—5 所示。

保护原理: 在正常情况下, 高压或低压大容量自动开关的

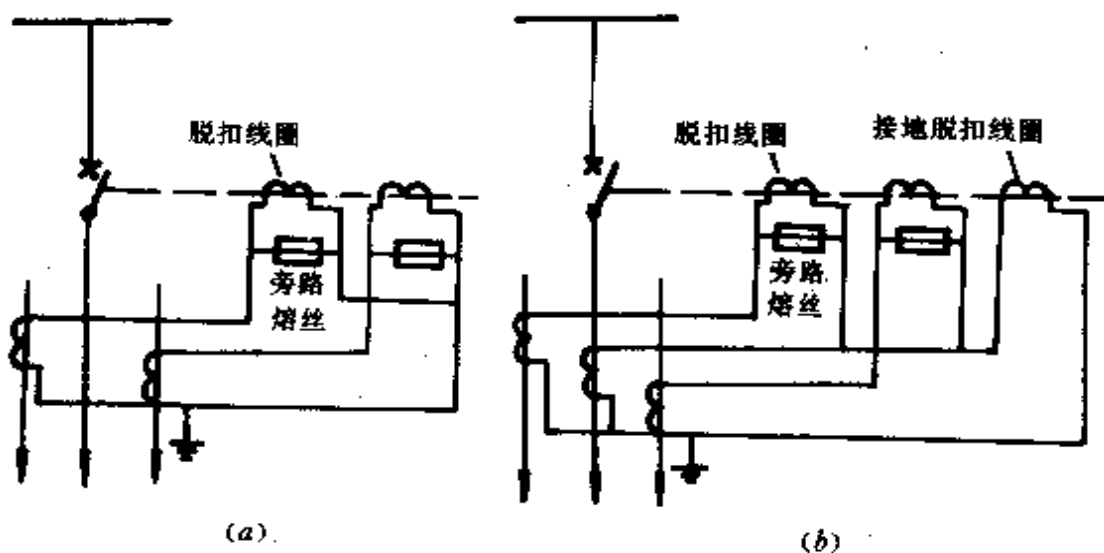


图 8 5 使用旁路熔丝的保护装置  
(a) 中性点不接地 (b) 中性点接地

脱扣线圈的阻抗比旁路熔丝大得多, 因此电流几乎都流过熔丝。当变压器低压侧电流超过熔丝熔断电流时, 熔丝熔断, 全部电流流过脱扣线圈作开关跳闸, 从而保护了变压器。

为了保证跳闸的准确可靠, 脱扣线圈的动作电流必须小于旁路熔丝熔断电流。

用旁路熔丝作过电流保护时, 其熔丝电流、变压器容量和电流互感器的选择见表 8—10。熔丝的时间特性见表 8—11。



表 8—10 变压器容量、电流互感器与熔丝的关系

电压(kV)	变压器容量(kVA)	电流互感器变比	旁路熔丝标值(A)
6 ~ 10	125 及以下	30/5	6
6 ~ 10	160 ~ 250	50/5	6
6 ~ 10	315 ~ 400	75/5	6
6 ~ 10	400 ~ 500	100/5	6
6 ~ 10	500 ~ 630	100/5	6
6 ~ 10	630 ~ 1000	150/5	7

表 8—11 旁路熔丝的性能

熔丝直径 (mm)	定 值 (A)	允许负荷		二倍熔断电流 的熔断时间		熔断电流 (A)			不熔断电流 (A)		
		稳定	瞬时	电流 (A)	时间 (s)	平均	最大	最小	平均	最大	最小
0.61	6	3.6	3.9	12	2.7 ± 0.2	6	6.6	5.4	5.7	6.25	5.15
0.813	8.5	5.1	5.52	18.7	2.9 ± 0.2	9.35	10.2	8.5	8.88	9.7	8.09
0.915	10	6	6.2	22.0	3.1 ± 0.2	11	12	10	10.45	11.4	9.5

### 三、母线分段断路器及联络断路器的继电保护计算

#### 1. 6 ~ 10kV 母线断路器继电保护方式的选择

(1) 变电所 6 ~ 10kV 母线分段断路器应装设瞬时过电流保护。保护应只在断路器合闸瞬间起作用，合闸完毕自动或手动解除保护。保护一般为两相式。

(2) 变电所 6 ~ 10kV 母线联络断路器应装设下列保护:

① 电流速断保护: 作为母线耐压试验时的速动保护, 或作为送出线电流速断保护的备用保护。

② 带时限过电流保护: 作为送出线过电流保护的后备保护。保护一般为两相式。

2. 母线断路器继电保护动作电流的整定, 见表 8—12

3. 灵敏度校验

(1) 过电流保护灵敏度校验:

$$K_m^{(2)} = K_{\text{mxd}} \frac{I_{d \cdot \text{min}}^{(3)}}{I_{dz}} \geq 1.5, I_{dz} = \frac{I_{dzj} n_l}{K_{jz}}$$

式中:  $I_{d \cdot \text{min}}^{(3)}$  —— 最小运行方式下母线三相短路时, 流过保护安装处的稳态电流(A);

$I_{dz}$  —— 保护装置的一次动作电流(A)。

作为后备保护时

$$K_m^{(2)} = K_{\text{mxd}} \frac{I_{d1 \cdot \text{min}}^{(3)}}{I_{dz}} \geq 1.25$$

式中:  $I_{d1 \cdot \text{min}}^{(3)}$  —— 最小运行方式下相邻元件末端三相短路时, 流过保护安装处的稳态电流(A)。

(2) 电流速断保护灵敏度校验:

$$K_m^{(2)} = K_{\text{mxd}} \frac{I_{d1 \cdot \text{min}}^{(3)}}{I_{dz}} \geq 2$$

式中:  $I_{d \cdot \text{min}}^{(3)}$  —— 最小运行方式下母线三相短路时流过保护安装处的超瞬变电流(A);

$I_{dz}$  —— 保护装置一次动作电流(A),

$$I_{dz} = I_{dzj} n_l$$

**例 8 4** 试选择变电所 10kV 分段母线的保护。已知一段母线最大负荷(包括电动机起动引起的)电流  $I_{h \cdot \text{max}}$  为 240A。设电源容量为无穷大, 稳态短路电流等于超瞬变短路电流。最小运行方式下, 母线三相短路超瞬变电流  $I_{d \cdot \text{min}}^{(3)}$  为 2520A, 相邻元件

端三相短路时,流过保护装置的三相短路超瞬变电流  $I_{d\cdot\min}^{(3)}$  为 650A。

表 8—12 6~10kV 母线断路器继电保护整定计算

保护装置名称	保护装置整定值	保护装置动作时限 S	备注
过电流保护	保护装置的動作電流整定值 $I_{dzj} = K_k K_{jx} \frac{I_{h\cdot\max}}{K_h n_l}$	应较相邻元件的过电流保护大一时限阶段,一般大 0.5~1.0s	$K_k$ —可靠系数,取 1.3 $K_{jx}$ —接线系数,接于相电流时取 1,接于相电流差时取 $\sqrt{3}$ $K_h$ —继电器返回系数,取 0.85 $n_l$ —电流互感器变比 $I_{h\cdot\max}$ —任一段母线的最大工作电流(A)
电流速断保护	整定值 按电流互感器的一次侧额定电流整定 $I_{dzj} = K_k \frac{K_{gh} I_{ei}}{n_l}$ 当上式整定灵敏度不满足要求时,可按下式整定 $I_{dzj} = K_{msd} \frac{I_{d2\cdot\min}^{(3)}}{K_m^{(3)} n_l}$	0	$K_{gh}$ —过负荷系数,取 4 $I_{ei}$ —电流互感器额定一次电流(A) $K_{msd}$ —相对灵敏系数,见表 8-7 $K_m^{(3)}$ —两相短路的最小灵敏系数 $\geq 2$ $I_{d2\cdot\min}^{(3)}$ —最小运行方式下,母线三相短路时流过保护装置的超瞬变电流(A)

**解** (1) 保护装置的选择:过电流保护由两个 GL—11 型继电器和两个变比为 200/5 的电流互感器组成。不用过电流继电器瞬动部分。

(2) 保护整定计算:动作电流应躲过任一母线段的最大负荷电流。

$$I_{dzj} = K_k K_{jx} \frac{I_{h\cdot\max}}{K_h n_l} = 1.3 \times 1 \times \frac{240}{0.85 \times 40} = 9.2(\text{A}),$$
取 10A 保护装置的一次动作电流

$$I_{dz} = I_{dzj} \frac{n_l}{K_{ix}} = 10 \times \frac{40}{1} = 400(\text{A})$$

(3) 灵敏度校验:

$$K_m^{(2)} = K_{mxd} \frac{I_{d \cdot \min}^{(3)}}{I_{dz}} = 0.87 \times \frac{2520}{400} = 5.5 > 1.5$$

若作后备保护

$$K_m^{(2)} = K_{mxd} \frac{I_{d1 \cdot \min}^{(3)}}{I_{dz}} = 0.87 \times \frac{650}{400} = 1.41 > 1.25$$

保护装置的动作时限采用 0.7s。

#### 四、自动重合闸继电保护计算

##### 1. 电流线圈额定电流的选择

$$I_e < I_{dhe}$$

式中:  $I_e$ ——自动重合闸(ZCH)中间继电器的电流线圈的额定电流(A);

$I_{dhe}$ ——断路器合闸接触器线圈的额定电流(A),可按表 8—13 选择

表 8—13 中间继电器电流线圈额定电流

合闸接触器线圈额定电流(A)	0.3 ~ 0.6	0.6 ~ 1.2	1.2 ~ 3	3 ~ 3.2
自动重合闸的额定电流(A)	0.25	0.5	1	2.5

2. 单侧电源配电线路自动重合闸动作时限的整定计算对于不对应起动方式

$$t_{zch} \geq t_{cz} + t_c$$

对于保护起动方式

$$t_{zch} \geq t_{dl} + t_{cz} + t_c$$

式中:  $t_{zch}$ ——重合闸装置的时限,即 ZCH 中时间继电器的延时(s);

$t_{cz}$ ——操作机构恢复原位准备好合闸的时间,对于电磁式操作机构,取 0.3 ~ 0.4s;

$t_c$ ——储备时间,取 0.3 ~ 0.4s;

$t_{di}$ —断路器掉闸时间(s)。

35kV以下的线路,当计算时限 $t_{ca}$ 小于0.8s时,一般取0.8~1s。

ZCH的返回时限一般都能满足要求,可以不作计算。后加速继电器的复归时间一般取0.3~0.4s。

## 第四节 电动机继电保护计算

### 一、异步电动机继电保护计算

#### 1. 异步电动机继电保护方式的选择

(1) 电压低于1000V的电动机一般功率不大,重要性较小,可采用下列保护:

- ① 熔断器保护;
- ② 在一台电动机短路时,断开几台电动机的公用断路器;
- ③ 自动空气开关作为低电压保护。

(2) 电压为3~10kV、功率大于150kW、小于2000kW的电动机,应装设电流速断保护;当电流速断保护不能满足灵敏度要求时需装设纵联差动保护。

(3) 电压为3~10kV的电动机,若生产过程中易发生过负荷时,或起动、自起动等条件严重时,均应装设过负荷保护。另外,当单相接地电流大于5A时,需装设单相接地保护,一般5~10A时可作用于信号,也可作用于跳闸;大于10A时作用于跳闸。

(4) 3~35kV网络的中性点是不接地的,为保护电动机,应在电动机母线上装设“绝缘监视”装置。

(5) 当电动机有必要装设低电压保护装置时,可采用在线电压上的低电压继电器将电动机断开;必要时可采用两个继电器的低电压保护。

#### 2. 异步电动机继电保护的整定(表8-14和表8-15)

表 8-14 电压低于 1000V 异步电动机的继电保护整定计算

保护装置名称	保护装置的整定值	保护装置动作时限 (s)	备注
熔断器  用自动空气开关实现过 电流保护	熔断器的电流 正常起动的电动机 $I_r = \frac{I_q}{2 \sim 2.5}$ 较严重情况下起动的电动机 $I_r = \frac{I_q}{1.6 \sim 2.0}$ 自动空气开关的动作电流整 定值 $I_{Dj} > I_q$	根据可熔保险 器的特性动作 时限与电流有 关	$I_r$ ——熔断器的电流(A) $I_q$ ——电动机的起动电流(A) $I_{Dj}$ ——自动空气开关整定电流值 (A) $U_{Dj}$ ——自动空气开关整定电压 值(V) $U_e$ ——电动机的额定电压(V)
用附有低电压线圈的电 磁起动器或自动空气开 关实现低电压保护	自动空气开关的动作电压整 定值 $U_{Dj} < 0.8U_e$		

表 8—15 电压高于 1000V 异步电动机的继电保护整定计算

保护装置名称	保护装置的整定值	保护装置动作时限 (s)	备注
电流速断保护	保护装置动作电流整定值 $I_{dxj} = K_k k_{jz} \frac{I_q}{n_l}$	0	$K_k$ ——可靠系数, 采用 DL 型电流继电器取 1.4 ~ 1.6; 采用 GL 型的取 1.8 ~ 2 $K_{jz}$ ——接线系数, 接于相电流时取 1,
过电流保护(可与电流速断共用一个感应型过电流继电器)	整定值 $I_{dxj} = K_k k_{jz} \frac{I_{ed}}{K_b n_l}$	躲过电动机起动的全部时间。	接于相电流差时取 $\sqrt{3}$ $K_k$ ——可靠系数, 动作于信号时取 1.05 ~ 1.10, 动作于掉闸时取 1.2 ~ 1.25
单相接地保护	一次动作电流 $I_{dx} \leq \frac{I_{eZ}}{1.25}$	0	$K_b$ ——继电器返回系数, 取 0.85 $n_l$ ——电流互感器变比 $n_y$ ——电压互感器变比
低压保护	整定值 $U_{dxj} = (0.7 \sim 0.8) \frac{U_e}{n_y}$	重要电动机: 10 ~ 15 不重要电动机: 0.5 ~ 0.7	$I_{ed}$ ——电动机额定电流(A) $I_q$ ——电动机的起动电流(A) $I_{eZ}$ ——电网的总单相接地电容电流(A) $U_e$ ——电动机额定电压(V)

注: 对于一般电动机  $t_{dx} = (1.1 \sim 1.2)t_q$  (其中  $t_q$  为保护装置动作时间,  $t_q$  为电动机起动及自起动时间)。对于传动风机负荷的电动机  $t_{dx} = (1.2 \sim 1.4)I_q$



### 3. 电流速断保护灵敏度校验

$$K_m^{(2)} = K_{msd} \frac{I_{d\cdot\min}^{(3)}}{I_{dz}} \geq 2, I_{dz} = I_{dzj} \frac{n_l}{K_{jx}}$$

式中： $K_{msd}$ ——相对灵敏系数，见表 8—7；

$I_{d\cdot\min}^{(3)}$ ——最小运行方式下，电动机出线端三相短路时流过保护安装处的超瞬变电流(A)；

$I_{dz}$ ——保护装置的一次动作电流(A)，

$n_l$ ——电流互感器变比；

$K_{jx}$ ——接线系数，接于相电流时取 1，接于相电流差时取  $\sqrt{3}$ 。

**例 8 5** 试选择一台 6kV、380kW 电动机的保护。电动机装在经常有人值班的机房内，运行过程中有过负荷的可能。已知电动机的额定电流  $I_{ed}$  为 47.5A，起动电流倍数  $K_q$  为 4。在最小运行方式下电动机出线端三相短路时，流过保护安装处的超瞬变电流  $I_{d\cdot\min}^{(3)}$  为 6500A，稳态电流  $I_{d\cdot\min}^{(3)}$  为 4800A。

**解** (1) 保护装置的选择：因电动机在运行过程中有过负荷的可能性，故需装过负荷保护。电动机由于经常有值班人员照顾，因此不需装防止长时间失压的低电压保护。装设电流速断保护和过电流保护（与电流速断共用一感应型过电流继电器），采用接于两相电流差的 DL—11/100 型电流继电器。

(2) 保护装置整定计算及灵敏度校验：

① 电流速断保护继电器的动作电流：

$$\begin{aligned} I_{dzj} &= K_k K_{jx} \frac{K_q I_{ed}}{n_l} = 1.6 \times \sqrt{3} \times \frac{4 \times 47.5}{15} \\ &= 35.2(\text{A}), \text{取 } 40\text{A} \end{aligned}$$

保护装置的一次动作电流为

$$I_{dz} = I_{dzj} n_l = 40 \times 15 = 600(\text{A})$$

灵敏度校验



$$K_m^{(2)} = K_{m,rd} \frac{I_{d \cdot \min}^{(3)}}{I_{dz}} = 0.5 \times \frac{6500}{600} = 5.4 > 2$$

② 过电流保护继电器的动作电流

$$I_{dzj} = K_k K_{jx} \frac{I_{ed}}{K_k n_l} = 1.25 \times \sqrt{3} \times \frac{47.5}{0.85 \times 15} \\ = 8.0(\text{A}), \text{取 } 8\text{A}$$

保护装置的一次动作电流为

$$I_{dz} = I_{dzj} n_l = 8 \times 15 = 120(\text{A})$$

灵敏度校验

$$K_m^{(2)} = K_{m,rd} \frac{I_{d \cdot \min}^{(3)}}{I_{dz}} = 0.5 \times \frac{4800}{120} = 11.7 > 1.5$$

## 二、同步电动机继电保护计算

### 1. 同步电动机继电保护方式的选择

(1) 电压为 3 ~ 10kV、功率小于 2000kW 的电动机应装设电流速断保护；当电流速断保护不能满足灵敏度要求时应装设纵联差动保护。

(2) 同异步电动机继电保护方式的选择 3。

(3) 电压为 3 ~ 10kV 的电动机，均需装设失步保护。

### 2. 同步电动机继电保护的整定(表 8—16)

#### 3. 灵敏度校验

(1) 电流速断保护灵敏度校验：同异步电动机电流速断保护灵敏度校验。

(2) 纵联差动保护灵敏度校验：

① 采用 BCH—2 型差动继电器时：先确定继电器的差动线圈和平衡线圈的匝数：

差动继电器计算匝数  $W_{\beta}$

表 8—16 同步电动机继电保护的整定计算

保护装置 的名称	保护装置的整定值	保护装置 动作时限 (S)	备 注
电 流 速 断保护	保护装置动作电流整定值 按躲过电动机的起动电 流整定 $I_{dzj} = K_k K_{jz} \frac{I_q}{n}$ 按躲过外部短路时电动 机的输出电流整定 $I_{dzj} = K_k K_{jz} \frac{I_{dd}^{(3)}}{n}$ 选择其中最大值作为整定值	0	$K_k, K_{jz}$ 同表 8—15 $I_q$ ——电动机起动电流(A) $I_{dd}^{(3)}$ ——同步电动机出线端 三相短路时,输出的 超瞬变电流(A) $I_{cd}$ ——同步电动机的电容电 流(中、小型电动机的 电容电流可忽略不 计)(A) $I_{cs}$ ——电网的总单相接地电 容电流(A)
过电流 保护	同异步电动机	同异步电动机	
纵联差 动保护 (采用 BCH—2 型差动 继电器)	按躲过电动机起动电流 整定 $I_{dzj} = K_k K_{jz} \frac{0.1 I_q}{n}$ 按躲过外部短路时同步 电动机输出超瞬变电流 整定 $I_{dzj} = K_k K_{jz} \frac{0.05 I_{dd}^{(3)}}{n}$	0	

(续表)

保护装置 的名称	保护装置的整定值	保护装置 动作时限 (s)	备 注
纵联差动 保护(采用 BCH-2型 差动继电 器)	按电流互感器二次回路 断线条件整定 $I_{dx1} = K_R K_{jx} \frac{I_{cd}}{n_1}$ 选择其中最大值作为整 定值	0	
纵联差动 保护(采用 DL-11型 继电器)	整定值 $I_{dxj} = (1.5 \sim 2) \frac{I_{cd}}{n_1}$	0	
单相接地 保护	一次动作电流(按最灵敏 系数1.25整定) $I_{dx} \leq \frac{I_{c2} - I_{cd}}{1.25}$ 或按下式整定: $I_{dxj} = (1.5 \sim 2) I_{cd}$	0	
失步保护	整定值 $I_{dxj} = K_R K_{jx} \frac{I_{cd}}{K_h n_1}$	同过负 荷保护	

注:同步电动机出线端三相短路时,输出的超瞬变电流

$$I_{dd}^{(3)} = \left( \frac{1.05}{x'_{d'}} + 0.95 \sin \varphi_e \right) I_{cd} \quad x'_{d'} \text{ 为同步电动机超瞬变电抗标公值; } \varphi_e \text{ 为同步电动机额定功率因数角; } I_{cd} \text{ 为同步电动机额定电流(A)}$$

$$W_{js} = \frac{AW_0}{I_{dzj}}$$

要求  $W_{js} \geq W_1 + W_c$

$$W_1 = W_2$$

式中： $AW_0$ ——继电器动作安匝数，应采用实测值；如无实测值，可取 60；

$W_1、W_2$ ——第一和第二平衡线圈的实用匝数；

$W_c$ ——差动线圈的实用匝数。

短路线圈的抽头：一般选取抽头 3—3 或 2—2；功率大于 5000kW 的同步电动机可选取 2—2 或 1—1。

再进行保护装置的灵敏度校验：

$$K_m^{(2)} = \frac{W_1 + W_c}{AW_0} K_{mzd} K_{jz} \frac{I_{d\cdot\min}^{(3)}}{n_l} \geq 2$$

式中： $K_{mzd}$ ——相对灵敏系数，见表 8—7；

$I_{d\cdot\min}^{(3)}$ ——最小运行方式下，电动机出线端三相短路时流过保护安装处的超瞬变电流(A)；

其它符号同前。

② 采用 DL—11 型电流继电器时：

$$K_m^{(2)} = K_{mzd} \frac{I_{d\cdot\min}^{(3)}}{I_{dz}} \geq 2$$

4. 同步电动机自控设备其它保护设备的整定

(1) 低电压保护装置的整定：

① 用于电源的低电压继电器，可采用 DJ—122/160 型电压继电器。

$$U_{dzj} = (0.6 \sim 0.7)U_{ce}$$

式中： $U_{dzj}$ ——电压继电器动作电压整定值(V)；

$U_{ce}$ ——电网额定电压(V)。

保护装置动作时限为 0.5s。

② 用于强迫励磁的低电压继电器，可采用 DJ—122/160 型

电压继电器。

$$U_{dzj} = 0.8U_{ce}, \text{动作延时 } 10\text{s}$$

③ 用于控制回路和保护与信号回路低电压继电器,可采用 JT<sub>3</sub>-11/1 型电压继电器,

$$U_{dzj} = 0.8U_{ke}, \text{动作延时 } 0.5\text{s}$$

式中:  $U_{ke}$  —— 控制回路和保护信号回路的额定电压(V)。

(2) 辅助电动机联锁继电器时间的整定: 考虑辅助电动机的自动起动时间, 辅助电动机停车联锁继电器时间可整定 3s 左右。

## 第五节 发电机继电保护计算

### 一、小型发电机继电保护计算

#### 1. 小型发电机继电保护方式的选择

通常称 3000kW 及以下的发电机为小型发电机。发电机的额定电压有 6.3kV、3.15kV 和 400/230V。

(1) 容量在 200kW 以下, 电压为 400V 的发电机, 可用熔断器或自动空气开关作为保护装置。

(2) 容量为 200 ~ 500kW, 电压为 400V 或 6.3kV 的发电机, 应装设由 GL-10 型电流组成过电流与过负荷保护。电流继电器由装在发电机中性点侧的电流互感器供电。

(3) 容量在 500kW 以上的发电机, 应装设纵联差动保护装置, 作为发电机的主保护, 过电流保护为后备保护; 当普通的过电流保护不能满足灵敏度要求时, 需加装带低电压起动的过电流保护装置。

(4) 电压为 6.3kV 的发电机, 当发电机电压网络的单相接地电容电流大于 5A 时, 需装设定子单相接地保护装置。

(5) 容量在 750kW 以下的发电机, 允许用发电机出口自动

空气开关的过载脱扣器代替继电保护装置。脱扣器的整定值采用发电机额定电流的 1.35 ~ 1.7 倍。

2. 发电机继电保护的整定(见表 8—17)

表 8—17 电压为 1kV 以上的发电机的继电保护装置

保护装置 的名称	保护装置的整定	保护装置 动作时限 (s)	备 注
纵联差动 保护装置	保护装置动作电流整定值	0	$I_e$ ——发电机额定电流(A)
监视电流 互感器 二次接线完 整性的信号	$I_{dsj} = \frac{(1.3 \sim 1.4)I_e}{n_i}$ 整定值	1	$n$ ——电流互感器的变比
低电压起 动的过电 流保护	整定值 $I_{dsj} = \frac{(1.3 \sim 1.4)I_e}{K_A n_i}$ $U_{dsj} = \frac{K_R U_{min}}{K_k n_y}$	较变压器和出 线保护的时限 大 1 ~ 2 阶段 $t_1 + \Delta t$	$K$ ——继电器返回系数, 取 0.85 $K_k$ ——电压继电器的可 靠系数,取 1.2 $n_y$ ——电压互感器的变 比 $t_1$ ——变压器和出线保 护的时限定值(s) $U_{min}$ ——发电机最低运 行电压,一般 取 0.9 $U_e$ ( $U_e$ 为 发电机额定电 压)(V)
过电流 保护	整定值 $I_{dsj} = \frac{1.05I_e}{K_k n_i}$	10s 以下	

二、多台发电机并列运行继电保护计算

1. 多台发电机并列运行继电保护方式的选择

(1) 采用不带时限的电流速断保护作为发电机定子绕组多相短路和单相接地短路保护。

(2) 采用带时限的过电流保护作为外部短路保护。

2. 继电保护的整定(见表 8—18)

表 8—18 多台发电机并列运行继电保护整定计算

保护装置 的名称	保护装置的整定	保护装置 动作时限 (s)	备 注
电 流 速 断 保 护	保护装置的电流整定值 按躲过母线短路时 流过发电机开关的三相 短路超瞬变电流整定 $I_{dzj} = \frac{1.5 I_{d\min}^{(3)}}{n_i}$ 按躲过系统稳定性 遭到破坏时的最大振荡 电流整定 $I_{dzj} = \frac{2K_k E_c}{n_i(X'_d + X_c)}$ 选择其中最大值作为整 定值	0	$I_{d\min}^{(3)}$ ——最小运行方式下, 母线三相短路时 流过发电机开关 的超瞬变电流 (A) $n_i$ ——电流互感器的变比 $E_c$ ——发电机额定电压 (V) $K_k$ ——可靠系数,取 1.3 $X'_d$ ——发电机超瞬变电抗 ( $\Omega$ ) $X_c$ ——系统电抗( $\Omega$ ) $I_c$ ——发电机额定电流(A) $K_A$ ——返回系数,取 0.85
带 时 限 过 电 流 保 护	整定值 $I_{dzj} = \frac{1.2 I_c}{K_A n_i}$	应比联在发 电机母线上的 直配线路 或升压变压 器等的保护 装置大一 级,一般为 0.5 ~ 2s	

电流速断保护的整定原则是:将过电流脱扣器的起动电流整定得大于母线短路时流过发电机开关的三相短路电流,使故

障发电机的电流速断保护动作将故障发电机切除,而其它发电机的电流速断保护不动作,从而保证了继电保护的选择性。

### 3. 电流速断保护装置灵敏度校验

(1) 按发电机母线两相短路情况校验:

$$K_m^{(2)} = K_{mzd} \frac{I_{d\cdot\min}^{(3)}}{I_{dz}} \geq 1.2$$

(2) 按发电机母线单相短路情况校验:

$$K_m^{(2)} = K_{mzd} \frac{I_{d\cdot\min}^{(3)}}{I_{dz}} \geq 1.2$$

上述两条需同时满足要求。

式中: $I_{dz}$ ——保护装置的一次动作电流(A),

$$I_{dz} = \frac{I_{dzj}n_l}{K_{jz}}$$

以上两式中的  $K_{mzd}$  分别对应于两相短路和单相短路时的相对灵敏系数,见表 8-7。

### 4. 注意事项

(1) 若发电机控制屏上采用的是 DW 自动空气开关,则因 DW 型自动空气开关的过电流脱扣器系直接起动式,短路电流直接流过脱扣器,故脱扣器起动电流可按计算电流速断保护所得电流整定值  $I_{dzj}$  整定。

(2) 采用 GL 型过电流继电器时,电流速断保护动作电流应整定为过电流保护的起动电流的 6 ~ 7 倍,以避免发电机外部短路时电流速断保护误动作。

## 第六节 移相电容器继电保护计算

### 一、移相电容器保护和接线方式

1. 移相电容器的接线方式和装置特点,见表 8-19



表 8—19 移相电容器的接线方式和装置特点

项目	线路图	配套装置及线路特点
<p>低压 △接法, 熔断器保护</p>		<p>QS——带熔断器的刀开关                      KM<sub>1</sub>、KM<sub>2</sub>——接触器触头                      R——切合电阻                      HL——放电装置(如白炽灯)                      TA——电流互感器                      C——电容器组</p> <p>合闸:先合 KM<sub>1</sub>,延时 0.2~0.5s 后合 KM<sub>2</sub>                      断开:先开 KM<sub>2</sub>,延时后再开 KM<sub>1</sub></p> <p>特点:可降低涌流;降低操作过电压;减轻接触器触头烧损。该线路常用于低压移相电容器装置</p>
<p>高压单 △接法, 单台熔断器保护</p>		<p>QF——断路器,可采取在断口上加并联电阻等限制过电压的措施,                      3~10kV 者可用真空开关</p> <p>L<sub>1</sub>——串联电抗器(谐波较大时安装)                      L<sub>2</sub>——放电装置(如电压互感器或电抗器)</p> <p>FU——快速熔断器</p> <p>特点:简单、经济、保护性能可靠。但当出现一线(设为 b)接地故障时,在 c 端发生电容器一极对壳击穿,熔断器不能防止外壳爆裂。该线路适用于容量较小的高压移相电容器装置。</p>

(续表)

项目	线路图	配套装置及线路特点
高压单Y接法，单台熔断器保护		<p><math>FU</math>——熔断器，要求对过电流反应较灵敏</p> <p><math>TA_2</math>——中性电流平衡保护用电流互感器</p> <p>特点：简单，较可靠。该线路也适用于容量较小的高压移相电容器装置</p>
高压双Y接法，中性电流平衡保护，并有单台熔断器保护		<p>特点：线路保护可调到使开关(<math>QF</math>)在电容器内部串联元件组完全击穿前或一相中的电容器串联组上电压超过限度时动作，为了防止电容器爆炸，仍采用单台熔断器保护。保护灵敏，缺点是一台电容器损坏时往往造成全组电容器退出运行。该线路适用于容量较大的高压移相电容器装置</p>
高压双△接法，横联差动保护		<p><math>TA_2</math>——电流互感器，横联差动保护用。电流互感器要用加强绝缘，以能耐受电容器切合时的过电压</p> <p>特点：和项4线路有相同的保护效果，但继电器反应灵敏较高。该线路能反应一台电容器中部分串联组(例如50~75%)击穿的故障，其缺点与项4相同，并且用的电流互感器较多</p>

## 2. 配套装置参数选择

(1) 开关或熔断器:所选择的开关要能断开电容器组回路而不重燃。开关重燃不但对电容器危害很大,而且对开关本身和系统中邻近的其它电器都有威胁。为此,低压移相电容器补偿装置中最好采用切合电阻;对于高压电容器组可采用在断口上带有并联电阻的断路器,其额定电流按电容器额定电流的 1.3 ~ 1.5 倍选取,同时需考虑承受接通时涌流的能力。

(2) 熔断器:其额定电压应不低于被保护电容器的电压,断流量不低于电容器的短路故障电流,熔断器的额定电流一般约为电容器额定电流的 1.5 ~ 2.5 倍。1.5 倍是考虑电容器的最大过电流允许不超过额定电流的即 1.43 倍;而较高的倍数是考虑涌流存在的情况。熔断器作单台保护时,可考虑能切断内部串联部分击穿的电容器。

(3) 切合电阻:对于低压移相电容器组,切合电阻为

$$R = (0.2 \sim 0.3)X_c$$

高压开关上的切合电阻或并联电阻为

$$R = (0.4 \sim 0.8)X_c$$

式中: $R$ ——电阻( $\Omega$ );

$X_c$ ——电容器组的容抗( $\Omega$ )。

电阻上的温度以不超过 150°C 为宜。

(4) 放电电阻和放电电抗器:见第 430 页电容测算和保护元件计算。

对于自动切换的电容器组,放电电阻按下式计算:

$$R = 0.38t/c$$

式中: $R$ ——放电电阻( $\Omega$ );

$t$ ——切合之间的最短间隔时间(s);

$C$ ——电容器组的电容(F)。

(5) 串联电抗器:主要用以抑制高次谐波电流及涌流。其感

抗和容量按下列公式选取：

$$X_L = (0.05 \sim 0.07)X_c, S_L = (0.05 \sim 0.07)Q_c$$

式中： $X_L$ ——电抗器感抗( $\Omega$ )；

$S_L$ ——电抗器容量(kVar)；

$X_c$ ——电容器组的容抗( $\Omega$ )；

$Q_c$ ——电容器组的容量(kVar)。

## 二、6 ~ 10kV 移相电容器继电保护计算

### 1. 6 ~ 10kV 移相电容器继电保护的选择

(1) 容量在 400kVar 及以下的电容器组，应采用带熔断器的负荷开关保护。

(2) 容量在 400kVar 以上的电容器组，应采用瞬时或短时限的过电流保护，动作于断路器跳闸。一般采用两相式。

(3) 当电容器安装在单独的或分组的绝缘支架上，或单相接地电流在 10A 以下时，可不装设单相接地保护。

(4) 当电压可能经常超过 110% 额定电压时，宜装过电压保护。

(5) 对电容器内部故障及其引出线上的短路，应采取下列保护之一：

① 将电容器分成几组，在每组上安装熔断器保护。当电容器台数不多时，也可在每台电容器上安装熔断器保护。

② 将电容器分成两组，装设横差保护。当电容器组按星形连接时，横差保护装在连接两个中性点的连线上；当电容器组按三角形连接时，横差保护装在每相中并联分支上。保护由电流继电器构成，动作于跳闸。

### 2. 移相电容器继电保护的整定(表 8—20)

表 8—20 6~10KV 移相电容器继电保护的整定计算

保护装置 的名称	保护装置的整定	保护装置 动作时限 (s)	备 注
瞬时或带 短时限过 电流保护	保护装置的動作電流整定值 $I_{dzj} = K_k K_{jx} \frac{I_{cs}}{n_l}$	可不帶時限 (瞬時) 或帶 短時限 0.1 ~ 0.2s	$K_k$ ——可靠係數, 取 2 ~ 2.5 $K_{jx}$ ——接線係數, 接于相電 流時取 1, 接于相電 流差時取 $\sqrt{3}$ $n_l$ ——電流互感器的變比 $I_{cs}$ ——電容器組的額定電流 (A) $I_{bp}$ ——最大不平衡電流(A) $Q$ ——單台電容器額定容量 (kVar) $\beta_c$ ——單台電容器元件击穿相 對數, 取 0.5 ~ 0.75 $I_{cs}$ ——電網的總單相接地電 容電流(A) $U_{cs}$ ——電容器額定電壓(kV) $U_{c2}$ ——電壓互感器二次額定 電壓, $U_{c2} = 100V$
橫聯差動 保護	整定值 按躲過正常時, 電 流互感器二次側差動回 路中的最大不平衡電流 整定 $I_{dzj} \geq K_k I_{bp}$ 按當單台電容器內 部 50 ~ 75% 串聯元件擊 穿時, 使保護裝置有一定 的靈敏係數, 即 $K_m \geq 1.5$ 的條件整定 $I_{dzj} \geq \frac{Q\beta_c}{U_{cs}(1-\beta_c)} \cdot \frac{1}{n_l K_m}$	0	
單相接地 保護	一次動作電流(按最小靈 敏係數 1.5 整定) $I_{dz} \leq \frac{I_{cs}}{1.5}$	0	
過電壓 保護	整定值 $U_{dzj} = 1.1 U_{c2}$	動作于信號時 為 0s; 動作 于跳閘時時限 為 3' ~ 5min	

### 3. 过电流保护灵敏度校验

$$K_m^{(2)} = K_{m.sd} \frac{I_{d.min}^{(3)}}{I_{dz}} \geq 1.5$$

式中： $I_{d.min}^{(3)}$ ——最小运行方式下，电容器组首端三相短路时流过保护安装处的超瞬变电流(A)；

其它符号同前。

### 4. 单台电容器的熔丝选择

$$\text{熔丝电流 } I_f = (1.3 \sim 1.5) I_{CD}$$

式中： $I_{CD}$ ——单台电容器电容电流(A)。

**例 8—6** 试选择 10kV、450kVar 移相电容器组的保护。已知电容器为 YY10.5—25—1 型，单台容量为 25kVar，共 18 台。电容器组额定电流  $I_N$  为 26A。最小运行方式下，电容器组首端三相短路超瞬变电流  $I_{d.min}^{(3)}$  为 1900A，10kV 电网的总单相接地电容电流  $I_{\Sigma}$  为 12A。

**解**

(1) 保护装置的选择：

① 装设两个 DL—11 型电流继电器和两个变比为 30/5 的电流互感器组成的无时限过电流保护。

② 装设零序电流互感器与之连接的电流继电器是电容器组成单相接地保护，作用于跳闸。

③ 装设 DJ—111 型电压继电器为过电压保护，作用于跳闸。

(2) 保护装置整定计算：

① 无时限过电流保护：动作电流应躲过电容器组接通电路时的冲击电流。

$$I_{dzj} = K_s K_{j'} \frac{I_N}{n_t} = 2 \times 1 \times \frac{26}{6} = 8.67(\text{A}), \text{取 } 9\text{A}$$

保护装置一次动作电流为

$$I_{dz} = I_{dzj} \frac{n_t}{K_{j'}} = 9 \times \frac{6}{1} = 54(\text{A})$$

灵敏度校验

$$K_m^{(2)} = K_{m,d} \frac{I_{d,\min}^{(3)}}{I_{dz}} = 0.87 \times \frac{1900}{54} = 30.6 > 1.5$$

② 单相接地保护:保护装置一次动作电流为

$$I_{dz} = \frac{I_{c\Sigma}}{K_m} = \frac{12}{1.5} = 8(\text{A})$$

动作电流满足 LX—2 型零序电流互感器及 DD—11/60 型继电器的灵敏系数  $K = 1.5$  的要求。

③ 过电压保护:保护装置动作电流为

$$I_{dzj} = 1.1 U_{c2} = 1.1 \times 100 = 110(\text{V})$$

延时 3 ~ 5min

### 第七节 工厂配用电低压自动开关保护计算

工厂配用电低压自动开关一般装设在低压总电源、变压器低压侧及配电线路电源侧,保护线路及配电设备。低压自动开关分非选择型和选择型两类见表 7—57。

#### 一、非选择型配用电自动开关的保护计算

非选择型自动开关只具有长延时和瞬时过电流脱扣器。瞬时过电流脱扣器作为线路的主保护,保护线路全长,它没有选择性。长延时过电流脱扣器作为后备保护,也可作为过负荷保护。

##### 1. 长延时动作电流整定值及灵敏度要求

分以下两情况:

(1) 当配电线路不存在威胁其绝缘的过电流时,长延时动作电流整定值应同时满足以下三个条件:

$$\textcircled{1} I_{dzj} \geq 1.1 I_{jr}$$

② 长延时过电流作为线路等的后备保护时

$$I_{dzj} \leq 1.1 I_l$$

③ 选择性要求



$$I_{dzj} \geq 1.2I'_{dzj}$$

式中： $I_{dzj}$ ——动作电流整定值(A)；

$I_{jr}$ ——被保护线路等的计算电流(A)；

$I_l$ ——线路等的允许载流量(A)；

$I_{dzj}$ ——下一级长延时最大整定动作电流(A)。

(2) 当配电线路存在威胁其绝缘的过电流时：长延时自动开关主要用作为过负荷保护，其动作电流整定值应同时满足以下三个条件

① 过负荷要求

$$I_{dz} \leq (0.1 \sim 1)I_l$$

②  $I_l \geq 1.37I_{js}$

③ 选择性要求

$$I_{dzj} \geq 1.2I'_{dzj}$$

式中：符号同前。

满足上述条件，就能保证长延时自动开关达到保护线路等的绝缘，又在正常负荷运行时不发生误动作。

(3) 灵敏度校验：

① 长延时自动开关仅作为线路等过负荷保护时，不必校验灵敏度。

② 当瞬时过电流保护的灵敏度不够(不能保护线路全长)，利用长延时电流脱扣器作该线路短路的后备保护时，其灵敏度应同时满足以下三个要求：

a. 被保护线路末端短路时应可靠动作

$$K_m = \frac{I_{d,\min}}{I_{dz}} \geq 1.5$$

式中： $I_{d,\min}$ ——被保护线路末端最小短路电流(A)，对于中性点接地系统，取单相接地短路电流；对于中性点不接地系统，取两相短路电流。



b. 长延时过电流保护作为下一级重要线路短路后备保护时

$$K_m^{(3)} = \frac{I_{d \cdot \min}^{(3)}}{I_{dz}} \geq 1.5$$

式中： $I_{d \cdot \min}^{(3)}$ ——被保护的下一级重要线路末端在最小运行方式下的三相短路电流(A)。

c. 为保证人身和设备安全，长延时自动开关作短路后备保护时，其动作时间不应大于 15s。

实践表明当满足 c. 要求时，灵敏度肯定能满足。

### 2. 瞬时光流动作整定值及灵敏度要求

(1) 瞬时光流动作整定值应躲过线路等的尖峰电流：

$$I_{dz} \geq 1.1(I_{jx} + k_1 k I_{edm})$$

式中： $I_{jx}$ ——除最大一台电动机外的线路计算电流(A)；

$I_{edm}$ ——最大一台电动机的额定电流(A)；

$k_1$ ——电动机起动电流的冲击系数，取 1.7 ~ 2；

$k$ ——电动机的起动电流倍数。

### 2. 灵敏度校验

$$K_m = \frac{I_{d \cdot \min}}{I_{dz}} \geq 1.5$$

若瞬时光动作灵敏度不能满足上式要求时，可采取以下措施：

- ① 由低压自动开关的长延时过电流脱扣器作短路后备保护，其动作时间不大于 15s；
- ② 加零序保护；
- ③ 改用选择型自动开关。

## 二、选择型配用电自动开关的保护计算

选择型配用电自动开关具有短延时、瞬时(有的还有长延时)过电流脱扣器。因此用它作为线路等保护时，能保证有良好的选择性，且当线路末端发生短路时，能可靠动作。

### 1. 长延时动作电流整定值计算

计算方法与非选择型自动开关相同。

### 2. 短延时动作电流整定值及灵敏度校验

(1) 动作电流整定值:短延时动作电流整定值应满足以下要求:

① 应躲过回路尖峰电流

$$I_{dz} \geq 1.1(I_{jx} + 1.35kI_{cdm})$$

式中:符号同前。

② 当相邻负荷侧采用非选择型自动开关,且瞬时动作灵敏度不够时,为保证选择性动作,电源侧自动开关的短延时过电流整定值要满足:

$$I_{dz} \geq 1.2I_{dx}$$

式中: $I_{dx}$ ——负荷侧自动开关瞬时电流整定值(A)。

(2) 灵敏度校验:

$$K_n = \frac{I_{d \cdot \min}}{I_{dz}} \geq 1.5$$

式中:符号同前。

### 3. 瞬时动作电流整定值计算

瞬时动作电流整定值应满足以下二个条件,并取其中最大值。

(1) 应躲过回路尖峰电流:

$$I_{dz} \geq 1.1(I_{jx} + k_1 k I_{cdm})$$

式中:符号同前。

(2) 应躲过相邻负荷侧自动开关出线端最大三相短路电流:

$$I_{dz} \geq 1.1I_{d \cdot \max}^{(3)}$$

式中: $I_{d \cdot \max}^{(3)}$ ——相邻负荷侧自动开关出线端最大三相短路电流(A)。

---

---

## 第九章 电焊机

### 第一节 基础知识及计算

#### 一、弧焊机的基本计算

##### 1. 弧焊机一般参数及功率因数计算

弧焊机除有与一般电机、变压器相同的参数(如输入功率、效率等)外,还有下列参数:

(1) 空载电压  $U_0$ : 对手工弧焊机规定为: 弧焊变压器空载电压  $U_0 \leq 80\text{V}$ , 弧焊整流器空载电压  $U_0 \leq 90\text{V}$ , 直流弧焊发电机空载电压  $U_0 \leq 100\text{V}$ (单头) 或  $U_0 = 60\text{V}$ (多头)。

(2) 工作电压  $U_g$ : 指弧焊机在焊接电弧燃烧时(或在规定负载特性条件下)的输出端电压。对下降特性电源, 规定负载特性可用  $U = 20 + 0.04I$  ( $I > 600\text{A}$  时, 取  $U = 44\text{V}$ ) 表示; 对单头平特性电源可用  $U = 14 + 0.05I$  ( $I > 600\text{A}$  时, 取  $U = 44\text{V}$ ) 表示。

(3) 额定焊接电流  $I_r$ : 指弧焊机在额定工作条件下运行时, 能符合标准规定(如温升限度、电流稳定性等)而输出的电流。

(4) 额定工作电压  $U_{gr}$ : 指与额定焊接电流相应的工作电压。

(5) 最大焊接电流  $I_{h,\max}$ : 指弧焊机通过调节所允许输出的、与工作电压相应的最大电流。

(6) 最小焊接电流  $I_{h,\min}$ : 指弧焊机通过调节所能输出的、与工作电压相应的最小电流。

(7) 电流调节范围:指弧焊机在工作电压符合规定负载特性条件下,能够调节获得的焊接电流范围,以最大和最小焊接电流对额定电流之比表示:

$$I_{h,\max}/I_e \geq 1.2, \quad I_{h,\min}/I_e \leq 0.25$$

(8) 最大工作电压  $U_{g,\max}$ :指弧焊机通过调节所能输出的、与规定负载特性相应的最大电压。

(9) 最小工作电压  $U_{g,\min}$ :指弧焊机通过调节所能输出的、与规定负载特性相应的最小电压。

(10) 工作电压调节范围:指弧焊机在焊接电流符合规定负载特性条件下,能够调节获得的电压范围。

(11) 连续焊接电流  $I_L$ :指弧焊机能够以恒载连续工作方式运行的电流,此时电流温升不超过标准的规定。

(12) 负载持续率(又称暂载率)FZ:

$$FZ = \frac{t}{T} \times 100\%$$

式中: $t$ ——焊机工作时间;

$T$ ——整个周期(工作和休止时间之和),与  $t$  同单位。

我国规定:一般手工交流弧焊机  $T = 5\text{min}$ ,自动埋弧焊机等  $T = 10\text{min}$ ,一般接触焊机  $T = 1\text{min}$

① 一般电焊机如作为连续通电使用,可以用降低容量的办法按下式近似计算:

$$S_{100} = \sqrt{FZ_e} \cdot S_e$$

式中: $S_{100}$ ——电焊机连续通电使用时的容量(KVA);

$FZ_e$ ——电焊机额定负载持续率(%);

$S_e$ ——电焊机额定容量(KVA)。

例如,一台容量为 100KVA、额定负载持续率为 60% 的交流弧焊机,当以很长时间通电使用时,应按容量  $S = \sqrt{60\%} \times 100 \approx 77.5(\text{KVA})$  使用。

② 在某一负载持续率  $FZ$  下允许的焊接电流  $I_h$ , 可按下式近似计算:

$$I_h = \sqrt{FZ_c / FZ} \cdot I_{2c}$$

式中:  $I_{2c}$ ——电焊机额定焊接电流, 即电焊机次级电流(A)。

当连续焊接时  $I_h = \sqrt{FZ_c} \cdot I_{2c}$

③ 弧焊变压器的功率因数:

$$\cos\varphi \approx \frac{0.9U_g}{U_0\eta}$$

式中:  $\eta$ ——弧焊变压器的效率;

其它符号同前。

## 2. 电阻焊机焊接回路短路阻抗的估算

交流工频电阻焊机的焊接回路短路阻抗  $Z_{hd}$

$$Z_{hd} = \sqrt{X_{hd}^2 + R_{hd}^2}$$

式中:  $X_{hd}$ ——焊接回路短路时感抗( $\Omega$ );

$R_{hd}$ ——焊接回路短路时电阻( $\Omega$ )。

估计值:  $Z_{hd} = 150 \sim 400\mu\Omega$

$$X_{hd} = 120 \sim 400\mu\Omega$$

$$R_{hd} = 60 \sim 150\mu\Omega$$

焊接回路短路感抗  $X_{hd}$  为阻焊变压器漏抗及回路感抗之和, 其值可按图 9—1 所示的曲线估算。

焊接回路短路电阻  $R_{hd}$  为阻焊变压器内阻及回路中其它组件的电阻(包括接触电阻在内)之和。

焊接回路组件的导电截面, 可按表 9—1 的推荐电流密度来确定。截面确定后, 便可求得电阻值。考虑 50Hz 时的集肤效应, 其阻值约增加 20 ~ 70%。

接头的接触电阻与材料性质有关, 一般估计: 固定接触为 2 ~ 10 $\mu\Omega$ , 滑动接触为 20 $\mu\Omega$

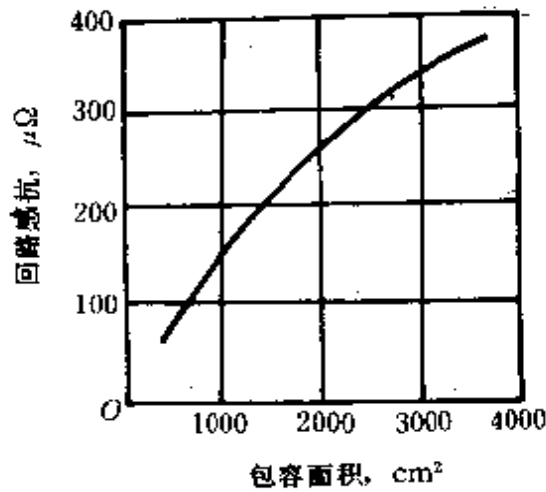


图 9—1 回路感抗和包容面积的关系(交流工频电阻焊机)

表 9 -1 焊接回路组件允许的电流密度

组件名称	材 料	冷却条件	允许的电流密度 (A/mm <sup>2</sup> )
电 极	铜、铜合金	强迫水冷	20 ~ 50
电极握杆	青 铜	强迫水冷	10 ~ 20
	黄 铜		8 ~ 12
电极臂、夹头、平板	铜	空 冷	1.4 ~ 2.2
		水 冷	2 ~ 3
	铜合金	空 冷	1.4 ~ 1.6
	铝		1.2 ~ 2
软连接线	铜电缆、紫铜带	空 冷	2.5 ~ 3
		接头处水冷	2.5 ~ 4
固定接触点	铜和其它材料	—	0.5 ~ 1
滑动接触点		水 冷	0.5 ~ 1
		水中工作	~ 12

## 二、电焊机熔敷金属量、有效能及效率计算

### 1. 熔敷金属量

$$m_i = \alpha It = m \left( \frac{1}{1 + K_b} \right) (1 - \zeta)(1 - \psi)$$

式中： $m_i$ ——焊接期间，熔敷到焊缝金属中的焊条金属质量(kg)；

$\alpha$ ——焊条焊芯的熔敷系数，即每1Ah能熔敷到焊缝中的焊芯质量(kg/Ah)；

$t$ ——焊接时间(h)；

$I$ ——焊接电流(A)；

$m$ ——焊接期间，焊条消耗质量(kg)；

其它符号见下述。

### 2. 损失系数

$$\psi = \Delta m / m_h$$

式中： $\Delta m$ ——焊接期间，金属蒸发、氧化和飞溅损失的焊条金属质量(kg)；

$m_h$ ——焊接期间，熔化的焊芯金属质量(kg)。

损失系数 $\psi$ ，对于结422焊条为0.0391；对于结507焊条为0.026。

### 3. 有效利用电流

$$I_{\text{有效}} = I(1 - \psi)$$

### 4. 药皮的质量系数

$$K_b = m_b / m_x$$

式中： $m_b$ ——药皮的质量(kg)；

$m_x$ ——电焊条的金属焊芯质量(kg)。

5. 焊芯丢失系数(即丢弃焊芯端头的丢失系数)

$$\zeta = \Delta m' / m_x$$

式中:  $\Delta m'$  —— 焊接期间, 丢弃的焊芯端头(kg)。

$K_b, \zeta$  可以实测, 为此, 令

$$K_l = \left( \frac{1}{1 + K_b} \right) (1 - \zeta)$$

式中:  $K_l$  —— 实测得的焊条利用系数。

则 
$$I_{yx} = \frac{m K_l (1 - \psi)^2}{\alpha t}$$

熔敷系数与电流对焊条的熔化系数之间有如下关系:

$$\alpha_h = \frac{\alpha}{1 - \psi}$$

式中:  $\alpha_h$  —— 电流对焊芯的熔化系数(kg/Ah), 参见表 9-2 和表 9-3;

$\alpha$  —— 熔敷系数(kg/Ah)。

6. 电焊机的有效电功率、有效电能和效率

$$P_{yx} = \frac{m K_l (1 - \psi) U_2 \cos \varphi}{\alpha_h t}$$

$$A_{yx} = \frac{m K_l (1 - \psi) U_2 \cos \varphi}{\alpha_h}$$

$$\eta = \frac{A_{yx}}{A_z} \times 100\%$$

式中:  $P_{yx}$  —— 电焊机有效电功率(W);

$A_{yx}$  —— 电焊机有效电能(Wh);

$\eta$  —— 效率;

$U_2$  —— 电焊机焊接时二次电压(V);

$\cos \varphi$  —— 电焊机焊接时一次侧功率因数;

$A_z$  —— 耗电量(Wh)。



表 9—2 焊芯的熔化系数  $\alpha_h$  值 (结 507 焊条)

序号	厂家名称	$\alpha_h$ (kg/Ah)	序号	厂家名称	$\alpha_h$ (kg/Ah)
1	宜昌电焊条厂	0.00844	8	上海电焊条厂	0.00721
2	自贡电焊条厂	0.00750	9	株洲电焊条厂	0.00794
3	集宁电焊条厂	0.00770	10	西安电焊条厂	0.00742
4	泰州电焊条厂	0.00727	11	沈阳电焊条厂	0.00849
5	电力电焊条厂	0.00774	12	兰州电焊条厂	0.00823
6	锦州电焊条厂	0.00736	13	东风电焊条厂	0.00832
7	常州电焊条厂	0.00787			

表 9—3 焊芯的熔化系数  $ah$  值(结 422 焊条)

序号	厂家名称	$ah$ (kg/Ab)	序号	厂家名称	$ah$ (kg/Ab)
1	锦州电焊条厂	0.00854	25	淄博电焊条厂	0.00768
2	天关电焊条厂	0.00834	26	厦门电焊条厂	0.00812
3	韶关电焊条厂	0.00860	27	贵阳电焊条厂	0.00796
4	辽源电焊条厂	0.00843	28	郑州电焊条厂	0.00774
5	西宁电焊条厂	0.00812	29	兰州电焊条厂	0.00815
6	合肥电焊条厂	0.00825	30	抚顺电焊条厂	0.00798
7	萍乡电焊条厂	0.00833	31	丹东电焊条厂	0.00841
8	天津电焊条厂(MT — 20)	0.00845	32	宝鸡电焊条厂	0.00814
9	银川电焊条厂	0.00753	33	宜昌电焊条厂	0.00816
10	西安电焊条厂	0.00862	34	南京电焊条厂	0.00843
11	广州电焊条厂	0.00790	35	电力电焊条厂	0.00871
12	大同电焊条厂	0.00782	36	泰州电焊条厂	0.00807
13	北京电焊条厂	0.00809	37	哈尔滨电焊条 厂	0.00805
14	上饶电焊条厂	0.00801	38	株洲电焊条厂	0.00855
15	天津电焊条厂	0.00820	39	石家庄电焊条 厂	0.00807
16	青岛电焊条厂	0.00817	40	桂林电焊条厂	0.00836
17	牡丹江电焊条厂	0.00771	41	哈反帝电焊条 厂	0.00795
18	保定电焊条厂	0.00769	42	集宁电焊条厂	0.00842
19	上海电焊条厂	0.00831	43	长春电焊条厂	0.00787
20	成都电焊条厂	0.00857	44	洛阳电焊条厂	0.00809
21	长治电焊条厂	0.00797	45	邢台电焊条厂	0.00869
22	常州电焊条厂	0.00803	46	自贡电焊条厂	0.00852
23	东风电焊条厂	0.00782	47	福州电焊条厂	0.00836
24	杭州电焊条厂	0.00781	48	沈阳电焊条厂	0.00817

### 三、电焊机耗电量计算

电焊机熔化金属的单位耗电量可按下式计算：

$$A = \frac{CU_{21}}{k\eta}$$

式中： $A$ ——单位耗电量(kwh/kg)；

$U_{21}$ ——电焊机次级电弧电压(V)；

$C$ ——考虑供电电源空载损失的系数，对交流电源通过变压器对焊机供电的场合和出现空载就断开电源的场合， $C = 1$ ；对于直流电源供电的场合， $C = 1.17$ ；

$\eta$ ——供电电源的效率(取负载情况下的平均值)；

$k$ ——焊接系数，当采用厚涂料焊条在交流电源下焊接时， $k = 6 \sim 18$ ；当采用焊剂进行自动焊接时， $k = 11 \sim 24$ 。

表 9—4 列出了手工电弧焊和电弧堆焊时每 kg 熔敷金属的耗电量。其中直流电弧焊的单位耗电量是在采用直流弧焊发电机的条件下得出的。当用整流式直流弧焊机时，由于整流器效率高，单位耗电量和空载功率都降低。表 9—5 列出了电阻焊的各种过程的单位耗电量，供参考。

表 9—4 电焊机的单位耗电量

电流种类和电焊方法	单位耗电量(kWh/kg)
交流手工电弧焊	
单相制	3.5 ~ 3.8
三相制	2.65 ~ 3.0
采用焊剂的自动电弧焊和半自动电弧焊	2.8 ~ 3.5
电弧堆焊	1.8 ~ 2.4
直流手工电弧焊	
单头焊	5.0 ~ 6.5
多头焊	8.0 ~ 9.0
采用焊剂的自动电弧焊和半自动电弧焊	4.2 ~ 6.0
二氧化碳保护自动电焊和半自动电焊	2.2 ~ 3.2

表 9-5 电阻焊的单位耗电量

闪光对焊			
焊接处的横截面积 (mm <sup>2</sup> )	一个对焊点的耗电量 (kWh)	焊接处的横截面积 (mm <sup>2</sup> )	一个对焊点的耗电量 (kWh)
100	0.024	1000	0.4
200	0.06	1500	0.825
300	0.06	2000	1.275
500	0.125	2500	1.725

自动焊机点焊			
被焊接板的总厚度 (mm)	100个焊点的耗电量 (kWh)	被焊接板的总厚度 (mm)	100个焊点的耗电量 (kWh)
2	0.04	8	0.23
4	0.08	10	0.38
6	0.13	12	0.62

酸洗钢缝焊			
被焊接板的总厚度 (mm)	m 焊缝的耗电量 (kWh)	被焊接板的总厚度 (mm)	m 焊缝的耗电量 (kWh)
0.5	0.04 ~ 0.08	2	0.12 ~ 0.24
1.0	0.08 ~ 0.14	3	0.25 ~ 0.5
1.5	0.1 ~ 0.2	4	0.5 ~ 1.0

## 第二节 电焊机选择

### 一、弧焊机的性能、特点

#### 1. 常用弧焊机的特点和适用范围(表 9—6)

表 9--6 常用弧焊机的特点和适用范围

电源类型	弧焊变压器	弧焊整流器	弧焊发电机
输出及电弧特点	<p>输出为交流的下降外特性。</p> <p>电弧的稳定性较差,但磁偏吹<sup>②</sup>现象很少产生</p>	<p>输出为直流或直流脉冲,其外特性可以是平的或下降的。</p> <p>有磁偏吹现象</p>	<p>输出为直流<sup>③</sup>,其外特性可以是平的或下降的。磁偏吹现象较明显</p>
运行特点	<p>大多接单相电网,功率因数较低,空载损耗小,噪声较小,维修简单</p>	<p>大多接三相电网,空载损耗较小,维修比弧焊变压器复杂</p>	<p>大多接三相<sup>③</sup>电网,空载损耗较大,维修比弧焊变压器复杂</p>
适用范围	<p>一般焊接结构的手工电弧焊(常使用酸性焊条)。铝合金的钨极氩弧焊。</p> <p>埋弧焊</p>	<p>较重要焊接结构的手工电弧焊(常使用碱性焊条)。</p> <p>各种埋弧焊及气体保护弧焊</p>	

注:

① 也曾制造过交流增频( $f = 200 \sim 400\text{Hz}$ )输出。

② 指电弧受电磁力影响所产生的偏移。

③ 这里指电动发电机型式。

2. 常用弧焊机的性能数据(见表 9—7 ~ 表 9—10)

表 9—7 BXI 系列的性能数据

项 目		单位	技术规格						
输 出	型 号		BX1 — 300			BX1 — 135			
	额定工作电压	V	30			30			
	额定暂载率	%	65			65			
	额定焊接电流	A	330			135			
	接 法		I	I	I	I			
	空载电压	V	70	60	75	60			
	焊接电流调节范围	A	50 ~ 180	160 ~ 450	25 ~ 85	50 ~ 150			
不 同 暂 载 率 下 参 数 变 动	暂载率	%	100	65	35	100	65	50	
	焊接电流	A	265	330	450	110	135	150	
	输入容量	kVA	17	21	28	7.2	8.7	10.3	
	输入 电 流	220V	A	78	95	128	33	41	47
		380V	A	45	56	74	19	23.5	27
		440V	A	40	50	66	16.2	19.8	23.4
输 入	电源电压	V	220, 380 或 440			380 或 220			
	相 数		1			1			
	频 率	Hz	50			50			
效 率		%	80			78			
功率因数			0.5			0.58			
重 量		kg	185			100			
外形尺寸(长 × 宽 × 高)		mm	870 × 530 × 790			680 × 480 × 580			

表 9--8 BX2 系列的性能数据

项 目		单 位	技 术 规 格												
输 出	型号		BX2 - 500			BX2 - 700			BX2 - 1000			BX2 - 2000			
	额定工作电压	V	45.5			43			42			50			
	额定暂载率	%	60			60			60			50			
	额定焊接电流	A	500			700			1000			2000			
	空载电压	接法 I V	80				72			69			72		
		接法 II V					80			78			84		
	工作电压范围	V	32 ~ 50			31.75 ~ 43			30 ~ 46			30 ~ 52.5			
焊接电流调节范围	A	200 ~ 600			250 ~ 900			400 ~ 1200			800 ~ 2200				
不 同 暂 载 率 下 参 数 变 动	暂载率	%	100	60	42	100	60	35	100	60	42	100	50	40	
	焊接电流	A	390	500	600	542	700	900	775	1000	1200	1400	2000	2200	
	输入电流	220V	A	155	190	228	200	254	325	260	336	400			
		380V	A	88.5	110	132	116	147	188	150	194	232	330	450	490
输入容量	kVA		42			56			76			170			
入	电源电压	V	220 或 380			220 或 380			220 或 380			380			
	相 数		1			1			1			1			
	频 率	Hz	50			50			50			50			
效 率		87			87			90			89				
功率因数		0.62			0.62			0.62			0.69				
重 量	kg	445			500			560			690				
外形尺寸 (长×宽×高)	mm	950 × 818 × 1215			950 × 818 × 1215			950 × 818 × 1215			1020 × 814 × 1260				

表 9-9 直流弧焊机的性能数据

项 目		单 位		技 术 规 格								
发 电 机	型号			AX - 320 (AT - 320)			AX1 - 500 (AB - 500)		AX - 165 (AB - 165)			
	工作电压	V		最大 30			最大 40		25 ~ 35			
	空载电压	V		50 ~ 80			60 ~ 90		最大 80			
	电流调节 范围	A		45 ~ 320			120 ~ 600		45 ~ 375			
	转速	r/min		1450			1450		2900			
	暂载率	%		100	75	50	100	65	100	60	35	
	焊接电流	A		250	280	320	400	500	230	300	375	
	功率	kW		7.5	8.4	9.6	16	20	3.9		5	
电 动 机	功率	kW		14		14		26	26	6		6
	电压	V		220/380		380/660		220/ 380	380/ 660	220/380		380/660
	相数			3		3		3	3	3		3
	转速	r/min		1450		1450		1450	1450	2900		2900
	电流	A		47.8/ 27.6	27.6/ 15.95	88.2/ 50.9	50.9/ 29.4	21.4/ 12.4	12.4/ 7.16			
	频率	Hz		50		50		50	50	50		50



第二节 电焊机选择

(续表)

项 目		单 位	技 术 规 格							
发 电 机	型号		AR - 300			AX3 - 300 - 2 (AG300 - 1)			ZHJ - 300	
	工作电压	V	25 ~ 35			25 ~ 30			30	
	空载电压	V	最大 85			最大 68			62 ~ 75	
	电流调节范围	A	45 ~ 375			35 ~ 375			45 ~ 300	
	转速	r/min	2900			2900			1450	
	暂载率	%	100	60	35	100	65	35	65	50
	焊接电流	A	230	300	375	230	300	375	280	300
功率	kW									
电 动 机	功率	kW	10			10	10		13	
	电压	V	380			220/380	380/660		380	
	相数		3			3	3		3	
	转速	r/min	2900			2900	2900		1450	
	电流	A	20.8			36/20.8	20.8/12		28	
	频率	Hz	50			50	50		50	

表 9—10 ZXG 系列弧焊机的性能数据

项 目		单 位	技 术 规 格			
型 号			ZXG -- 200	ZXG — 300	ZXG — 500	
空载电压		V	70	70	70	
工作电压		V	25 ~ 30	25 ~ 30	25 ~ 40	
输 出	额定焊接电流	A	200	300	500	
	焊接电流 调节范围	A	10 ~ 200	15 ~ 300	25 ~ 500	
	额定暂 载率	%	60	60	60	
	各暂载 率下的 焊接电 流	100%	A	155	230	387
		60%	A	200	300	500
电 源 电 压		V	380	380	380	
输 入	相 数		3	3	3	
	频 率	Hz	50	50	50	
	额定输入电流	A	23.6	32	58	
	额定输入容量	kVA	15.55	21	38	
	重 量	kg	170	220	325	
外形尺寸 (长 × 宽 × 高)		mm	560 × 410 × 820	600 × 440 × 940	650 × 500 × 1020	

## 二、电焊机电源容量计算

对于电阻焊机,其电源容量应考虑焊接时所造成的电压降及变压器温升等因素。

### 1. 单台电阻焊机所需电源容量

$$S = S_a$$

式中: $S$ ——电源容量(kVA);

$S_a$ ——一台电阻焊机的容量(kVA)。

### 2. 多台同规格的电阻焊机所需电源容量

由以下两式计算值中取大者

$$S_r = \sqrt{nFZ} \sqrt{1 - (n-1)FZ} \cdot S_{ap}$$

$$S_v = \frac{4U_d\%}{\Delta U\%} \sqrt{nFZ} \cdot S_{ap}$$

式中: $S_r$ ——由温升决定的容量(kVA);

$S_v$ ——由电压降限制所决定的容量(kVA);

$S_{ap}$ ——每台焊机实际使用时的平均输入视在功率(kVA);

$n$ ——电焊机台数;

$FZ$ ——负载持续率(%),计算方法与交流弧焊机相同;

$U_d\%$ ——变压器的阻抗电压百分数,可由产品目录查得;

$\Delta U\%$ ——使用状态下变压器允许的电压降百分数。高、低压侧及变压器内部压降之和不超过10%时,可取4~8。

一般情况下,大多数电阻焊机的  $S_r < S_v$ ,因此在选用电源及导线时,可不必按  $S_r$  而只用  $S_v$  作为基准。

## 三、阻焊变压器的设计程序及参数确定

1. 根据焊件的厚度或截面和焊接工艺要求,确定所需的额定焊接电流  $I_r$ 。

2. 由所焊工件大小及焊机结构,按图 9—1 曲线求得焊接回路的感抗,再加上阻焊变压器的漏抗,得短路总感抗  $X_{hd}$ 。

### 3. 计算额定次级电压

$$U_{2e} = I_e \sqrt{X_{hd}^2 + (R_{hd} + r_g)^2}$$

式中： $U_{2e}$ ——额定次级电压(V)；

$I_e$ ——额定焊接电流(A)。

$r_g$ ——工件电阻( $\Omega$ )。

### 4. 确定额定初级容量

$$P_{se} = (1.02 \sim 1.05) I_e U_{2e}$$

式中： $P_{se}$ ——额定初级容量(VA)。

5. 确定变压器的额定负载持续率  $FZ_e$ 。通常点、凸、对焊机取 20%，缝焊机取 50%，从而求得次级连续电流  $I_{2ex}$  和初级连续电流  $I_{1ex}$ 。

$$I_{2ex} = I_e \sqrt{FZ_e}, \quad I_{1ex} = \frac{P_{se}}{U - U_y} \sqrt{FZ_e}$$

式中： $FZ_e$ ——焊机的额定负载持续率；

$U$ ——电网电压(V)；

$U_y$ ——初级主回路中引燃管或硅闸管压降(V)。

### 6. 确定次级线圈匝数

次级线圈一般为一匝，但 5kVA 以下变压器及其它特殊焊机的变压器，为缩小铁芯尺寸常超过一匝。

### 7. 铁芯截面的选择

$$S = \frac{U_{2e} \times 10^4}{4.44 f B_m W_2}$$

式中： $S$ ——铁芯截面( $\text{cm}^2$ )；

$f$ ——电源频率(Hz)；

$B_m$ ——磁通密度(T)；

$W_2$ ——次级匝数。

### 8. 电流密度的选择

(1) 初级电流密度：当次级线圈为外焊铜管水冷式时，选用

2 ~ 3A/mm<sup>2</sup>; 当次级线圈直接用水冷铜管时, 选用 4 ~ 5A/mm<sup>2</sup>。

(2) 次级电流密度: 相应上述两种情况, 分别选用 3 ~ 5A/mm<sup>2</sup> 和 10 ~ 14A/mm<sup>2</sup>。

由上述选择可确定初、次级铜线截面。

9. 有了上述各参数, 便可按一般变压器的设计方法进行计算和安排。

10. 最后校验励磁电流、初级电阻、次级电阻、温升及重量是否符合要求。

### 第三节 电焊机运行

#### 一、电焊机电源干线计算工作电流及熔断器与电缆的选择

##### 1. 电焊机电源干线计算工作电流的计算

(1) 单相单台电焊机回路计算工作电流:

$$I_{\mu} = \frac{S_c}{U_c} \sqrt{FZ} \times 10^3 = I_c \sqrt{FZ} = I_{100}$$

$$S_c = P_c / \cos\varphi$$

式中:  $I_{\mu}$ ——电焊机回路计算电流(A);

$S_c$ ——额定功率(kW);

$P_c$ ——额定功率(kW);

$\cos\varphi$ ——功率因数, 可取 0.5;

$U_c$ ——额定电压(V);

$FZ$ ——负荷持续率;

$I_c, I_{100}$ —— $FZ$  为 65% 和 100% 时的焊机初级电流(A)。

(2) 多台焊机接于单相回路时的计算工作电流

$$I_{\mu} = K_x \sum \frac{S_c \sqrt{FZ}}{U_c} \times 10^3 = K_x \sum I_c \sqrt{FZ} = K_x I_{\mu}$$

式中:  $K_x$ ——需要系数, 二台焊机取 0.65, 三台及以上取 0.35;

$I_m$ ——尖峰电流(A)。

若由上式所得的电流小于其中一台最大焊机电流时,则以最大一台焊机电流作为回路计算工作电流。

(3) 在三相供电回路的二相或三相上分别连接单相电焊机馈电干线的计算工作电流  $I_{js}$ 。

① 三相负荷平衡时:

$$I_{js} = \frac{K_x \Sigma S_e \sqrt{FZ}}{\sqrt{3} U_e} \times 10^3 = \frac{K_x \Sigma P_e \sqrt{FZ}}{\sqrt{3} U_e \cos \varphi} \times 10^3$$

$$= \frac{K_x \Sigma I_e \sqrt{FZ}}{\sqrt{3}}$$

式中:  $\Sigma S_e$ 、 $\Sigma P_e$  —— 接于三相的总负荷和总功率(kVA、kW);

$\Sigma I_e$  —— 各电焊机负荷电流之和(A);

$K_x \cos \varphi$  —— 同前。

② 三相负荷不平衡时: 取  $I_A$ 、 $I_B$ 、 $I_C$  中最大的电流值作计算电流:

$$I_A = K_{xA} \sqrt{I_{AB}^2 + I_{CA}^2 + I_{AB} I_{CA}} = K_{xA} I_{mA}$$

$$I_B = K_{xB} \sqrt{I_{AB}^2 + I_{BC}^2 + I_{AB} I_{BC}} = K_{xB} I_{mB}$$

$$I_C = K_{xC} \sqrt{I_{CA}^2 + I_{BC}^2 + I_{CA} I_{BC}} = K_{xC} I_{mC}$$

式中:  $I_{AB}$ 、 $I_{BC}$ 、 $I_{CA}$  —— 分别为跨接于 AB、BC、CA 相间的电焊机负荷电流之和(A);

$K_{xA}$ 、 $K_{xB}$ 、 $K_{xC}$  —— 分别为各相电流的需要系数, 当一相接一台焊机时  $K_x = 1$ 、接二台焊机时  $K_x = 0.65$ 、接三台焊机时  $K_x = 0.35$ ;

$I_{mA}$ 、 $I_{mB}$ 、 $I_{mC}$  —— 分别为各相负荷的尖峰电流(A)。

## 2. 熔断器选择

(1) 单台电焊机回路:

$$I_{er} \geq K_e K_m I_{js}$$

式中： $I_{er}$ ——熔体额定电流(A)；

$K_e$ ——安全系数，取 1.1；

$K_m$ ——负荷尖峰系数，取 1.1；

$I_p$ ——计算工作电流(A)。

(2) 多台电焊机回路：

$$I_{er} \geq I_m/2$$

### 3. 电缆选择

(1) 按发热条件选择：

$$I_p \leq I_{ux}$$

式中： $I_{ux}$ ——电缆允许工作电流(A)。

(2) 按电压损失校验：要求电压损失不超过 10%

$$\text{单相回路 } \Delta U \% = \frac{2I_p l}{U_e} (R_0 \cos \varphi + X_0 \sin \varphi) \times 100$$

$$\text{三相回路 } \Delta U \% = \frac{\sqrt{3} I_p l}{U_e} (R_0 \cos \varphi + X_0 \sin \varphi) \times 100$$

式中： $l$ ——电焊机回路线路长度(m)；

$R_0, x_0$ ——电焊机回路线路每米电阻和电抗( $\Omega/m$ )。

电焊机初级电缆的选择：初级电缆一般采用 500V 单芯或多芯橡皮软线，如 YHC 型、BXR 型。对于一般长度的单芯电缆，电流密度可取 5 ~ 10A/mm<sup>2</sup>。如用三芯或敷设在管道内或长度较大时，可取 3 ~ 6A/mm<sup>2</sup>。当然还要满足上面的计算条件。为了节电，电流密度应尽可能取得小一些。

电焊机次级电缆的选择：次级电缆可采用 YHH 型电焊皮套电缆及 YHHR 型特软电缆。20m 以下时，电流密度可取 4 ~ 10A/mm<sup>2</sup>。一般，要求焊接回路导线压降应小于 4V，即约小于电焊机次级电弧电压的 10%。当然为了节电，应尽可能使该压降小些。

焊接导线的截面与电流、长度的关系见表 9—11。

表 9—11 焊接导线截面与电流、导线长度的关系

截面(mm <sup>2</sup> )	导线长度(m)								
	20	30	40	50	60	70	80	90	100
100	25	25	25	25	25	25	25	28	35
150	35	35	35	35	50	50	60	70	70
200	35	35	35	50	60	70	70	70	70
300	35	50	60	60	70	70	70	85	85
400	35	50	60	70	85	85	85	95	95
500	50	60	70	85	95	95	95	120	120
600	60	70	85	85	95	95	120	120	120

电阻焊机焊接回路组件的导线截面选择：电阻焊机焊接回路组件的导线截面可按表 9—12 所推荐的电流密度选择。在受压力情况下，该截面尚须满足机械强度及刚度的要求。

## 二、交流弧焊机加装节电器后的节电效果计算

1. 加装节电器(空载自停装置)后，减少的视在功率，可按下式计算：

$$S = (U_1 I_0 - U_1 I_{01}) \times 10^{-3}$$

式中： $S$ ——节约的视在功率(kVA)；

$U_1$ ——电源电压，即电焊机一次侧电压(V)；

$I_0, I_{01}$ ——加装节电器前、后的空载电流(A)。

加装节电器后，弧焊变压器的空载视在功率可比原来减少 60 ~ 90%。



表 9—12 焊接回路组件允许的电流密度

组件名称	材 料	冷却条件	允许电流密度 (A/mm <sup>2</sup> )
电 极	铜、铜合金	强迫水冷	20 ~ 50
电极握杆	青 铜	强迫水冷	10 ~ 20
	黄 铜		8 ~ 12
电极臂、夹头、平板	铜	空 冷	1.4 ~ 2.2
		水 冷	2 ~ 3
	铜合金	空 冷	1.4 ~ 1.6
	铝		1.2 ~ 2
软连接线	铜电缆、紫铜带	空 冷	2.5 ~ 3
		接头处水冷	2.5 ~ 4
固定接触点	铜和其他材料	—	0.5 ~ 1
滑动接触点		水 冷	0.5 ~ 1
		水中工作	~ 12

## 2. 节电量计算

$$A = [(P_0 - P_{01})t_1 - P_{02}t_2] \times 10^{-3}$$

式中：A——节电量(kWh)；

$P_0$ 、 $P_{01}$ ——加装节电器前、后的空载输入功率(W)可实测；

$P_{02}$ ——节电器消耗的功率(W)，可实测；

$t_1$ 、 $t_2$ ——电焊机空载和负载的时间(h)。

为了方便起见，式中的几个数值可按下列公式估算：

$$P_0 \approx 0.35U_1I_0$$

$$P_{01} \approx 0.6U_1I_{01}$$

$$P_{02}: \text{CJO} \cdot 20 \text{ 取 } 14\text{W}; \text{CJO} \cdot 40 \text{ 取 } 18\text{W}$$

第 1108 页

## 第十章 风机、空压机

### 第一节 风机基础知识及计算

#### 一、风机基本参数及特性曲线

##### 1. 风机的基本参数

(1) 风量  $Q$ : 指气体在单位时间内通过风机的体积, 单位为  $\text{m}^3/\text{s}$ , 或  $\text{m}^3/\text{h}$ 。当用重量流量  $G$  来表示时, 单位为  $\text{kg}/\text{s}$ , 或  $\text{t}/\text{h}$ 。体积称量与重量流量间的关系:

$$G = \gamma Q/g$$

式中:  $\gamma$ ——气体的重度( $\text{N}/\text{m}^3$ ), 当大气压力为  $101\text{kPa}$ 、温度为  $20^\circ\text{C}$  时, 空气的重度  $\gamma = 11.77\text{N}/\text{m}^3$ 。

$g$ ——重力加速度,  $g = 9.81\text{m}/\text{s}^2$

(2) 全压  $H$ : 指单位体积的气体经过风机后其能量的增加值, 单位为  $\text{Pa}$ 。

$$H = H_2 - H_1$$

$$H_1 = H_{j1} + H_{d1}; H_2 = H_{j2} + H_{d2};$$

式中:  $H_2$ ——风机出口处的总压( $\text{Pa}$ );

$H_1$ ——风机进口处的总压( $\text{Pa}$ ),

$H_{j1}$ 、 $H_{j2}$ ——风机进口处与出口处的静压( $\text{Pa}$ );

$H_{d1}$ 、 $H_{d2}$ ——风机进口处与出口处的动压( $\text{Pa}$ )。

风机的全压  $H$  可用下式表示:

$$\begin{aligned} H &= (H_{j2} + H_{d2}) - (H_{j1} + H_{d1}) \\ &= (H_{j2} - H_{j1}) + (H_{d2} - H_{d1}) \end{aligned}$$

(3) 转速  $n$ : 指风机叶轮每分钟的转动次数, 单位为  $r/\text{min}$ 。

(4) 有效功率(即理论功率)  $N_{yx}$ : 指气体在单位时间内从风机中所获得的总能量, 单位为  $\text{kW}$ 。

$$N_{yx} = HQ \times 10^{-3}$$

式中:  $H$ ——风机的全压( $\text{Pa}$ );

$Q$ ——风机的流量( $\text{m}^3/\text{s}$ )。

(5) 轴功率  $N$ : 指电动机传给风机轴上的功率, 单位为  $\text{kW}$ 。

(6) 风机效率  $\eta$ : 指风机的有效功率  $N_{yx}$  与轴功率  $N$  之比。

$$\eta = \frac{N_{yx}}{N} \times 100\%$$

## 2. 风机的特性曲线

风机做功能力的大小可以用流量  $Q$ 、全压  $H$  的大小来反映。在一定转速下, 一台风机的流量  $Q$  与全压  $H$  之间有一个对应的关系, 这个关系用  $Q-H$  座标图来表示, 即为风机的  $Q-H$  性能曲线。同样有流量  $Q$  与轴功率  $N$  的  $Q-N$  曲线; 流量  $Q$  与效率  $\eta$  的  $Q-\eta$  曲线。9-19No7.1 风机特性曲线如图 10-1 所示。

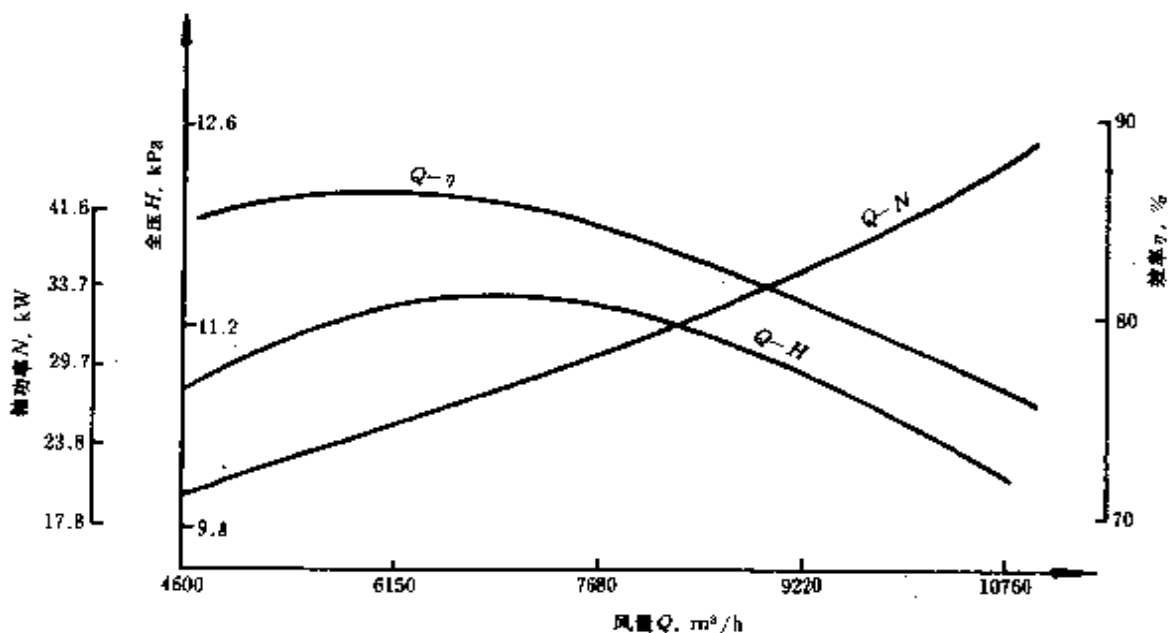


图 10-1 9-19No7.1 风机特性曲线

从特性曲线上可以看出,风机在某一对应的  $Q-H$  值运行时,风机将有最高效率,这时的  $Q、H、\eta$  值即为该台风机的额定参数。风机的流量是根据生产、工艺的需要来决定的,全压是根据管道阻力特性曲线来决定的。当风机运行点落在低效区域或节流运行时,风机运行就不经济。因此掌握和应用特性曲线,就能正确选择和经济合理地使用风机。

## 二、风量和风压的测算

### 1. 风量的测算

(1) 风速计算:用毕托管测量风量时,按下式计算:

$$v = 1.41K \sqrt{H_d g / \gamma_t}$$

$$H_d = (\sqrt{H_{d1}} + \sqrt{H_{d2}} + \dots + \sqrt{H_{dn}})^2$$

$$\gamma_t = \gamma_0 \frac{273 + 20}{273 + t} \cdot \frac{H_a \pm H_j}{101325}$$

式中:  $v$ ——测量截面上的平均气流速度(m/s);

$K$ ——毕托管校正系数;

$H_d$ ——测量截面上的平均动压(Pa);

$H_{d1}、H_{d2}$ ——各测点的动压(Pa);

$\dots H_{dn}$

$\gamma_t$ ——测量截面处介质重度(N/m<sup>3</sup>);

$g$ ——同前;

$H_a$ ——当地大气压(Pa)

$H_j$ ——测孔截面上的平均静压 Pa,当为表压力时取“+”号,真空时取“-”号;

$\gamma_0$ ——准标状态下气体重度,对空气, $\gamma_0 = 11.77\text{N/m}^3$ ;对烟气(在  $H_a = 101\text{kPa}, t = 0^\circ\text{C}$  时),

$$\gamma_0 = \left( \frac{1.97\text{R}_{\text{O}_2} + 1.429\text{O}_2 + 1.25\text{N}_2}{100} \right) \times 9.81(\text{N/m}^3)。$$

(2) 风量计算:

① 用毕托管测风量时：

$$Q = 3600Fv$$

式中： $Q$ ——风量( $m^3/h$ )；

$F$ ——测点处有效截面( $m^2$ )；

$v$ ——测点处平均流速( $m/s$ )。

② 用集流器测风量时：

$$Q = 0.00399\alpha D^2 \sqrt{\Delta H \cdot g/\gamma_i}$$

式中： $\alpha$ ——集流器系数，锥形集流器  $\alpha = 0.98$ ；圆弧形集流器  $\alpha = 0.99$ ；

$\Delta H$ ——集流器进口截面处测得的静压差值(Pa)；

$\gamma_i$ ——集流器处气体重度( $N/m^3$ )；

$D$ ——管道直径(mm)；

$g$ ——同前。

## 2. 全压计算

$$\begin{aligned} \text{如前所述 } H &= H_2 - H_1 = (H_{jc} - H_{j1}) + (H_{dz} - H_{d1}) \\ &= \Delta H_j + \Delta H_d \end{aligned}$$

(1) 风机进口处动压可按下式计算：

$$H_{d1} = \frac{1}{2g} \left( \frac{Q}{3600F_1} \right)^2 \gamma_1 = \frac{1}{2g} v_1^2 \gamma_1$$

式中： $H_{d1}$ ——风机进口处动压(Pa)；

$F_1$ ——风机进口处截面( $m^2$ )；

$v_1$ ——风机进口处平均流速( $m/s$ )；

$\gamma_1$ ——风机进口处气体重度( $N/m^3$ )。

(2) 风机出口处动压可按下式计算：

$$H_{d2} = \frac{1}{2g} \left( \frac{Q}{3600F_2} \right)^2 \gamma_2 = \frac{1}{2g} v_2^2 \gamma_2$$

式中： $H_{d2}$ ——风机出口处动压(Pa)

$F_2$ ——风机出口处截面( $m^2$ )；

$v_2$  —— 风机出口处平均流速(m/s);

$\gamma_2$  —— 风机出口处气体重度(N/m<sup>3</sup>)。

### 三、风机轴功率、电动机功率及风机效率计算

#### 1. 风机轴功率

$$N = \frac{N_{zt}}{\eta} = \frac{QH}{\eta} \times 10^{-3}$$

式中: $N$ —— 风机轴功率(kW);

$\eta$ —— 风机效率,约为0.4~0.75,实际数值以制造厂提供的数据为准;

其它符号同前。

风机轴功率还可写成如下形式:

$$N = P_1 \eta_d \eta_t$$

式中: $P_1$ —— 电动机输入功率(kW);

$\eta_d$ —— 电动机效率,计算方法见第五章第二节;

$\eta_t$ —— 传动装置效率,参见表10-1。

表10-1 传动效率估算值

传动方式	传动效率	传动方式	传动效率
三角皮带	0.95	齿轮减速器	0.94 ~ 0.98
联轴器	0.98	直 联	

#### 2. 电动机输入功率

$$P_1 = \sqrt{3}UI\cos\varphi \times 10^{-3}$$

式中: $P_1$ —— 电动机输入功率(kW);

$U$ —— 电源线电压(V);

$I$ —— 电动机负载电流(A);

$\cos\varphi$ —— 电动机功率因数。

#### 3. 风机(运行)效率 $\eta$ 与用电体系效率 $\eta_e$

$$\eta = \frac{N_{yz}}{N} \times 100\% = \frac{QH}{1000N} \times 100\%$$

$$= \frac{QH}{1000P_1\eta_d\eta_c} \times 100\%$$

$$\eta_c = \frac{N_{yz}}{P_1} \times 100\% = \frac{QH}{1000P_1} \times 100\%$$

#### 四、风机耗电量计算

$$A = \sum_1^n K_{ei} P_e T$$

式中： $A$ ——风机年耗电量(kWh/年)；

$n$ ——工厂中的风机数量；

$P_e$ ——电动机额定功率(kW)；

$T$ ——风机年运行小时数(h)；

$K_{ei}$ ——风机的利用系数，企业性质不同，其值也不同，参见表 10—2。

表 10—2 风机的利用系数  $K_{ei}$

鼓风机	0.5 ~ 0.6
通风机	0.6 ~ 0.8
高压通风机	0.75

**例 10—1** 某送风机，吸入重度为  $11.77\text{N/m}^3$  的大气温，以风量为  $0.7\text{m}^3/\text{s}$  的速度将风送到  $100\text{m}$  远的大气中，风道直径为  $300\text{mm}$ ，压力损失是  $400.2\text{Pa}$ ，如图 10—2(a) 所示。当风道中段有  $90\text{m}$  直径为  $400\text{mm}$  时，如图 10—2(b) 所示。试问送同一风量所需要的轴功率为图 10—2(a) 系统的百分之几？设送风机效率、管道摩擦系数在以上两种系统均一定且不变，另外，进出口压力损失可以忽略。假设图 10—2(b) 的系统由于风道急速扩大和缩小引起压力损失系数为  $K = 0.2$ 。



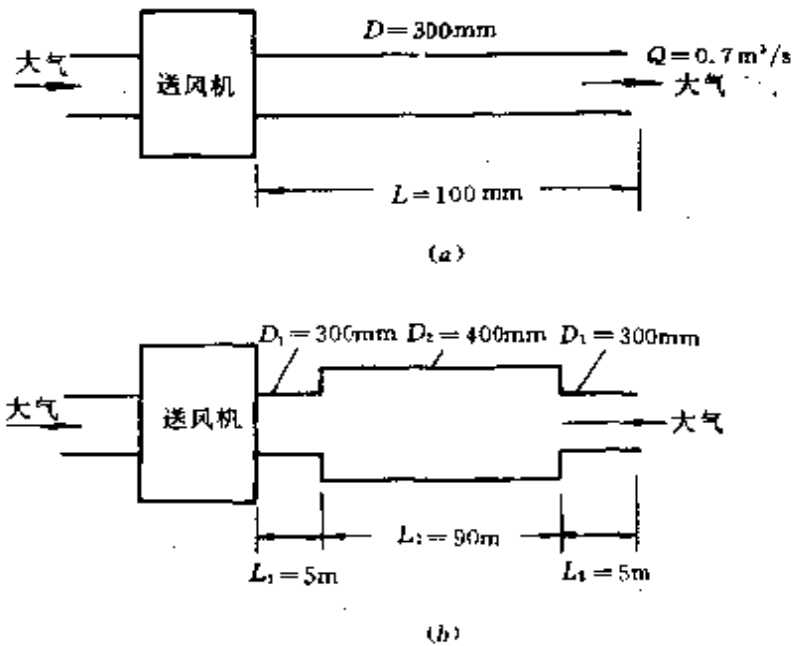


图 10—2 送风机风道系统

解 低压送风机所需轴功率  $N$  可由下式表示：

$$N = \frac{QH}{1000\eta}$$

设图 10—2(a) 和 (b) 各自所需的轴功率分别为  $N_A$  和  $N_B$ ，

则

$$N_B/N_A = H_B/H_A$$

直风道的压力损失为

$$\Delta H_A = f \frac{L}{D} \cdot \frac{1}{2g} \gamma v^2, \text{ 其中 } f \text{ 为风道摩擦系数。}$$

因管道内流速为

$$v = \frac{Q}{\frac{\pi}{4} D^2} = \frac{0.7 \times 4}{\pi \times 0.3^2} = 9.9(\text{m/s})$$

已知图 10—2(a) 中的压力损失为  $\Delta H_A = 400.2\text{Pa}$ ，图 10—2(b) 直管中的压力损失为

$$\begin{aligned} \Delta H_B &= \Delta H_A \frac{2L_1}{L} + \Delta H_A \frac{L_2}{L} \left( \frac{D}{D_2} \right)^5 \\ &= 400.2 \times 10/100 + 400.2 \times 90/100 \times (300/400)^5 \end{aligned}$$

$$= 125.49(\text{Pa})$$

急速扩大管或急速缩小管的压力损失  $\Delta H_B'$  可由下式计算:

$$\begin{aligned} \Delta H_B' &= K\gamma v^2/2g = 0.2 \times 11.77 \times 9.9^2/2 \times 9.81 \\ &= 11.76(\text{Pa}) \end{aligned}$$

由于系统包含急速扩大管和急速缩小管,故此项损失应乘以 2,即为  $2\Delta H_B'$ 。

向大气排出的动压损失为

$$\begin{aligned} \Delta H_A'' &= \Delta H_B' = \gamma v^2/2g = 11.77 \times 9.9^2/2 \times 9.81 = \\ &= 58.80(\text{Pa}) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{因此 } \frac{N_B}{N_A} &= \frac{H_B}{H_A} = \frac{\Delta H_B + 2\Delta H_B' + \Delta H_B''}{\Delta H_A + \Delta H_A''} \\ &= \frac{125.49 + 2 \times 11.77 + 58.80}{400.2 + 58.80} = 45.3\% \end{aligned}$$

### 五、风机参数的换算

#### 1. 换算为标准状况下的计算

风机的特性曲线是按风机的用途在规定条件下作出的。如通风机的规定条件:大气压力 101.3kPa,气温 20°C,气体重度 11.77N/m<sup>3</sup>;引风机的规定条件:大气压力 101.3kPa,气体温度 200°C,气体重度 7.31N/m<sup>3</sup>。为了把被测风机的特性与风机特性曲线作比较,需要把所测的风量、全压和轴功率换算到标准状况下的数值。

(1) 风量换算:

$$Q_0 = Q \frac{n_0}{n}$$

(2) 全压换算:

$$H_0 = H \frac{273 + t}{273 + t_0} \cdot \frac{H_a \pm H_j}{101325} \left(\frac{n_0}{n}\right)^2 = H \frac{\gamma_0}{\gamma_t} \left(\frac{n_0}{n}\right)^2$$

(3) 轴功率换算:

$$N_0 = N \frac{\gamma_0}{\gamma_t} \left(\frac{n_0}{n}\right)^3$$

表 10—3 风机变工况换算表

变量	定量	风量	全压	轴功率
$n$	$D, \gamma$	$Q_2 = Q_1 \left( \frac{n_2}{n_1} \right)^3$	$H_2 = H_1 \left( \frac{n_2}{n_1} \right)^2$	$N_2 = N_1 \left( \frac{n_2}{n_1} \right)^3$
$\gamma$	$D, n$	$Q_2 = Q_1$	$H_2 = H_1 \frac{\gamma_2}{\gamma_1}$	$N_2 = N_1 \frac{\gamma_2}{\gamma_1}$
$D$	$\gamma, n$	$Q_2 = Q_1 \left( \frac{D_2}{D_1} \right)^3$	$H_2 = H_1 \left( \frac{D_2}{D_1} \right)^2$	$N_2 = N_1 \left( \frac{D_2}{D_1} \right)^5$
$n, \gamma$	$D$	$Q_2 = Q_1 \frac{n_2}{n_1}$	$H_2 = H_1 \frac{\gamma_2}{\gamma_1} \left( \frac{n_2}{n_1} \right)^3$	$N_2 = N_1 \frac{\gamma_2}{\gamma_1} \left( \frac{n_2}{n_1} \right)^3$
$n, D$	$\gamma$	$Q_2 = Q_1 \frac{n_2}{n_1} \left( \frac{D_2}{D_1} \right)^3$	$H_2 = H_1 \left( \frac{n_2}{n_1} \right)^2 \left( \frac{D_2}{D_1} \right)^2$	$N_2 = N_1 \left( \frac{n_2}{n_1} \right)^3 \left( \frac{D_2}{D_1} \right)^5$
$\gamma, D$	$n$	$Q_2 = Q_1 \left( \frac{D_2}{D_1} \right)^3$	$H_2 = H_1 \frac{\gamma_2}{\gamma_1} \left( \frac{D_2}{D_1} \right)^2$	$N_2 = N_1 \frac{\gamma_2}{\gamma_1} \left( \frac{D_2}{D_1} \right)^5$

注：角码 1 指原来的数据，2 指变量变化后的数据。

上述式中,  $Q, H, N, n, \gamma_i$  为风机实测时的流量、全压、轴功率、转速和气体重度;  $Q_0, H_0, N_0, n_0, \gamma_0$  为风机在标准状况下的流量、全压、轴功率、转速和气体重度。  $H_a$  为当地的大气压力 (Pa)。

### 2. 风机变工况的换算

当风机工况改变时(改变量有如表 10—3 第一列所示), 其参数换算见表 10—3。

表 10—3 中,  $D$  为叶轮外径, 其它符号同前。

## 六、变速风机的电动机功率的选择

(1) 连续周期运行方式: 其运行状况如图 10—3 所示。这种运行工况电动机的输出功率应按负载的均方根计算。即

$$P_2 = \sqrt{\frac{N_1^2 t_1 + N_2^2 t_2}{t_1 + t_2}}$$

由图可得负载持续率为  $(t_1 + t_2)/T \times 100\%$ 。

根据以上计算的输出功率和负载持续率, 便可从产品目录中选择合适的电动机。

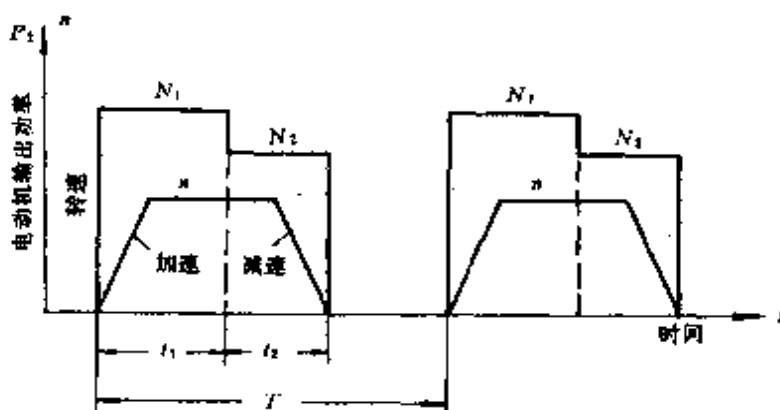


图 10—3 连续周期运行的状态曲线

(2) 连续运行方式: 其运行状况如图 10—4 所示。这种工况电动机的等效输出功率为

$$P_2 = \sqrt{\frac{N_1^2 t_1 + N_2^2 t_2 + N_3^2 t_3}{t_1 a_1 + t_2 a_2 + t_3 a_3}}$$

式中： $a$ ——冷却系数，见表 10—4。

这时  $T = t_1 a_1 + t_2 a_2 + t_3 a_3 + t_4 a_4$  为考虑冷却系数的等效周期。

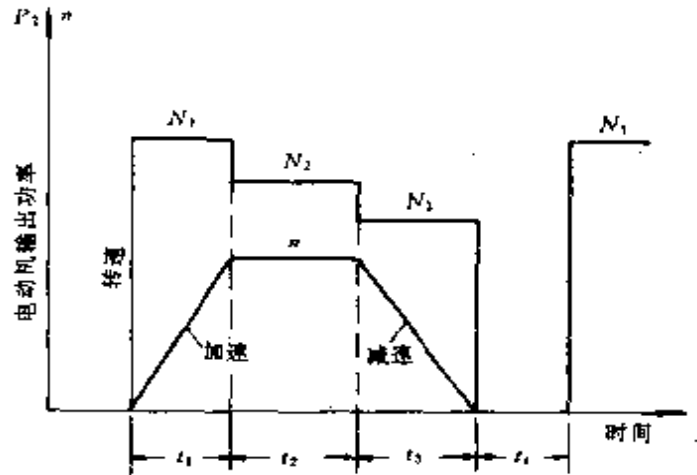


图 10—4 周期性负载

表 10—4 冷却系数  $a$  表

电动机型式	停止	加速	运行	减速
开启式交流电动机	0.2	0.5	1.0	0.5
封闭式交流电动机	0.3	0.6	1.0	0.6
全封闭外扇冷却式交流电动机	0.5	0.75	1.0	0.75
强迫通风冷却式交流电动机	1.0	1.0	1.0	1.0

由上式求出的输出功率一般偏低，还应计算电动机启动、运行、减速中的损耗。

### 七、空调设备用风机轴功率和送风量计算

空调设备用风机的轴功率和送风量可按下列公式计算：

$$N = \frac{QH}{1000\eta}$$

$$Q = \frac{V_{qsf} \cdot SHF}{3600C \cdot \Delta t_f}$$

式中： $N$ ——轴功率(kW)

$Q$ ——送风量( $m^3/s$ )；

$H$ ——风机全压(Pa)；

$\eta$ ——风机效率；

$V$ ——空气的相对容积( $m^3/kg$ )；

$q_{rf}$ ——室内全热负荷(kJ/h)；

$SHF$ ——室内负荷显热比；

$C$ ——空气温的比热(kJ/kg·°C)

$\Delta t_f$ ——送风温差(°C)。

**例 10—2** 某变电所装有一台  $SL_7-800kVA$  变压器，由于条件限制，变压器室过小，散热条件差。现欲将变压器产生的热量排至室外，求所需冷却风扇的排气量多少？设排气扇的吸气与排气的温差为  $5^\circ C$ ，空气重度为  $11.77N/m^3$ 、比热为  $100J/kg \cdot ^\circ C$ ，且变压器在额定负荷下运行。变压器的空载损耗为  $1.54kW$ ，短路损耗为  $9.9kW$ 。

**解：** 变压器的有功损耗为

$$\Delta P_b = P_0 + \beta^2 P_d = 1.54 + 9.9 = 11.44(kW)$$

这些损耗产生的每分钟发热量为

$$Q_1 = \Delta P_b \times 10^3 \times 60 = 11.44 \times 10^3 \times 60 = 686400(J)$$

另一方面，假设冷却风扇每分钟排出的热量为  $Q_2$ ，排气量为  $Q(m^3/min)$ ，空气重度为  $\gamma(N/m^3)$ 、比热为  $C(J/kg \cdot ^\circ C)$ ，温度为  $\Delta t(^\circ C)$ ，则

$$Q_2 = Q \gamma C \cdot \Delta t/g$$

令  $Q_1 = Q_2$ ，即可求得排气量为

$$Q = \frac{Q_1 g}{\gamma C \cdot \Delta t} = \frac{686400 \times 9.81}{11.77 \times 1000 \times 5} = 114.4(m^3/min)$$

## 八、锅炉送、引风机风量、全压和电动机功率的计算

### 1. 送风机计算

(1) 送风机风量:

$$Q = k_1 a B V^0 \frac{(273 + t_f) \times 101.3 \times 10^3}{273 H_a n}$$

式中:  $Q$ ——送风机风量( $\text{m}^3/\text{h}$ );

$k_1$ ——风量储备系数,一般取 1.05;

$a$ ——炉膛过剩空气系数;

$B$ ——锅炉的计算耗煤量( $\text{kg}/\text{h}$ );

$V^0$ ——理论燃烧空气量( $\text{Nm}^3/\text{kg}$ );

$t_f$ ——进入送风机的冷空气温度( $^{\circ}\text{C}$ );

$H_a$ ——当地大气压(Pa);

$n$ ——送风机台数。

(2) 风机全压:

式中:  $H$ ——风机全压(Pa);

$k_2$ ——风压储备系数,一般取 1.1;

$\Sigma\Delta H_f$ ——风道的计算总阻力(Pa),包括全部阻力和摩擦阻力,并进行气压修正。

## 2. 引风机计算

(1) 引风机风量:

$$Q = k_1 \left[ B V^0 \frac{(273 + t_f) \times 101.3 \times 10^3}{273 H_a} + V_{sq} \right] \frac{1}{n}$$

$$V_{sq} = \frac{\Delta G}{0.804} \cdot \frac{273 + t_c}{273} \cdot 3600;$$

式中:  $Q$ ——引风机风量( $\text{m}^3/\text{h}$ );

$k_1$ ——风量储备系数,取 1.05 ~ 1.1;

$V^0$ ——计入漏风后引风机前的烟气体积( $\text{Nm}^3/\text{kg}$ );

$t_f$ ——引风机前烟气温度( $^{\circ}\text{C}$ );

$n$ ——引风机台数;

$V_{sq}$ ——当采用湿式除尘器时,除尘器内蒸发的水蒸汽体积( $\text{m}^3/\text{h}$ );

$\Delta G$ ——除尘器进出口增加的烟气湿分量(kg/s);

$t_c$ ——除尘器出口烟温度( $^{\circ}\text{C}$ );

$B, H_a$ ——同前。

(2) 引风机全压:

$$H = k_2(\Sigma\Delta H_y - H)$$

式中:  $H$ ——引风机全压(Pa);

$k_2$ ——风压储备系数,取 1.1 ~ 1.15;

$\Sigma\Delta H_y$ ——烟道的总计算阻力(Pa);

$H$ ——自生通风力(Pa)。

3. 送、引风机的电动机功率的计算

$$P = k_3 \frac{QH}{36000\eta}$$

式中:  $P$ ——电动机功率(kW);

$k_3$ ——功率储备系数,根据电动机型式、风机运行及电动机起动条件选取,一般取 1.15 ~ 1.3;

$Q$ ——计算使用容量( $\text{m}^3/\text{h}$ );

$H$ ——计算的使用全压(Pa);

$\eta$ ——在计算的使用工况下,送、引风机的运行效率。

4. 变工况换算

当送、引风机的风量或全压计算后,由于条件变动,需重新计算时,可利用表 10—3 进行换算。

## 第二节 空压机计算

### 一、空压机效率计算

1. 每千克压缩空气的理论有效能

(1) 绝热压缩时:

① 对于一级压缩:



$$W_{yz} = \frac{k}{k-1} RT_1 \left[ \left( \frac{H_2}{H_1} \right)^{\frac{k-1}{k}} - 1 \right] \times 10^{-3}$$

式中： $W_{yz}$ ——每千克压缩空气的理论有效能(kJ/kg·K)；

$k$ ——空气绝热压缩指数，为 1.4；

$R$ ——空气的气体常数，为 287.676J/kg·K；

$T_1$ ——空压机吸气口空气绝对温度(K)；

$H_1$ 、 $H_2$ ——空压机进气和出气绝对压力(MPa)。

② 对于二级压缩：

$$W_{yz} = \frac{k}{k-1} R \left[ T_1 \left( \frac{H_2}{H_1} \right)^{\frac{k-1}{k}} + T_3 \left( \frac{H_4}{H_3} \right)^{\frac{k-1}{k}} - T_1 - T_3 \right] \times 10^{-3}$$

式中： $T_3$ ——二级吸气口空气绝对温度(K)；

$H_3$ 、 $H_4$ ——空压机二级进气和出气绝对压力(MPa)。

(2) 等温压缩时

① 对于一级压缩：

$$W_{yz} = \left( RT \lg \frac{H_2}{H_1} \right) \times 10^{-3}$$

② 对于二级压缩：

$$W_{yz} = \left( RT \lg \frac{H_2 H_4}{H_1 H_3} \right) \times 10^{-3}$$

式中： $T$ ——等温压缩绝对温度(K)，一般用制成品空气温度计算。

2. 空压机压缩空气温量

$$m = 3476.1 \frac{QH}{T}$$

式中： $m$ ——空压机压缩空气量(kg/h)；

$Q$ ——测点处空气流量(m<sup>3</sup>/h)；

$H$ ——测点处绝对压力(MPa)；

$T$ ——测点处绝对温度(K)。

3. 空压机效率

$$\eta = \frac{W_{z,yx}}{3600P_1} \times 100\%, W_{z,yx} = mW_{yx}$$

式中： $P_1$ ——电动机实测输入功率(kW)；  
 $W_{z,yx}$ ——空气压缩机总有效能(kJ/h)；  
 $m$ ——空气压缩机压缩空气量(kg/h)；  
 $W_{yx}$ ——同前。

## 二、空压机管网漏气损失电能的测算

### 1. 漏气量的测试

在停产检修时，所有用风点均要停止用风，将管网末端全部封闭，用压力—时间曲线测试法进行测试。

现设有  $n$  台空压机，将它们全开动，使空压机系统的压力逐渐升高，直至达到工艺规定的压力，关闭空压机，由于漏气，系统压力逐渐降低。在此过程中，记录压力在实际使用范围内由  $H_1$  至  $H_2$  压力上升时间  $t_1$  和由  $H_2$  至  $H_1$  压力下降时间  $t_2$  (图 10—5)。则平衡期  $n$  台空压机总排气量  $Q_p$

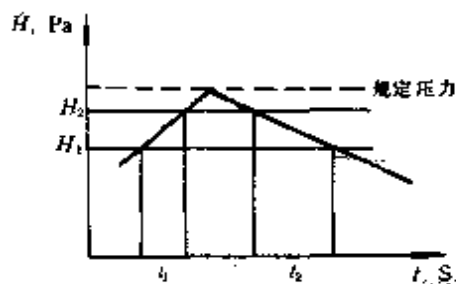


图 10—5 压力 - 时间曲线

$$Q_p = Q_1 + Q_2 + \dots + Q_n = \Sigma Q_i$$

设空压机系统的容积为  $V(\text{m}^3)$ ，则

$$V = (Q_p - Q_L)t_1 = Q_L t_2$$

式中： $Q_L$ ——空压机系统的漏气量( $\text{m}^3/\text{s}$ )；

$t_1$ ——在实际工况的压力范围内，压力从  $H_1$  上升到  $H_2$  所需时间(s)；

$t_2$ ——在实际工况的压力范围内，压力从  $H_2$  下降到  $H_1$  所

需时间(s)。

$$\text{漏气量 } Q_L = \frac{t_1}{t_1 + t_2} Q_p$$

设年有效工作日为 300 天,则每年漏气量为

$$Q_a = Q_L \times 300 \times 24 \times 3600$$

### 2. 管网漏气损失电能计算

测试期在  $t_1$  时间内,供给  $n$  台空压机的总电能为

$$A = \frac{1}{3600} (P_1 + P_2 + \dots + P_n) t_1 = (\Sigma P_i) t_1$$

式中: $A$ ——在  $t_1$  时间内供给  $n$  台空压机的总电能(kWh);

$P_1 \sim P_n$ ——各空压机的输入电能(kW)。

测试期在  $t_1$  时间内  $n$  台空压机换算到吸气状态下的总排气量为

$$Q_p = (Q_1 + Q_2 + \dots + Q_n) t_1 = (\Sigma Q_i) t_1$$

式中: $Q_p$ ——在  $t_1$  时间内  $n$  台空压机换算到吸气状态下的总排气量( $m^3$ )。

平均比电能为

$$m_B = A / Q_p$$

空压机管网年漏气损失电能为

$$\Delta A = Q_a m_B$$

## 第十一章 水泵

### 第一节 基础知识及计算

#### 一、水泵基本参数及特性曲线

##### 1. 水泵的基本参数

(1) 流量  $Q$ : 指水泵在单位时间内所能抽送的水量, 单位为  $\text{m}^3/\text{h}$ 。

(2) 扬程  $H$ : 指水泵能够扬水的高度, 单位为  $\text{m}$ 。扬水所需的扬程等于实际扬程与损失扬程之和(图11—1)。所谓

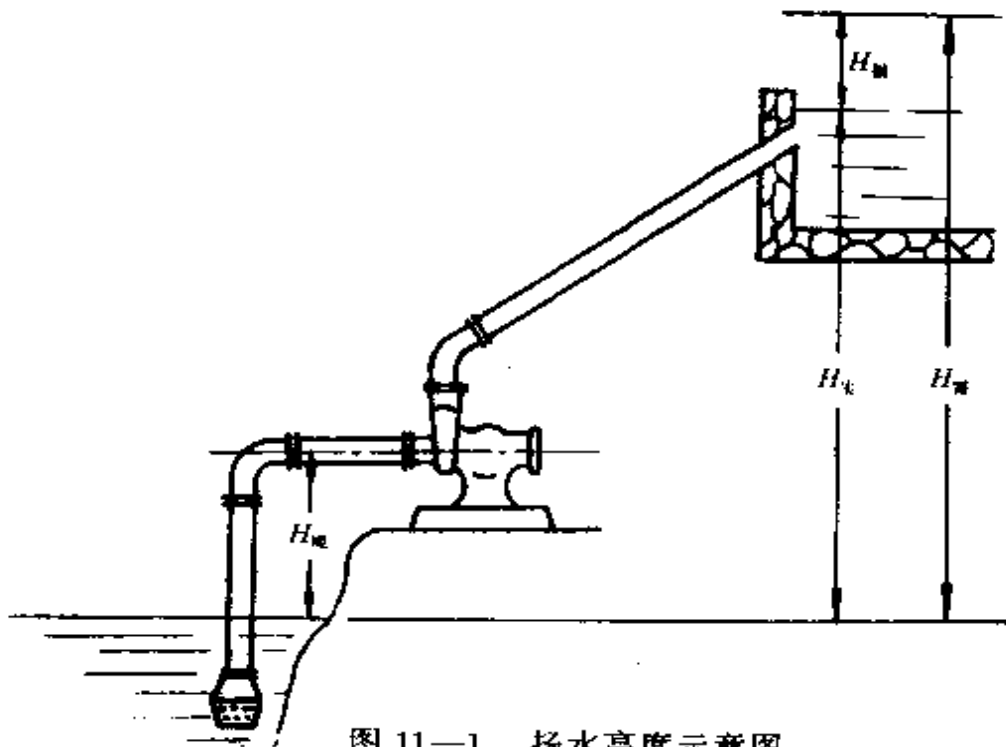


图 11—1 扬水高度示意图

损失扬程, 指水经过管路时, 由于受到阻力和摩擦而损失的扬

程。所需扬程应等于或小于水泵铭牌上所给出的扬程。

(3) 有效功率(或称为理论功率) $N_{yx}$ :指水在单位时间内从水泵中所获得的总能量,单位为 kW。

$$N_{yx} = \frac{\nu QH}{1000}$$

式中: $\nu$ —— 介质重度( $n/m^3$ );

$H$ —— 水泵的扬程(m);

$Q$ —— 水泵的流量(kg/s)。

(4) 轴功率  $N$ :指电动机传给水泵轴上的功率,单位为 kW。

(5) 效率  $\eta$ :指水泵的有效功率与轴功率之比。

$$\eta = \frac{N_{yx}}{N} \times 100\%$$

(6) 转速  $n$ :指水泵的叶轮每分钟转多少转,单位 r/min。

(7) 允许吸上真空高度  $H_s$ :它表示该水泵吸水能力的大小,也是确定水泵安装高度的依据。在安装水泵时,其实际吸水高度  $H_{吸}$ (见图 11—1) 与吸水管路损失扬程的和,应小于允许吸上的真空高度。

(8) 比转速  $n_s$ :也叫比速,单位为 r/min。

$$n_s = \frac{3.65n \sqrt{Q}}{H^{3/4}}$$

式中: $Q$ —— 单吸叶轮的流量( $m^3/s$ ),如为 Sh 型泵,则应取  $Q_n/2$  代入;

$H$ —— 单吸叶轮的扬程(m),如为 D(DA) 型泵,则应取  $H_D/Z$  代入,其中  $Z$  是叶轮的个数。

## 2. 水泵的特性曲线

水泵做功能力的大小,可以用流量  $Q$  及扬程  $H$  的大小来反映。在一定的转速下,一台水泵的流量  $Q$  与扬程  $H$  之间有一个对应的关系。这个关系用  $Q-H$  座标图来表示,即为水泵的  $Q-H$  性能曲线。同样有流量  $Q$  与轴功率  $N$  的  $Q-N$  曲线;流量

$Q$  与效率  $\eta$  的  $Q-\eta$  曲线。8Sh—6 型水泵的特性曲线如图 11—2 所示。

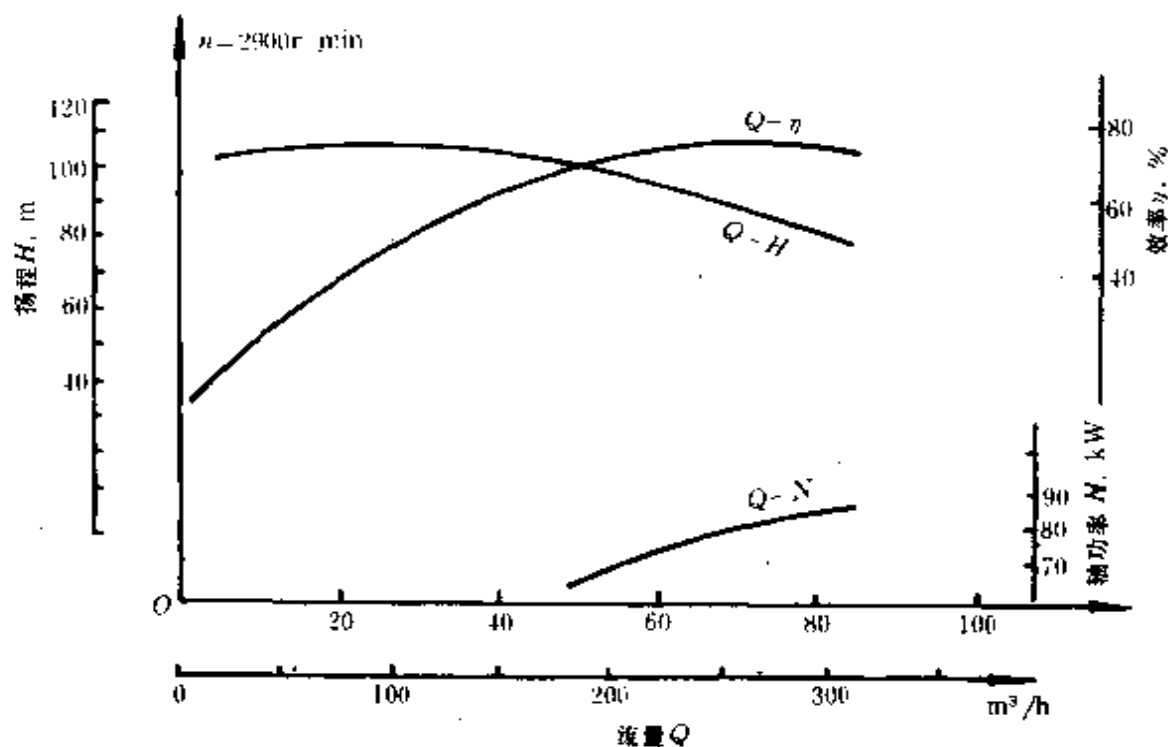


图 11—2 8Sh—6 型水泵的特性曲线

由图可见,水泵在某一对应  $Q-H$  值运行时,水泵将有最高效率,这时的  $Q$ 、 $H$ 、 $\eta$  值即为该台水泵的额定参数。水泵的运行点是由其水泵特性曲线与管道特性曲线的交点来确定的。

## 二、流量和扬程及损失扬程的计算

### 1. 流量的测算

(1) 容积法测量流量:可利用容积水池测量流量,但水池形状应能精确计算其容积。每次测量时间要持续 1min 以上;初水位与末水位位差值应在 0.2m 以上。

流量可按下式计算:

$$Q = S(h_2 - h_1)/t$$

式中: $Q$ ——流量( $m^3/s$ );

$S$ ——水池液面面积( $m^2$ );

$h_1, h_2$ —— 初水位与末水位值(m);  
 $t$ —— 测量时间,即注水或吸水时间(s)。

(2) 秤重法测流量:适用于小流量水泵

$$Q = (Gg/\nu)t$$

式中: $G$ —— 水的重量(kg);

$g$ —— 重力加速度, $g = 9.81\text{m/s}^2$ ;

$\nu$ —— 水的重度,一般情况可取 $\nu = 9810\text{N/m}^3$ ;

$t$ —— 注水时间(s)。

(3) 利用水表测量流量:水管径小于200mm时,可利用水表或涡轮流量计测量,表前应有 $10 \sim 15D$ 的直管段;当条件不允许时,表前可减为 $4 \sim 7D$ 的直管段,表后可减为 $2 \sim 3D$ 的直管段。

流量可按下式计算:

$$Q = (A_2 - A_1)/t$$

式中: $A_1, A_2$ —— 计量初和计量末的水表读数( $\text{m}^3$ );

$t$ —— 测量时间(s)。

(4) 利用毕托管配U型测压管测流量:水管径大于200mm的水泵,可利用毕托管测定水流的动压力,然后求出流量。毕托管应按装在直管段中,管前有 $4 \sim 7D$ 的直管段;毕托管后应有 $2 \sim 3D$ 的直管段。按等环面积法布置测点,各测点离管道中心的距离 $r$ 值,可按下式计算:

$$r_1 = R \sqrt{1/2n_2}, r_2 = R \sqrt{3/2n_2}, r_3 = R \sqrt{5/2n_2},$$

$$r_4 = R \sqrt{7/2n_2}, r_5 = R \sqrt{9/2n_2},$$

式中: $r_1, r_2 \dots r_5$ —— 各测点至管道中心的距离(mm);

$R$ —— 被测管段半径(mm);

$n_2$ —— 管道截面上圆环数量,一般取5,或按表11-1确定。

表 11—1 等面积圆环数与测量直径数表

管道直径 D(mm)	300 以下	400	600	800	900	1200	1400	1600
等面积圆环数 $n$	3	4	5	6	7	8	9	10
测量条数	1	1	2	2	2	2	2	2
测点总数	6	8	20	24	28	32	36	40

流量可按下式计算：

$$Q = KF \sqrt{2g} \sqrt{H_{cp}(\gamma_c - \gamma)/\gamma}$$

式中： $Q$ ——流量( $m^3/s$ )；

$F$ ——测点处水管截面( $m^2$ )；

$K$ ——毕托管校正系数；

$\gamma$ ——被测液体的重度( $N/m^3$ )；

$\gamma_c$ ——U 型管中测量液(如四氯化碳)的重度( $N/m^3$ )；

$$H_{cp} = \left[ \frac{\sqrt{H_1} + \sqrt{H_2} + \dots + \sqrt{H_n}}{n} \right]^2$$

$H_1, H_2 \dots H_n$  为各测点处 U 型管中的压差示值(m)。

(5) 利用标准孔板或标准喷嘴或文氏管等节流装置测量；

节流装置前应有  $4 \sim 7D$  的直管段，节流装置后应有  $2 \sim 3D$  的直管段。

流量可按下式计算

$$Q = a_s F_0 \sqrt{2g/\gamma} \sqrt{\Delta P}$$

式中： $Q$ ——流量( $m^3/s$ )；

$a_s$ ——流量系数；

$F_0$ ——节流装置收缩断面处的面积( $m^2$ )；

$\gamma$ ——水的重度( $N/m^3$ )；

$\Delta P$ ——节流前后的压差(Pa)。

## 2. 扬程的测算



(1) 离心泵总扬程的测算(图 11—3):

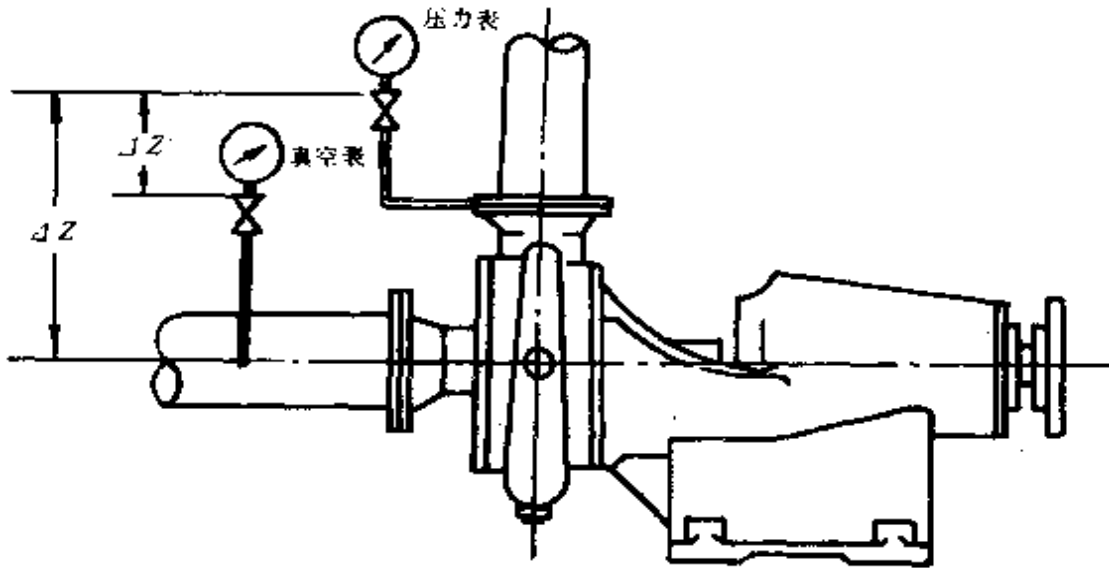


图 11—3 离心泵测试示意图

当进口压力为正值(表压力)时

$$H = 10.2 \times 10^{-5}(P_2 - P_1) + \frac{v_2^2 - v_1^2}{2g} + \Delta Z'$$

当进口压力为负值(真空)时

$$H = 10.2 \times 10^{-5}(P_2 + P_v) + \frac{v_2^2 - v_1^2}{2g} + \Delta Z$$

式中:  $H$ ——离心泵总扬程(m);

$P_1, P_2$ ——进口和出口压力表读数(Pa);

$P_v$ ——进口测定断面上的真空表读数(Pa);

$v_1, v_2$ ——进口和出口的流速(m/s),

$$v_1 = \frac{Q}{\frac{\pi}{4}D_1^2}, v_2 = \frac{Q}{\frac{\pi}{4}D_2^2};$$

$\Delta Z'$ ——出口压力表零位到进口压力表零位之间的垂直高度差,两表计接管内皆充水(m);

$\Delta Z$ ——出口压力表零位到进口真空表测点之间的垂直高

度差, 压力表的接管内充水、真空表的接管内充气。

(2) 轴流泵总扬程的测算(图 11—4)

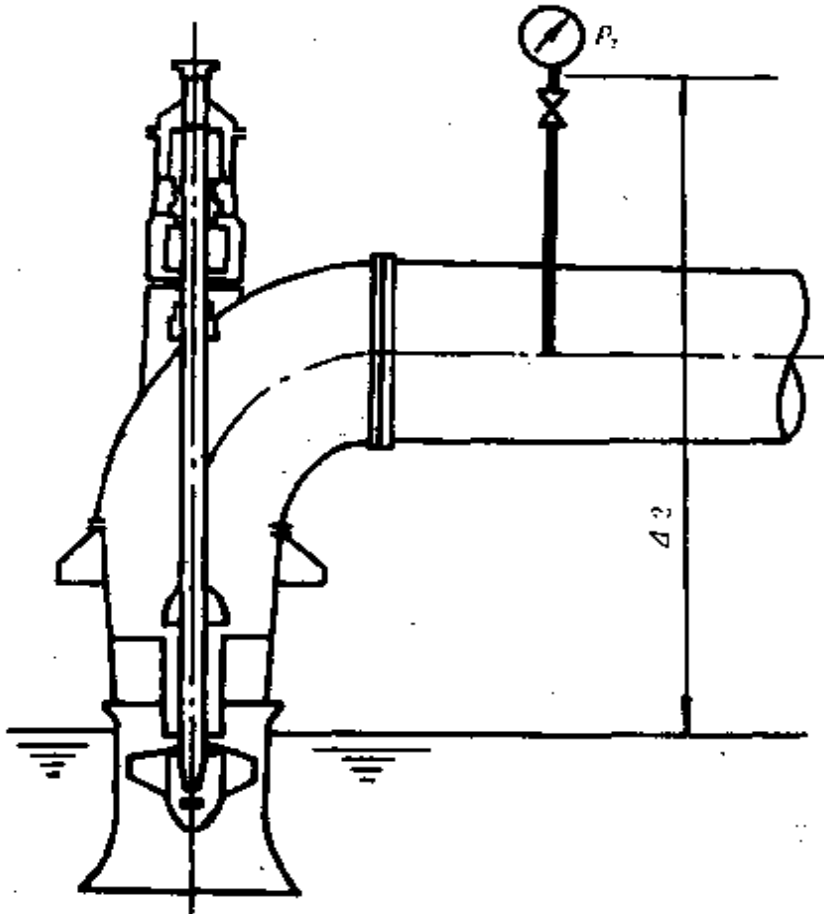


图 11—4 轴流泵测试示意图

$$H = 10.2 \times 10^{-5} P_2 + \frac{v_2^2}{2g} + \Delta_2$$

式中:  $H$ ——轴流泵总扬程(m);

$P_2$ ——出口压力表读数(pa);

$\Delta_2$ ——出口压力表到水平面距离(m)。

(3) 水泵扬程的粗略估算: 一般水泵总扬程在 50m 以内, 当管路长度不超过实际扬程的二倍时(如小型灌区), 可按下式粗略估算总扬程:

$$H = (1 + k)H_{sh}$$

式中： $H$ ——总扬程(m)；

$H_{sh}$ ——实际扬程(m)，可实测；

$k$ ——损失扬程系数，见表 11—2。

表 11—2 损失扬程系数  $k$  值

实际扬程 (m)	管 路 直 径 (mm)			
	200 以下	250 ~ 300	350 以上	
	$k$ (%)			管路直径在 350mm 以上时不 包括底阀损失
10	30 ~ 50	20 ~ 40	10 ~ 25	
10 ~ 30	20 ~ 40	15 ~ 30	5 ~ 15	
30 以上	10 ~ 30	10 ~ 20	3 ~ 10	

### 3. 扬程损失计算

(1) 泵管路系统扬程损失计算：管路中扬程损失由二部分组成：沿程扬程损失和局部扬程损失，即

$$\Delta H_z = h_y + h_j$$

式中： $\Delta H_z$ ——管路中总扬程损失(m)；

$h_y$ ——沿程扬程损失(m)；

$h_j$ ——局部水头损失(m)。

① 沿程扬程损失：

$$h_y = \frac{\lambda L}{D} \cdot \frac{v_2^2}{2g}$$

式中： $\lambda$ ——沿程阻力系数；

$L$ ——液体流经的直管长度(m)；

$D$ ——管路内径(m)；

$v$ ——液体在管路中的平均流速(m/s)；

其它符号同前。

其中沿程阻力系数  $\lambda$  与液体流态判别雷诺数  $Re$ 、管壁相对粗糙度  $K/D$  及过流断面的几何形状有关。

所谓雷诺数  $Re$ , 定义如下:

$$Re = \frac{\nu D}{\nu}$$

式中:  $\nu$ ——运动粘度 ( $m^2/s$ );

其它符号同前。

对于过流断面形状相同的圆管道:

(a) 当液体为层流状态时, 雷诺数  $Re < 2.3 \times 10^3$ , 阻力系数  $\lambda$  与  $Re$  有关:

$$\lambda = 64/Re$$

(b) 当液体为粗糙管紊流状态时,  $Re > 2.3 \times 10^3$ , 阻力系数  $\lambda$  与圆管内壁的粗糙度、管道内径有关:

$$\lambda = (2 \lg \frac{D}{2K} + 17.4)^2$$

式中:  $K$ ——管壁绝对粗糙度, 可查表 11—3。

表 11—3 不同材料管壁粗糙度  $K$

材料	管壁状态	绝对粗糙度
钢、铝、塑料	新、光滑	0.0015 ~ 0.01
钢管	新管	0.01 ~ 0.1
	旧管、锈蚀	0.2 ~ 2
橡胶	新管	0.03
钢、铁	新管	0.25
	旧管、锈蚀	1 ~ 3

沿程阻力系数  $\lambda$  值也可以从圆管断面的沿程阻力系数  $\lambda$  与雷诺数  $Re$ 、相对粗糙度  $K/D$  关系由线图上查得 (见 GB3216—82 或流体力学书籍)。

(c) 当液体为光滑管紊流状态时, 沿程损失系数可按下式计算:

$$Re < 10^3 \quad \lambda = 0.3164 Re^{-0.25}$$

$$10^5 < Re < 3 \times 10^6 \quad \lambda = 0.0032 + 0.221 Re^{-0.237}$$

一般粗略估算时,取沿程阻力系数:

$$\lambda = 0.03 \sim 0.04$$

② 局部扬程损失:局部扬程损失,一般与管件的形状、雷诺数和相对粗糙度有关。只有当  $Re > 10^5$  时,局部阻力系数才与雷诺数无关。局部阻力系数按下式计算:

$$h_j = \xi \frac{v^2}{2g}$$

式中: $\xi$ ——局部阻力系数,由液体流经局部截面的几何形状、结构决定,可查《电机工程手册》第一卷 P1—194 ~ P1—197(机械工业出版社 1984 年 3 月版)。

几种常用的局部阻力系数列于表 11—4,供参考。

表 11—4 局部阻力系数表

几何形状	局部阻力系数 $\xi$									
底阀	<i>D</i>	40	50	75	100	150	200	250	300	mm
	$\xi$	12	10	8.5	7	6	5.2	4.4	3.7	
无底阀	2 ~ 3									
90° 圆管 弯头	<i>R/D</i>	1		2		4		6		10
	光滑	0.2		0.14		0.11		0.08		0.06
	粗糙	0.52		0.28		0.23		0.18		0.15
90° 折管 弯头	<i>L/D</i>	0.25	0.5	1	1.5	2	2.5	3	4	5
	光滑	0.9	0.67	0.35	0.28	0.3	0.34	0.36	0.38	0.4
	粗糙	0.95	0.71	0.4	0.37	0.39	0.41	0.44	0.45	0.45
闸阀	<i>S/D</i>	全开	7/8	6/8	5/8	4/8	3/8	2/8	1/8	
	$\xi$	0	0.07	0.26	0.81	2.06	5.52	7.9	7.8	

注:

*R*——管道弯头曲率半径。

*L*——折管中心一段直管长度。

*S*——闸阀开度。

管道和附件的损失扬程换算表

表 11-5

水管口径		流量 (m <sup>3</sup> /h)	流速 (m/s)	损 失 扬 程 (m)								
				每米水管 长	底阀 $S_{fv} = 5$	逆止阀 $S_{rv} = 1.7$	闸阀 $S_{zv} = 0.1$	进水管口		弯 头	出水扩散管 $S_{mu} = 0.25$	
(mm)	(英寸)							有喇叭口 $S_{mu} = 0.2$	无喇叭口 $S_{mu} = 0.5$	90° $S_{mu} = 0.2$	45° $S_{mu} = 0.1$	
50	2	20	2.5	0.378	2.0	0.68	0.04	0.08	0.02	0.08	0.04	0.1
75	3	45	2.8	0.227	2.03	0.69	0.04	0.08	0.02	0.08	0.04	0.1
100	4	85	2.8	0.157	2.0	0.68	0.04	0.08	0.02	0.08	0.04	0.1
125	5	100	2.27	0.075	1.3	0.44	0.026	0.052	0.013	0.052	0.026	0.065
150	6	150	2.36	0.064	1.4	0.47	0.026	0.056	0.014	0.056	0.028	0.07
200	8	280	2.45	0.048	1.5	0.51	0.03	0.06	0.015	0.06	0.03	0.075
250	10	486	2.75	0.044	1.9	0.65	0.038	0.076	0.196	0.078	0.038	0.096
300	12	792	3.11	0.044	2.5	0.85	0.05	0.1	0.25	0.1	0.05	0.125
350	14	1260	3.64	0.049		1.13	0.067	0.067	0.34	0.13	0.067	0.17
400	16	1440	3.18	0.031		0.85	0.05	0.05	0.25	0.1	0.05	0.125
500	20	2016	2.85	0.019		0.68	0.04	4.04	0.2	0.08	0.04	0.1

注:

①表中  $S_{mu}$  表示局部损失系数。

②350mm 以上的泵,应用真空泵启动,一般不用底阀。

(2) 估算法求扬程损失:水泵的扬程损失与很多因素有关,计算繁复。现将根据型号水泵的中等流量计算的水管路及其各种附件的扬程损失,列于表 11—5。

当水泵流量与表中所列数值基本相符时,只要将表中各项的损失扬程相加即可。

当水泵流量与表中所列数值相差较大时,可将表中有关各项的损失扬程相加后,再乘以 $\left(\frac{\text{水泵流量}}{\text{表中流量}}\right)^2$ 。

**例 11—1** 已知一台水泵,水管直径为 200mm,水泵流量为 300t/h,管路长 20m,水泵附件中有底阀一个、逆止阀一个、45°弯管两个、闸门一个,试求该水泵系统的损失扬程。

**解** 根据已知条件与表 11—5 中第六栏数值较接近,先按此栏计算。

$$20\text{m 水管损失扬程 } 20 \times 0.048 = 0.96(\text{m})$$

$$\text{一个底阀损失扬程 } 1.5\text{m}$$

$$\text{一个逆止阀损失扬程 } 0.51\text{m}$$

$$\text{两个 } 45^\circ \text{ 弯管损失扬程 } 2 \times 0.03 = 0.06(\text{m})$$

$$\text{总损失扬程为 } 0.96 + 1.5 + 0.51 + 0.06 + 0.03 = 3.06(\text{m})$$

再按下式校正:

$$3.06 \times \left(\frac{300}{280}\right)^2 = 3.51(\text{m})$$

即总损失扬程为 3.51m。

测出实际扬程加上计算出来的损失扬程,就是所选择水泵的总扬程。

### 三、水泵轴功率、电动机功率及水泵效率的计算

#### 1. 水泵轴功率

$$N = \frac{N_{\text{轴}}}{\eta} = \frac{\gamma Q H}{1000\eta}$$

式中:  $N$ ——水泵轴功率(kW);

$\eta$ ——水泵效率,约为0.6~0.84,实际数值以制造厂提供的数据为准;

其它符号同前。

水泵轴功率还可写成以下形式

$$N = P_1 \eta_d \eta_t$$

式中: $P_1$ ——电动机输入功率(kW);

$\eta_d$ ——电动机效率;

$\eta_t$ ——传动装置效率,直接连接时, $\eta_t = 1$ 。

2. 电动机输入功率  $P_1$  见第十章第一节。

3. 水泵效率

$$\eta = \frac{N_{yz}}{N} \times 100\% = \frac{\gamma Q H}{1000 N} \times 100\% = \frac{\gamma Q H}{1000 P_1 \eta_d \eta_t} \times 100\%$$

4. 水泵用电体系效率

$$\eta_c = \frac{N_{yz}}{P_1} \times 100\% = \frac{\gamma Q H}{1000 P_1} \times 100\%$$

#### 四、水泵参数的换算

当实际转速与水泵额定转速不同时,为了便于和水泵的额定参数相比较,须按下列公式换算:

$$Q_0 = Q \frac{n_0}{n}, H_0 = H \left(\frac{n_0}{n}\right)^2, N_0 = N \left(\frac{n_0}{n}\right)^3$$

式中: $Q$ 、 $H$ 、 $N$ 、 $n$ ——水泵实测时的流量、扬程、轴功率和转速;

$Q_0$ 、 $H_0$ 、 $N_0$ ——换算到水泵额定转速  $n_0$  下的流量、扬程和轴功率。

#### 五、空调设备用水泵轴功率和送水量的计算

$$N = \frac{\gamma Q H}{1000 \eta}$$

$$Q = \frac{q_{w,j}/4.1868}{3600 \Delta t_w}$$

式中: $N$ ——水泵轴功率(kW);

$Q$ ——送水量( $m^3/s$ );



$H$ ——泵的扬程(m);

$q_{mf}$ ——室内全热负荷(kJ/h);

$\Delta t_w$ ——利用温差( $^{\circ}\text{C}$ );

其它符号同前。

**例 11—2** 有一活塞式水泵,向高度为 80m 处供水,排水量为  $108\text{m}^3/\text{h}$ ,泵效率为 0.8,水泵轴与电动机作硬性联结,转速为  $980\text{r}/\text{min}$ ,总水头损失为 14m。试选择电动机的容量(计算值)。

**解** 水的重度  $\gamma = 9810\text{N}/\text{m}^3$ ,排水量  $Q = 108\text{m}^3/\text{h} = 0.03\text{m}^3/\text{s}$ ,泵效率  $\eta = 0.8$ ,由于直接传动,故机械传动效率  $\eta_t = 1$ ,扬程  $H = 80 + 14 = 94(\text{m})$ 。

将以上参数代入下式,得电动机的输出功率(即电动机容量)为

$$P_2 = \frac{\gamma Q H}{1000 \eta \eta_t} = \frac{9810 \times 0.03 \times 94}{1000 \times 0.8 \times 1} = 34.6(\text{kW})$$

**例 11—3** 某水泵站的有效扬程为 150m,现要从下部贮水池中抽出  $5 \times 10^5\text{m}^3$  的水时,需消耗多少电能?设水泵效率为 80%,电动机效率为 92%。水泵与电动机为直接联结。假设排水时有效扬程与效率不变。

**解** 设有效扬程为  $H(\text{m})$ ,排水量为  $Q(\text{m}^3/\text{s})$ ,水泵效率为  $\eta$ ,电动机效率为  $\eta_d$ ,则电动机输入功率为

$$P_1 = \frac{\gamma Q H}{1000 \eta \eta_d}$$

设电动机运转  $t$  小时才能将贮水池中的水  $V = 5 \times 10^5\text{m}^3$  抽出,故

$$V = Q \cdot 3600t$$

将  $Q = \frac{V}{3600t}$  代入前式,得

$$P_1 = \frac{\gamma V H}{1000 \times 3600t \eta \eta_d}$$

所以运转  $t$  小时,抽出  $5 \times 10^5\text{m}^3$  水量所消耗的电能

$$A = P_1 t = \frac{\gamma V H}{1000 \times 3600 \eta \eta_i \eta_d}$$

$$= \frac{9810 \times 5 \times 10^5 \times 150}{1000 \times 3600 \times 0.8 \times 1 \times 0.92} = 2.78 \times 10^5 (\text{kWh})$$

## 第二节 水泵的选择

### 一、水泵选择的步骤和方法

选择水泵的型号、规格时,应先求出所需流量 $Q$ 和所需的扬程 $H$ ,然后再从产品样本中查出与此相应的水泵。所选择的水泵的流量和扬程均要大于或等于所需的流量和扬程。

#### 1. 所需流量的计算

可按第一节所介绍的方法计算,也可按下式估算:

$$Q = \frac{A}{t\beta}$$

式中: $Q$ ——流量( $\text{m}^3/\text{h}$ );

$A$ ——最大用水量( $\text{m}^3$ );

$t$ ——水泵每天轴水时间( $\text{h}$ );

$\beta$ ——水路系统有效利用系数。

#### 2. 所需扬程计算

可按第一节扬程计算公式计算。

#### 3. 水泵型号的选择

知道了所需流量和扬程后,就可从产品样本中查得合适的水泵。选择水泵及台数应根据经济、管理方便等原则综合考虑。

### 二、深井泵选择的步骤和方法

#### 1. 选择所需资料

(1) 测出井的实际深度 $H_s$ 、静水位 $H_0$ 、水深 $H$ 和井孔直径,如图 11-5 所示。

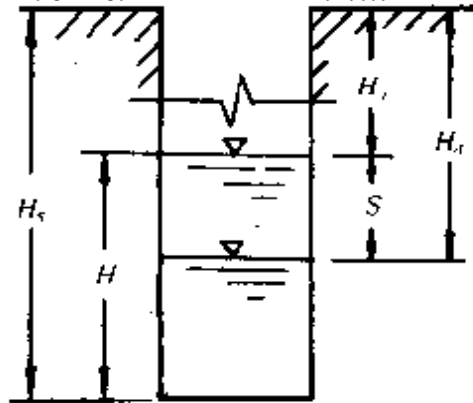


图 11-5 井的各种深度

(2) 根据抽水试验, 求出该井的最大可能出水量  $Q_{\max}$  和相应的最大水位降  $S_{\max}$ , 并求出单位流量时的水位降  $S_q$ , 即  $S_q = S_{\max} / Q_{\max}$ 。

如果缺乏准确的抽水试验资料, 也可按下式估算  $Q_{\max}$ :

$$Q_{\max} = \frac{(2H - S_{\max})S_{\max}}{(2H - S)S} Q$$

式中:  $H$ ——井中水深(m);

$Q$ ——一次抽水试验在水位稳定时, 井中的出水量 ( $\text{m}^3/\text{s}$ );

$S$ ——相应于  $Q$  时井中的水位降, 即静水位到稳定水位间的距离(m);

$S_{\max}$ ——井的最大水位降(m), 一般为  $H/2$ ;

$Q_{\max}$ ——相应于  $S_{\max}$  时的最大可能出水量 ( $\text{m}^3/\text{s}$ )。

## 2. 选择的步骤

(1) 确定深井泵的型号: 根据机井孔直径初步选定深井泵的型号。如井孔内径为 200mm 时, 只能选用 8JD 以下或 SD8 型深井泵。

(2) 求水位降: 根据所选型号, 参照产品样本, 查出其额定流量  $Q_e$ , 按下式求出此流量时的水位降:

$$S_M = S_q Q_e$$

式中:  $S_M$ ——水位降(m)。

同时,为了防止井中水位降落过大而造成井的坍塌或淤积, $S_M$  应满足  $S_M \leq H/2$  的条件。

(3) 求动水位深度:按下式求出相应的动水位深度:

$$H_d = H_i + S_M$$

(4) 算出深井泵在井中输水管的总长度:

$$L = H_d + (1 \sim 2)$$

式中: $L$ ——输水管的总长度(m)。

求得的  $L$  值不应大于该型号泵在产品样本中所给出的“输入管放入井口最大长度”

(5) 求总损失扬程:根据输水管直径和流量,从图 11—6 中查出每 10m 长输水管的摩擦损失  $h$  值,则输水管的总损失为

$$\Delta H_x = 0.1hL$$

式中: $\Delta H_x$ ——输水管总损失扬程(m)。

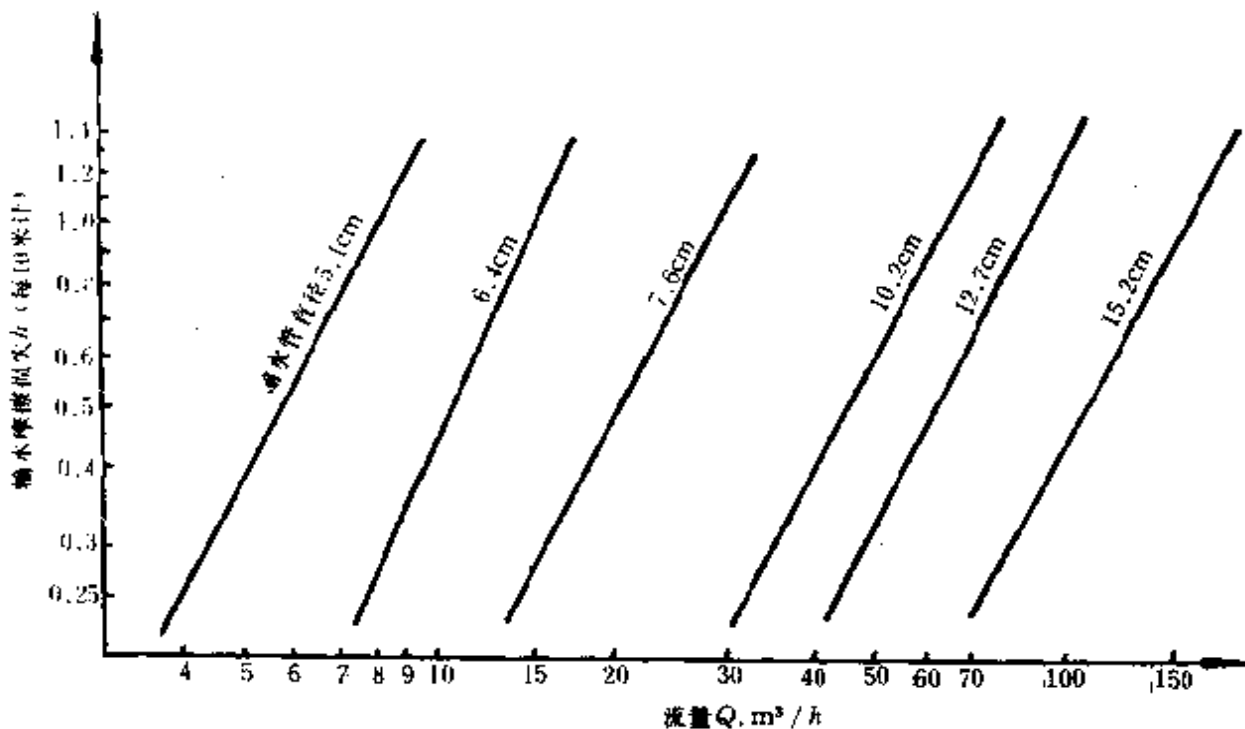


图 11 -6 深井泵输水管输水摩擦损失曲线

(6) 求提水所需扬程:

$$H_x = H_d + \Delta H_x$$

式中  $H_x$  是指深井泵扬水至井口地面所需的扬程。如果是将水抽至离地某高度时,则上式中还要加上高出地面一段的管路输水摩擦损失。

(7) 确定叶轮级数和水泵扬程:根据求出的  $H_x$ ,查产品样本,确定该泵叶轮的级数,使水泵的额定扬程不小于  $H_x$ ,即  $H_e = k_c H_x$ 。式中  $k_c$  为裕量系数,约 1.1 ~ 1.2。

**例 11—4** 某井深度  $H_s$  为 50m,静水位  $H_i$  为 20m,井孔直径为 150mm。已知当出水量  $Q$  为 30m<sup>3</sup>/h,相应的稳定水位降  $S$  为 6m,要求将水记到离地面  $H'$  为 5m 的水塔内。试选择合适的深井泵。

**解** (1) 最大可能出水量  $Q_{\max}$ :

$$\text{井中水深 } H = H_s - H_i = 50 - 20 = 30(\text{m})$$

$$\text{井的最大水位降 } S_{\max} = H/2 = 30/2 = 15(\text{m})$$

$$Q_{\max} = \frac{(2H - S_{\max})S_{\max}}{(2H - S)S} Q = \frac{(2 \times 30 - 15) \times 15}{(2 \times 30 - 6) \times 6} \times 30 \\ = 62.5(\text{m}^3/\text{h})$$

单位流量的水位降为

$$S_q = S_{\max}/Q_{\max} = 15/62.5 = 0.24$$

(2) 已知井孔直径为 150mm,初选一台 6JD56 型水泵,其流量为 56m<sup>3</sup>/h。

由于井中水位可能降落值为

$$S_M = S_q Q = 0.24 \times 56 = 13.4\text{m} < H/2 = 15(\text{m})$$

因此满足要求。

$$(3) \text{ 动水位深度 } H_d = H_i + S_M = 20 + 13.4 = 33.4(\text{m})$$

$$(4) \text{ 输水管总长 } L = H_d + (1 \sim 2) = 33.4 + 2 = 35.4(\text{m})$$

(5) 6JD 型水泵输水管直径为 115mm,当输送流量为 56m<sup>3</sup>/h 时,每 10m 管长摩擦损失由图 11—6 可查得为  $h = 0.75\text{m}$ ,故输水管总长为 35.4m 时的摩擦损失为

$$\Delta H_z = 0.1hL = 0.1 \times 0.75 \times 35.4 = 2.7(\text{m})$$

(6) 所需扬程:

$$H_z = H_d + \Delta H_z + H' = 33.4 + 2.7 + 5 = 41.1(\text{m}),$$

因此  $H_s = 1.1H_z = 1.1 \times 41.1 = 45.2(\text{m})$

查产品样本, 选用 8 级, 即 6JD56 × 8 型深井泵, 其扬程为 64m (> 41.1m), 流量为 56m<sup>3</sup>/h, 转速为 2900r/min, 轴功率为 14.38kW。

### 三、如何根据电动机的功率选配水泵

如果已有一台电动机, 欲配水泵使用, 可以按下列步骤进行选择:

1. 按下式估算出水泵的流量

$$Q = \frac{102\eta P_e}{k_c H}$$

式中:  $Q$ ——水泵的流量(m<sup>3</sup>/s);

$\eta$ ——欲配水泵的效率, 一般水泵取 0.6 ~ 0.84;

$P_e$ ——已有电动机的额定功率(kW);

$k_c$ ——裕量系数, 约 1.1 ~ 1.2;

$H$ ——水泵扬程(m), 可根据地形条件等初步确定。

2. 知道了扬程  $H$  和流量  $Q$ , 就可按前面介绍的方法初选水泵。

3. 根据初选水泵的性能再对上面估算的流量、效率等数据进行校对, 必要时再作一次精确的复选, 以选出较合理的泵型。

### 四、如何判断无铭牌离心泵的性能

先测量出水泵进口直径  $D$  和叶轮外径  $D_1$ , 再按下法估算出该水泵的流量、转速和扬程:

$$Q = 7.75 \times 10^{-3} D^2$$

$$H = 12 \times 10^{-4} n^2 D_1^2$$

式中:  $Q$ ——水泵的流量(m<sup>3</sup>/h);

$D$ ——水泵进口直径(mm)；

$H$ ——水泵的扬程(m)；

$n$ ——转速(r/min)，可由表 11—6 查出；

$D_1$ ——水泵叶轮外径(m)。

表 11· 6 水泵进口直径与转速的关系

水泵型式	单吸式离心泵		双吸式离心泵			
	进口直径 $D$ (mm)	100 以下 (4 英寸 以下)	150 ~ 200 (6 ~ 8 英寸)	200 以下 (8 英寸 以下)	250 ~ 356 (10 ~ 14 英寸)	508 ~ 610 (200 ~ 24 英寸)
转速 $n$ (r/min)	2900	1450	2900	1450	960	730

---

## 第十二章 起重机运输设备

### 第一节 起重机、提升机的简易计算

首先按简化公式初步确定电动机的功率;然后根据电动机工作状况(如负荷持续率、起动次数、传动惯量等)进行功率校正,最后选定电动机的功率。

#### 一、电动机功率初选

##### 1. 起重机电动机功率计算

##### (1) 起升机构电动机功率:

$$P_1 = \frac{Q_1 v_1}{6120 \eta_1}$$

式中:  $P_1$ ——起升机构电动机功率(kW);

$Q_1$ ——起升负荷重量(kg),包括吊具或取物装置自重;

$v_1$ ——提升速度(m/min);

$\eta_1$ ——起重机构总效率,一般为0.60~0.85。

##### (2) 横向走行机构电动机功率:

$$P_2 = \frac{f_2}{9.81} \cdot \frac{Q_2 v_2}{6120 \eta_2}$$

式中:  $P_2$ ——横行机构电动机功率(kW);

$f_2$ ——横行阻力系数,取245~343N/t;

$Q_2$ —— $Q_1$ 加上绞车重量(t);

$v_2$ ——横行速度(m/min);



$\eta_2$ ——机械效率,一般为 0.70 ~ 0.80。

(3) 走行机构电动机功率:

$$P_3 = \frac{f_3}{9.81} \cdot \frac{(Q_2 + Q_3)v_3}{6120\eta_3}$$

式中: $P_3$ ——走行机构电动机功率(kW);

$f_3$ ——走行阻力系数,取 226 ~ 324N/t;

$Q_3$ ——桁架重量(t);

$v_3$ ——走行速度(m/min);

$\eta_3$ ——机械效率,一般为 0.65 ~ 0.70。

(4) 旋转机构电动机功率:

$$P_4 = \frac{Q_4 v_4}{150000} \left[ v_4 + 40 \left( 1 + \frac{R}{r} \right) \right]$$

式中: $P_4$ ——旋转机构电动机功率(kW);

$Q_4$ ——重量(t);

$v_4$ ——悬臂端部周速,一般在 120m/min 以下;

$R$ ——旋转半径(m);

$r$ ——悬臂端半径(m)。

## 2. 提升机电动机初选功率计算

$$P = k \left( \frac{\mu Q v}{6120\eta} + P_0 \right)$$

式中: $P$ ——电动机初选功率(kW);

$k$ ——与增减速时所需转矩有关的系数,取 1.3 ~ 1.5;

$\mu$ ——与平衡重有关的系数,取 0.5 ~ 0.6;

$Q$ ——载重(kg);

$v$ ——提升速度(m/min);

$\eta$ ——提升机构总效率,齿轮式取 0.5 ~ 0.8;非齿轮式取 0.80 ~ 0.85;

$P_0$ ——空载运行输出,齿轮式取 2 ~ 4。

## 二、电动机功率的校正

### 1. 校正后的电动机功率 $P'$ 的计算

$$P' = \frac{P}{K_f K_z}$$

式中： $P$ ——电动机初选功率(kW)；

$K_f$ ——功率校正系数；

$K_z$ ——功率降低系数。

求得  $P'$  后，就可从产品样本中查得所需的电动机。

### 2. 功率校正系数 $K_f$ 的计算

(1) 先求出电动机的实际负载持续率：

$$FZ\% = \frac{\text{工作时间}}{\text{一个工作周期}} \times 100$$

(2) 再从图 12—1 的功率校正系数曲线中查得  $K_f$

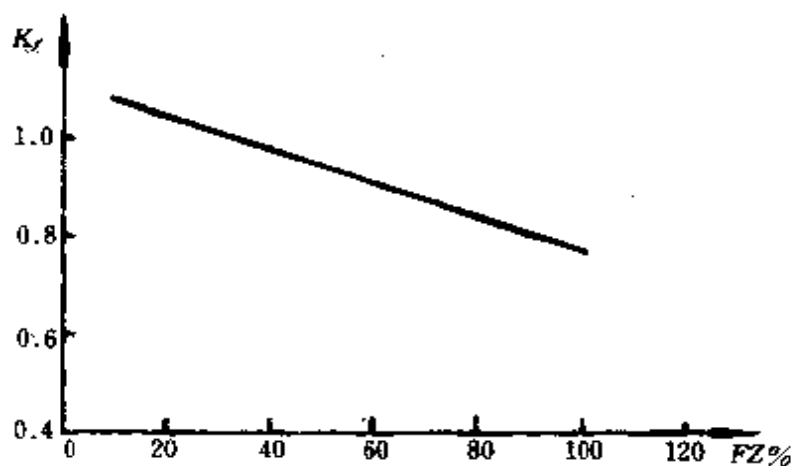


图 12-1 YZR 系列起重电动机的功率校正系数曲线

### 3. 功率降低系数 $K_z$ 的计算

(1) 先把一个工作周期内的点动、电制动和反转次数，折算成等效全起动次数，并求出等效全起动次数总和  $z$ 。

1 次点动 = 0.25 次全起动

1 次电制动 = 0.8 次全起动

1 次反转 = 1.8 次全起动

(2) 再按下式求出电机惯量增率  $C$ ：

$$C = \frac{GD_m^2 + GD_L^2}{DG_m^2}$$

式中  $GD_m^2$  —— 电动机的飞轮力矩 ( $\text{Nm}^2$ )；

$GD_L^2$  —— 折算到电动机轴上的全部负载飞轮力矩 ( $\text{Nm}^2$ )。

(3) 最后从图 12-2 的功率降低系数曲线中查得  $K_z$ 。

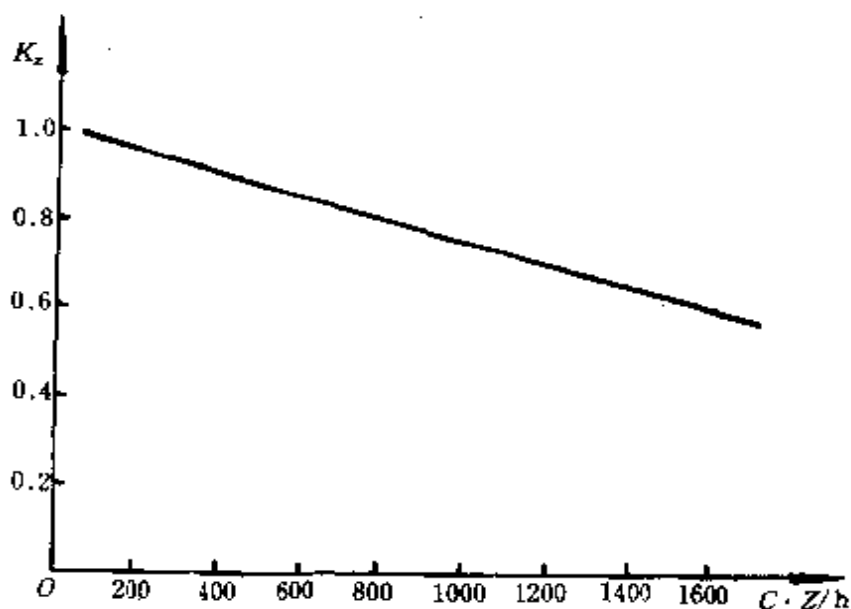


图 12-2 电动机功率降低系数曲线

**例 12-1** 试选择一台桥式起重机电动机。已知起升重量  $Q$  为 7.5t，提升速度  $v$  为 10m/min，起重电动机按断续周期性工作方式运行，一个工作周期内，工作 7.5min，停止 2.5min；1h 内电动机起动 500 次（其中全起动 150 次，点动 200 次，电制动 100 次，反转 50 次）；传动系统的惯量折算到电动机轴端为  $37\text{N} \cdot \text{m}^2$ 。

**解**

(1) 电动机初选功率：

$$P = \frac{Qv}{6120\eta} = \frac{7500 \times 10}{6120 \times 0.82} = 15(\text{kW})$$

(2) 求功率校正系数  $K_f$  :

$$\text{负载持续率 } FZ\% = \frac{7.5}{7.5 + 2.5} \times 100 = 75$$

查图 12-1, 得  $K_f = 0.875$

(3) 求功率降低系数  $K_z$  :

点动 200 次, 折算成全起动为  $0.25 \times 200 = 50$  次

电制动 100 次, 折算成全起动为  $0.8 \times 100 = 80$  次

全起动 50 次, 折算成全起动为  $1.8 \times 50 = 90$  次

全起动 150 次

共计全起动次数  $z = 370$  次

根据初选, 电动机功率为 15kW, 考虑到负荷持续率和起动次数较多, 估计电动机功率将在 20kW 左右。

查起动电动机的样本, YZR225M - 8 型电动机额定功率为 22kW, 其  $GD_m^2 = 31N \cdot m^2$ , 所以电动机惯量增率为

$$C = \frac{GD_m^2 + GD_i^2}{GD_m^2} = \frac{31 + 37}{31} = 2.2$$

所以,  $Z \cdot C = 370 \times 2.2 = 814(\text{次/h})$

查图 12-2, 得  $K_z = 0.8$

(4) 求校正功率  $P'$  :

$$P' = \frac{P}{K_f K_z} = \frac{15}{0.875 \times 0.8} = 21.43(\text{kW})$$

可见, YZR225M - 8 型起重电动机是恰当的。

## 第二节 输送机的计算

### 一、皮带输送机的计算

1. 电动机输入到输送机械的功率  $P_{st}$

$$P_{st} = P_d \eta_{is} \eta_{st}, P_d = \sqrt{3} UI \cos \varphi \eta_d \times 10^{-3}$$

式中： $P_d$ ——电动机输出功率(kW)，

$U$ ——电动机端子电压(V)；

$I$ ——电动机负荷电流(A)；

$\cos\varphi$ ——电动机功率因数；

$\eta_d$ ——电动机效率；

$\eta_b$ ——输送机减速机效率；

$\eta_r$ ——输送机齿轮传动效率。

## 2. 输送机输出功率 $P_{sc}$

$$P_{sc} = K(P_1 + P_2 + P_3 + P_4)$$

式中： $K$ ——工作条件系数，取 1.1 ~ 1.2。

(1) 提升物料所消耗的功率：

$$P_1 = \frac{QH}{367}$$

式中： $P_1$ ——提升物料所消耗的功率(kW)；

$Q$ ——运输能力(t/h)；

$H$ ——提升(垂直)高度(m)。

(2) 克服输送物料时摩擦阻力所消耗的功率：

$$P_2 = \frac{f_1 QL}{367}$$

式中： $P_2$ ——克服摩擦阻力所消耗的功率(kW)；

$f_1$ ——阻力系数，当皮带宽度  $B = 800\text{mm}$  时， $f_1 = 0.051$ ；

$L$ ——运输长度(m)。

(3) 克服空运输时牵引机构的阻力所消耗的功率：

$$P_3 = \frac{f_2 v L}{367}$$

式中： $P_3$ ——克服空运输时牵引机构的阻力所消耗的功率(kW)；

$f_2$ ——阻力系数,当  $B = 800\text{mm}$  时,  $f_2 = 4.75$ ;

$v$ ——移动速度(m/s)。

(4) 使卸装物料设备运转所消耗的功率  $P_4$ :

当  $B = 800\text{mm}$  时,  $P_4 \approx 2\text{kW}$

3. 皮带输送机的效率

$$\eta = \frac{P_{sc}}{P_{sr}} \times 100\% = \frac{K(P_1 + P_2 + P_3 + P_4)}{P_{sr}} \times 100\%$$

**例 12-2** 试求某输送原盐的皮带输送机的效率。已知实测数据如下: 运输能力  $Q$  为  $180\text{t/h}$ , 皮带移动速度  $v$  为  $0.38\text{m/s}$ , 提升(垂直)高度  $H$  为  $7.2\text{m}$ , 运输长度  $L$  为  $16.3\text{m}$ 。又测得电动机端子电压  $U$  为  $390\text{V}$ , 电流  $I$  为  $23\text{A}$ ,  $\cos\varphi$  为  $0.75$ , 设电动机效率  $\eta_d$  为  $0.85$ 。

**解**  $P_1 = \frac{QH}{367} = \frac{180 \times 7.2}{367} = 3.53(\text{kW})$

$$P_2 = \frac{f_1 QL}{367} = \frac{0.051 \times 180 \times 16.3}{367} = 0.408(\text{kW})$$

$$P_3 = \frac{f_2 v L}{367} = \frac{4.75 \times 0.38 \times 16.3}{367} = 0.08(\text{kW})$$

$$P_4 = 2\text{kW}$$

$$\begin{aligned} P_d &= \sqrt{3} UI \cos\varphi \eta_d \times 10^{-3} \\ &= \sqrt{3} \times 390 \times 23 \times 0.75 \times 0.85 \times 10^{-3} \\ &= 9.9(\text{kW}) \end{aligned}$$

$$P_{sr} = P_d \eta_{js} \eta_{rv} = 9.9 \times 0.98 \times 0.94 = 9.12(\text{kW})$$

皮带输送机的效率

$$\begin{aligned} \eta &= \frac{K(P_1 + P_2 + P_3 + P_4)}{P_{sr}} \\ &= \frac{1.2 \times (3.53 + 0.408 + 0.08 + 2)}{9.12} = 79.2\% \end{aligned}$$

## 二、其它输送设备电动机功率的计算

### 1. 斗式升运机电动机功率

$$P = \frac{KQH}{102\eta}$$

式中： $P$ ——电动机功率(kW)；

$K$ ——升运系数，取 0.28；

$Q$ ——升运能力(t/h)；

$H$ ——谷物被提升高度(m)；

$\eta$ ——总效率，取 0.4 ~ 0.7。

### 2. 刮板输送机电动机功率

$$P = \frac{K_1 Q (KL + H)}{102\eta}$$

式中： $P$ ——电动机功率(kW)；

$K_1$ ——综合起动系数，取 0.071；

$Q$ ——输送能力(t/h)；

$K$ ——总阻力系数，取 2；

$L$ 、 $H$ ——输送机长度和作物被提升高度(m)；

$\eta$ ——总效率。

### 3. 螺旋运输机电动机功率

$$P = \frac{KQL}{102\eta}$$

式中： $P$ ——电动机功率(kW)；

$K$ ——谷物摩擦系数，取 0.58

其它符号同前。

### 4. 电梯计算

(1) 重锤重量  $W_2$ ：

乘人用的电梯  $W_2 = W_1 + 0.4W_3$

载物用的电梯  $W_2 = W_1 + 0.5W_3$

式中： $W_1$ ——电梯室的重量(kg)；

$W_3$ ——电梯的积载容量(kg)。

(2) 提升电动机的功率  $P$ ：

$$P = \frac{KW_3v}{6120\eta} + P_0$$

式中： $P$ ——提升电动机功率(kW)；

$K$ ——重锤比率系数，只乘人用电梯时取 0.6；载物(人物共用)用电梯时取 0.5；

$v$ ——提升速度(m/min)，见表 12—1；

$\eta$ ——提升机效率，见表 12—2；

$P_0$ ——空载运行损耗，约 1.5 ~ 3.9kW。

表 12—1 按使用场所分的升降速度

使用场所	升降速度(m/min)	使用场所	升降速度(m/min)
一般办公单位	60 ~ 150	公寓	30 ~ 70
百货公司	60 ~ 120	旅馆	45 ~ 100
医院(病号用)	30 ~ 45	仓库(货物用)	20 ~ 45

按速度分类：

低速：15、20、30、45(m/min)

中速：60、75、90、105(m/min)

高速：120、150、180、210、240、300(m/min)

表 12—2 提升机效率  $\eta$  参考值

传动装置形式		$\eta$	传动装置形式		$\eta$
齿轮传动	半圆弧包角式	0.5 ~ 0.6	无齿轮传动	半圆弧包角式	0.85
	全圆弧包角式	0.4 ~ 0.55		全圆弧包角式	0.8



### 第三节 桥式起重机电缆、干线、滑线及 保护设备的选择

#### 一、桥式起重机工作电流的计算

起重设备通常在重复短时工作方式下运行,负荷电流采用均方根值。干线或主滑线上的计算电流按下述步骤计算:

1. 求电动机的均方根电流  $I_{jf}$

$$I_{jf} = I_e \sqrt{\frac{FZ\%}{10}}$$

式中:  $I_e$ ——电动机的额定电流(A);

$FZ\%$ ——负荷持续率百分数,若负荷持续率为15%,则公式中应以15代入。

2. 求电动机的平均电流  $I_p$

$$I_p = I_e \frac{FZ\%}{100}$$

3. 求一台或一组起重机的均方根电流  $I_{ajf}$

$$I_{ajf} = \sum I_p \sqrt{1 + \frac{a}{b}}$$
$$a = \sum I_{jf}^2 - \sum I_p^2, b = (\sum I_p)^2$$

式中:  $\sum I_{jf}^2$ 、 $\sum I_p^2$ ——接在干线或滑线上的电动机均方根电流之和和平均电流之和(A),当起重机轨道上只有一台起重机时,只计算该起重机的电流值;当在同一轨道上有一组起重机时,则应计算各起重机上所有电动机的电流值。

4. 求综合负载持续率  $FZ\%$  和系数  $K$

$$FZ\% = (\sum I_p / \sum I_e) \times 100$$

$$K_1 = I_{a3f} / \Sigma I_e$$

5. 从图 12 - 3 曲线中查出系数  $K_2$
6. 求出按照发热条件选择干线或滑线的计算电流  $I_{js}$

$$I_{js} = K_2 I_{a3f}$$

7. 确定电压损失用的最大电流  $I_{max}$

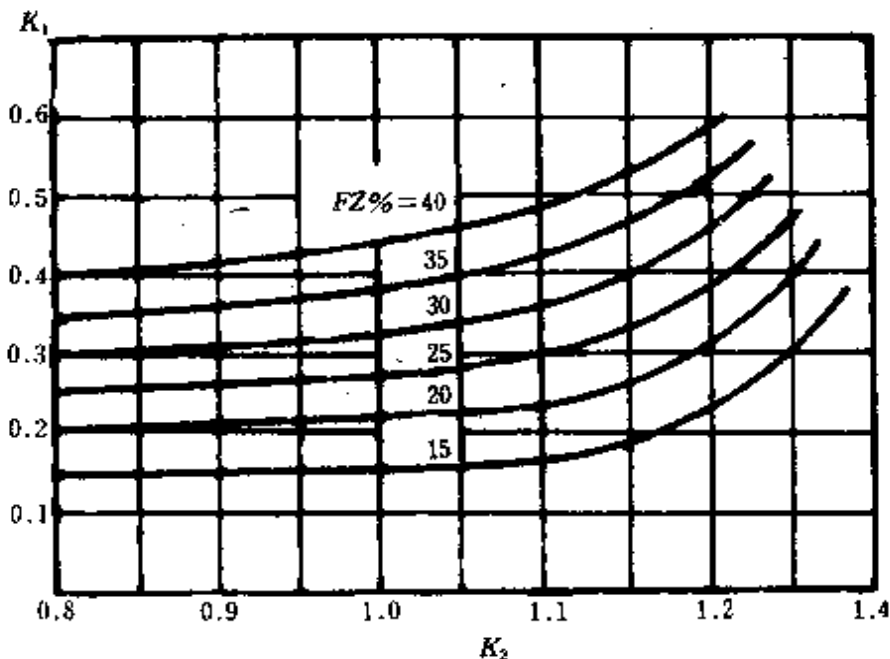


图 12 - 3 确定起重干线或机滑线负荷用的计算系数曲线

$$I_{max} = I_{js} + (k_q - 1) I_{e_{max}}$$

式中:  $k_q$  —— 最大功率电动机的起动电流倍数;

$I_{e_{max}}$  —— 最大功率电动机的额定电流(A)。

## 二、干线和滑线的选择

干线或滑线的截面按发热条件选择,用电压损失来校验。

### 1. 按发热条件选择

$$I_{js} \leq I_{ur}$$

式中:  $I_{js}$  —— 干线或滑线的计算电流(A);

$I_{ur}$  —— 已知截面和断面型式的干线(按表 7-27、表 7-28),或滑线按表 12-3 取得的长期允许负载电流(A)。

## 2. 按电压损失校验

(1) 直流线路的电压损失:

$$\Delta U = 2I_{\max}R_z l_{js}$$

式中:  $\Delta U$ ——电压损失(V);

$I_{\max}$ ——最大电流(A);

$R_z$ ——单位长度直流有效电阻( $\Omega/\text{km}$ );

$l_{js}$ ——干线或滑线计算长度(km),取  $l_{js} = 0.8l_{zc}$ ;

$l_{zc}$ ——干线或滑线最长回路的实际长(km),即从供电点至回路的终端。

(2) 单相交流线路的电压损失:

$$\Delta U = 2I_{\max}l_{js}(R_j \cos\varphi + X_j \sin\varphi)$$

式中:  $R_j$ ——单位长度电抗( $\Omega/\text{km}$ ),对钢导体为内电抗  $X_n$ ;

$\cos\varphi$ ——干线或滑线的负荷功率因数,对绕线型电动机为 0.65;对鼠笼型为 0.5;

其它符号同前。

(3) 三相交流线路的电压损失:

$$\Delta U = \sqrt{3} I_{\max} l_{js} (R_j \cos\varphi + X_j \sin\varphi)$$

式中:符号同前。

电压损失要求:自供电变压器的低压母线至起重机电动机端子的电压损失,在尖峰电流时,不宜超过额定电压的 15%,由于起重机内部电压损失约占 2~3%,电源线的电压损失约占 3~5%,因此起重机主滑线的电压损失不应大于 8~10%。

## 3. 按机械强度校验

(1) 干线强度计算:干线跨距不得大于以下计算值:

$$l_{\max} = \sqrt{\frac{K\sigma_s W}{172.6i_{\max}^2}}$$

式中:  $l_{\max}$ ——干线的最大跨距(cm);

$K$ ——系数,跨距数  $\leq 2$  时,  $K = 8$ ;跨距数  $> 2$  时,  $K = 10$ ;

$a$ ——相间距离(cm);

$\sigma_{al}$ ——允许应力(Pa)

$W$ ——母线截面系数( $\text{cm}^3$ ),可按表 7—32 中的公式计算;

$i_{ch}$ ——三相短路冲击电流或直流短路电流(kA)。

扁铝干线的最大跨距  $l_{max}$  与短路电流  $i_{ch}$  的关系,如图 12—4 所示。

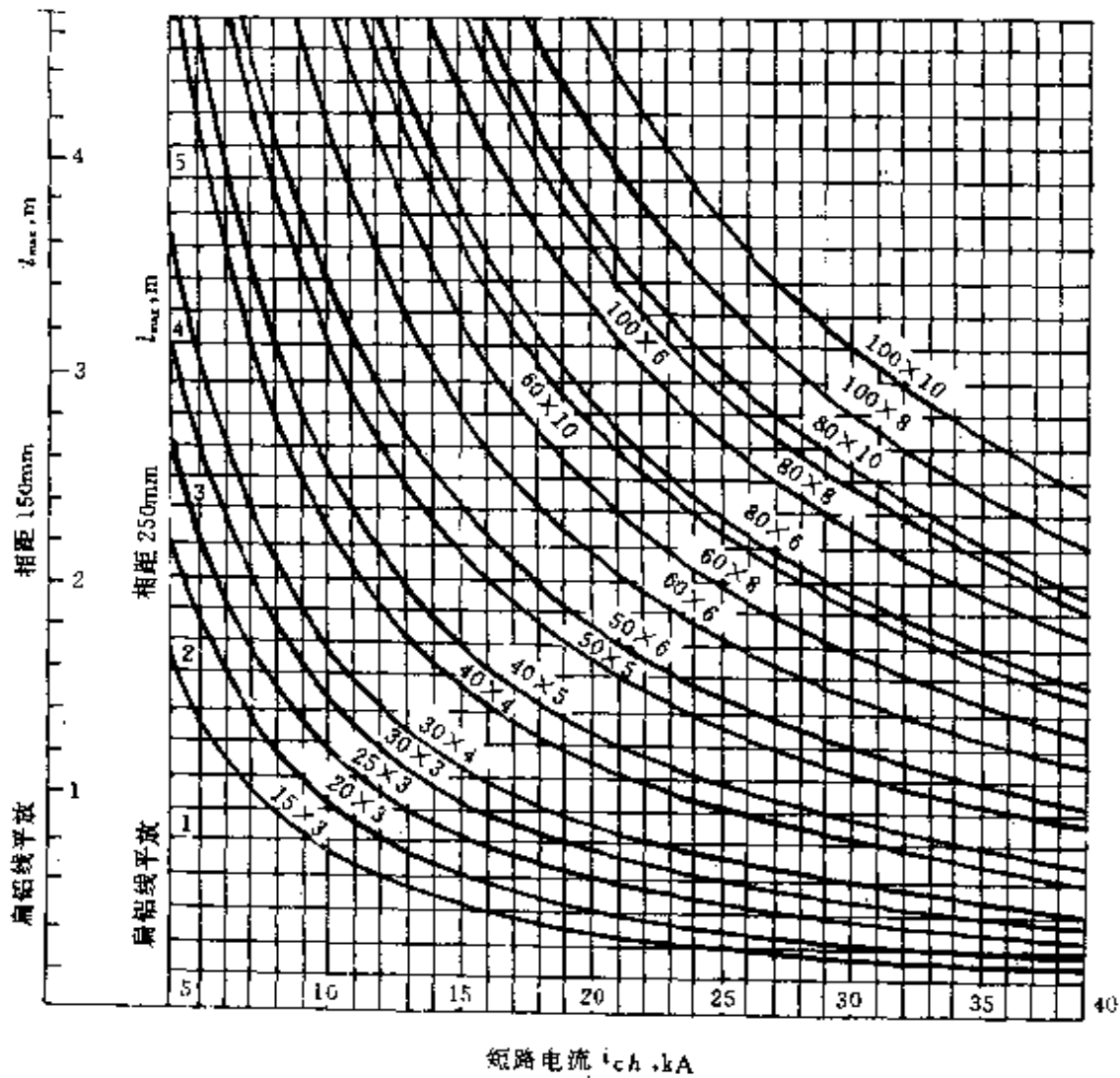


图 12-4 扁铝线最大允许跨距

实际上,厂房的柱距一般为 6m,因此干线支架的间距也为 6m。如机械强度不够时,可在干线两支点间增设干线夹,干线夹数量不应超过两个。

(2) 角钢滑线强度计算

角钢滑线的跨距可按下列公式计算:

$$M = \sigma_w W \times 10^{-4} = 9.81 \times \left( \frac{G_1 L}{8} + \frac{G_2 L^2}{12} \right) \times 10^{-4}$$

$$f = \frac{G_2 L + 2G_1}{39EJ} L^3$$

式中:  $M$ ——弯距(N·cm);

$f$ ——挠度(cm),不大于  $L/350$ ;

$G_1$ ——电刷重量,取  $G_1 = 17\text{kg}$ ;

$G_2$ ——滑线自重(kg/cm);

$L$ ——跨距(cm);

$E$ ——钢的弹性系数,  $E = 19.6 \times 10^6 \text{N/cm}^2$ ;

$J$ ——转动惯量( $\text{cm}^4$ );

其它符号同前。

由以上两式算出  $L$ ,取其中较小者作为规定的跨距长度。实际上,滑线跨距要结合厂房柱距考虑。当厂房柱距为 6m 时,滑线跨距为 3m。单轨电葫芦的滑线跨距在直线部分为 2m,在曲线部分为 1m 左右。

直流起重设备的滑线阻抗:对圆钢、扁钢及角钢(热轧钢)作成的滑线,电阻率  $\rho = 0.165\Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$ ,内电抗  $X_s = 0.564R_s$ ;对铁路钢轨作成的滑线,  $\rho = 0.23\Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$ ,  $X_s = 0.75R_s$ 。

扁铝线的电阻、电抗列于表 12-4;常用滑线型钢的  $R_s$ 、 $X_s$  值列于表 12-5~表 12-7。扁铝线在三相交流时的电压损失列于表 12-8;常用滑线型钢在三相交流时的电压损失列于表 12-9~表 12-11。

表 12-3 用作滑线的型钢技术数据

滑线型式	主要尺寸 (mm)	截 面 (mm <sup>2</sup> )	1m 的质量 (kg)	+ 25°C 时长期允许负载电流(A)		电 阻 (Ω/km)
				交流 50Hz	直 流	
圆 钢	φ6	28	0.222	30	43	5.1
	φ8	50	0.395	47	76	2.88
	φ10	78	0.617	57	103	1.85
扁 钢	30 × 8	240	1.88	152	280	0.60
	50 × 8	400	3.14	247	450	0.36
角 钢	25 × 25 × 4	186	1.46	147	222	0.78
	30 × 30 × 4	227	1.78	184	306	0.64
	40 × 40 × 4	308	2.42	247	410	0.47
	45 × 45 × 4	429	3.37	296	510	0.38
	50 × 50 × 5	480	3.77	328	566	0.30
	60 × 60 × 6	601	5.42	396	740	0.21
	65 × 65 × 8	987	7.75	450	922	0.147
	75 × 75 × 8	1150	9.03	518	1085	0.126
	75 × 75 × 10	1410	11.1	524	1180	0.103
	铁路狭轨类型	7	885	6.93	—	—
8		1076	8.42	—	—	0.186
11		1431	11.2	—	—	0.146
15		1880	14.72	—	—	0.106
18		2307	18.06	—	—	0.087
24		3270	24.04	—	—	0.061

注：表中所列长期允许负载电流系指周围空气温度为 + 25°C、最高发热温度达 + 70°C 而言。

扁铝线的电阻和电抗

表 12—4

规格(mm)	截面(mm <sup>2</sup> )	电阻(Ω/km)	电 抗(Ω/km)		重量(kg/m)
			相距 250(mm) 平放	相距 150(mm) 平放	
15 × 3	45	0.74	0.230	0.198	0.12
20 × 3	60	0.556	0.214	0.181	0.16
25 × 3	75	0.444	0.201	0.168	0.2
30 × 3	90	0.37	0.189	0.157	0.24
30 × 4	120	0.278	0.186	0.156	0.32
40 × 4	160	0.208	0.172	0.140	0.43
40 × 5	200	0.167	0.171	0.139	0.54
50 × 5	250	0.133	0.157	0.125	0.68
50 × 6	300	0.111	0.156	0.124	0.81
60 × 6	360	0.093	0.146	0.114	0.97
60 × 8	480	0.070	0.145	0.113	1.3
60 × 10	600	0.056	0.144	0.112	1.62
80 × 6	480	0.070	0.129	0.097	1.3
80 × 8	640	0.052	0.128	0.096	1.73
80 × 10	800	0.042	0.127	0.095	2.16
100 × 6	600	0.056	0.116	0.084	1.62
100 × 8	800	0.042	0.115	0.083	2.16
100 × 10	1000	0.038	0.114	0.082	2.7
120 × 8	960	—	—	—	—
120 × 10	1200	—	—	—	—

表 12-5 圆钢、扁钢的有效电阻和内电抗( $\Omega/\text{km}$ )

电流密度 ( $\text{A}/\text{mm}^2$ )	圆 钢 (mm)				扁 钢 (mm)			
	$\phi 8$		$\phi 10$		$30 \times 8$		$50 \times 8$	
	$R_j$	$X_n$	$R_j$	$X_n$	$R_j$	$X_n$	$R_j$	$X_n$
0.15	13.2	7.45	9.9	5.6	3.9	2.2	2.5	1.4
0.20	12.7	7.15	9.6	5.4	3.7	2.1	2.4	1.35
0.25	12.25	6.9	9.2	5.2	3.6	2.04	2.2	1.25
0.30	11.75	6.65	8.8	5.0	3.4	1.9	2.1	1.2
0.35	11.35	6.4	8.5	4.8	3.2	1.8	2.0	1.1
0.40	11.1	6.25	8.25	4.65	3.1	1.75	1.9	1.1
0.50	10.4	5.9	7.8	4.4	-	-	-	-
0.60	10.0	5.65	7.5	4.25	-	-	-	-
0.80	9.5	5.4	7.15	4.05	-	-	-	-
1.0	9.2	5.2	7.0	3.95	-	-	-	-
1.2	9.0	5.1	-	-	-	-	-	-







表 12—8 扁铝线在三相交流时的电压损失(V/km)

电 流 (A)	扁 铝 线 规 格																		
	15 × 3		20 × 3		25 × 3		30 × 3		30 × 4		40 × 4		40 × 5		50 × 5		50 × 6		
	0.5	0.65	0.5	0.65	0.5	0.65	0.5	0.65	0.5	0.65	0.5	0.65	0.5	0.65	0.5	0.65	0.5	0.65	
49	50	54	40	43	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
100	98	108	80	86	68	72	60	63	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
150	147	162	120	129	102	108	90	94	78	81	66	66	—	—	—	—	—	—	—
200	—	—	160	172	136	144	120	126	104	108	88	88	80	70	69	—	—	—	—
250	—	—	—	—	170	180	150	156	130	135	110	110	100	88	67	83	80	—	—
300	—	—	—	—	—	—	180	190	156	162	131	133	120	105	104	99	96	—	—
350	—	—	—	—	—	—	—	—	182	189	153	155	140	123	121	116	112	—	—
400	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	175	177	160	140	138	132	128	—	—
450	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	197	199	180	158	156	149	144	—	—
500	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	200	173	165	160	—	—	—
650	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	228	232	214	232	—	—
750	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	248	248	—	—

(续表)

电 流 (A)	扁 铝 线 规 格																											
	60 × 6			60 × 8			60 × 10			80 × 6			80 × 8			80 × 10			100 × 6			100 × 8			100 × 10			
	0.5	0.65	0.5	0.65	0.5	0.65	0.5	0.65	0.5	0.65	0.5	0.65	0.5	0.65	0.5	0.65	0.5	0.65	0.5	0.65	0.5	0.65	0.5	0.65	0.5	0.65	0.5	
300	90	89	83	81	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
350	105	103	97	95	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
400	120	118	111	108	106	93	102	99	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
500	150	148	139	135	132	116	127	124	119	114	107	113	107	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
600	180	178	167	162	158	139	152	149	142	136	129	136	129	133	129	119	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
700	210	207	195	189	185	162	178	174	166	159	150	159	150	155	151	146	139	143	135	—	—	—	—	—	—	—	—	—
800	240	237	222	216	211	185	203	199	190	182	172	181	172	178	173	167	159	163	154	—	—	—	—	—	—	—	—	—
900	270	266	250	243	238	208	229	224	213	204	193	204	193	200	194	188	179	183	174	—	—	—	—	—	—	—	—	—
1000	—	—	278	270	264	232	254	249	237	227	214	227	214	222	216	209	199	204	193	—	—	—	—	—	—	—	—	—
1200	—	—	334	324	317	278	305	298	284	272	257	272	257	266	259	251	238	245	231	—	—	—	—	—	—	—	—	—
1400	—	—	—	—	—	—	—	—	332	318	300	318	300	311	302	292	278	285	270	—	—	—	—	—	—	—	—	—
1600	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	355	345	334	318	326	309	—	—	—	—	—	—	—	—	—

注：上述数值为扁铝线相距 250mm 时的值。

表 12—9 圆钢、扁钢作成的滑线在三相交流电时的电压损失(V/km)

电 流 (A)	圆 钢 (mm)		扁 钢 (mm)		功 率 因 数							
	φ8		φ10		30 × 8		50 × 8		0.65		0.65	
	0.5	0.65	0.5	0.65	0.5	0.65	0.5	0.65	0.5	0.65	0.5	0.65
10	216	226	169	181	50	54	39	42	39	42	39	42
20	379	415	314	343	127	139	73	80	73	80	73	80
30	513	560	421	464	204	224	120	131	120	131	120	131
40	617	720	534	584	252	287	178	195	178	195	178	195
50	735	860	642	704	309	359	218	240	218	240	218	240
60	906	1020	733	803	373	408	253	277	253	277	253	277
70	—	—	845	920	406	445	294	322	294	322	294	322
80	—	—	—	—	440	480	329	358	329	358	329	358
90	—	—	—	—	—	—	345	386	345	386	345	386
100	—	—	—	—	—	—	379	405	379	405	379	405
120	—	—	—	—	—	—	431	473	431	473	431	473
140	—	—	—	—	—	—	480	525	480	525	480	525
160	—	—	—	—	—	—	524	572	524	572	524	572

表 12-10 铁轨作成的滑线在三相交流时的电压损失(V/km)

电 流 (A)	铁 轨 类 型											
	7		8		11		15		18		24	
	0.5	0.65	0.5	0.65	0.5	0.65	0.5	0.65	0.5	0.65	0.5	0.65
功 率 因 数												
300	520	552	497	525	—	—	—	—	—	—	—	—
350	592	630	566	600	465	494	398	422	—	—	—	—
400	660	760	630	665	520	552	448	476	417	442	358	380
500	788	838	755	800	625	665	540	574	508	540	446	474
600	915	970	873	925	725	770	625	664	590	525	522	555
700	1040	1100	985	1045	825	875	712	756	670	712	592	627
800	1130	1200	1070	1130	910	965	786	835	742	786	652	692
900	—	—	1150	1220	990	1050	860	910	810	860	720	765
1000	—	—	—	—	1060	1130	925	980	870	925	780	830
1200	—	—	—	—	—	—	1055	1120	955	1055	884	938
1400	—	—	—	—	—	—	—	—	1110	1175	982	1040
1600	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	1075	1140

表 12-11 角铁作成的滑线在三相交流时的电压损失(V/km)

电 流 (A)	角 钢 尺 寸																		
	25×25×3		30×30×4		40×40×4		45×45×5		50×50×5		60×60×6		65×65×8		75×75×8		75×75×10		
	0.5	0.65	0.5	0.65	0.5	0.65	0.5	0.65	0.5	0.65	0.5	0.65	0.5	0.65	0.5	0.65	0.5	0.65	
100	474	515	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
125	550	600	460	500	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
150	625	690	520	570	420	450	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
175	700	760	575	630	470	512	418	456	390	425	—	—	—	—	—	—	—	—	—
200	770	835	630	690	520	566	460	502	425	465	—	—	—	—	—	—	—	—	—
250	900	975	735	809	616	670	540	592	495	540	428	468	430	—	—	—	—	—	—
300	1020	1100	835	905	686	748	608	665	556	608	482	525	482	442	436	390	424	—	—
350	—	—	930	1005	752	820	672	732	610	665	538	585	535	490	480	430	470	—	—
400	—	—	1020	1100	824	900	740	802	670	730	588	642	585	534	520	464	506	—	—
500	—	—	—	—	980	1070	858	935	770	890	682	745	675	618	600	525	572	—	—
600	—	—	—	—	—	—	968	1060	885	960	760	828	760	695	675	600	655	—	—
750	—	—	—	—	—	—	—	—	1025	1120	870	950	875	800	722	686	755	—	—
900	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	900	1080	980	818	805	880	—	—	—
1100	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	942	1030	980	—	—	—

### 三、保护设备及电源线的选择

#### 1. 熔断器选择

$$I_{er} \geq I_{\max}/2$$

式中： $I_{er}$ ——熔断器熔件的额定电流；

$I_{\max}$ ——同前。

#### 2. 自动空气开关瞬时脱扣器整定值 $I_{zd}$

$$I_{zd} \geq K_k I_{\max}$$

式中： $K_k$ ——可靠系数。

#### 3. 连接线电缆及导线的选择

连接线电缆及导线的截面按发热条件选择，用电压损失来校验。

按电压损失校验时，三相交流导线的截面为

$$S = \frac{173 I_{\max} l}{\gamma u \% \cdot U \cos \varphi}$$

式中： $S$ ——导线截面( $\text{mm}^2$ )；

$l$ ——单根导线的长度(m)；

$\gamma$ ——导线的电导率( $\text{S} \cdot \text{m}/\text{mm}^2$ )，铜导线为 57，铝导线为 34.5；

$u\%$ ——允许电压损失的百分数，以 5 ~ 7% 为宜；

$U$ ——线路电压(V)；

$\cos \varphi$ ——功率因数，对绕线型电动机为 0.65，对鼠笼型电动机为 0.5。

计算接到单独电动机上的导线时，上式的  $I_{\max} = I_e$  ( $I_e$  为电动机额定电流)；计算接到一组电动机的导线时， $I_{\max} = I_{js} + (k_q - 1)I_{e, \max}$ 。

### 四、电力拖动系统负载转矩和飞轮质量的折算

#### 1. 电力拖动系统中常用的运动方程式

$$M - M_z = \frac{GD^2}{375} \cdot \frac{dn}{dt}$$



由上式可见,当电动机转矩  $M$  大于负载转矩  $M_z$  时,  $dn/dt > 0$ , 系统加速运转; 当  $M < M_z$  时,  $dn/dt < 0$ , 系统减速运转; 当  $M = M_z$  时,  $dn/dt = 0$ , 系统处于稳定运行状态或静止状态。

### 2. 负载转矩 $M_z$ 的折算

上述方程式中的负载转矩  $M_z$ 、飞轮惯量  $DG^2$  都为同一轴上的值。如果生产机械为多轴系统, 则必须将这两个量折算到同一轴上。通常都是将它们折算到电动机轴上。

(1) 对于图 12—5(a) 所示的多轴运动系统: 折算后的单轴运动系统如图 12—5(b) 所示, 折算前后功率相等。

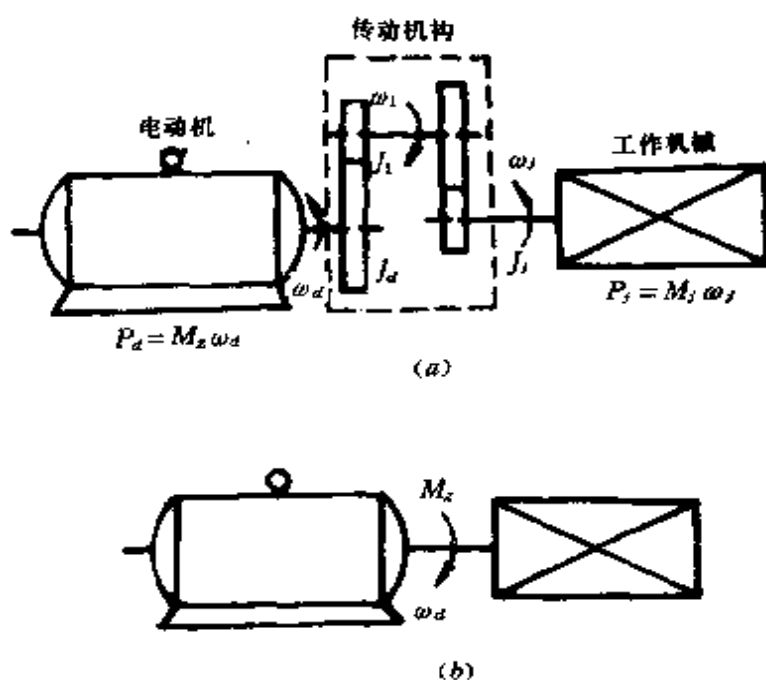


图 12—5 多轴系统与单轴系统

若不考虑传动机构损耗, 则有

$$P_j = P_d; M_j \omega_j = M_z \omega_d$$

得电动机轴上的负载转矩(即折算到电动机轴上的阻转矩)为

$$M_z = \frac{M_j \omega_j}{\omega_d} = \frac{M_j}{n_i}$$

式中： $M_z$ ——折算到电动机轴上的阻转矩(N·m)；

$P_j$ ——生产机械轴上的功率(kW)；

$P_d$ ——电动机轴上的功率(kW)；

$M_j$ ——生产机械轴上的负载转矩(N·m)；

$\omega_j$ ——生产机械轴上的角速度(rad/s)；

$\omega_d$ ——电动机轴上的角速度(rad/s)；

$n_i$ ——传动机构的速比，

$$n_i = \omega_d / \omega_j。$$

实际上，传动机构在传递功率的过程中是有损耗的，故传动效率

$$\eta_i = P_{sc} / P_{sr}$$

式中： $P_{sc}$ ——输出功率(kW)；

$P_{sr}$ ——输入功率(kW)；

功率传递方向不同，负载转矩的折算公式也不同，有以下几种情况：

① 电动机拖动生产机械运行，功率由电动机传递给生产机械，损耗功率由电动机付出。

这时对传动机构而言， $P_{sr} = P_d$ ， $P_{sc} = P_j$ ，故

$$\eta_i = \frac{P_j}{P_d} = \frac{M_j \omega_j}{M_z \omega_d}$$

折算到电动机轴上的负载转矩

$$M_z = \frac{M_j \omega_j}{\eta_i \omega_d} = \frac{M_j}{\eta_i n_i}$$

② 生产机械带动电动机运行(如起重机放下重物时)，功率由生产机械传递给电动机，损耗功率由生产机械付出。

这时， $P_{sr} = P_j$ ， $P_{sc} = P_d$ ，故

$$\eta'_i = \frac{P_d}{P_j} = \frac{M_z \omega_d}{M_j \omega_j}$$

折算到电动机轴上的负载转矩为

$$M'_z = \frac{M_z}{\eta_z} \eta'_z$$

上述公式中,  $\eta_z$  为传动机构的传动效率, 可以从有关工程手册中查得。而  $\eta'_z$  与  $\eta_z$  不同, 它主要是传动机构的形式所决定的。近似计算时

$$\eta'_z = 2 - 1/\eta_z$$

(2) 对于图 12—6 所示的电动起重机: 这是一部分运动部件作旋转运动, 而另一部分作直线运动的生产机械。

① 重物上升, 功率由电动机传递给生产机械, 则

$$M_z = 9.55 \frac{Fv}{\eta_z n}$$

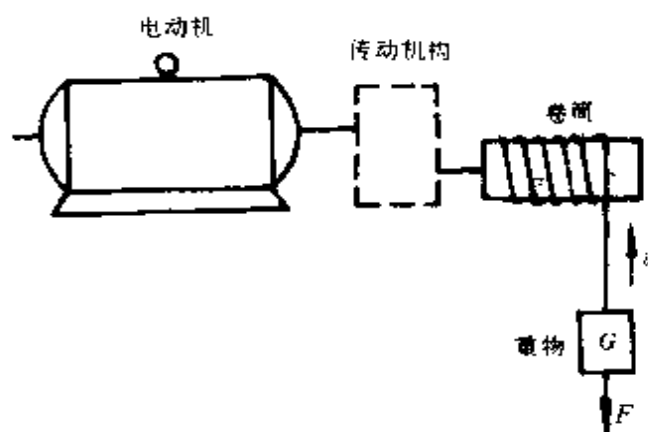


图 12—6 电动起重机构示意图

② 重物下降, 功率由生产机械传递给电动机, 则

$$M'_z = 9.55 \frac{Fv}{n} \eta'_z$$

式中:  $F$ ——生产机械直线运动部件的负载力(N);

$v$ ——运动速度(m/s);

$n$ ——电动机转速(r/min);

$\eta_z, \eta'_z$ ——同前。

### 3. 飞轮惯量 $GD^2$ 的折算

即转动惯量  $J$  的折算。折算原则是折算前后系统贮藏的总

动能不变。

(1) 如图 12-5(a) 情况: 设电动机轴、中间传动轴和机械轴的转动惯量分别为  $J_d$ 、 $J_1$  和  $J_j$ , 角速度分别为  $\omega_d$ 、 $\omega_1$  和  $\omega_j$ , 系统所贮藏的总动能是

$$A = J_d \frac{\omega_d^2}{2} + J_1 \frac{\omega_1^2}{2} + J_j \frac{\omega_j^2}{2}$$

设系统折算到电动机轴上的总转动惯量为  $J_\Sigma$ , 则

$$\begin{aligned} J_\Sigma \frac{\omega_d^2}{2} &= J_d \frac{\omega_d^2}{2} + J_1 \frac{\omega_1^2}{2} + J_j \frac{\omega_j^2}{2} \\ J_\Sigma &= J_d + \frac{J_1}{(\omega_d/\omega_1)^2} + \frac{J_j}{(\omega_d/\omega_j)^2} \\ &= J_d + \frac{J_1}{n_1^2} + \frac{J_j}{n_j^2} \end{aligned}$$

式中:  $n_1$  —— 电动机轴与中间传动轴之间的速比;

$n_j$  —— 电动机轴与生产机械轴之间的速比。

在工程计算中习惯用飞轮惯量  $GD^2 (\text{N} \cdot \text{m}^2)$ , 它与转动惯量之间的关系是  $J = GD^2/4g$  (式中  $g$  为重力加速度, 取  $9.81 \text{m/s}^2$ )。因此总的飞轮惯量为

$$GD_\Sigma^2 = GD_d^2 + \frac{GD^2}{n_1^2} + \frac{GD^2}{n_j^2}$$

如果减速机构为  $m$  级, 则

$$GD_\Sigma^2 = GD_d^2 + \frac{GD^2}{n_1^2} + \dots + \frac{GD_{m-1}^2}{n_{m-1}^2} + \frac{GD_m^2}{n_j^2}$$

式中:  $GD_\Sigma^2$  —— 总飞轮惯量 ( $\text{N} \cdot \text{m}^2$ )。

(2) 如图 12-6 情况: 这时, 直线运动部件的质量也应折算为电动机轴上的飞轮惯量:  $GD_i^2$ :

$$GD_i^2 = 365 \frac{Gv^2}{n^2}$$

式中： $GD^2$ ——飞轮惯量( $N \cdot m^2$ )；

$G$ ——直线运动部件的重量(kg)；

$v$ ——运动速度(m/s)；

$n$ ——电动机转速(r/min)。

### 第四节 吊装用具计算

#### 一、麻绳、钢丝绳计算

##### 1. 麻绳的允许拉力计算

$$F = \frac{\pi d^2}{4} \sigma_{ux}$$

式中： $F$ ——允许拉力(N)；

$d$ ——麻绳直径(mm)；

$\sigma_{ux}$ ——麻绳的允许拉应力( $N \cdot cm^2$ )，可由表 12—12 查得。

表 12 12 麻绳(白棕绳)规格

圆周 (mm)	直径 (mm)	每卷(200m) 重量 (kg)	破断拉力 (N)	安全拉力(N)			最小滑轮直径 $D > 10d$ (mm)
				安全系数 3	安全系数 5	安全系数 6	
19	6	6.5	1960	657	392	324	100
25	8	10.5	3190	1060	638	530	100
32	11	17.0	5640	1870	1130	940	150
33	13	23.5	7850	2610	1570	1300	150
44	14	32.0	9320	3110	1860	1550	150
51	16	41.0	11280	3760	2260	1880	200

(续表)

绳径 (mm)	直径 (mm)	每卷(200m) 重量 (kg)	破断拉力 (N)	安全拉力(N)			最小滑轮直径 $D > 10d$ (mm)
				安全系数 3	安全系数 5	安全系数 6	
57	19	52.5	12750	4250	2550	2130	200
63	20	60.0	15700	5230	3140	2620	200
70	22	70.0	18150	6050	3630	3020	220
76	25	90.0	23540	7850	4410	3920	250
89	29	120	25510	8500	5100	4250	290
101	33	165	28450	9490	5690	4740	330
114	38	200	34330	11380	6870	5720	380
127	41	250	36790	12260	7360	6130	410
140	44	290	44150	14710	8830	7360	440
152	51	330	58860	19620	11770	9810	510
178	57	450	63770	21260	12750	10620	—
190	63	500	68670	22890	13730	11440	—

麻绳的允许拉应力在不同使用状态下有所不同:

- (1) 在潮湿状态下允许拉应力减小 50%。
- (2) 合用 2 根及 4 根麻绳时,其允许总拉力相应增加 2 倍及 4 倍。
- (3) 当麻绳之间成一角度时,其允许总拉力  $F_z$  为

$$F_z = KF_{z0}$$

式中:  $F_{z0}$  — 麻绳之间角度为  $0^\circ$  时的允许总拉力(N);

$K$  — 系数,麻绳之间的角度为  $60^\circ$  时取 0.87,  $90^\circ$  时

取 0.7

2. 钢丝绳的允许拉力的计算

$$F = F_d / K$$

式中： $F$ ——允许拉力(N)；

$F_d$ ——钢丝绳的破断拉力(N)；

$K$ ——综合安全系数，即安全系数 × 震动系数 × 过牵引张力系数，一般可取 4.5 ~ 5。

钢丝绳的允许拉力见表 12—13 和表 12—14。

钢丝绳结扣时，其允许拉应力减小 50%。

一般起重各种扎绳形状的安全拉力见表 12—15。

表 12—13 钢丝绳(6 股 61 丝绳芯)的规格





直径 (mm)		钢丝绳重量 (kg/m)	钢丝绳拉力强度极限(MPa)				
			1370	1470	1580	1670	1770
钢丝绳	钢丝	钢丝绳之破断拉力(kN) 不小于					
19.5	0.7	1.2	154	166	176	185	196
22	0.8	1.6	199	213	228	241	256
25	0.9	2.0	253	270	289	306	326
28	1	2.6	312	336	358	380	400
30	1.1	3.0	378	405	432	459	486
33.5	1.2	3.8	448	483	513	544	577
39	1.4	5.1	613	657	697	734	785
44.5	1.6	9.8	800	858	912	970	1015
50	1.8	8.4	1015	1089	1148	1226	1998

表 12-14 钢丝绳(6股19丝绳芯)的规格

直径 (mm)		钢丝绳重量 (kg/m)	钢丝绳拉力强度极限(MPa)						
			1280	1370	1470	1570	1670	1770	1860
钢丝绳	钢丝		钢丝绳之破断拉力(kN) 不小于						
7.7	0.5	0.2	—	26.5	27.5	29.4	31.2	33.0	34.8
9.2	0.6	0.29	34.7	37.3	39.9	42.8	45.3	48.1	50.6
11	0.7	0.4	47.6	51.3	54.9	58.6	62.3	66.0	69.6
12.5	0.8	0.52	61.8	66.7	71.7	76.5	80.4	85.8	90.3
14	0.9	0.65	79.5	84.9	90.7	97.1	103	109	116
15.5	1	0.81	97.6	105	112	120	128	133	142
17	1.1	0.92	117	126	135	144	152	163	171
18.5	1.2	1.2	140	150	161	172	182	193	204
20	1.3	1.3	164	176	189	205	214	227	239
21.5	1.4	1.6	190	205	220	234	249	262	279
23	1.5	1.8	219	235	252	269	287	303	320
25	1.6	2.1	247	268	286	305	326	343	363
26.5	1.7	2.4	281	302	324	345	367	389	410
28	1.8	2.6	315	338	363	387	412	436	459
31	2	3.1	387	418	447	477	507	538	567
34	2.2	3.8	469	505	542	579	613	650	—
37	2.4	4.6	560	602	645	687	733	775	—
40	2.6	5.4	657	706	755	807	858	909	—
43.5	2.8	6.3	761	819	878	937	991	1050	—
46.5	3	7.2	873	942	1010	1074	1143	1207	—



表 12—15 一般起重各种扎绳形状的安全拉力表

钢绳直径 mm	6 股 19 丝麻心钢绳的安全拉力(N)			
	吊 重 形 式			
				
8	4610	9610	7850	4610
9.5	8440	14720	12260	8440
11	11580	19620	16480	11580
13	14910	25510	21090	14910
14	17660	31390	25110	17660
16	22070	37770	31390	22070
19	31390	52970	44150	31390
22	41200	71610	58860	41200
26	53460	92210	75540	53460
28	67680	117720	96140	67680
31	83390	147150	117720	83390
35	98070	171680	140280	98070
37	113800	196200	161860	113800
39	127530	213860	181480	127530
42	151070	262610	213860	151070
44	158730	294300	240340	168730

二、轮鼓、滑轮计算

1. 轮鼓与滑轮的最小允许直径及钢丝绳的安全系数(表 12—6)

表 12—16 轮鼓与滑轮的最小允许直径及钢丝绳的安全系数值

起重机与起重机构的种类	传动类型与工作情况		轮鼓与滑轮的最小允许直径	允许的最小安全系数 $K$
1. 装在汽车履带车及轨道车上的起重机, 建筑的及临时工作的起重机与起重机构	人力传动		$D \geq 16d$	4.5
	机械传动	轻型	$D \geq 16d$	5.0
		中型	$D \geq 18d$	5.5
		重型	$D \geq 20d$	6.0
2. 所有其余的起重机与起重机构	人力传动		$D \geq 18d$	4.5
	机械传动	轻型	$D \geq 20d$	5.0
		中型	$D \geq 25d$	5.5
		重型	$D \geq 30d$	6.0
3. 起重量 1t 以内的绞车	人力传动		$D \geq 12d$	4.0
4. 有驾驶员的载荷升降机及旅客的升降机	机械	一个轮鼓的绞车	$D \geq 40d$	9.0
	传动	索动的滑车	$D \geq 40d$	12.0

注:  $d$ —钢丝绳的直径,  $D$ —轮鼓与滑轮的直径。

轻型  $FZ\% = 15$ , 指起重速度在 4m/min 以下。

中型  $FZ\% = 25$ , 指起重速度为 4 ~ 20m/min。

重型  $FZ\% = 40$ , 指起重速度为 20m/min 以上。

## 2. 滑轮计算

### (1) 单滑轮:

① 定滑轮:如图 12—7(a) 所示。

$$F = 9.81Q/\eta$$

式中:  $F$ ——所加拉力(N);

$Q$ ——荷重(kg);

$\eta$ ——定滑轮效率。

② 动滑轮:如图 12—7(b) 所示。

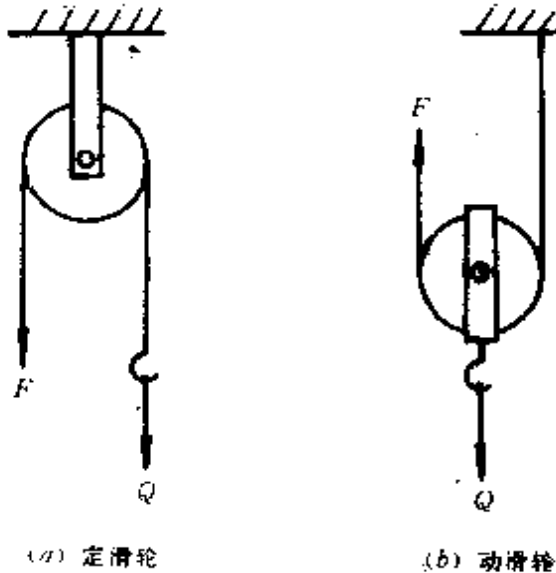


图 12 7 滑轮

$$F = \frac{9.81Q}{2\eta}$$

### (2) 滑轮组:

① 绳索牵引端从定滑轮引出:如图 12—8 所示。

$$F = \frac{9.81Q}{n\eta_c}$$

式中:  $n$ ——滑轮组的滑轮数;

$\eta_c$ ——滑轮组的综合效率。

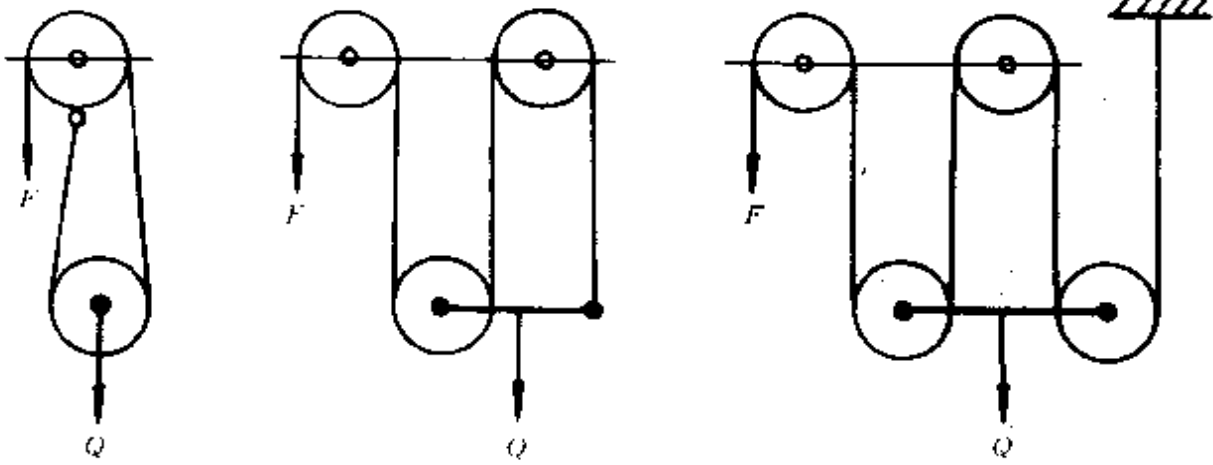


图 12-8 牵引端从定滑轮引出

② 绳索牵引端从动滑轮引出:如图 12-9 所示。

$$F = \frac{9.81Q}{(n+1)\eta_z}$$

滑轮组的主要性能见表 12-17 ~ 表 12-20。

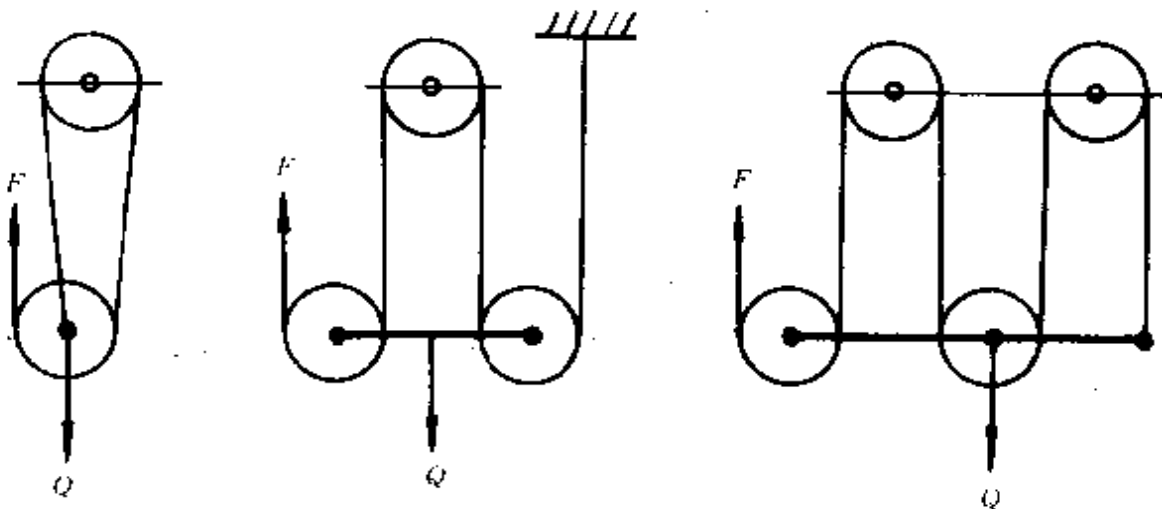


图 12-9 牵引端从动滑轮引出

表 12-17 牵引端从定滑轮引出的钢丝绳滑轮组的主要性能

滑轮数	1	2	3	4	5	6	7	8
滑轮组的 联结方式								
$\eta\%$	94	94	94	94	94	94	94	94
$\eta_z\%$	—	91.6	88.3	85	83.4	81	78.6	76.6
$F \times 9.81$	1.06Q	0.54Q	0.378Q	0.29Q	0.24Q	0.206Q	0.81Q	0.164Q
$\eta\%$	95	95	95	95	95	95	95	95
$\eta_z\%$	—	93	90	88	86	84	82	80
$F \times 9.81$	1.05Q	0.538Q	0.37Q	0.284Q	0.227Q	0.198Q	0.174Q	0.156Q
$\eta\%$	97	97	97	97	97	97	97	97
$\eta_z\%$	—	95	94.4	92.7	91.4	90	88.7	87.5
$F \times 9.81$	1.03Q	0.526Q	0.354Q	0.27Q	0.219Q	0.186Q	0.16Q	0.14Q
$\eta\%$	98	98	98	98	98	98	98	98
$\eta_z\%$	—	97.5	96.7	95	94	93.4	92.2	91.3
$F \times 9.81$	1.02	0.51Q	0.344Q	0.26Q	0.21Q	0.178Q	0.155Q	0.137Q

注： $\eta\%$ —滑轮组每个单滑轮的效率； $\eta_z\%$ —滑轮组的综合效率；  
 $F$ —提升时所需的拉力(N)； $Q$ —提升重量(kg)。

表 12-18 牵引端从动滑轮引出的麻绳滑轮组的主要性能

滑轮数	1	2	3	4	5	6	7	8
滑轮组的联结方式	同表 12-14	同表 12-14	同表 12-14	同表 12-14	同表 12-14	同表 12-14	同表 12-14	同表 12-14
$\eta\%$	85	85	85	85	85	85	85	85
$\eta_z\%$	—	85.8	72.9	67.6	63.1	58.8	55	51.5
$F \times 9.81$	0.54Q	0.388Q	0.457Q	0.369Q	0.317Q	0.283Q	0.259Q	0.243
$\eta\%$	86	86	86	86	86	86	86	86
$\eta_z\%$	—	86.6	74.5	69.5	65	60.9	57.2	53.8
$F \times 9.81$	0.538Q	0.385Q	0.447Q	0.359Q	0.307Q	0.273Q	0.249Q	0.232Q
$\eta\%$	87	87	87	87	87	87	87	87
$\eta_z\%$	—	87.7	76.1	71.5	67.2	63.2	59.6	56.1
$F \times 9.81$	0.535Q	0.38Q	0.438Q	0.349Q	0.297Q	0.264Q	0.239Q	0.223Q
$\eta\%$	88	88	88	88	88	88	88	88
$\eta_z\%$	—	88.6	78	73.5	69.4	65.6	62	58.8
$F \times 9.81$	0.531Q	0.376Q	0.427Q	0.34Q	0.288Q	0.254Q	0.23Q	0.212Q
$\eta\%$	92	92	92	92	92	92	92	92
$\eta_z\%$	—	92.5	85	81.5	78.6	75.6	72.8	70
$F \times 9.81$	0.52Q	0.36Q	0.392Q	0.307Q	0.254Q	0.22Q	0.196Q	0.178Q
$\eta\%$	93	93	93	93	93	93	93	93
$\eta_z\%$	—	93.4	86.6	84	81.1	78.4	75.7	73.2
$F \times 9.81$	0.518Q	0.357Q	0.385Q	0.297Q	0.246Q	0.212Q	0.189Q	0.171Q

表 12—19 牵引端从动滑轮引出的钢丝绳滑轮组的主要性能

滑轮数	1	2	3	4	5	6	7	8
滑轮组的 联结方式								
$\eta\%$	94	94	94	94	94	94	94	94
$\eta_2\%$	—	94	91.2	88.7	86.2	83.3	81.3	79.2
$F \times 9.81$	1.06Q	0.355Q	0.274Q	0.226Q	0.194Q	0.17Q	0.154Q	0.14Q
$\eta\%$	95	95	95	95	95	95	95	95
$\eta_2\%$	—	95.4	92.5	90.4	88.3	86.3	84.2	82.2
$F \times 9.81$	1.05Q	0.35Q	0.26Q	0.22Q	0.189Q	0.166Q	0.148Q	0.135Q
$\eta\%$	97	97	97	97	97	97	97	97
$\eta_2\%$	—	96.8	96	94	92.9	91.4	90	89
$F \times 9.81$	1.03Q	0.314Q	0.26Q	0.21Q	0.18Q	0.16Q	0.139Q	0.125Q
$\eta\%$	98	98	98	98	98	98	98	98
$\eta_2\%$	—	98.3	97.6	96	95	94.3	93.2	92.2
$F \times 9.81$	1.02Q	0.34Q	0.256Q	0.205Q	0.176Q	0.15Q	0.134Q	0.12Q

表 12—20 牵引端从定滑轮引出的麻绳滑轮组的主要性能

滑轮数	1	2	3	4	5	6	7	8
滑轮组的 联结方式	同表 12—16	同表 12—16	同表 12—16	同表 12—16	同表 12—16	同表 12—16	同表 12—16	同表 12—16
$\eta\%$	85	85	85	85	85	85	85	85
$\eta_z\%$	—	78.7	79.6	74.2	69.3	64.7	60.6	56.8
$F \times 9.81$	1.18Q	0.535Q	0.314Q	0.27Q	0.24Q	0.221Q	0.206Q	0.193Q
$\eta\%$	86	86	86	86	86	86	86	86
$\eta_z\%$	—	80	80.8	75.6	70.8	66.5	62.5	58.5
$F \times 9.81$	1.16Q	0.625Q	0.309Q	0.264Q	0.235Q	0.215Q	0.20Q	0.188Q
$\eta\%$	87	87	87	87	87	87	87	87
$\eta_z\%$	—	81.6	82.1	77.6	72.6	68.5	64.6	61
$F \times 9.81$	1.15Q	0.613Q	2.304Q	0.258Q	0.229Q	0.208Q	0.193Q	0.182Q
$\eta\%$	88	88	88	88	88	88	88	88
$\eta_z\%$	—	83	83.5	78.9	74.5	70.5	66.8	63.2
$F \times 9.81$	1.04Q	0.602Q	0.299Q	0.253Q	0.224Q	0.203Q	0.187Q	0.175Q
$\eta\%$	92	92	92	92	92	92	92	92
$\eta_z\%$	—	88.7	88.7	85.2	82.2	79	76.2	73.4
$F \times 9.81$	1.09Q	0.563Q	0.282Q	0.235Q	0.203Q	0.181Q	0.164Q	0.151Q
$\eta\%$	93	93	93	93	93	93	93	93
$\eta_z\%$	—	90	90	87.1	84.3	81.5	78.7	76.2
$F \times 9.81$	1.08Q	0.555Q	0.287Q	0.229Q	0.198Q	0.175Q	0.159Q	0.146Q



### 三、抱杆式起重杆的选择

#### 1. 单抱杆式起重杆的选择(表 12-21)

表 12-21 单抱杆式起重杆的选择

起重量 (t)	抱杆高度 (m)	抱杆顶部横断面直径(小头) (mm)	拖拉绳直径(倾斜 45° 时) (mm)	复式滑轮			绞车起重量 (t)	抱杆连接时的搭接长度 (m)
				钢丝绳直径 (mm)	滑轮数			
					上部	下部		
3	8.5	200	15.5	11.5	2	1	1	2.5 ~ 3
3	11.0	220	15.5	11.5	2	1	1	
3	13.0	220	15.5	11.5	2	1	1	
3	15.0	240	15.5	11.5	2	1	1	
5	8.5	240	15.5	15.5	2	1	3	3 ~ 3.5
5	11.0	250	20.0	15.5	2	1	3	
5	13.0	260	20.0	15.5	2	1	3	
5	15.0	270	20.0	15.5	2	1	3	
10	8.5	300	21.5	17.0	3	2	3	3.5 ~ 4
10	11.0	300	21.5	17.0	3	2	3	
10	13.0	310	31.5	17.0	3	2	3	
10	13.0	310	31.5	17.0	3	2	3	

注：抱杆采用落叶松圆木。

2. 人字抱杆式起重杆的选择(表 12—22)

表 12--22 人字抱杆式起重杆的选择

木杆长度(m)	小头直径(mm)	$\alpha$ 角及起重量(t)		
		75°	65°	55°
6	200	4	3.5	3
8	210	4	3.5	3
11	230	4	3.5	3
13	240	4	3.5	3
15	250	4	3.5	3
6	260	7.1	6.5	5.1
8	270	7.1	6.5	5.1
11	280	7.1	6.5	5.1
13	290	7.1	6.5	5.1
15	300	7.1	6.5	5.1
6	310	14.0	12.0	10.0
8	320	14.0	12.0	10.0
11	330	14.0	12.0	10.0
13	340	14.0	12.0	10.0

注:表中 $\alpha$ 角系抱杆与地面间之夹角。

## 第十三章 电加热

### 第一节 电热计算

#### 一、电热元件的计算

##### 1. 电热元件的选用

常用电热材料及元件不同品种的工作温度、特性及电阻率修正系数,见表 13—1~表 13—3。

##### 2. 电热元件温度和单位表面负荷的计算

电热元件温度,是指其长期工作的最高温度。表面负荷是电热元件表面积上所发出的功率数,单位为  $W/cm^2$ 。

(1)以辐射热交换为主的电热元件温度和允许表面负荷,见表 13—4。通常加热温度  $t_q \leq 300^\circ C$  时,电热元件温度  $t_j \leq 500^\circ C$ ;加热温度  $t_q = 400 \sim 500^\circ C$  时,电热元件温度  $t_j$  取  $600^\circ C$ ;加热温度  $t_q = 700^\circ C$  时,  $t_j$  取  $800^\circ C$ 。

电热元件表面负荷的选用还与电热设备的类型有关,见表 13—5。

(2)以对流热交换为主的电热元件的允许表面负荷,可根据气流速度  $v$ 、加热温度  $t_q$  和电热元件温度  $t_j$ ,由图 13—1 和图 13—2 查得。使用图 13—1 和图 13—2 应注意如下事项:

① 电热元件的允许表面负荷  $W_{xr}$ :

$$W_{xr} = W_c - W_R$$

式中:  $W_c$  —— 图中对流部分表面负荷 ( $W/cm^2$ );

$W_R$  —— 图中辐射部分表面负荷 ( $W/cm^2$ ),它有两个值,

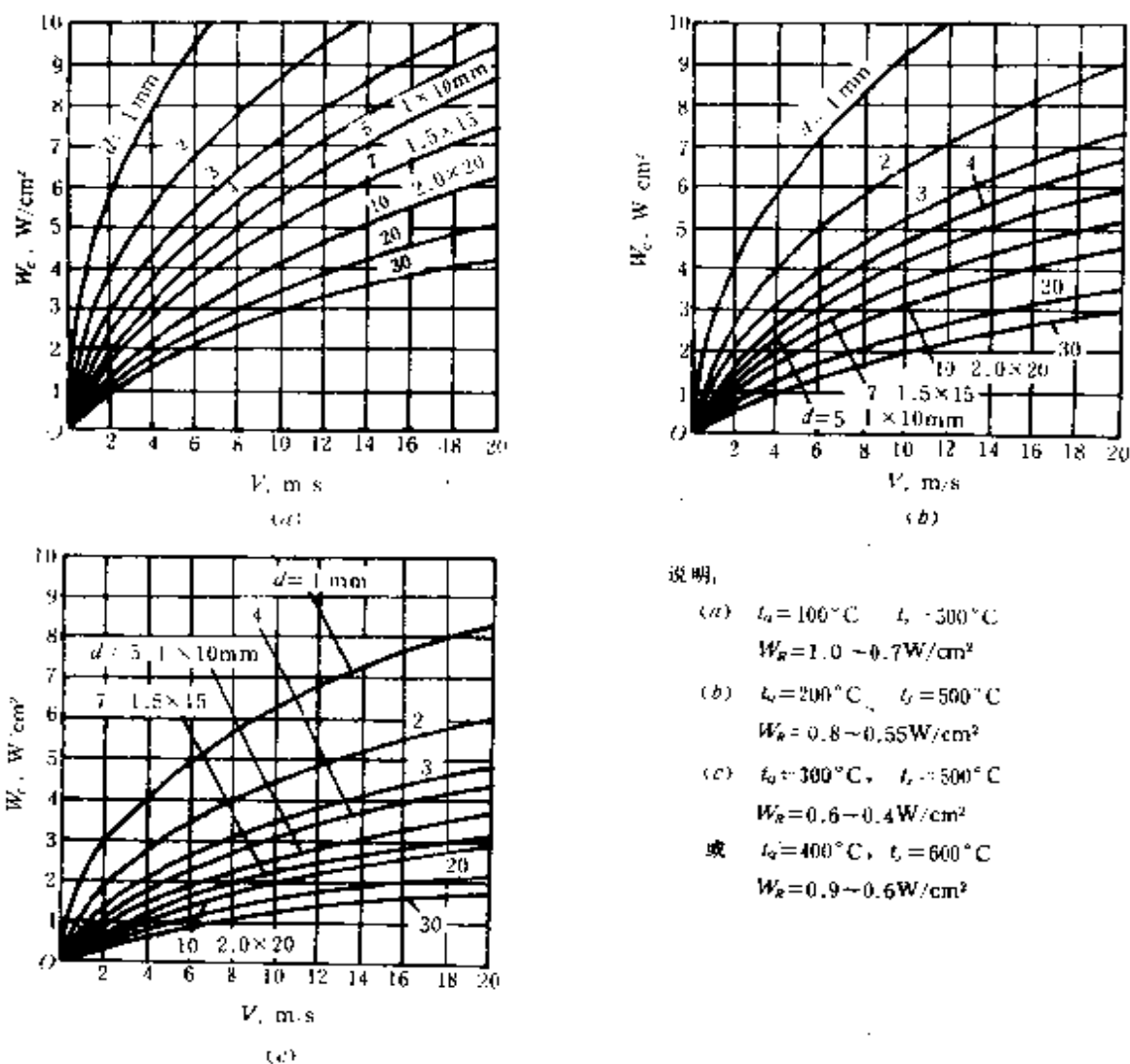


图 13-1 对流加热元件的表面负荷(一)

当电热元件与被加热炉料之间屏蔽少时,取较大值;反之,取较小值。

② 图中的  $d$ ,对于线材元件即为线径,对于带材则为当量直径  $d_e$ 。对于  $m = 10$  的带材,若宽面与气流方向平行,则  $d_e = 0.22l$ ;若宽面与气流方向垂直,则  $d_e = 0.32l$ 。其中  $l$  为带材截面的周长。

③ 该图是在气流流过的截面上除了线材或带材的发热部分外没有支撑结构和其它东西阻挡的情况下得出的。对于绕在

表 13-1 常用电热材料及元件的品种、工作温度和主要特点

类别	品 种		发热体工作温度 (°C)		主 要 特 点
			常 用	最 高	
材	镍铬合金	Cr20Ni80	1000 ~ 1050	1150	1. 高温强度较好, 适用于移动式设备上; 2. 基本上无磁性
		Cr15Ni60	900 ~ 950	1050	
	铁铬铝合金	1Cr13A14	900 ~ 950	1100	1. 价较廉; 2. 高温强度低, 适用于各种固定式设备; 3. 有磁性
0Cr13A16Mo2		1050 ~ 1200	1300		
0Cr25A15		1050 ~ 1200	1300		
0Cr27A17Mo2		1200 ~ 1300	1400		
料	高熔点纯金属	铂 P <sub>1</sub>	1300 ~ 1400	1600	1. 电阻率较低, 须配调压装置, 以防开始加热时电流过大; 2. 材料价高; 3. 适用于实验室或特殊电炉
		钼 M <sub>0</sub>		1800	
		钽 T <sub>a</sub>		2200	
		钨 W		2400	
	石墨 C			3000	1. 电阻率较低, 须配大电流低电压调压器; 2. 适用于真空或保护气氛中使用
元	硅碳棒 硅碳管 SiC		1250 ~ 1400	1500	1. 高温强度高; 2. 硬而脆; 3. 易老化, 电阻随使用时间延长而增大(须配调压装置)
	硅钼棒 M <sub>0</sub> Si <sub>2</sub>		1500 ~ 1600	1700	1. 无老化现象; 2. 须配调压装置, 以防开始加热时电流过大
件	管状电加热元件		500°C 以下 (介质温度)		1. 可直接在液体中加热; 2. 机械强度好

常用电热材料的物理及机械性能

表 13—2

性能	密度 (g/cm <sup>3</sup> )	线膨胀系数 (20~1000°C) (10 <sup>-5</sup> /°C)	比热 (J/g·°C)	导热系数 (KJ/m·h·°C)	熔点 约值 (°C)	抗张 强度 (MPa)	伸长率 (%)	反复 弯曲 次数	电阻率 (20°C) (Ω·mm <sup>2</sup> /m)
镍铬合金	Cr20Ni80	14	0.440	60.3	1400	637~785	≥20		1.09±0.05
	Cr15Ni60	13	0.461	45.2	1390	637~785	≥20		1.12±0.05
铁铬铝合金	1Cr13Al4	15.4	0.490	52.8	1450	588~735	≥12	≥5	1.26±0.08
	0Cr13Al6Mo2	7.2	0.494	49.0	1500	686~834	≥12	≥5	1.40±0.10
	0Cr25Al5	7.1	0.494	46.1	1500	637~785	≥12	≥5	1.40±0.10
	0Cr27AlMo2	7.1	0.494	45.2	1520	686~785	≥10	≥5	1.50±0.01

(续表)

性能	密度 (g/cm <sup>3</sup> )	线膨胀系数 (20~1000°C) (10 <sup>-6</sup> /°C)	比热 (J/g·°C)	导热系数 (KJ/m·h·°C)	熔点 约值 (°C)	抗张 强度 (MPa)	伸长率 (%)	反反 弯曲 次数	电阻率 (20°C) (Ω·mm <sup>2</sup> /m)
钨	21.5	8.9	0.133	248.7	1773	157~177			0.106
钨	10.2	6.1	0.314	527.5	2622	745~1177			0.0553
钨	16.6	6.5	0.142	195.9	2996	294~441			0.124
钨	19.3	5.9	0.142	466.8	3400	1079			0.0549
硅碳棒	3.1~3.2	5 (20~1500°C)	0.712	83.7		39~49 (抗折)			1000左右 (1400°C)
硅钼棒	5.3~5.5				2030	245~343 (抗弯)			0.25

表 13—3 常用电热材料在不同温度下的电阻率修正系数 C<sub>t</sub>

温度 (°C)		20	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000	1100
镍铬合金	Cr20Ni80	1.000	1.006	1.016	1.024	1.031	1.035	1.026	1.019	1.017	1.021	1.028	1.038
	Cr15Ni60	1.000	1.013	1.029	1.046	1.062	1.074	1.078	1.083	1.089	1.097	1.105	
铁铬铝	1Cr13Al4	1.000	1.004	1.013	1.027	1.041	1.062	1.090	1.114	1.126	1.135	1.142	
	0Cr13Al6Mo2	1.000	1.001	1.003	1.007	1.014	1.028	1.048	1.053	1.057	1.060	1.063	1.066
	0Cr25Al5	1.000	1.002	1.007	1.013	1.022	1.036	1.056	1.063	1.068	1.072	1.076	1.079
合金	0Cr27Al7Mo2	1.000	0.997	0.994	0.992	0.992	0.992	0.992	0.992	0.992	0.992	0.992	0.992
高熔点纯金属	铂 Pt	1.000	1.291	1.645	1.987	2.32	2.64	2.95	3.25	3.53	3.81	4.08	4.33
	钼 Mo	1.000	1.362	1.822	2.28	2.74	3.20	3.65	4.12	4.58	5.06	5.58	6.11
	钽 Ta	1.000	1.275	1.621	1.96	2.31	2.65	2.99	3.34	3.68	4.02	4.35	4.67
	钨 W	1.000	1.352	1.801	2.28	2.79	3.32	3.85	4.39	4.94	5.49	6.05	6.62
硅钼棒元件	1.00	1.40	2.00	2.60	3.32	4.08	4.96	5.84	6.80	7.76	8.80	9.76	



(续表)

温度 (°C)		1200	1300	1400	1500	1600	1700	1900	2100	2300	2500	2700	2900
铁铬铝	1Cr13Al4												
	0Cr13Al16Mo2	1.069											
	0Cr25Al5	1.082											
	0Cr27Al7Mo2	0.992											
高熔点纯	铂 Pt	4.58	4.81	5.03	5.25								
	钼 Mo	6.64	7.18	7.71	8.24	8.79	9.34	10.43	11.51	12.61	13.73		
	钽 Ta	4.96	5.23	5.50	5.77	6.03	6.29	6.80	7.30	7.78	8.23	8.70	9.13
	钨 W	7.19	7.78	8.36	8.96	9.56	10.16	11.40	12.65	13.94	15.25	16.58	17.95
硅钼棒元件	10.80	11.84	12.84	13.92	14.92	16.00							

注:

(1) 硅钼棒元件 1400°C 时电阻率为  $1000\Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$  左右, 室温至 900°C 时电阻率由大变小, 900~1450°C 则由小变大

(2)  $\rho_1 = \rho_0 / \rho_{20}$ , 式中  $\rho_1$  温度  $t$ °C 时的电阻率,  $\rho_{20}$  20°C 时电阻率.

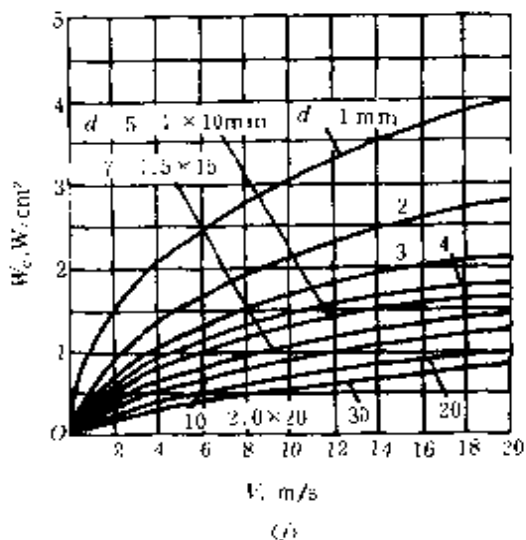
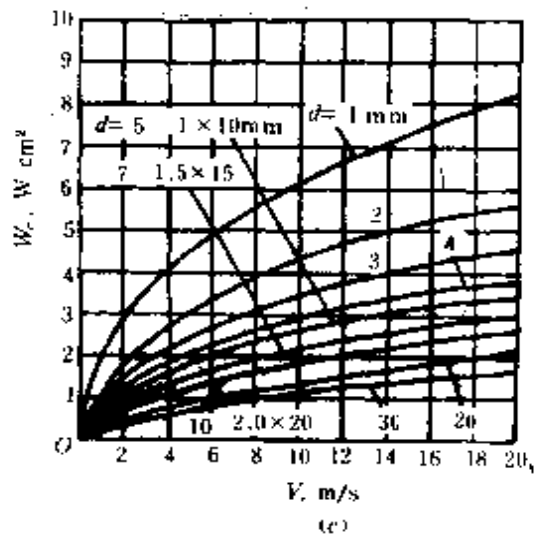
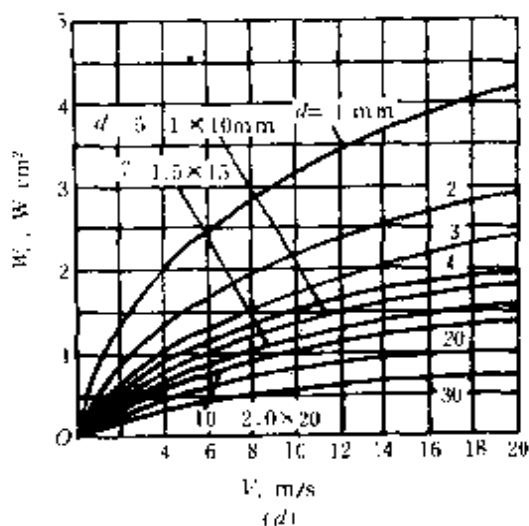
表 13-4 辐射电热元件的温度和允许表面负荷

加热元件材料	Cr20Ni80	1Cr13Al4	0Cr25Al15 0Cr13Al16Mo2	0Cr27Al17Mo2	碳化硅 元件	二硅化钼元件
推荐最高工作温度(°C)	1100	1000	1200	1350	1450	1700
允许表面负荷 (W/cm <sup>2</sup> )						
炉	600	1.8~2.2				
	700	1.6~2.0				
	800	1.4~2.0	1.0~1.6	1.8~2.2		
	900	1.2~1.6	0.8~1.0	1.4~2.0		
温	1000	0.8~1.2		1.0~1.6	1.8~2.4	
	1100			0.8~1.0	1.2~1.8	
	1200				1.0~1.5	14~22
(°C)	1300				0.8~1.0	11~18
	1400				26.3	9~15
	1500				20.5	6~11
	1600				13.5	
					4.9	

表 13-5 铁铬铝合金(0Cr25Al5) 允许表面负荷

电热设备类型	工业电阻炉		日用电炉		电烙铁		电熨斗	管状电加热元件
	炉温 1000 ~ 1200°C	炉温 950°C	开启式	半开启式	外热式	内热式		
材料形状	线材	线材	线材	线材	带材	带材	带材	线材
表面负荷 选用范围 (W/cm <sup>2</sup> )	1.0 ~ 1.5	1.4 ~ 1.8	4 ~ 6	13 ~ 15	2 ~ 3	8 ~ 10	5 ~ 8	8 ~ 25

注:带材元件的表面负荷可高出表列线材元件 20% 左右。



说明:

$t_a = 500^\circ\text{C}$ ,  $t_b = 600^\circ\text{C}$

$W_R = 0.55 \sim 0.4 \text{ W/cm}^2$

$t_a = 600^\circ\text{C}$ ,  $t_b = 800^\circ\text{C}$

$W_R = 1.8 \sim 1.2 \text{ W/cm}^2$

$t_a = 700^\circ\text{C}$ ,  $t_b = 800^\circ\text{C}$

$W_R = 1.0 \sim 0.7 \text{ W/cm}^2$

图 13-2 对流加热元件的表面负荷(二)

陶瓷管上的线材螺旋形加热元件,使用此图时应作如下修正:当螺旋节距  $S > 3d$  时,允许表面负荷取图中查得值的 80%;  $S < 3d$  时取 70%。其中  $d$  为线径。

④ 该图适用于加热介质为空气的情况,若为其它气体,则此图仅作参考。

### 3. 以辐射为主的电热元件的计算

#### (1) 计算条件:

① 每组电热元件的总功率  $P_j$ ,单位为 kW。

② 每组中电热元件的个数(指在同一端电压下的并联分支数,每一个并联分支称作一个电热元件) $n$ 。

③ 每组电热元件的端电压  $U$ ,单位为 V。

④ 允许表面负荷  $W_{uz}$ ,单位为  $W/cm^2$ 。

⑤ 电热元件材料的种类和性能。

#### (2) 计算步骤:

① 每个电热元件的功率  $P_i$ :

$$P_i = P_j/n$$

② 工作温度下,电热元件材料的电阻率  $\rho_t$ :

$$\rho_t = \rho_{20}C_t$$

式中: $\rho_{20}$ ——电热元件材料在 20°C 时的电阻率( $\Omega \cdot mm^2/m$ ),

见表 13-2;

$C_t$ ——电阻率修正系数,见表 13-3。

③ 电热元件的截面尺寸:

线材直径

$$d_1 = 34.3 \sqrt[3]{\frac{\rho_t P_i^2}{U^2 W_{uz}}}$$

带材的宽度  $b_1$  和厚度  $a_1$ :

$$a_1 = \sqrt[3]{\frac{10^3 \rho_t P_i^2}{2m(m+1)U^2 W_{uz}}}$$

$$b_1 = ma_1$$

式中： $d_1$ 、 $a_1$ 、 $b_1$ ——计算得的截面尺寸(mm)。

按所求得的截面尺寸，便可从产品目录中选定标准规格的尺寸。

④ 选定材料的截面：

$$\text{线材} \quad S = \frac{\pi}{4} d_2^2$$

$$\text{带材} \quad S = a_2 b_2$$

式中： $d_2$ 、 $a_2$ 、 $b_2$ ——选定材料的截面尺寸(mm)。

⑤ 每个电热元件在工作温度下的电阻值和每个电热元件的长度：

$$R_i = U^2 \times 10^{-3} / P_i, \quad l = SR_i / \rho_i$$

式中： $R_i$ ——每个电热元件的电阻( $\Omega$ )；

$l$ ——每个电热元件的长度(m)。

⑥ 实际表面负荷

$$W = \frac{\rho_i}{f l} \times 10^3$$

式中： $W$ ——实际表面负荷( $W/cm^2$ )；

$f$ ——每米电热元件材料的表面积( $cm^2/m$ )。

⑦ 每组电热元件总长度  $L$ ：

$$L = nl$$

可把上述各参数之间的关系绘制成计算曲线，如图 13-3 所示。这样就可利用图解法计算电热元件的尺寸。

如果不是采用 0Cr25Al5 和  $\rho_i$  不等于  $1.51 \Omega \cdot mm^2/m$  的线材，则可将从该图中查得的线径  $d_1$  和线长  $L_1$  值分别乘以如下系数，便可得到实际线径  $d_1'$  和线长  $L'$ 。

$$d_1' = d_1 \sqrt[3]{\frac{\rho_i}{1.51}}, \quad L_1' = L_1 \sqrt[3]{\frac{1.51}{\rho_i}}$$

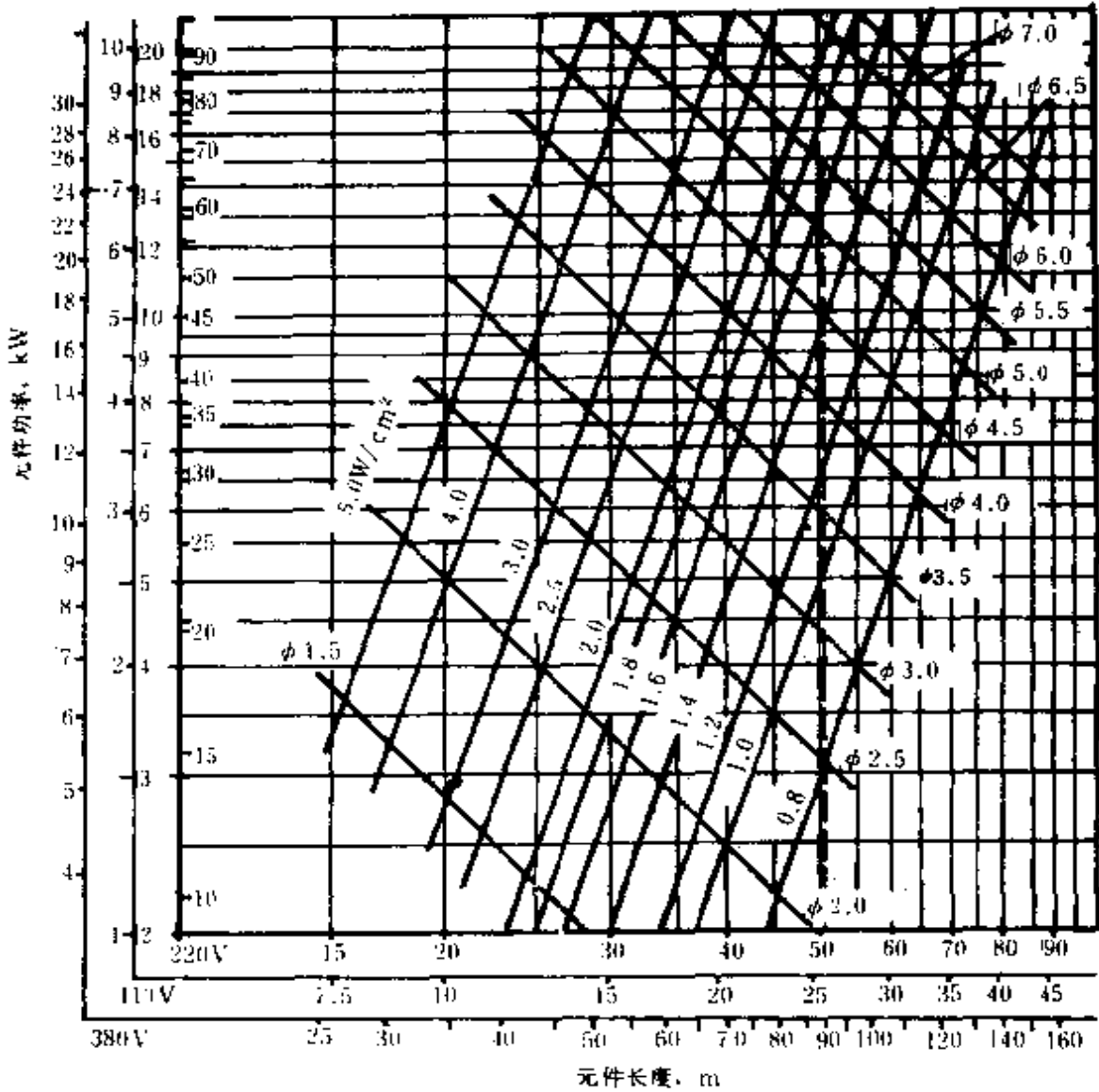


图 13-3 0Cr25Al5 线材电热元件计算图 ( $\rho_r = 1.51 \Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$ )

**例 13-1** 欲设计一箱式电阻炉, 电阻炉总功率  $P$ , 为 30kW, 元件组数  $n$  为 2, 电热元件材料用 0Cr25Al5, 炉温 950℃, 元件端电压  $U$  为 220V, 求电热元件的直径和长度。

**解**

(1) 计算法求解:

① 每个电热元件的功率：

$$P_i = P/n = 30/2 = 15(\text{kW})$$

② 查表 13—5, 取表面负荷  $W_{ux} = 1.7\text{W}/\text{cm}^2$ 。查表 13—2 和表 13—3, 0Cr25Al5 在  $1100^\circ\text{C}$  时的电阻率为  $\rho_t = \rho_{20}C_t = 1.4 \times 1.079 = 1.51\Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$

③ 元件截面尺寸：

$$\text{直径 } d_1 = 34.3 \sqrt[4]{\frac{\rho_t P_i^2}{U^2 W_{ux}}} = 34.3 \sqrt[4]{\frac{1.51 \times 15^2}{220^2 \times 1.7}}$$

$$= 5.5(\text{mm})$$

$$\text{长度 } L = \frac{\pi d_1^2}{4} \cdot \frac{U^2}{\rho_t P_i} \times 10^{-3} = \frac{\pi \times 5.5^2}{4}$$

$$\times \frac{220^2}{1.51 \times 15} \times 10^{-3}$$

$$= 50.7(\text{m}) \approx 51(\text{cm})$$

总长度为  $nL = 2 \times 51 = 102(\text{m})$

(2) 图解法求解：

① 在图 13—3 左下角找到 220V, 沿纵座标向上找到 15kW。

② 以 15kW 为起点, 作一平行于横座标的直线, 与单位表面负荷为  $1.7\text{W}/\text{cm}^2$  的等值线相交于 O 点, 求得线径约为 5.5mm; 同时, 平行线又与电流线交于 68A。

③ 在横轴上求得线长为 51m, 所以电热元件线径为 5.5mm, 总长度为 102m, 电流为 68A。

4. 以对流为主的电热元件的计算

(1) 当气流速度  $v$ 、气体加热温度  $t_g$ 、电热元件温度  $t_1$  已知后, 查图 13—1 得允许表面负荷  $W_{ux}$  和元件截面尺寸  $d$  之间的对

应关系  $W_{ux} = f(d)$ ; 对于带状元件  $d$  为当量直径。

(2) 当供电电压  $U$ 、每个电热元件的功率  $P_i$ 、加热元件材料的  $\rho_i$  及带材的  $m$  已知后, 便可按前面所述的以辐射为主的电热元件的计算方法求出允许表面负荷  $W_{ux}$  和元件尺寸  $d$  或  $a$  之间的对应关系  $W_{ux} = \varphi(d)$  或  $W_{ux} = \varphi(a)$ , 如图 13-4 所示。

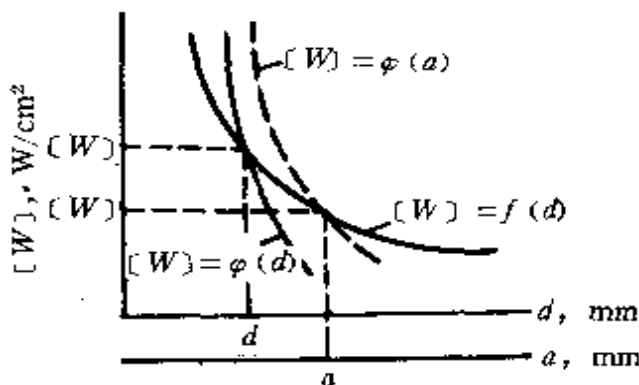


图 13-4 图解计算示意图

(3) 图解法求出同时满足  $W_{ux} = f(d)$  和  $W_{ux} = \varphi(d)$  或  $W_{ux} = \varphi(a)$  的  $W_{ux}$  值和  $d$  或  $a$  值。

(4) 接下的计算与前面介绍的以辐射为主的电热元件的计算方法相同。

### 5. 硅碳电热元件的计算

(1) 硅碳元件表面负荷的计算:

$$W = C \left[ \left( \frac{T_1}{1000} \right)^4 - \left( \frac{T_2}{1000} \right)^4 \right] \times 10^{12}$$

式中:  $W$  —— 电热元件表面负荷 ( $W/cm^2$ );

$T_1$  —— 电热元件的绝对温度 (K),  $T_1 = 273 + t_1$ ;

$T_2$  —— 炉内绝对温度 (K),  $T_2 = 273 + t_2$ ;

$C$  —— 硅碳元件的辐射系数, 为  $5 \times 10^{-12} W/cm^2 \cdot ^\circ C^4$ ;

$t_1$  —— 元件温度 ( $^\circ C$ ), 一般  $t_1 = t_2 + \Delta t$ ;

$\Delta t$  —— 温差, 约  $50 \sim 100^\circ C$ ;

$t_2$  —— 所需炉温 ( $^\circ C$ )。



(2) 硅碳元件支数的计算:

① 硅碳元件发热部的总面积:

$$S = P_T / W$$

式中:  $S$ ——元件发热部总面积( $\text{cm}^2$ );

$P_T$ ——电炉所需总功率( $\text{W}$ )。

② 根据电炉的实际尺寸,查附录 19,确定一种合适的硅碳元件发热部长度  $l$  和接线端长度  $l_2$ 。并从中选定一种直径  $d$ (棒)或  $D$ (管)。

③ 按下式求出元件支数  $z$ :

$$z = \frac{S}{\pi dl} (\text{棒}), z = \frac{S}{\pi D l} (\text{管})$$

在三相电路中,须把  $z$  凑成 3 的倍数。

④ 求出每支功率  $P_1$ :

$$P_1 = P_T / z$$

(3) 每支元件的允许负荷:表 13—4 中列出不同炉温下每支元件的允许负荷,是在元件温度规定为  $1450^\circ\text{C}$  条件下的值。由附录 20 查得炉温在  $1100^\circ\text{C}$ 、 $1200^\circ\text{C}$ 、 $1300^\circ\text{C}$  和  $1400^\circ\text{C}$  时的表面负荷分别为 26.3、20.5、13.47 和  $4.91\text{W}/\text{cm}^2$ 。把它们分别乘以每支发热部表面积  $\pi dl$ (棒)或  $\pi D l$ (管),就可求得各种规格的元件在不同炉温下的每支允许负荷,使用中不得超过该值。

(4) 元件电压调节:为了延缓电热元件老化,在使用过程中须用调压器随时调节电压,以保持其额定功率。因为  $U = \sqrt{P_1 R}$ ,故设允许元件电阻  $R$  增加至 4 倍,则调压器的调节范围上限应为起始使用电压的两倍。

### 6. 电炉丝拉伸长度的计算

拉伸电炉丝有两种方法:一种方法是先加热后拉伸到规定的长度;另一种方法是把电热丝硬拉到所需长度,然后通电加热定型。后者方法效果较好。

电热丝拉伸的长度可用伸缩性小的软绳按电热丝在炉盘内方位走向盘在电炉盘内,然后取出并记录长度,加上接线部分长度后,就是应拉伸的总长。也可参照表 13—6 数值。

表 13—6 电炉丝拉伸长度参考值

电炉功率(kW)	0.8	1	1.2	1.5	2
炉盘直径(cm)	14	16	18	19	20
炉丝原长度(cm)	48	50	53	62	76
拉伸后实际长度(cm)	96	120	130	140	165

电炉丝配用电炉盘的规格,见表 13—7。

表 13—7 电炉丝配用电炉盘的规格

圆形电炉盘规格 (mm)	配用电炉丝 (W)	方(矩)形电炉盘 规格 (mm)	配用电炉丝 (W)
75	200 ~ 300	50 × 200	500 ~ 600
100	400	75 × 120	500 ~ 600
		100 × 150	700 ~ 800
125	500	100 × 200	800 ~ 1000
140	600	125 × 125	600 ~ 700
		125 × 225	1000 ~ 1500
150	700 ~ 800	140 × 140	800 ~ 1000
165	1000 ~ 1200	140 × 275	1000 ~ 1500
185	1500	150 × 165	1500
200	1500 ~ 2000	175 × 300	1500 ~ 2000
		175 × 400	2000 ~ 2500
250	3000	200 × 200	1200 ~ 1500
300	4000	200 × 500	3000 ~ 4000
370	4500	275 × 275	2000 ~ 2500
520	6000	300 × 300	2500 ~ 3000
600	6000	325 × 650	4000 ~ 5000

### 7. 小电炉的效率

小电炉是指额定容量小于 2kW 的电炉。小电炉有以下两种效率：

(1) 初始效率：在标准容器中加入水，通电后 15min，根据水的温升来计算出来的效率。

(2) 额定效率：把水盛于标准器中，从通电 45min 后开始计算水在 15min 内的温升，用这个温升计算的效率。

小电炉的效率见表 13--8。

表 13—8 小电炉的效率

标定功率	初始效率(%)	额定效率(%)
600W 外露式	56 ~ 67	78 ~ 93
600W 反射式	79 ~ 84	89 ~ 98
1.2kW 外露式	40 ~ 53	69 ~ 85
1.2kW 封闭式	40 ~ 48	95 ~ 100
600W 改良式	72	94

### 8. 并联式电热带的计算

并联式电热带用于各类工业管路及管路附件(罐、槽、泵、阀等)的伴热保温，通常用在温度低于 + 150°C、保温距离小于 600m 的场合。

(1) 保温所需功率计算：

① 圆筒状设备保温所需功率：

$$p_s = \frac{8.767\lambda(t_y - t_0)}{L_n \frac{D + 2b}{D}}$$

式中： $p_s$ ——被伴热物体每米所需功率(W/m)；

$\lambda$ ——保温材料的导热系数(W/m·°C)，见表 13—9，1Wh = 3.6kJ；

$t_y$ ——管路等设备要求的维持温度(°C)；

$t_0$ ——环境最冷日平均地温度(设备埋地)或大气温度(设备在露天)(°C)；

$D$ ——管路或设备的外径(m)；

$b$ ——保温材料厚度(m)。

② 板状设备保温所需功率：

$$p_s = \frac{1.395\lambda(t_y - t_0)}{b}$$

式中： $p_s$ ——被伴热物体每平方米所需功率(W/m<sup>2</sup>)；

其它符号同前。

(2) 所需电热带计算：

① 电热带规格：

$$p = p_s / N$$

式中： $p$ ——电热带发热功率(W)，见表 13—10；

$N$ ——每米或每平方米被加热物所配电热带长度(m/m 或 m/m<sup>2</sup>)；

$p_s$ ——同前。

② 所需电热带长度：

$$L = Nl \text{ 或 } L = NS$$

式中： $L$ ——电热带长度(m)；

$l$ ——管路等设备长度(m)；

$S$ ——管路等设备表面积(m<sup>2</sup>)。

表 13--9 常用保温绝热材料的热物理特性

序号	材料名称	容重 $r$ (kg/m <sup>3</sup> )	导热系数 $\lambda$ (kJ/m·h·°C)	导温系数 $a \times 10^3$ (m <sup>2</sup> /h)	比热 $C$ (kJ/kg·°C)	重量 湿度 (%)
1	泡沫混凝土	525	0.398	0.79	0.963	0
2	加气混凝土	545	0.544	0.97	1.172	4.8
3	粉煤灰混凝土	640	0.754	0.87	1.340	12.5
4	耐热混凝土	296	0.310	0.91	1.172	—
5	浮石藻混凝土	729	0.628	0.77	0.837	0
6	玻璃棉混凝土	232	0.276	1.39	0.879	0
7	聚苯乙烯混凝土	538	0.670	0.90	1.340	13.7
8	锯木屑混凝土	705	0.712	1.21	0.837	—
9	木屑硅制土砖	590	0.502	0.89	0.921	—
10	珍珠岩粉料	44	0.151	2.00	1.591	0
11	水泥珍珠岩制品	400	0.327	0.93	0.879	0
12	沥青珍珠岩制品	285	0.356	0.82	1.507	—
13	乳化沥青珍珠岩 制品	304	0.301	0.68	1.465	—
14	水玻璃珍珠岩 制品	310	0.356	1.08	1.047	1.9
15	蛭石粉料	278	0.327	0.88	1.340	—
16	沥青蛭石制品	450	0.586	0.63	2.093	26.7

(续表)

序号	材料名称	容重 $r$ (kg/m <sup>3</sup> )	导热系数 $\lambda$ (kJ/m·h·°C)	导温系数 $a \times 10^3$ (m <sup>2</sup> /h)	比热 $C$ (kJ/kg·°C)	重量 湿度 (%)
17	水泥矽石制品	347	0.544	1.34	1.172	7.9
18	白灰矽石制品	408	0.879	1.29	1.675	—
19	水玻璃矽石制品	430	0.461	1.32	0.795	—
20	乳化沥青矽石制品	473	0.586	0.91	1.340	—
21	玻璃棉	100	2.093	2.78	0.754	—
22	树脂玻璃棉板	57	1.465	2.13	1.214	—
23	沥青玻璃棉	78	0.155	1.81	1.089	—
24	火山岩棉	80 ~ 110	0.147 ~ 0.180	—	—	—
25	硅酸铝纤维	140	0.193	1.41	0.963	—
26	矿渣棉	180	0.151	—	—	—
27	沥青矿棉板	300	0.335	1.48	0.754	—
28	酚醛矿棉板	200	0.251	1.67	0.754	—
29	碎石棉	103	0.176	—	—	—
30	石棉水泥板	300	0.335	1.33	0.837	—
31	硅藻土石棉板	810	0.502	0.39	1.633	—
32	石棉菱苦土	870	1.59	1.97	0.921	—
33	泡沫石膏	411	0.586	1.67	0.837	—

www.jcpeixun.com

(续表)

序号	材料名称	容重 $\gamma$ (kg/m <sup>3</sup> )	导热系数 $\lambda$ (kJ/m·h·°C)	导温系数 $a \times 10^3$ (m <sup>2</sup> /h)	比热 $C$ (kJ/kg·°C)	重量 湿度 (%)
34	泡沫玻璃	140	0.188	1.51	0.879	—
35	聚苯乙烯硬塑料	50	0.113	1.07	2.093	—
36	脲醛泡沫塑料	20	0.167	5.71	1.465	—
37	聚胺酯泡沫塑料	34	0.147	2.15	2.010	—
38	聚异氰脲酸酯泡沫塑料	41	0.117	1.64	1.717	0
39	聚氯乙烯泡沫塑料	190	0.209	0.75	1.465	—
40	矿渣棉板	322	0.155	0.57	0.837	—
41	锯木屑	250	0.335	0.53	2.512	—

注：测定温度为常温。

表 13-10 几种发热带的技术数据

产品型号	电压 (V)	发热功率 W/m)	绝缘材 料色别	长期工 作温度 (°C)	短时冲 击温度 (°C)	最大应 用长度 (m)	发热 节长 (m)
RRVB-10	220	10	PN 灰	90	125	150	1.08
RRVB-15	220	15	PN 黑	90	125	140	0.88
RRVB-20	220	20	F46 棕	190	235	130	0.90
RRVB-30	220	30	F46 绿	190	235	120	0.82
RRVB-40	220	40	F46 红	190	235	110	0.71

注：PN——聚氯乙烯—丁腈橡胶混合物；F46——四氟乙烯——六氟丙烯聚物。

**例 13—2** 有一圆筒形贮油罐置于室外,油罐半径为 1.05m、高 1.6m、由水泥珍珠岩制品作保温材料, $\lambda = 0.058 \text{ W/m} \cdot ^\circ\text{C}$ ,保温层厚 60mm,介质维持温度为  $+8^\circ\text{C}$ ,冬季最冷日平均气温为  $-20^\circ\text{C}$ 。试选用电热带。

**解** 被保温物每平方米所需功率(热量)为

$$p_s = \frac{1.395\lambda(t_y - t_0)}{b} = \frac{1.395 \times 0.058 \times [8 - (-20)]}{0.06} \\ = 37.8(\text{W/m}^2)$$

电热带均匀缠绕在贮油罐外面(除顶、底面外),则被保温物保温加热面积为

$$S = 2\pi rH = 2\pi \times 1.05 \times 1.6 = 10.56(\text{m}^2)$$

由表 13—10 查得 RRVB—15 的电热带的发热功率为 15W/m,每平方米所配电热带长度为

$$N = p_s/p = 37.8/15 = 2.5(\text{m/m}^2)$$

所需电热带长度为

$$L = NS = 2.52 \times 10.56 = 26.6(\text{m}) \quad \text{取 } 26\text{m}$$

总需要功率为

$$p = pL = 15 \times 26 = 390(\text{W}) = 0.39\text{kW}$$

## 二、电热干燥室功率计算

干燥电机用的电热干燥室,计算步骤如下:

1. 求出墙壁的热量损失

按下式求出干燥室墙壁的净面积,然后查表 13—11 得墙壁的热量损失(折算成功率) $P_u$ 。

$$S_i = S_z - S_m$$

式中: $S_i$ ——墙壁的净面积( $\text{m}^2$ );

$S_z$ ——墙壁的总面积( $\text{m}^2$ );

$S_m$ ——门的面积( $\text{m}^2$ )。



表 13—11 墙壁单位热量损失

砖墙厚(mm)	100	200	300	400	500	600	700	800
墙的种类	每平方米每 °F 的热量损失(W/m <sup>2</sup> · °F)							
普通砖墙	2.108	1.239	0.965	0.805	0.710	0.625	0.551	0.498
内面粉墙	2.172	1.303	1.027	0.773	0.709	0.646	0.593	0.529

注:1°F =  $\frac{9}{5}C + 32$ , C 为摄氏度 °C。

2. 求出门的热量损失  $P_m$

$$P_m = W_m S_m$$

式中  $W_m$ ——门的单位热量损失,普通门为 3.154(W/m<sup>2</sup> · °F)。

3. 求出室顶天花板的散热热量损失  $P_b$

100mm 钢筋水泥室顶为 1.865W/m<sup>2</sup> · °F;150mm 钢筋水泥室顶为 1.674W/m<sup>2</sup> · °F。

4. 求出地板的散热热量损失  $P_d$

砖铺上粉泥地面为 0.947W/m<sup>2</sup> · °F;钢筋水泥地面为 0.635W/m<sup>2</sup> · °F。

5. 求出空气吸收的热量

求出室内空气的体积,然后根据每小时空气换气的次数(视需要而定),由表 13—12 查出系数,即可求出空气所需吸收的热量  $P_q$ 。

表 13—12 空气单位热量损失

空气换气次数	1/2	1	1 1/2	2	3
热量损失(W/m <sup>3</sup> · °F)	0.0918	0.1871	0.2789	0.3743	0.5579
空气换气次数	4	5	6	10	—
热量损失(W/m <sup>3</sup> · °F)	0.7450	0.9287	1.1193	1.8608	—

6. 电热器所需功率  $P$

$$P = \frac{K}{\eta} (P_w + P_m + P_b + P_d + P_q)$$

式中:K——裕量系数;

$\eta$ ——电热器热效率。

7. 电热器的功率  $P$  和使用电压  $U$  已知后, 就可根据电热丝的单位表面负荷来选择电热元件。

单位表面负荷: 露出式电热器为  $4 \sim 5 \text{W/cm}^2$ ; 密闭式为  $1.5 \sim 2 \text{W/cm}^2$ 。

**例 13—3** 有一壁厚为 300mm 的普通砖墙, 墙面积为  $0.5 \text{m}^2$ , 墙内温度为  $90^\circ\text{C}$ , 墙外为  $33^\circ\text{C}$ , 试求该墙的散热热量是多少?

**解** 折成华氏温度为

$$\frac{9}{5}C + 32 = \frac{9}{5}(90 - 33) + 32 = 134.6(^{\circ}\text{F})$$

查表 13-11 得墙壁单位热量损失为  $0.965 \text{W/m}^2 \cdot ^{\circ}\text{F}$ , 因此该墙壁的散热热量损失为

$$P_w = 0.965 \times 0.5 \times 134.6 = 64.9(\text{W})$$

**例 13—4** 某干燥室容积为  $70 \text{m}^3$ , 每小时换气 2 次, 室内外温差为  $12^\circ\text{C}$ , 求每小时空气所需吸收的热量是多少?

**解** 折成华氏温度为

$$\frac{9}{5}C + 32 = \frac{9}{5} \times 12 + 32 = 53.6(^{\circ}\text{F})$$

查表 13-9 得空气单位热量损失为  $0.3743 \text{W/m}^3 \cdot ^{\circ}\text{F}$ , 因此每小时空气所吸收的热量为

$$P_v = 70 \times 0.3743 \times 53.6 = 1404(\text{W})$$

### 三、按炉膛容积估算炉子功率

普通箱式和井式电阻加热炉的炉子功率, 可根据不同炉温按下列公式估算:

$$\text{炉温 } 1200^\circ\text{C} \quad P = (100 \sim 150) \sqrt[3]{V^2}$$

$$\text{炉温 } 950^\circ\text{C} \quad P = (75 \sim 100) \sqrt[3]{V^2}$$

$$\text{炉温 } 650^\circ\text{C} \quad P = (50 \sim 75) \sqrt[3]{V^2}$$

炉温  $400^{\circ}\text{C}$        $P = (35 \sim 50) \sqrt[3]{V^2}$

式中： $P$ ——炉子功率(kW)；

$V$ ——炉膛名义容积( $\text{m}^3$ )，箱式炉  $V = bhl$ ；井式炉  $V = Dl$ ， $b$ 、 $h$ 、 $l$  分别为炉口宽度、高度和深度(m)； $D$  为口径直径(m)。

## 第二节 盐浴炉计算

### 一、炉膛尺寸和功率的计算

#### 1. 炉膛尺寸的确定

炉膛尺寸应能容纳熔盐体积  $V_{\text{熔}}$ ，同时工件在盐液中的位置应满足加热工艺的要求。电极底边应离开盐槽底约  $50 \sim 80\text{mm}$ ，工件与盐槽壁面之间应有  $30 \sim 50\text{mm}$  的间距。

熔盐在工作温度下的体积  $V_{\text{熔}}$  为

$$V_{\text{熔}} = G_{\text{熔}} / r_{\text{熔}}$$

式中： $G_{\text{熔}}$ ——所需要的熔盐重量(kg)；

$r_{\text{熔}}$ ——工作温度下熔盐的密度(kg/L)。

据经验， $G_{\text{熔}}$  与炉子生产率  $A$  (单位：kg/h) 之间存在如下关系：

对中温炉(炉温  $650 \sim 950^{\circ}\text{C}$ )     $G_{\text{熔}} = (2 \sim 3)A$

对高温炉(炉温高于  $950^{\circ}\text{C}$ )     $G_{\text{熔}} = (1 \sim 1.5)A$

#### 2. 炉子功率的确定

$$P = KV_{\text{熔}}$$

式中： $P$ ——炉子功率(kW)； $K$ ——经验系数，对埋入式盐浴炉，炉温为  $650^{\circ}\text{C}$  时取  $0.4 \sim 0.6$ ； $850^{\circ}\text{C}$  时取  $0.6 \sim 0.8$ ； $1300^{\circ}\text{C}$  时取  $0.9 \sim 1.5$ ；对升温要求快，或盐面散热大的炉子，取较大值。

## 二、埋入式盐浴炉电源变压器的要求

变压器额定容量按下式估算：

$$P_b = (1.1 \sim 1.2)P$$

式中： $P_b$ ——变压器额定容量(kW)；

$P$ ——炉子额定功率(kW)。

变压器一次电压为 380V 或 220V，二次电压：5.5 ~ 17.5V(插入式电极盐炉)；14 ~ 32V(埋入式电极盐炉)。电压分 6 ~ 7 级调节。

## 三、电阻炉、盐浴炉电能利用率的计算

### 1. 测试电能利用率注意事项

(1) 实测时的炉子工作条件应尽可能与日常生产情况相符。

(2) 对于一般的周期作业炉，应测量一个完整的工艺周期的有关数据；冷炉升温时的耗电量，要均匀的分摊到每个炉次中去。

(3) 对于连续作业炉或连续工作的周期作业炉，当产品工艺相同时，可以只测一个作业周期的有关数据。

### 2. 电能利用率的测算方法

(1) 电阻炉、盐浴炉的电能利用率

$$\eta = \frac{Q_{yx}}{Q_{sr}} \times 100\% = \frac{Q_{yx}}{Q_{yx} + \Delta Q} \times 100\%$$

$$\Delta Q = Q_T + Q_{sw} + Q_F + Q_x + Q_l + Q_C + Q_{FZ} + Q_{J1} + Q_{J2} + Q_Q$$

对于盐浴炉，上式还要加上  $Q'_{b0}$  (炉子空载情况变压器及导电体的损耗)。

式中： $Q_{yx}$ ——工件升温所吸收的热量(kJ)，即有效热量；

$Q_{sr}$ ——电网输入电能换算成的热量(KJ)；

- $\Delta Q$ ——总损失热量(kJ)；
- $Q_r$ ——炉体蓄热(kJ),对盐浴炉是指炉蓄热  $Q_l$ ；
- $Q_{ss}$ ——通过炉墙向周围空间散失的热量(kJ)；
- $Q_F$ ——辐射热损耗(kJ)；
- $Q_x$ ——泄漏热损耗(kJ)；
- $Q_L$ ——冷却水带走的热量(kJ)；
- $Q_c$ ——外伸金属件的传热损耗(kJ)；
- $Q_{FZ}$ ——辅件热损耗(kJ)；
- $Q_{J1}$ ——加热控制气氛、渗剂的热量(kJ)；
- $Q_{J2}$ ——排出废气所带走的热量(kJ)；
- $Q_Q$ ——其它原因造成的损失热量(kJ)。

(2) 输入热量计算:由电度表实测出加热工艺周期中的耗电量  $A$ ,按下式折算成输入热量:

$$Q_{sr} = 3600A$$

式中: $Q$ ——输入热量(kJ)；

$A$ ——耗电量(kWh)。

(3) 有效热量计算:

$$Q_{yz} = G(C_2t_2 - C_1t_1)$$

式中: $Q_{yz}$ ——有效热量(kJ)；

$G$ ——被加热工件的重量(kg)；

$C_1, C_2$ ——工件起始和终止温度时的比热(kJ/kg·°C),见表 13—13；

$t_1, t_2$ ——工件起始和终止温度(°C)。

### 3. 损耗热量计算

(1) 冷炉升温损耗计算:对于电阻炉来说,该项损耗主要是升温时炉体(主要是耐火材料、保温材料)吸收的能量,即炉体

蓄热。

① 电阻炉炉体蓄热  $Q_T$ ：

$$Q_T = V_1 \gamma_1 C_1 \Delta t_1 + V_2 \gamma_2 C_2 \Delta t_2 + \dots + V_n \gamma_n C_n \Delta t_n$$

式中： $V_1, V_2 \dots V_n$ ——各种炉衬的体积( $m^3$ )；

$\gamma_1, \gamma_2 \dots \gamma_n$ ——各层炉衬的体积密度( $kg/m^3$ )，查附录 21；

$C_1, C_2 \dots C_n$ ——各层炉衬的平均比热( $kJ/kg \cdot ^\circ C$ )，查附录 21；

$\Delta t_1, \Delta t_2 \dots \Delta t_n$ ——各层炉衬加热开始的平均温度与加热终了时的平均温度之差( $^\circ C$ )， $\Delta t = t_h - t_q$ ； $t_h$  为加热后某保温层两界面平均温度( $^\circ C$ )； $t_q$  为加热前某保温层两界面平均温度( $^\circ C$ )，当冷态使用时  $t_q = t_w$ ； $t_w$  为环境温度( $^\circ C$ )。

② 盐浴炉蓄热  $Q_T$ ：盐浴炉冷炉升温，除炉体蓄热外，还包括盐浴炉吸热、辐射损失和变压器及导体损耗。炉体蓄热  $Q_T$ ，计算方法同电阻炉。盐浴熔化耗能，包括以下两项能耗：

升温耗能  $Q_T'$

$$Q_T' = G(C_2 t_2 - C_1 t_1)$$

熔化潜热量  $Q_q$

$$Q_q = Gq$$

式中： $G$ ——盐浴重量( $kg$ )；

$C_1, C_2$ ——盐浴加热初始和终止温度下的比热，( $kJ/kg \cdot ^\circ C$ )，查表 13—14 或有关资料；

$t_1, t_2$ ——加热初始和终止温度( $^\circ C$ )。

$q$ ——熔液潜热，即熔解热( $kJ/kg$ )，可查表 13—14 或有关资料。盐面辐射损失  $Q_{m,r}$ ，可参见表 13—15 估算。

表 13-13 常用金属不同温度的比热(kJ/kg·°C)

比热 温度 (°C)	金 属							铸 铁	铸 铁
	铝	铜	纯铁	钢 0.3%C	钢 0.6%C	钢 0.8%C	0.6%Mn 1.5%Si 3.7%C	0.7%Mn 1.5%Si 4.2%C	
100	0.938	0.389	0.465	0.459	0.481	0.502	-	0.544	
200	0.950	0.398	0.490	0.481	0.486	0.502	0.461	0.565	
300	0.955	0.410	0.511	0.502	0.515	0.523	0.494	0.565	
400	0.959	0.41	0.536	0.515	0.523	0.536	0.507	0.565	
500	0.971	0.423	0.561	0.536	0.544	0.553	0.515	0.586	
600	0.978	0.435	0.595	0.569	0.574	0.586	0.536	0.607	
700	1.453	0.444	0.599	0.603	0.607	0.615	0.603	0.641	
800	1.344	0.448	0.632	0.687	0.678	0.691	0.666	0.691	
900	1.352	0.444	0.649	0.699	0.678	0.678	0.678	0.712	
1000	—	0.465	0.632	0.699	0.678	0.670	0.670	0.720	
1100	—	0.662	0.678	0.699	0.682	0.653	0.670	0.733	
1200	—	0.689	0.678	0.703	0.682	0.653	0.871	0.909	
1300	—	0.641	0.682	0.703	0.687	0.653	0.879	0.909	
1400	—	0.628	0.691	0.703	0.687	0.653	0.883	0.913	
1500	—	0.632	0.699	—	—	—	—	—	

表 13—14 常用盐浴的物理性能数据

性 能	碱金属 硝酸盐 亚硝酸盐 混合盐	碱金属 硝酸盐 混合盐	碱金属 氯化盐 混合盐	碱金属 氯化盐 碳酸盐 混合盐	碱金属 碱土金属 氯化盐 混合盐	氯化钡	碱类 混合物
熔点(°C)	≈ 145	≈ 170	≈ 670	≈ 590	≈ 550	960	≈ 150
工作温度(°C)	≈ 300	≈ 430	≈ 850	≈ 670	≈ 750	1290	≈ 250
固态密度(kg/m <sup>3</sup> )	2120	2150	2080	2260	2070	3860	2120
工作温度下密度 (kg/m <sup>3</sup> )	1850	1800	1600	1900	2280	2870	1660
固态比热 (kJ/kg·°C)	1.34	1.34	0.84	0.96	0.59	0.13	—
液态比热 (kJ/kg·°C)	1.55	1.51	1.09	1.42	0.75	0.50	—
熔解热 (kJ/kg)	127.7	23.0①	669.9①	368.4	345.4①	182.1①	

注：此数据波动较大，可能与含结晶水有关。

表 13—15 盐浴表面在不同温度下的辐射热损失

盐浴表面温度 (°C)	辐射热损失		盐浴表面温度 (°C)	辐射热损失	
	(kJ/m <sup>2</sup> ·h)	(kW/m <sup>2</sup> )		(kJ/m <sup>2</sup> ·h)	(kW/m <sup>2</sup> )
200	7348	2.0	800	194250	53.9
300	15797	4.4	900	277420	77.0
400	30061	8.4	1000	384830	106.9
500	52335	14.5	1100	520750	144.6
600	85120	23.6	1200	689860	191.6
700	131340	36.5	1300	897150	249.2

变压器耗能计算方法见第三章第一节内容；导体耗能主要取决于铜排截面积、长度及电极与铜排的接触条件，计算方法见第七章第一节母线选择及计算。一般两项损耗约为输入能量



的 5% 左右。而  $Q_1 = Q_T + Q_T' + Q_q + Q_{mF} + Q_{bd}$ 。

上述冷炉升温测算对周期作业炉,特别是间歇使用的周期炉十分重要。据统计,老式砖砌热处理箱式炉 850°C 间断作业时  $Q_2$  约占总能耗的 53 ~ 66%。

(2) 空载损耗:就是电炉在空载情况下,炉温达到额定温度并处于热稳定状态,维持这种状态所需要的能量。

空载损耗(单位:kJ)包括以下各项:

① 通过炉墙向周围空间散失的热量  $Q_{ss}$ :

$$Q_{ss} = \frac{t_{rn} - t_w}{\sum \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{67 \sim 71}} \cdot F\tau$$

式中:  $t_{rn}$ ——炉体内表面温度(°C);

$t_w$ ——外界环境温度(°C);

$\delta_1, \delta_2 \dots \delta_n$ ——各层炉衬厚度(m);

$\lambda_1, \lambda_2 \dots \lambda_n$ ——各层炉衬导热系数(kJ/m · h · °C);

67 ~ 71——炉墙外表面向周围介质放热系数的经验值(kJ/m<sup>2</sup> · h · °C);

$F$ ——炉壁外表面积(m<sup>2</sup>);

$\tau$ ——时间(h)。

在稳定工况下,炉体的散热损失还可用热流计直接测得。

② 通过炉门、缝隙及盐浴表面的辐射热损耗  $Q_F$ :盐浴炉的液面及炉面耐火砖的辐射热损耗

$$Q_F = a\epsilon \left[ \left( \frac{T_1}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_2}{100} \right)^4 \right] F\tau$$

式中:  $a$ ——绝对黑体的辐射系数,为 20.77(kJ/m<sup>2</sup> · h · K<sup>4</sup>);

$\epsilon$ ——实际物体的全辐射率,见表 13—25;

$T_1, T_2$ ——测量时被测物及环境温度(K),  $T_1 = 273 + t_b$ ;

$T_2 = 273 + t_w$ ,  $t_b, t_w$  为被测物表面温度和环境温度(°C);

$F$ ——辐射散热表面积(m<sup>2</sup>);

$\tau$  —— 时间(h)。

箱式炉及井式电阻炉

$$Q_F = a\epsilon\left[\left(\frac{T_1}{100}\right)^4 - \left(\frac{T_2}{100}\right)^4\right]F\phi J\tau$$

式中： $\phi$ —— 遮蔽系数，见表 13—16，一般炉门取 0.9，小孔缝隙取 0.5；

$J$ —— 炉门开启率，即启闭周期中开启时间所占的比例。缝隙  $J = 1$ ；

其它符号同前。

③ 泄漏热损耗  $Q_x$ ：

$$Q_x = V_r C_q (t_s - t_w) \tau$$

式中： $V$ —— 进入炉内的冷空气量( $m^3/h$ )，电阻炉  $V = 2200BH\sqrt{H}$ ； $B$  为炉门的宽度(m)； $H$  为炉门开启高度(m)；

$C_q$ —— 空气的平均比热( $kJ/kg \cdot ^\circ C$ )，见表 13—16；

$r$ —— 炉外空气的体积密度( $kg/m^3$ )，见表 13—17；

$t_s, t_w$ —— 空气的泄出温度和室温( $^\circ C$ )；

$\tau$ —— 时间(h)。

表中是干空气的物理常数，当车间空气中含有  $H_2O$ 、 $SO_2$ 、 $CO_2$  等气体时，由于这些气体的比热比干空气的比热大 10 ~ 20% 左右，在计算时可参照环境条件对表中数值作适当修正。

④ 冷却水带走的热量  $Q_L$ ：当电炉使用冷却水时，要计算被冷却水带走的热量。

$$Q_L = qC_s(t_2 - t_1)\tau$$

式中： $q$ —— 每小时冷却水的流量( $kg/h$ )；

$C_s$ —— 水的比热( $kJ/kg \cdot ^\circ C$ )；

$t_1, t_2$ —— 冷却水入、出的温度( $^\circ C$ )；

$\tau$ —— 时间(h)。

表 13--16 遮蔽系数  $\phi$  值

炉口深度 (mm)	炉口宽度 (mm)	炉口高度 (mm)					炉口深度 (mm)	炉口宽度 (mm)	炉口高度 (mm)				
		150	250	450	600	750			150	250	450	600	750
115	150	0.55	0.63	0.66	0.68	0.69	345	150	0.36	0.43	0.45	0.47	0.49
	300	0.63	0.70	0.73	0.76	0.78		300	0.42	0.48	0.52	0.55	0.57
	600	0.68	0.76	0.80	0.82	0.84		600	0.47	0.55	0.59	0.62	0.64
	900	0.71	0.79	0.83	0.85	0.87		900	0.50	0.58	0.63	0.66	0.69
	1200	0.72	0.81	0.85	0.87	0.89		1200	0.52	0.60	0.65	0.68	0.71
	1500	0.73	0.82	0.86	0.89	0.91		1500	0.53	0.61	0.66	0.70	0.72
230	150	0.43	0.49	0.52	0.55	0.56	450	150	0.31	0.36	0.39	0.42	0.43
	300	0.49	0.56	0.60	0.63	0.64		300	0.36	0.43	0.46	0.49	0.51
	600	0.55	0.63	0.67	0.70	0.72		600	0.42	0.49	0.53	0.56	0.58
	900	0.57	0.66	0.70	0.73	0.75		900	0.45	0.52	0.57	0.60	0.62
	1200	0.59	0.68	0.72	0.76	0.78		1200	0.47	0.55	0.59	0.63	0.65
	1500	0.61	0.69	0.74	0.77	0.79		1500	0.48	0.56	0.61	0.64	0.67

注:

① 尺寸未包括在表中的炉口,其 $\phi$ 值可按比例求得,例如 $2400 \times 2400 \times 460$ mm的炉口可按 $600 \times 600 \times 115$ mm求。

② 圆形炉口可近似地以其直径作边长按正方形炉口求。

表 13-17 干空气的某些物理常数(一大气压下)

温度 (°C)	密度 (kg/m <sup>3</sup> )	比热 (kJ/kg·°C)	比热 (kJ/m <sup>3</sup> ·°C)	温度 (°C)	密度 (kg/m <sup>3</sup> )	比热 (kJ/kg·°C)	比热 (kJ/m <sup>3</sup> ·°C)
0	1.252	1.009	1.264	180	0.755	1.034	0.779
10	1.206	1.009	1.218	200	0.723	1.034	0.749
20	1.164	1.013	1.181	250	0.653	1.034	0.682
30	1.127	1.013	1.143	300	0.596	1.047	0.624
40	1.092	1.013	1.105	350	0.549	1.055	0.578
50	1.056	1.017	1.076	400	0.508	1.059	0.540
60	1.025	1.017	1.043	500	0.450	1.072	0.481
70	0.996	1.017	1.013	600	0.400	1.089	0.435
80	0.968	1.022	0.988	800	0.325	1.114	0.360
90	0.942	1.022	0.963	1000	0.268	1.139	0.306
100	0.916	1.022	0.938	1200	0.238	1.164	0.276
120	0.870	1.026	0.892	1400	0.201	1.189	0.243
140	0.827	1.026	0.850	1600	0.182	1.218	0.222
160	0.789	1.030	0.812	1800	0.165	1.243	0.205

⑤ 外伸金属件的传热损耗  $Q_c$ ：

$$Q_c = \lambda \frac{t_L - t_{wj}}{L} F n \tau$$

式中： $\lambda$ ——外伸金属件的导热系数(kJ/m·h·°C)；

$L$ ——外伸金属件的长度(m)；

$t_L$ ——炉膛温度(°C)；

$t_{wj}$ ——外伸件外端温度，可取 60 ~ 100°C；

$F$ ——外伸件的截面积(m)<sup>2</sup>；

$n$ ——外伸件的数目；

$\tau$ ——时间(h)。

⑥ 盐浴炉变压器及导电体的热损耗  $Q_{bd}$ ：约为输入能量的 5% 左右。

⑦ 其它热损耗  $Q_Q$ ：约为总损耗的 10% 左右。

(3) 加热工件所要求的辅件、气氛等所损耗的能量：

① 工夹具、料筐(盘)及炉底板的吸热  $Q_{FZ}$ ：

$$Q_{FZ} = G_f(C_2 t_2 - C_1 t_1)$$

式中： $G_f$ ——辅助工件的重量(kg)；

$C_1, C_2$ ——辅助工件在初始和终止温度时的比热(kJ/kg·°C)。

$t_1, t_2$ ——辅助工件的初始和终止温度(°C)。

② 加热控制气氛、渗剂的热量及其因加热而溢出气体带走的热量：

加热上述介质的热量  $Q_{J1}$

$$Q_{J1} = G_f C_p (t_2 - t_1)$$

式中： $G_f$ ——通入炉内介质的重量(kg)；

$C_p$ ——介质的平均比热(kJ/kg·°C)；

$t_1, t_2$ ——介质入炉前、后的温度(°C)。

排出废气所带走的热量  $Q_{J2}$

$$Q_{12} = qdC_p(t_Q - t_W)\tau$$

式中： $q$ ——排出气体的流量( $m^3/h$ )；

$C_p$ ——排出气体的平均比热( $kJ/kg \cdot ^\circ C$ )；

$t_Q, t_W$ ——被加热的气体和周围空气温度( $^\circ C$ )；

$d$ ——气体密度( $kg/m^3$ )；

$\tau$ ——时间(h)。

在计算介质时,要注意其在炉内有无吸热或放热反应,并把这些热量考虑在内。

按上述方法测算出各项损耗,若  $Q_{sr} = Q_{yz} + 4Q \approx 3600A$  ( $A$  为电度表实测的耗电量  $kWh$ ),其误差小于 5%,说明前述的计算基本符合要求,可以作为电平衡分析的依据。

### 第三节 感应加热炉计算

#### 一、电流透入深度计算

电流在工件中渗透的深度与电流频率成反比,频率越高,渗透深度越浅,反之就越深。其值可按下式计算:

$$\delta = 5030 \sqrt{\frac{\rho}{\mu_r f}}$$

式中： $\delta$ ——电流透入深度( $cm$ )；

$\rho$ ——平面体材料(炉料)的电阻率( $\Omega \cdot cm$ )；

$\mu_r$ ——平面体材料(炉料)的相对磁导率；

$f$ ——电磁波的频率( $Hz$ )。

常用材料在不同温度下的电流透入深度见图 13—5。

#### 二、电源频率和感应器尺寸的计算

电源频率的选取可根据工件的尺寸和加热层的厚度及要求来决定。我国当前感应炉电源的频率主要有 50、400、1000、2500、4000、8000、250000 ~ 300000 $Hz$  几种,在发展中的有 150、

250000、50000 ~ 70000Hz 等。

1. 圆柱形炉料及其感应器(图 13—6)

(1) 电源频率:

$$f \geq \frac{F_0 \rho_f \times 10^8}{\mu_r D^2}, \rho_f = \frac{1}{t} \int_0^t \rho dt。$$

式中:  $f$ ——电源频率(Hz);

$F_0$  与金属材料的直径  $D$  和长度  $L$  有关的参数, 约 3 ~ 6; 当  $D/L < 0.1$  时取 3,  $D/L > 0.2$  时取 6;

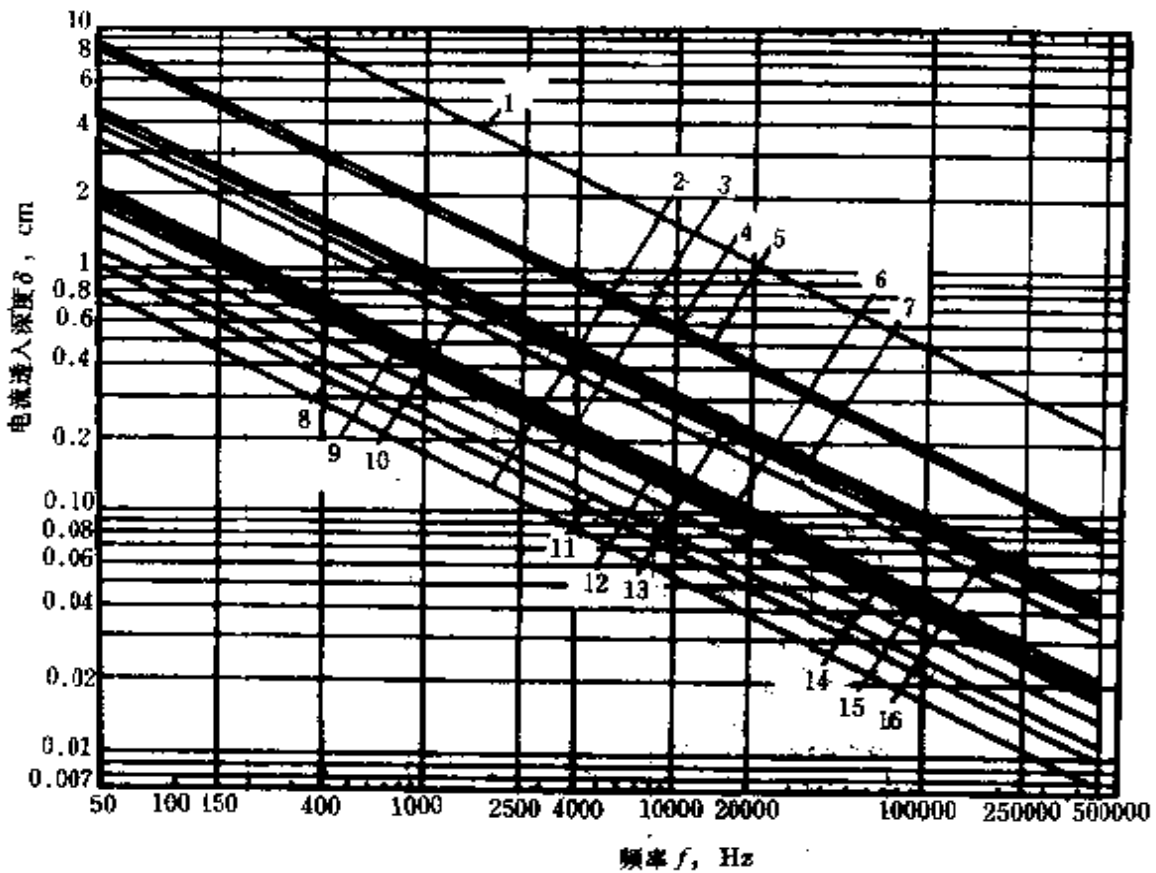


图 13—5 常用材料的电流透入深度( $\rho$ 为电阻率,单位:  $\Omega \cdot \text{cm}$ ; 图中未注明者,  $\mu_r = 1$ )

1. 电极石墨 1500°C  $\rho = 9 \times 10^{-4}$ ; 2. 碳钢  $\mu_r = 16$  20°C  $\rho = 20 \times 10^{-6}$ ;
3. 碳钢  $\mu_r = 16$  300°C  $\rho = 66 \times 10^{-6}$ ; 4. 碳钢 1200°C  $\rho = 126 \times 10^{-6}$ ;
5. 碳钢 1520°C  $\rho = 136.6 \times 10^{-6}$ ; 6. 锌 20°C  $\rho = 6.1 \times 10^{-6}$ ;
7. 锌 419.4°C  $\rho = 35 \times 10^{-6}$ ; 8. 铜 55°C  $\rho = 2 \times 10^{-6}$ ;
9. 铜 930°C  $\rho = 8 \times 10^{-6}$ ; 10. 铜 1200°C  $\rho = 22 \times 10^{-6}$ ;
11. 铝 20°C  $\rho = 2.7 \times 10^{-6}$ ; 12. 铝 300°C  $\rho = 8.5 \times 10^{-6}$ ;
13. 铝 800°C  $\rho = 29.28 \times 10^{-6}$ ; 14. 黄铜 20°C  $\rho = 6 \times 10^{-6}$ ;
15. 黄铜 800°C  $\rho = 6.8 \times 10^{-6}$ ; 16. 黄铜 940°C  $\rho = 38.5 \times 10^{-6}$ ;

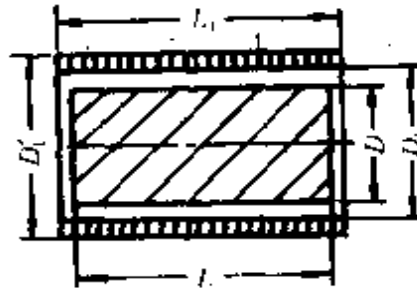
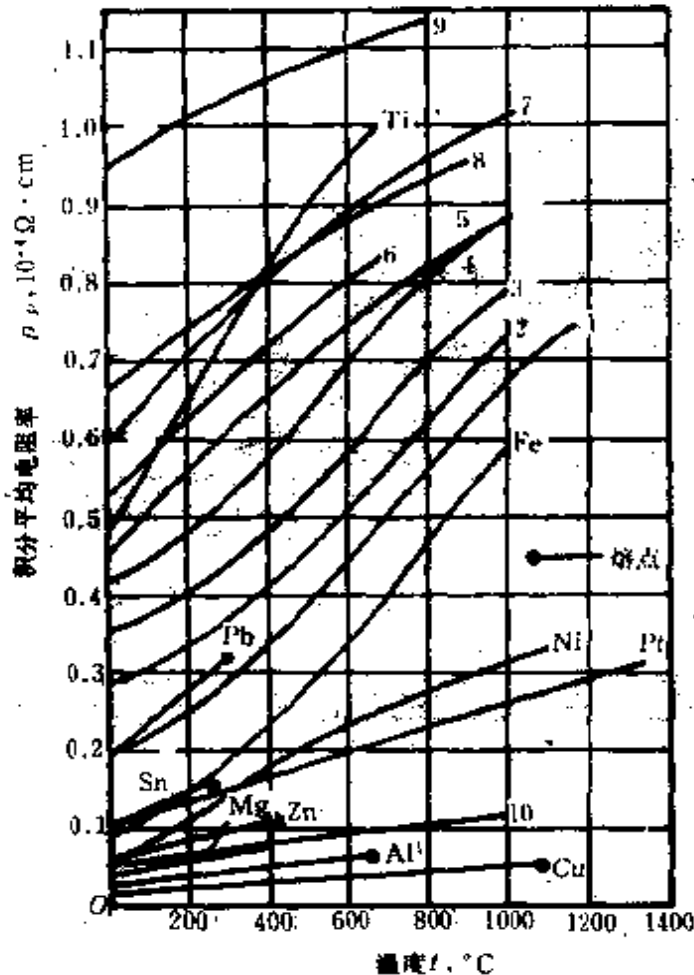


图 13—6 圆柱形炉料及其感应器的尺寸

$\rho_p$ ——材料积分平均电阻率( $\Omega \cdot \text{cm}$ ), 见图 13—7;



13—7 金属材料的积分平均电阻率

1. 碳钢(C0.44 ~ 1.5%) 2. 镍钢(Ni5.5%) 3. 镍钢(Ni14.7%) 4. 镍钢(Ni25%) 5. 铬钢(Cr12%) 6. 铬钢(Cr13.65%) 7. 铬钢(Cr25%) 8. 镍铬钢(Ni8.04%, Cr17.87%) 9. 镍铬钢(Ni26.86%, Cr15.20%) 10. 黄铜(Cu58% ~ 62%, 其余 Zn)



$\rho$ —— 金属材料的电阻率( $\Omega \cdot \text{cm}$ );

$t$ —— 温度( $^{\circ}\text{C}$ );

$D$ —— 圆柱形炉料的直径( $\text{cm}$ )。

电源频率也可参见表 13—18 选择

表 13—18 金属材料感应透热频率的选择

电源频率 (Hz)	炉 料 直 径 (mm)					
	钢	铜	黄铜	镍	铝	钛
50	> 150, 最佳 330	> 70, 最佳 90	> 100	> 120, 最佳 210	> 70, 最佳 90	> 200, 最佳 200
1000	40 ~ 150	20 ~ 500	25 ~ 300	—	—	—
2500	25 ~ 70	10 ~ 300	13 ~ 150	—	—	—
8000	12 ~ 50	5 ~ 150	8 ~ 100	—	—	—

(2) 感应器的尺寸: 用不锈钢筒作内衬的感应器, 取  $D_1 = (1.3 \sim 1.5)D$ ; 用耐火材料作炉衬的感应器, 取  $D_1 = (1.4 \sim 2.0)D$ ,  $D$  大时取较小值,  $D$  小时取较大值。炉衬内径取  $(1.1 \sim 1.2)D$ 。

感应器长度取  $L_1 = L + (0.85 \sim 1.5)D$ 。

2. 圆管形炉料及其感应器(图 13—8)

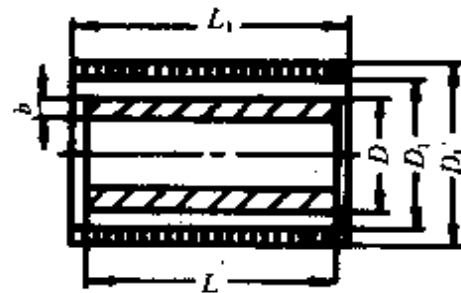


图 13—8 圆管形炉料及其感应器的尺寸

(1) 电源频率:

初选频率

$$f \geq \frac{4 \times 10^7 \rho_p}{\mu_r (D - b) b K_1}$$

式中： $f$ ——电源频率(Hz)

$D$ ——圆管形炉料的外径(cm)；

$b$ ——圆管壁厚(cm)；

$K_1$ ——系数；可由图 13—9 查得，图中  $\sigma = (D - b)/L$ ， $L$  为炉料长度(cm)；

其它符号同前。

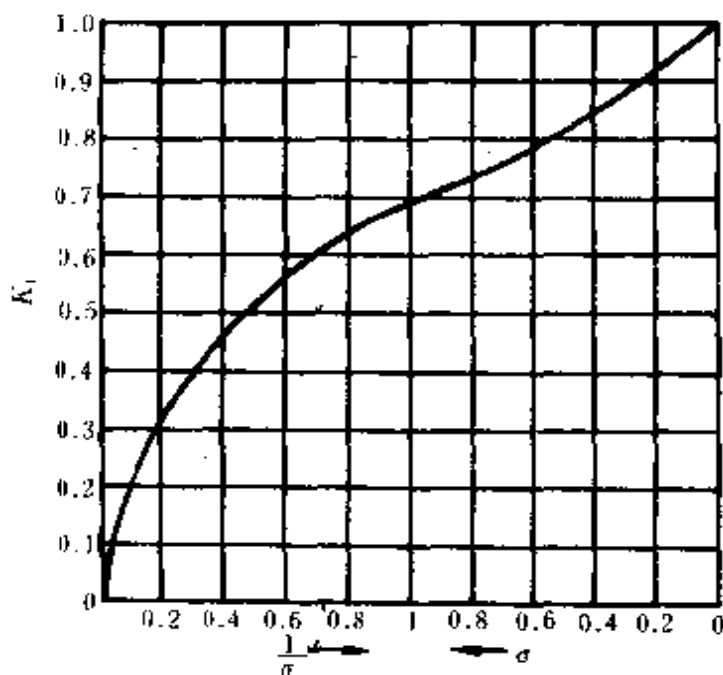


图 13—9  $K_1$  值

初选频率确定后，再按式  $\delta = 5030 \sqrt{\rho_p / (\mu_r f)}$  计算出电流透入深度  $\delta$ 。如  $\delta > b$ ，则所选取的频率  $f$  可用；如  $\delta < b$ ，则频率  $f$  应参照圆形炉料的公式选择。

(2) 感应器的尺寸：同圆柱形炉料的感应器。

3. 矩形截面炉料及其感应器(图 13—10)

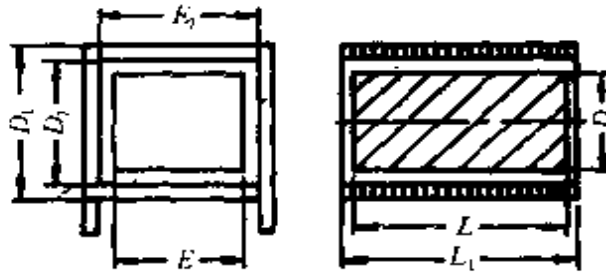


图 13-10 矩形截面炉料及其感应器的尺寸

(1) 电源频率:

① 当  $E = D$  (即方锭) 时, 可将其折算成等截面积的圆柱形炉料, 按计算圆柱形炉料的方法选取频率。

② 当  $E > D$  时, 可按下式选取:

$$f \geq \frac{F_f \rho_p \times 10^8}{\mu_r D^2}$$

式中:  $f$ ——电源频率(Hz);

$F_f$ ——系数, 约  $1 \sim 6.25$ , 当  $D/L < 0.1$  和  $D/E < 0.1$  时取  $1$ ; 当  $D/L = D/E = 0.5$  时取  $4.8$ 。

(2) 感应器的尺寸: 参照圆柱形炉料的感应器尺寸。当采用不锈钢筒内衬时,  $D_1 = (1.25 \sim 1.5)D$ ; 当采用耐火材料炉衬时,  $D_1 = (1.4 \sim 3.0)D$ ;  $E_1$  类推。当炉料较薄、加热中挠曲较大时,  $D_1$  应适当放大。

$$L_1 = L + (1.0 \sim 1.5)D$$

#### 4. 淬火感应器

(1) 电源频率: 棒材和板材表面淬火所需的电源频率可按下列式选取:

$$150/\delta_s^2 < f < 2500/\delta_s^2$$

式中:  $\delta_s$ ——所要求的淬硬层深度(cm)。

(2) 电源功率  $P$ :

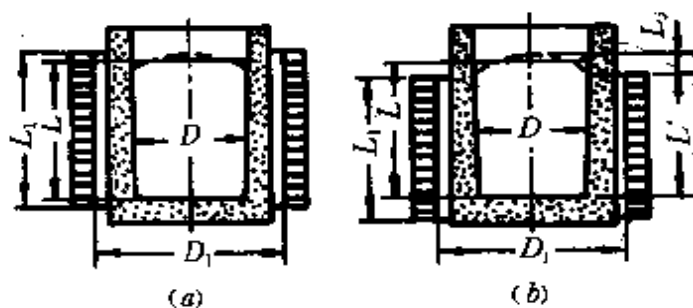
$$P = P_s S / \eta$$

式中： $P_s$ ——感应表面淬火需要的功率密度，对中频为  $0.5 \sim 2.5 \text{ kW/cm}^2$ ；对高频为  $0.2 \sim 1.5 \text{ kW/cm}^2$ ；当  $\delta_s$  大时取较小值；

$S$ ——材料淬火表面积 ( $\text{cm}^2$ )；

$\eta$ ——感应器效率，约  $0.6 \sim 0.85$ 。

5. 坩埚和感应器(图 13—11)



13—11 无芯感应熔炼炉炉料和感应器尺寸  
(a) 中频炉 (b) 工频炉

(1) 电源频率：

$$f \geq \frac{25 \times 10^8 \rho}{D^2}$$

式中： $f$ ——电源频率(Hz)；

$\rho$ ——液态炉料的电阻率( $\Omega \cdot \text{cm}$ )；

$D$ ——坩埚的平均内径(cm)。

(2) 感应器的尺寸：

① 坩埚的有效容积：

$$V_z = 10^3 G / \gamma_y$$

式中： $V_z$ ——坩埚的有效容积( $\text{cm}^3$ )；

$\gamma_y$ ——液态金属的密度( $\text{kg/L}$ )；

$G$ ——炉子容量(kg)。

铸铁熔炼用工频炉的最小经济容量约为 750kg。

② 坩埚的平均内径  $D$  和液态炉料的高度  $L$ ；

$$D = \sqrt[3]{4V_g/\pi a}; L = aD$$

式中,  $a$  见表 13-19。

③ 感应线圈的内径  $D_1$ :

$$D_1 = D + 2\Delta_x$$

式中:  $\Delta_x$ ——坩埚壁厚(cm), 铸铁用炉,  $\Delta_x$  值可按表 13-19

选择; 中频炉和有色金属熔炉的  $\Delta_x$  值可取稍小。

表 13-19 耐火材料坩埚的  $a$  和  $\Delta_x$  值

炉子容量(kg)	$a$	$\Delta_x$ (cm)
< 500	2 ~ 1.5	(0.25 ~ 0.2)D
500 ~ 3000	1.5 ~ 1.25	(0.2 ~ 0.15)D
> 3000	1 ~ 1.25	(0.15 ~ 0.1)D

④ 感应器的高度  $L_1$ :

中频炉  $L_1 \approx (1.1 \sim 1.3)L$

工频炉  $L_1 \approx L - (0.8 \sim 1.3)L_i$

$$L_i = \frac{100P}{DL\gamma_s \sqrt{\rho f}}$$

式中:  $L_i$ ——当液态炉料与坩埚的交界线位于感应器顶部平面时, 液态炉料由于电动力所产生的液面驼峰高度(cm);

$L$ ——液态炉料被感应器包围部分的高度(cm), 初算时可取  $L = (0.7 \sim 0.9)L$ ; 对小容量炉取较大值。

以上求得的  $L_1$  值对熔铝、镁、锌炉取较小值; 熔铜、钢和铸铁炉取较大值。

### 三、输电线路计算

1. 中频线路用电缆的长期允许工作电流(表 13-20)。

表 13--20 不同频率下多芯电缆的长期允许工作电流(A)

缆芯名义截面 (mm <sup>2</sup> )	频 率 (Hz)											
	500		1000		2500		8000		10000			
	双芯	四芯	双芯	四芯	双芯	四芯	双芯	四芯	双芯	四芯	双芯	四芯
25	115/100	—	95/80	—	76/66	—	57/47	—	55/45	—	—	—
35	130/115	—	110/95	—	86/75	—	65/55	—	60/50	—	—	—
50	150/130	290/235	120/105	235/205	96/84	185/160	75/65	135/115	70/60	130/110	—	—
70	180/155	320/280	150/130	265/230	115/100	210/185	90/75	155/135	85/70	150/130	—	—
95	205/180	385/335	170/150	325/305	135/120	250/220	100/85	190/160	95/80	180/150	—	—
120	225/200	430/370	190/170	355/310	150/135	280/250	115/105	210/180	105/95	200/170	—	—
150	260/225	470/415	215/185	385/340	170/150	310/260	130/110	230/195	120/105	220/190	—	—

注:

①表中分子指铜芯电缆,分母指铝芯电缆。

②表中数据相当于电缆的环境温度为25°C,最高温升为55°C的情况。

## 2. 汇流排的长期允许工作电流

中、高频线路用汇流排的长期允许工作电流可按式估算  
(电流方向如表 13—20 图所示)：

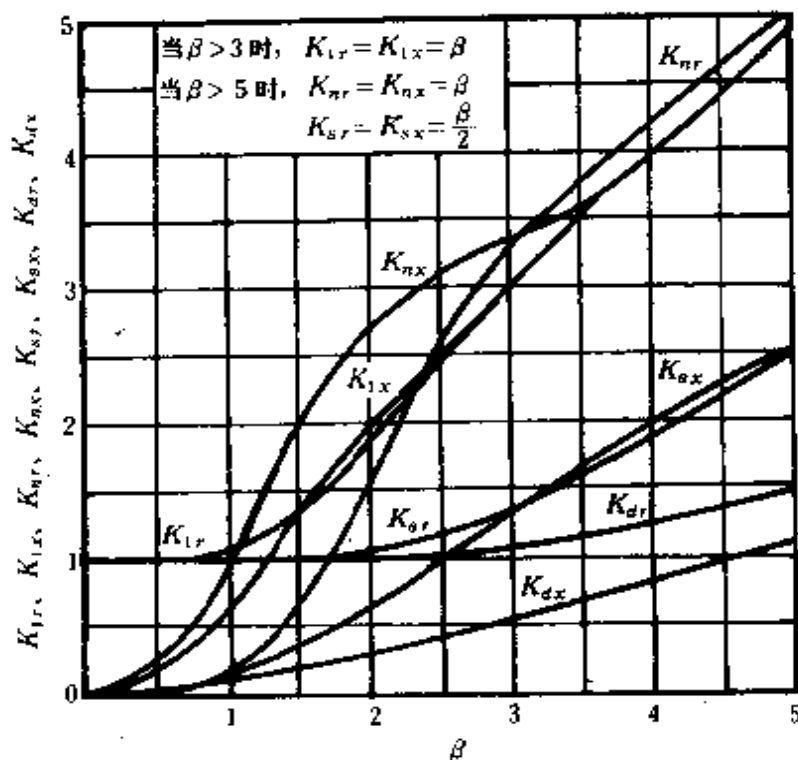


图 13—12  $K_{1r}, K_{1x}, K_{nr}, K_{nr}, K_{nr}, K_{dr}, K_{dr}, K_{dr}$  的值

$$I_c = K_c(n - 1)I_0 \sqrt{\delta_r/d}$$

- 式中：
- $I_0$ ——汇流排长期允许直流(或工频)电流(A)；
  - $K_c$ ——系数,对双条汇流排取 1;多条取 0.7;
  - $n$ ——汇流条的条数;
  - $\delta_r$ ——汇流排材料的电流透入深度(m);
  - $d$ ——汇流条的厚度(cm),对两侧汇流条应有  $d > 1.2\delta_r$ ;中间汇流条  $d > 2.4\delta_r$ 。

## 3. 线路电压降

$$\Delta U_r = I_r(R_r + jX_r)$$

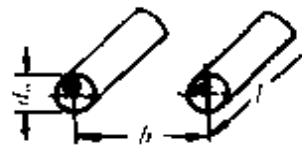
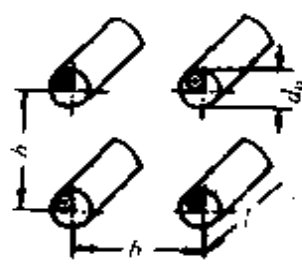
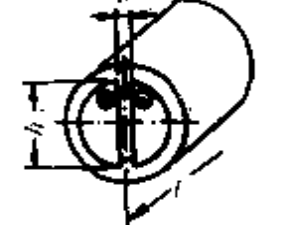
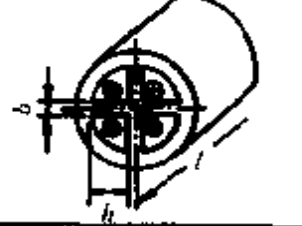
## 4. 线路功率损耗

$$P_{xl} = I_x^2 R_x \times 10^{-3}$$

式中： $R_x$ 、 $X_x$ ——汇流排的电阻和电抗( $\Omega$ )。

5. 交流输电线路的阻抗计算(表 13—21 和表 13—22)

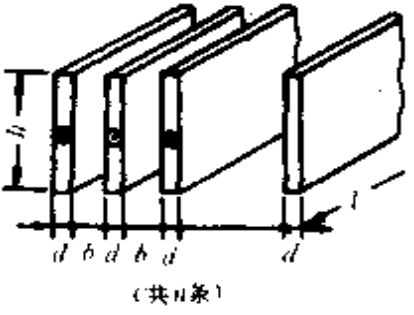
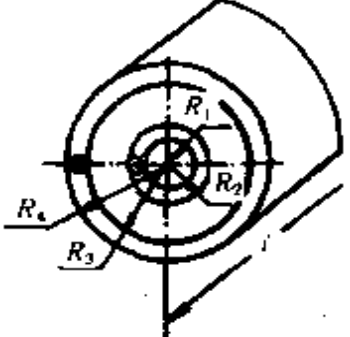
表 13—21 交流输电线路的电阻  $R_x$  和电抗  $X_x$ (一)

图号	线路类型	$R_x$ 和 $X_x$ ( $\Omega$ )
1		$R_x = \frac{2\rho_x l K_{dr}}{S_x}$ $X_x = \frac{2\rho_x l K_{dr}}{S_x} + 2.89 \times 10^{-8} f l g \frac{2b}{d_0}$
2		$R_x = \frac{\rho_x l K_{dr}}{S_x}$ $X_x = \frac{\rho_x l K_{dr}}{S_x} + 2.89 \times 10^{-8} f l g \frac{2b}{d_0} - 2.51$ $\times 10^{-8} f l \left(\frac{b}{d_0}\right) \left[1 + \frac{3}{2} \left(\frac{b}{d_0}\right)\right]$
3		$R_x = \frac{2\rho_x l K_{1r}}{S_x}$ $X_x = \frac{2\rho_x l K_{1x}}{S_x} + 7.9 \times 10^{-8} \frac{f b l}{h}$
4		$R_x = \frac{\rho_x l K_{1r}}{2S_x}$ $X_x = \frac{\rho_x l K_{1x}}{2S_x} + 7.9 \times 10^{-8} \frac{f b l}{4h}$

注： $\rho_x$ —线路材料的电阻率( $\Omega \cdot \text{cm}$ )； $l$ —线路长度(cm)； $d_0$ —电缆外径(cm)； $\delta_x$ —线路材料的电流透入深度(cm)； $b$ —电缆间中心距(图 1、2)，缆芯间距(图 3、4)； $f$ —电流频率(Hz)； $S_x$ —电缆截面( $\text{cm}^2$ )， $S_x = 0.75\pi d_0^2/4$ (图 1、2)；每股缆芯的截面( $\text{cm}^2$ ，图 3、4)； $h$ —缆芯宽度(cm)； $K_{dr}$ 、 $K_{dx}$ —系数，由图 13—12 查得，图中  $\beta = d_0/\delta_x$ ； $K_{1r}$ 、 $K_{1x}$ —系数，由图 13—12 查得，图中  $\beta = h/\delta_x$ 。



表 13—22 交流输电线路的电阻  $R_x$  和电抗  $X_x$  (二)

图号	线路类型	$R_x$ 和 $X_x$ ( $\Omega$ )
1	 <p>(共 <math>n</math> 条)</p>	$R_x = \frac{\rho_x l K_{or}}{hd}$ $X_x = \frac{\rho_x l K_{ox}}{hd} + \frac{7.9 \times 10^{-3} f b l}{(n-1)h}$ <p>式中, 当 <math>n</math> 为偶数时 (<math>n \geq 2</math>)</p> $K_{or} = \frac{4K_{or}K_{1r}}{2K_{or} + (n-2)K_{1r}}$ $K_{ox} = \frac{4K_{ox}K_{1x}}{2K_{ox} + (n-2)K_{1x}}$ <p>当 <math>n</math> 为奇数时 (<math>n \geq 3</math>)</p> $K_{or} = \frac{4K_{or} + [2K_{or} + (n-2)K_{1r}]}{(n-1)[4K_{or} + (n-3)K_{1r}]}$ $K_{ox} = \frac{4K_{ox}(2K_{ox} + (n-2)K_{1x})}{(n-1)(4K_{ox} + (n-3)K_{1x})}$ <p>当频率很高, <math>d/\delta_x \geq 4</math> 时</p> $K_{or} \approx K_{ox} \approx \frac{2d}{\delta_x(n-1)}$
2		$R_x = \frac{\rho_x l}{\pi} \left[ \frac{K_{1r2}}{(2R_2 - \delta_x)(R_2 - R_1)} + \frac{K_{1r3}}{(2R_3 + \delta_x)(R_4 - R_3)} \right]$ $X_x = 4\pi f l \times 10^{-9} \left[ \ln \frac{R_3}{R_2} + \frac{\delta_x^2 K_{1x2}}{2(R_3 - R_1)R_2} + \frac{\delta_x^2 K_{1x3}}{2(R_4 - R_3)R_3} \right]$

注:  $\rho_x, l, f, \delta_x$ —同前;  $h$ —汇流条高度 cm;  $d$ —汇流条厚度 cm;  $b$ —汇流条之间的间距 cm;  $n$ —汇流条的条数;  $K_{or}, K_{ox}, K_{1r}, K_{1x}$ —系数, 由图 13—12 查得, 图中  $\beta = d/\delta_x$ ;  $R_1, R_2, R_3, R_4$ —分别为内外管的内外半径 cm;  $K_{1r2}, K_{1r3}, K_{1x2}, K_{1x3}$ —由图 13—12 查得;  $K_{1r2}$  按  $\beta = \frac{R_2 - R_1}{\delta_x}$  查  $K_{1r}$  曲线;  $K_{1r3}$  按  $\beta = \frac{R_4 - R_3}{\delta_x}$  查  $K_{1r}$  曲线;  $K_{1x2}$  按  $\beta = \frac{R_2 - R_1}{\delta_x}$  查  $K_{1x}$  曲线;  $K_{1x3}$  按  $\beta = \frac{R_4 - R_3}{\delta_x}$  查  $K_{1x}$  曲线。

#### 四、中频感应炉补偿电容的计算

感应炉是个感性负荷,功率因数很低,需要电容器进行无功补偿。补偿电容器一般通水冷却,也有自然冷却的。通水冷却,如RW0.5—125—2.5s型中频电热电容器,其工作电压是500V、标称容量为125kVar、运行频率为2500Hz。

补偿电容器的电容量可按下列式计算:

$$C = \frac{I_1 \sin\varphi + I_1 \cos\varphi \tan\varphi}{2\pi f v}$$

式中: C——电容器电容量( $\mu\text{F}$ );

$I_1$ ——流过感应线圈的电流(A);

$\cos\varphi$ ——感应线圈的功率因数;

$\varphi$ ——补偿后的功率因数角;

f——运行频率(Hz);

U——中频电源电压有效值(V)。

补偿电容器的容量可按下列式计算:

$$Q_c = QP + UI_0 \sin\varphi$$

式中:  $Q_c$ ——电容器容量(kVar);

Q——感应线圈的品质因数,见表13—23;

P——有功功率(kW);

$I_0$ ——逆变器输出电流有效值(A)。

表 13—23 各种用途的感应线圈的品质因数 Q 值

用途	熔炼	透热	淬火	烧结
Q 值	10 ~ 20	5 ~ 10	3 ~ 5	3 ~ 7

**例 13—5** 功率为100kW、频率为1000Hz、容量为150kg的中频感应熔炼炉,已知中频电源电压为700V,逆变器输出电流为220A,功率因数角 $\varphi = 36^\circ$ 。试求补偿电容器容量。

**解**  $Q_c = qP + UI_0 \sin\varphi$

$$= 11 \times 100 \times 10^3 \times 700 \times 220 \times \sin 36^\circ = 1190.5 (\text{kVar})$$

可选用 RW0.75—90—1S 型中频电容器, 每台电容量为  $25\mu\text{F}$ , 每台实际无功功率为

$$\begin{aligned} Q_{c1} &= 2\pi fCV^2 \\ &= 2\pi \times 10^3 \times 25 \times 10^{-6} \times 700^2 = 77(\text{kVar}) \end{aligned}$$

故共需补偿电容器的台数为

$$n = Q_c / Q_{c1} = 1190.5 / 77 \approx 16(\text{台})$$

### 五、工频感应加热器的计算

工频感应加热器实际上是利用涡流发热达到干燥、加热目的的一种加热器。在被加热的物料容器(钢质)外面加保温层, 再在保温层外面绕线圈, 通电即成。加热温度一般不超过  $600^\circ\text{C}$ 。

工频感应加热器的精确计算很困难, 下面介绍两种简易实用的计算方法。

#### 1. 方法一:

##### (1) 加热器的功率

$$P = \lambda F(t_1 - t_0)$$

式中:  $P$ ——加热器所需功率(kW);

$F$ ——工件的表面积( $\text{m}^2$ );

$t_1$ ——加热所需的最高温度( $^\circ\text{C}$ );

$t_0$ ——周围介质温度( $^\circ\text{C}$ );

$\lambda$ ——导热系数( $\text{kW}/\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$ ), 塔釜保温良好时取  $5.3 \times 10^{-3}$ , 不保温时取  $12 \times 10^{-3}$ ; 平面油箱保温良好时取  $5 \times 10^{-3}$ , 不保温时取  $12 \times 10^{-3}$ ; 管式油箱保温良好时取  $6 \times 10^{-3}$ , 不保温时取  $16 \times 10^{-3}$ ; 对于保温变压器取  $5 \times 10^{-3}$ , 不保温变压器取  $12 \times 10^{-3}$ 。

##### (2) 励磁电流

###### ① 单相电源:

$$I = \frac{P \times 10^3}{U \cos\varphi}$$

式中:  $I$ ——励磁电流(A);

$U$ ——电源电压(V);

$\cos\varphi$ ——功率因数,可取 0.5 ~ 0.7;

$P$ ——同前。

② 三相电源:

由于 
$$I = \frac{P \times 10^3}{\sqrt{3} U \cos\varphi}$$

故每相励磁电流  $I_x$  为:

绕组星形接法 
$$I_x = I$$

绕组三角形接法 
$$I_x = I / \sqrt{3}$$

式中:  $I$ ——线电流(A);

$U$ ——电源线电压(V);

其它符号同前。

(3) 导线选择

导线截面可按安全电流选取,即

单相 
$$q = I / j$$
; 三相 
$$q = I_x / j$$

式中:  $q$ ——导线截面( $\text{mm}^2$ );

$j$ ——电流密度( $\text{A}/\text{mm}^2$ ),铜导线取 4.5,铝导线取 3;

$I, I_x$ ——同前。

(4) 单位面积上的功率损耗计算

① 单相电源:

$$\Delta P = P / F_t$$

② 三相电源:

$$\Delta P = \frac{P}{3F_t}$$

式中:  $\Delta P$ ——单位面积上的功率损耗( $\text{kW}/\text{m}^2$ );

$F_t$ ——被励磁绕组覆盖的面积( $m^2$ );

$F'_t$ ——被每相励磁绕组覆盖的面积( $m^2$ );

$P$ ——同前。

(5) 励磁绕组匝数计算

① 单相电源:

$$W = \frac{KU}{l}$$

式中: $W$ ——励磁绕组匝数(匝);

$U$ ——电源电压(V);

$l$ ——被加热体周长(m);

$K$ ——系数,可由图 3—53 查得。

② 三相电源:

$$W = \frac{KU_x}{l}$$

式中: $W$ ——每相励磁绕组的匝数(匝);

其它符号同前。

(6) 注意事项

① 中部线圈的匝数约取端部匝数的 75%。

② 欲增大电流,则减少匝数;欲减小电流,则增加匝数。

**例 13—6** 某工厂有一工艺罐,罐筒体为铁质,圆柱体,一端封闭,罐长 12m、直径 2m,欲采用三相 380v 工频感应加热法进行干燥处理。试计算加热器的有关参数。设环境温度为 30°C,最高干燥温度为 150°C。

**解**

(1) 干燥所需功率

罐体的表面积

$$F = \pi dH + \pi \frac{d^2}{4} = \pi \times 2 \times 12 + \pi \frac{2^2}{4} = 78.5(m^2)$$

设保温良好,取  $\lambda = 5.3 \times 10^{-3}kW/m^2 \cdot ^\circ C$

干燥所需功率为

$$P = \lambda F(t_1 - t_0) = 5.3 \times 10^{-3} \times 78.5 \times (150 - 30) \\ = 49.9(\text{kW})$$

(2) 励磁电流

若绕组采用三角形接法,取  $\cos\varphi = 0.6$ ,则

$$I = \frac{P \times 10^3}{\sqrt{3} U \cos\varphi} = \frac{49.9 \times 10^3}{\sqrt{3} \times 380 \times 0.6} = 126(\text{A})$$

每相励磁电流为

$$I_x = I / \sqrt{3} = 126 / \sqrt{3} = 72.8(\text{A})$$

(3) 导线选择

$$q = I_x / j = 72.8 / 3 = 24.2(\text{mm}^2)$$

可选用截面积为  $25\text{mm}^2$  的铝导线。

(4) 计算单位面积上的功率损耗

$$\Delta P = \frac{P}{3F_t} = \frac{49.9}{3 \times \frac{78.5}{3} \times 0.95} = 0.67(\text{kW}/\text{m}^2)$$

式中:0.95 为绕组覆盖面积的利用系数。

(5) 求匝数

由图 3-63 查得  $K = 2.1$

中部绕组匝数(作为一相)

$$W = \frac{KU_x}{l} = \frac{2.1 \times 380}{2\pi} = 127(\text{匝})$$

每个端部的匝数(作为另外两相)

$$W' = 127 \div 75\% = 169(\text{匝})$$

实施时,尚须进行现场调试,以符合工艺对温度的要求,并适当考虑三相负荷的平衡。

**2. 方法二:**

该计算方法适合圆柱形钢(铁)质容器。

(1) 物料吸收的热量

$$Q = G(C_2t_2 - C_1t_1)$$

式中： $Q$ ——物料吸收的热量(kJ)；

$G$ ——被加热物料的重量(kg)

$C_1, C_2$ ——物料起始和终止温度时的比热(kJ/kg·°C)，见表 13—10；

$t_1, t_2$ ——物料起始和终止温度(°C)。

若将热量转换成功率，则

$$P_G = \frac{Q}{3.6\eta_s t}$$

式中： $P_G$ ——物料需要的功率(kW)；

$\eta_s$ ——转换效率(%)；

$t$ ——加热时间(h)。

(2) 加热器的功率

感应加热器的功率应不小于物料需要的功率，即

$$P \geq P_G$$

① 被加热容器单位面积吸收能量(即功率密度)可按下式计算：

$$P = 2 \times 10^{-6} H_0^2 \sqrt{\rho \mu r f}$$

式中： $P$ ——功率密度(kW/m<sup>2</sup>)；

$H_0$ ——容器表面磁场强度(A/m)，计算公式见后；

$\rho$ ——容器材料的电阻率(Ω·cm)；

$\mu r$ ——容器材料的相对磁导率；

$f$ ——电源频率(Hz)。

② 加热器的功率：

$$P = pF = 2 \times 10^{-6} H_0^2 \sqrt{\rho \mu r f} \cdot \pi dH$$

式中： $P$ ——加热器功率(kW)；

$F$ ——容器被加热面的面积(m<sup>2</sup>)；

$d$ —— 容器直径(m);

$H$ —— 容器高度(或长度 —— 平放时)(m);

其它符号同前。

(3) 线圈匝数计算

① 容器表面磁场强度:

$$H_0 = \frac{W}{L}I$$

② 励磁电流(采用单相电源时):

$$I = \frac{P \times 10^3}{U \cos \varphi}$$

式中: $W$ —— 线圈匝数(匝);

$L$ —— 加热器长度(m),取与容器高度(或长度 —— 平放时)相等;

$U$ —— 电源电压(V);

$\cos \varphi$ —— 功率因数,一般取 0.6。

③ 线圈匝数:由以上三式,并考虑到加热设备的效率 $\eta$ ,及 $f = 50\text{Hz}$ ,可得

$$W = U \cos \varphi \sqrt{\frac{22.4L\eta}{dP \times 10^3 \sqrt{\rho\mu r}}}$$

(4) 实用计算方法

由上述理论公式计算较困难,可以用下面的实用方法求之。求解步骤如下:

① 按设计要求的电源电压、频率、功率密度、加热温度,由图 13—13 和图 13—14 查得容器的 $\sqrt{\rho\mu r}$ 值、功率因数 $\cos \varphi$ 及设备效率 $\eta$ 。

② 根据下式求出线圈匝数:

$$W = U \cos \varphi \sqrt{\frac{22.4L\eta}{dP \times 10^3 \sqrt{\rho\mu r}}}$$



③ 再按下式求得励磁电流：

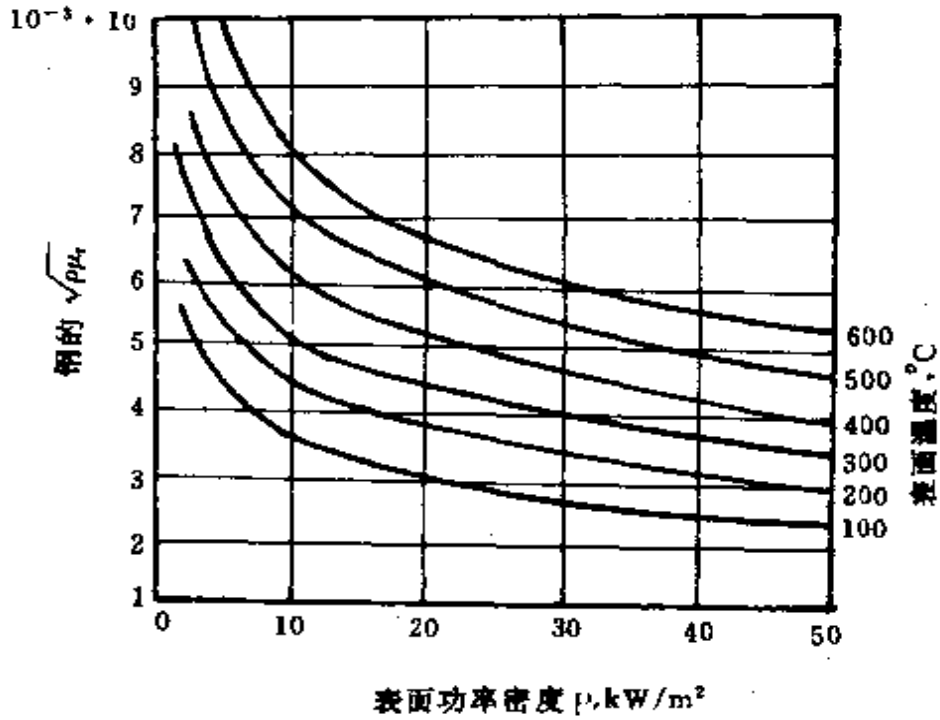


图 13—13 在不同温度下钢的  $\sqrt{\rho\mu}$  值与功率密度的关系

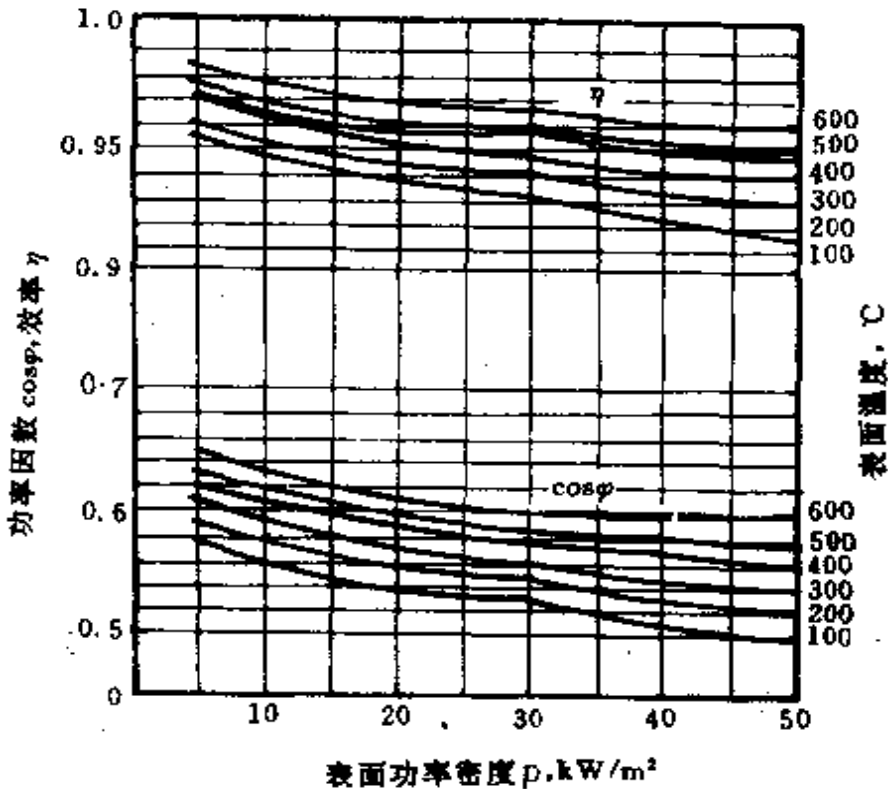


图 13—14 在不同温度下  $\cos\phi$  及  $\eta$  与功率密度的关系

$$I = \frac{P \times 10^3}{U \cos \varphi}$$

④ 选择导线截面：

$$q = I/j$$

式中：  $q$ —— 导线截面 ( $\text{mm}^2$ )；

$j$ —— 电流密度 ( $\text{A}/\text{mm}^2$ )，铜导线取 4.5，铝导线取 3。

**例 13-7** 某工艺容器用 5mm 的钢板制成圆筒状，筒长 1m，直径 0.5m，要求物料加热  $300^\circ\text{C}$ 。欲采用单相 380V 电源作工频感应加热。试计算加热器的有关参数。

**解**

(1) 求  $\sqrt{\rho\mu r}$ 、 $\cos\varphi$  和  $\eta$ ：

功率密度估计为  $P = 10\text{kW}/\text{m}^2$ ，按题意，由图 13—13 和图 13—14 查得  $\sqrt{\rho\mu r} = 5.1 \times 10^{-3}$ ， $\cos\varphi = 0.6$ ， $\eta = 0.96$

(2) 加热器的功率：

$$P = pF = P\pi dH = 10 \times \pi \times 0.5 \times 1 = 15.7(\text{kW})$$

(3) 线圈匝数：

$$\begin{aligned} W &= U \cos \varphi \sqrt{\frac{22.4L\eta}{dP \times 10^3 \sqrt{\rho\mu r}}} \\ &= 380 \times 0.6 \sqrt{\frac{22.4 \times 1 \times 0.96}{0.5 \times 15.7 \times 10^3 \times 5.1 \times 10^{-3}}} \\ &= 167(\text{匝}) \end{aligned}$$

(取  $L = H = 1\text{m}$ )

(4) 励磁电流：

$$I = \frac{P \times 10^3}{U \cos \varphi} = \frac{15.7 \times 10^3}{380 \times 0.6} = 68.8(\text{A})$$

(5) 导线截面：

$$q = I/j = 68.8/4.5 = 15.3(\text{mm}^2)$$

选取  $16\text{mm}^2$  的铜线。

### 六、无芯工频电炉的计算

无芯工频电炉是单相负荷,为了使其接入电源后达到三相平衡,可将炉子感应器与平衡电容和平衡电抗组成三相平衡系统(图 13-15)。

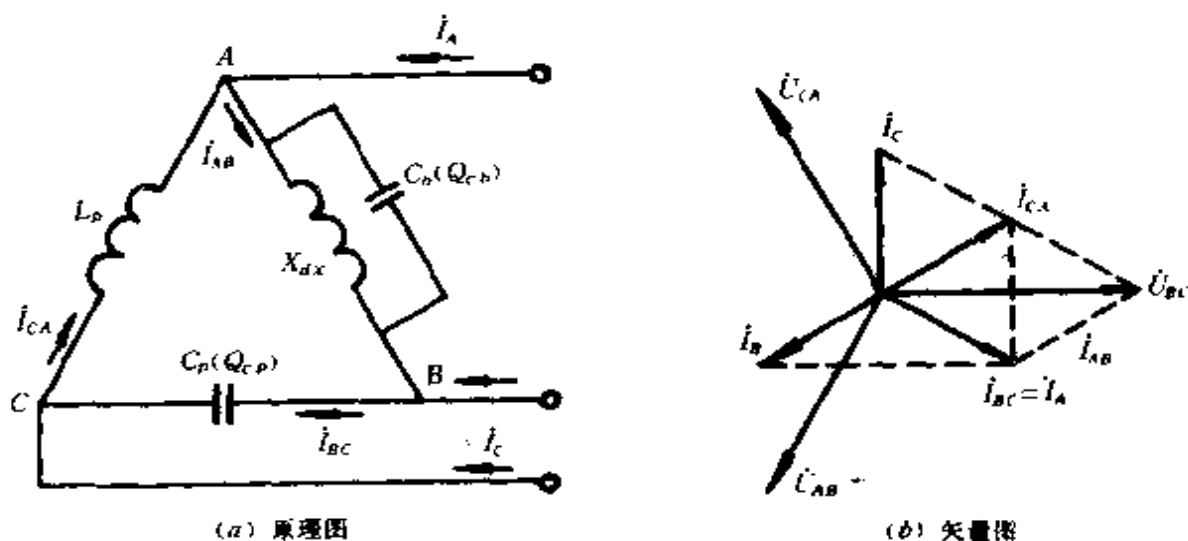


图 13-15 感应器、电容、电抗组成的三相平衡系统及矢量图

图中,  $X_{ax}$  为无芯电炉感应器的等值电抗,  $C_c$  为感应器的补偿电容,  $C_p$  为平衡电容,  $L_p$  为平衡电抗。如果将功率因数补偿到 1, 则矢量图如图 13-15(b) 所示。

接入平衡电容和平衡电抗的三相平衡条件是:

1. 炉子的功率因数应补偿到  $\cos\varphi = 1$ 。
2.  $I_{BC} = I_{CA} = I_{AB} / \sqrt{3}$  和  $I_{BC} + I_{CA} = I_{AB}$ 。
3. 电源相序应该是逆序的, 即负载三角形与电源的接线必须按图 13-15(a) 的接法。

平衡电容和平衡电抗的无功功率计算

$$Q_c = U_{BC} I_{BC} = U_{BC} I_{AB} / \sqrt{3} = P / \sqrt{3}$$

$$Q_L = U_{CA}I_{CA} = U_{CA}I_{AB}/\sqrt{3} = P/\sqrt{3}$$

$$P = (1.1 \sim 1.15)P_r$$

式中： $Q_c$ 、 $Q_L$ ——平衡电容和平衡电抗的无功功率(kVar)；

$P$ ——炉子的有功功率(kW)；

$P_r$ ——炉子的额定功率(kW)。

平衡电抗计算

$$L_p = \frac{U^2}{2\pi f Q_L}$$

式中： $L_p$ ——平衡电抗(mH)；

$U$ ——线电压(V)。

另外，要注意电容器实际运行电压与其额定电压(铭牌电压)是否相同。如果不同，则需要折算。如铭牌电压为400V的电容器运行在380V时，其容量 $Q_c$ 将为额定值的 $(380/400)^2 = 0.9$ 倍。因此所计算的 $C_s$ 和 $C_p$ 值都要除以0.9。

设计电路时，平衡电容和平衡电抗应分级，一般分为五级左右，而补偿电容分级需更多，以便于调整。

**例 13—8** 有一250kg无芯工频电炉，已知有功功率 $P$ 为120kW，自然功率因数 $\cos\varphi$ 为0.15，试求补偿电容容量 $Q_{cs}$ 、平衡电容容量 $Q_{cp}$ 和平衡电抗 $L_p$ 。

**解**

(1) 炉子补偿到 $\cos\varphi_2 = 1$ 时的补偿电容容量 $Q_{cs}$ ：

$$\cos\varphi_1 = 0.15, \cos\varphi_2 = 1, \text{相应的 } \operatorname{tg}\varphi_1 = 6.6, \operatorname{tg}\varphi_2 = 0。$$

$$Q_{cs} = P(\operatorname{tg}\varphi_1 - \operatorname{tg}\varphi_2) = 120 \times 6.6 = 790(\text{kVar})$$

(2) 平衡电容容量 $Q_{cp}$ ：

$$Q_{cp} = P/\sqrt{3} = 120/\sqrt{3} = 69(\text{kVar})$$

(3) 平衡电抗 $L_p$ ：

$$Q_L = P/\sqrt{3} = 69(\text{kVar})$$

$$\text{故 } L_p = \frac{U^2}{2\pi f Q_L} = \frac{380^2}{314 \times 69} = 6.66(\text{mH})$$

### 第四节 远红外加热计算

#### 一、红外区的划分及远红外加热机理

红外线的波长范围大致在  $0.76 \sim 1000\mu$  频谱之内。相对应的频率大致在  $4 \times 10^{14} \sim 3 \times 10^{11}\text{Hz}$  之间。红外区的划分如表 13—24 所示。

表 13—24 红外区的划分( $\mu$ )

学 科	近红外	中红外	远红外	极远红外
红外分析	0.78 ~ 2.5 0.78 ~ 2	2.5 ~ 25 2 ~ 25	25 ~ 1000 25 ~ 1000	
光学物理	0.75 ~ 1.5	1.5 ~ 5.6	5.6 ~ 1000	
照 明	0.78 ~ 1.4	1.4 ~ 3	3 ~ 1000	
其 它	0.75 ~ 4 0.76 ~ 3	3 ~ 6	4 ~ 400 6 ~ 15	400 ~ 1000 15 ~ 1000
加 热	0.75 ~ 2.5		2.5 ~ 15 (实效区)	15 ~ 1000 (微效区)

国际照明委员会规定： $0.78 \sim 1.4\mu$  为近红外； $1.4 \sim 3\mu$  为中红外； $3 \sim 1000\mu$  为远红外，用于加热最适宜。

远红外加热是指利用波长  $2.5 \sim 25\mu$  的辐射加热技术。当辐射源的波长与被加热物的吸收波长相一致时，被加热物就吸收大量的红外能，从而改变和加剧其分子的运动，达到发热升温加热的作用，这就是所谓匹配吸收原理。

## 二、黑体辐射基本定律

### 1. 普朗克定律

黑体在绝对温度  $T$  K 时,单位表面积在半球面方向辐射的能量对波长的分布关系,称为普朗克定律。

光谱辐射通量密度

$$W_\lambda = \frac{C_1}{\lambda^5 (e^{C_2/\lambda T} - 1)}$$

式中: $W_\lambda$ —— 光谱辐射通量密度( $W/cm^2 \cdot \mu$ );

$C_1$ —— 第一辐射常数,为  $3.7413 \times 10^4 W\mu^4/cm^2$ ;

$C_2$ —— 第二辐射常数,为  $1.4388 \times 10^4 \mu K$ ;

$\lambda$ —— 波长( $\mu$ );

$T$ —— 绝对温度(K)。

例如,800°C 黑体对波长  $1.5\mu$  红外光的辐射通量密度为

$$\begin{aligned} W_\lambda &= \frac{3.7413 \times 10^4}{1.5^5 (e^{1.4388 \times 10^4 / 1.5 \times (800 + 273)} - 1)} \\ &= 0.6457 (W/cm^2 \cdot \mu) \end{aligned}$$

波长越长,辐射通量密度越小。

### 2. 维恩位移定律

黑体的辐射通量密度的峰值波长  $\lambda_m$  与绝对温度  $T$  成反比关系:

$$\lambda_m T = a$$

式中: $a$ —— 常数,为  $2889\mu K$

例如,800°C 黑体的峰值波长为

$$\lambda_m = \frac{a}{T} = \frac{2889}{(800 + 273)} = 2.69(\mu)$$

当黑体温度升高时,峰值波长向短波方向移动;反之,则向长波方向移动。

维恩位移定律的另一种表达方式—— 五次方定律。即辐射

通量密度的峰值  $W_{\lambda_m}$  与黑体表面绝对温度的五次方成正比:

$$W_{\lambda_m} = bT^5$$

式中:  $b$ ——常数, 为  $1.2862 \times 10^{-15} \text{W/cm}^2 \cdot \mu\text{K}^5$ 。

黑体温度、辐射通量密度峰值  $W_{\lambda_m}$  及其波长  $\lambda_m$  的值, 及总辐射通量密度  $W$  值的关系, 见表 13—25。

表 13—25 黑体的温度、 $W_{\lambda_m}$ 、 $\lambda_m$  及  $W$  的关系

°C	$W_{\lambda_m}$ (W/cm <sup>2</sup> · μ)	$\lambda_m$ (μ)	$W$ (W/cm <sup>2</sup> )
1300	12.39	1.84	34.7
1200	8.92	1.94	26.7
1000	4.30	2.28	15.0
900	2.86	2.47	10.7
800	1.83	2.70	7.5
700	1.12	2.98	5.1
600	0.65	3.32	3.3
500	0.36	3.75	2.0
400	0.18	4.31	1.2
300	0.08	5.06	0.61
200	0.031	6.13	0.28
100	0.0093	7.77	0.11
60	0.0053	8.70	0.07

### 3. 斯蒂芬·玻尔兹曼定律(全辐射发射定律)

黑体在绝对温度  $T$  K 时, 单位表面积在半球面方向发射的全波长辐射通量(总的辐射通量), 即斯蒂芬·玻尔兹曼定律。

$$W = \int_0^{\infty} W_{\lambda} d\lambda = \int_0^{\infty} \frac{C_1}{\lambda^5 (e^{C_2/\lambda T} - 1)} d\lambda$$

$$= \sigma T^4 \text{ (单位: } W/cm^2 \text{)}$$

或 
$$W = C_b \left(\frac{T}{100}\right)^4 \text{ (单位: } kJ/m^2 \cdot h \text{)}$$

式中:  $\sigma$ ——斯蒂芬·玻尔兹曼常数, 为  $5.6697 \times 10^{-12} W/cm^2 \cdot K^4$ ;

$C_b$ ——黑体辐射系数, 为  $20.43 kJ/m^2 \cdot h \cdot K^4$ 。

#### 4. 基尔霍夫定律

在任意给定温度下, 辐射通量密度  $W$  和吸收率  $\alpha$  之比, 对任何材料都是一个常数, 并等于该温度下黑体的辐射通量密度  $W_h$ :

$$W_h = W/\alpha$$

由于灰体的辐射通量密度为  $W = \epsilon \sigma T^4$ , 其中  $\epsilon$  为材料的全辐射率(黑度), 故  $W_h = W/\alpha$  可改写成

$$\frac{\epsilon \sigma T^4}{\alpha} = \sigma T^4, \text{ 得 } \epsilon = \alpha$$

这说明, 任何材料的全辐射率  $\epsilon$  等于同温度下的吸收率  $\alpha$ 。全辐射率大的物体吸收率也必然大, 也就是说, 好的辐射体必然是好的吸收体。由此可知, 不管原来的发射体是什么特性, 只要表面层具有所需要的辐射率特性就可以了。从而给远红外加热带来方便。

常用材料的全辐射率  $\epsilon$  见表 13—26。

### 三、远红外辐射元件

常用的远红外辐射材料有金属氧化物、碳化物、氮化物和硼化物等, 见表 13—27。

#### 1. 远红外元件的品种

(1) 碳化硅板: 由天然或人造的单晶体粉状 SiC 加入粘土(粘合作用)烧结而成, 表面涂有辐射涂料, 是一种良好的远



表 13—26 常用材料的全辐射率  $\epsilon$

材 料 名 称	$t(^{\circ}\text{C})$	$\epsilon$
绝对黑体	—	1.0
石墨粉	—	0.95
石棉纸板	24	0.96
石棉纸	40 ~ 370	0.93 ~ 0.945
表面粗糙的红砖	20	0.93
表面粗糙汲上釉的硅砖	100	0.83
表面粗糙上釉的硅砖	1100	0.85
上过釉的粘土耐火砖	~ 1100	0.87
耐火砖(新的)	~ 1000	0.83 ~ 0.87
耐火砖(用过的)	~ 1000	0.72 ~ 0.76
涂在不光滑铁板上的白釉漆	23	0.906
涂在铁板上有光泽的黑漆	25	0.875
无光泽的黑漆	40 ~ 95	0.96 ~ 0.98
白漆	40 ~ 95	0.80 ~ 0.96
各种不同颜色的油质涂料	100	0.92 ~ 0.96
磨光的硬橡皮板	23	0.945
加热到 325 $^{\circ}\text{C}$ 以后的铝质涂料	150 ~ 315	0.35
灰色不光滑的软橡皮板(经过精制)	24	0.859
平整的玻璃	22	0.937
上过釉的瓷器	22	0.924
熔附铁上的珐琅	19	0.897
表面磨光的铝	225 ~ 575	0.039 ~ 0.057
表面不光滑的铝	26	0.055
在 600 $^{\circ}\text{C}$ 时氧化后的铝	200 ~ 600	0.11 ~ 0.19
表面磨光的铁	425 ~ 1020	0.144 ~ 0.377
氧化后的铁	100	0.736

(续表)

材 料 名 称	t(°C)	$\epsilon$
未经加工的铸铁	925 ~ 1115	0.87 ~ 0.95
表面磨光的钢铸件	770 ~ 1040	0.52 ~ 0.56
研磨后的钢板	940 ~ 1100	0.55 ~ 0.61
在 600°C 时氧化后的钢	200 ~ 600	0.80
经过刮面加工的生铁	830 ~ 990	0.60 ~ 0.70
在 600°C 时氧化后的生铁	200 ~ 600	0.64 ~ 0.78
氧化铁	500 ~ 1200	0.85 ~ 0.95
无光泽的黄铜板	50 ~ 350	0.22
600°C 时氧化后的黄铜	200 ~ 600	0.59 ~ 0.51
600°C 时氧化后的铜	200 ~ 600	0.57 ~ 0.87
氧化铜	800 ~ 1100	0.66 ~ 0.50
熔解铜	1075 ~ 1275	0.16 ~ 0.13
技术上用的经过磨光的纯镍	225 ~ 375	0.07 ~ 0.087
镍丝	185 ~ 1000	0.096 ~ 0.186
在 600°C 时氧化后的镍	200 ~ 600	0.37 ~ 0.48
氧化镍	650 ~ 1255	0.59 ~ 0.86
铬镍	125 ~ 1034	0.64 ~ 0.76
锡、光亮的镀锡铁皮	225	0.043 ~ 0.064
经过磨光的商品锌(99.1%)	225 ~ 325	0.045 ~ 0.053
在 400°C 时氧化后的锌	400	0.11
磨光的纯银	225 ~ 625	0.0198 ~ 0.0324
铂	100 ~ 1000	0.08 ~ 0.26
有光泽的镀锌铁皮	28	0.228
已经氧化的灰色镀锌铁皮	24	0.276
盐浴表面黑度	500 ~ 600	0.74
	800 ~ 900	0.87
	1200 ~ 1300	0.89

表 13--27 高辐射率的远红外辐射材料

元素	氧化物	碳化物	氮化物	硼化物
B	B <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	B <sub>4</sub> C	BN	CrB · Cr <sub>3</sub> B <sub>4</sub>
Cr	Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Cr <sub>3</sub> C <sub>2</sub>	CrN	
Si	Si <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiC	SiN	
Ti	TiO <sub>3</sub>	TiC	TiN	TiB <sub>2</sub>
Zr	ZrO <sub>2</sub>	ZrC	ZrN	ZrB <sub>2</sub>
Al	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>			
Fe	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>			
Mn	MnO <sub>3</sub>			
Ni	Ni <sub>2</sub> O <sub>3</sub>			
Co	Co <sub>2</sub> O <sub>3</sub>			

红外辐射材料。要求 SiC 含量 60 ~ 70%。如含量低于 60%，辐射率将显著下降。它在 930°C 时 10μ 波长的辐射率相当于黑体辐射率的 80 ~ 90%。表面温度可达 1100 ~ 1700°C。使用寿命较长，转换效率高。缺点是抗机械振动性能差，热惯性大，升温时间长。

(2) 氧化镁管：金属电热管采用适宜直径、长度的金属管，重要用途的选用 1Cr18Ni9Tiφ18 不锈钢管，根据辐射器的额定功率绕电热丝，装入金属管内填以氧化镁粉。其表面涂有辐射涂料。涂层厚度不超过 0.2 ~ 0.3mm。其特点是机械强度高，适用于硝石、油、水、酸、碱等工业生产的加热系统。

(3) LHMg 型高硅氧灯：是在普通碘钨灯表面烧结一层黑色高硅氧玻璃粉料而成。由于近红外光谱较多，远红外光谱相对较少，因此效率不高。

(4) DYF 铁猛酸稀土钙高辐射涂层电阻带：表面温度低于 500°C，辅助装置复杂，效率不高。

(5)MTY 埋入式陶瓷元件:系仿德国 EISTEIN 产品,规格较齐,发热丝“埋入”在陶瓷基体中并烧结成一体,表面涂有高辐射层,功率为 $0.2 \sim 1.2\text{kW}$ ,表面温度一般低于 $500^{\circ}\text{C}$ ,表面光洁、白质,适用于食品、医药加工。但在高温下辐射率和导热系数下降,效率降低。

(6)TIR 半导体元件:以多晶半导体为发热体,涂复远红外辐射层,两端涂有银电极。它只适用于 $300^{\circ}\text{C}$ 以下加热场合,转换效率较高。

(7)SHQ 乳白石英元件:采用乳白石英为远红外转换元件,吸收电热丝发射的可见光和近红外光,转换成远红外辐射。功率 $0.2 \sim 5\text{kW}$ ,表面温度 $200 \sim 850^{\circ}\text{C}$ ,转换效率较高。

(8)准黑体不锈钢平板辐射器:具有较好的高温特性,但转换效率不及 TIR 和 SHQ。

## 2. 远红外辐射元件主要参数的要求

(1) 辐射率要高(大于 0.85),并要求使用 3000h 以上辐射率衰减不低于铭牌数据的 75%。

(2) 有效辐射面积要大。

(3) 在输入固定功率情况下,要求元件表面温度愈高愈好。

## 四、远红外辐射涂料及辐射光谱

当辐射材料与工作温度确定后,物体的全辐射率主要受表面状况的影响。粗糙表面比光滑清洁的表面全辐射率高;选择适当的远红外辐射涂料,能改变辐射器的辐射特性,使之与被加热干燥物质的吸收特性相一致,从而提高加热干燥效率、节约节能。

### 1. 典型的远红外辐射涂料

(1) 锆钛系: $\text{ZrO}_2$  由 97.5 ~ 5% 加  $\text{TiO}_2$  2.5 ~ 95%。

(2) 三氧化二铁系:如  $\alpha - \text{Fe}_2\text{O}_3$  和以  $\gamma - \text{Fe}_2\text{O}_3$  为主体的辐射涂料。

(3) 碳化系:多数以 SiC60% 以上和粘土 40% 以下烧结成的碳化硅板,或以 SiC 为主配比的其它材料制成的涂料。

(4) 稀土系:如铁锰酸稀土钙复合涂料,或将某些稀土材料烧结在碳化硅元件表层以提高其辐射率的涂料。

(5) 锆英砂系:以锆英砂(含 67%ZrO<sub>2</sub> 和 31%SiO<sub>2</sub> 为主)添加其它金属氧化物呈浅黑色锆系辐射元件的涂料。

(6) 镍钴系:以 Ni<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 和 CO<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 为主的涂料。

(7) 沸石分子筛系:吉林大学研制成功的高硅分子筛,是一种适用于脱水处理的选择性涂料。其辐射特性与水的吸收特性非常相近。如在 2.6 ~ 3μ、5.5 ~ 6.5μ 和 8 ~ 12.5μ 处,都有较强烈的辐射功率。

常用几种远红外辐射涂料的配方,见表 13—28 至表 13—31。

表 13—28 氧化硅系远红外涂料配方(按重量 %)

材 料	配 方 类							
	1	2	3	4	5	6	7	8
SiO <sub>2</sub>	80	40	30	30	30	30	30	79.8
SiC				10			10	
ZrO <sub>2</sub>	8			10	30	30	10	
MgO	7	10	30	10	10	10	10	
CaO	5				10			
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>					10	10	10	
TiO <sub>2</sub>		40				15		
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>			20	10		5		
TiC			10	10		5	10	
BN		10	10		10			
WC					10			
MO <sub>3</sub> B <sub>4</sub>						5		
CN							10	
C							10	

表 13—29 氧化锆系辐射涂料配方(按重量 %)

$\text{CO}_2\text{O}_3$	$\text{TiO}_2$	$\text{Al}_2\text{O}_3$	$\text{NiO}_2$	$\text{ZrO}_2$
50	20		10	20
85		15		
85	2		5	8

表 13—30 一种烧结陶瓷涂层的配方(按重量 %)

$\text{Fe}_2\text{O}_3$	$\text{ZrO}_2$	$\text{Cr}_2\text{O}_3$	$\text{SiO}_2$
10	50	20	20

表 13—31 一种钴质陶瓷的配方

材料成分	重量 %	材料成分	重量 %
199A 铁红	3	$\text{Cr}_2\text{O}_3$	3
60 ~ 80 目锆英砂	26	$\text{MnO}_2$	2
100 ~ 120 目锆英砂	26	苏州粘土	10
矾土	15	漳州黑土	15

## 2. 常用辐射涂料按辐射波长分类

(1) 长波涂料:是指在  $5\mu$  以内辐射率降低与  $6\mu$  以外长波部分辐射率很高的涂料,如锆系、锆钛系(图 13—16)。

(2) 近全波涂料:是指在远红外实效区  $2.5 \sim 15\mu$  全波段内辐射率较高的涂料,如碳化硅系、沈混一号和稀土系等(图 13 ~ 17)。

(3) 短波涂料:是指在  $3.5\mu$  以内有很高辐射率的涂料,如

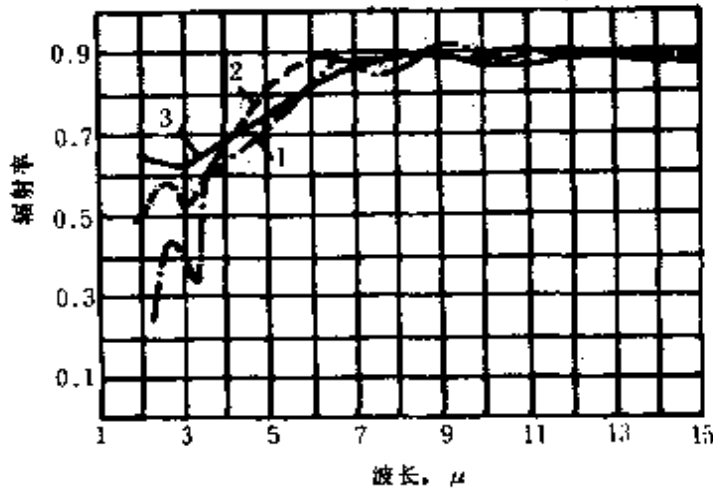


图 13—16 长波涂料的辐射光谱

1 为  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  以有机硅粘结; 2 为锆英砂为主以水玻璃粘结; 3 为锆钛系

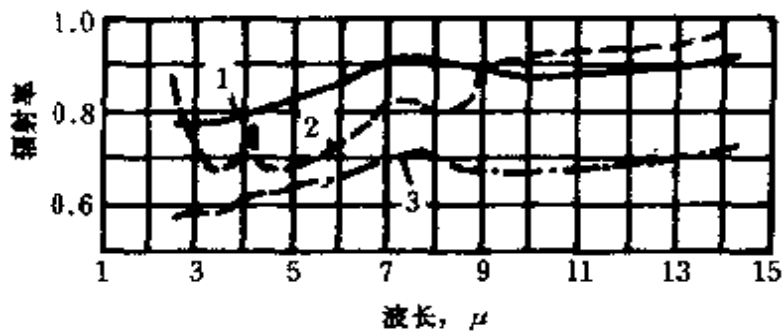


图 13—17 近全波涂料的辐射光谱

1 为铁锰酸稀土钙; 2 为  $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$ ; 3 为碳化硅板粉,  $\text{SiC}60\%$ , 陶土  $40\%$

沸石分子筛系、高硅氧和半导体氧化钛( $\text{TiO}_{1.9}$ ) 涂料等(图 13—18)。

(4) 中高温涂料: 如金属加热温度高于  $600^\circ\text{C}$ , 则某些长波涂料(纯  $\text{SiC}$ ) 会有较好效果; 如加热温度  $1000^\circ\text{C}$ , 则用镍钴系和二硅化钼等涂料有较好效果(图 13—19)。

绝大部分有机物、高分子材料在波长  $3\sim 16\mu$  之间都有强

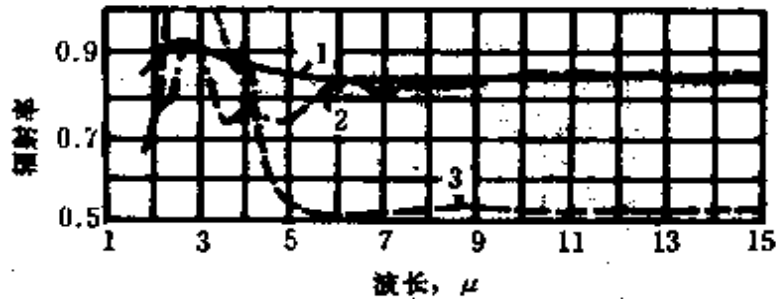


图 13—18 短波涂料的辐射光谱

1 为 TiO80%；2 为沸石分子筛 DB—12；3 为高硅氧灯

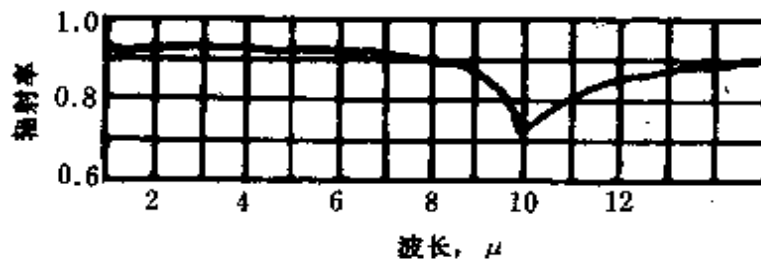


图 13—19 中、高温涂料的辐射光谱

烈的吸收。各种涂料的辐射光谱和各种物质的吸收光谱及透射光谱可查有关专著。

几种远红外辐射器的性能见表 13—32。

表 13—32 几种远红外辐射器的性能

特 性	电 加 热					煤气加热	
	红外线	石英碘钨灯	镍铬合金丝石英辐射器	管状加热器	板状加热器	陶瓷穿孔板	反射型
工作温度 (°C)	1650 ~ 2200	1650 ~ 2200	760 ~ 980	400 ~ 600	200 ~ 590	760 ~ 920	760 ~ 1200
峰值能量波长 (μ)	1.5 ~ 1.15	1.5 ~ 1.15	2.8 ~ 2.6	4.3 ~ 3.3	6.0 ~ 3.2	2.8 ~ 2.5	2.8 ~ 2.2



(续表)

特 性		电 加 热				煤气加热		
		红外线	石英碘钨灯	镍铬合金丝石英辐射器	管状加热器	板状加热器	陶瓷穿孔板	反射型
最大功率密度 (W/cm <sup>2</sup> )		1	5~8	4~5	2~4	1~4		
平均寿命		5000h	5000h	几年 (中波石英灯)	几年	几年	几年	几年
工作温度时的颜色		白	白	樱桃红	淡红	暗色	深红	鲜红
抗冲击 稳定性	机械冲击	差	中	中	优	不一	优	差
	热冲击	差	优	优	优	良	优	优
时间 响应	加热	秒级	秒级	分级	分级	十分级	几分钟	几分钟
	冷却	秒级	秒级	分级	分级	十分级	几分钟	几分钟

### 五、辐射元件表面温度和受热物最佳加热干燥温度的选择

#### 1. 辐射元件表面温度的选择

如前所述,辐射元件的全辐射量与表面的绝对温度的四次方成正比( $W = \sigma T^4$ ),即元件表面温度越高,辐射能量越大,但根据维恩位移定律表明,元件表面温度越高,则单色辐射强度的峰值波长要向短波长方向位移。因此要想提高长波远红外区的辐射强度,不能只用增加温度的办法来实现。

设元件的辐射能量为 $W_{\text{辐}}$ 、对流量为 $W_{\text{对流}}$ ,总传热能量为 $W_{\text{总}} = W_{\text{辐}} + W_{\text{对流}}$ ;波长 $3 \sim 16\mu$ 区间的辐射能量为 $W_{3-16}$ ;辐射能量峰值波长为 $\lambda_m$ ,灰体全辐射率 $\epsilon = 0.9$ ,则在不同元件表面温度下的计算结果,见表 13—33。

不同元件表面温度下的计算结果

表 13-33

温度 (°C)	$\lambda_{00}$ ( $\mu$ )	$W_{\text{总}}$ (kJ/h)	$W_{3-16}$ (kJ/h)	$\frac{W_{3-16}}{W_{\text{总}}}$ (%)	$W_{\text{向下}}$ (元件) (向下) (kJ/h)	$\frac{W_{3-16}}{W_{\text{向下}}}$	$W_{\text{向上}}$ (元件) (向上) (kJ/h)	$\frac{W_{3-16}}{W_{\text{向上}}}$	$\frac{W_{3-16}}{W_{\text{总}}}$ (%)
200	6.1	7850	6490	82.7	3864	1.68	6071	1.07	7725
250	5.5	112405	10618	85.6	5250	2.02	8252	1.29	10505
300	5.1	18472	15960	86.4	6711	2.38	10547	1.51	13423
350	4.7	26348	22789	86.5	82248	2.76	12958	1.76	16496
400	4.3	36367	31238	85.9	8935	3.18	15458	2.02	19632
450	4.0	48889	41311	84.5	11476	3.60	18037	2.29	22952
500	3.7	64414	52821	82	13172	4.01	20695	2.55	26343
550	3.5	83003	65988	79.5	14905	4.43	23425	2.82	29810
600	3.5	105449	81190	77	16680	4.87	26214	3.10	33365
700	3.0	163461	116058	71	22356	5.70	31991	3.63	40712
800	2.7	242395	159496	65.8	24162	6.60	37966	4.20	48324
900	2.5	346772	209449	60.4	28093	7.46	44150	4.74	56187
1000	2.3	491545	264849	55	32138	8.24	50505	5.24	64276

从表 13—33 分析可知;当元件温度在 200°C 以下时,对流散热损失在 50% 以上,辐射能量密度低,加热速度慢,红外涂层的效果只能在 10% 左右。温度在 400 ~ 600°C 之间,主辐射波长在 3.3 ~ 4.3 $\mu$  之间,辐射能量密度在 1 ~ 3W/cm<sup>2</sup> 之间,有效辐射能量在 80% 左右,加热干燥效果好,是有利的辐射温度。

选择辐射元件的表面温度时,要考虑有最佳的匹配辐射能  $E_\lambda$ 、最佳的匹配辐射率  $K_\lambda$  和最佳的使用寿命  $\tau$ 。例如尿素、三聚氰酰胺一类被加热物,其匹配吸收波长为 5 ~ 10 $\mu$ 、 $E_\lambda$ 、 $K_\lambda$  和  $\tau$  的最佳值,见表 13—34。

表 13—34 尿素、三聚氰酰胺类不同温度时的  $E_\lambda$  和  $K_\lambda$  值

参数	温 度 (K)							
	400	500	600	700	800	900	1000	1100
$E_\lambda$ (W/cm <sup>2</sup> )	0.032	0.089	0.184	0.300	0.464	0.632	0.737	0.913
$K_\lambda$ (%)	22	24	25	22	20	17	13	11
$\tau$ (h)	延长 ← ----		正 常		----- → 缩短			

由表可见,加热这类物质,辐射元件表面温度为 750 ~ 850K 时, $E_\lambda$ 、 $K_\lambda$  和  $\tau$  处于最佳值。水的吸收波长位于远红外短波区,加热时辐射元件表面温度以 800 ~ 900K 为宜。

### 2. 被加热物最佳加热干燥温度的确定

被加热物最佳加热干燥温度一般由试验确定,它与辐射元件的数量、辐照距离、元件功率、布置、温度分布及加热速度等有关。几种被加热物的最佳加热干燥温度和时间,见表 13—35,供参考。

表 13—35 几种被加热物的最佳加热干燥温度及时间

被加热物名称	醇酸磁漆	1032 绝缘清漆	1010 沥青漆	谷物	木板
最佳加热温度(°C)	110 ~ 130	150 ~ 170	180 ~ 200	45 ~ 55	80 ~ 90
最短辐射时间	1.3min	1.5min	3min	0.5 ~ 1min	20 ~ 50h

### 3. 最佳辐照距离的确定

分析表明,最佳辐照距离的推荐值为100~400mm。但原则上以保证辐射匀度,在不影响产品质量等前提下,辐照距离越近,加热效率越高。辐射元件与受热面互相平行时获得的热量多。

## 六、远红外加热炉的设计

远红外加热炉可制成箱体式,也可制成隧道式。箱体式炉适用于小批量生产,隧道式炉适用于大批量的、连续的生产。

### 1. 几种加热炉电功率的计算

(1) 单纯加热物体所耗用的电功率:

$$P = \frac{GC\Delta t}{3600\eta}$$

式中:  $P$ ——加热工件所耗用的电功率(kW);

$G$ ——被加热工件的总重量(kg);

$C$ ——被加热工件材料的比热(kJ/kg·°C);

$\Delta t$ ——加热前后的温差(°C);

$\eta$ ——加热炉的效率(%)。

对于完全密封的加热炉,  $\eta = 0.6 \sim 0.85$ ; 对于隧道式(通过式)加热炉,  $\eta = 0.5 \sim 0.6$ ; 对于敞开式加热炉,  $\eta = 0.25 \sim 0.35$ 。

(2) 进行脱水加热干燥时所消耗的电功率:

$$P = \frac{G_1 C_1 \Delta t + G_2 C_2 \Delta t + G_3 q}{3600 \eta}$$

式中： $P$ ——脱水加热干燥所消耗的电功率(kW)；

$G_1$ ——水份的处理重量(kg)；

$G_2$ ——加热材料的重量(kg)；

$G_3$ ——蒸发水的重量(kg)；

$C_1$ ——水的比热，为 4.1868kJ/kg·°C；

$C_2$ ——加热材料的比热(kJ/kg·°C)；

$\Delta t$ ——加热前后的温差(°C)；

$q$ ——水份挥发时的汽化热，为 2256.7kJ/kg；

$\eta$ ——加热炉的效率(%)。

(3) 采用辐射功率密度法进行估算：

$$P = RA$$

式中： $P$ ——加热炉电功率(kW)；

$R$ ——辐射功率密度(kW/m<sup>2</sup>)；

$A$ ——单位时间加热面积(m<sup>2</sup>/h)。

辐射功率密度一般取 3 ~ 8kW/m<sup>2</sup>。加热大面积薄工件时， $R$ 可取小值；加热小面积厚壁或实体工件时， $R$ 取大值。对于体形复杂的工件或铸件， $R$ 可取 10kW/m<sup>2</sup>。

(4) 热平衡计算法进行估算：

$$P = \frac{QK_2}{3600K_1}$$

式中： $P$ ——加热炉电功率(kW)；

$Q$ ——加热炉总发热量(kJ)， $Q = Q_{yx} + \Delta Q$ ，可参本章第二节方法计算；

$K_1$ ——电压波动修正系数，见表 13-36；

$K_2$ ——功率储备系数，约 1.1 ~ 1.3。

表 13-36  $K_1$  与电压  $U$  的关系

$U(V)$	240	230	220	210	200	190	180	170
$K_1$	1.19	1.093	1	0.911	0.826	0.746	0.67	0.6

(5) 采用 SHQ 辐射元件加热干燥时元件的电功率:

$$P = \frac{\epsilon_\lambda \sigma T^4 S}{1000\eta}$$

式中:  $P$ ——元件的电功率(kW);

$\epsilon_\lambda$ ——元件的光谱辐射率, SHQ 为 0.92;

$\sigma$ ——斯蒂芬·波尔兹曼常数, 为  $5.6697 \times 10^{-12}$   
( $W/cm^2 \cdot K^4$ );

$S$ ——元件辐射表面积( $cm^2$ );

$T$ ——元件表面温度(K);

$\eta$ ——元件电能辐射能转换效率(%), 对 SHQ 元件,  $0 \sim 550^\circ C$  时约  $\eta = 0.65$ 。

**例 13—9** 试设计一台供烘燥涂有聚氯乙烯(PVC)和增塑剂(DOP)铁板的远红外电热炉。已知每天 8h 处理 8000kg 铁板( $1 \times 1000 \times 2000mm$ )涂饰固化。测得远红外辐射基本参数(样品小试):当辐射强度为  $0.25W/cm^2$  时,工件经过 5min 加热,可由  $20^\circ C$  升至固化温度  $130^\circ C$ 。当采用 SHQ 元件,炉壁反射良好,材料比热为  $0.502kJ/kg \cdot ^\circ C$ ,炉体热效率为 0.45,材料吸收率为 0.9,面积利用率为 0.9。

**解**

(1) 远红外电热元件设计:用远红外分光光度计对 PVC—DOP 材料测定表明,其匹配吸收波长为  $3 \sim 4\mu$ 、 $5.5 \sim 10\mu$ 。在辐射元件设计上,必须保证元件在波长  $3 \sim 4\mu$ 、 $5.5 \sim 10\mu$  有最佳的匹配辐射能  $E_\lambda$ 、最佳的匹配辐射率  $K_\lambda$  和最佳的使

使用寿命 $\tau$ 。通过计算(查阅普朗克函数表)可以求出 $E_\lambda$ 、 $K_\lambda$ 和 $\tau$ 的最佳值。或者说,求出最佳状态 $E_\lambda$ 和 $K_\lambda$ 时元件表面温度,结果列于13-37。

表 13—37 PVC—DOP 在不同温度时  $E_\lambda$  和  $K_\lambda$  值

参数	温 度 (K)							
	400	500	600	700	800	900	1000	1100
$E_\lambda$ (W/cm <sup>2</sup> )	0.056	0.165	0.377	0.687	1.092	1.674	2.438	3.321
$K_\lambda$ (%)	38.4	46.7	51.3	50.5	48	45	43	40
$\tau$ (h)	延长 ←		正 常		→ 缩短			

由表可见,元件表面温度为700~800K时, $E_\lambda$ 、 $K_\lambda$ 和 $\tau$ 处于最佳值。

电热元件外形尺寸由设备设计参数确定。例如国产PVC造革设备,选用 $\phi 18 \times 2000$ mm的SHQ乳白石英远红外元件;烤漆烘道选用 $\phi 18 \times 1100$ mmSHQ元件。

对于加热PVC的 $\phi 18 \times 2000$ mm的元件,功率可按下式计算( $T = 800$ K):

$$P = \epsilon_\lambda \sigma T^4 S / \eta = 3.35(\text{kW}) \approx 3(\text{kW})$$

对于烤漆元件, $\phi 18 \times 1100$ mm,同样可求得功率  $P = 0.98\text{kW} \approx 1\text{kW}$ 。

选取电阻丝直径,以保证其有最佳寿命。一般远红外加热元件,电阻丝的表面负荷为3~4W/cm<sup>2</sup>。当选用直径1.0mm的铁铬铝电阻丝时,对于功率为3kW的元件,表面负荷为11W/cm<sup>2</sup>。1.2mm为6.8W/cm<sup>2</sup>;1.4mm为4.0W/cm<sup>2</sup>;1.6mm为3.2W/cm<sup>2</sup>。故选择1.4~1.6mm粗的铁铬铝电阻丝为宜。这样



可保证元件寿命在 15000h 以上。

(2) 烘箱烘道电器设计: 挂料从 20°C 升至 130°C, 每小时所需的热量为

$$Q = GC\Delta t = (8000/8) \times 0.502 \times (130 - 20) = 5508(\text{kJ})$$

烘道总效率为

$$\eta = \eta_1\eta_2\eta_3 = 0.45 \times 0.9 \times 0.9 = 0.36$$

故所需功率为

$$P = \frac{Q}{3600\eta} = \frac{5508}{3600 \times 0.36} = 42.5(\text{kW})$$

对于连续式漆膜固化烘道, 可根据小样试验测得的基本参数, 求得一张铁板的功率, 然后根据固化时间, 计算出窑长、车速和总功率。另外, 也可以先确定保温材料、炉衬厚度和窑炉结构, 再根据已知条件(固化和加热时间、悬链速度) 确定烘道长度。例如固化时间为 20min, 悬链速度为 3m/min, 则  $20 \times 3 = 60(\text{m})$ , 考虑预热区和冷却区, 烘道总长应为 70m。

总功率的设计的经验数据:  $3 \sim 12\text{kW}/\text{m}^3$  空间。它与工件大小、加热温度高低、速度有关。

最后还需设计反射罩, 通常用抛光铝板制作, 反射罩可提高元件定向辐射能 40% 以上。需将元件布置好, 使辐射均匀。并确定好工件与元件间距(在保证均匀性等条件下, 越小越好)。

**例 13—10** 试设计一台远红外面包烘烤炉。已知每小时烘烤面粉量为 450kg, 相应的砂糖及配料为 180kg/h, 总水分含量为 418.5kg/h, 蒸发水分量为 180kg/h。上述各原料调合后做成面包坯放在铁盘中, 一共有 250 盘/h, 相当于 4.166 盘/min。

**解**

(1) 经小试验炉多次烘烤试验表明: 炉膛温度约 150 ~ 160°C; 烘烤时间为 16min; 照射距离: 面火 120 ~ 150mm, 底火 100 ~ 120mm; 照射面平均电功率为 1 ~ 1.2W/cm<sup>2</sup>(总耗用功



率 ÷ 炉膛被照射面截面积)。

(2) 炉体长度计算: 选用链条式单层, 炉膛上下横排远红外电热管。炉膛宽 1.5m, 高 0.5m, 每米炉长可容纳四盘面包, 即  $n_1 = 4$  盘/m。

根据试验得烘烤时间为  $t = 16\text{min}$ , 即物料要在炉内运行 16min, 所以炉膛内最小要容纳面包盘数为:  $n = 4.166 \times 16 = 66.66$ (盘)。因此炉膛最小长度为  $L = n/n_1 = 66.66/4 = 16.66$ (m), 实际取 18m。物料运送速度为  $v = L/t = 18/16 = 1.125$ (m/min。)

(3) 热量计算: 各种物料的比热见表 13—38。

表 13—38 各种物料的比热

物 料	水	水蒸汽	面粉	糖	钢铁
比热 $C(\text{kJ}/\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})$	4.1868	2.0097	2.0934	1.6747	0.5024

水的气化热  $q = 2256.7\text{kJ}/\text{kg}$ 。

① 各种物料升温吸热量  $Q_1$ : 设物料进炉温度  $40^\circ\text{C}$ , 升温终点  $100^\circ\text{C}$ , 则

面粉吸热  $450 \times 2.0934 \times (100 - 40) = 56521.8(\text{kJ}/\text{h})$

糖及配料吸热  $180 \times 1.6747 \times (100 - 40) = 18087.0(\text{kJ}/\text{h})$

水分吸热  $418.5 \times 4.1868 \times (100 - 40) = 10513.05(\text{kJ}/\text{h})$

合计  $Q_1 = 179739(\text{kJ}/\text{h})$

② 水分蒸发吸热  $Q_2$ :

$Q_2 = 180 \times 2256.7 = 406203.3(\text{kJ}/\text{h})$

③ 水分蒸发后水蒸汽继续升温至炉温  $150^\circ\text{C}$  时吸热  $Q_3$ :

$$Q_3 = 180 \times 2.0097 \times (150 - 100) = 18087.0(\text{kJ/h})$$

④ 铁盘升温吸热  $Q_4$ : 铁盘数量为 250 个/h, 重量为 2.5kg/个, 铁盘升温至炉温  $150^\circ\text{C}$ 。

$$Q_4 = 2.5 \times 250 \times 0.5024 \times (150 - 40) = 34541.1(\text{kJ/h})$$

⑤ 传送链条升温吸热  $Q_5$ : 链条重量为 2.68kg/m, 共四条; 链条速度为 1.12m/min, 升温至炉温  $150^\circ\text{C}$ 。

$$Q_5 = (2.68 \times 4 \times 1.12 \times 60) \times 0.5024 \times (150 - 40) = 39812.3(\text{kJ/h})$$

⑥ 总的计算吸热量  $Q_{js}$ :

$$Q_{js} = Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4 + Q_5 = 678383(\text{kJ/h})$$

⑦ 总的实际耗热量  $Q$ :

$$Q = 1.1Q_{js} = 1.1 \times 678383 = 746221(\text{kJ/h})$$

(4) 烘烤炉电热容量  $P$ :

$$P = \frac{Q}{3600\eta} = \frac{746221}{3600 \times 0.85} = 243.9(\text{kW})$$

(5) 实际安装容量: 选  $\Phi 8.5 \times 1500$  远红外电热管 200 支, 每支 1.2kW, 共计 248kW。

这个容量相当于照射面平均电功率为  $0.9\text{W}/\text{cm}^2$ , 与试验所得数据  $1 \sim 1.2\text{W}/\text{cm}^2$  相近, 满足要求。

此外, 在元件后面加装抛光铝板以加强反射效果, 提高辐射强度。

---

---

## 第十四章 可控硅及电子电路

### 第一节 可控硅电路及其计算

#### 一、可控硅基本参数

##### 1. 可控硅元件参数定义

(1) 正向转折电压  $V_{BO}$ : 元件正向从阻断状态转向导通状态的电压。

(2) 正向阻断峰值电压  $PFV$ : 在控制极断路和正向阻断条件下, 可以重复加于正向的峰值电压, 此电压规定为小于正向转折电压 100V。

(3) 正向压降  $V_F$ : 在规定环境温度、标准散热和元件导通条件下, 通以工频正弦半波额定正向平均电流时, 阳极与阴极间的电压平均值。

(4) 正向电流  $I_F$ : 在规定环境温度、标准散热和元件导通条件下, 阳极与阴极间可连续通过的工频正弦半波电流的平均值。

(5) 正向平均漏电流  $I_F$  正向阻断: 控制极断路和额定结温条件下, 阳极与阴极间加以工频正弦半波正向阻断峰值电压时的正向平均电流。

(6) 正向电压上升率  $dV/dt$ : 在额定结温, 控制极断路和正向阻断条件下, 元件在单位时间内所能允许上升的正向电压(电压从零加到正向阻断峰值电压), 通常用“V/ $\mu$ s”来表示。

(7) 维持电流  $I_H$ : 在规定环境温度, 控制极断路和元件导通时, 要保持元件处于导通状态所必须的最小正向电流。

(8) 反向阻断峰值电压  $PRV$ : 在控制极断路和额定结晶的条件下, 可以重复加在元件上的反向峰值电压。此电压规定为元件的反向漏电流急速增加, 反向特性曲线开始弯曲时电压减去  $100V$ 。

(9) 反向转折电压(反向最高测试电压)  $V_{K0}$ : 在控制极断路条件下, 加于反向的峰值电压, 此电压规定为反向漏电流急速增加, 反向特性曲线开始弯曲时的电压。

(10) 控制极触发电压  $V_g$ : 在规定环境温度和阳极与阴极间加以一定的电压条件下, 触发可控硅元件, 使元件从阻断状态转变为导通状态所需要的最小控制极直流电压。

(11) 控制极触发电流  $I_g$ : 在规定环境温度及阳极与阴极间加以一定正向电压时, 使其从阻断状态变为导通状态所需的最小控制极直流电流。

(12) 控制极不触发电压  $V_{gN}$ : 在规定环境温度及阳极与阴极间加以一定正向电压时, 保持元件阻断状态所能加的最大控制极直流电压。

(13) 控制极最大反向电压  $V_{gR}$ : 在规定额定结温条件下, 在控制极与阴极间所能加的最大反向峰值电压。

(14) 控制极不触发电流  $I_{gN}$ : 在规定环境温度及阳极与阴极间加以一定正向电压时, 保持元件阻断状态所能加的最大控制极直流电流。

(15) 开通时间  $T_{on}$ : 在规定的环境温度下, 通以一定的正向电流, 元件自加以控制讯号至进入导通状态所需要的时间。

(16) 关断时间  $T_{off}$ : 在额定结温条件下, 元件从切断正向电流, 使元件重新处于阻断状态, 直到控制极恢复控制能力为止所需的时间。

(17) 额定工作结温  $t_j$ : 元件在正常工作条件下所允许的  $PN$  结温度。

2. 3CT 系列可控硅元件使用条件

- (1) 环境温度不高于 + 40°C, 不低于 - 40°C。
- (2) 空气相对湿度不大于 85%。
- (3) 海拔高度不超过 1000m。
- (4) 在无爆炸危险的介质中, 且介质无足以腐蚀金属和绝缘的气体及导电尘埃。

二、可控硅整流电路参数及基本电量关系

- 1. 可控硅整流电路的电参数(表 14—1)
- 2. 可控硅整流电路的比较(表 14—2)
- 3. 各种可控硅整流电路的波形及电流、电压的关系

各种可控硅整流电路在不同性质负载和不同导通角时  $I_a/I_y$ 、 $I_z/I_F$  及  $I_x/I_a$  的数值, 见表 14—3 ~ 表 14—13。

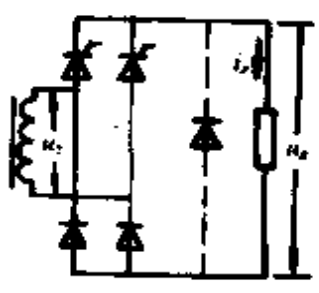
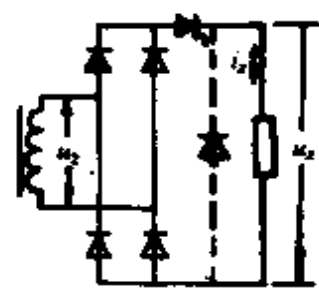
表中符号说明:

- $u_x$ —— 整流器输出电压瞬时值;
- $i_x$ —— 整流器工作电流瞬时值;
- $U_x$ —— 整流器输出电压平均值;
- $U_2$ —— 变压器次级相电压的有效值;
- $U_L$ —— 变压器次级线电压的有效值;
- $I_y$ —— 可控硅工作电流的有效值;
- $I_F$ —— 可控硅额定正向电流有效值;
- $I_r$ —— 可控硅额定半波电流的有效值;
- $I_a$ —— 可控硅工作电流的平均值;
- $I_F$ —— 可控硅额定正向平均电流;
- $I_z$ —— 整流器输出电流平均值;
- $I_m$ —— 可控硅工作电流的峰值。

表 14—1 可控硅整流电路的基本电量关系

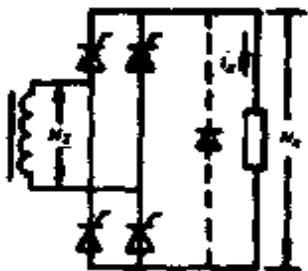
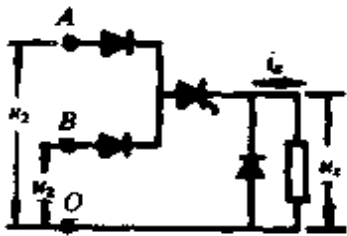
整流电路名称		单相半波	单相全波
电路图			
空载直流输出电压	全导通 ( $\alpha = 0$ ) $U_{x0}$	$0.45U_2$	$0.9U_2$
	某一移相角 $\alpha$ 时 $U_x$ (电阻负载或带续流二极管电感负载)	$\frac{1 + \cos\alpha}{2}U_{x0}$	$\frac{1 + \cos\alpha}{2}U_{x0}$
	某一移相角 $\alpha$ 时 $U_x$ (无续流二极管电感负载)	—	$\cos\alpha U_{x0}$
元件最大正向电压和最大反向电压峰值 $U_m$		$1.41U_2 (3.14U_{x0})$	$2.83U_2 (3.14U_{x0})$
移相范围	电阻负载或带续流二极管的电感负载	$0 \sim 180^\circ$	$0 \sim 180^\circ$
	无续流二极管的电感负载	—	$0 \sim 90^\circ$ ( $\alpha > 90^\circ$ 转入逆变状态)
元件最大导通角		$180^\circ$	$180^\circ$
输出电压最低脉动频率		$1f$	$2f$
全导通时输出电压纹波系数 $\gamma$		1.21	0.484
全导通时输出电压脉动系数 $s$		1.57	0.657
流过可控硅的电流平均值 (无续流二极管)		$I_x$	$0.5I_x$
功率因数		0.405	0.637
变压器一次侧容量 $P_{11}$		$3.48U_x I_x$	$1.11U_x I_x$
变压器二次侧容量 $P_{12}$		$3.48U_x I_x$	$1.57U_x I_x$

(续表)

整流电路名称		单相半控桥	可控硅作开关的单相桥
电路图			
空载直流输出电压	全导通 ( $\alpha = 0$ ) $U_{x0}$	$0.9U_2$	$0.9U_2$
	某一移相角 $\alpha$ 时 $U_x$ (电阻负载或带续流二极管电感负载)	$\frac{1 + \cos\alpha}{2} U_{x0}$	$\frac{1 + \cos\alpha}{2} U_{x0}$
	某一移相角 $\alpha$ 时 $U_x$ (无续流二极管电感负载)	$\frac{1 + \cos\alpha}{2} U_{x0}$	—
元件最大正向电压和最大反向电压峰值 $U_m$		$1.41U_2 (1.57U_{x0})$	$1.41U_2 (1.57U_{x0})$ 可控硅不受反向电压
移相范围	电阻负载或带续流二极管的电感负载	$0 \sim 180^\circ$	$0 \sim 180^\circ$
	无续流二极管的电感负载	$0 \sim 180^\circ$	—
元件最大导通角		$180^\circ$	$360^\circ$
输出电压最低脉动频率		$2f$	$2f$
全导通时输出电压纹波系数 $\gamma$		0.484	0.484
全导通时输出电压脉动系数 $s$		0.667	0.667
流过可控硅的电流平均值 (无续流二极管)		$0.5I_x$	$I_x$
功率因数		0.901	0.901
变压器一次侧容量 $P_{11}$		$1.11U_2 I_x$	$1.11U_2 I_x$
变压器二次侧容量 $P_{22}$		$1.11U_2 I_x$	$1.11U_2 I_x$

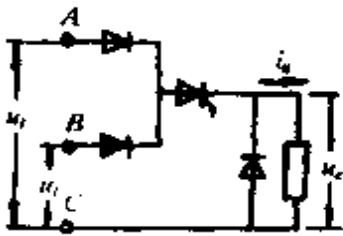
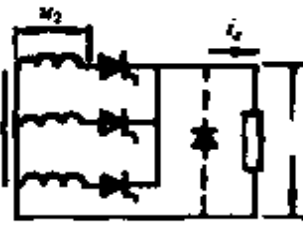


(续表)

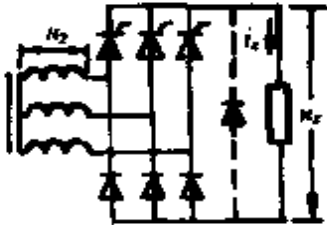
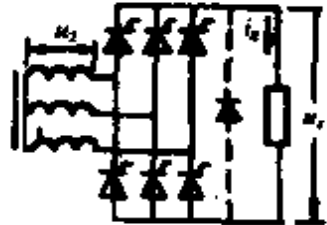
整流电路名称		单相全控桥	二相零式
电路图			
空载直流输出电压	全导通( $\alpha = 0$ ) $U_{x0}$	$0.9U_2$	$0.839U_2$
	某一移相角 $\alpha$ 时 $U_x$ (电阻负载或带续流二极管电感负载)	$\frac{1 + \cos\alpha}{2}U_{x0}$	$0.268(2.73 + \cos\alpha)U_{x0}$ ( $0 < \alpha < 150^\circ$ ) $0.268[1 + \cos(\alpha - 120^\circ)]U_{x0}$ ( $150^\circ < \alpha < 300^\circ$ )
	某一移相角 $\alpha$ 时 $U_x$ (无续流二极管电感负载)	$\cos\alpha U_{x0}$	—
元件最大正向电压和最大反向电压峰值 $U_n$		$1.41U_2(1.57U_{x0})$	可控硅 $1.41U_2(1.69U_{x0})$ 二极管 $2.45U_2$
移相范围	电阻负载或带续流二极管的电感负载	$0 \sim 180^\circ$	$0 \sim 300^\circ$
	无续流二极管的电感负载	$0 \sim 90^\circ$ ( $\alpha > 90^\circ$ 转入逆变状态)	—
元件最大导通角		$180^\circ$	$300^\circ$
输出电压最低脉动频率		$2f$	$1f$
全导通时输出电压纹波系数 $\gamma$		0.484	0.613
全导通时输出电压脉动系数 $s$		0.667	0.698
流过可控硅的电流平均值(无续流二极管)		$0.5I_L$	SCR: $0.833I_L$ V: $0.320I_L$
功率因数		0.901	
变压器一次侧容量 $P_1$		$1.11U_2I_L$	
变压器二次侧容量 $P_2$		$1.11U_xI_L$	



(续表)

整流电路名称		二相式	三相半波
电路图			
空载直流输出电压	全导通 ( $\alpha = 0$ ) $U_{z0}$	$0.675U_2$	$1.17U_2$
	某一移相角 $\alpha$ 时 $U_z$ (电阻负载或带续流二极管电感负载)	$0.334(2 + \cos\alpha)U_{z0}$ ( $0 < \alpha < 120^\circ$ ) $0.334[1 + \cos(\alpha - 60^\circ)]U_{z0}$ ( $120^\circ < \alpha < 240^\circ$ )	$\cos\alpha U_{z0}$ ( $0 \leq \alpha \leq 30^\circ$ ) $0.577[1 + \cos(\alpha + 30^\circ)]U_{z0}$ ( $30^\circ \leq \alpha \leq 150^\circ$ )
	某一移相角 $\alpha$ 时 $U_z$ (无续流二极管电感负载)	—	$\cos\alpha U_{z0}$
元件最大正向电压和最大反向电压峰值 $U_m$		$1.41U_2 (2.09U_{z0})$	$2.45U_2 (2.09U_{z0})$
移相范围	电阻负载或带续流二极管的电感负载	$0 \sim 240^\circ$	$0 \sim 150^\circ$
	无续流二极管的电感负载	—	$0 \sim 90^\circ$ ( $\alpha > 90^\circ$ 转入逆变状态)
元件最大导通角		$240^\circ$	$120^\circ$
输出电压最低脉动频率		1f	3f
全导通时输出电压纹波系数 $\gamma$		0.875	0.183
全导通时输出电压脉动系数 $s$		1.21	0.25
流过可控硅的电流平均值(无续流二极管)		可控硅: $0.667I_z$ ; 二极管: $0.40I_z$	$0.333I_z$
功率因数			0.826
变压器一次侧容量 $P_{s1}$			$1.21U_2I_z$
变压器二次侧容量 $P_{s2}$			$1.48U_2I_z$

(续表)

整流电路名称		三相半控桥	三相全控桥
电路图			
空载直流输出电压	全导通 (\$\alpha = 0\$) \$U_{x0}\$	\$2.34U_2\$	\$2.34U_2\$
	某一移相角 \$\alpha\$ 时 \$U_z\$ (电阻负载或带续流二极管电感负载)	\$\frac{1 + \cos\alpha}{2} U_{x0}\$	\$\cos\alpha U_{x0}\$ (\$0 \le \alpha \le 60^\circ\$) \$[1 + \cos(\alpha + 60^\circ)] U_{x0}\$ (\$60^\circ \le \alpha \le 120^\circ\$)
	某一移相角 \$\alpha\$ 时 \$U_z\$ (无续流二极管电感负载)	\$\frac{1 + \cos\alpha}{2} U_{x0}\$	\$\cos\alpha U_{x0}\$
元件最大正向电压和最大反向电压峰值 \$U_m\$		\$2.45U_2(1.05U_{x0})\$	\$2.45U_2(1.05U_{x0})\$
移相范围	电阻负载或带续流二极管的电感负载	\$0 \sim 180^\circ\$	\$0 \sim 120^\circ\$
	无续流二极管的电感负载	\$0 \sim 180^\circ\$	\$0 \sim 90^\circ\$ (\$\alpha > 90^\circ\$ 转入逆变状态)
元件最大导通角		\$120^\circ\$	\$120^\circ\$
输出电压最低脉动频率		\$6f\$	\$6f\$
全导通时输出电压纹波系数 \$\gamma\$		\$0.042\$	\$0.042\$
全导通时输出电压脉动系数 \$s\$		\$0.057\$	\$0.057\$
流过可控硅的电流平均值(无续流二极管)		\$0.333I_z\$	\$0.333I_z\$
功率因数		\$0.955\$	\$0.955\$
变压器一次侧容量 \$P_{s1}\$		\$1.05U_2I_z\$	\$1.05U_2I_z\$
变压器二次侧容量 \$P_{s2}\$		\$1.05U_2I_z\$	\$1.05U_2I_z\$

(续表)

整流电路名称		具有中点二极管的三相半控桥	双反星形带平衡电抗器
电路图			
空载直流输出电压	全导通 ( $\alpha = 0$ ) $U_{z0}$	$2.34U_2$	$1.17U_2$
	某一移相角 $\alpha$ 时 $U_z$ (电阻负载或带续流二极管电感负载)	$0.5(1 + \cos\alpha)U_{z0}$ ( $0 < \alpha \leq 30^\circ$ ) $0.288[\sqrt{3} + 1 + \cos(\alpha + 30^\circ)]U_{z0}$ ( $30^\circ < \alpha < 150^\circ$ )	$\cos\alpha U_{z0}$ ( $0 \leq \alpha \leq 60^\circ$ ) $[1 + \cos(\alpha + 60^\circ)]U_{z0}$ ( $60^\circ \leq \alpha \leq 120^\circ$ )
	某一移相角 $\alpha$ 时 $U_z$ (无续流二极管电感负载)	同上	$\cos\alpha U_{z0}$
元件最大正向电压和最大反向电压峰值 $U_m$		$1.41U_2(2.45U_{z0})$	$2.45U_2(2.09U_{z0})$
移相范围	电阻负载或带续流二极管的电感负载	$0 \sim 150^\circ$	$0 \sim 120^\circ$
	无续流二极管的电感负载	$0 \sim 150^\circ$	$0 \sim 90^\circ$ ( $\alpha > 90^\circ$ 转入逆变状态)

(续表)

整流电路名称	具有中点二极管 的三相半控桥	双反星形带平衡电抗器
元件最大导通角	$120^\circ$	$120^\circ$
输出电压最低脉动频率	$6f$	$6f$
全导通时输出电压纹波 系数 $\gamma$	0.042	0.042
全导通时输出电压脉动 系数 $s$	0.057	0.057
流过可控硅的电流平均 值(无续流二极管)	可控硅、二极管: $0.333I_L$ ( $0 < \alpha < 150^\circ$ )	$0.167I_L$
功率因数	0.955	0.955
变压器一次侧容量 $P_{s1}$	$1.05U_2I_L$	$1.05U_2I_L$
变压器二次侧容量 $P_{s2}$	$1.05U_2I_L$	$1.48U_2I_L$

注:

① 表 14-1 中  $U_2$  指相电压。若变压器二次侧为三角形接法,则  $U_2$  应以  $U_{l2}/$

$\sqrt{3}$  代入,  $U_{l2}$  为二次侧线电压。

②  $f$  —— 交流电源频率(Hz)。

③  $\gamma$  —— 纹波系数 =  $\frac{\text{交流分量的有效值}}{\text{直流分量(即平均值)}}$ 。

④  $s$  —— 脉动系数 =  $\frac{\text{交流分量的基波(或最低次谐波)的振幅值}}{\text{直流分量(即平均值)}}$ 。

表 14-2 常用可控硅整流电路比较

指标	单相半波	单相全波	二相零式	单相全控桥	三相半波	三相桥式	双反星形带平衡电抗器
$U_m/U_{20}$	3.14	3.14	1.68	1.57	2.09	1.05	2.09
越小越好	最大	最大	一般	一般	较大	最小	较大
$I_a/I_s$	1	0.5	0.83	0.5	0.33	0.33	0.167
越小越好	最大	一般	较大	一般	一般	一般	最小
变压器初级利用率 %	28.6	90		90	82.7	95.5	95.5
越大越好	最小	较大		较大	一般	最大	最大
变压器次级利用率 %	28.6	63.7		90	67.5	95.5	67.5
越大越好	最小	一般		较大	一般	最大	一般
功率因数	0.405	0.637		0.901	0.826	0.955	0.955
越大越好	最小	小	小	一般	一般	最大	最大
$s$	1.21	0.484		0.484	0.187	0.042	0.042
越小越好	最大	较大	较大	较大	一般	最小	最小
线路结构	一个可控硅	二个可控硅	一个可控硅 二个二极管	四个可控硅	三个可控硅	六个整流元件	六个可控硅
越简单越好	最简单	较简单	较简单	较简单	一般	一般	平衡电抗 较复杂

注： $U_m$ —元件最大反向电压峰值； $U_{20}$ —空载直流输出电压； $I_a$ —流过可控硅的电流平均值； $I_s$ —输出直流电流； $s$ —全导通时输出电压脉动系数。

单相半波电路

表 14—3

负载性质	电路图	整流器输出电压波形 $u_a$	流过可控硅的电流波形 $i_a$	移相角 $\alpha$	导通角 $\beta$	$\frac{U_2}{U_2}$	$\frac{I_2}{I_2}$	$\frac{I_o}{I_m}$	$\frac{I_o}{I_F}$ 条件为 $I_y = I_y$	$\frac{I_2}{I_o}$	$\frac{I_2}{I_F}$ 条件为 $I_y = I_y$
电阻性负载				0°	180°	0.450	1.37	0.318	1	1	1
				30°	150°	0.420	1.66	0.297	0.946	1	0.946
				60°	120°	0.338	1.88	0.239	0.835	1	0.835
				90°	90°	0.225	2.26	0.159	0.695	1	0.695
				120°	60°	0.113	2.78	0.092	0.565	1	0.565
				150°	30°	0.030	3.99	0.043	0.394	1	0.394
电感性负载				0°	180°	0.450	1.41	0.500	1.11	2	2.22
				30°	150°	0.420	1.55	0.417	1.01	2.4	2.42
				60°	120°	0.338	1.73	0.334	0.908	3	2.72
				90°	90°	0.225	2.00	0.250	0.785	4	3.14
				120°	60°	0.113	2.45	0.167	0.640	6	3.84
				150°	30°	0.030	3.46	0.083	0.454	12	5.45

单相全波电路

表 14-4

负载性质	电路图	整流器输出电压波形 $u_d$	流过可控硅的电流波形 $i_d$	移相角 $\alpha$	导通角 $\beta$	$\frac{U_d}{U_2}$	$\frac{I_d}{I_0}$	$\frac{I_d}{I_m}$	$\frac{I_d}{I_F}$ 条件为 $I_y - I_V$	$\frac{I_d}{I_a}$	$\frac{I_d}{I_F}$ 条件为 $I_y = I_V$
电阻性负载				0°	180°	0.900	1.57	0.318	1	2	2
				30°	150°	0.840	1.66	0.297	0.946	2	1.89
				60°	120°	0.676	1.88	0.239	0.835	2	1.67
				90°	90°	0.450	2.26	0.159	0.695	2	1.39
				120°	60°	0.226	2.78	0.092	0.565	2	1.13
				150°	30°	0.060	3.99	0.043	0.394	2	0.788
电感性负载				0°	180°	0.900	1.41	0.500	1.11	2	2.22
				30°	150°	0.840	1.55	0.417	1.01	2.4	2.42
				60°	120°	0.676	1.73	0.334	0.908	3	2.72
				90°	90°	0.450	2.00	0.250	0.785	4	3.14
				120°	60°	0.226	2.45	0.167	0.640	6	3.84
				150°	30°	0.060	3.46	0.083	0.454	12	5.45

单相半控桥式电路

表 14-5

负载性质	电路图	整流器输出电压波形 $u_x$	流过可控硅的电流波形 $i_a$	移相角 $\alpha$	导通角 $\beta$	$\frac{U_x}{U_i}$	$\frac{I_y}{I_o}$	$\frac{I_a}{I_m}$	$\frac{I_a}{I_F}$ 条件为 $I_y = I_Y$	$\frac{I_z}{I_o}$	$\frac{I_z}{I_F}$ 条件为 $I_y = I_Y$
电阻性负载				0°	180°	0.900	1.57	0.318	1	2	2
				30°	150°	0.840	1.66	0.297	0.946	2	1.80
				60°	120°	0.676	1.88	0.239	0.835	2	1.67
				90°	90°	0.450	2.26	0.159	0.695	2	1.39
				120°	60°	0.226	2.78	0.092	0.565	2	1.13
				150°	30°	0.060	3.99	0.043	0.394	2	0.788
电感性负载				0°	180°	0.900	1.41	0.500	1.11	2	2.22
				30°	150°	0.840	1.55	0.417	1.01	2.4	2.42
				60°	120°	0.676	1.73	0.334	0.908	3	2.72
				90°	90°	0.450	2.00	0.250	0.785	4	3.14
				120°	60°	0.226	2.45	0.167	0.640	6	3.84
				150°	30°	0.060	3.46	0.083	0.454	12	5.45



单相全控桥式电路

表 14—6

负载性质	电 路 图	整流器输出 电压波形 $u_x$	流过可控硅 的电流波形 $i_d$	移相角 $\alpha$	导通角 $\beta$	$\frac{U_x}{U_2}$	$\frac{I_x}{I_n}$	$\frac{I_a}{I_m}$	$\frac{I_y}{I_F}$ 条件为 $I_y = I_F$	$\frac{I_z}{I_n}$	$\frac{I_z}{I_F}$ 条件为 $I_y = I_F$	
电阻性负载				0°	180°	0.900	1.57	0.318	1	2	2	
				30°	150°	0.840	1.66	0.297	0.946	2	1.89	2
				60°	120°	0.676	1.88	0.239	0.835	2	1.67	2
				90°	90°	0.450	2.26	0.159	0.695	2	1.39	2
				120°	60°	0.226	2.76	0.092	0.565	2	1.13	2
				150°	30°	0.060	3.99	0.043	0.394	2	0.788	2
				180°	0°	0.900	1.414	0.500	1.11	2	2.22	2
电感性负载				0°	180°	0.900	1.414	0.500	1.11	2	2.22	
				30°	180°	0.780	1.414	0.500	1.11	2	2.22	2
				60°	180°	0.450	1.414	0.500	1.11	2	2.22	2

表 14-7 单相桥式(输出端有一个可控硅)电路

负载性质	电路图	整流器输出电压波形 $u_a$	流过可控硅的电流波形 $i_a$	移相角 $\alpha$	导通角 $\beta$	$\frac{U_a}{U_2}$	$\frac{I_a}{I_m}$	$\frac{I_a}{I_F}$ 条件为 $I_y = I_F$	$\frac{I_z}{I_F}$ 条件为 $I_y = I_F$		
电阻性负载				0°	180°	0.900	1.11	0.636	1.41	1.41	
				30°	150°	0.840	1.17	0.594	1.34	1.34	
				60°	120°	0.676	1.33	0.478	1.18	1.18	
				90°	90°	0.450	1.57	0.318	1.00	1.00	
				120°	60°	0.226	1.97	0.184	0.796	0.796	
				150°	30°	0.060	2.82	0.085	0.557	0.557	
电感性负载				0°	180°	0.900	1	1.57	1	1.57	
				30°	150°	0.840	1.09	0.833	1.43	1.2	1.71
				60°	120°	0.676	1.22	0.667	1.29	1.5	1.93
				90°	90°	0.450	1.41	0.500	1.11	2	2.22
				120°	60°	0.226	1.73	0.333	0.908	3	2.72
				150°	30°	0.060	2.45	0.167	0.640	6	3.84

二 相 零 式 线 路

表 14—8

负载性质	电 路 图	整流器输出 电压波形 $u_x$	流过可控硅 的电流波形 $i_a$	移 相 角 $\alpha$	导 通 角 $\beta$	$\frac{U_x}{U_2}$	$\frac{I_y}{I_a}$	$\frac{I_a}{I_m}$	$\frac{I_a}{I_F}$ 条件为 $I_y = I_F$	$\frac{I_k}{I_a}$	$\frac{I_z}{I_r}$ 条件为 $I_y = I_F$
电 阻 性 负 载				0°	300°	0.843	1.18	0.595	1.33	1	1.33
				30°	270°	0.810	1.20	0.572	1.31	1	1.31
				90°	210°	0.616	1.39	0.435	1.13	1	1.13
				150°	150°	0.421	1.67	0.297	0.940	1	0.940
				210°	90°	0.225	2.23	0.159	0.706	1	0.706
				270°	30°	0.030	3.96	0.043	0.396	1	0.396
电 感 性 负 载				0°	300°	0.843	1.10	0.833	1.43	1.20	1.72
				30°	270°	0.810	1.16	0.750	1.35	1.33	1.79
				90°	210°	0.616	1.31	0.583	1.20	1.72	2.06
				150°	150°	0.421	1.55	0.416	1.01	2.40	2.42
				210°	90°	0.225	2.00	0.250	0.785	4.00	3.14
				270°	30°	0.030	3.48	0.083	0.451	12.00	5.41

二相式电路

表 14—9

负载性质	电路图	整流器输出电压波形 $u_z$	流过可控硅的电流波形 $i_a$	移相角 $\alpha$	导通角 $\beta$	$\frac{U_z}{U_1}$	$\frac{I_y}{I_a}$	$\frac{I_a}{I_m}$	$\frac{I_a}{I_F}$ 条件为 $I_y = I_V$	$\frac{I_z}{I_a}$	$\frac{I_z}{I_F}$ 条件为 $I_y = I_V$
电阻性负载				$0^\circ$	$240^\circ$	0.676	1.33	0.478	1.18	1	1.18
				$30^\circ$	$210^\circ$	0.645	1.38	0.456	1.14	1	1.14
				$60^\circ$	$180^\circ$	0.563	1.49	0.398	1.05	1	1.05
				$90^\circ$	$150^\circ$	0.451	1.66	0.319	0.946	1	0.946
				$150^\circ$	$90^\circ$	0.225	2.23	0.159	0.706	1	0.706
				$210^\circ$	$30^\circ$	0.030	3.96	0.043	0.396	1	0.396
电感性负载				$0^\circ$	$240^\circ$	0.676	1.23	0.667	1.28	1.50	1.92
				$30^\circ$	$210^\circ$	0.645	1.31	0.583	1.20	1.72	2.06
				$60^\circ$	$180^\circ$	0.563	1.42	0.500	1.11	2.00	2.22
				$90^\circ$	$150^\circ$	0.451	1.55	0.416	1.01	2.40	2.42
				$150^\circ$	$90^\circ$	0.225	2.00	0.250	0.785	4.00	3.14
				$210^\circ$	$30^\circ$	0.030	3.48	0.083	0.451	12.00	5.41

三相半波电路

表 14-10

负载性质	电路图	整流器输出电压波形 $u_c$	流过可控硅的电流波形 $i_a$	移相角 $\alpha$	导通角 $\beta$	$\frac{U_c}{U_2}$	$\frac{I_c^2}{I_a}$	$\frac{I_a}{I_m}$	$\frac{I_a}{I_F}$ 条件为 $I_y = I_F$	$\frac{I_a}{I_a}$	$\frac{I_c}{I_F}$ 条件为 $I_y = I_F$
电阻性负载				0°	120°	1.17	1.76	0.276	0.892	3	2.68
				30°	120°	1.01	1.88	0.239	0.835	3	2.50
				60°	90°	0.675	2.22	0.159	0.708	3	2.12
				90°	60°	0.338	2.75	0.093	0.565	3	1.69
				120°	30°	0.0905	3.92	0.042	0.394	3	1.18
电感性负载 (有续流二极管)				0°	120°	1.17	1.73	0.333	0.908	3	2.72
				30°	120°	1.01	1.73	0.333	0.908	3	2.72
				60°	90°	0.675	2.00	0.250	0.785	4	3.14
				90°	60°	0.338	2.45	0.167	0.641	6	3.85
				120°	30°	0.0905	3.48	0.083	0.451	12	5.41
电感性负载 (无续流二极管)				0°	120°	1.17	1.73	0.333	0.908	3	2.72
				30°	120°	1.01	1.73	0.333	0.908	3	2.72
				60°	120°	0.586	1.73	0.333	0.908	3	2.72

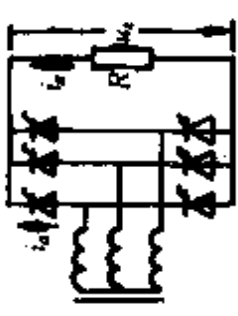
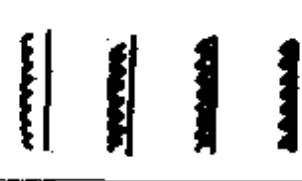
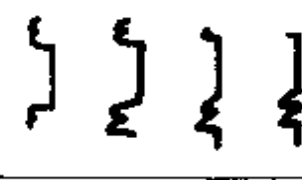
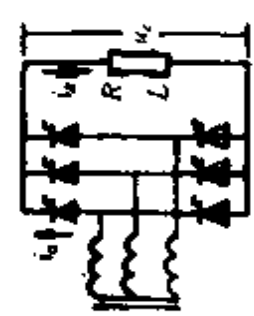

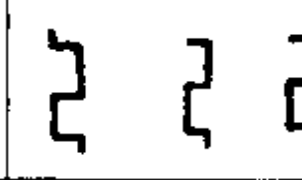
三相半控桥式电路

表 14-11

负载性质	电路图	整流器输出电压波形 $u_d$	流过可控硅的电流波形 $i_d$	移相角 $\alpha$	导通角 $\beta$	$\frac{U_d}{U_i}$	$\frac{I_d}{I_a}$	$\frac{I_a}{I_m}$	$\frac{I_d}{I_F}$ 条件为 $I_d = I_F$	$\frac{I_s}{I_a}$	$\frac{I_s}{I_F}$ 条件为 $I_s = I_F$
电阻性负载				0°	120°	2.33	1.73	0.318	0.908	3	2.72
				30°	120°	2.17	1.75	0.297	0.891	3	2.69
				60°	120°	1.75	1.88	0.242	0.835	3	2.51
				90°	90°	1.17	2.22	0.161	0.707	3	2.12
				150°	30°	0.157	3.99	0.042	0.394	3	1.18
(有续流) 电感性负载				0°	120°	2.33	1.73	0.333	0.908	3	2.72
				30°	120°	2.17	1.73	0.333	0.908	3	2.72
				60°	120°	1.75	1.73	0.333	0.908	3	2.72
				90°	90°	1.17	2.00	0.250	0.785	4	3.14
				150°	30°	0.157	2.48	0.083	0.451	12	5.41
电感性负载				0°	120°	2.33	1.73	0.333	0.908	3	2.72
				60°	120°	1.75	1.73	0.333	0.908	3	2.72
				150°	120°	0.157	1.73	0.333	0.908	3	2.72

三相全控桥式电路

表 14—12

负载性质	电路图	整流器输出电压波形 $u_z$	流过可控硅的电流波形 $i_a$	移相角 $\alpha$	导通角 $\beta$	$\frac{U_z}{U_T}$	$\frac{I_y}{I_a}$	$\frac{I_a}{I_m}$	$\frac{I_a}{I_F}$ 条件为 $I_y = I_V$	$\frac{I_z}{I_a}$	$\frac{I_z}{I_F}$ 条件为 $I_y = I_V$
电阻性负载				0°	120°	2.33	1.73	0.318	0.912	3	2.73
				30°	120°	2.02	1.76	0.275	0.891	3	2.67
				60°	120°	1.17	1.97	0.183	0.796	3	2.39
				90°	60°	0.311	2.82	0.085	0.556	3	1.67
电感性负载 (无续流二极管)				0°	120°	2.53	1.73	0.333	0.912	3	2.72
				30°	120°	2.02	1.73	0.333	0.912	3	2.72
				60°	120°	1.17	1.73	0.333	0.912	3	2.72

双反星形带平衡电抗器电路

表 14-13

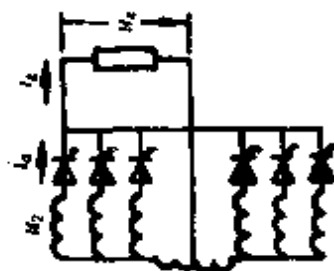
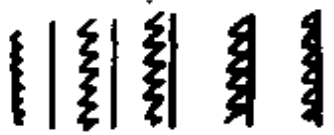
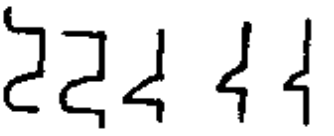
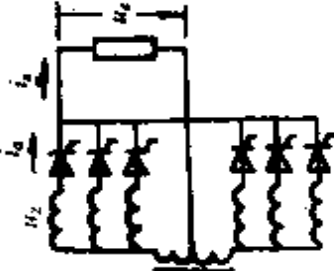

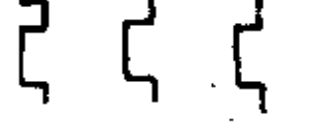
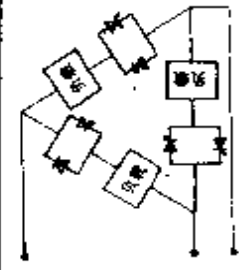
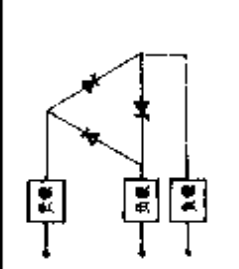
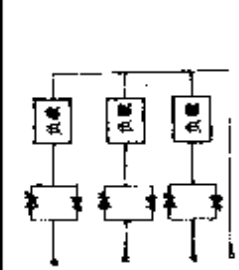
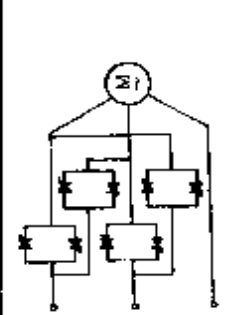
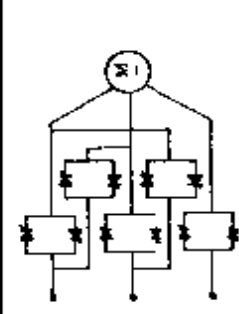
负载性质	电路图	整流器输出电压波形 $u_x$	流过可控硅的电流波形 $i_a$	移相角 $\alpha$	导通角 $\beta$	$\frac{U_1}{U_2}$	$\frac{I_y}{I_a}$	$\frac{I_a}{I_m}$	$\frac{I_a}{I_T}$ 条件为 $I_y = I_T$	$\frac{I_s}{I_a}$	$\frac{I_x}{I_T}$ 条件为 $I_y = I_T$
电阻性负载				0°	120°	1.17	1.76	0.276	0.892	6	5.35
				30°	120°	1.01	1.88	0.239	0.835	6	5.01
				60°	90°	0.675	2.22	0.159	0.708	6	4.25
				90°	60°	0.338	2.75	0.093	0.565	6	3.39
				120°	30°	0.0905	3.62	0.042	0.394	6	2.36
				0°	120°	1.17	1.73	0.333	0.908	6	5.44
电感性负载 (有续流二极管)				30°	120°	1.01	1.73	0.333	0.908	6	5.44
				60°	120°	0.586	1.73	0.333	0.908	6	5.44
				0°	120°	1.17	1.73	0.333	0.908	6	5.44



表 14-14 三相可控硅起动器的主要型式及其特点

序号	1	2	3	4
电路图				
可控硅承受的电压最大值	$\sqrt{2}U$	$\sqrt{2}U$	正向 $\sqrt{2}U$ , 反向 0	$\sqrt{2}U$
流过可控硅的电流平均值	$\frac{\sqrt{2}I}{\pi}$	$\frac{\sqrt{2}I}{\pi}$	$\frac{\sqrt{2}I}{\pi}$	$\frac{I}{\pi\sqrt{2}}$
(1) 特点	<p>元件用量少                      (1) 在断开状态下承受过电压能力小                      (2) 三相电动机, 只适于容量不平衡, 若用小容量</p>	<p>在断开状态下承受过电压能力较强                      (1) 三相电动机, 只适于容量平衡各种负载                      (2) 三相电动机, 只适于容量平衡各种负载                      (3) 三相电动机, 只适于容量平衡各种负载</p>	<p>元件用量少                      (1) 在断开状态下承受过电压能力小                      (2) 三相电动机, 只适于容量平衡各种负载                      (3) 三相电动机, 只适于容量平衡各种负载                      (4) 三相电动机, 只适于容量平衡各种负载</p>	<p>(1) 可控硅的负载较轻                      (2) 在断开状态下承受过电压能力小                      (3) 只适用于星形负载</p>

(续表)

<p>5</p> 	<p>6</p> 	<p>7</p> 	<p>8</p> 	<p>9</p> 
<p><math>\sqrt{2}U</math></p> <p><math>\frac{\sqrt{2}}{\pi} \frac{I}{\sqrt{3}}</math></p> <p>(1) 可控硅负载较轻, 为线电流的 <math>\frac{1}{\sqrt{3}}</math></p> <p>(2) 在断开状态下承受过电压能力小</p> <p>(3) 适用于三角形负载</p>	<p><math>\sqrt{2}U</math></p> <p><math>\frac{\sqrt{2}}{\pi} I</math></p> <p>(1) 可控硅用量少</p> <p>(2) 元件电流为额定电流的 1.5 倍</p> <p>(3) 在断开状态下承受过电压能力小</p> <p>(4) 有偶次谐波电流, 冲击于星形负载</p> <p>(5) 适用于星形负载</p>	<p><math>\frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}} U</math></p> <p><math>\frac{\sqrt{2}}{\pi} I</math></p> <p>(1) 可控硅承受的电压较低, 为相电压幅值</p> <p>(2) 适用于星形负载</p>	<p><math>\sqrt{2}U</math></p> <p><math>\frac{\sqrt{2}}{\pi} I</math></p> <p>在断开状态下承受过电压能力小</p>	<p><math>\sqrt{2}U</math></p> <p><math>\frac{\sqrt{2}}{\pi} I</math></p> <p>(1) 在断开状态下承受过电压能力强</p> <p>(2) 电路对称性好</p>

注:  $U$ —相电压有效值(V);  $I$ —线电流有效值(负荷电流)(A)。

### 三、可控硅起动器的型式及其特点

三相可控硅起动器的主要型式及其特点,见表 14—14。

### 四、硅及可控硅整流元件的选择

#### 1. 电压等级的选择

硅整流元件  $U_{RM} > U_{mf}$

可控硅元件  $PFV \geq (1.5 \sim 2)U_{mz}$

$$PRV \geq (1.5 \sim 2)U_{mf}$$

式中:  $U_{RM}$  —— 所选整流元件额定反向峰值电压(V);

$U_{mf}$  —— 所选整流元件所承受的反向电压峰值(V),可由表 14—1 查得;

$U_{mz}$  —— 所选整流元件所承受的正向电压峰值(V),可由表 14—1 查得;

$PFV$  —— 所选可控硅正向阻断峰值电压(V);

$PRV$  —— 所选可控硅反向阻断峰值电压(V);

1.5 ~ 2 —— 安全系数。

#### 2. 电流等级的选择

(1) 不考虑环境影响时:

$$I_F > I_a = I/1.57$$

式中:  $I_F$  —— 所选元件额定正向平均电流(A);

$I_a$  —— 实际流过元件的电流平均值(A),一般情况下取全导通时流过元件的电流平均值,可由表 14—1 查得;

$I$  —— 实际流过元件的电流有效值(A);

1.57 —— 正弦半波电流有效值与平均值之比。

(2) 考虑环境影响时:

$$I_F \geq \frac{K_3 I_a}{K_1 K_2}$$

式中:  $K_1$  —— 风速系数,见图 14—1(a),20A 以下的硅元件不需强迫鼓风,故  $K_1 = 1$ ;

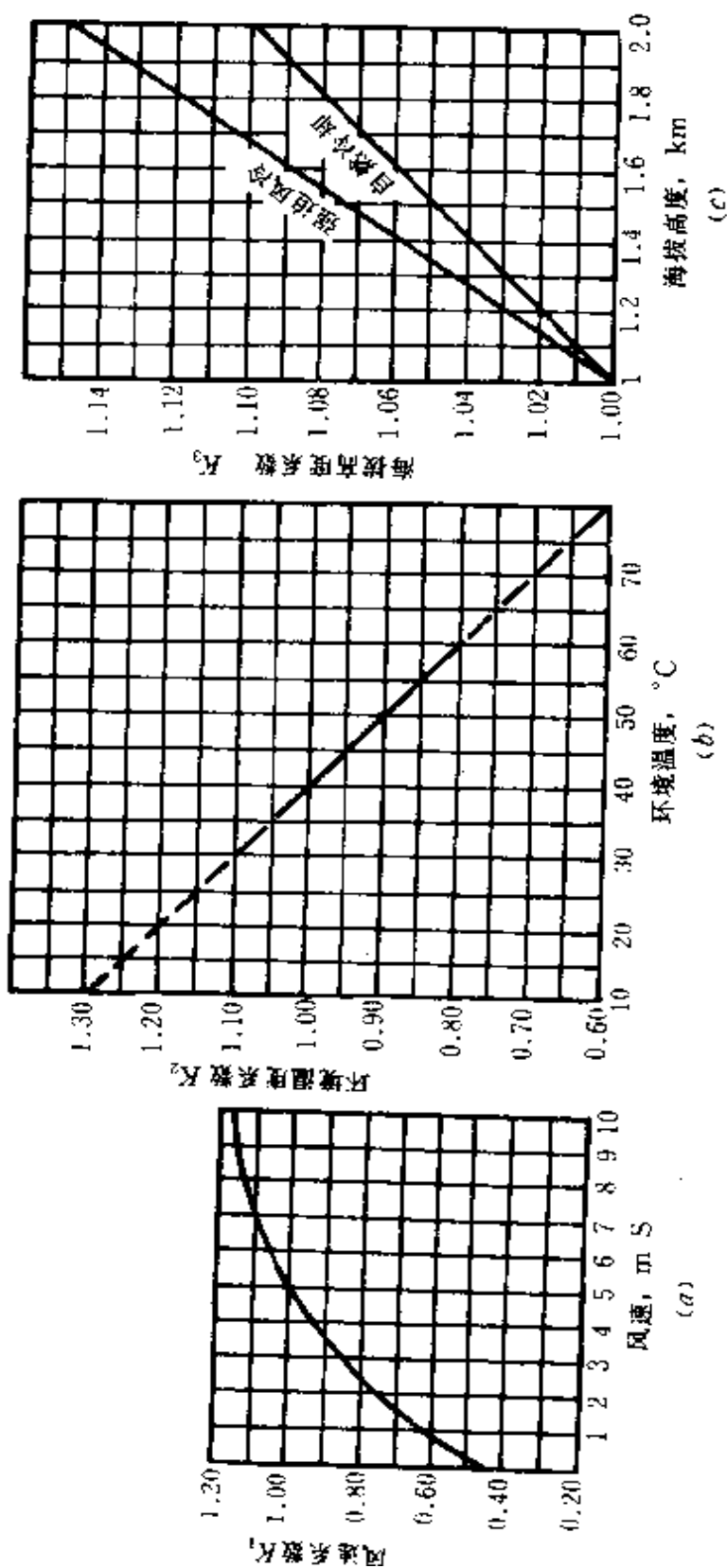


图 14-1 硅元件电流选择中的环境影响系数

(a) 风速系数  $K_1$  (b) 温度系数  $K_2$  (c) 海拔高度系数  $K_3$

$K_2$ ——环境温度系数,见图 14-1(b);

$K_3$ ——海拔高度系数,见图 14-1(c)。

如果整流电路为三相桥式,可控硅元件不串联,也可参照表 14-15,根据电动机的额定电压来选择元件的额定电压。

表 14-15 可控硅元件额定电压的选择

电动机额定电压(V)	220	330	440	660	750
可控硅额定电压(V)	800	1200	1600	2300	2500

### 五、可控硅元件串、并联计算

为了避免可控硅串、并联后引起击穿或烧毁,必须选用特性相近的同一规格的可控硅元件,并采用均压保护(串联)和均流保护(并联)。

#### 1. 串联

可控硅元件串联保护,如图 14-2 所示。

##### (1) 串联元件数

$$n = \frac{U_{sf}}{0.45PRV}$$

式中: $U_{sf}$ ——元件串联后承受总的反向峰值电压(V);

PRV——可控硅反向阻断峰值电压(V)。

##### (2) 均压电阻估算:

$$R = (K_1 - 1) \frac{PRV}{I_R}$$

式中: $K_1$ ——允许电压不均匀系数,

##### (3) 电阻功率:

$$P = K_2 \frac{(PRV)^2}{R}$$

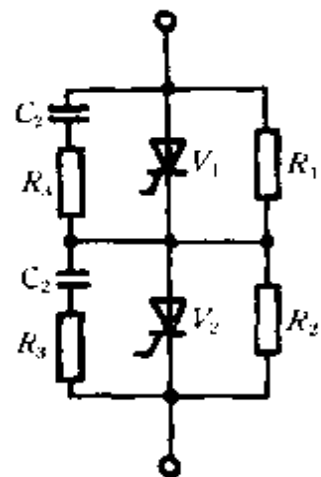


图 14-2 可控硅元件串联保护

式中： $K_2$ ——系数，对于单相线路，取 0.25；三相线路， $K_2$  取 0.4；直流线路， $K_2$  取 1。

(4)  $R_3$ 、 $C_2$  的选择：见本节可控硅保护元件选择。

## 2. 并联

可控硅元件并联保护如图 14-3 所示。

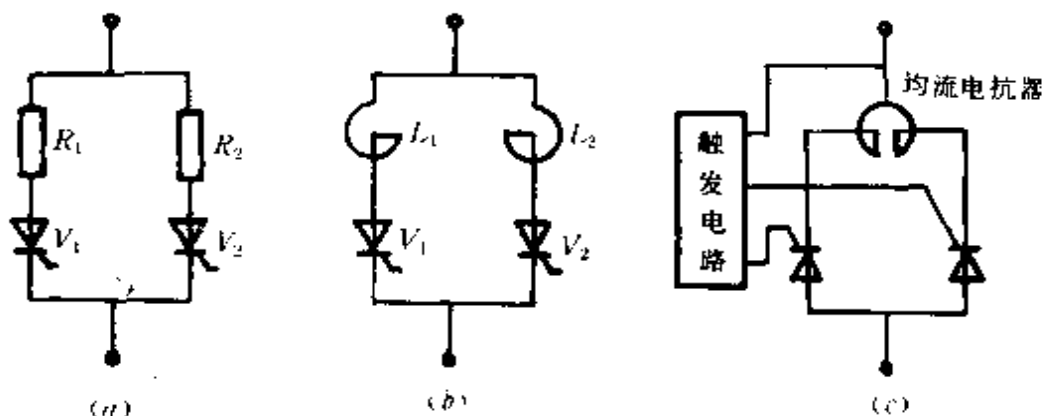


图 14-3 可控硅元件并联保护

(1) 并联元件数：

$$n = \frac{I}{1.26I_F}$$

式中： $I$ ——并联元件中流过总的正向电流有效值(A)；

$I_F$ ——同前。

(2) 均流电阻计算：

$$R = \frac{0.4 \sim 1}{I_F}$$

(3) 电阻功率：

$$P_R = I_F^2 R$$

串联电阻的方法，由于损耗较大，只适用于小功率的场合。空芯电抗器  $L$  可取  $40\mu\text{H}$  左右，即可保证有良好的均流效果。均流电抗器的计算，见第三章第四节均流电抗器设计。

## 六、可控硅保护计算

### 1. 交流侧过电压保护计算

(1) 阻容保护计算：交流侧阻容保护接法，如图 14-4 所示。

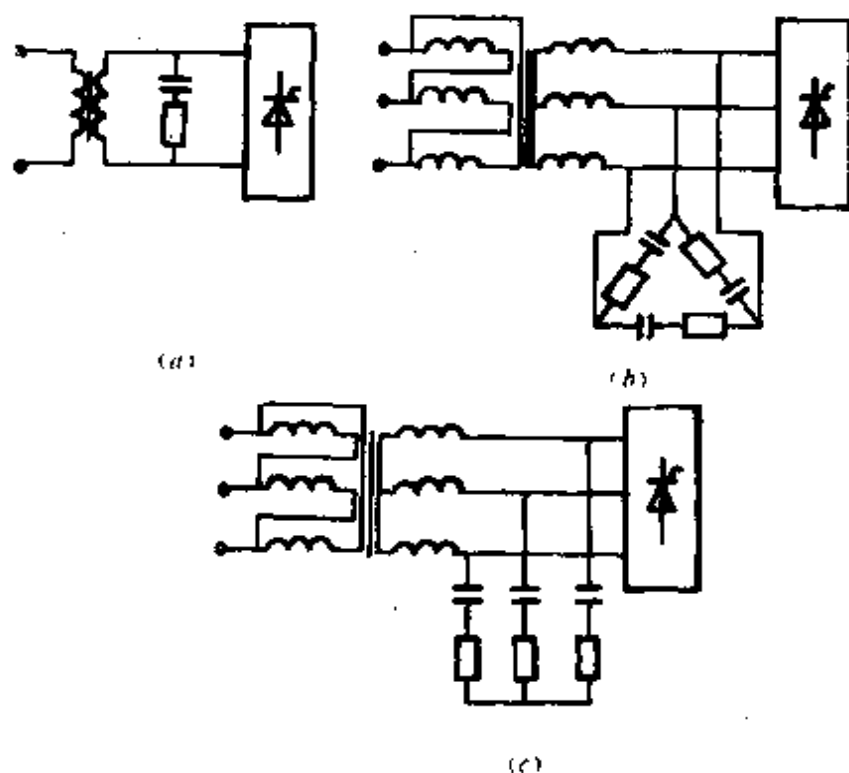


图 14-4 交流侧阻容保护电路  
(a) 单相 (b) 变压器次级 Y 接法, 阻容  $\Delta$  接法  
(c) 变压器次级 Y 接法, 阻容 Y 接法

① 方法一: 见图 14-4(a), 交流侧过电压保护  $R$ 、 $C$  之值可按下列公式计算:

$$C \geq 6I_0\% \frac{S_x}{U_2^2}$$

$$R \geq 2.3 \frac{U_2^2}{S_x} \sqrt{\frac{U_d\%}{I_0\%}}$$

电容  $C$  的交流耐压  $\geq 1.5U_2$

电阻功率  $P \geq (3 \sim 4)I_0^2R$

式中:  $S_x$ ——变压器每相的平均计算容量(VA);

$U_2$ ——变压器次级相电压有效值(V);

$I_0\%$ ——变压器空载电流百分数, 对于几百 VA 的变压器, 取 10; 对于几十 VA 的取 3~4;

$U_d\%$  —— 变压器阻抗电压百分数, 约 5 ~ 10;

$U_c$  —— 阻容两端正常工作交流电压有效值(V);

$I_c$  —— 正常工作时流过阻容电路的交流电流有效值(A)。

对于图 14-4(b) 或(c), 若  $R$ 、 $C$  接法与变压器次级接法一致(均  $\Delta$  或均  $Y$  接法), 则  $R$ 、 $C$  值可按以上公式计算; 若接法不一致, 则先按以上两式算出阻容值, 再进行  $Y - \Delta$  换算:  $R_\Delta = 3R_Y$ ;  $C_\Delta = C_Y/3$ 。如图 14-4(b), 可先计算出都按  $Y$  接法的  $R_Y$  及  $C_Y$  值, 再将阻容换算成  $\Delta$  接法的值。若变压器次级是  $\Delta$  接法,  $R$  及  $C$  是  $Y$  接法, 先计算出均按  $\Delta$  接法的  $R_\Delta$  及  $C_\Delta$  值, 再将阻容换算成  $Y$  接法的值。

② 方法二: 对于小容量整流设备:

200VA 以下的单相电路

$$C = 700 \frac{S}{(\text{PRV})^2}$$

200VA 以上的单相电路

$$C = 400 \frac{S}{(\text{PRV})^2}$$

5kVA 以下的三相电路

$$C = K \frac{S}{(\text{PRV})^2}$$

式中:  $S$  —— 整流变压器的容量(VA);

$\text{PRV}$  —— 可控硅额定反向峰值电压(V), 当由  $n$  只可控硅串联时, 则此值应乘  $n$ ;

$K$  —— 计算系数, 见表 14-16。

表 14-16 小容量整流设备过电压抑制电容的计算系数  $K$  值

变压器联接型式	电容器三角形接法	电容器星形接法
$Y_Y$ , 初级中点不接地	150	450
$Y_\Delta$ , 初级中点不接地	300	900
所有其他接法	900	2700



$$R = 100 \sqrt{\frac{R_z}{C \sqrt{f}}}$$

电阻功率  $P_R = R(U_2/X_c)^2$

式中： $R_z$ ——等效负载电阻，即负载情况下直流电压除以直流电流之值( $\Omega$ )；

$f$ ——电网频率(Hz)；

$U_2$ ——变压器次级每相电压(V)；

$X_c$ ——容抗( $\Omega$ )，

$$X_c = \frac{10^{-6}}{2\pi f C}$$

为了减少发热量，电阻功率应选择为计算值的 2 倍。

对于大容量整流设备

$$C = K_c \left( \frac{I_{02}}{f U_{02}} \right)$$

$$R = K_R (U_{02} / I_{02})$$

$$P_R = (2 \sim 3) (K_p I_{02})^2 R$$

式中： $U_{02}$ ——变压器次级绕组电压(V)；

$I_{02}$ ——折算到变压器次级绕组的励磁电流(A)；

$K_c, K_R, K_p$ ——系数，见表 14—17。

表 14—17 大容量整流设备交流侧过电压

RC 抑制电路计算系数

整流电路	$K_c$	$K_R$	$K_p$
单相桥式	29000	0.3	0.25
三相桥式	10000	0.3	0.25
三相半波	8000	0.36	0.25
六相半波	7000	0.3	0.2

③ 整流装置直接接到电源上时阻容保护和限制电压上升率  $dV/dt$  的保护的计算：阻容保护估算：

保护电容电容量

$$C = \frac{21U_x^2 I^2 U_d \%}{S_r (\text{PRV})^2}$$

式中： $U_x$  —— 额定工作电压(V)；

$I$  —— 相邻负载拉闸电流(A)；

其它符号同前。

**例 14—1** 有一个三相可控硅整流装置接在 380V 电网上，电网由一台 200kVA 的变压器供电，变压器的  $U_d\%$  为 4，已知相邻负载最大线电流为 120A，可控硅的额定反向峰值电压 PRV 为 900V，试选用保护电容电容量。

**解** 保护电容电容量

$$C = \frac{21 \times 380^2 \times 120^2 \times 4}{\left(\frac{200000}{3}\right) \times 900^2} = 3.2(\mu\text{F})$$

可取 3 ~ 4 $\mu\text{F}$  的电容。

当电源电压发生突变时，有可能出现电压上升率  $dV/dt > 20\text{V}/\mu\text{s}$  的情况。如果不用整流变压器，就可能引起可控硅误导通。为此需进行限制  $dV/dt$  保护计算，在电源输入端加串联电感和阻容保护电路(图 14—5)。

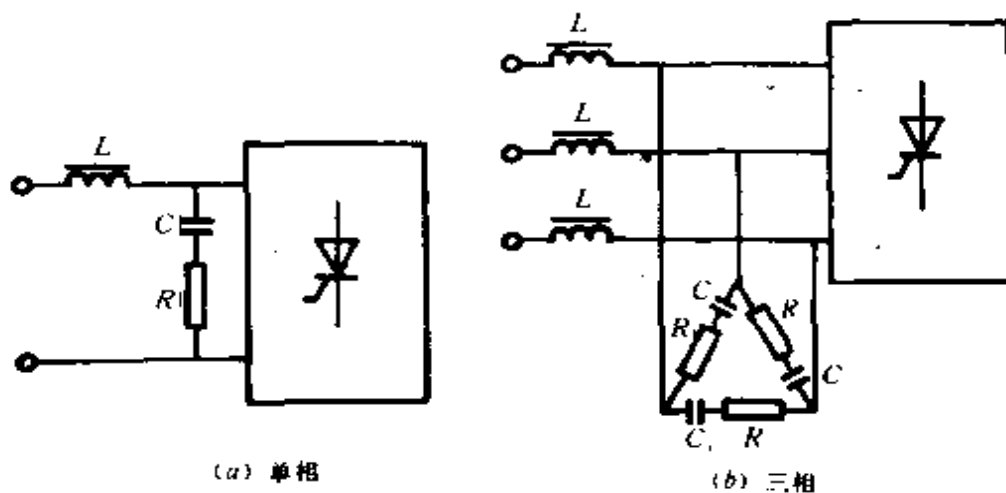


图 14—5 限制电压上升率的保护电路

电感的计算

$$L = \frac{(0.03 \sim 0.05)R_z}{2\pi f}$$

式中： $L$ ——电感(H)；

$R_z$  —— 整流器输入端等效负载电阻，即电源电压除以输入整流器的电流之值；对于三相整流为每相等效负荷电阻( $\Omega$ )；

$f$  —— 电源频率(Hz)。

① 可控硅换相过电压阻容保护计算：可控硅换相过电压采取阻容保护，是将  $RC$  并联在可控硅元件上， $RC$  数值可由表 14—18 选取。

表 14—18 与可控硅元件并联的  $RC$  数值

可控硅额定 电流 (A)	5	10	20	50	100	200	500
电容 $C$ ( $\mu F$ )	0.1	0.1	0.15	0.2	0.25	0.5	1
电阻 $R$ ( $\Omega$ )	100	100	80	40	20	10	2

电阻  $R$  值也可按负荷电阻的 2.2 倍选取。

电阻功率计算：

方法一

$$P_R = \frac{1.5(\text{PRV} \cdot 2\pi f C)^2 \times 10^{-12}}{2} \times R$$

方法二

$$P_R > \frac{U_z^2}{R^2 + X_c^2} R$$

式中： $U$  —— 阻容保护电路两端电压有效值(V)，若接在直流侧应为整流电压中交流分量有效值；

$X_c$  —— 阻容保护的电容容抗( $\Omega$ )。

需指出：过电压保护的计算方法有多种，尚无统一的标准公式。计算结果并不是严格的，可根据同类设备的保护参数或实际

经验进行适当修正。

(2) 硒堆保护计算: 硒堆可装在交流侧及直流侧。

① 硒片面积选择: 10kW 以下, 选用  $16 \times 16\text{mm}^2$  或  $22 \times 22\text{mm}^2$ ; 20 ~ 30kW, 选用  $40 \times 40\text{mm}^2$ ; 30 ~ 100kW, 选用  $90 \times 90\text{mm}^2$ ; 100kW 以上, 选用  $100 \times 100\text{mm}^2$ 。

② 硒片片数确定:

$$\text{单相} \quad n = K_{cp} U_2 / U_{cp}$$

$$\text{三相} \quad n = K_{cp} \sqrt{3} U_2 / U_{cp}$$

式中:  $K_{cp}$  —— 硒片动作电压系数, 一般为 1.1 ~ 1.3;

$U_2$  —— 变压器次级线电压有效值(V);

$U_{cp}$  —— 硒片击穿电压, 一般为 20 ~ 30V; 上海无线电十四厂生产的 XTP 或 XLP 型硒片, C 级每片 20V, D 级每片 25V, E 级每片 30V。

硒堆保护接法如图 14--6 所示。

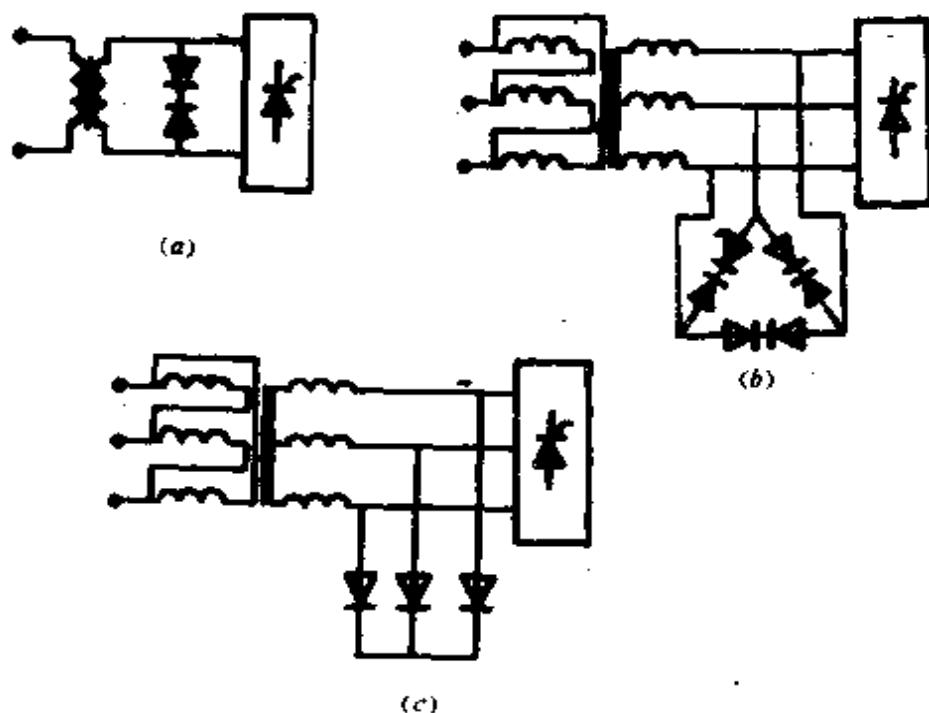


图 14--6 硒堆保护接法

(a) 单相 (b) 三相  $\Delta$  接法 (c) 三相 Y 接法

如交流侧单相电压为 220V, 则硒片片数  $n = K_{cp}U_2/U_{cp}$   
 $= 1.1 \times 220/20 = 12$ (片), 每堆为 24 片。

硒片片数确定后, 应满足下式要求: (否则应适当调整片数)

$$I_p \geq K_0 I_{02}$$

式中:  $I_p$  —— 硒堆在试验电压下的反向电流;

$I_{02}$  —— 隔离变压器二次空载电流;

$K_0$  —— 经验系数, 取 0.7

(3) 压敏电阻保护计算: 即确定压敏电阻额定电压  $U_y$ :

$$U_y = \frac{\epsilon}{0.8 \sim 0.9} U_{ym}$$

式中:  $U_{ym}$  —— 承受额定电压的峰值(V);

$\epsilon$  —— 电网电压升高系数, 取 1.05 ~ 1.10。

## 2. 可控硅直流侧过电压保护计算

(1) 阻容保护计算:

$$C = K_{cc} \frac{I_{02}}{fU_{02}}$$

$$R = K_{Rz} U_{02} / I_{02}$$

式中:  $C$  —— 电容量( $\mu F$ );

$R$  —— 电阻( $\Omega$ );

$I_{02}$  —— 折算到变压器次级绕组的励磁电流(A);

$U_{02}$  —— 变压器次级绕组电压(V);

$K_{cc}$ 、 $K_{Rz}$  —— 系数, 见表 14—19。

表 14—19 直流侧过电压 RC 抑制电路计算系数

整流电路	$K_{cc}$	$K_{Rz}$
单相桥式	120000	0.25
三相桥式	$70000 \sqrt{3}$	$0.1 / \sqrt{3}$
三相半波	$70000 \sqrt{3}$	$0.1 / \sqrt{3}$

(2) 快熔保护计算：快熔是快速熔断器的简称，装在交流侧或直流侧。常用的快熔有 RLS 和 RS3 系列。快熔的额定电压  $U_{rr}$  和熔体额定电流  $I_{rr}$  (有效值) 按下列公式选取：

$$U_{rr} \geq U_g$$

$$1.57I_F \geq I_{rr} \geq I_g \text{ 或 } I_{rr} = (1.2 \sim 1.5)I_F$$

式中： $U_g$ ——线路正常工作电压(V)；

$I_F$ ——可控硅额定正向平均电流(A)；

$I_g$ ——流过可控硅的实际工作电流有效值(A)。

快速熔断器的接法，如图 14—7 所示。

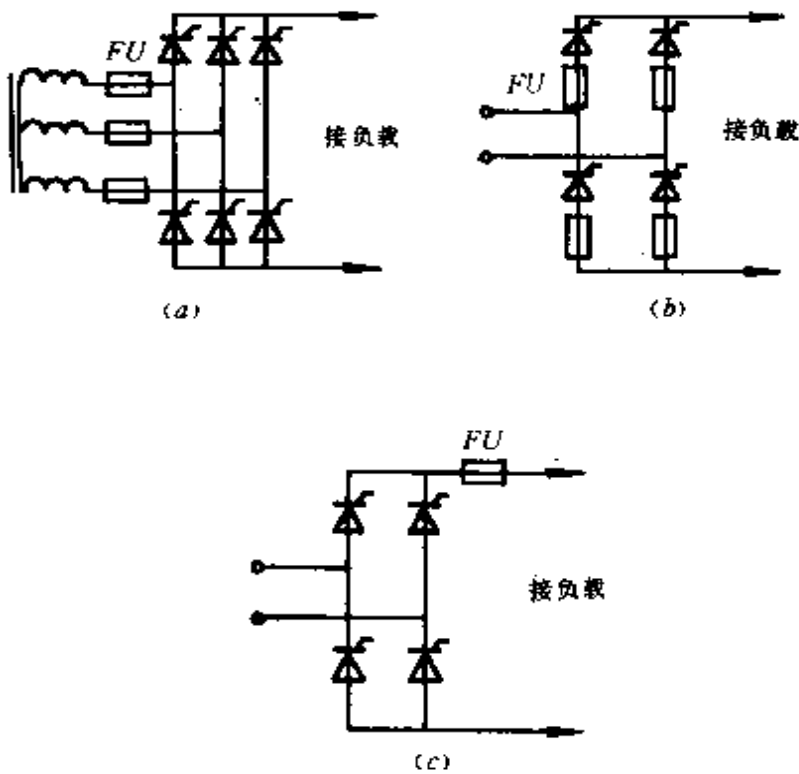


图 14—7 快速熔断器保护接法

(a) 交流侧串快熔 (b) 元件串快熔 (c) 直流侧串快熔

RLS 系列螺旋式快速熔断器的技术数据见表 14—20。

表 14—20 RLS 系列快速熔断器的技术数据

型号	额定电压 (V)	额定电流 (A)	熔体额定电流 (A)	极限分断 电流有效值	电路功 率因数
RLS - 10	500V 以下	10	3、5、10	40kA	≥ 0.3
RLS - 50		50	15、20、25、30、40、50、		
RLS - 100		100	60、80、100		

保 护 特 性

额定电流倍数	熔断时间
1.1	5h 不断
1.3	1h 不断
1.75	1h 内断
4	< 0.2s
6	< 0.02s

(3) 应急时用普通熔断器代替快熔保护的计算：作为临时措施，可用普通熔断器降低定额代替快熔保护可控硅。这时可按下式选择：

$$I_{cr} \leq \frac{2}{3} \times 1.57 I_F = 1.05 I_F$$

式中： $I_{cr}$ ——普通熔断器的熔体额定电流(A)；

$I_F$ ——同前。

如 20A 的可控硅可选用 20A 的普通熔断器来保护。

除了上述保护方法外，还有直流快速开关作直流侧的过载和短路保护，以及在交流侧和直流侧接入过流继电器进行过电流保护。快速开关机构动作时间只有 2ms，全部断弧时间为 25 ~ 30ms，是较好的直流侧过电流保护装置。

第二节 整流电路及其计算

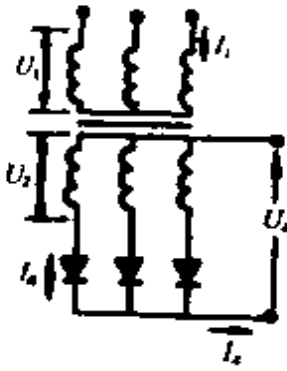
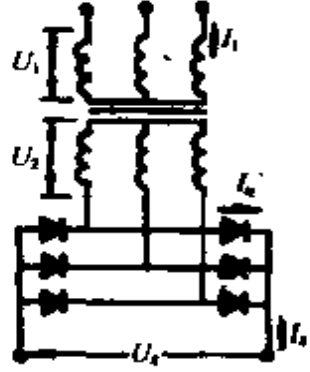
一、各种整流电路参数及比较(表 14—21)

表 14—21 整流电路的基本电量关系

整流电路名称	单相半波	单相全波 (双半波)	单相桥式(全波)
电路图			
空载直流输出电压 $U_{c0}$	$0.45U_2$	$0.90U_2$	$0.90U_2$
元件最大正向和最大反向电压峰值 $U_m$	$1.41U_2$ ( $3.14U_{c0}$ )	$2.83U_2$ ( $3.14U_{c0}$ )	$1.41U_2$ ( $1.57U_{c0}$ )
输出电压纹波系数 $\gamma$	1.21	0.484	0.484
流过元件的电流平均值 $I_a$	$I_a$	$0.5I_a$	$0.5I_a$
变压器一次侧相电流 $I_{c1}$	$1.21kI_a$	$1.11kI_a$	$1.11kI_a$
变压器二次侧相电流(有效值) $I_{r2}$	$1.57I_a$	$0.785I_a$	$1.11I_a$
变压器二次侧相电压(有效值) $U_{r2}$	$2.22U_r + ne$	$1.11U_r + ne$	$1.11U_r + ne$
变压器一次侧容量 $P_{r1}$	$2.69U_r I_a$	$1.23U_r I_a$	$1.23U_r I_a$
变压器二次侧容量 $P_{r2}$	$3.49U_r I_a$	$1.74U_r I_a$	$1.23U_r I_a$
变压器平均计算容量 $P_{r1}$	$3.09U_r I_a$	$1.49U_r I_a$	$1.23U_r I_a$



(续表)

整流电路名称	三相半波(星形零点)	三相星形桥式
电路图		
空载直流输出电压 $U_{x0}$	$1.17U_2$	$1.35U_2$
元件最大正向和最大反向电压峰值 $U_m$	$2.45U_2(2.09U_{x0})$	$1.41U_2(1.05U_{x0})$
输出电压纹波系数 $\gamma$	0.183	0.042
流过元件的电流平均值 $I_x$	$0.333I_x$	$0.333I_x$
变压器一次侧相电流 $I_{x1}$	$0.47kI_x$	$0.817kI_x$
变压器二次侧相电流(有效值) $I_{x2}$	$0.58I_x$	$0.817I_x$
变压器二次侧相电压(有效值) $U_{x2}$	$0.855U_x + ne$	$0.428U_x + 2ne$
变压器一次侧容量 $P_{s1}$	$1.21U_x I_x$	$1.05U_x I_x$
变压器二次侧容量 $P_{s2}$	$1.49U_x I_x$	$1.05U_x I_x$
变压器平均计算容量 $P_{\sigma}$	$1.35U_x I_x$	$1.05U_x I_x$

(续表)

整流电路名称	六相双反星形	六相星形半波
电路图		
空载直流输出电压 $U_{z0}$	$1.35U_2$	$1.17U_2$
元件最大正向和最大反向电压峰值 $U_m$	$2.83U_2(2.09U_{z0})$	$2.45U_2(2.09U_{z0})$
输出电压纹波系数 $\gamma$	0.042	0.042
流过元件的电流平均值 $I_a$	$0.167I_Z$	$0.167I_Z$
变压器一次侧相电流 $I_{L1}$	$0.407kI_Z$	$0.576kI_Z$
变压器二次侧相电流(有效值) $I_{L2}$	$0.289I_Z$	$0.407I_Z$
变压器二次侧相电压(有效值) $U_{r2}$	$0.855U_2 + ne$	$0.744U_2 + ne$
变压器一次侧容量 $P_1$	$1.05U_2I_Z$	$1.28U_2I_Z$
变压器二次侧容量 $P_2$	$1.48U_2I_Z$	$1.81U_2I_Z$
变压器平均计算容量 $P_{VT}$	$1.26U_2I_Z$	$1.43U_2I_Z$

注:  $e$  为硅元件正向压降;  $n$  为硅元件的串联只数;  $k$  为  $U_2/U_1$ 。

**例 14—2** 试设计一单相整流电路。已知负载为电阻性负载,要求输出直流电压  $U_x$  为 12V,输出直流电流  $I_x$  为 0.6A,纹波系数  $\gamma < 0.5\%$ 。

**解** 为了提高变压器利用率并减少脉动,采用单相桥式整流电路。由于对纹波系数要求不高,故可采用简单的  $R$ 、 $C$  滤波(滤波部分的计算见第三节滤波电路及其计算)。

(1) 变压器计算:由表 14—21 可得,变压器二次侧电压和电流分别为

$$U_2 = 0.91U_x = 0.91 \times 12 = 10.9(\text{V})$$

$$I_2 = 1.11I_x = 1.11 \times 0.6 = 0.67(\text{A})$$

变压器总计算容量为

$$P_s = 1.23U_2I_2 = 1.23 \times 10.9 \times 0.67 = 8.9(\text{VA})$$

(2) 整流二极管选择:查表 14—21 可得,通过二极管的平均电流为

$$I_d = 0.5I_x = 0.5 \times 0.6 = 0.3(\text{A})$$

二极管承受的反向峰值电压为

$$U_m = 1.28U_x = 1.28 \times 12 = 15.4(\text{V})$$

查晶体管手册,可选用 2CP33B,其最大整流电流为 500mA,最高反向工作电压为 100V。

## 二、多级倍压整流电路的计算

当整流电流很小(小于 5mA)时,可以采用多级倍压整流电路获得很高的直流电压。

多级倍压整流电路如图 14—8 所示(图中为 5 级)。

理论输出直流电压  $U_x$  为

$$U_x = nU_{2m} = n\sqrt{2}U_2$$

实际上,加上负载后的输出直流电压  $U_x$  约为

$$U_x = nU_2/0.85$$

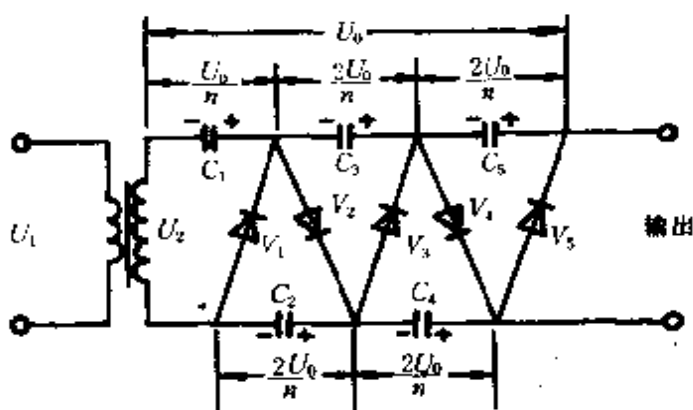


图 14—8 多级倍压整流电路

电容器两端电压约为

$$U_{c1} = U_2/n = U_2/0.85$$

$$U_{c2} = U_{c3} = \dots = U_{cn} = 2U_{c1} = 2U_2/0.85$$

电容器电容量约为

$$C_1 = C_2 = C_3 = \dots = 34I_0(n + 2)/U_2$$

式中： $U_2$ ——变压器二次侧电压有效值(V)；

$n$  —— 倍压级数；

$I_0$ —— 整流电流(mA)。

需注意：当加大负荷(负荷电阻减小)时，输出电压将严重下跌，倍压整流的级数不宜过多，如用于静电喷漆上的九级倍压输出电压可在 60 ~ 120kV 范围内调节(由调节高频振荡器输出的振荡电压来实现)，输出的电能够供给 6 支喷枪同时进行喷漆。

**例 14-3** 已知一个九级倍压整流器， $U_2$  为 7000V， $I_0$  为 1mA，试计算直流最高输出电压，并选择所需电容器。

**解** 直流最高输出电压(有负载时)

$$U_z = nU_2/0.85 = 9 \times 7000/0.85 = 74118$$

$$\approx 75000(\text{V})$$

由于负荷等情况不同,最高输出电压计算值不是很严格。

第一只电容器上两端的电压约为

$$U_{c_1} = U_2 / 0.85 = 7000 / 0.85 \approx 8235(\text{V})$$

其余各电容器上两端的电压约为

$$U_{c_2} = U_{c_3} = \dots = U_{c_9} = 2 \times 8235 = 1647(\text{V})$$

电容器电容量为

$$\begin{aligned} C_1 = C_2 = \dots = C_9 &= 34I_0(n + 2) / U_2 \\ &= 34 \times 1 \times (9 + 2) / 7000 = 0.053(\mu\text{F}) \end{aligned}$$

因此可采用耐压为20kV、电容量为0.05 $\mu\text{F}$ 的高压电容器。

### 三、整流元件串、并联计算

为了避免元件串、并联后整流元件击穿烧毁,必须选用特性相近的同一规格的整流元件,并采用均压保护(串联)和均流保护(并联)。

#### 1. 串联(图 14—9)

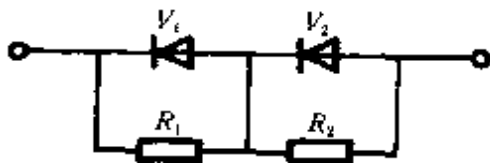


图 14—9 整流元件串联保护

串联元件数

$$n = \frac{U_{2mf}}{0.9U_{KM}}$$

$$\text{均压电阻 } R = \frac{U_{mf}}{K_1 I_{mf}} \times 10^3$$

$$\text{均压电阻功率 } P_R = \frac{K_2}{R_1} \left( \frac{U}{N} \right)^2$$

式中： $U_{zmf}$ ——元件串联后承受总的反向峰值电压(V)；

$U_{RM}$ ——每个硅整流元件额定反向峰值电压(V)；

$U_{m1}$ ——每个硅整流元件反向峰值电压(V)；

$I_{m1}$ ——每个硅整流元件反向漏电流(mA)；

$K_1$ ——系数，取 2 ~ 5；

$K_2$ ——系数，取 0.35 ~ 1；

$U$ ——线路反向峰值电压(V)；

$N$ ——整流元件串联支数。

## 2. 并联(图 14-10)

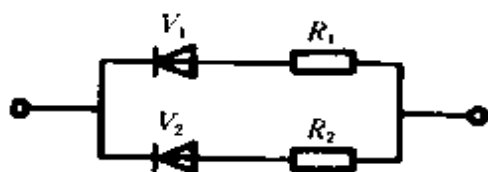


图 14-10 整流元件并联保护

$$\text{并联元件数 } n = \frac{I}{1.26I_F}$$

$$\text{均流电阻 } R = K_1 NU / I$$

$$\text{功率 } P_R = K_2 R \left(\frac{I}{N}\right)^2$$

式中： $I$ ——流过并联元件总的正向电流有效值(A)；

$I_F$ ——每个整流元件的额定正向平均电流(A)；

$K_1$ ——系数，取 3 ~ 4；

$K_2$ ——系数，取 1.5 ~ 2.5；

$N$ ——整流元件并联支路；

$U$ ——整流元件正向压降(V)；

$I$ ——同上。

#### 四、整流元件的保护计算

1. 阻容保护计算(同可控硅元件的阻容保护)
2. 快熔保护计算

$$I_{cr} \leq 0.8I_e$$

式中： $I_{cr}$ ——快熔额定电流(A)；

$I_e$ ——整流元件的额定电流(A)。

### 第三节 滤波电路及其计算

#### 一、常用小功率滤波电路的比较

1. 常用小功率滤波电路的比较和参数(表 14—22)

(1) 负载特性指负载电流变化时输出电压的变化情况。输出电压变化大,负载特性差。对于电容滤波电路,当负载变化很大时,可在输出端并联一个泄放电阻,以改善负载特性。泄放电阻可按  $10R_L$  来选取。 $R_L$  为等效负载电阻:

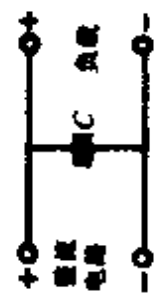

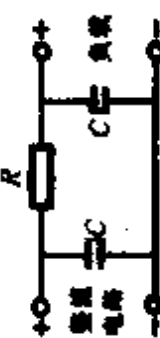
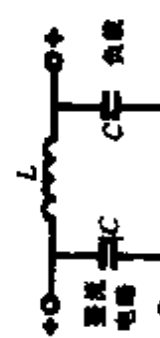
$$R_L = \frac{\text{输出直流电压 } U_2(\text{V})}{\text{负载直流电流 } I_L(\text{A})}$$

(2) 滤波用电解电容的耐压等级不小于  $\sqrt{2}U_2$ 。采用较大的滤波电容时,要加大整流二极管的电流裕度,必要时加限流电阻限制充电电流。

(3) 采用电感滤波,而电感量较大时,为防止断开电源的瞬间感应电动势击穿整流管,所选用的整流管的电压等级应留有一定裕度。

2. 常用小功率电容滤波电路的特性(表 14—23)。

表 14-22 常用小功率滤波电路的比较和参数

名称	电容滤波	Γ型滤波	阻容滤波	π型滤波
电路图				
滤波效果	较差	较好	较好	好
输出电压	高	低	较高	高
输出电流	较小	大	小	较小
负载特性	差	较好	差	差
参数选择 ( $f=50$ Hz)	全波整流 $C = \frac{1.44 \times 10^3}{\gamma R_L}$ 半波整流 $C = \frac{2.88 \times 10^3}{\gamma R_L}$	全波整流 $LC = \frac{1.19}{\gamma}$ 取 $L \geq \frac{2R_L}{942}$	全波整流 $RC^2 = \frac{2.3 \times 10^6}{\gamma R_L}$ 其中 $R$ 一般取数十至数百欧	由于体积、重量都较大,所以在晶体管整流电路中较少应用

注:  $\gamma$  为输出电压纹波系数, 电容  $C$  的单位为  $\mu\text{F}$ 。



表 14—23 常用小功率电容滤波电路的特性

电路形式	输入交流电压 (有效值)	空载直流输出电压 $U_{r0}$	负载直流输出电压 $U_z$	元件最大反向电压峰值 $U_m$	流过元件的平均电流 $I_e$	需用二极管数
半波整流电容滤波	$U_2$	$\sqrt{2} U_2$	$U_2$	$2\sqrt{2} U_2$	$I_z$	1
全波整流电容滤波	$U_2 + U_2$	$\sqrt{2} U_2$	$1.2U_2$	$2\sqrt{2} U_2$	$0.5I_z$	2
桥式整流电容滤波	$U_2$	$\sqrt{2} U_2$	$1.2U_2$	$\sqrt{2} U_2$	$0.5I_z$	4
倍压	$U_2$	$2\sqrt{2} U_2$	$2U_2$	$2\sqrt{2} U_2$	$I_z$	2

## 二、滤波电路计算

### 2. 各种滤波电路的计算

(1) 电感型滤波电路(图 14—11)；

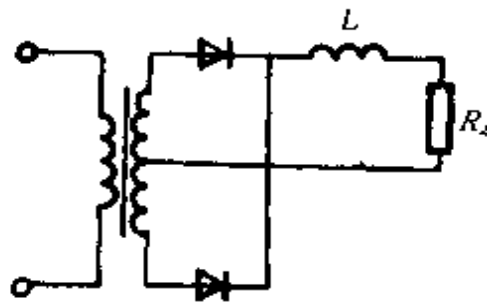


图 14—11 电感型滤波电路

全波整流滤波系数  $Q = \gamma_{未滤} / \gamma_{滤} = 2\omega L / R_z$

半波整流滤波系数  $Q = \omega L / R_z$

如果已知负载电阻及滤波系数,便可由上述公式求得所需的电感值。

例 14—4 有一全波整流电路,未加滤波前,输出电压纹波

系数  $\gamma_{未滤}$  为 66.7%，采用  $L$  型滤波后， $\gamma_{滤}$  为 0.1%，负载电阻  $R_L$  为  $100\Omega$ ，试求滤波系数和电感量。

解 滤波系数  $Q = \gamma_{未滤} / \gamma_{滤} = 0.667 / 0.001 = 667$

$$\text{而 } Q = \frac{2\omega L}{R_L} = \frac{2 \times 2\pi \times 50 L}{100} = 667$$

$$\text{故电感量 } L = \frac{667 \times 100}{100 \times 2\pi} \approx 106(\text{H})$$

(2) 电容型滤波电路(图 14—12)：

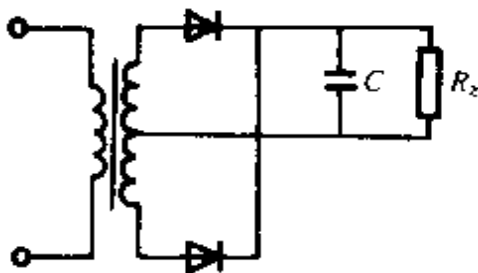


图 14—12 电容型滤波电路

①全波整流：

$$\text{纹波系数 } \gamma_{全波} = \frac{0.072}{fCR_L}$$

$$\text{滤波系数 } Q = 2.2fCR_L$$

②半波整流：

$$\text{纹波系数 } \gamma_{半波} = \frac{0.144}{fCR_L}$$

$$\text{滤波系数 } Q = 1.1fCR_L$$

通常电容取数百到数千  $\mu\text{F}$ ；电容耐压应取变压器次级电压有效值  $U_2$  的  $\sqrt{2}$  倍以上。

电容器容量的一般经验数据见表 14—24。

(3)  $\Gamma$  型滤波电路：

①单节  $\Gamma$  型滤波电路(图 14—13)：

表 14--24 滤波电容与输出电流的关系

输出电流	2A 左右	1A 左右	0.5~1A	0.1~0.5A	100mA 以下	50mA 以下
电容量 $\mu\text{F}$	4000	2000	1000	500	200~500	200

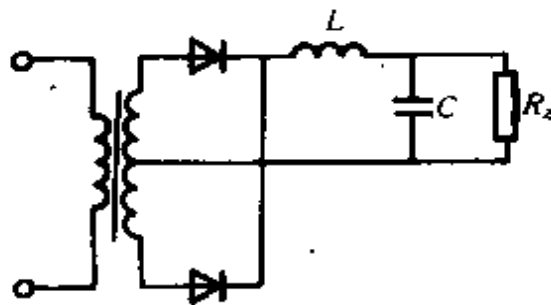


图 14—13 单节  $\Gamma$  型滤波电路

滤波系数  $Q = m^2 \omega^2 LC$

对于半波整流,  $m = 1$ ; 对于全波和桥式整流,  $m = 2$ 。  $\omega = 2\pi f$ ,  $f$  为电源频率。

**例 14—5** 有一全波整流电路, 输出电压  $U_2$  为 24V, 负载电流  $I_2$  为 100mA, 要求输出电压纹波系数  $\gamma_{\text{滤}} \leq 0.001$ , 采用  $\Gamma$  型滤波电路, 试求滤波系数和电感、电容量。

**解** 由于  $\gamma_{\text{全波(未滤)}} = 0.667$ ,  $S_{\text{滤}} = 0.001$

$$\text{故滤波系数 } Q = \frac{\gamma_{\text{未滤}}}{\gamma_{\text{滤}}} = \frac{0.667}{0.001} = 667$$

$$\text{又 } Q = m^2 \omega^2 LC = 2^2 \times 314^2 LC = 667$$

$$\text{得 } LC = 1.7 \times 10^{-3}$$

晶体管电路的电源电压较低而电流常为几百 mA 以上, 故电感量一般取 1~10H, 而电容量一般取数百  $\mu\text{F}$  到数千  $\mu\text{F}$ 。如果电感  $L$  取 10H、100mA, 则电容量为

$$C = \frac{1.7 \times 10^{-3}}{L} = \frac{1.7 \times 10^{-3}}{10}$$

$$= 1.7 \times 10^{-4} \text{F} = 170 (\mu\text{F})$$

电容器耐压可取 30V。

②多节  $\Gamma$  型滤波电路(图 14-14):

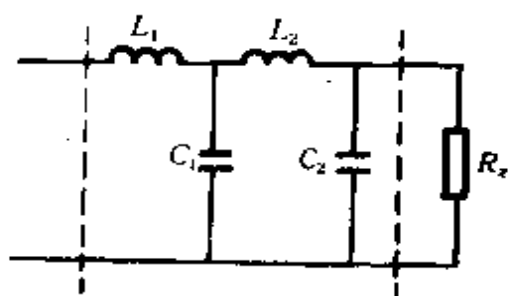


图 14-14 两节  $\Gamma$  型滤波电路

两节  $\Gamma$  型滤波电路的滤波系数为

$$Q = Q_1 Q_2$$

式中:  $Q_1$ 、 $Q_2$ ——第一节和第二节滤波电路的滤波系数。

对全波整流,有

$$\gamma_{\text{波}} = \frac{0.67}{4\omega^2 L_1 C_1} \times \frac{1}{4\omega^2 L_2 C_2}$$

一般取  $L_1 = L_2 = L$ ,  $C_1 = C_2 = C$ , 现仍以  $S_{\text{波}}$  为 0.001 的要求来设计, 则有  $\gamma_{\text{波}} = 0.67 / (16\omega^4 L^2 C^2) = 0.001$ , 得  $LC = 6.55 \times 10^{-5}$ , 若取  $L = 2\text{H}$ 、 $100\text{mA}$ , 则

$$C = 6.55 \times 10^{-5} / L = 32.8 (\mu\text{F})$$

(4) $\pi$  型滤波电路(图 14-15):

由  $C$  型滤波电路和  $\Gamma$  型滤波电路串联组成, 其滤波系数为

$$Q = Q_1 Q_2$$

式中:  $Q_1$ 、 $Q_2$ ——电容滤波电路和  $\Gamma$  型滤波电路的滤波系数。

一般取  $C_1 = C_2 = C$ 。

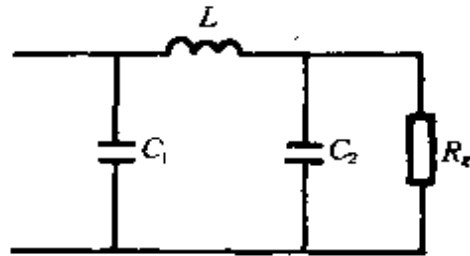


图 14-15  $\pi$  型滤波电路

## 2. 大功率整流电路中滤波电抗器电感量的估算

在大功率整流电路中,为了使整流电流连续并减小电流脉动,往往在负载回路中串入电抗器。滤波电抗器电感量的估算如下:

(1) 维持电流连续的临界电感量:

$$L_{lj} = K_{lj} \frac{U_2}{I_{r \cdot \min}} - (L_d + L_b)$$

式中:  $L_{lj}$ ——临界电感量(mH);

$K_{lj}$ ——系数,见表 14-25;

$U_2$ ——整流变压器二次侧相电压(V);

$I_{r \cdot \min}$ ——最小负荷电流(A);

$L_d$ ——负荷(如电动机)的电感量(mH);

$L_b$ ——整流变压器的每相电感量(mH)。

(2) 保证电流脉动不超过要求值的电感量:

$$L_{md} = K_{md} \frac{U_2}{S I_{rr}} - (L_d + L_b)$$

式中:  $K_{md}$ ——系数,见表 14-25;

$S$ ——电流最大允许脉动系数,100kW 以下的电动机,当

为三相半波整流时,取 0.12;三相桥式整流时,取 0.10;

$I_{cr}$ ——额定负荷电流(A);

其它符号同前。

### 三、电动机和变压器电感量的估算

#### 1. 电动机电感量

$$L_d = K_d \frac{U_e}{2pn_e I_e} \times 10^3$$

式中: $L_d$ ——电动机电感量(mH);

$K_d$ ——系数,与电动机种类有关。一般无补偿电动机取 8~12;快速无补偿电动机取 6~8;有补偿电动机取 5~6;

$U_e$ ——电动机额定电压(V);

$p$ ——电动机极对数;

$n_e$ ——电动机额定转速(r/min);

$I_e$ ——电动机额定电流(A)。

#### 2. 变压器每相电感量

$$L_b = K_b \frac{U_d \% U_2}{100 I_e}$$

式中: $L_b$ ——变压器每相电感量(mH);

$K_b$ ——系数,见表 14—25;

$U_d \%$ ——变压器阻抗电压百分数,一般变压器取 4~5;整流变压器取 10 左右;

其它符号同前。

表 14—25 计算滤波电抗器系数表

输出端形式	系数	整流电路形式										
		单相半波	单相全波	单相半控桥	用一个可控硅的单相桥	单相全控桥	三相半波	三相半控桥	三相全控桥	六相半波	双反星形带平衡电抗器	
输出端有续流二极管	$K_{I_d}$	2.7	1.67	1.67	1.37	1.67	1.03	1.78	0.655	0.378	0.325	
	$K_{m_d}$	5.05	2.8	2.8	2.8	2.8	1.66	2.88	0.925	0.56	0.338	
	$K_b$	6.37	6.37	3.18	3.18	3.18	6.75	3.9	3.9	5.51	7.8	
输出端无续流二极管	$K_{I_d}$	—	—	1.67	—	2.86	1.46	1.78	0.695	0.401	0.348	
	$K_{m_d}$	—	—	2.8	—	4.5	2.25	2.88	1.05	0.605	0.323	
	$K_b$	—	—	3.18	—	3.18	6.75	3.9	3.9	5.51	7.8	

## 第四节 晶体管基础知识

### 一、常用晶体管的基本参数

#### 1. 二极管基本参数

(1) 平均整流电流  $I_0$ : 是在有效负载的半波整流电路中, 在一个周期内通过二极管的电流平均值(直流分量)。

(2) 最大允许整流电流  $I_{0M}$ : 在有效负载的半波整流电路中, 二极管参数的变化不超过规定允许值时, 二极管所能通过的最大整流电路。

(3) 反向电流  $I_R$ : 是在给定的反向偏压下, 通过二极管的直流电流值。

(4) 整流电压  $U_0$ : 是在半波整流电路中, 在一个周期内二极

管有效负载上的电压平均值(直流分量)。

(5)额定正向平均电流  $I_F$  (即最大正向电流  $I_{FM}$ ):正向电流过大,将烧毁 PN 结,因此每个二极管都有一个额定电流,工作电流只能在额定值以下才行。

(6)正向电压降  $U_F$ :是最大整流电流时,二极管两端的电压降。锗管约  $0.2\sim 0.4V$ ,硅管约  $0.6\sim 0.8V$ 。

(7)额定反向峰值电压  $U_{RM}$ :是二极管参数的变化不超过规定允许值时所能承受的最大反向电压峰值。它等于反向最高测试电压的一半。反向最高测试电压规定为反向漏电流急速增加反向特性曲线开始弯曲时的电压。

(8)二极管电容  $C$ :是二极管加上反向电压时,引出线间的电容。

## 2. 晶体管(三极管)基本参数

(1)集电极反向饱和电流  $I_{cbo}$ :是发射极开路时,基极和集电极之间加以规定的反向电压时的集电极电流。

(2)发射极反向饱和电流  $I_{ebo}$ :是集电极开路时,基极和发射极之间加以规定的反向电压时的发射极电流。

(3)集电极穿透电流  $I_{ceo}$ :是基极开路时,集电极和发射极之间加以规定的反向电压时的集电极电流。

(4)共发射极电流放大系数  $h_{fe}(\beta)$ :是在共发射极电路中,集电极电流和基极电流的变化量之比。

(5)共基极电流放大系数  $h_{fb}(\alpha)$ :是在共基极电路中,集电极电流和发射极电流的变化量之比。

(6)共发射极截止频率  $f_{\beta}$ :是  $\beta$  下降到低频的  $0.707$  倍时所对应的频率。

(7)共基极截止频率  $f_{\alpha}$ :是  $\alpha$  下降到低频的  $0.707$  倍时所对应的频率。

(8)特征频率  $f_T$ :是  $\beta$  下降到  $1$  时所对应的频率。当  $f \geq f_T$



时,晶体管便失去电流放大能力。

(9)最高振荡频率  $f_M$ :是给定条件下,晶体管能维持振荡的最高频率。它表示晶体管功率增益下降到1时所对应的频率。

(10)集电极-基极反向击穿电压  $BV_{CBO}$ :是发射极开路时,集电结的最大允许反向电压。

(11)集电极-发射极反向击穿电压  $BV_{CEO}$ :是基极开路时,集电极和发射极之间的最大允许电压。

(12)发射极-基极反向击穿电压  $BV_{EB0}$ :是发射极开路时,发射结最大允许反向电压。

(13)基极-发射极间并联电阻时的集电极-发射极反向击穿电压  $BV_{CER}$ :是基极-发射极间并联电阻  $R_B$ 时,集电极与发射极之间最大允许电压。

(14)集电极最大允许电流  $I_{CM}$ :是晶体管参数变化不超过规定允许值时,集电极的最大电流。

(15)集电极最大允许耗散功率  $P_{CM}$ :是保证晶体管参数变化在规定允许范围之内集电极最大消耗功率。

(16)最高允许结温  $T_{jm}$ :是保证晶体管参数变化不超过规定允许范围的PN结最高温度。

(17)基极电阻  $r_{be}$ :是输入电路交流开路时,发射极-基极间的电压变化与集电极电流变化之比值。

(18)热阻  $R_T$ :是集电极每耗散1W(大功率管)或1mW(小功率管)功率引起管子PN结结温升高的度数。

### 3. 稳压管和单结晶体管的基本参数

#### (1)稳压管:

①稳定电压  $V_w$ :是稳定范围内,稳压二极管上的电压。

②稳定电流  $I_w$ :是稳压范围内,稳压二极管的电流。

③动态电阻  $R_w$ :是稳定状态下,稳压二极管上的电压微变量与通过稳压二极管的电流微变量之比值。

④最大稳定电流  $I_{WM}$ :是能保证稳压二极管稳定电压(并不致损坏)的电流。

⑤最大允许耗散功率  $P_M$ :是稳压二极管参数变化不超过规定允许值时耗散的最大功率。

(2)单结晶体管:

①基极电阻  $R_{bb}$ :是发射极开路状态下基极 1 和基极 2 之间的电阻。基极电阻随温度的增加而增大。

②分压比  $\eta$ :是发射极和基极 1 之间的电压与基极 2 和基极 1 之间的电压之比,一般为 0.3~0.8。

③发射极与基极 1 间反向电压  $V_{m1}$ :是基极 2 开路时,在额定的反向电流下基极 1 与发射极之间的反向耐压。

④发射极与基极 2 间反向电压  $V_{m2}$ :是基极 1 开路时,在额定的反向电流下,基极 2 与发射极之间的反向耐压。

⑤反向电流  $I_{co}$ :是基极 1 开路时,在额定的反向电压  $V_{cb2}$  下的反向电流。

⑥峰点电流  $I_{pc}$ :是发射极电压最大值时的发射极电流。该电流表示了使管子工作或使振荡电路工作时所需的最小电流。 $I_{pc}$ 与基极电压成反比,并随温度增高而减小。

#### 4. 光电元件基本参数

(1)光谱响应曲线:用单位辐射通量的不同波长的光分别照射光电元件,在光电元件上产生的饱和电流的大小不同,饱和电流相对值与光波波长的关系曲线称为光谱响应曲线。

(2)光谱响应峰值  $\lambda_m$ :即峰值波长,是光谱响应曲线峰值所对应的波长即单位辐射通量的光照射元件中最大饱和电流所对应的光波波长。

(3)光谱范围:是光谱响应曲线所占据的波长范围。

(4)最大工作电压  $V_M$ :是测试条件下,光电元件最大能承受的工作电压。

(5)暗电流  $I_D$ :是光敏元件没有光照时流过的电流。





(6)光电流  $I_{PH}$ :是光敏元件在光照射下流过的电流。

(7)响应时间  $T_r$ :即时间常数,是光敏元件自停止光照起到电流下降到光照时的 63% 所需要的时间,此时间越短表示光敏元件惰性越小。

(8)光调截止频率:光敏晶体管的工作频率为调制光频,晶体管增益与调制光频的关系曲线为光敏晶体管频率特性曲线,此特性曲线下降到 0.707 处所对应的调制光频为光调制截止频率。

常用光电元件的特点见表 14—26。

表 14—26 常用光电元件的特点

类型	光敏二极管	光敏三极管	光 电 池	光敏电阻(光导管)
符 号				
说 明 与 特 点	说明:无光照时有一反向饱和电流称为暗电流。有光照时反向饱和电流增加,称为光电流,有光照时反向电阻可以降低到几百欧 特点:体积小,频率特性好,弱光下灵敏度低	说明,光照电流相当于三极管的基极电流,因此集电极电流是其 $\beta$ 倍,故光电三极管比光电二极管有更高的灵敏度 特点:与光敏二极管相比,其电流灵敏度大	说明:当 PN 结受光照时,在 PN 结两端出现电动势,P 区为正极,N 区为负极 特点:体积小,不需外加电源;频率特性差,弱光下灵敏度低	说明:当光照射到光敏层时,阻值变化,光线愈强,阻值愈小 特点:体积小,可工作在可见光至红外线区。弱光下工作其灵敏度比所列元件高很多,频率特性差,工作频率在 100Hz 时,衰减较大,光电特性为非线性,同时受温度影响大

## 二、晶体管计算

### 1. 晶体管三种工作状态的特点和条件

晶体管作为放大用应工作在晶体管特性曲线的放大区；晶体管作为开关用应工作在其特性曲线的饱和区和截止区。例如，某晶体管的放大区、饱和区和截止区如图 14—16 所示。

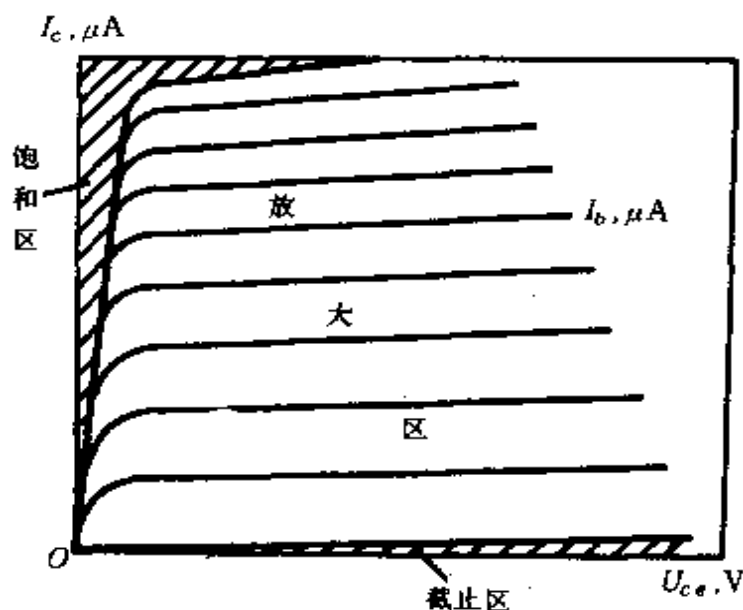


图 14—16 晶体管的放大区、饱和区和截止区

#### (1) 截止状态

①条件：对 PNP 型管， $U_b \geq U_c$ ；对 NPN 型管， $U_b \leq U_c$ 。截止时的特点是两个 PN 结均为反向偏置。

②特点： $I_b \approx 0$ ， $I_c \approx 0$ ， $U_{ce} \approx E_c$  ( $E_c$  为电源电压)。

为了使晶体管更好地截止，可采取下列措施：

A. 采用  $I_{c0}$  较小的管子。

B. 在基极和发射极间加反向偏压。此时截止的条件为：对于 PNP 型管， $U_{be} \geq 0$ ；对于 NPN 型管， $U_{be} \leq 0$ 。

#### (2) 放大状态

①条件：发射结加正向电压； $U_b > U_c$ ；集电结反向， $U_c > U_b$ 。

②特点： $\Delta I_c = \beta \Delta I_b$  满足放大规律， $I_c$  与  $R_c$ 、 $E_c$  基本上无关。

(3)饱和(导通)状态

①条件： $I_b \geq \frac{I_{CM}}{\beta}$  (如果  $I_{CM} = \frac{E_c}{R_c}$ ，则  $I_b > \frac{E_c}{\beta R_c}$ )。

②特点：发射结、集电结都处于正向， $I_b$  增加， $I_c$  不再增加， $I_c = E_c/R_c$  由  $R_c$ 、 $E_c$  决定，饱和压降  $U_{ces} \approx 0$ ，这时可以把晶体管的三个电极看作是接通的。

2. 晶体管三种工作状态和数量关系见表 14—27。

**例 14—6** 如图 14—17 电路，已知电源电压  $E_c$  为 12V，负载电阻  $R_c$  为 1.2k $\Omega$ ，基极电阻  $R_b$  为 8k $\Omega$ ，电流放大倍数  $\beta$  为 70，试验算当输入电压从 -3V 变为 +3V 时，晶体管是否能从截止状态转为饱和状态？

**解** 当  $U_{in} = -3V$  时， $I_b = 0$ ， $I_c = 0$ ， $U_c = E_c - I_c R_c = 12V$ ，管子截止。

当  $U_{in} = +3V$  时， $I_b = (U_{in} - U_{be})/R_b = (3 - 0.7)/8 = 0.29$  (mA)。

如果晶体管导通，最大集电极电流  $I_{CM} = E_c/R_c = 12/1.2 = 10$  (mA)，临界饱和基极电流  $I_b = I_{CM}/\beta = 10/70 = 0.14$  (mA)。因为  $I_b > I_{CM}/\beta$ ，满足饱和条件，管子进入饱和状态。

如果把  $R_b$  改成 20k $\Omega$ ， $I_b = (3 - 0.7)/20 = 0.115$  (mA)，这时  $I_b < I_{CM}/\beta$ ，晶体管工作在放大状态。如果忽略  $I_{ce0}$ ， $I_c \approx \beta I_b = 70 \times 0.115 = 8.05$  (mA)， $U_c = E_c - I_c R_c = 12 - 8.05 \times 1.2 = 2.34$  (V)。

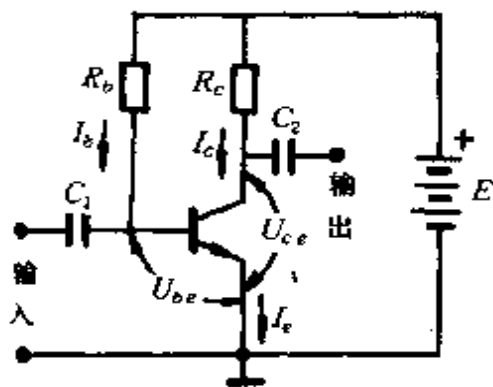


图 14—17 单管放大器电路图

表 14-27 晶体管三种工作状态和数量关系

工作状态	截止状态	放大状态	饱和状态
PNP 型			
NPN 型			

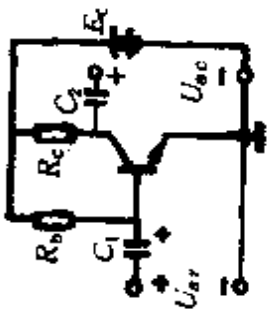
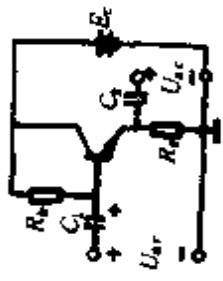
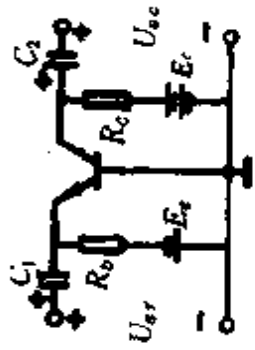
(续表)

工作状态	截止状态	放大状态	饱和状态
	$I_b \leq 0, I_b$ 为负值时,表示实际方向与图中所示相反	$I_b > 0$ , 其实际方向如图所示	$I_b > \frac{E_c}{\beta R_c}$ , 为使晶体管处于深度饱和工作区, $I_b = (2 \sim 3) E_c / \beta R_c$
参数范围	锗管 $U_{be}$ 约 $+0.3V \sim -0.1V$ ; 硅管约 $-0.3V \sim +0.5V$	锗管 $U_{be}$ 约从 $-0.1V \sim -0.2V$ ; 硅管约从 $+0.5V \sim +0.7V$	锗管 $U_{be}$ 比 $-0.2V$ 更负; 硅管大于 $+0.7V$
	$I_c \leq I_{c0}$	$I_c = \beta I_b + I_{c0}$	$I_c = E_c / R_c$
工作状态的特点	$U_{ce} \approx E_c$	$U_{ce} \approx E_c - I_c R_c$	(管子饱和压降) $U_{ce} \approx 0.2 \sim 0.3V$
	当 $I_b \leq 0$ 时, 集电极电流很小, 晶体管相应于截止, 电源电压 $E_c$ 几乎全部加在管子两端	$I_b$ 从 0 逐渐增大, 集电极电流 $I_c$ 也按一定比例增加。很小的 $I_b$ 变化引起很大的 $I_c$ 变化, 晶体管起放大作用	晶体管饱和时, 管子两端压降很小, 电源电压 $E_c$ 几乎全部加在集电极负载电阻 $R_c$ 两端; $\beta$ 越大, 控制越灵敏



2. 晶体管三种接法的比较(表 14—28)。

表 14—28 晶体管三种接法的比较

名称	共发射极电路	共集电极电路(射极输出器)	共基极电路
电路图			
输出与输入电压的相位	反相	同相	同相
输入电阻	中(几百Ω~几kΩ)	大(几+kΩ以上)	小(几Ω~几十Ω)
输出电阻	中(几kΩ~几十kΩ)	小(几Ω~几十Ω)	大(几+kΩ~几百kΩ)
电压放大倍数	大	小(小于1并接近于1)	大
电流放大倍数	大(β为几十)	大((1+β)为几十)	小(α小于1并接近于1)
功率放大倍数	大(约30~40dB)	小(约10dB)	中(约15~20dB)
频率特性	高频差	好	好
稳定性	差	较好	较好
失真情况	较大	较小	较小
对电源要求	只需一个电源	只需一个电源	需两个独立的电源
应用	多级放大器的中间级, 低频放大	输入级, 输出级或作阻抗匹配用	高频或宽频带电路及恒流源电路

注: PNP 型三种接法的电源极性相反。



### 3. 晶体管集电极反向截止电流 $I_{cb0}$ 计算

手册给出的晶体管集电极反向截止电流  $I_{cb0}$  一般为室温  $25^{\circ}\text{C}$  时测量的数据,当温度上升时,  $I_{cb0}$  会急剧增加。锗管每升高  $12^{\circ}\text{C}$  约增加一倍,硅管每升高  $8^{\circ}\text{C}$  约增加一倍。某温度下的  $I_{cb0}$  可按下列公式计算:

$$\text{对于锗管 } I_{cb0} = (I_{cb0})_{25} \times 2^{\frac{t-25}{12}}$$

$$\text{对于硅管 } I_{cb0} = (I_{cb0})_{25} \times 2^{\frac{t-25}{8}}$$

式中:  $(I_{cb0})_{25}$  ——  $25^{\circ}\text{C}$  时集电极反向截止电流;

$t$  —— 管子周围的空气温度( $^{\circ}\text{C}$ )。

### 4. 晶体管集电极最大允许耗散功率 $P_{CM}$ 计算

手册给出的晶体管集电极最大允许耗散功率  $P_{CM}$  一般为室温  $25^{\circ}\text{C}$  时测量的数据。当温度上升时,  $P_{CM}$  会降低。某一温度下的  $P_{CM}$  可按下列公式计算:

$$P_{CM} = (P_{CM})_{25} \frac{T_{jM} - t}{T_{jM} - 25}$$

式中:  $(P_{CM})_{25}$  ——  $25^{\circ}\text{C}$  时允许耗散功率;

$T_{jM}$  —— 最高允许结温( $^{\circ}\text{C}$ );

$t$  —— 管子周围的空气温度( $^{\circ}\text{C}$ )。

## 三、晶体管散热计算

晶体管集电极耗散功率与各热阻之间的关系可由下列公式表达:

$$T_j - t \approx P_c (R_{Tj} + R_{Tc} + R_{Tf})$$

式中  $T_j$  —— 管子允许结温( $^{\circ}\text{C}$ ),一般手册给出的最大允许结温  $T_{jM}$ , 不等于  $T_j$ , 但计算时可取  $T_j = T_{jM}$ ;

$t$  —— 管子周围的空气温度( $^{\circ}\text{C}$ );

$R_{Tj}$  —— 管子本身的热阻( $^{\circ}\text{C}/\text{W}$ ),手册给出的  $R_T$  是指这个数值;

$R_{Tc}$  —— 管子与散热片之间的热阻,与两者间是否垫绝缘

层及两者间的接触面积和紧固程度有关, 约在  $0.1 \sim 3^{\circ}\text{C}/\text{W}$  之间, 如  $0.05\text{mm}$  厚的云母片的热阻约为  $1.5^{\circ}\text{C}/\text{W}$ ;

$R_{Tc}$ ——散热片的热阻 ( $^{\circ}\text{C}/\text{W}$ ), 可按表 14—29 作粗略估算。

表 14—29 散热片面积和热阻的估算

散热片面积 ( $\text{cm}^2$ )	100	200	300	400	500	600 以上
$R_{Tc} (^{\circ}\text{C}/\text{W})$	4.5~6	3.5~4.5	3~3.5	2.5~3	2~2.5	1.5~2.5

散热片较厚 ( $3\text{mm}$  以上), 垂直放置时取下限值。散热片薄 ( $1.5\text{mm}$  以下), 水平放置时取上限值。

利用上述公式可以计算在一定的温升和散热片面积下功率管的允许集电极耗散功率, 也可以在给定耗散功率的情况下求散热片的面积。

图 14--18 为铝平板散热器在不同情况下的热阻。

例 14—7 输出为  $50\text{W}$  的功率放大器, 采用两只 3AD18C 管子, 设环境温度最高为  $40^{\circ}\text{C}$ , 试选用多大的铝散热片?

解 由手册查得 3AD18C 的有关参数为: 允许结温  $T_j = 90^{\circ}\text{C}$ ,  $R_{Tj} = 1^{\circ}\text{C}/\text{W}$ 。

每个管子在额定输出功率  $P_o$  下的功率损耗  $P_c$  为

$$P_c = 0.2P_{sc} = 0.2 \frac{P_o}{\eta} = 0.2 \times \frac{50}{0.8} = 12.5(\text{W})$$

式中  $\eta$ ——变压器效率, 取  $0.8$ 。

所需要的总热阻为

$$R_{Tz} = \frac{T_j - t}{P_c} = \frac{90 - 40}{12.5} = 4(^{\circ}\text{C}/\text{W})$$

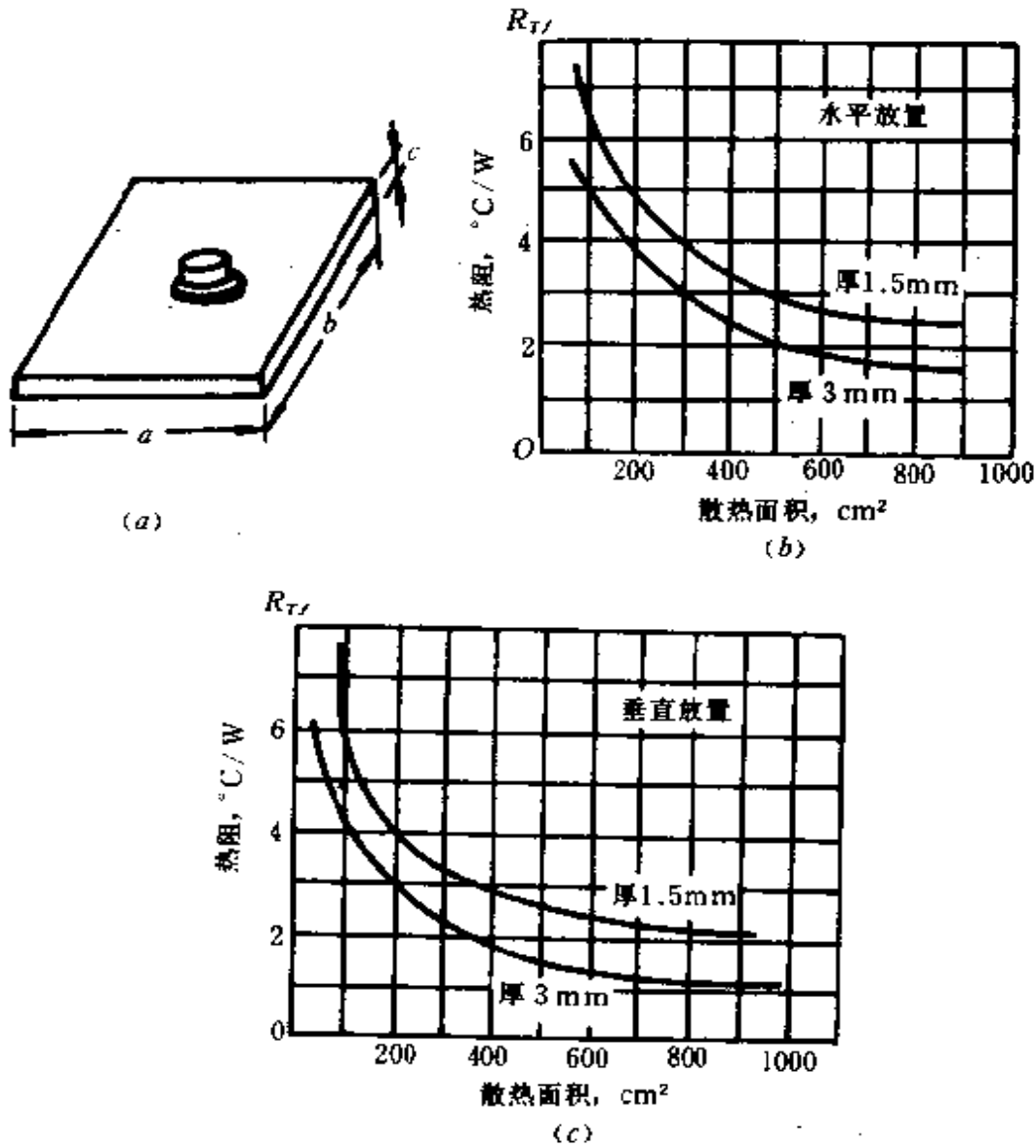


图 14—18 铝平板散热器的热阻

(a) 铝平板散热器 (b) 铝平板散热器在水平放置情况下的热阻 (c) 铝平板散热器在垂直放置情况下的热阻

散热片的热阻为

$$R_{Tf} = R_{Tz} + R_{Tj} + R_{Tc} = 4 + 1 + 0.5 = 2.5 (\text{°C/W})$$

式中： $R_{Tj}$ ——管子本身的热阻，取  $1\text{°C/W}$ ；

$R_{Tc}$ ——管壳与散热片之间的热阻,取  $0.5^{\circ}\text{C}/\text{W}$ 。

由图 14—7(b)可知采用 3mm 厚散热面积为  $400\text{cm}^2$  的铝散热板(垂直放置), $R_{Tf}=1.9^{\circ}\text{C}/\text{W}$ ,可满足要求。

### 第五节 晶体管电路及其计算

#### 一、稳压电路的计算

##### 1. 最简单的稳压电路(图 14—19)

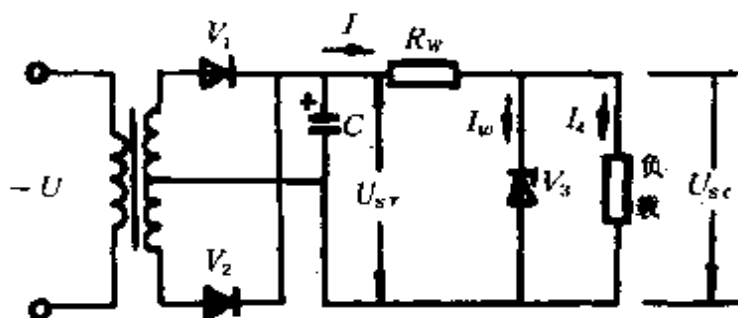


图 14—19 硅稳压管稳压电路

(1)稳压管选择:

稳定电压  $V_w=U_{sc}$

稳压管工作电流  $I_w=I_z$  或取  $I_{wM} \geq (2 \sim 3)I_z$

式中: $U_{sc}$ ——输出电压(即负载上的电压)(V);

$I_z$ ——负载电流(A);

$I_{wM}$ ——稳压管最大稳定电流(A),可查手册或按下式计算:

$$I_{wM} = P_M / V_w;$$

$P_M$ ——稳压管最大耗散功率(W)。

(2)限流电阻估算:

$$R_w = \frac{U_{sr} - U_{sc}}{I_{w1} + I_z} = \frac{U_{sr} - U_{sc}}{I}$$

式中： $R_w$ ——限流电阻( $\Omega$ )；

$U_{sr}$ ——输入电压(V)；

$I_{w1}$ ——实际流过稳压管的电流(A)，可取其略大于  
 $I_z$ ；

$I$ ——流过限流电阻的电流(A)。

限流电阻的功率  $P_R \geq (2 \sim 4)I^2R_w$

(3) 校验：初定了电路参数后，再校验一下两种极端情况：

①在  $U_{sr}$  最大 ( $U_{sr \cdot \max}$ ) 而负载开路时，流过稳压管的电流不超过  $I_{wM}$ ，以免烧坏稳压管。即

$$\frac{U_{sr \cdot \max} - U_{sc}}{R_w} \leq I_{wM}$$

②在  $U_{sr}$  最小 ( $U_{sr \cdot \min}$ ) 而负载又最大时，尚能起稳压作用。即

$$U_{sr \cdot \min} - (I_w + I_{z \cdot \max})R_w \geq V_w$$

否则稳压管不进入击穿区，不起稳压作用。

**例 14—8** 如图 14—19 电路，已知  $U_{sc}$  为 12V， $R_z$  为 380 $\Omega$ ，求稳压电路元件参数。

**解** 取  $V_w = U_{sc} = 12V$

负载电流  $I_z = U_{sc}/R_z = 12/380 = 0.0316A = 31.6(mA)$

查手册选稳压管 2CW21H，其参数为

$$V_w = 11.5 \sim 14V, I_w = 30mA, P_M = 1W$$

$$I_{wM} = P_M/V_w = 1/12 = 0.083A = 83(mA)$$

输入电压  $U_{sr} = (2 \sim 3)U_w = 30(V)$

取  $I_{w1} = 64mA > I_w$ ，则限流电阻为

$$R_w = \frac{U_s - U_z}{I_{w1} + I_z} = \frac{30 - 12}{64 + 31.6} = 0.188(\text{k}\Omega) \approx 190\Omega$$

2. 稳压电路温度补偿计算

(1) 采用具有正温度系数的电阻补偿:

① 当稳压管具有正温度系数时,可采用图 14—20 的电路。

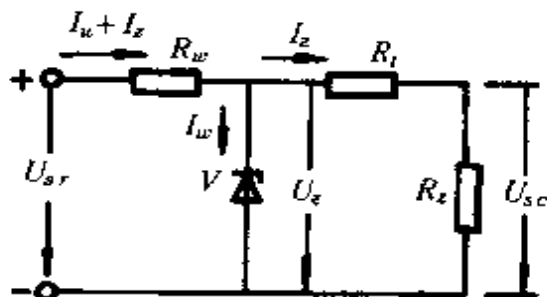


图 14—20 采用具有正温度系数的硅稳压管的温度补偿电路

补偿电阻为

$$R_t = \frac{V_w \alpha_{VWT}}{I_z \alpha_t}$$

式中:  $R_t$ ——补偿电阻( $\Omega$ );

$\alpha_{VWT}$ ——电压温度系数  $1/^\circ\text{C}$ ;

$\alpha_t$ ——补偿电阻的温度系数  $1/^\circ\text{C}$ ;

其它符号同前。

**例 14—9** 如图 14—20 电路,稳压管采用 2CW18,补偿电阻采用铜电阻, $\alpha_t$  为  $(4.25 \times 10^{-3})1/^\circ\text{C}$ ,负载电流  $I_z$  为 8mA,试计算补偿电阻值。

**解** 查手册得 2CW18 的稳定电压  $V_w = 11\text{V}$ ,电压温度系数  $\alpha_{VWT} = (0.095\%)/^\circ\text{C}$ ,故补偿电阻值为

$$R_t = \frac{11 \times 0.095 \times 10^{-2}}{8 \times 10^{-3} \times 4.25 \times 10^{-3}} = 307(\Omega)$$

实际上,为了得到较好的温度补偿效果,还需进行温度试验,对  $R_i$  作调整。

②当稳压管具有负温度系数时,可采用图 14--21 的电路。

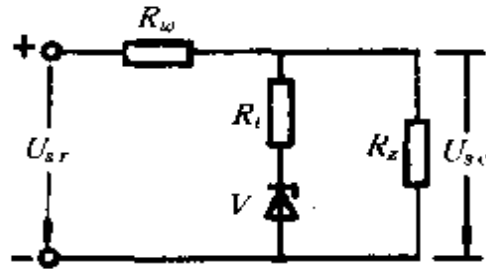


图 14—21 采用具有负温度系数的硅稳压管的温度补偿电路

(2)采用稳压管或二极管补偿:当稳压管具有正温度系数时,可采用具有负温度系数的稳压管或正向工作的二极管与之互补,其电路如图 14--22 所示。

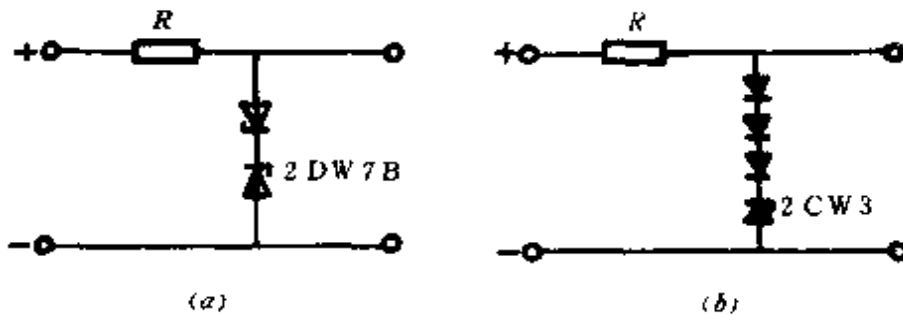


图 14—22 采用稳压管或二极管作温度补偿的电路

(a)采用稳压管自补偿 (b)采用正向二极管补偿

图 14—22(b)中配接的二极管数量计算举例如下。

2CW3 的稳定电压  $V_w = 10V$ , 其电压温度系数  $\alpha_{VWT} = (0.09\%)/^\circ C$ , 则温度变化  $1^\circ C$  稳定电压将变化  $\Delta V_w = 10 \times 0.09 \times 10^{-2} = 9(mV)$ 。正向二极管的电压温度系数为  $\alpha_{VVT} = -3mV/^\circ C$ , 所以串联二极管只数为

$$n = \frac{\Delta V_w}{|\alpha_{VVT}|} = \frac{9}{3} = 3(\text{只})。$$

注意,自补稳压管,如 2DW7A、2DW7B、2DW7C 在其内部已装入补偿二极管。

3. 带有直流放大环节的稳压电源计算(图 14—23)

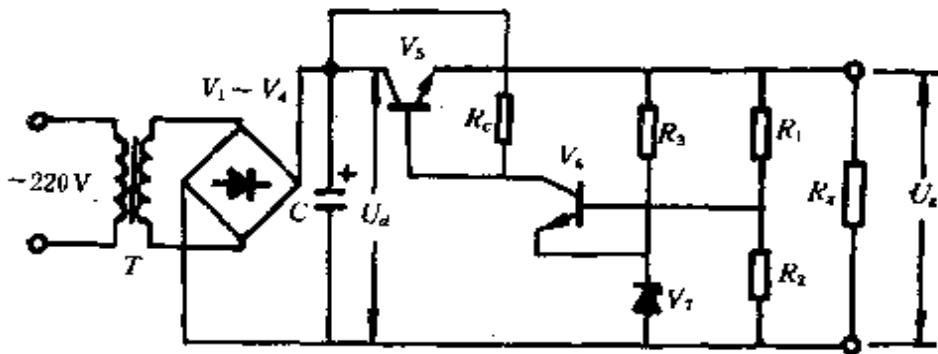


图 14—23 带有直流放大环节的稳压电源

(1) 电路元件参数的选择

① 晶体管的选择： $V_5$  起调整作用，必须工作在放大区，需要一个合适的管压降  $U_{ce1} = U_a - U_o = 3 \sim 8V$ ，此电压过小，管子易饱和；过大，管耗增大，不仅要选用更大功率的管子，还增加电耗。

调整管的  $\beta$  应选得大些，由于一般大功率管的  $\beta$  较低，故常用复合管作调整管(图 14—24)。

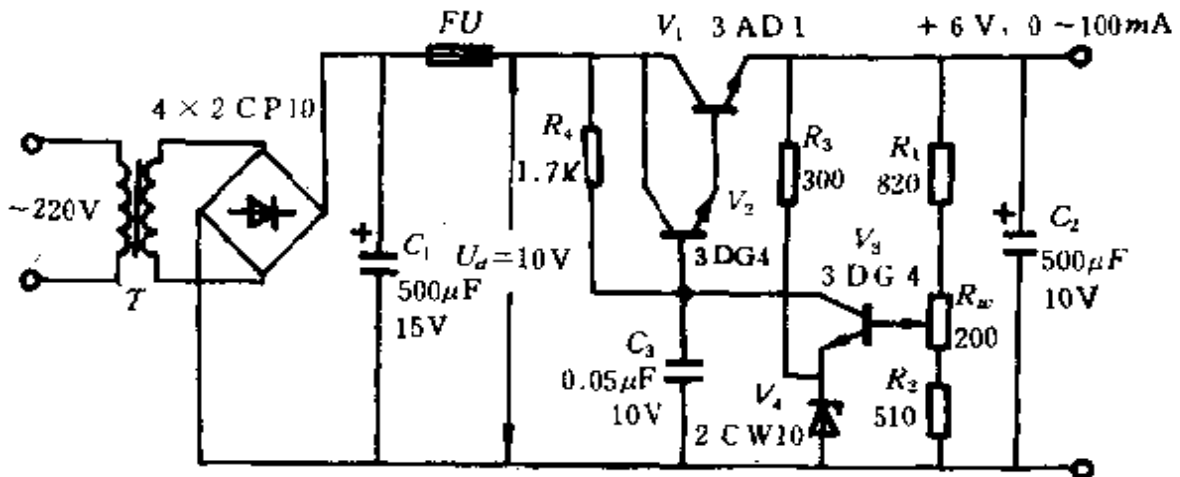


图 14—24 采用复合管的稳压电源



$V_6$  应选用  $\beta$  较大的管子,  $\beta$  越大稳压越稳定。

②分压电阻  $R_1$ 、 $R_2$  的选择: 当  $I_1 \gg I_{b2}$  时, 取样电压  $U_{s2} = U_z \frac{R_2}{R_1 + R_2}$ 。要使输出电压变化的大部分能通过  $V_6$  放大, 以控制调整管,  $R_2 / (R_1 + R_2)$  的比值不能太小, 一般取  $0.5 \sim 0.8$ ;  $R_1 + R_2$  的阻值也不能太大, 否则不能满足  $I_1 \gg I_{b2}$  的要求。

③限流电阻  $R_3$  的选择:

$$R_3 = (U_z - V_w) / I_w$$

式中:  $V_w$ 、 $I_w$ ——稳压管  $V_7$  的稳定电压和稳定电流(V、A), 可由手册查得。

(2)图 14—24 中各元件及其作用:  $V_1$  采用大或中功率管;  $V_2$  采用中或小功率管子。总放大倍数为  $\beta = \beta_1 \beta_2$ 。电位器  $R_w$  起保证  $U_z$  正确地达到所需电压的作用。电容  $C_2$  防止脉冲负载电流引起输出电压的波动, 也可减小输出端的纹波电压。电容  $C_3$  防止干扰信号影响调整管的工作, 并可抑制电源内部可能产生的高频自激。

## 二、交流放大电路静态工作点的选择和直流负载线的确定

### 1. 放大电路静态工作点的选择

放大电路的静态工作点是指在没有输入信号时晶体管的工作状态。其静态工作点由下列各式决定(见图 14—25):

$$I_b = \frac{E_c - U_{be}}{R_b} \approx \frac{E_c}{R_b}$$

$$I_c = \beta I_b + I_{ce0} \approx \beta I_b$$

$$U_{ce} = E_c - I_c R_c$$

$U_{be}$  对于硅管约为  $0.5 \sim 0.7V$ ; 对于锗管约为  $0.1 \sim 0.2V$ , 较电源电压  $E_c$  小很多, 可以忽略不计; 晶体管的穿透电流  $I_{ce0}$  数值也很小, 有时也可忽略不计。

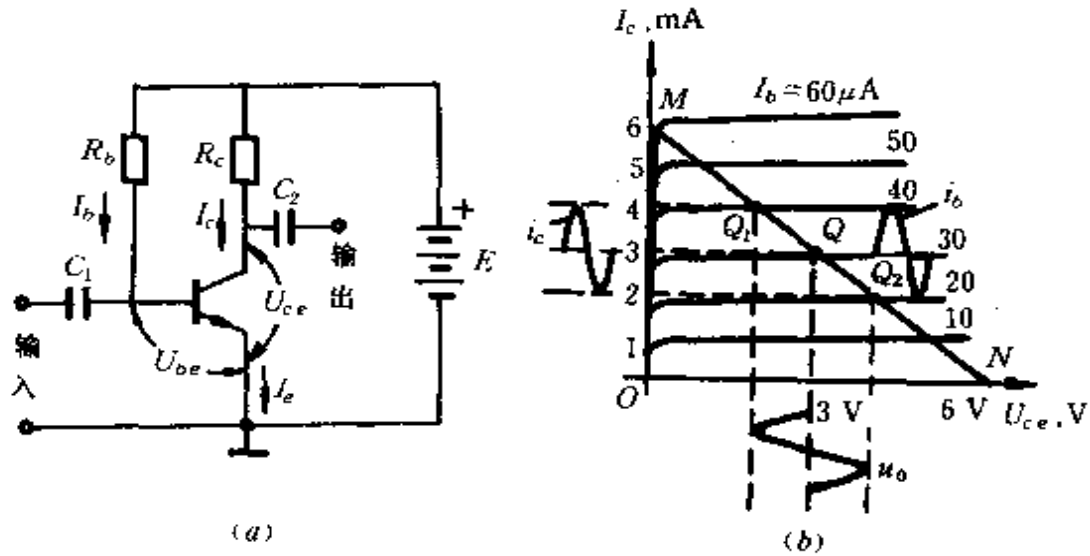


图 14—25 最简单的单管放大器和放大器的图解

(a)单管放大器 (b)放大器的图解

$R_b$  确定了,  $I_b$  也就确定了, 从而可求出相应的  $I_c$  和  $U_{ce}$  的数值, 把这一点标在图 14—25(b) 中, 该点  $Q$  就是静态工作点。

### 2. 放大器的直流负载线的确定

$I_b$  的大小随  $R_b$  值的改变而变化, 即静态工作点位置会发生变化, 其变化规律是在某一直线上移动。该直线称为直流负载线。它由下列关系式确定。

当  $U_{ce} = 0$  时  $I_c = E_c / R_c$  [图 14—25(b) 上的  $M$  点]。

当  $I_c = 0$  时  $U_{ce} = E_c$  [图 14—25(b) 上的  $N$  点]。

### 3. 图解法确定静态工作点

图解法确定静态工作点, 即通过作图, 在晶体管输出特性曲线上找出放大器的静态工作点。例如,  $E_c$  为 6V,  $R_c$  为 1k $\Omega$ ,  $R_b$  为 180k $\Omega$ , 则  $I_b = (E_c - U_{be}) / R_b = (6 - 0.6) / 180 \approx 30\mu A$ , 所以晶体管必定工作在  $I_b = 30\mu A$  的那一条特定输出特性曲线上。另外, 晶体管的工作点还必须在直流负载线  $MN$  上 ( $M$  点在纵座

标上,距原点为  $E_c/R_c=6\text{mA}$ ;  $N$  点在横坐标上,距原点为  $E_c=6\text{V}$ 。要同时满足这两个条件,在图 14—25 中只有一个特定点,即直流负载线  $MN$  与  $I_b=30\mu\text{A}$  的输出特性曲线的交点  $Q$ 。因此, $Q$  点就是放大器的静态工作点。

确定好工作点  $Q$  后,可以从图上分析有交流信号输入时放大器的运行状态〔图 14—25(b)〕。由图解可见,如果放大器工作在输出特性曲线的放大区,它不会产生明显的失真。但若  $Q$  点选择不当,而使放大器的工作点进入了饱和区或截止区,就会引起失真。

### 三、放大器的输入、输出电阻,负载电阻及放大倍数的计算

#### 1. 晶体管输入电阻的计算

$$r_{be} = \frac{\Delta U_{be}}{\Delta I_b} = r_b + (\beta + 1) \frac{26\text{mA}}{I_c\text{mA}}$$

式中: $r_{be}$ ——晶体管输入电阻( $\Omega$ );

$\beta$ ——晶体管的电流放大倍数;

$r_b$ ——晶体管的基区电阻,对一般小功率管在低频信号状态时约为  $300\Omega$  左右;

$I_c$ ——发射极的静态工作电流( $\text{mA}$ )。

$r_{be}$  约在  $300\Omega$  到几  $\text{k}\Omega$  之间变化。晶体管手册中常把  $r_{be}$  写成  $h_{ie}$  或  $h_{i1}$ 。

例如,有一 3DG6 晶体管, $\beta=100$ , $I_c=3.2$  毫安,则它的输入电阻为  $r_{be} \approx 300 + (100 + 1) \times 26 / 3.2 \approx 1120(\Omega)$

#### 2. 放大器的输入电阻和输出电阻的计算

如图 14—26 所示, $e_s$  为信号源电势, $R_s$  为信号源内阻。

(1)放大器的输入电阻  $r_{sr}$ :放大器的输入电阻就是从放大器输入端  $AB$  两点看进去的等效电阻,即

$$r_{sr} = U_{sr} / i_{sr} = R_{b1} // R_{b2} // r_{be}$$

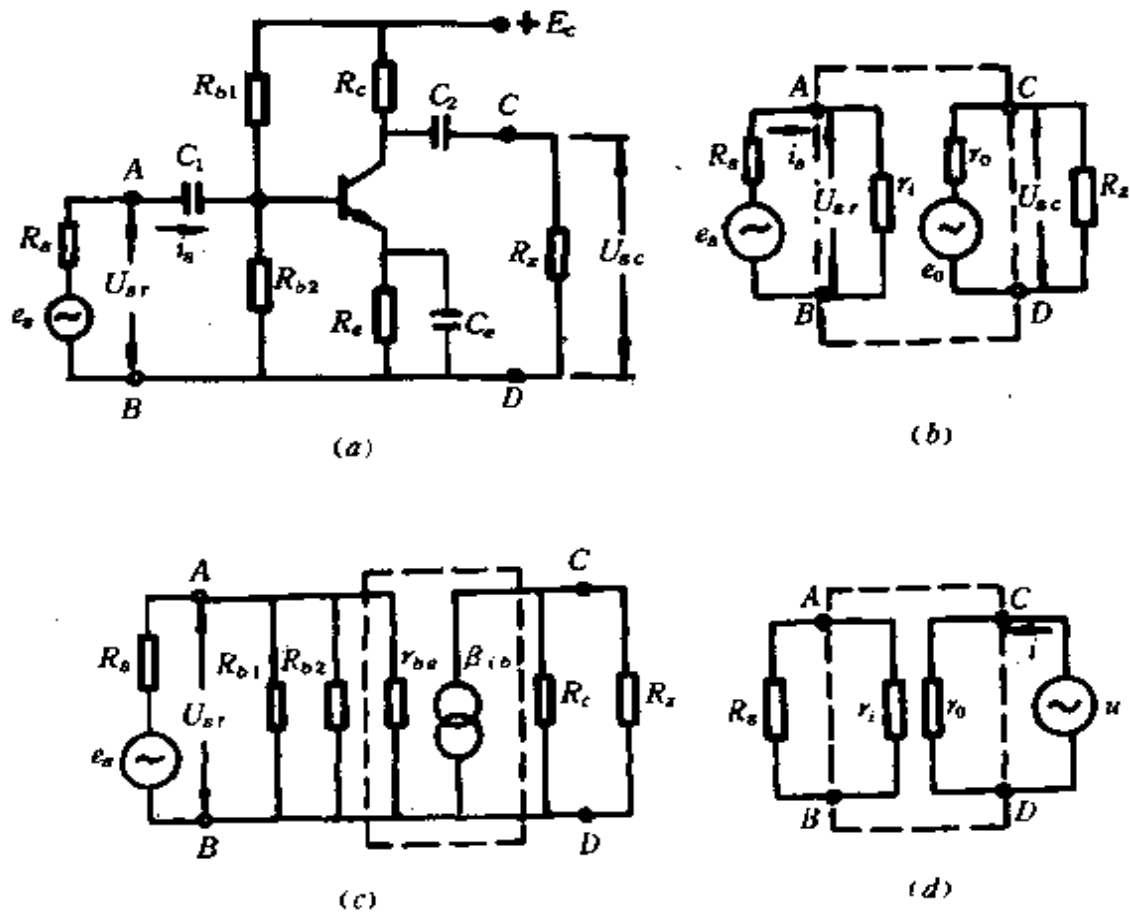


图 14-26 放大器的输入电阻和输出电阻

(a)典型放大电路 (b)输入电阻和输出电阻 (c)等效电路 (d)测试输出电阻

由于在实际电路中,通常  $r_{be} \ll R_{b1}, R_{b2}$ , 所以有  $r_{sr} \approx r_{be}$ ,  $r_{be}$  为晶体管的输入电阻。

(2)输出电阻  $r_{sc}$ : 放大器的输出电阻就是从放大器输出端 CD 两端看进去的等效电源的内阻, 即

$$r_{sc} = \left( \frac{e_0}{U_{sc}} - 1 \right) R_L$$

式中:  $e_0$  —— 放大器的空载电压(V), 由实测得;

$U_{sc}$  —— 放大器有载电压(V), 由实测得。

实际上, 从图 14-26(c) 的等效电路即可看出,  $r_{sc} = R_L$ , 并不需要进行上述测算。

通常我们总是希望放大器的输入电阻较高,以便较少地从信号源取出电流,使它对信号源的影响小一些;并希望放大器的输出电阻较低,以便能带动更大的负载。

### 3. 放大器的放大倍数 $K$ 的计算

$$K = \frac{U_{sc}}{U_{sr}} = \frac{-\beta R'_L}{r_{be}}$$

式中:  $R'_L$ ——放大器输出的总负载电阻( $\Omega$ ),

$$R'_L = \frac{R_c R_L}{R_c + R_L};$$

其它符号同前。

**例 14—10** 如图 14—25, 已知  $E_c$  为 20V,  $R_b$  为 420k $\Omega$ ,  $R_c$  为 8k $\Omega$ ,  $R_L$  为 3k $\Omega$ ,  $\beta$  为 60, 试求放大器的输入电阻、输出电阻和放大倍数。

**解** (1) 计算放大器的静态工作点

$$I_b \approx E_c / R_b = 20V / 420k\Omega = 47.6\mu A$$

$$I_c \approx \beta I_b = 60 \times 47.6\mu A = 2.86mA$$

$$I_e = I_b + I_c \approx 2.91mA$$

(2) 求不接负载电阻  $R_L$  时的电压放大倍数:

$$\begin{aligned} r_{be} &= r_b + (\beta + 1) \frac{26mV}{I_e mA} \\ &= 300\Omega + (60 + 1) \times \frac{26mV}{2.91mA} = 845\Omega \end{aligned}$$

当输入信号电压  $U_{sr}$  为 20mV 时, 则基极电流和集电极电流为

$$i_b = U_{sr} / r_{be} = 20mV / 845\Omega = 23.7\mu A$$

$$i_c = \beta i_b = 60 \times 23.7\mu A = 1.422(mA)$$

不接入负载电阻  $R_L$  的情况下, 输出电压为

$$U_{sc} = -i_c R_c = -1.422mA \times 8k\Omega = -11.38V$$

放大器的电压放大倍数为

$$K_u = U_{sc} / U_{sr} = -11.38V / 20mV = -569 \text{ 倍}$$

(3) 求接入负载电阻  $R_L$  后的电压放大倍数

$$R'_L = \frac{R_c R_L}{R_c + R_L} = \frac{3k\Omega \times 8k\Omega}{3k\Omega + 8k\Omega} = 2.18k\Omega$$

电压放大倍数为

$$K_u = -\beta \frac{R'_L}{r_{be}} = -60 \times \frac{2.18k\Omega}{845\Omega} \approx -155 \text{ 倍}$$

与不接负载电阻时相比,放大倍数下降了约 3.7 倍。

#### 四、阻容耦合放大器的计算

阻容耦合放大器的典型电路如图 14—27 所示。

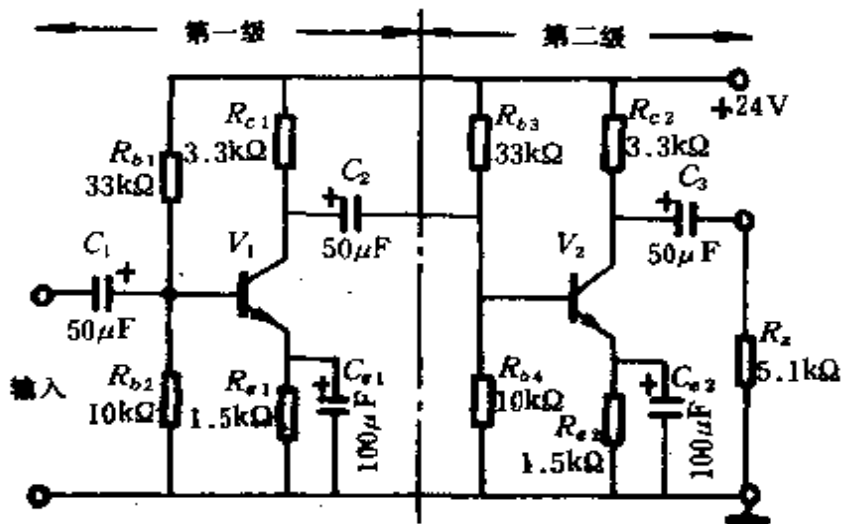


图 14—27 典型的阻容耦合放大器

##### 1. 电压放大倍数计算

(1) 分解成两个单级放大器: 先将以上两级放大器分成两个单级放大器, 如图 14—28 所示。

(2) 第一级放大器计算: 第一级放大器的负载电阻  $r_{r2}$  为

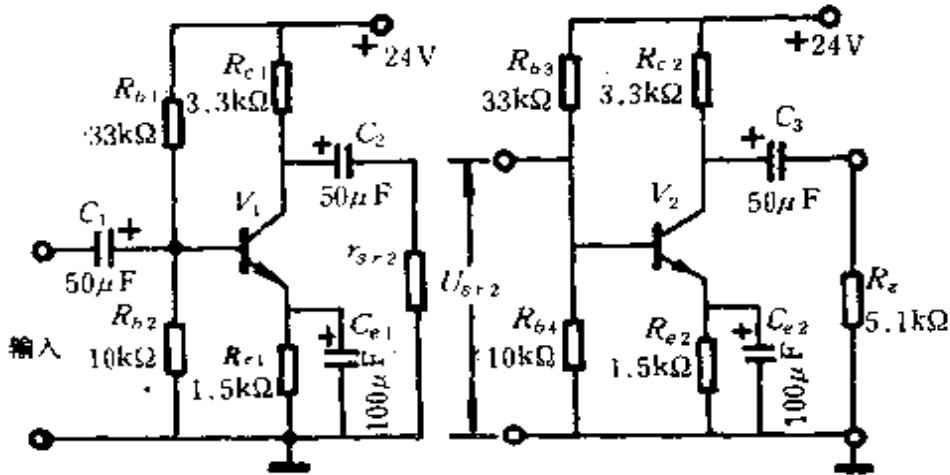


图 14-28 多级放大器的分解

$$r_{sr2} = R_{b3} // R_{b4} // r_{be2}$$

式中： $r_{be2}$ ——晶体管  $V_2$  的输入电阻( $\Omega$ )，计算方法同单管放大器。

第一级放大器的总负载电阻  $R'_{c1}$  为

$$R'_{c1} = R_{c1} // r_{sr2} = R_{c1} // R_{b3} // R_{b4} // r_{be2}$$

如果  $V_1$  和  $V_2$  的电流放大倍数为  $\beta_1 = \beta_2 = 60$ ，输入电阻  $r_{be1} = r_{be2} = 1.4\text{k}\Omega$ ，则

$$R'_{c1} = 3.3 // 33 // 10 // 1.4 = 0.87(\text{k}\Omega)$$

第一级放大器的电压放大倍数  $K_{u1}$  为

$$K_{u1} = -\beta_1 \frac{R'_{c1}}{r_{be1}} = -60 \times \frac{0.87}{1.4} = -37.3$$

(3) 第二级放大器计算：第二级放大器的总负载电阻  $R'_{c2}$  为

$$R'_{c2} = R_{c2} // R_L = 3.3 // 5.1 \approx 2(\text{k}\Omega)$$

第二级放大器的电压放大倍数  $K_{u2}$  为

$$K_{u2} = -\beta_2 \frac{R'_{s2}}{r_{be2}} = -60 \times \frac{2}{1.4} = -85.7$$

(4) 两级电压放大器的总电压放大倍数计算:

$$K_u = K_{u1} K_{u2} = (-37.3) \times (-85.7) = 3197$$

## 2. 耦合电容计算

耦合电容可按下式估算:

$$C_2 \geq (3 \sim 5) \frac{1}{2\pi f (r_{s1} + r_{i2})}$$

式中:  $C_2$ ——耦合电容器容量( $\mu\text{F}$ );

$r_{s1}$ ——第一级放大器的输出电阻( $\Omega$ );

$r_{i2}$ ——第二级放大器的输入电阻( $\Omega$ )。

实际上,为了减小低频信号的耦合中的损失,耦合电容往往选得较大,约  $10 \sim 15 \mu\text{F}$ ,并不作精确计算。

## 3. 发射极旁路电容计算

发射极旁路电容可按下式估算:

$$C_{e2} \geq (3 \sim 10) \frac{\beta + 1}{2\pi f (R_s + r_{be2})}$$

式中:  $C_{e2}$ ——发射极旁路电容器容量( $\mu\text{F}$ );

$R_s$ ——信号源内阻( $\Omega$ );

$r_{be2}$ ——第二级放大器输入电阻( $\Omega$ )。

通常  $C_{e2}$  的容量选择得比耦合电容  $C_2$  为大。

## 4. $n$ 级共射极放大器总放大倍数的估算

$$K_u = K_{u1} K_{u2} \cdots K_{un} \approx (-1)^n \beta_1 \beta_2 \cdots \beta_n \frac{R'_{zn}}{r_{be1}}$$

式中:  $\beta_1, \beta_2, \cdots, \beta_n$ ——分别为各级晶体管的电流放大倍数;

$R'_{zn}$ ——第  $n$  级(末级)的总负载电阻;

$r_{be1}$ ——第一级晶体管的输入电阻。

当级数愈多,估算值的误差也愈大。



$(-1)^n$  是为了考虑共射极电路每级的倒相关系。当  $n$  为奇数时,放大器末级的输出电压与第一级的输入电压相位相反;当  $n$  为偶数级时,末级的输出电压与第一级的输入电压同相。

### 五、射极输出器的计算

射极输出器的典型电路如图 14—29 所示。

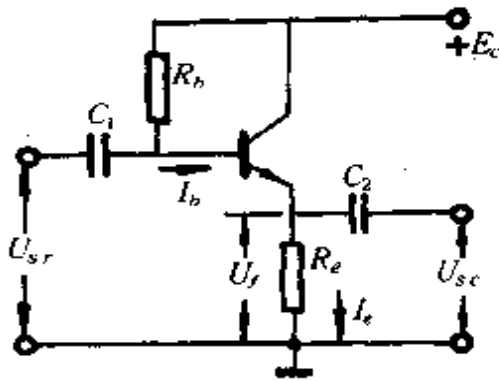


图 14—29 射极输出器

#### 1. 静态工作点计算

基极静态电流  $I_b$

$$I_b = \frac{E_c - U_{be}}{R_b + (\beta + 1)R_e} \approx \frac{E_c}{R_b + (\beta + 1)R_e}$$

当  $E_c \gg U_{be}$  时,可用近似式计算。

**例 14—11** 如图 14—29,已知  $E_c$  为 12V,  $R_b$  为 120k $\Omega$ ,  $R_e$  为 2.2k $\Omega$ ,  $\beta$  为 80,假设  $U_{be} \approx 0$ ,试求晶体管各极的电流和电压值。

**解** 基极静态电流

$$\begin{aligned} I_b &\approx \frac{E_c}{R_b + (\beta + 1)R_e} \\ &= \frac{12\text{V}}{120\text{k}\Omega + (80 + 1) \times 2.2\text{k}\Omega} = 40.2(\mu\text{A}) \end{aligned}$$

发射极电流

$$I_e = (\beta + 1)I_b = (80 + 1) \times 40.2 \mu\text{A} = 3.3(\text{mA})$$

发射极电压  $U_e = I_e R_e = 3.3 \text{mA} \times 2.2 \text{k}\Omega = 7.26(\text{V})$

管压降  $U_{ce} = E_c - U_e = 12 - 7.26 = 4.74(\text{V})$

2. 输入电阻计算

$$r_{sr} = R_b // r'_{sr} \approx R_b // \beta R'_z$$

式中： $r_{sr}$ ——输入电阻( $\Omega$ )；

$R'_z$ ——射极输出器输出端的等效负载( $\Omega$ )，

$$R'_z = R_e // R_x；$$

$r'_{sr}$ ——不考虑  $R_b$  时射极输出器的输入电阻( $\Omega$ )， $r'_{sr} = r_{be} + (\beta + 1)R_e$ 。

射极输出器的输入电阻一般可达几十  $\text{k}\Omega$  到几百  $\text{k}\Omega$ ，比起集电极输出电路(即共发射极电路)的输入电阻提高几十倍到几百倍。

3. 输出电阻计算

$$r_{sc} = R_e // \left( \frac{R'_b + r_{be}}{\beta + 1} \right) \approx \frac{R'_b + r_{be}}{\beta}$$

式中： $r_{sc}$ ——输出电阻( $\Omega$ )；

$R'_b$ ——等效电阻( $\Omega$ )， $R'_b = R_b // R_s$ ；

$R_s$ ——信号源内阻。

当  $\left( \frac{R'_b + r_{be}}{\beta + 1} \right) \ll R_e$  时，可用近似式计算。

由以上公式可见，晶体管的  $\beta$  愈大， $r_{sc}$  就愈小。为了获得特别低的输出电阻，应选用  $\beta$  大的管子。

射极输出器的输出电阻大约在几十  $\Omega$  到几百  $\Omega$  的范围内，比共发射极电路来的输出电阻低得多。

**例 14—12** 如图 14—29，已知  $R_b$  为  $120 \text{k}\Omega$ ， $R_e$  为  $2.2 \text{k}\Omega$ ， $\beta = 80$ ， $r_{be}$  约  $0.9 \text{k}\Omega$ ，设信号源内阻  $R_s$  为  $700 \Omega$ ，试求射极输出器

的输出电阻。

解 等效电阻  $R'_b = R_b // R_i \approx R_i = 0.7\text{k}\Omega$

$$\frac{R'_b + r_{be}}{\beta + 1} = \frac{0.7\text{k}\Omega + 0.9\text{k}\Omega}{80 + 1} = 19.7\Omega \ll R_c$$

因此可用近似式计算：

$$r_{so} = \frac{R'_b + r_{be}}{\beta} = \frac{0.7\text{k}\Omega + 0.9\text{k}\Omega}{80} = 20\Omega$$

4. 求放大倍数

射极输出器的电压放大倍数  $K_u$  可按下式计算：

$$K_u = \frac{U_{sc}}{U_{sr}} = \frac{(\beta + 1)R'_c}{r_{be} + (\beta + 1)R'_c} \ll 1$$

式中： $R'_c$ ——输入电阻( $\Omega$ )， $R'_c = R_c // R_L$ ；

其它符号同前。

通常总有  $r_{be} \ll (\beta + 1)R'_c$ ，所以  $K_u \approx 1$ 。实际上，只要  $R'_c$  在几百  $\Omega$  以上，就可认为电压放大倍数是 1。

## 六、负反馈电路的计算

1. 电压串联负反馈

射极输出器(图 14—29)就是电压串联负反馈的一个突出例子。它的反馈电压等于输出电压，即  $U_f = I_e R_c = U_{sc}$ 。

电压串联负反馈放大电路能稳定输出电压(提高了电压放大倍数的稳定性及减少了电路的输出电阻)和提高输入电阻。

2. 电流串联负反馈

单级电流串联负反馈电路如图 14—30 所示。

(1)输入电阻：

$$r_{sr} = R_b // R_i, R_i = r_{be} + (\beta + 1)R_c$$

(2)输出电阻：

$$r_{so} \approx R_c$$

(3)电压放大倍数：

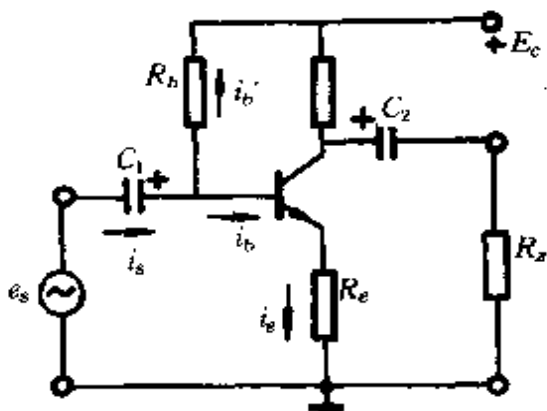


图 14—30 单级电流串联负反馈放大器

$$K_u \approx -R'_c/R_e, R'_c = R_c // R_L$$

由以上公式可见,电流负反馈放大电路的主要特点是电压放大倍数稳定,输入电阻比较高。

### 3. 电压并联负反馈

单级电压并联负反馈电路如图 14—31 所示。

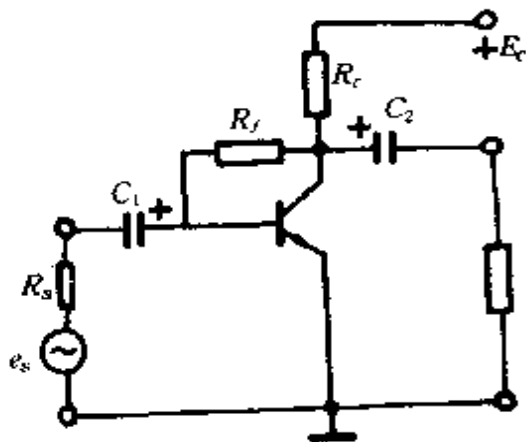


图 14—31 单级电压并联负反馈放大器

(1) 输入电阻:

$$r_{if} \approx \frac{r_{be}}{1 + \frac{K_u(R_c + r_{be})}{R_f}}$$

式中： $R_s$ ——信号源内阻( $\Omega$ )；

$K_0$ ——没有反馈时的放大倍数， $K_0 = \frac{-\beta R'_c}{R_s + r_{be}}$ ；

$$R'_c = R_c // R_L$$

(2) 输出电阻：

$$r_{oc} \approx \frac{R'_c}{1 + K_0 \beta}$$

式中： $\beta$ ——电压并联负反馈电路的反馈系数， $\beta = R_s / R_f$ 。

(3) 放大器的电压放大倍数：

$$K_u \approx \frac{K_0}{1 + K_0 \beta}$$

由以上公式可见，电压并联负反馈放大电路能减小输入电阻，对高频放大电路来说能改善频率特性，提高放大器的稳定性。

#### 4. 电流并联负反馈

电流并联负反馈电路如图 14—32 所示。

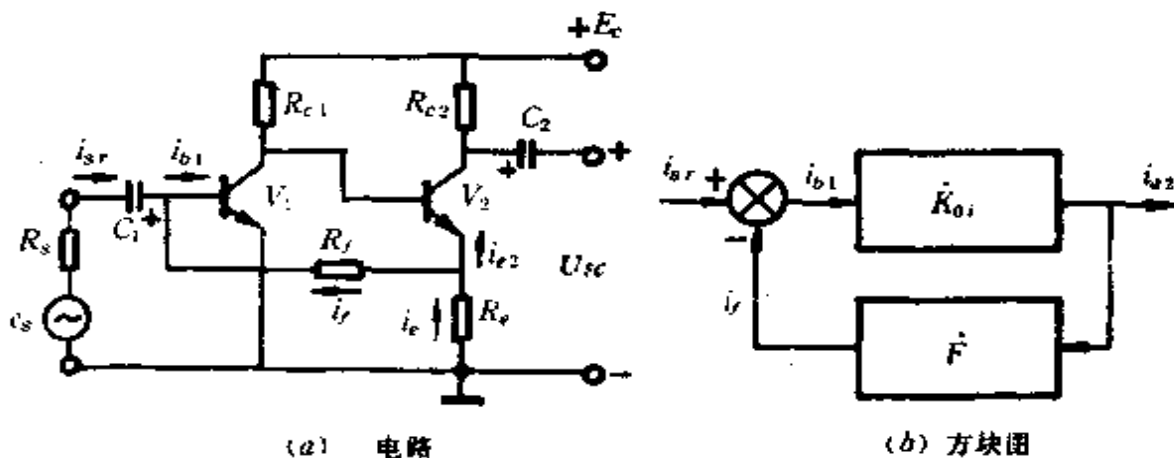


图 14--32 电流并联负反馈放大器

放大器的电流放大倍数

$$K_i \approx 1 + R_f / R_e$$

可见，电流并联负反馈放大电路能稳定电流放大倍数(因为

放大倍数仅与  $R_f$  和  $R_c$  有关,而与晶体管的具体参数几乎无关)。

**小结:**

以上四种负反馈电路的特点,列于表 14-30。

表 14-30 四种负反馈连接形式的特点

负反馈的连接形式		稳定了哪个输出量?	输入电阻	输出电阻
反馈信号取自哪个输出量?	输入端怎么连接?			
电 压	串 联	$U_o$	提 高	减 小
电 流	串 联	$I_o$ (或 $I_e$ )	提 高	提高(或近似不变)
电 压	并 联	$U_o$	减 小	减 小
电 流	并 联	$I_o$ (或 $I_e$ )	减 小	提高(或近似不变)

**七、单管交流放大器的设计要点**

单管交流放大器设计的重要原则之一,是使信号不失真,为此应遵守下列原则(参图 14-25):

1. 不截止的条件

$$I_b > I_{bm}$$

式中:  $I_b$ ——晶体管基极电流;

$I_{bm}$ ——输入交流信号  $i_b$  的峰值,  $I_{bm} = U_{orm} / r_{be}$ ;

$U_{orm}$ ——输入交流电压峰值。

2. 不饱和的条件

考虑到带负载的情况,应有

$$U_{ce \cdot \min} = E_c - I_c R_c - I_{cm} R'_L > 0.5V$$

式中： $U_{ce, min}$  —— 晶体管最小管压降(V)；

$E_c$  —— 电源电压(V)；

$I_c$  —— 集电极电流(A)；

$R_c$  —— 集电极电阻( $\Omega$ )；

$I_{cm}$  —— 集电极交流电流峰值(A),  $I_{cm} = \beta I_{bm}$ ；

$R'_c$  —— 等效负载电阻( $\Omega$ ),  $R'_c = R_c // R_L$ ；

$R_L$  —— 负载电阻( $\Omega$ )。

此外,在校验放大器的电压放大倍数时,可以利用下面公式

$$K_u = -\beta \frac{R'_c}{r_{be}}$$

为留有余地,上述条件宜适当地放宽。

**例 14—13** 试设计一个电压放大倍数  $|K_u| \geq 60$  的单管放大器。已知负载电阻  $R_L$  为  $3k\Omega$ , 输入交流电压有效值  $U_{sr}$  为  $30mV$ , 晶体管选用高频小功率硅管 3DG6,  $\beta$  为 60, 晶体管输入电阻  $r_{be}$  约  $800\Omega$ , 电源电压  $E_c$  为  $12V$ 。

**解**

(1) 选择电路: 选定如图 14—25 所示的电路。

(2) 晶体管基极电流  $I_b$  的选择: 晶体管基极电流需满足  $I_b > I_{bm}$ , 由于

$$\begin{aligned} I_{bm} &= \frac{U_{sr}}{r_{be}} = \frac{\sqrt{2} U_{sr}}{r_{be}} = \frac{\sqrt{2} \times 30mV}{800\Omega} \\ &= 53\mu A \end{aligned}$$

故选择  $I_b = 60\mu A$

$$R_b \approx E_c / I_b = 12V / 60\mu A = 200(k\Omega)$$

集电极电流  $I_c = \beta I_b = 60 \times 60\mu A = 3.6mA$

(3) 集电极电阻  $R_c$  的选择: 为了保证输出回路不致饱和, 要求

$$U_{ce, \min} = E_c - I_c R_c - I_{cm} R'_z > 0.5V$$

由于  $R_c > R'_z$ , 为了简化计算, 令

$$E_c - (I_c + I_{cm}) R_c > 0.5V$$

取  $E_c - (I_c + I_{cm}) R_c = 1V$

$$I_{cm} = \beta I_{bm} = 60 \times 53 \mu A = 3.18mA$$

$$R_c = \frac{E_c - 1V}{I_c + I_{cm}} = \frac{12V - 1V}{3.6mA + 3.18mA} \approx 1.62k\Omega,$$

取  $1.5k\Omega$

(4) 放大器的电压放大倍数  $K_u$  的计算:

$$R'_z = \frac{R_c R_z}{R_c + R_z} = \frac{1.5k\Omega \times 3k\Omega}{1.5k\Omega + 3k\Omega} = 1k\Omega$$

$$K_u = -\beta \frac{R'_z}{r_{be}} \approx -60 \times \frac{1k\Omega}{0.8k\Omega} = -75$$

满足  $|K_u| \geq 60$  的设计要求。

### 八、工作点稳定的典型电路设计要点

工作点稳定的典型电路如图 14—33 所示。

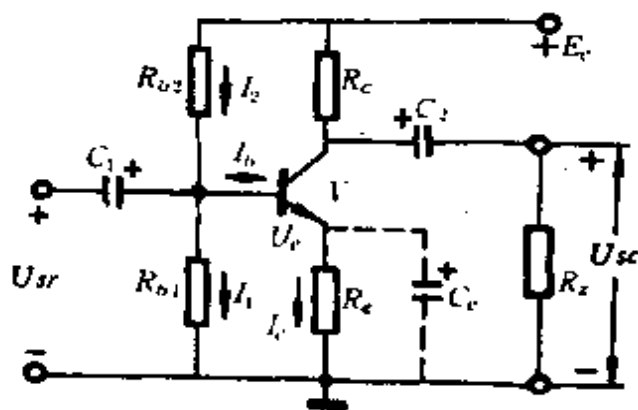


图 14—33 工作点稳定的典型电路

为了保证工作点足够稳定, 应满足下列条件:

$$I_1 \geq (5 \sim 10) I_b \text{ (硅管可以更小)}$$



$$U_b \geq (5 \sim 10)U_{be} = \begin{cases} 3 \sim 5V (\text{硅管}) \\ 1 \sim 3V (\text{锗管, 取绝对值}) \end{cases}$$

各量的计算公式如下:

$$U_b \approx E_c \frac{R_{b1}}{R_{b1} + R_{b2}}$$

$$I_c \approx I_e = \frac{U_b - U_{be}}{R_c} \approx \frac{U_b}{R_c}$$

$$I_b = I_c / \beta$$

$$I_i = U_b / R_{b1}$$

引入反馈电阻  $R_c$  后, 为了稳定直流分量, 又不削弱交流分量, 为此, 在电阻  $R_c$  上并联一个电容  $C_c$  (约  $10 \sim 100\mu F$ ), 利用电容对直流电与交流电的容抗不同, 使其对射极的交流电流起“短路”的作用。即让  $R_c$  对交流电流不起负反馈作用, 从而使放大器的交流放大倍数不致下降。

该电路的电压放大倍数仍按下式计算:

$$K_u = -\beta \frac{R'_c}{r_{be}}$$

式中:  $R'_c$  ——  $R_c$  与  $R_e$  的并联电阻 ( $\Omega$ ),  $R'_c = R_c // R_e$

### 九、各类交流放大器的特点及比较

交流放大器的基本单元电路及特点见表 14—31。

### 十、晶体管直流放大器的计算

直流放大器和交流放大器的主要区别在于, 直流放大器是放大变化缓慢的微弱信号 (通称为直流信号) 用的。直流放大器的形式很多, 图 14—34 是最简单的直流放大器。该放大器是利用调整后级发射极电位, 使前级输出端电位和后级输入端电位相配合, 以使各级管子工作点处于线性区。

各元件参数的估算

已知条件: 电源电压  $E_c$ 、晶体管  $V_1$  和  $V_2$  的工作点 (即已知各管的  $U_c$  和  $I_c$ ) 及放大倍数  $\beta$  (各管均同)。

1. 选取  $R_{c1}$

表 14-31 交流放大器的基本单元电路及特点

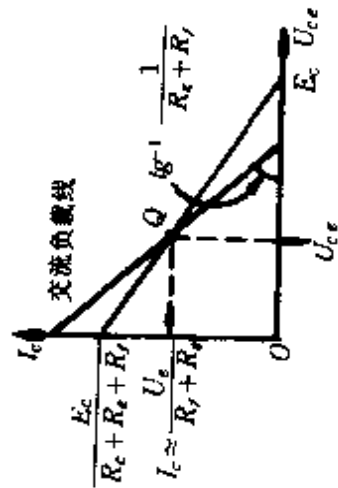
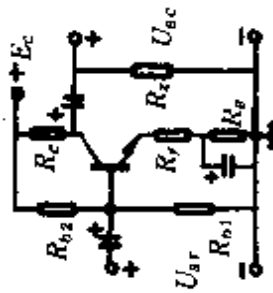
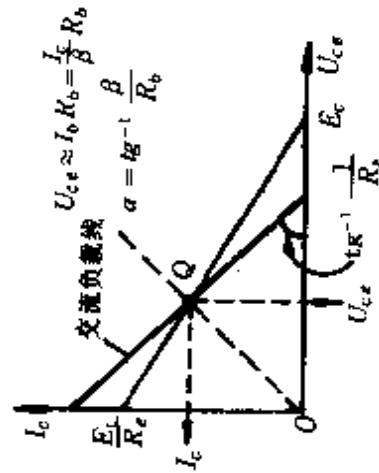
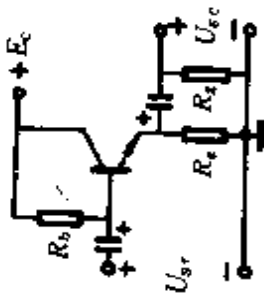
表 14-31

<p>电路图</p>			
<p>图解法</p>		<p>方法同右图</p>	

(续表)

静态 工作点	$I_b \approx \frac{E_c}{R_b}, I_c = \beta I_b$ $U_{ce} = E_c - I_c R_c$	$U_{be} \approx \frac{E_c R_{b1}}{R_{b1} + R_{b2}}, U_{ce} = U_b - U_{be}$ $I_c \approx I_e, U_{ce} \approx E_c - I_c (R_c + R_e)$	$U_{be} \approx \frac{E_c R_{b1}}{R_{b1} + R_{b2}}, U_{ce} = U_b - U_{be}$ $I_c \approx I_e, U_{ce} \approx E_c - I_c (R_c + R_e)$
输入电阻	$r_{ie} \approx r_{be} \text{ (当 } r_{be} \ll R_b \text{)}$	$r_{ie} \approx r_{be1} \text{ (当 } r_{be1} \ll R_1 // R_2 \text{)}$	$r_{ie} \approx r_{be} \text{ (当 } r_{be} \ll R_{b1} // R_{b2} \text{)}$
输出电阻	$r_{oe} \approx R_c$	$r_{oe} \approx R_{c2}$	$r_{oe} \approx R_c$
放大倍数	$K = -\frac{\beta R'_c}{r_{be}}$	$K = \frac{U_{ce}}{U_{be}} \approx \beta_1 \beta_2 \frac{R'_{c2}}{r_{be1}}$ <p>(当 <math>R_{c1} \gg r_{ie2}</math>)</p>	$K = -\frac{\beta R'_c}{r_{be}}$
特点	放大倍数大, 工作点不稳定	放大倍数大, 工作点稳定	工作点稳定
用途	不要求工作点稳定的简单放大电路	工作要求稳定的放大电路, 多用于多级放大器的中间级	

(续表)



电路图

图解法

(续表)

静态 工作点	$U_b, U_e \text{ 同左, 但 } I_c = \frac{U_c}{R_c + R_f},$ $U_{ce} \approx E_c - I_c(R_c + R_e + R_f)$	$I_b \approx \frac{E_c}{R_b + \beta R_c}, I_c \approx \beta I_b,$ $U_{ce} = E_c - I_c R_c$
输入电阻	$r_{ir} \approx R_{b1} // R_{be} // (\beta R_f + r_{be})$	$r_{ir} \approx R_b // \beta R_c$
输出电阻	$r_{ic} \approx R_c$	$r_{ic} \approx \frac{R_b + r_{be}}{\beta} \text{ (当 } \frac{R_b + r_{be}}{\beta} \ll R_c \text{)}$
放大倍数	$K \approx \frac{-R'_c}{R_f} \text{ (当 } \beta R_f \gg r_{be} \text{)}$	$K = \frac{(\beta + 1)R'_c}{r_{be} + (\beta + 1)R'_c}$
特点	$r_{ir}$ 较大, $ K  > 1$ 且与晶体管参数几乎无关, 工作点稳定	$r_{ir}$ 大, $r_{ic}$ 小, $ K  \ll 1$ , 工作点稳定
用途	放大器的输入级或为了提高 $K$ 的稳定性	放大器的输入级或输出级

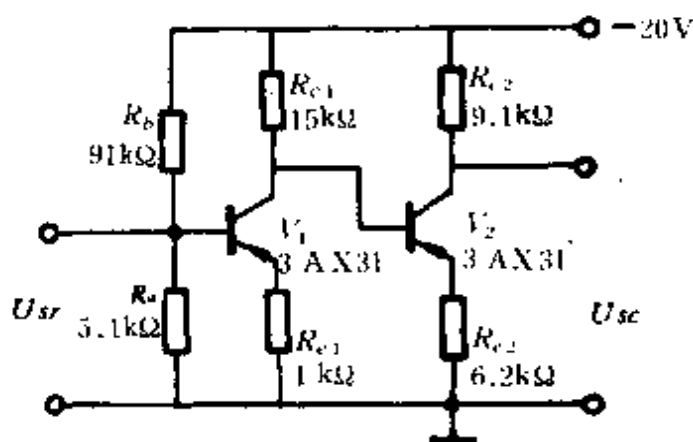


图 14-34 最简单的直流放大器

$R_{e1}$  根据稳定性要求选取, 对小信号放大器可取几百  $\Omega$  到几  $k\Omega$ 。

2. 确定  $R_{e1}$

$$R_{e1} = \frac{E_c - U_{ce1} - I_{e1} R_{e1}}{I_{e1}}$$

3. 确定  $R_c$  和  $R_b$

$$R_c = \frac{\beta}{10} R_{b1}$$

$$R_b = \frac{\beta}{10} \left( \frac{E_c}{I_b} - R_{e1} \right)$$

4. 确定  $R_{e2}$

$$R_{e2} = \frac{U_{ce1} + I_{c1} R_{e1} - U_{eb2}}{I_{c2}} \approx \frac{U_{ce1} + I_{c1} R_{e1}}{I_{c2}}$$

5. 确定  $R_{c2}$

$$R_{c2} = \frac{E_c - U_{ce2} - I_{e2} R_{e2}}{I_{c2}}$$

上述各参数选定后(取标准值电阻), 再根据实际情况调整  $R_b$  和  $R_{c2}$ , 以确定  $V_1$  和  $V_2$  的工作点。

### 十一、差动放大器的计算

差动放大器的输入信号是差动信号。即两管的输入信号振幅相等、相位相反, 即  $u_{sr1} = u_{sr2}$ 。放大器的输出正比于差动信号,  $u_u = K_{du}(u_{sr1} - u_{sr2})$ 。式中  $K_{du}$  为差动放大器的差动电压放大倍数。

差动放大器的基本电路, 见表 14-32。

### 十二、场效应管放大电路的计算

场效应管的输入阻抗非常高,可达  $10^9 \sim 10^{15} \Omega$ ,输入电路和输出电路基本独立,电路结构较简单,并具有噪音低、动态范围广和抗干扰、抗辐射能力强等特点。

常用的场效应管基本放大电路,见表 14-33。

### 十三、运算放大器的计算

运算放大器是具有高放大倍数( $K_0$ )和深度负反馈的直流放大器,可用来实现信号的组合和运算。它的输出—输入关系仅简单地决定于反馈电路和输入电路的参数,与放大器本身的参数没有很大关系。运算放大器基本上有两种连接方式:反相输入〔图 14-35(a)〕和同相输入〔图 14-35(b)〕。

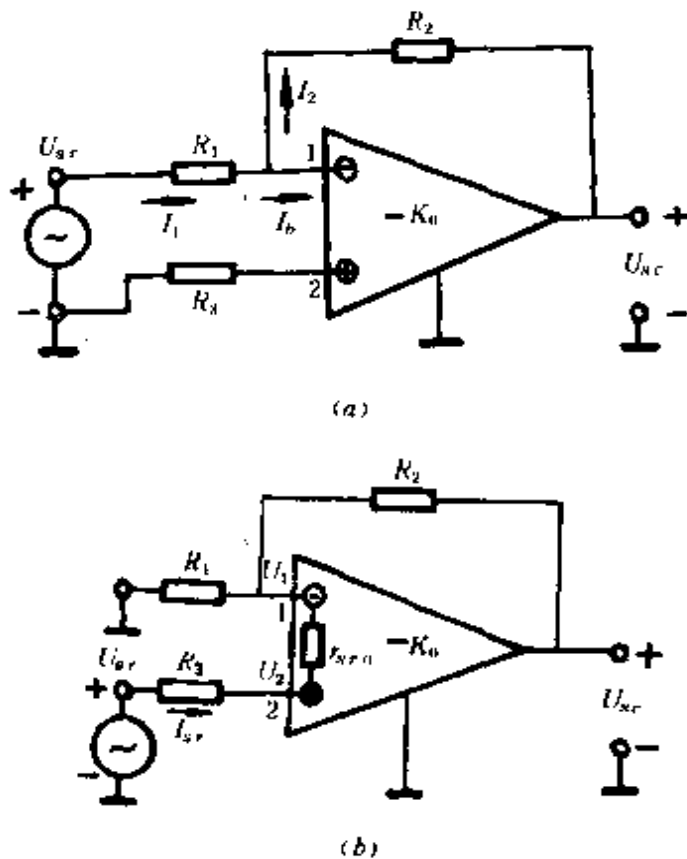


图 14-35 运算放大器的两种接线  
(a)反相输入接线图 (b)同相输入接线图

#### 1. 运算放大器主要性能参数

表 14-32 差动放大器基本电路

电路型式	电路图	输入电阻	电压放大倍数	输出电阻
双端输入 双端输出		$r_{if} = 2(R_{b1} + r_{be})$	$K_{du} = -\beta \frac{R'_{fc}}{R_{b1} + r_{be}}$ $R'_{fc} = R_c // \frac{R_{fc}}{2}$	$r_{oe} = 2R_c$
双端输入 单端输出		$r_{if} = 2(R_{b1} + r_{be})$	$K_{du} = -\beta \frac{R'_{fc}}{2(R_{b1} + r_{be})}$ $R'_{fc} = R_c // R_{fc}$	$r_{oe} = R_c$



(续表)

电路型式	电路图	输入电阻	电压放大倍数	输出电阻
单端输入 单端输出		$r_{ir} = 2(R_{B1} + r_{be})$	$K_{du} = -\beta \frac{R'_{L2}}{2(R_{B1} + r_{be})}$ $R'_{L2} = R_C // R_{L2}$	$r_{oe} = R_C$
单端输入 双端输出		$r_{ir} = 2(R_{B1} + r_{be})$	$K_{du} = -\beta \frac{R'_{L2}}{R_{B1} + r_{be}}$ $R'_{L2} = R_C // \frac{R_{L2}}{2}$	$r_{oe} = 2R_C$

注:  $K_{du}$  为差动放大器的差动电压放大倍数。

常用场效应管基本放大电路

表 14-33

电路类型	电路图	静态工作点	输入电阻	电压放大倍数	输出电阻
共源放大器		$U_S = I_D R_S$ $U_G = U_{K_2} = \frac{E_D R_2}{R_1 + R_2}$ $U_{GS} = U_G - U_S$	$r_i = R_x + R_1 // R_2$	$K_u = -g_m (R_d // R_L)$	$r_o \approx R_d$
源极输出器		$U_S = I_D R_S$ $U_G = U_{K_2} = \frac{E_D R_2}{R_1 + R_2}$ $U_{GS} = U_G - U_S$	$r_i = R_x + R_1 // R_2$	$K_u = \frac{g_m (R_s // R_L)}{1 + g_m (R_s // R_L)}$	$r_o = \frac{1}{\frac{1}{R_s} + g_m}$

电子线路

(续表)

电路类型	电路图	静态工作点	输入电阻	电压放大倍数	输出电阻
混合跟随器		$U'_S = (I_D + I_C)R_S$ $U'_G = U_{R2} - \frac{E_D R_2}{R_1 + R_2}$ $U_{GS} = U_G - U_S$	$r_{ir} = [1 + (1 + \beta)g_m R'_S]R_i$ $\beta = \beta \frac{K_d}{h_{ip} + R_d}$ $R'_S = R_S // R_1 // R_2$	$K_u = \frac{\beta g_m R_c + (1 + \beta)g_m R'_S}{1 + (1 + \beta)}$	$r_{oe} = \frac{K_d + (1 + g_m K_d)R'_S}{1 + (\beta + 1)g_m R'_S}$
电流负反馈		$U'_S = I_D(R_S + R_{SF})$ $U'_G = U_{R2} = \frac{E_D R_2}{R_1 + R_2}$ $U_{GS} = U_G - U_S$	$r_{ir} = R_S + \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}$	$K_u = \frac{-g_m R'_S}{1 + g_m R_{SF}}$ $R'_S = R_d // R_{fz}$	$r_{oe} \approx R_d$

注:  $g_m$  为正向跨导。

(1) 开环放大倍数  $K_0$ : 是指元件加反馈环路、放大器工作在直流(或很低频率的交流)下的电压放大倍数, 一般在  $10^3 \sim 10^7$  左右。运算放大器除作比较器外, 通常都接成闭环使用, 以保证其工作稳定。

(2) 输入特性: 输入电阻计算如下:

当反相输入时, 属于电压并联负反馈

$$r_{sr} \approx R_1$$

当同相输入时, 属于电压串联负反馈

$$r_{sr} = (1 + K_0 F) r_{sr0} + R_2, F = \frac{r_{sr0} // R_1}{(r_{sr0} // R_1) + R_2}$$

式中:  $r_{sr0}$ ——放大器开环输入电阻, 一般数值较大, 如几十  $k\Omega$  ~ 几百  $k\Omega$ ;

$K_0$ ——开环电压放大倍数, 此值很大, 如积分用的运算放大器为  $10^6 \sim 10^7$ ;

$F$ ——电压反馈系数。

输入电流  $I_b$  在数  $\mu A$  ~ 数  $pA$  之间。

(3) 输出特性  $V_{pp}$ —— $R_z$ :  $R_z$  代表输出端接有负载时能输出的最大电压值。它标志一个放大器的负载能力。输出电阻计算如下:

开环输出电阻  $r_{so}$  约几百  $\Omega$ 。

$$\text{闭环输出电阻 } r_{sc} \approx \frac{r_{so}}{1 + K_0 F} \approx 0$$

(4) 失调电压  $V_{os}$ 、电流  $I_{os}$ : 集成运算放大器通常都采用差分输入级, 由于输入差分管的不对称, 即使输入端电压、电流为零。放大器的输出电压、电流也不为零。我们把使放大器输出电压为零在输入端所加的信号电压称为失调电压。

(5) 单位增益带宽  $f_c$ : 当开环差模增益下降到  $K=1$  时的频率称为放大器的单位增益带宽, 即放大器使用频率上限。

## 2. 运算放大器的设计

现以 F008 为例介绍同相和反相放大器的设计和调试。F008 外引线排列见图 14-36(a), 开环增益随频率变化曲线见图 14-36(b)。表 14-34 列出了它的性能参数。

(1) 反相比例放大器设计(图 14-37): 图中  $R_f$  为反馈电阻,  $R_1$  与  $R_f$  共同决定放大器闭环增益。  $R_2$  为  $R_1$  与  $R_f$  并联值, 它可以减小失调电流的影响。  $C_f$  为相位补偿电容, 主要用来防止放大器产生自激振荡。  $C_f$  一般在几~1000pF 之间。此电容量太大会使频带变窄, 太小又使放大器不能稳定工作。

表 14-34 F008 性能参数

名称	符号	单位	测试条件	典型值
输入失调电压	$V_{os}$	mV	$R_b = 50\Omega$	5
输入失调电流	$I_{os}$	nA	$R_b = 50k\Omega$	50
输入基极电流	$I_b$	nA	$R_b = 50k\Omega$	300
静态功耗电流	$I_{cc}$	mA	$R_f = \infty$	1.5
开环增益	$G_{OL}$	dB	$f = 4Hz, R_f = 10k\Omega, V_{opp} = 20V$	
共模电压范围	$V_{CM}$	V		24
共模抑制比	CMRR	dB	$R_b = 50\Omega$	106
输出电压幅度	$V_{opp}$	V	$R_f = 10k\Omega (R_f = 1k\Omega)$	24(20)

注:  $U_+ = 15V, U_- = -15V, T_a = 25^\circ C$

若信号源内阻很小, 则输出电压  $U_o$  为

$$U_o = -\frac{R_f}{R_1} U_{sr}$$

电压放大倍数  $K_u = U_o / U_{sr} = -R_f / R_1$

式中负号表示反相。图中若  $R_f = 51k\Omega, R_1 = 1k\Omega$ , 则  $K_u = -51/1 = -51$ 。在小信号输入 ( $U_{sr} = 50mV$ ) 时,  $C_f = 2pF$ , 测得放大器

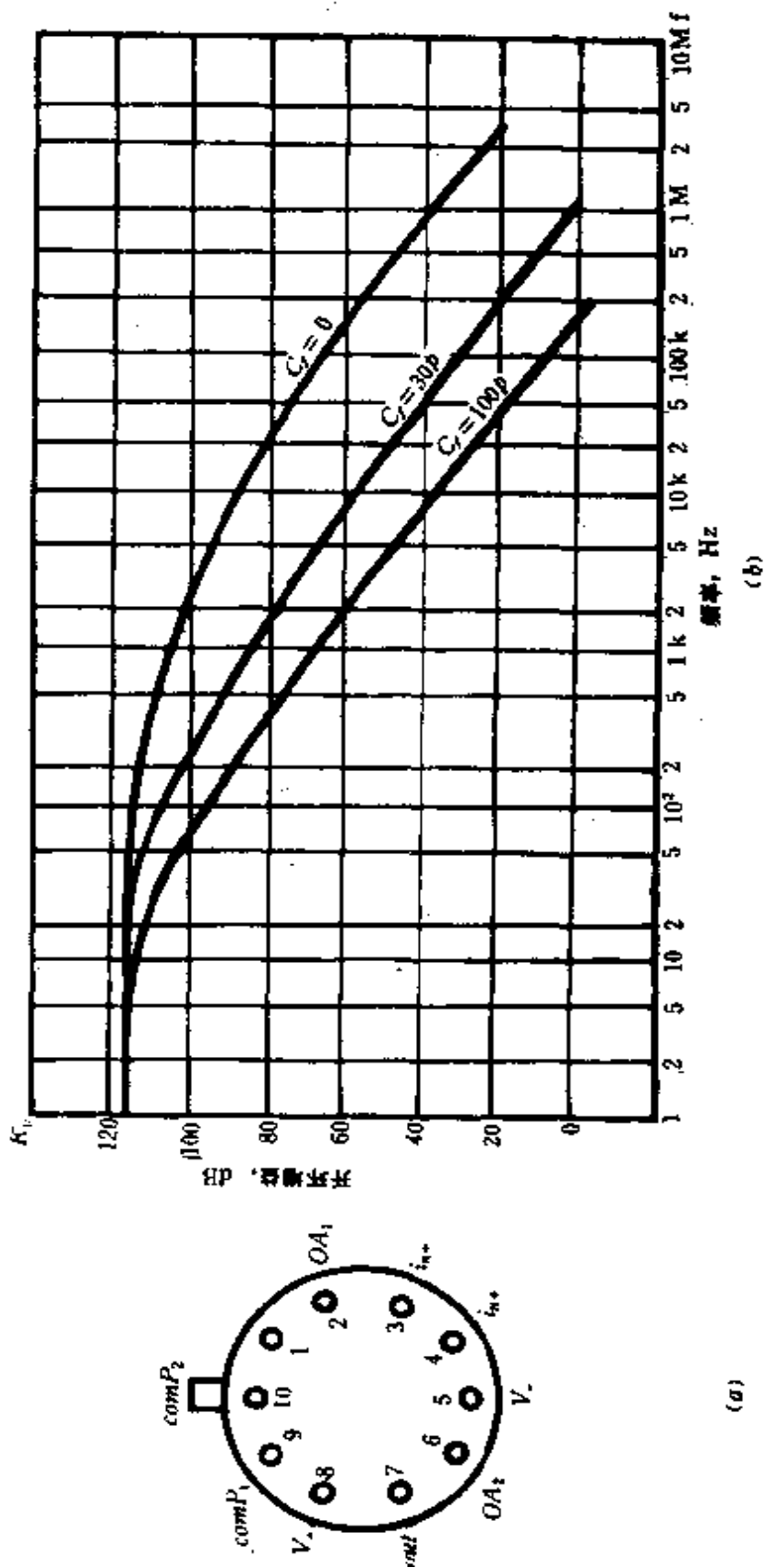


图 14-36 F008 管脚图及开环增益变化曲线  
(a)管脚排列图 (b)开环增益  $K_0$  随频率变化的曲线

带宽大于  $500\text{kHz}$ 。若  $R_f = 5.1\text{k}\Omega$ ,  $R_1 = 1\text{k}\Omega$ ,  $K_u = -5$ ,  $U_{sr} = 50\text{mV}$ ,  $C_f = 50\text{pF}$ , 测得放大器带宽大于  $1\text{MHz}$ 。

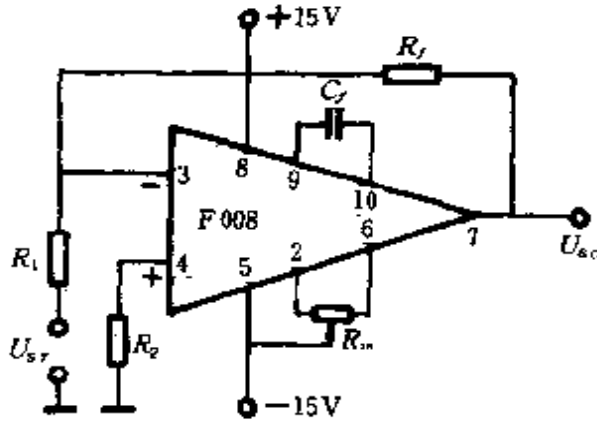


图 14-37 反相比例放大器

(2)同相放大器的设计(图 14-38):

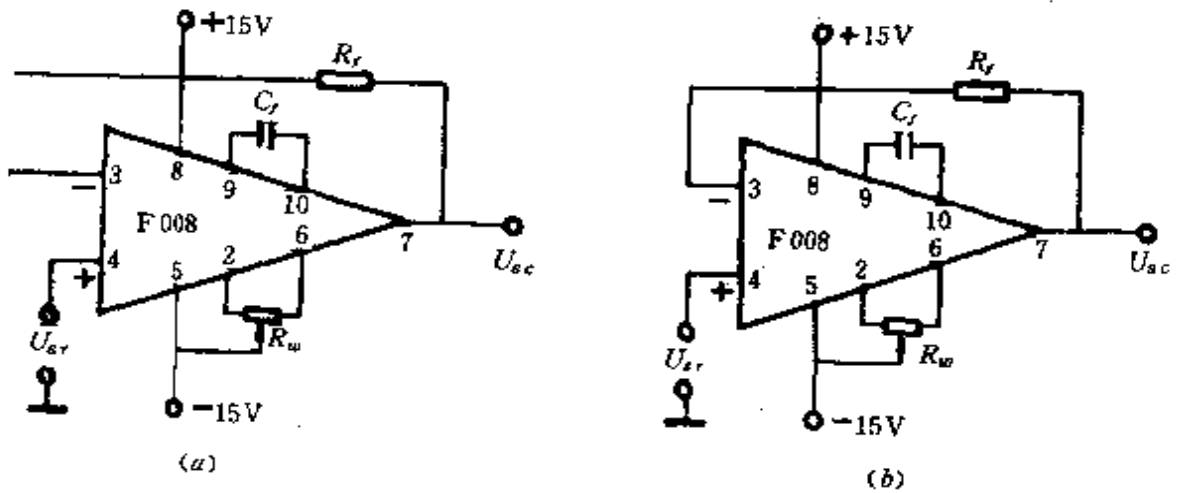


图 14-38 同相放大器

(a)同相比例放大器 (b)电压跟随器

对于图 14-38(a)有下列关系式:

$$U_{sc} = U_{sr} \left( 1 + \frac{R_f}{R_1} \right)$$

$$K_u = U_{sc} / U_{sr} = 1 + R_f / R_1$$

如果  $R_1 \rightarrow \infty$ , 则  $K_u = 1 + R_f / R_1 = 1$ , 于是图 14-38(a)就

变成图 14-38(b)所示的电压跟随器电路。图 14-38(a)中,若  $R_f = 51\text{k}\Omega$ ,  $R_1 = 1\text{k}\Omega$ ,  $C_f = 2\text{pF}$ ,  $U_{sr} = 50\text{mV}$ ,  $K_u = 52$ , 则频率响应大于  $600\text{KHz}$ 。若  $R_f = 5.1\text{k}\Omega$ ,  $R_1 = 1\text{k}\Omega$ ,  $U_{sr} = 50\text{mV}$ ,  $K_u = 6$ , 则频率响应大于  $1\text{MHz}$ 。

(3)调试:上述两种电路调试方法简单。当要求输入电压为零时输出也要为零,可把  $U_{sr}$  对地短路,调整  $R_w$  使输出为零即可。

$C_f$  的调整:先不接  $C_f$ ,放大器可能振荡,若振荡则加上  $C_f$ ,由小逐渐增大,直到不振荡。固定输入电压,改变信号频率,使其从某一个频率开始增益单调下降,这时的  $C_f$  值称为最佳补偿值,可得到最大带宽。这里所述的带宽是指小信号带宽。若要放大器有较窄的带宽,可适当加大电容至数百  $\text{pF}$ 。

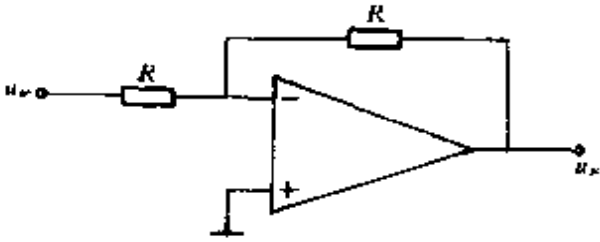
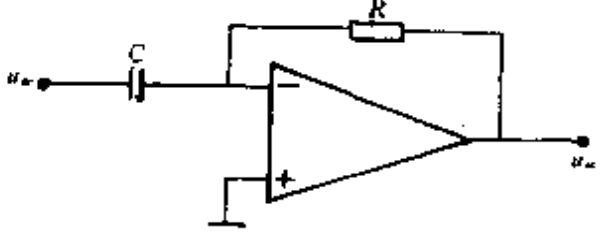
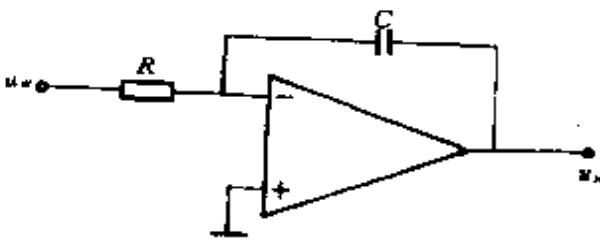
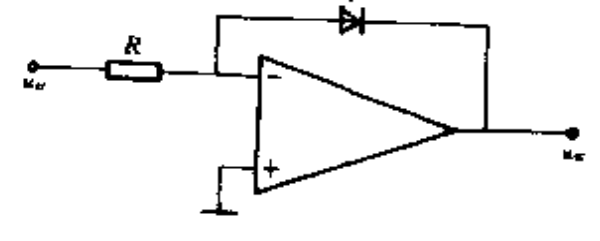
3. 各种运算放大器的基本电路(表 14-35)

表 14-35 各种运算放大器的基本电路

运算关系	基本电路方框图	逻辑关系
加法		$u_o = -R_f \sum_{i=1}^n \frac{u_i}{R_i}$ <p>当 <math>R_f = R_1 = R_2 = \dots</math>  <math>= R_n</math> 时 <math>u_o = -\sum_{i=1}^n u_i</math></p>
减法		$u_o = u_2 - u_1$



(续表)

运算关系	基本电路方框图	逻辑关系
倒相		$u_y = -u_x$
微分		$u_y = -RC \frac{du_x}{dt}$
积分		$u_y = -\frac{1}{RC} \int u_x dt$
对数放大		$u_y = K_1 \ln u_x + K_2$

(续表)

运算关系	基本电路方框图	逻辑关系
反对数放大		$u_2 = K_1 \ln^{-1}(u_1 K_2)$
乘法		$u_2 = K u_1 u_2$
除法		$u_2 = K \frac{u_1}{u_2}$

可以通过改变运算放大器输入和反馈电路的形式和参数实现不同的运算关系。 $K_0$  愈大, 运算精度愈高。

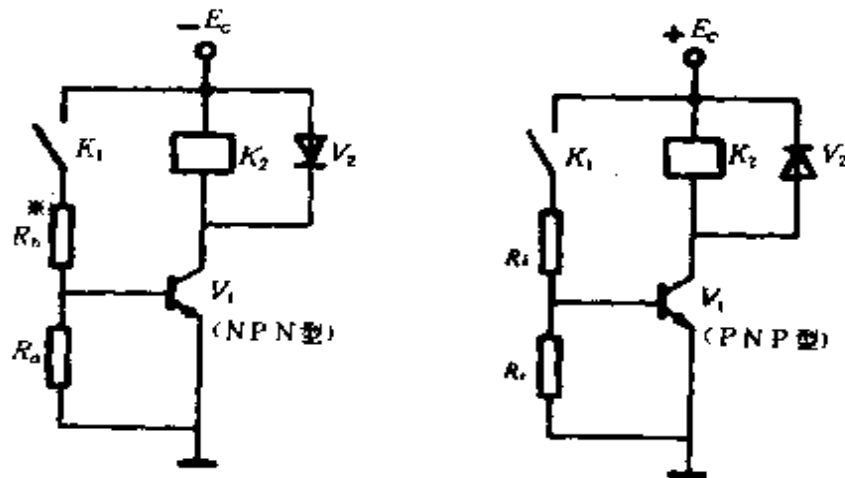
#### 十四、晶体管电子继电器元件参数的选择

几种常用晶体管电子继电器原理电路如图 14-39 所示。图中触点  $K_1$  代表发信元件的触点。 $K_1$  闭合, 晶体管  $V_1$  导通, 继电器  $K_2$  吸合;  $K_1$  断开,  $V_1$  截止,  $K_2$  释放。为了防止误动作,  $V_1$  的基极可外加正偏压(对 PNP 管)或负偏压(对 NPN 管)。电子继

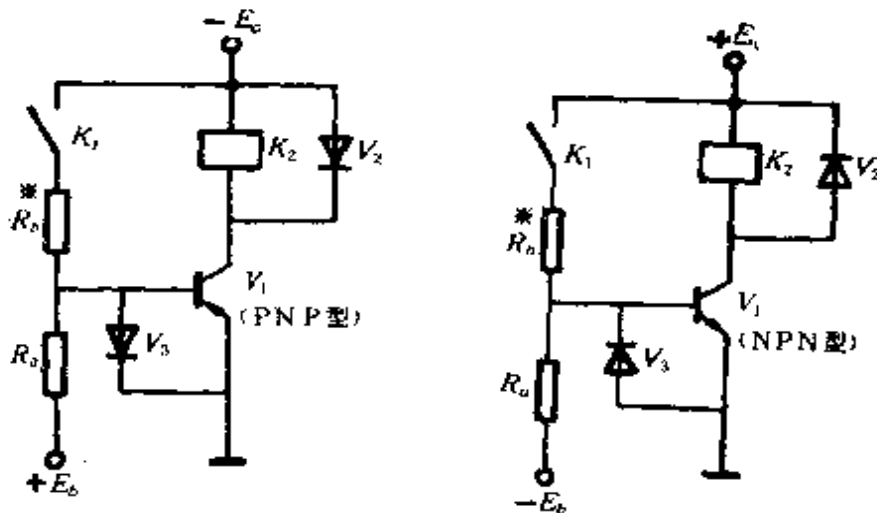
电器元件的选择及计算如下：

(1)继电器  $K_2$  的选择：继电器  $K_2$  可用直流电阻  $R_c$  为几百  $\Omega$  到几  $k\Omega$ ，吸合电流  $I_{吸}$  为几到几十 mA 的小型继电器，如 JR 型、JRX 型、JQ 型和 JQX 型等。

(2)电源电压  $E_c$  选择： $E_c \geq U_{吸} = I_{吸} R_c$



(a) 无外加偏压的电路



(b) 外加反向偏压的电路

图 14-39 晶体管电子继电器原理电路

(3)晶体管  $V_1$  选择： $V_1$  一般采用小功率锗管或硅管。要求集电极最大允许电流  $I_{CM} > I_{吸}$ ；集电极与发射极间的反向击穿

电压  $BV_{ceR} > E_c$ 。

(4) 二极管  $V_2$  选择:  $V_2$  为保护晶体管用, 要求其额定反向峰值电压  $V_{RM} > E_c$ ; 最大正向电流  $I_{OM} \geq I_{zmax}$  ( $I_{zmax}$  为最大负载电流)。

(5) 二极管  $V_3$  选择:  $V_3$  为保护晶体管  $V_1$  用, 要求其额定电流  $I_c > E_b/R_a$ 。

(6) 电阻  $R_a$  的选择:

① 对于图 14-39(a), 对低频小功率锗管取几百  $\Omega$  到几千  $\Omega$ 。 $R_a$  小些, 管子截止更可靠, 但损耗大。当  $R_a \approx 1k\Omega$  时,  $BV_{ceR} \approx 1.5BV_{ce0}$ 。

② 对于图 14-39(b), 为使管子可靠截止,  $BV_{cb0}$  不小于 0.3V, 即要求

$$R_a \leq \frac{E_b - 0.3}{I_{cb0}}$$

式中:  $E_b$  —— 基极电压, 一般取 6V;

$I_{cb0}$  —— 集电极反向饱和电流(A), 取最高可能环境温度下的数值。

(7) 电阻  $R_b$  的选择:

① 对于图 14-39(a), 为使管子饱和, 要求  $\frac{E_c}{R_b} \geq \frac{E_c}{\beta R_{\text{吸}}}$ , 即  $R_b \leq \beta R_{\text{吸}}$ 。

② 对于图 14-39(b), 可按下列公式计算  $R_b$ :

$$\text{(锗管)} \quad E_c - \left( I_b + \frac{E_b + 0.2}{R_a} \right) R_b \geq 0.2$$

$$\text{(硅管)} \quad E_c - \left( I_b + \frac{E_b + 0.7}{R_a} \right) R_b \geq 0.7$$

由于管子性能有差异, 偏置电阻  $R_b$  尚需实际调整。 $R_b$  值得略小, 能使管子得到充分饱和, 但将使开关速度有所下降。

### 十五、功率放大器保护元件的计算

1. 功率放大器感应过电压的抑制元件的选择

在控制电路中,末级的功率放大器往往要推动接触器、继电器、电磁阀门等电感性负载。在切断这些电感负载时会产生感应过电压,因而可能击穿晶体管。为此需采取保护措施。常用的保护元件有二极管、稳压管、电阻、电容等。图 14-40 为几种常用的过电压抑制线路和晶体管导通、截止过程中集电极电流  $I_c$  与电压  $U_{ce}$  的变化曲线。图(e)对应于图(a)和图(b)的线路;图(f)对应于图(c)的线路;图(g)对应于图(d)的线路。抑制元件的选择原则如下:

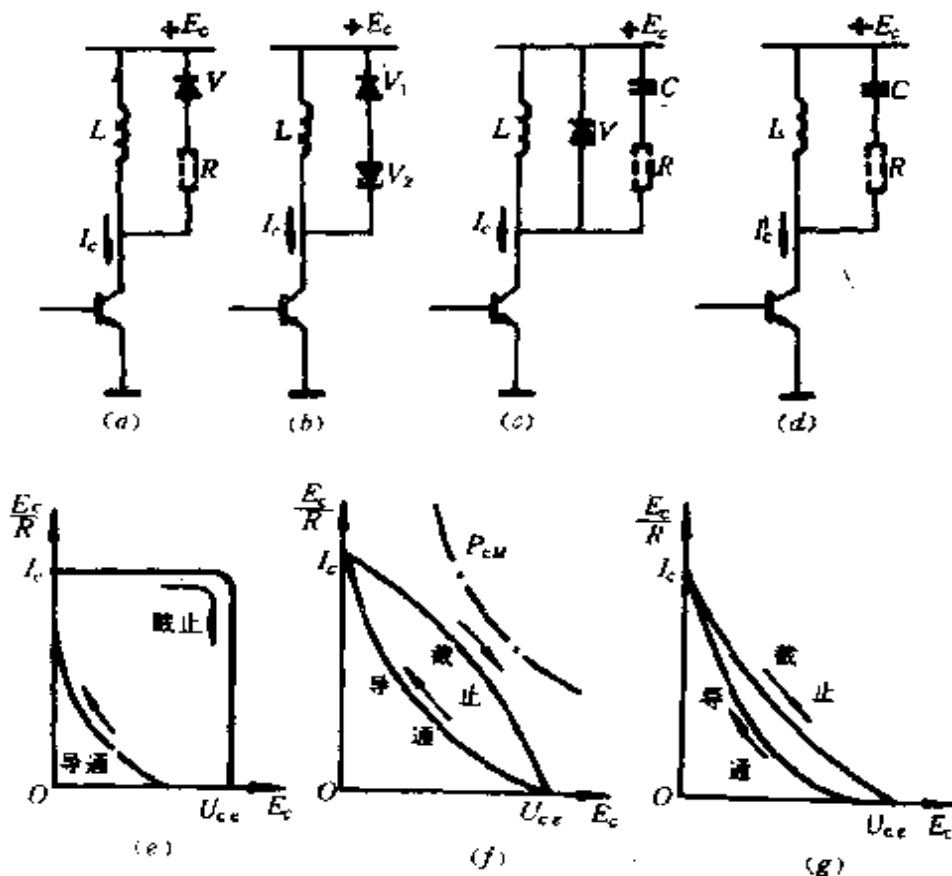


图 14-40 过电压抑制线路及晶体管导通截止过程中  $I_c$  和  $U_{ce}$  的变化曲线

(1) 对于图 14-40(a): 在上述“晶体管电子继电器元件参数的选择”内容中已叙述。

(2)对于图 14-40(b);二极管仍按上述原则选择;稳压管的功率应考虑流过的最大电流时必须低于其允许的耗散功率,稳压管的稳定电压  $V_w$  可按下式计算:

$$V_w = E_c (N - 1)$$

式中:  $N$ ——允许电压上升系数,等于  $U_m/E_c$ ;

$V_w$ ——稳压管稳定电压,其值应小于  $BV_{c0}$ 。

(3)对于图 14-40(c)和(d):电源合闸瞬间(电容相当于短路),充电电流应小于晶体管集电极最大允许电流  $I_{CM}$ ,若不能满足,可串接一个限流电阻。同时还要考虑防止电容电感可能产生自激振荡。

### 2. 功率放大器连接白炽灯泡时的限流计算

白炽灯泡灯丝的冷态电阻要比燃亮后的热态电阻大 8~10 倍,因而放大器接通灯泡的瞬间,其电流要比热态电流大 8~10 倍。如果根据灯泡的标称功率(热态功率)计算出的热态电流来选择晶体管的工作电流,则在接通灯泡的瞬间,可能会损坏晶体管,这时需采取限流措施,见图 14-41。

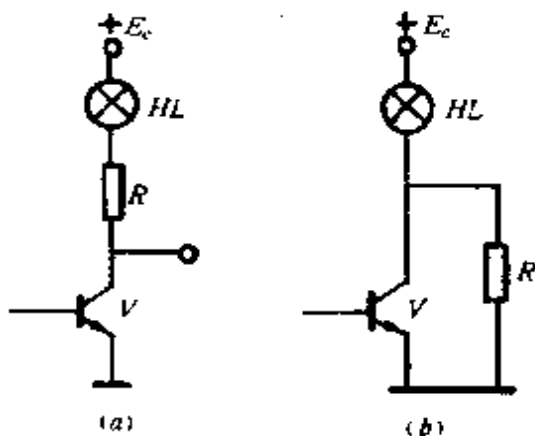


图 14-41 限制灯泡冷态电流的方法

(a)串联电阻 (b)预热灯丝

### 限流电阻 $R$ 的计算

(1)对于图 14-41(a):方法一:灯泡采用比电源电压  $E_c$  低一级的电压,其差值则由  $R$  降压;方法二:串联电阻压降按  $0.1E_c$  来选择,其电阻  $R$  能降低灯泡的工作电压,该方法可提高灯泡的使用寿命。

(2)对于图 14-41(b):当  $V$  截止时, $R$  与灯泡串联,使灯泡上的电压降约为  $(0.1 \sim 0.2)E_c$ ,灯泡中流过少量预热电流但又不燃亮。

### 十六、发光二极管回路限流电阻的计算

发光二极管主要用作电源、音频和信号状态的指示,以及数字符号的显示。

#### 1. 驱动电路形式

发光二极管可以用直流、交流和脉冲等电流驱动,其典型电路如图 14-42 所示。

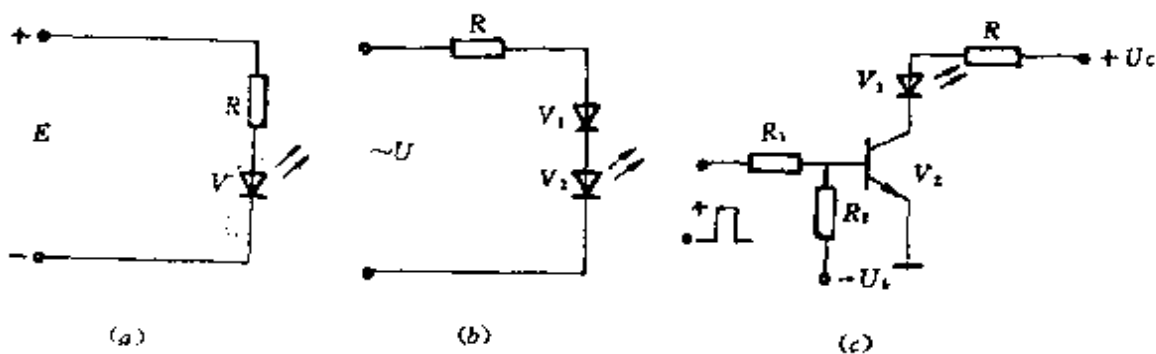


图 14-42 发光二极管驱动电路

(a)直流驱动 (b)交流驱动 (c)脉冲驱动

#### 2. 限流电阻计算

(1)直流驱动时〔图 14-42(a)〕:

$$R = \frac{E - V_F}{I}$$

式中： $R$ ——限流电阻( $k\Omega$ )；

$E$ ——电源电压(V)；

$V_F$ ——发光二极管正向压降(V)；

$I_F$ ——发光二极管工作电流(mA)。

(2)交流驱动时〔图 14-42(b)〕：

$$R = \frac{U_m - (V_1 + V_F)}{I_{Fm}}$$

式中： $U_m$ ——交流电压的峰值(V)；

$V_1$ ——二极管正向压降(V)；

$I_{Fm}$ ——发光二极管最大工作电流(mA)。

图中二极管  $V_1$  是用来保护发光二极管在交流负半周时不被击穿。

(3)脉冲驱动时〔图 14-42(c)〕：

$$R = \frac{U_s - (U_{ces} + V_F)}{I_{Fm}}$$

式中： $U_s$ ——电源电压(V)；

$U_{ces}$ ——三极管饱和导通时的管压降(V)；

其它符号同前。

### 3. 注意事项

(1)发光二极管的最大工作电流与环境温度关系极大,如磷化镓管,温度低于  $25^{\circ}\text{C}$  时,  $I_{Fm}$  为  $30\text{mA}$ ,当温度高于  $80^{\circ}\text{C}$  时,  $I_{Fm}$  为零。用于室温下,一般取发光二极管的工作电流  $I_F \leq 1/5 \sim 1/3 I_{Fm}$  为宜。

(2)发光二极管的反向耐压低,一般为  $6\text{V}$  左右。为保护管子免受击穿,可与发光二极管并联一只反向保护二极管。

## 第六节 触发电路、振荡器和变流器等计算

### 一、单结晶体管触发电路的计算



单结晶体管张弛振荡器如图 14-43 所示。

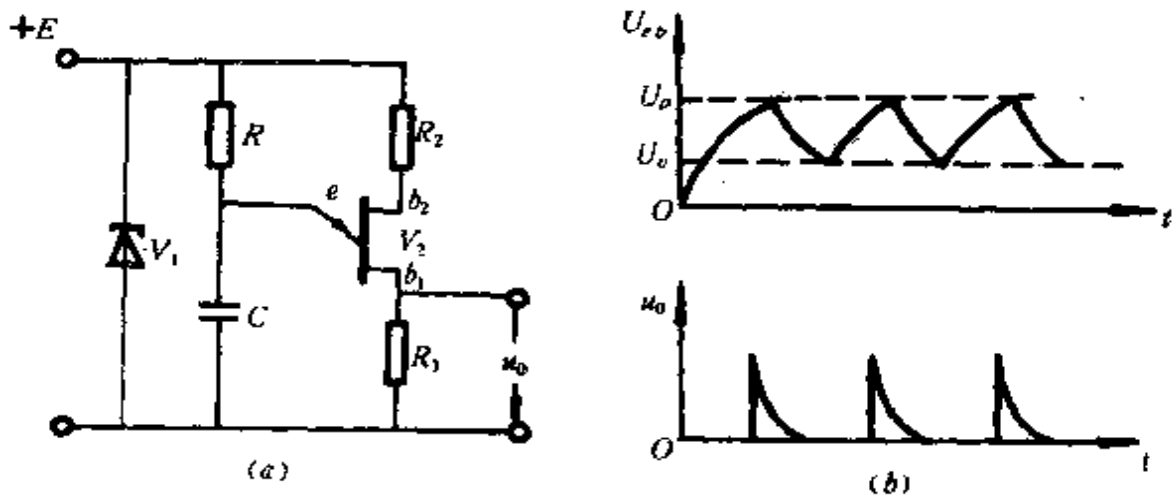


图 14-43 单结晶体管张弛振荡器

(a) 振荡器典型线路 (b) 波形图

### 1. 电容 $C$ 的选择

电容  $C$  的容量太小, 储存的电能不能足, 放电脉冲就窄, 不易触开可控硅;  $C$  的容量太大, 这将与  $R$  的选择产生矛盾。一般  $C$  的选用范围为  $0.1 \sim 1 \mu\text{F}$ , 触发大容量的可控硅时可选大些。

### 2. 放电电阻 $R_1$ 的选择

$R_1$  的阻值太小, 会使放电太快, 尖顶脉冲过窄, 不易触发导通可控硅;  $R_1$  的阻值太大, 则漏电流 (约几 mA) 在  $R_1$  上的电压降就大, 致使可控硅误触发 (可控硅的不触发电压约为  $0.15 \sim 0.25\text{V}$ )。一般  $R_1$  的选用范围为  $50 \sim 100 \Omega$ 。

### 3. 温度补偿电阻 $R_2$ 的选择

因为单结晶体管的峰值电压为  $U_p = \eta U_M + U_D$ , 其中, 分压比  $\eta$  几乎与温度无关,  $U_p$  的变化是由等效二极管的正向压降  $U_D$  引起,  $U_D$  具有  $-2\text{mV}/^\circ\text{C}$  的温度系数。  $U_p$  变化会引起可控硅的通导角改变, 这是不允许的。为了稳定  $U_p$ , 接入电阻  $R_2$ , 此

时基极间的电压将为

$$U_{bb} = \frac{R_{bb}}{R_1 + R_2 + R_{bb}} E$$

式中： $R_{bb}$ ——基极间电阻( $\Omega$ )。

$R_{bb}$ 具有正的温度系数，只要适当选择  $R_2$  的数值，便可使  $nU_{bb}$  随温度的变化恰好补偿  $U_D$  的变化量。

$R_2$  一般选用 300~400 $\Omega$ 。

#### 4. 充电电阻 $R$ 的选择

为了获得稳定的振荡， $R$  的阻值应满足：

$$\frac{U_{bb} - V_v}{I_v} < R < \frac{U_{bb} - U_p}{I_p}$$

式中： $U_v$ 、 $U_p$ ——谷点和峰点电压(V)；

$I_v$ 、 $I_p$ ——谷点和峰点电流(A)。

为了便于调整， $R$  一般由一只固定电阻和一只电位器串联而成。

振荡器的振荡频率按下式计算：

$$f = \frac{1}{RC \ln \frac{1}{1-\eta}}$$

式中： $f$ ——振荡频率(Hz)；

$R$ ——电阻( $\Omega$ )；

$C$ ——电容(F)。

#### 5. 分压比 $\eta$ 的选择

一般选用单晶体管的分压比  $\eta$  为 0.5~0.85。 $\eta$  太大，触发时间容易不稳定；太小，脉冲幅值又不够高。

#### 6. 稳压管 $V_1$ 的选择

稳压管的工作电压  $V_w$  若选得太低，会使输出脉冲幅度减小造成不触发；选得太高(超过单晶体管的耐压，即 30~60V，或使触发脉冲幅值超过可控硅控制极的允许值，即 10V)，会损坏单晶体管或可控硅。一般选用 20V 左右。

## 二、射极耦合单稳态触发器的设计

下面以整形器为例介绍一般的设计原则。

**例 14-14** 试设计一个将脉冲信号进行整形的射极耦合触发器。要求输出低电位不超过 3V、输出幅度  $U_m > 4V$ 、最高工作频率  $f$  为 20kHz、输出波形的边沿小于 100ns，负载为射极输出器。

**解** 设计步骤如下：

(1) 电路选择：根据给定的技术指标，选用图 14-44 的电路。

(2) 电源电压的选择：根据设计要求，输出低电位不等于零，所以只用一个电源即可。

$$E_c > 3 + 4 = 7(\text{V}), \text{ 选用 } 9\text{V}$$

输出低电位  $U_{\text{sat}} = 2\text{V}$ ，输出幅度为 7V。

(3) 晶体管选择：考虑波形边沿要好，故选用 3DK2A,  $BV_{\text{CEO}} \geq E_c$ ,  $f_T \geq 50f = 50 \times 20 = 1000(\text{kHz})$ ,  $\beta_{\text{min}} = 20$ 。

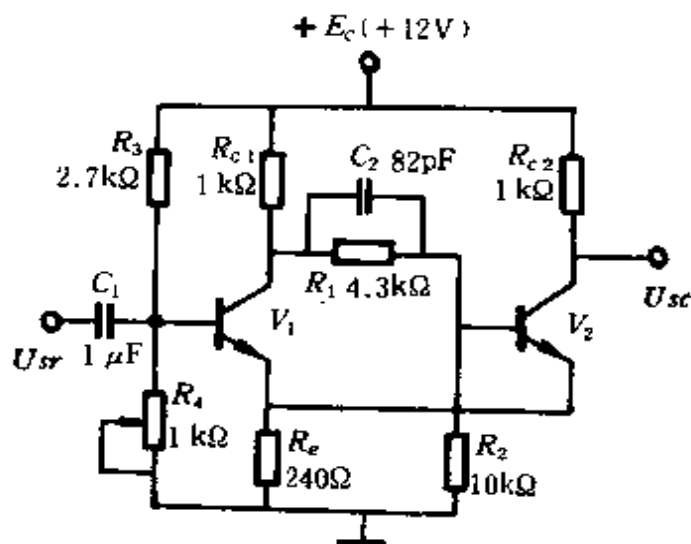


图 14-44 射极耦合触发器

(4) 确定电阻  $R_{c1}$ 、 $R_{c2}$ ：作为整形器应具有一定的稳定性，为

此,要求  $V_1$ 、 $V_2$  分别在两种稳态下处于饱和状态。可选  $R_{c1} = R_{c2}$ 。

$R_{c2}$  一般根据负载情况来选择,由于负载是射极输出器,负载电流很小,负载对电路输出影响很小。可取  $V_2$  的集电极电流为  $I_{c2} = (1/3 \sim 1/2)I_{CM}$ 。3DK2A 的  $I_{CM}$  为 30mA,选  $I_{c2}$  为 10mA。

$$R_{c2} = \frac{E_c - U_{scd}}{I_{c2}} = \frac{9V - 2V}{10mA} = 0.7k\Omega = 700\Omega$$

取  $R_{c1} = R_{c2} = 910\Omega$ 。

(5) 确定电阻  $R_e$ : 忽略  $I_{b2}$  时

$$R_e \approx \frac{U_{scd} - V_{ces}}{I_{c2}} = \frac{2V - 0.3V}{10mA} = 0.17k\Omega \\ = 170\Omega, \text{取 } 200\Omega$$

(6) 确定分压电阻  $R_1$  和  $R_2$ : 当  $V_1$  饱和时,  $V_2$  定能截止, 当  $V_1$  截止时, 要使  $V_2$  可靠饱和,  $R_2$  宜选得较大, 例如选  $I_{R2} = (0.2 \sim 1)I_{b2}$ , 由于  $I_{b2 \cdot \min} = I_{c2} / \beta_{\min} = 10/20 = 0.5(\text{mA})$ , 取  $I_{b2}$  为临界值的 2.5 倍, 则

$$I_{b2} = 2.5 I_{b2 \cdot \min} = 2.5 \times 0.5 \approx 1.3(\text{mA})$$

所以可选  $I_{R2} = 0.3\text{mA}$ , 取  $U_{b2} = 2.5\text{V}$ ,

$R_2 = U_{b2} / I_{R2} = 2.5\text{V} / 0.3\text{mA} = 8.3k\Omega$ , 取  $10k\Omega$  (这时实际  $U_{b2} = 3\text{V}$ )。

$$\text{而 } R_{c1} + R_1 = \frac{E_c - U_{b2}}{I_{b2} + I_{R2}} = \frac{9V - 3V}{1.3\text{mA} - 0.3\text{mA}} \\ = 3.75k\Omega$$

所以  $R_1 = 3.75 - 0.91 = 2.84(k\Omega)$ , 取  $2.7k\Omega$

(7) 确定电阻  $R_3$ 、 $R_4$ : 为了使接通电位连续可调, 采取设置基极回路 (即用分压电阻  $R_3$ 、 $R_4$ ) 的方法, 使  $V_1$  基极得到一个所需要的起始电压。现选  $R_3$  为  $2k\Omega$ ,  $R_4$  采用阻值为  $1k\Omega$  的电位器。

隔直电容  $C_1$  取  $1\mu\text{F}$ 。

(8)选择加速电容  $C_2$ :电阻  $R_1$  上并联加速电容  $C_2$  的目的是加速翻转过程,改善输出波形边沿。对于开关管来说, $C_2$  可取几十 pF,此外选  $C_2$  为 82pF。

计算结果:电源电压  $E_c=9V$ , $V_1$ 、 $V_2$  采用 3DK2A, $R_1=2.7k\Omega$ , $R_2=10k\Omega$ , $R_3=2k\Omega$ , $R_4=1k$  电位器, $R_{b1}=R_{b2}=910\Omega$ , $C_1=1\mu F$ , $C_2=82pF$ 。

### 三、双稳态触发器的设计

下面以计数用触发器为例介绍一般的设计原则。

**例 14-15** 试设计一个计数式双稳态触发器,要求输出脉冲幅度  $U_m \geq 9V$ ,最高工作频率  $f$  为 100kHz,在环境温度  $-20^\circ C \sim 50^\circ C$  的范围内正常工作。

**解**

(1)电路选择:根据给定的技术指标,可选用最基本的计数式触发器,如图 14-45 所示。

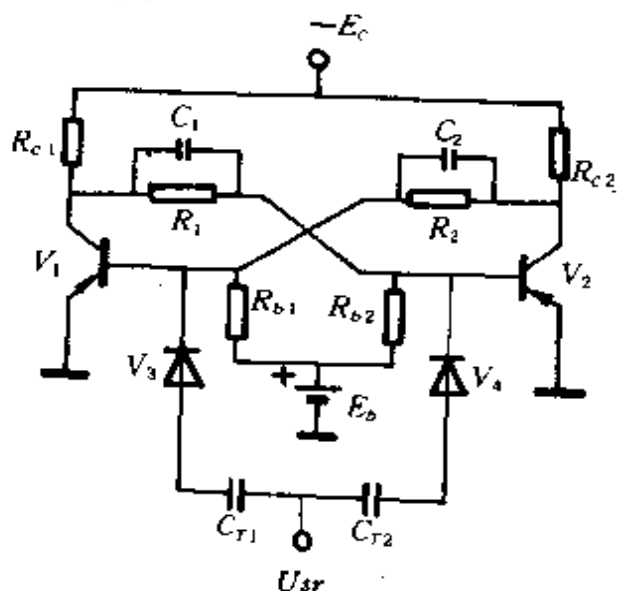


图 14-45 计数式双稳态触发器

(2)电源电压的选择:

$$E_c \geq 1.2U_m = 1.2 \times 9 = 10.8(V), \text{ 选用 } E_c = 12V$$

$$E_b \geq 0.2E_c = 0.2 \times 12 = 2.4(V), \text{ 选用 } E_b = 4V$$

(3) 晶体管选择: 所选晶体管要满足共基极截止频率  $f_c > (2 \sim 4)f = (200 \sim 400)\text{kHz}$  的要求, 低频管已能满足此要求, 选用  $3A \times 4$ ,  $BV_{cbo} \geq E_c$ ,  $P_{CM} \geq 3P_M$  ( $P_M$  为负载要求的功率),  $\beta_{\min} = 20$ 。

(4) 确定集电极电阻  $R_{c1}$ 、 $R_{c2}$ :

$$R_{c1} = R_{c2} \geq E_c / I_c = 12\text{V} / 8\text{mA} = 1.5\text{k}\Omega$$

$I_c$  为晶体管工作时的集电极饱和电流,  $I_c < I_{CM}$ , 这里取  $I_c = 8\text{mA}$ ;  $I_{CM}$  为晶体管集电极最大允许电流。

(5) 确定电阻  $R_{b1}$ 、 $R_{b2}$ :

$$R_{b1} = R_{b2} \leq E_b / I_{cbo} = 4\text{V} / 43\mu\text{A} = 93\text{k}\Omega$$

取  $R_{b1} = R_{b2} = 62\text{k}\Omega$

$I_{cbo}$  为最高温度时最大反向集电极电流

$$I_{cb0} = I_{cb025} \times 2^{\frac{t-25}{12}} = 10 \times 2^{2.1} = 43(\mu\text{A})$$

(6) 确定电阻  $R_1$ 、 $R_2$ :

$$R_1 = R_2 < \beta R_c$$

$$\frac{0.3}{\frac{E_b - 0.3}{R_b} - I_{cbo}} \leq R_1 \leq \frac{E_c - 0.3}{\frac{E_b + 0.3}{R_b} + \frac{I_c}{\beta}} - R_c$$

若为硅管, 上式中的 0.3 改为 0.7。

将具体数值代入上列公式, 得

$$R_1 < 20 \times 1.5 = 30(\text{k}\Omega)$$

$$\frac{0.3}{\frac{4 - 0.3}{62} - 0.043} \leq R_1 \leq \frac{12 - 0.3}{\frac{4 + 0.3}{62} + \frac{8}{20}} - 1.5$$

$$18.1\text{k}\Omega \leq R_1 \leq 23.4\text{k}\Omega$$

取  $R_1 = R_2 = 20\text{k}\Omega$

(7) 选择加速电容  $C$ : 加速电容一般可按下列取值范围选取: 低频小功率管, 取  $300 \sim 1000\text{pF}$ ; 高频小功率管, 取  $100 \sim 300\text{pF}$ ; 开关管, 取  $20 \sim 200\text{pF}$ 。

本例是低频小功率管,取  $C=520\text{pF}$ 。

(8) 选择触发电容  $C_T$ :

$$C_T = (1.5 \sim 2)Q_g / U_{sr} = (1.5 \sim 2) \times 3000 / 5 \\ = 900 \sim 1200(\text{pF}), \text{取 } 1000\text{pF}$$

$Q_g$  为晶体管由饱和至截止所放出的电荷,可用电荷参数测试仪测得,此处  $Q_g$  为  $3000\mu\text{C}$ ;  $U_{sr}$  为触发脉冲电压幅度,取  $U_{sr}$  为  $5\text{V}$ 。

#### 四、多谐振荡器的计算

1. 检查多谐振荡器是否满足条件的计算

简单的多谐振荡器电路如图 14-46 所示。

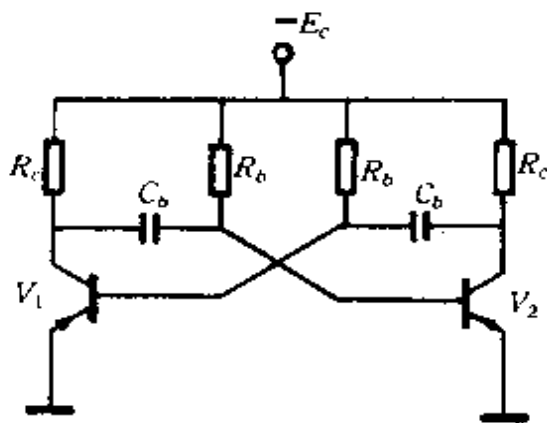


图 14-46 简单的多谐振荡器

(1) 检查是否满足饱和条件:多谐振荡器属无稳态电路,它通过正反馈的连锁反应达到某一暂稳态状态。一管饱和导通的条件是:

$$I_b > I_{bs}$$

由于

$$I_b = E_c / R_b$$

$$I_{bs} = I_{cs} / \beta = E_c / (R_c \beta)$$

故导通条件可改写为

$$\beta > R_b / R_c$$



若检查电路参数是否满足上式要求,可将一耦合电容断开,如图打“×”号处,如果此时两只管子的  $U_{c1} \approx 0$ 、 $U_{c2} \approx 0$ ,则说明满足  $R_c \beta > R_b$  的条件。

(2)检查电路能否起振:将断开处连接,合上电源。若振荡器的两侧完全对称,则两管集电极电位应为  $U_{c1} = U_{c2} \approx E_c/2$ 。如果测得  $U_{c1} = U_{c2} \approx 0$ ,则说明两管均处于饱和状态,不起振。这时应更换  $\beta$  值较小的管子,或者增大电阻  $R_b$  试试。注意, $R_b$  增大后,若要保持振荡频率不变,应调整耦合电容  $C_b$  的数值。

(3)检查输出电压的大小和对称性是否满足要求:输出电压  $U_{o1}$  和  $U_{o2}$  不对称的原因是两侧回路参数不对称,应着重检查耦合电容是否严重漏电。

输出电压值不符合要求的原因有:

- ①电源电压变化。
- ②波形畸变。

当晶体管的  $\beta$  值太小时,集电极电压有可能出现畸变。

## 2. 基极定时自激多谐振荡器的设计例

**例 14-16** 试设计一个多谐振荡器。要求输出脉冲幅度  $U_m \geq 10V$ 、振荡频率  $f$  为  $70kHz$ ,输出脉冲的上升沿  $t_r \leq 0.5\mu s$ ,输出脉冲的下降沿  $t_f = 0.6\mu s$ 、在环境温度  $-20^\circ C \sim 50^\circ C$  的范围内正常工作。

**解**

(1)电路选择:由于下降沿要求较高,电路中加入“校正”二极管,故选用图 14-47 电路。

(2)电源电压的选择:选择方法与双稳态触发器相同,选  $E_c = 12V$ 。

(3)晶体管选择:由于振荡频率不高,可以选用低频管,如  $3A \times 4$ 。

(4)确定集电极电阻  $R'_{c1}$  ( $R'_{c2}$ ) 和  $R''_{c1}$  ( $R''_{c2}$ ):选择方法与双



稳态触发器相同,取  $R_{c1} = R'_{c1} // R''_{c1} = 2\text{k}\Omega$ , 取  $R'_{c1} = R'_{c2} = R''_{c1} = R''_{c2} = 2\text{k}\Omega$ 。

(5) 确定电阻  $R_{b1}$ 、 $R_{b2}$  :

$$R_{b1} = R_{b2} = \beta_{\min} R_c = 20 \times 1 = 20 (\text{k}\Omega)$$

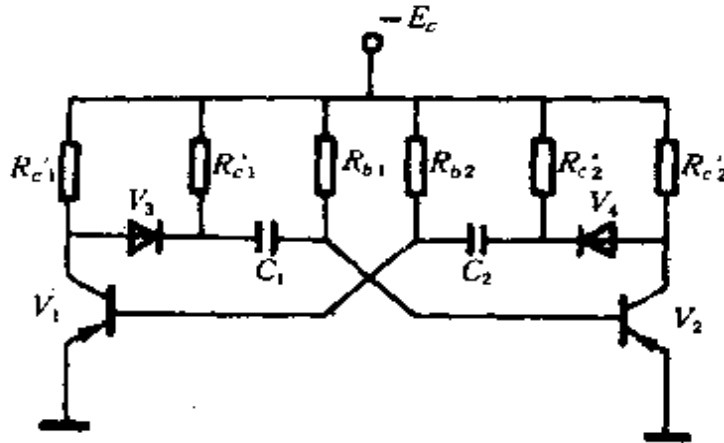


图 14-47 基极定时自激多谐振荡器

(6) 选择耦合电容  $C_1$ 、 $C_2$  :

$$C_1 = C_2 = \frac{1}{1.4fR_{b1}} = \frac{1}{1.4 \times 70 \times 10^3 \times 20 \times 10^3} = 511 (\text{pF})$$

(7) 确定振荡频率: 多谐振荡器的振荡频率可按下式计算:

$$f = \frac{1}{T_1 + T_2} \approx \frac{1}{0.7R_{b1}C_2 + 0.7R_{b2}C_1}$$

当  $R_{b1} = R_{b2}$ 、 $C_1 = C_2$  时

$$f = \frac{1}{1.4R_{b1}C_2}$$

(8) 检验耦合电容  $C$  是否满足不等式  $C > C_{\min}$ : 按下式求出电容的最小值:

$$C_{\min} = (1.5 \sim 2) Q_g / E_c = (1.5 \sim 2) \times 3000 / 12 = 375 \sim 500 (\text{pF}) < C = 511 \text{pF} \quad \text{满足要求。}$$

$Q_g$  为晶体管由饱和至截止所放出的电荷, 可用电荷参数测

试仪测得,此处  $Q_g$  为  $3000\mu\text{C}$ 。

(9) 检验上升沿  $t_s$ : 上升沿按下式计算:

$$t_s = \frac{2C_{c1}R_{c1}}{1-n} + C_H R_{c1}$$

$C_{c1}$  为集电结势垒电容(F);  $C_H$  为电路的分布电容(F);  $n$  为常数,对于突变结,  $n=0.5$ 。

对晶体管  $3A \times 4$ , 其  $C_{c1}=40\text{pF}$ , 设电路的  $C_H$  为  $50\text{pF}$ , 则

$$t_s = \frac{2 \times 40 \times 10^{-12} \times 2 \times 10^3}{1-0.5} + 50 \times 10^{-12} \times 2 \times 10^3$$

$$\approx 0.42 \times 10^{-6}(\text{s}) = 0.42\mu\text{s} < 0.5\mu\text{s} \text{ 满足要求。}$$

(10) 检验下降沿  $t_z$ : 由于采用了“校正”二极管, 其下降沿与上升沿接近, 也能满足要求。

常用非正弦波振荡器电路及频率计算公式, 见表 14-36。

### 五、LC 振荡器的比较

LC 振荡器的比较, 见表 14-37。振荡器的计算步骤如下:

(1) 选定振荡频率。如用于接近开关的 LC 振荡器, 振频一般在几十 kHz 至几百 kHz。

(2) 由表 14-37 中的计算公式, 求得 LC 乘积。

(3) 按以下原则选定 C 和 L 值:

① 品质因数  $Q = \frac{1}{R} \sqrt{\frac{L}{C}}$ ,  $L$  大,  $Q$  高, 但  $L$  过大, 则易引起寄生振荡, 反而不好。

② C 一般取  $1000 \sim 4700\text{pF}$ ; 对于电容三点式振荡器, 可取  $C_1/C_2=0.01 \sim 0.5$ , 线圈匝数一般取 100 匝左右; 对于电感三点式振荡器,  $L_2/L_1=1/7 \sim 1/3$ 。

### 六、晶体管直流变换器的设计

典型的单管直流变换器如图 14-48 所示。图中  $W_p$  是变压器初级绕组,  $W_f$  是反馈绕组,  $W_s$  是次级绕组。电阻 R 提供电路初始的直流注入, 电容 C 起交流旁路作用。

表 14-36 常用非正弦波振荡器及频率计算公式

类别	名称	电路图	波形	振荡频率
方波振荡器	自激多谐振荡器			$f = \frac{1}{T} = \frac{1}{T_1 + T_2}$ $= \frac{1}{0.69(C_1 R_{b2} + C_2 R_{b1})}$ <p>若 <math>R_{b1} = R_{b2} = R, C_1 = C_2 = C</math>, 则</p> $f = \frac{1}{1.38RC}$
脉冲波振荡器	变压器间歇振荡器			$f = \frac{1}{T} = \frac{1}{T_1 + T_2}$ $= \frac{1}{\pi \sqrt{L_0 C_0} \cdot R_0 C_0 \ln(1 + \frac{L_1}{L_0})}$
	单结晶体管间歇振荡器			$f = \frac{1}{RC \ln \frac{1}{1-\eta}}$ <p><math>\eta</math> 为单结晶体管的分压比</p>

(续表)

类别	名称	电路图	波形	振荡频率
锯齿波 振荡器	利用多谐振荡器的锯齿波振荡器			$f = \frac{1}{2RC}$
	利用间歇振荡器的锯齿波振荡器			$f = \frac{1}{T} = \frac{1}{T_1 + T_2}$ $= \frac{1}{RC + \pi \sqrt{L_2 C_2}}$

LC 振荡器的比较

表 14-37

电路种类	电容三点式振荡器	电感三点式振荡器	变压器反馈式振荡器
电路形式			
振荡频率	$f_0 = \frac{1}{2\pi \sqrt{L \frac{C_1 C_2}{C_1 + C_2}}}$	$f_0 = \frac{1}{2\pi \sqrt{(L_1 + L_2 + 2M)C}}$	$f_0 = \frac{1}{2\pi \sqrt{LC}}$
振荡条件	$\frac{C_2}{C_1} \leq \beta$	$\frac{L_1 + M}{L_2 + M} \leq \beta$ $\frac{W_1}{W_2} \leq \beta (\text{磁芯线圈})$	$\beta F \geq 1$
特点	(1) 振荡波形好 (2) 频率稳定性好 (3) 振荡频率高	(1) 容易起振 (2) 高次谐波多 (3) 振荡波形差	特性一般 (较少采用)

注:  $\beta$ ——电流放大倍数;  $F$ ——反馈系数;  $M$ ——互感。

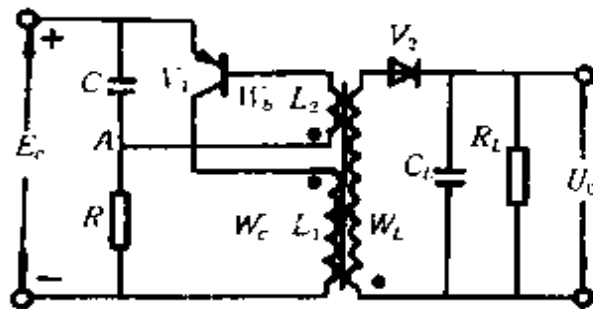


图 14-48 典型的单管直流变换器

1. 确定振荡频率  $f$

$$f = \frac{1}{T} = \frac{1}{t_1 + t_2}$$

$$t_1 = I_{cm} / E_c$$

$$t_2 = L_1 I_{cm} \frac{W_L}{W_c U_0}$$

式中： $f$ ——振荡频率(Hz)；

$T$ ——变换器的周期(s)；

$t_1, t_2$ ——晶体管的导通时间和截止时间(s)；

$L_1$ ——变压器初级绕组电感(H)；

$I_{cm}$ ——集电极电流峰值(A)；

$U_0$ ——负载两端的电压(V)。

在一般情况下，变换器的频率可达几 kHz 至几十千 kHz。要减小变换器的体积，可将振荡频率提高，但提得太高，变压器损耗会增大。一般认为，当输出电压较高而输出功率不大时，可将振荡频率取得高些(15~40kHz)；当输出功率较大，电压较低时，则可将振荡频率取得低些(几 kHz)。

2. 晶体管选择

(1)单管电路(图 14-48)：管子的  $P_{CM} \geq (3 \sim 5)P_M$ 。

(2)推挽电路： $P_{CM} > 0.5P_M$ 。

式中： $P_M$ ——负载要求功率。

$$BV_{ceo} > 2E_c$$

$$f_T \geq 50f$$

式中： $f$ ——变换器的工作频率。

所选取的管子应有尽可能小的饱和压降，小的反向漏电流及较大的 $\beta$ 。

### 3. 确定振荡启动元件 $R$ 、 $C$

一般  $R$  可取几百  $\Omega$  到几  $k\Omega$ 。 $R$  取得太小，电源功耗会增大，电路工作效率会降低，甚至会烧毁管子。

电容  $C$  一般可取  $0.1 \sim 1\mu F$ ，具体数值可由实验决定，以获电路的最高效率。

### 4. 滤波器的选择

(1) 整流电压低压时：当整流电压小于  $1kV$  时，可由以下经验公式确定滤波电容

$$C_L = (1 \sim 2) \times 10^6 \frac{I_o}{fU_o S_o}$$

(2) 整流电压高压时：

$$C_L = (5 \sim 10) \times 10^6 \frac{I_o}{fU_o S_o}$$

式中： $C_L$ ——滤波电容电容量( $\mu F$ )；

$I_o$ 、 $U_o$ ——输出电流和电压(A、V)；

$S_o$ ——脉动振幅与整流电压  $U_o$  的百分比。

### 5. 变压器设计

(1) 变压器铁芯的选择：对于  $f$  在  $1kHz$  以下的变压器，可用硅钢片作铁芯，其饱和磁通密度  $B_s$  为  $1.00 \sim 2.00T$ ；对于  $f$  为几  $kHz$  时，可用坡莫合金作铁芯，其  $B_s$  为零点几  $T$ ；对于更高频率的变压器时，可用铁氧体磁芯，其  $B_s$  为  $0.10 \sim 0.20T$ 。E 型磁芯如图 14-49 所示。

当变压器效率  $\eta$  为  $0.75 \sim 0.9$ 、导线电流密度  $j$  为  $2.5 \sim 3A/mm^2$  时，有

$$SQ = \frac{0.72 \times 10^2}{fB_s} P_s$$

式中:  $S$ — 铁芯有效截面积 ( $\text{cm}^2$ ),  $S = aB$ ;

$Q$ — 窗口面积 ( $\text{cm}^2$ ),  $Q = hC$ ;

$B_s$ — 铁芯的饱和磁通密度 (T);

$P_s$ — 变压器的标称功率 (VA)。

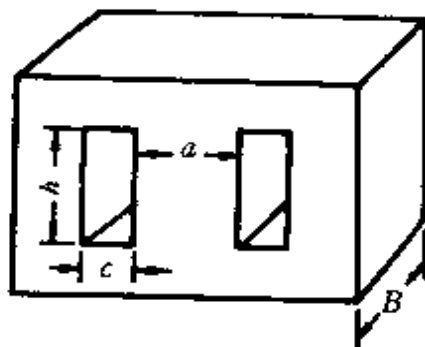


图 14-49 采用铁氧体的 E 型磁芯

变压器输出绕组上的负载为电阻或桥式整流(或倍压整流器)时,有

$$P_s \approx 1.3 I_o U_2$$

如果输出绕组上的负载为全波整流时,有

$$P_s \approx 2.1 I_o U_2$$

式中  $I_o$ — 输出电流 (A);

$U_2$ — 输出绕组(全波时为一半)的电压有效值 (V)。

(2) 变压器各绕组匝数的确定及导线选择:

① 变压器初级绕组匝数  $W_c$ :

$$W_c = \frac{U_c \times 10^4}{4fB_s S} \approx \frac{E_c \times 10^4}{4fB_s S}$$

式中:  $U_c$ — 集电极线圈上的交流电压峰值 (V);

$E_c$ — 电源电压 (V);

其它符号同前。

上式对推挽电路较为合适,单管电路也可参考。

② 反馈绕组匝数  $W_b$ :

$$W_b = W_c U_b / U_c$$

式中:  $U_b$ — 反馈电压峰值,一般取  $U_b \approx (1/2 \sim 1/4) E_c$ 。

③ 初级绕组匝数  $W_l$ :



$$W_L = W_c U_{0m} / U_c$$

式中： $U_{0m}$ ——次级绕组上峰值电压(V)。

当考虑到绕组的直流电阻时，绕组匝数应适当增加。

④导线直径  $d$  的选择：

$$d = 1.13 \sqrt{I/j} \text{mm}$$

式中： $I$ ——变压器绕组的电流有效值(A)；

$j$ ——电流密度(A/mm<sup>2</sup>)。

当绕组上的电压超过 1000V 时，导线直径应不小于 0.06mm。导线可用油基漆包线，在高压变压器的次级绕组中需采用高强度漆包线。

(3)变压器绕组的绕法：由于变换器的工作频率一般总在几 KHz 以上，因此绕制应特别注意。常用的绕法有：

①双线平绕法(图 14-50)：采用推挽电路时，初级绕组可采用图 14-50(a)绕法，而反馈绕组分绕在二端。

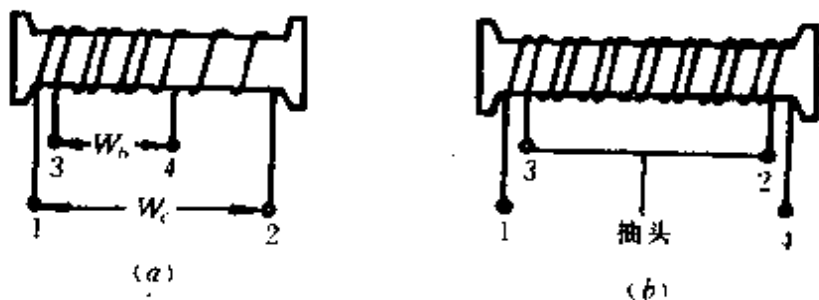


图 14-50 双线平绕法

②蜂房式绕法：该绕法能使绕组层间的分布电容减小，特别适用于高频高压电路中，但变压器铁芯的内芯柱须选用圆形。

各绕组位置的安排一般是将次级绕组最内层的引出线接输出电压的低电位端，最外层次级绕组引出处接输出电压的高电位端。

(4)变压器的绝缘：在高频高压中，层间绝缘采用聚脂塑料薄膜纸，它具有耐压高(0.1mm 厚耐压达万伏)，吸湿性小的优

点。绕组间绝缘,常用聚脂薄膜青壳纸,0.15~0.2mm厚耐压为1500~2000V,且强度高。

骨架及引出线的接线板可用厚度为1.5mm以上的环氧酚醛玻璃布板。

线圈绕制后,在安装铁芯时要注意铁芯距次级绕组最外层绝缘纸之间应留有1mm以上的空隙,以免两者之间打火。变压器须经过浸渍处理,常用3404环氧树脂漆。为了进一步提高防潮性能,有时还可采用硅橡胶或环氧树脂灌注。

### 第七节 晶体管延时电路及计算

#### 一、三种基本的晶体管延时电路延时时间的计算

以下电路均为延时工作,瞬时复归电路。

##### 1. 普通晶体管时延电路(图14-51)

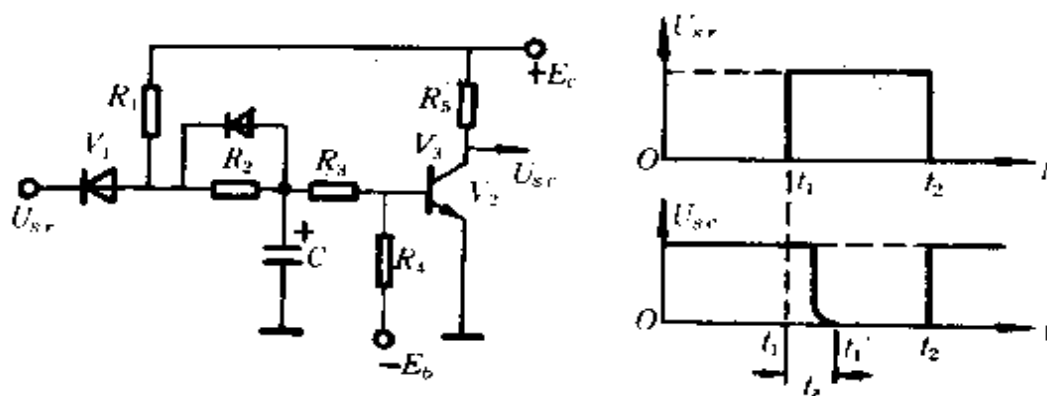


图14-51 普通晶体管延时电路

(1)工作原理:当输入 $U_{xr}$ 为高电位时,二极管 $V_1$ 截止,电源 $E_c$ 经 $R_1$ 、 $R_2$ 对电容 $C$ 充电,电容两端的电压 $U_c$ 由零逐渐上升,当 $U_c$ 达到一定值 $U_p$ 时,晶体管 $V_3$ 导通,输出 $U_{xc}$ 为低电位。当 $U_{xr}$ 为低电位时,电容 $C$ 便分别经 $V_2$ 、 $V_1$ 和 $R_3$ 、 $V_3$ 的基极-发射极入地放电。放电时间极短,可以忽略不计。

(2) 延时时间: 电容  $C$  两端的电压由零到达  $U_\varphi$  这段时间该电路的延时时间  $t_s$  (单位: s), 可按下式计算:

$$t_s = (R_1 + R_2)C \ln \frac{E_c}{E_c - U_\varphi}$$

2. 桥型延时电路 (图 14-52)

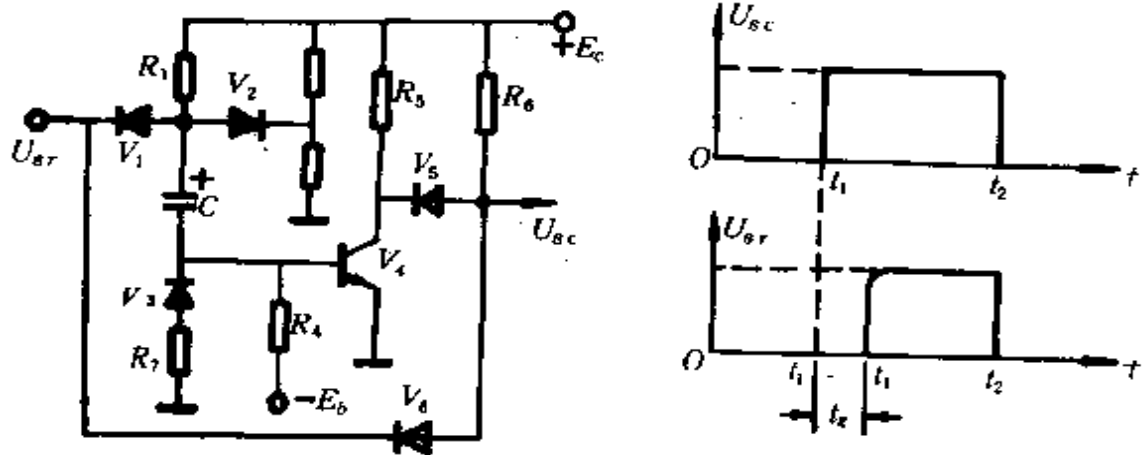


图 14-52 桥型延时电路

(1) 工作原理: 当  $U_{sr}$  为低电位时,  $V_4$  导通, 输出  $U_{sc}$  为低电位。当  $U_{sr}$  为高电位时, 电源  $E_c$  经  $R_1$  和  $V_4$  的基极-发射极对电容  $C$  充电, 充电电流使  $V_4$  导通, 故  $V_5$  导通, 输出仍为低电位。当  $C$  的两端电压逐渐升高, 使  $M$  点电位高于  $N$  点电位时,  $V_2$  导通, 电容器充电立即停止,  $V_4$  截止,  $V_5$  截止。输出  $U_{sc}$  为高电位。当  $U_{sr}$  又变为低电位时,  $V_6$  立即使  $U_{sc}$  瞬时变为低电位。

(2) 延时时间:  $V_4$  导通的时间即为该电路在输入高电位时的延时时间  $t_s$  (单位: s), 可按下式计算:

$$t_s = R_1 C \ln \frac{R_2 + R_3}{R_2}$$

3. 带射极耦合触发器的延时电路 (图 14-53)

(1) 工作原理: 当  $U_{sr}$  为高电位时, 其电位经  $V_1$ 、 $V_2$  对  $C$  充电。充电时间很短, 可忽略不计。因  $V_2$  箝位作用,  $N$  点电位约为 +1V, 当  $C$  充电完毕,  $M$  点电位接近输入电位。同时, 输入高电位也经  $V_1$ 、 $R_1$ 、 $V_3$  基极-发射极和  $R_7$  入地, 使  $V_3$  基极电位高于

射极耦合触发器的翻转电压  $V_f$ ,  $V_3$  导通,  $V_4$  截止, 输出高电位。

当  $U_{sr}$  变为低电位时, 电容  $C$  沿  $C_+$ 、 $R_1$ 、 $V_3$  基极-发射极、 $R_7$ 、地、 $E_c$ 、 $R_3$  和  $C$ , 使  $V_3$  继续导通,  $V_4$  截止。当  $P$  点放电电压低于  $V_f$  时,  $V_3$  截止,  $V_4$  导通, 输出  $U_{sc}$  为低电位。

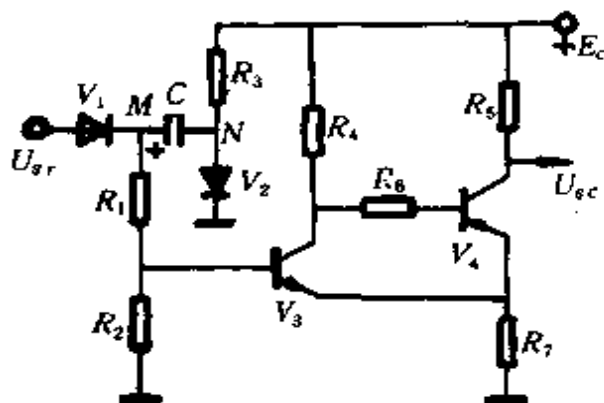


图 14-53 带射极耦合触发器延时电路

(2) 延时时间: 当输入端变为低电位瞬时至射极耦合触发器翻回的时间, 就是该延时电路在输入变低电位时的延时时间  $t_z$  (单位: s), 可按下式计算:

$$t_z = (R_1 + R_3)C \ln \frac{2E_c}{E_c - V_f}$$

## 二、几种晶体管延时电路和记忆电路的延时时间的计算

延时电路可分为延时动作、瞬时复归电路和瞬时动作、延时复归电路两大类。

### 1. 第一类电路: 延时动作、瞬时复归电路

(1) 导通管控制充电式时间电路(图 14-54):

①工作原理: 正常情况下输入  $U_{sr}$  为负电位,  $V_1$  导通,  $V_2$  导通,  $U_{MN}$  小于稳压管  $V_3$  的击穿电压,  $V_3$  截止, 输出  $U_{sc}$  为负电位。

当  $U_{sr}$  变为零电位时,  $V_1$  截止,  $V_2$  反向不导通, 电源  $-E_c$  经  $R$  对  $C$  充电,  $U_{MN}$  逐渐变负, 当达到一定值时,  $V_3$ 、 $V_6$  和  $V_5$  的发射结回路击穿,  $V_3$  导通, 输出  $U_{sc}$  变为零电位。从  $U_{sr}$  变为零电位至  $U_{sc}$  变为零电位的时间间隔  $t_r$  就是时间元件的延时时间。

② 一些元件的作用： $V_3$  决定时间电路的温度稳定性。一般选用大于 5.6V 的稳压管，因为大于 5.6V 的稳压管的起始击穿特性较好； $V_4$  具有正向特性随温度升高而减小的特性，能对稳压管的击穿电压  $V_w$  进行温度补偿； $V_6$  为温度补偿二极管，它有两个作用：

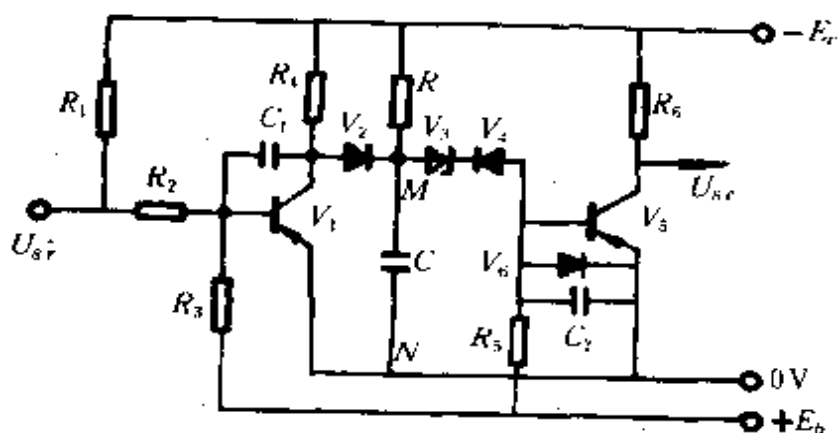


图 14-54 导通控制充电式时间电路

① 利用  $V_6$  的正向压降稳定  $V_5$  截止时的基极电位，减小它随温度的变差。

② 当  $V_5$  由截止变为导通时，利用  $V_6$  的反向电流随温度升高而增大来补偿  $V_5$  的  $\beta$  随温度升高而增大。

③ 延时时间。延时时间  $t_z$  (单位: s) 按下式计算：

$$t_z = RC \ln \frac{E_c}{E_c - U_\varphi} = RC \ln \frac{1}{1 - K}$$

式中： $R$  —— 电阻 ( $\Omega$ )；

$C$  —— 电容 (F)；

$E_c$  —— 电源电压 (V)；

$U_\varphi$  ——  $V_3$ 、 $V_4$  及  $V_5$  发射结串联回路的击穿电压 (V)；

$K$  —— 系数， $K = U_\varphi / E_c$ 。

当  $K = 0.63$  时， $t_z = RC$ ，时间特性较为稳定，并能获得最长

的整定时间  $t_{cmax}$ , 计算简单。

$$t_{cmax} = \frac{0.3\beta_2 R_5 R_6}{K \left( R_5 + \beta_2 \frac{E_b}{E_c} R_6 \right)}$$

在  $\beta_2$  较大时,

$$t_{cmax} \approx \frac{0.37E_c}{kE_b} R_5 C$$

式中:  $k$ ——可靠系数, 一般取 2;

$\beta_2$ —— $V_5$  的电流放大倍数;

$E_b$ ——反偏压值(V)。

④复归时间。当  $U_w$  又变为负电位时, 输出信号即瞬时返回 (约 1~2ms), 但整个电路的复归时间  $t_f$  (单位:s) 为

$$t_f = R_b C \ln \frac{U_w - (E_c - \beta_1 I_{b1} R_b)}{U_{MN} - (E_c - \beta_1 I_{b1} R_b)}$$

当  $K=0.63$  时

$$t_f = R_b C \ln \frac{\beta_1 I_{b1} R_b - 0.37E_c}{\beta_1 I_{b1} R_b - E_c}$$

式中:  $R_b$ ——为  $R$  与  $R_4$  的并联电阻( $\Omega$ );

$I_{b1}$ —— $V_1$  的基极电流(A);

$\beta_1$ —— $V_1$  的电流放大倍数;

$U_{MN}$ —— $MN$  稳态电压的近似值(V);

其它符号同前。

(2)截止管控制充电式时间电路(图 14-55):

①动作时间:

$$t_z = RC \ln \frac{E_c}{U_{MN}}$$

式中:  $U_{MN}$ —— $V_5$  由导通变为截止时  $MN$  间的电压(V)。

当  $U_{MN}/E_c = 0.37$  时,  $t_z = RC$ , 时间特性较为稳定, 并能获得最长的整定时间  $t_{cmax}$ , 计算简单。

$$t_{cmax} = \frac{0.37E_c \beta_2 R_6 R_7 C}{k(E_b \beta_2 R_7 + E_c R_6)}$$

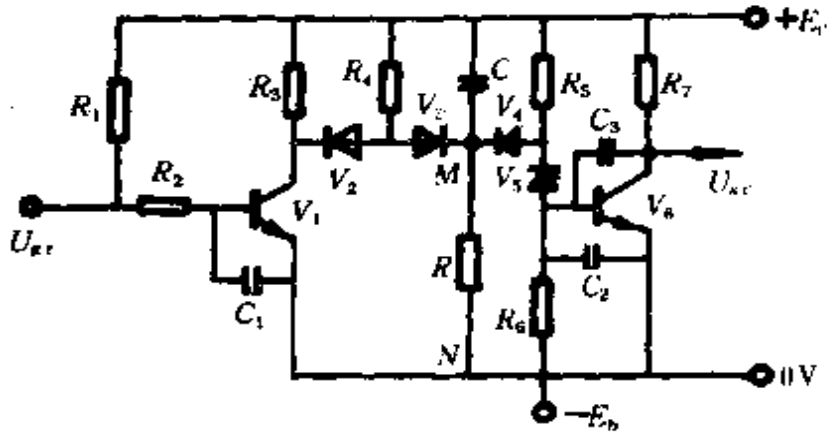


图 14-55 截止管控制充电式时间电路

在  $\beta_2$  较大时,

$$t_{zmax} = \frac{0.37}{k} \frac{E_c}{E_b} R_6 C$$

式中:  $k$ ——可靠系数,一般取 2。

②复归时间:输出信号的复归是瞬时的,整个电路的复归时间  $t_f$ (单位:s)为

$$t_f \approx 3R_4 C$$

(3)放电式时间电路(图 14-56)

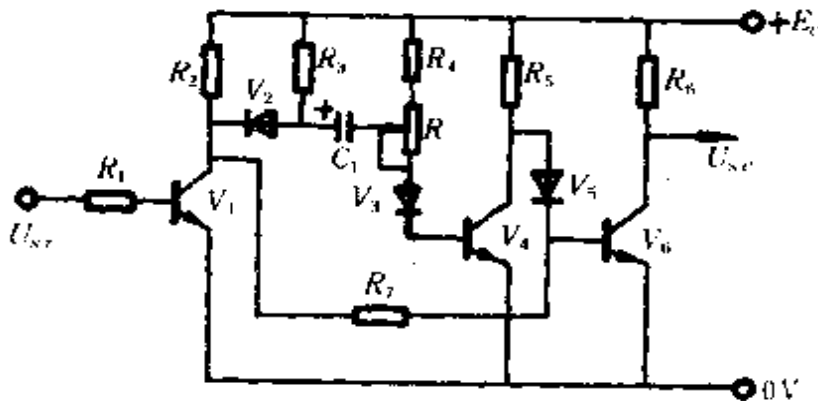


图 14-56 放电式时间电路

①动作时间

$$t_z = 0.7(R_c + R)C_1$$

②返回时间:输出信号的返回是瞬时的。电路的复归时间

$$t_f \approx 3R_3C_1$$

2. 第二类电路:瞬时动作、延时复归电路(记忆电路)

第二类电路又可分为前记忆和后记忆两类。前记忆电路为输入信号一到即动作,并开始计算记忆时间;后记忆电路为输入信号一到即动作,信号消失时开始计算记忆时间。

(1)放电式前记忆电路(图 14-57):

①前记忆时间:

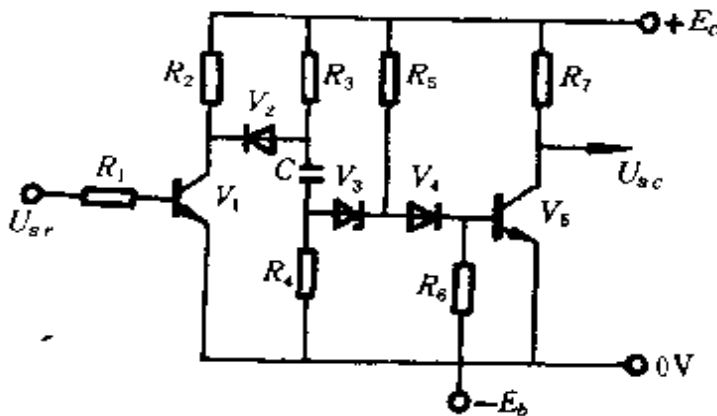


图 14-57 放电式前记忆电路

$$t_z = \frac{R_4 R_5}{R_4 + R_5} C_1 \ln \frac{(2R_4 + R_5)E_c - R_4 U_{jc}}{R_4 E_c + R_5 U_{jc}}$$

式中:  $U_{jc}$  ——  $V_3$  的击穿电压(V)。

②电路的返回时间:

$$t_f \approx 3(R_3 + R_4)C$$

(2)充电式前记忆电路(图 14-58):

①前记忆时间:

$$t_z = \frac{R_3 R_4}{R_3 + R_4} C_1 \ln \frac{E_c}{E_c - U_{jc}}$$



式中： $U_{\mu}$ —— $V_3$  的击穿电压(V)。

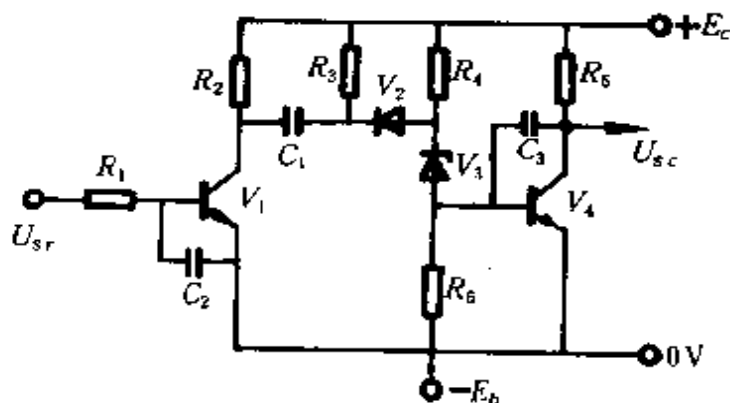


图 14-58 充电式前记忆电路

②电路的复归时间：

$$t_f \approx 3(R_2 + R_3)C_1$$

(3)放电式后记忆电路(图 14-59)：

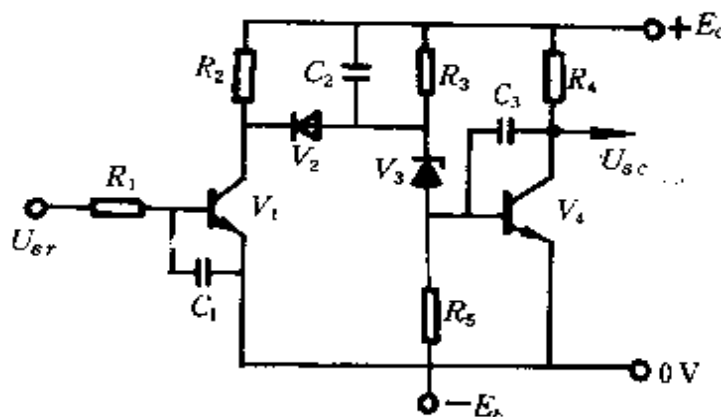


图 14-59 放电式后记忆电路

后记忆时间为

$$t_c = R_3 C_2 \ln \frac{E_c}{E_c - U_{jc}}$$

(4)充电式后记忆电路(图 14-60)：

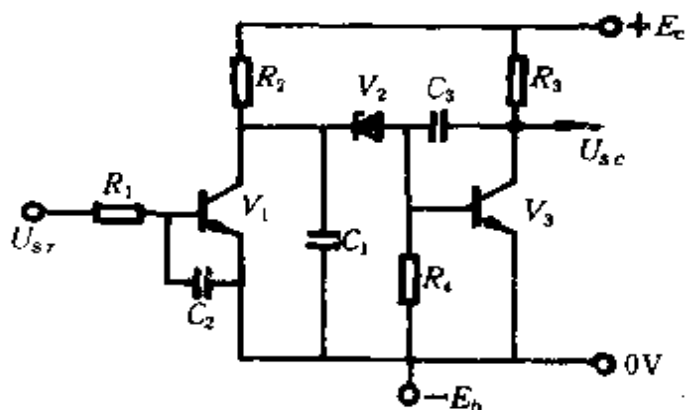


图 14-60 充电式后记忆电路

后记忆时间为

$$t_z = R_2 C_1 \ln \frac{E_c}{E_c - U_j}$$

### 三、可控硅延时电路

1. 截止延时(如图 14-61 至 14-66 所示)

所谓截止延时,即可控硅导通后经过一段延时后截止。

(1)图 14-61 电路:

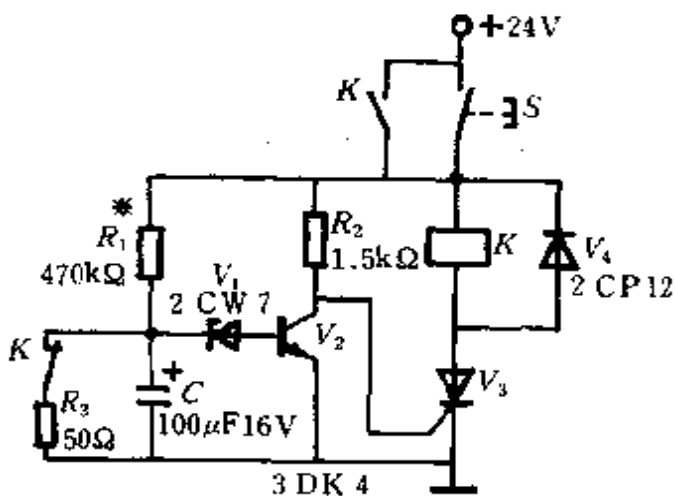


图 14-61 电路(一)

①工作原理:按动按钮 S,电源便经  $R_2$  向可控硅  $V_4$  提供一

控制电流,  $V_4$  导通, 继电器  $K$  吸合并自保; 同时常闭触点断开, 电源经  $R_1$  向  $C$  充电, 当  $C$  两端电压达到稳压管  $V_1$  的击穿电压时,  $V_2$  饱和导通, 于是  $V_4$  截止,  $K$  释放, 同时  $C$  通过  $R_3$  放电, 电路复原。

②延时时间: 10s 以内。改变  $R_1$  (或  $C$  或  $V_1$ ) 可调节延时量。

(2)图 14-62 电路:

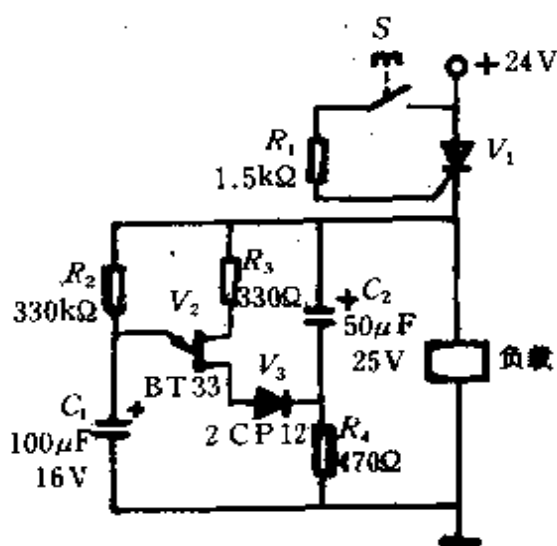


图 14-62 电路(二)

①工作原理: 按动按钮  $S$ ,  $V_1$  导通, 接通负载, 这时在负载上的电压降  $U_1$  约为 23V, 于是  $U_1$  对  $C_2$  充电; 同时  $U_1$  通过  $R_2$  对  $C_1$  充电, 当  $C_1$  的端电压达到单结晶体管峰值电压  $V_p$  (约 16V) 时,  $C_1$  经  $e-b$  结、 $V_3$  及  $R_4$  迅速放电, 从而使得负载上的电压升到大约  $(23+16)V$ , 于是  $V_1$  被反偏置而截止, 电路复原。

②延时时间: 数 min。改变  $R_2$  (或  $C_1$ ) 可调节延时量。

(3)图 14-63 电路:

①工作原理: 按动按钮  $S$ , 电源即通过  $R_4$  向  $V_1$  提供一控制极电流,  $V_1$  导通, 其常开触点闭合, 并自保; 常闭触点断开, 切断控制极回路。同时电源通过  $R_3$  对  $C_2$  充电,  $C_2$  两端很快充电到约 23V; 电源也经  $R_1$  对  $C_1$  充电, 经过一段延时,  $V_2$  饱和导通。

②点约为地电位,  $C_2$  上的电荷使④点电位相对于地为负值。  $C_2$  向负载  $K$  放电, 使电流减小到零,  $V_1$  截止,  $K$  释放, 电路复原。

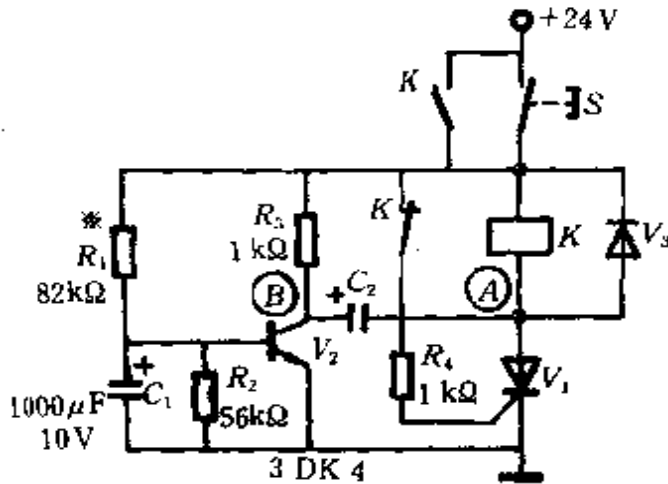


图 14-63 电路(三)

②延时时间: 数 s。改变  $R_1$  (或  $C_1$ ) 可调节延时量。

(4) 图 14-64 电路:

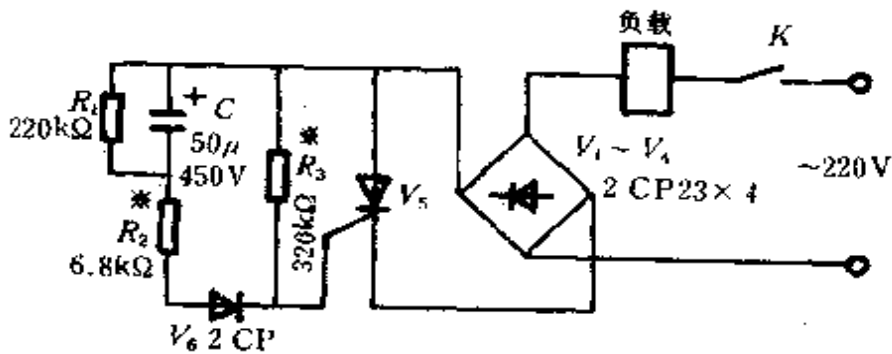


图 14-64 电路(四)

①工作原理: 当  $K$  吸合后, 交流电源便经负载在  $V_5$  阳极—阴极间建立一个经  $V_1 \sim V_4$  桥式整流后的脉动电压; 同时该电压对  $C$  充电,  $V_5$  控制极有一电流通过,  $V_5$  立即导通, 于是负载接通。随着  $C$  充电电流的减小, 经过一段延时,  $V_5$  不能再触发导

通,负载电源被切断。这种电路属于自断电路(图 14—65、图 14—66 也属自断电路)。

$R_1$  的作用是当  $K$  释放后,为  $C$  提供一放电回路,以便电路复原。

②延时时间:1~2min。改变  $R_1 \sim R_3$  可调节延时量。

(5)图 14—65 电路:

①工作原理:当  $K$  吸合后,电源便向  $C_1$  充电, $V_1$  即触发导通,直流电磁离合器  $Y$  吸合;随着  $C_1$  充电电流的减小,经过一段延时, $V_1$  不能再触发导通,切断  $Y$  电源, $Y$  释放。 $C_2$  为防干扰电容。

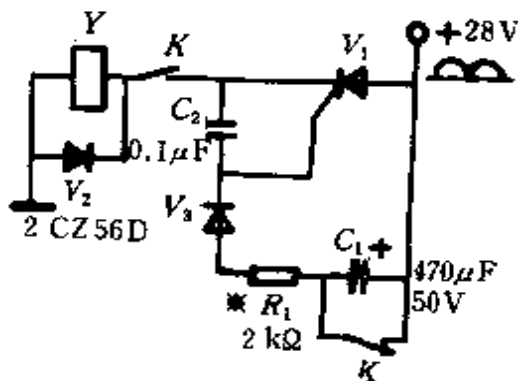


图 14—65 电路(五)

②延时时间:10s 以内。改变  $R_1$  (或  $C_1$ ) 可调节延时量。

(6)图 14—66 电路:

①工作原理:按动按钮  $S$ ,电源正半周电压便向  $C_2$  充电, $V_1$  即触发导通,直流继电器  $K$  吸合并自保;随着  $C_2$  充电电流的减小,经过一段延时, $V_1$  截止, $K$  释放,电路复原。 $C_2$  向  $R_2$  释放电荷。 $C_1$  有提高继电器  $K$  线圈两端的工作电压作用,此处不能用二极管代替。

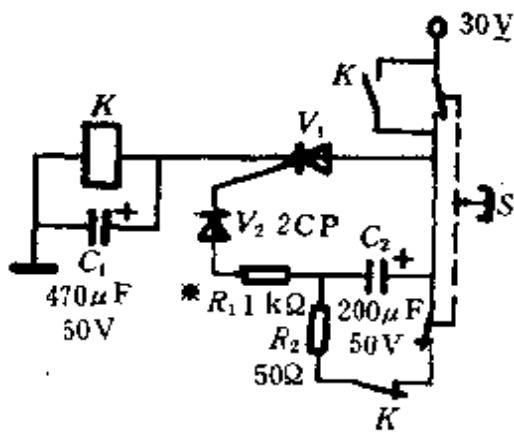


图 14—66 电路(六)

②延时时间:5s 以内。改变  $R_1$  (或  $C_2$ ) 可调节延时量。

2. 接通延时(如图 14-67 至图 14-74 所示)

所谓接通延时,即截止的可控硅经过一段延时后导通。

(1)图 14-67 电路:

①工作原理:当接触器  $K_1$  吸合,电源便经  $R_1$  对  $C$  充电,当  $C$  两端的电压达到  $V_2$  的击穿电压时, $V_1$  触发导通, $K_2$  吸合,其常闭触点断开控制极回路。当  $K_1$  释放后,电路复原。

②延时时间:10s 以内。改变  $R_1$ (或  $C$  或  $V_2$ )可调节延时量。

(2)图 14-68 电路:

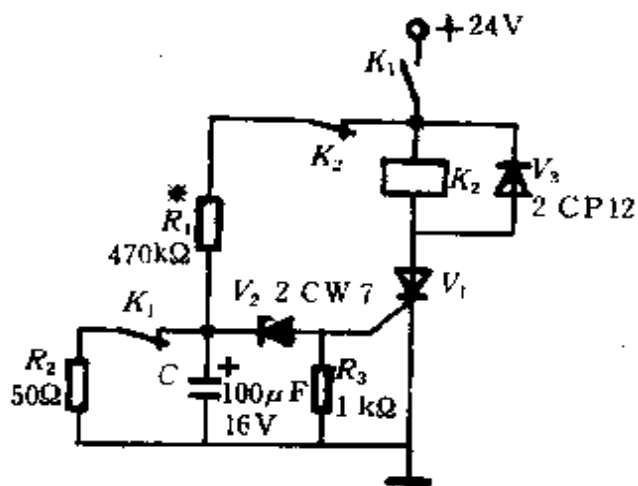


图 14-67 电路(七)

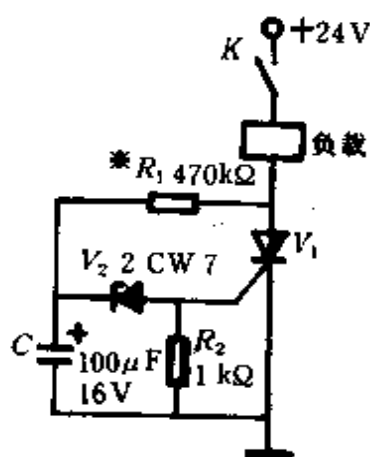


图 14-68 电路(八)

①工作原理:与图 14-67 电路类似,不同的是,当  $V_1$  导通后, $V_1$  阳极-阴极间的电压降约为 1V,使控制极不再有触发电压。

②延时时间:10s 以内。改变  $R_1$ (或  $C$  或  $V_2$ )可调节延时量。

(3)图 14-69 电路:

①工作原理:当  $K_1$  吸合,电源便经  $R_1$  对  $C_1$  充电,当  $C_1$  两端电压达到单晶体管的峰点电压  $V_p$  时, $C_1$  经  $e-b_1$  结和  $R_3$  迅速放电,在  $R_3$  上产生一正脉冲输出,于是  $V_1$  导通, $K_2$  吸合,其常闭触点断开触发回路。 $K_1$  释放后电路复原。 $C_2$  在这里有当单

晶体管被触发时电路负载的作用。

②延时时间：数 min。改变  $R_1$  (或  $C_1$ ) 可调节延时量。

(4)图 14-70 电路：

①工作原理：与图 14-69 同。

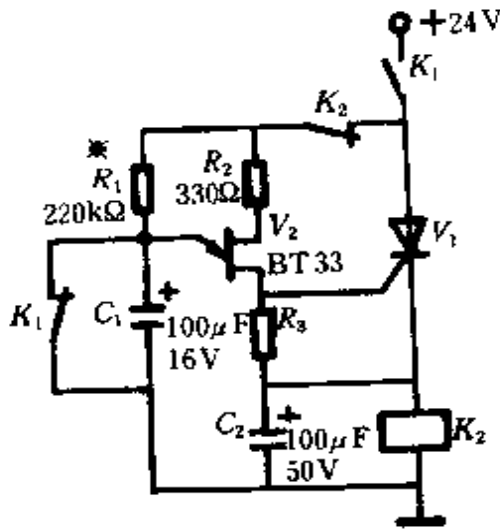


图 14-69 电路(九)

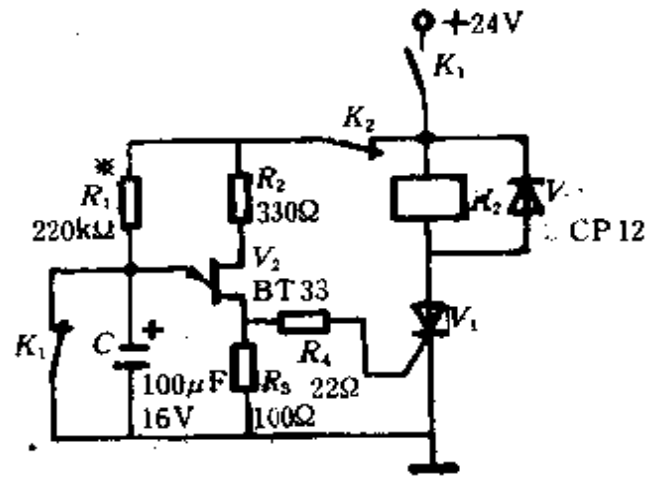


图 14-70 电路(十)

(5)图 14-71 电路：

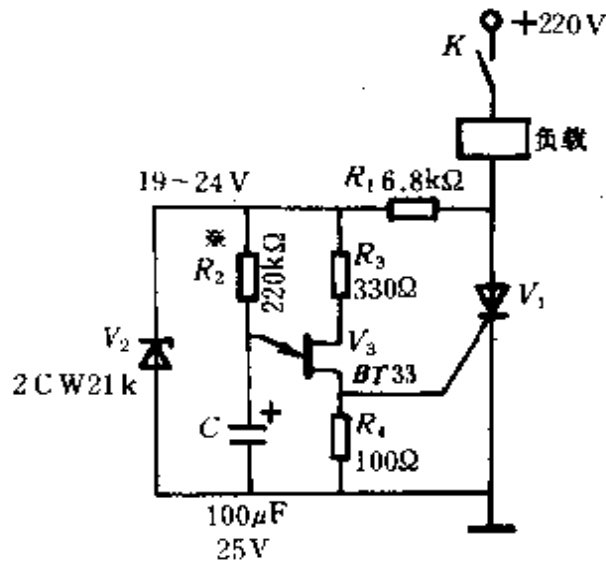


图 14-71 电路(十一)

①工作原理:当  $K$  吸合,  $+220V$  电源经负载、 $R_1$  降压、 $V_2$  稳压;稳压后的电源对  $C$  充电,经过一段延时, $V_3$  触发, $V_1$  导通,接通负载,此时  $V_1$  阳极—阴极间电压降约  $1V$ ,使控制极不再有触发电压, $K$  释放后电路复原。

②延时时间:数 min。改变  $R_2$ (或  $C$ )可调节延时量。

(6)图 14-72 电路:

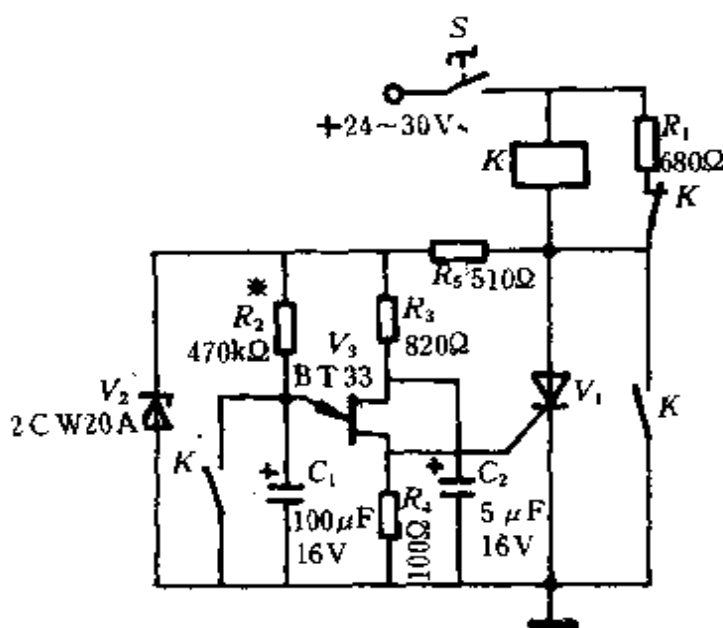


图 14-72 电路(十)

①工作原理:合上开关  $S$ ,  $V_1$  通过  $K$  的线圈及  $R_1$  得到正向阳极电压,同时电源又经  $R_2$  对  $C_1$  充电。经过一段延时, $V_3$  触发, $V_1$  导通, $K$  得电吸合,其常开触点闭合,此时  $V_1$  的正向阳极电压为零,便自动关断,继电器  $K$  自保。另一常开触点闭合,给  $C_1$  放电,为下次延时作好准备。电路其他部分失电。要使下次动作,必须打开  $S$ ,否则  $K$  一直吸合不放。 $C_2$  为稳定单结晶体管工作而加的, $S$  合上至  $K$  吸合止为延时时间。

②延时时间:1min。改变  $R_2$ (或  $C_1$ )可调节延时量。

(7)图 14-73 电路:



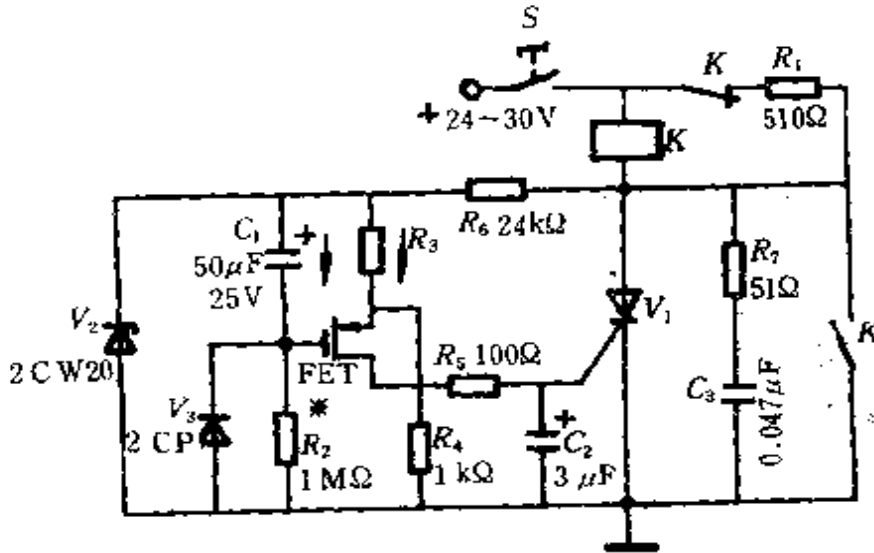


图 14-73 电路(十三)

①工作原理:合上开关  $S$ ,  $+24 \sim 30V$  电源经  $K$ 、 $R_1$ 、 $R_6$  降压、 $V_2$  稳压,稳定后的直流电压经  $R_2$  向  $C_1$  充电。接通电源的瞬间,  $U_{G1} = 0$ , 场效应管 FET 的栅源电压  $U_{GS} = -U_{C1} + U_{R3} = U_{R3} \geq 0$ , 因此 FET 截止,漏极电流  $I_D = 0$ ,  $V_1$  截止,  $K$  释放。当  $U_{GS} < 0$  时, FET 导通,  $I_D$  便开始流通。  $U_{C1}$  充得愈高,  $U_{GS}$  愈负,  $I_D$  就愈大。当  $I_D$  大到  $V_1$  的触发电流时,  $V_1$  导通,  $K$  吸合。其常闭触点断开,常开触点闭合,  $K$  自保。  $V_3$  的作用是提供快速放电回路 ( $R_3$ 、 $R_4$ 、 $V_3$ 、 $C_1$ );  $R_7$ 、 $C_3$ 、 $C_2$  的作用是防止可控硅误导通。

②延时时间:数 min。改变  $R_2$  (或  $C_2$ ) 等可调节延时量。

(8)图 14-74 电路:

①工作原理:合上开关  $S$ , 由  $R_1$ 、 $C_1$  及  $V_3$  组成的弛张振荡器便工作,其脉冲重复周期达几十秒。这些电压脉冲经  $V_4$ 、 $R_4$  向  $C_2$  间断充电。当  $C_2$  上的电压逐渐升高达  $V_5$  的峰点电压  $V_p$  时,  $V_5$  导通,  $C_2$  通过  $V_5$  放电,触发  $V_1$ ,  $K$  吸合。

②延时时间:十几至数十 min。改变  $R_1$  (或  $C_1$ ) 及  $C_2$  可调节

延时量。

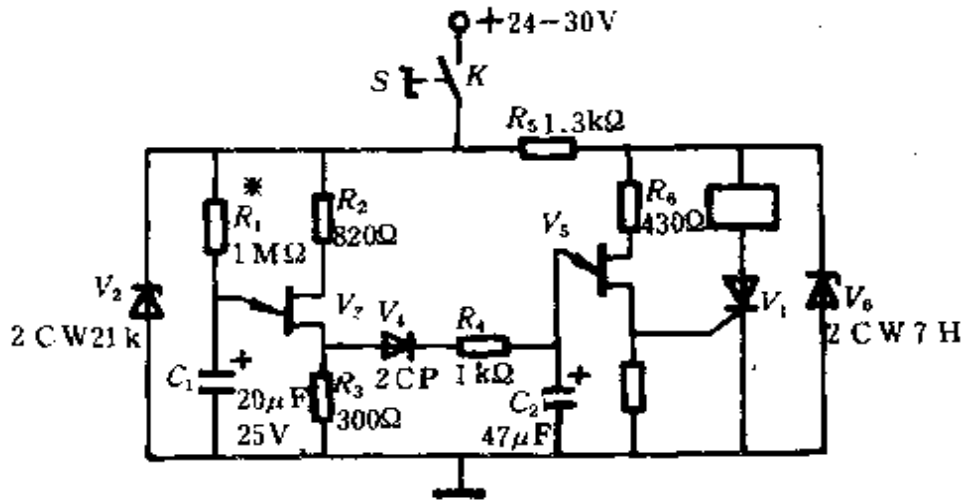


图 14-74 电路(十四)

## 第十五章 仪器仪表

### 第一节 基础知识及计算

#### 一、电测量仪表的基本计算

##### 1. 张丝的计算

(1) 矩形截面张丝的反作用力矩的计算:

$$M_a = \frac{bh^3Ga}{3L} + \frac{b^3F\alpha}{12L} + \frac{b^3hE\alpha^2}{360L}$$

或写成 
$$M_a = \frac{kh^4Ga}{3L} + \frac{k^3h^3\sigma_F\alpha}{12L} + \frac{k^3h^3E\alpha^2}{360L}$$

式中:  $M_a$ ——张丝的反作用力矩(mN·cm/90°);

$G$ ——材料的切变模量(mN/cm<sup>2</sup>);

$b, h, L$ ——分别为张丝宽度、厚度和长度(cm);

$\alpha$ ——扭转角度(rad);

$E$ ——弹性模量(mN/cm<sup>2</sup>), 见表 15—1;

$F$ ——工作张力(mN),  $F = \sigma_F S = \sigma_F kh^2$ ;

$\sigma_F$ ——张丝的拉应力(mN/cm<sup>2</sup>), 一般取拉伸强度  $\sigma_H$  的 20% ~ 25%;

$k$ ——张丝的宽厚比, 即  $k = b/h$ , 一般取 10 ~ 20。

(2) 张丝的尺寸:

① 张丝的厚度(cm): 
$$h = \sqrt[4]{\frac{M_a}{\frac{kGa}{3L} + \frac{k^3\sigma_F\alpha}{12L}}}$$

② 张丝的宽度(cm);  $b = kh$

(3) 应力校验:

① 张丝总的正应力:

$$\sigma = \frac{E\alpha^2 b^2}{12L^2} + \frac{F + 9.81g}{bh}$$

式中:  $\sigma$ ——张丝总的正应力(mN/cm<sup>2</sup>);

$g$ ——可动部分重量(mg)。

② 张丝的最大应力应满足  $\sigma_{\max} \leq \sigma_B/4$

$$\sigma_{\max} = \frac{1}{2}(\sigma_f + \sqrt{\sigma_f^2 + 4\tau^2})$$

矩形截面张丝  $\tau = hG \frac{\alpha}{L}$

式中:  $\sigma_B$ ——拉伸强度(mN/cm<sup>2</sup>), 见表 15-1;

$\tau$ ——张丝的扭应力(mN/cm<sup>2</sup>)。

校验结果若不能满足要求, 则说明张丝的应力已超出允许范围, 应对张丝的尺寸重新计算。

### 2. 阻尼力矩的计算

仪表中装有阻尼器, 目的是在可动部分运动时产生阻尼力矩。阻尼力矩仅与可动部分运动速度成线性关系, 与偏转角无关。

阻尼力矩  $M_p$  按下式计算:

$$M_p = P \frac{d\alpha}{dt}$$

式中:  $P$ ——阻尼系数。

### 3. 摩擦力矩的计算

(1) 在轴尖—宝石支承的仪表中: 当可动部分运动时, 在支承处产生一摩擦力矩  $M_f$ 。

$$M_f = M - M_s = M_c = M_s \Delta\alpha$$

常用弹性材料性能

表 15-1

材料名称	弹性模量 $E$ (MPa)	切变弹性模量 $G$ (MPa)	拉伸强度 $\sigma_B$ (MPa)	弹性极限 $\sigma_e$ (MPa)	电阻率 $\rho$ ( $\Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$ )	弹性后效 $\beta$ (%)	电阻温度系数 $\frac{d\rho}{dt}$ ( $\times 10^{-4}/^\circ\text{C}$ )	对铜热电势 ( $\mu\text{V}/^\circ\text{C}$ )
锡青铜	112780	44130	1128	785	0.09	0.1	9.5	2.0
玻青铜	132390	49030	1569	981	0.06	0.2	15.5	1.0
铂银合金	171620	68650	2157	1569	0.3	0.05	10.5	8.0
磷青铜	98070	—	1177	—	0.18	0.1	4	—
镍 36	215750	78450	1961	1569	1.1	0.02	—	—
铂 40	205940	78450	2942	1863	1.0	0.02	3.0	1.0

注: 1MPa =  $10^6\text{mN}/\text{cm}^2$ 。

$$\Delta\alpha = M_f / M'_c$$

式中： $M$ ——转动力矩；

$M_a$ ——反作用力矩；

$M_c$ ——定位力矩；

$M'_c$ ——定位力矩系数， $M'_c = dM_c/d\alpha$ 。

(2) 在一般指示仪表中，有如下关系：

$$M_f = CG^{1.5}$$

式中： $C$ ——常数；

$G$ ——可动部分重量。

(3) 摩擦误差  $\gamma_f$

$$\gamma_f = \frac{M_f}{M_{90}} = C \frac{G^{1.5}}{M_{90}}$$

式中： $M_{90}$ ——仪表偏转  $90^\circ$  时的转动力矩。

#### 4. 动圈式磁电系仪表计算

动圈式测量机构通过固定的永久磁钢的磁场与通有直流电流的动圈磁场相互作用而产生转动力矩。

(1) 载流导体在磁场中所受力：

$$F = BNLI$$

式中： $F$ ——导体所受力(N)；

$B$ ——气隙中磁通密度(T)；

$N$ ——动圈匝数；

$L$ ——动圈绕组在气隙中的有效长度(m)；

$I$ ——动圈电流(A)。

(2) 作用于动圈上的力矩：

$$M = IBNS$$

式中： $M$ ——作用于动圈上的力矩(Nm)；

$S$ ——动圈的有效面积(m<sup>2</sup>)。

当平衡时偏转角为

$$\alpha = M/W = (BSN/W)I$$

式中： $\alpha$ ——偏转角(rad)；

$W$ ——反作用力矩系数；

$BSN/W$ ——结构常数。

可见，偏转角与动圈电流成正比，标尺特性是均匀的。

### 5. 电动系仪表计算

电动系仪表测量机构通过载流固定线圈的磁场与载流的动圈间相互作用而产生转动力矩。

(1) 直流时：

$$M = I_1 I_2 \frac{\partial M_{12}}{\partial \alpha}$$

式中： $I_1$ 、 $I_2$ ——定圈和动圈中的电流。

(2) 交流时；当定圈和动圈中的电流  $i_1$ 、 $i_2$  为正弦变化，且有相位角差  $\psi$  时，转动力矩平均值  $M_p$  为

$$M_p = I_1 I_2 \cos \psi \frac{\partial M_{12}}{\partial \alpha}$$

式中： $I_1$ 、 $I_2$ ——定圈和动圈中电流的有效值；

$M_{12}$ ——定圈动圈间互感；

$\alpha$ ——偏转角。

(3) 反作用力矩由游丝(或张丝)产生，可动部分平衡时，偏转角为

$$\alpha = \frac{1}{W} \frac{\partial M_{12}}{\partial \alpha} I_1 I_2$$

式中： $W$ ——游丝的反作用力矩系数。

### 6. 铁磁电动系仪表计算

铁磁电动系仪表测量机构通过动圈的磁场与励磁线圈的磁场相互作用而产生转动力矩。

转动力矩为

$$M = K\phi_1 I_2 \cos(\phi_1, I_2)$$

式中： $\phi_1$ ——定圈中电流  $I_1$  产生的磁通， $\phi_1$  正比于  $I_1$ ；

$I_2$ ——动圈电流；

$\cos(\phi_1, I_2)$ —— $\phi_1$  与  $I_2$  夹角的余弦。

当平衡时偏转角为

$$\alpha = \frac{K}{W}\phi_1 I_2 \cos(\phi_1, I_2) = \frac{K}{W}I_1 I_2 \cos(I_1, I_2)$$

式中： $W$ ——反作用力矩系数。

### 7. 电磁系仪表计算

电磁系仪表测量机构通过电流的固定线圈产生的磁场对动铁芯的吸引，或被此磁场磁化的静铁芯与动铁芯之间的作用而产生转动力矩。

转动力矩为

$$M = \frac{1}{2} I^2 \frac{dL}{d\alpha}$$

式中： $I$ ——线圈中的电流（交流时为电流有效值）；

$L$ ——线圈的电感；

$\alpha$ ——偏转角。

当平衡时偏转角为

$$\alpha = \frac{1}{2W} I^2 \frac{dL}{d\alpha}$$

式中： $W$ ——反作用力矩系数。

### 8. 感应系仪表计算

感应系仪表测量机构通过一个或几个固定的载流回路产生的磁通与这些磁通在活动部分（铝盘）感应的电流间相互作用产生转动力矩。这种机构只能用于交流，如电度表。

以电度表为例，转动力矩为

$$M = K_1 \phi_1 \phi_2 \sin\psi = KIU \sin\psi = KIU \cos\varphi = KP$$



式中： $K_1$ 、 $K$ ——系数；

$\phi_v$ ——电压磁通；

$\phi_i$ ——电流磁通；

$\psi$ —— $\phi_v$ 与 $\phi_i$ 的相角差， $\psi = 90^\circ - \varphi$ ；

$\varphi$ ——负载电流滞后于电网电压的角度；

$P$ ——负载功率。

当电度表达到平衡时，铝盘保持稳定转速旋转，且在某段时间内  $T$  的转数正反映这段时间内负载消耗的电能  $A_f$ 。

$$A_f = CnT$$

式中： $C$ ——比例系数；

$n$ ——铝盘转数。

电度表常数  $N = 1/C = n/A_f$  (r/kWh)

### 9. 整流系仪表计算

由磁电系测量机构和整流电路组成的仪表称为整流系仪表。

转动力矩为

$$M = BNSi$$

式中： $B$ ——气隙中磁通密度；

$N$ ——动圈匝数；

$S$ ——动圈有效面积；

$i$ ——交流在同方向半个周期瞬时值。

对于半波整流电路，偏转角  $\alpha$  为

$$\alpha = \frac{I_p}{2} \frac{BNS}{W}$$

对于全波整流电路，则

$$\alpha = I_p \frac{BNS}{W}$$

式中： $I_p$ ——电流平均值；

$W$  —— 游丝反作用力矩系数。

10. 转动线圈式测量仪表的运动方程式

$$J \frac{d^2\theta}{dt^2} + \rho \frac{d\theta}{dt} + K\theta = GJ + K\theta_0$$

偏转角

(1) 当  $\frac{\rho^2}{4J^2} > \frac{K}{J}$  时(过制动):

$$\theta = \theta_0 \left\{ 1 - \frac{e^{-\alpha t}}{2\beta} [(\alpha + \beta)e^{\beta t} - (\alpha - \beta)e^{-\beta t}] \right\}$$

(2) 当  $\frac{\rho^2}{4J^2} = \frac{K}{J}$  时(临界制动):

$$\theta = \theta_0 [1 - e^{-\alpha(1 + \alpha t)}]$$

(3) 当  $\frac{\rho^2}{4J^2} < \frac{K}{J}$  时(欠制动):

$$\theta = \theta_0 \left[ 1 - \frac{\sqrt{\alpha^2 + \omega^2}}{\omega} e^{-\alpha t} \sin(\omega t + \text{tg}^{-1} \frac{\omega}{\alpha}) \right]$$

式中:  $\alpha = \frac{\rho}{2J}, \beta = \sqrt{\left(\frac{\rho}{2J}\right)^2 - \frac{K}{J}}, \omega = \sqrt{\frac{K}{J} - \left(\frac{\rho}{2J}\right)^2}$

$J$  —— 可动部分的转动惯量( $\text{kg} \cdot \text{m}^2$ );

$\theta_0$  —— 最终偏转角(rad);

$\rho$  —— 阻尼系数( $\text{Nm}/\text{rad}/\text{s}$ );

$K$  —— 转动常数( $\text{Nm}/\text{rad}$ );

$\theta$  —— 偏转角(rad),

$$\theta = \frac{BAni}{k};$$

$B$  —— 气隙中的磁通密度(T);

$A$  —— 线圈断面积( $\text{m}^2$ );

- $n$ ——线圈匝数(匝);
- $i$ ——线圈中电流(A);
- $k$ ——悬丝制动转矩常数(Nm/rad)。

固有振荡频率

$$f_0 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{J}}$$

式中： $f_0$ ——固有振荡频率(Hz);

其它符号同前。

### 11. 仪表误差和修正公式

(1) 误差:

$$\epsilon = M - T$$

$$\text{误差百分率 } \epsilon_0 = \frac{M - T}{T} \times 100(\%)$$

(2) 修正:

$$\alpha = T - M$$

$$\text{修正百分率 } \alpha_0 = \frac{T - M}{T} \times 100(\%)$$

(3)  $\epsilon_0$  与  $\alpha_0$  的关系:

$$\left(1 + \frac{\epsilon_0}{100}\right) \left(1 + \frac{\alpha_0}{100}\right) = 1$$

式中： $M$ ——测量仪表的读数;

$T$ ——真值。

## 二、热电阻的电阻与温度的关系

常用热电阻的电阻与温度的关系曲线见图 15—1

常用热电阻的电阻与温度的关系特性公式如下:

### 1. 铂热电阻的特性公式

当  $-200^\circ\text{C} \leq t \leq 0^\circ\text{C}$  时

$$R_t = R_0[1 + At + Bt^2 + Ct^3(t - 100)]$$

当  $0^\circ\text{C} \leq t \leq 650^\circ\text{C}$  时

$$R_t = R_0(1 + At + Bt^2)$$

式中： $R_0$ —— $0^\circ\text{C}$  时的电阻值；

$R_t$ ——温度为  $t^\circ\text{C}$  时的电阻值；

$A, B, C$ ——常数，

$$A = 3.96847 \times 10^{-3} (1/^\circ\text{C});$$

$$B = -5.847 \times 10^{-7} (1/^\circ\text{C});$$

$$C = -4.22 \times 10^{-12} (1/^\circ\text{C})。$$

### 2. 铜热电阻的特性公式

$$R_t = R_0(1 + At + Bt^2 + Ct^3)$$

式中： $A, B, C$ ——常数，

$$A = 4.28899 \times 10^{-3} (1/^\circ\text{C});$$

$$B = -2.133 \times 10^{-7} (1/^\circ\text{C});$$

$$C = 1.233 \times 10^{-9} (1/^\circ\text{C})。$$

### 3. 热敏电阻的特性公式

$$R_t = Ae^{B/t}$$

式中： $A, B$ ——常数。

## 三、热电偶的热电势与温度的关系

图 15—2 为常用高温热电偶的热电势与温度的关系图。

图 15—3 为常用中温热电偶的热电势与温度的关系图。

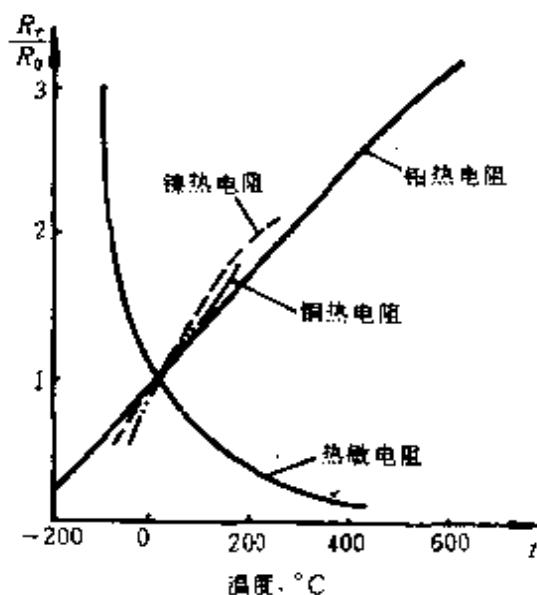


图 15—1 常用热电阻的电阻与温度的关系曲线

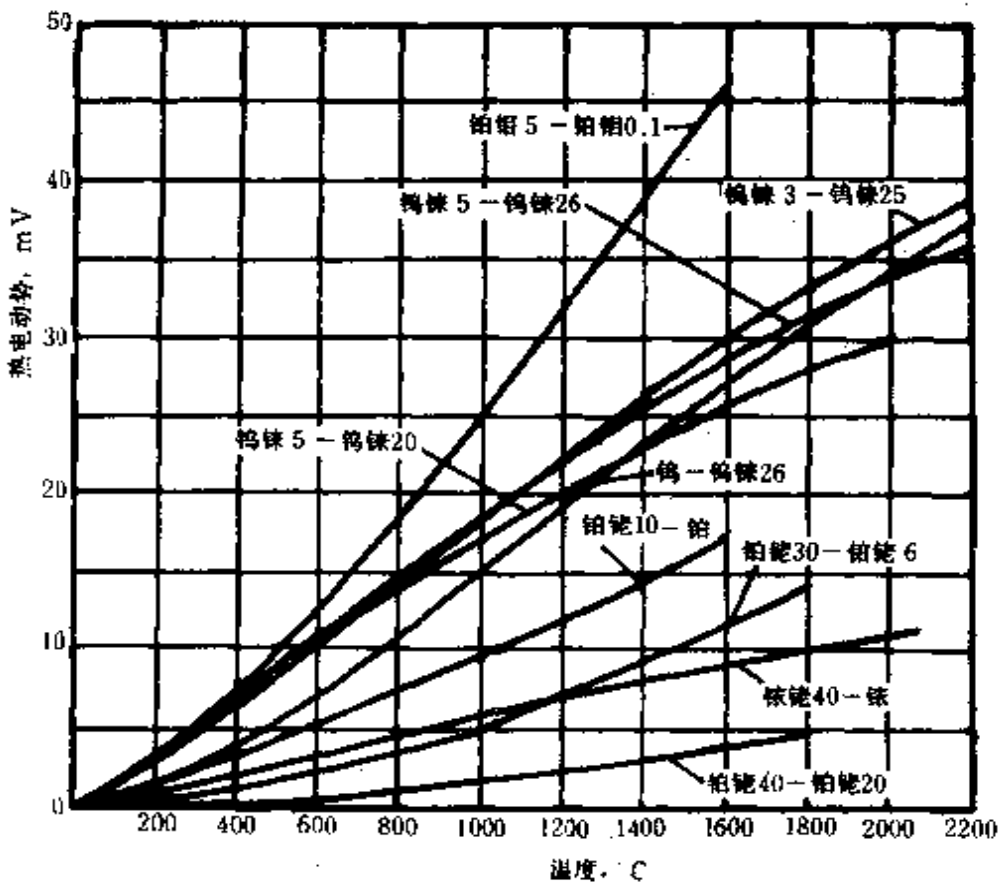


图 15-2 常用高温热电偶的热电势与温度的关系图

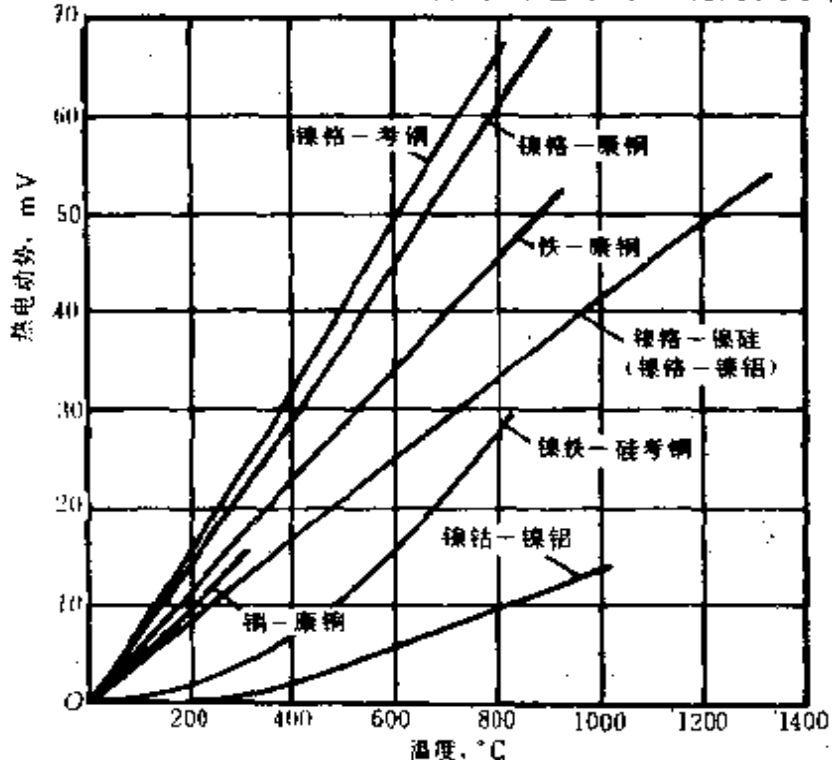


图 15-3 常用中温热电偶的热电势与温度的关系图

图 15—4 为常用低温热电偶的热电势与温度的关系图,图中金铁的百分数均为原子百分数。

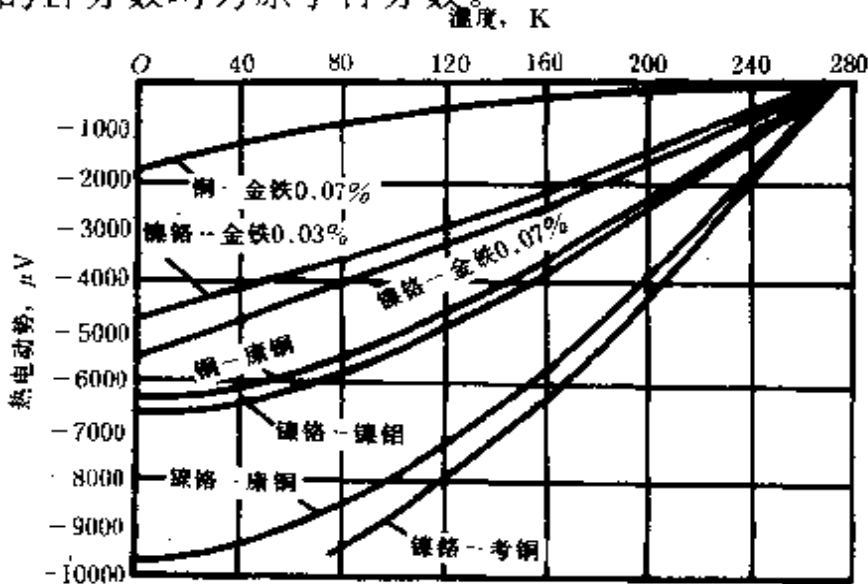


图 15—4 常用低温热电偶的热电势与温度的关系图

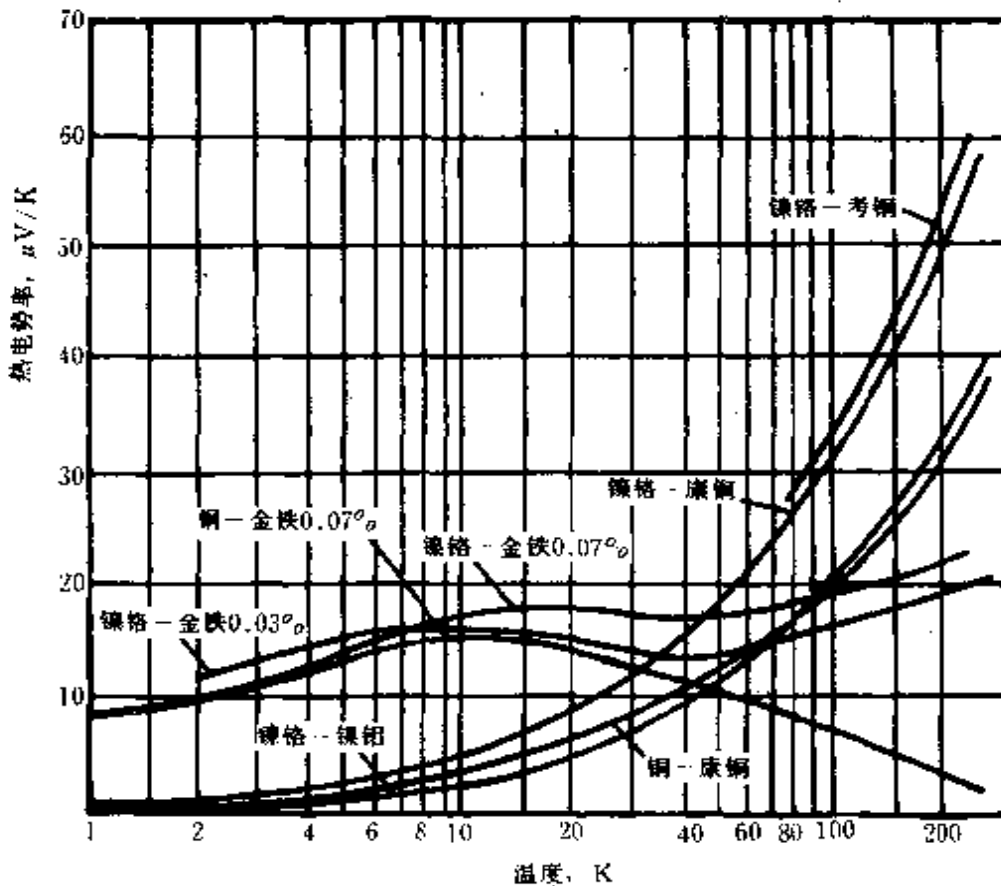


图 15—5 常用低温热电偶的热电势率与温度的关系图

图 15-5 为常用低温热电偶的热电势率与温度的关系图，图中金铁的百分数均为原子百分数。

图 15-6 为常用单根热电极对铂热电势与温度的关系图。

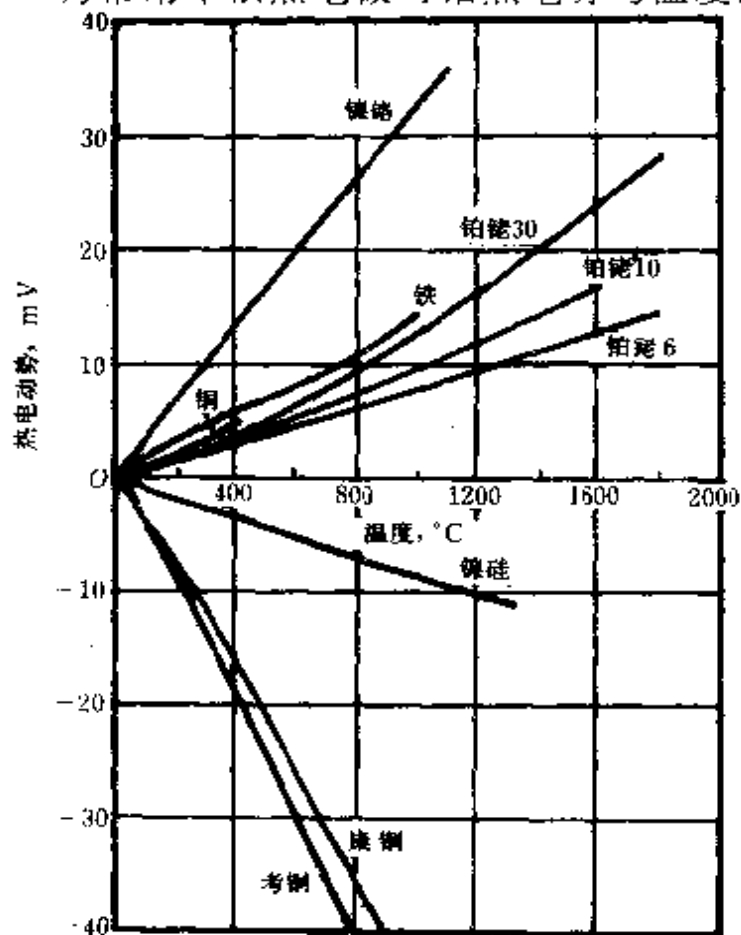


图 15-6 常用单根热电极对铂热电势与温度的关系图

## 第二节 仪表正确接法的分析

### 一、两表法测量三相有功功率的分析

两表法测量三相有功功率的接线图见图 15-7。它适用于三相三线制电路对称或不对称负载。

由矢量图可知，两瓦特表指示值为

$$P_1 = U_{AB} I_A \cos(30^\circ - \varphi)$$

$$P_2 = U_{CB} I_C \cos(30^\circ - \varphi)$$

式中： $\varphi$ ——相电压和相电流的相角差。

$$P_1 + P_2 = U_{AB}I_A \cos(30^\circ + \varphi) + U_{CB}I_C \cos(30^\circ - \varphi)$$

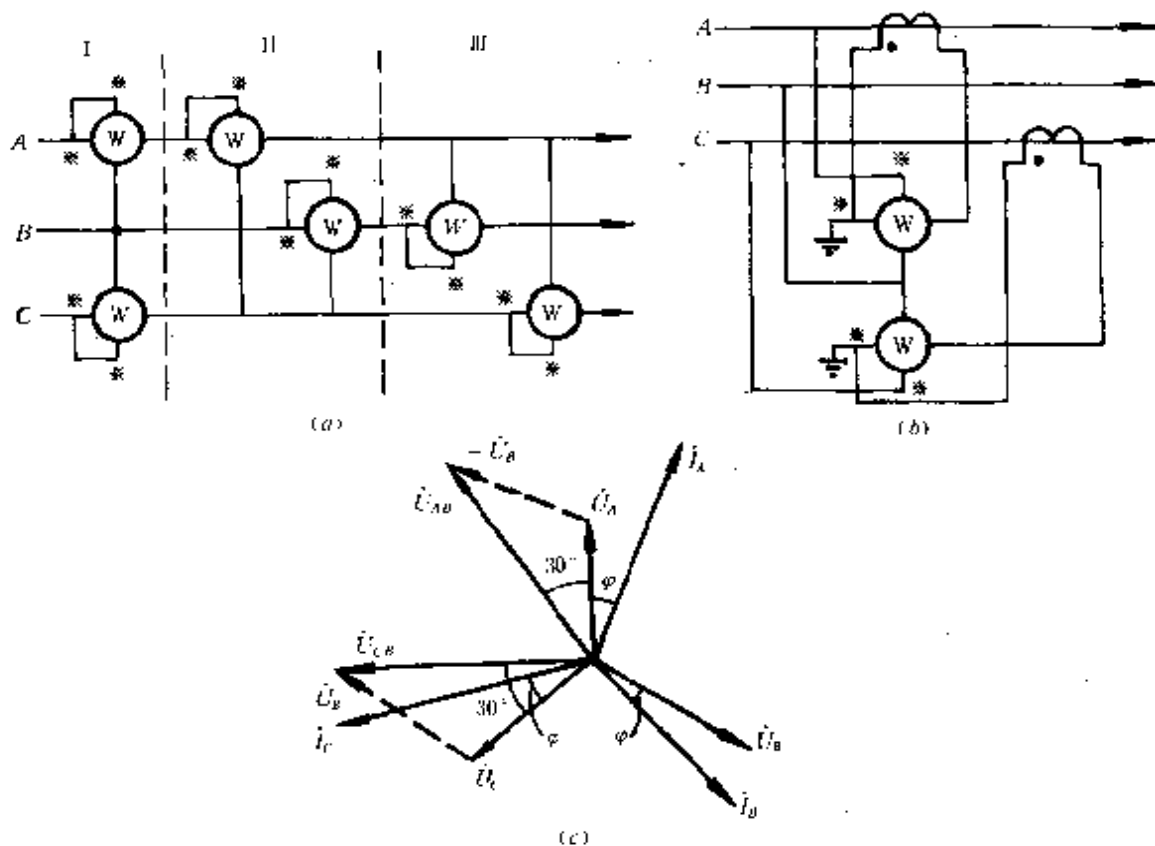


图 15-7 两表法测三相功率或有功电度的接线

(a) 直接接入(三种接法均可) (b) 经电流互感器接入法 (c) 图(a)的矢量图  
当负载对称时

$$U_{AB} = U_{CB} = U_{CA} = U$$

$$I_A = I_B = I_C = I$$

式中： $U, I$  —— 线电压和线电流，下同。

这时  $P_1 + P_2 = UI[\cos(30^\circ + \varphi) + \cos(30^\circ - \varphi)]$

$$= \sqrt{3}UI\cos\varphi$$

说明三相有功功率等于两瓦特表指示值之和。

当  $\varphi > 60^\circ$  时，一只表会反转，这时应将该表倒相，计算总功率时，反转表的读数取负值。

两表指示随  $\varphi$  改变而变化的情况见表 15-2。



表 15-2 两表指示随相角  $\varphi$  改变而变化的情况

$\varphi$ 度	$P_1$	$P_2$	$P_1 + P_2$
-90	$0.5P_n$	$-0.5P_n$	0
-60	$0.866P_n$	0	$\frac{1}{2} \sqrt{3} P_n$
-30	$P_n$	$0.5P_n$	$1.5P_n$
30	$0.5P_n$	$P_n$	$1.5P_n$
60	0	$0.866P_n$	$\frac{1}{2} \sqrt{3} P_n$
90	$-0.5P_n$	$0.5P_n$	0

注： $P_n$  是  $P_1$  或  $P_2$  的最大值。

根据两表法原理制成的两元件瓦特表或有功电度表，可直读三相三线电路的有功功率和有功电能，使用时不会有反转现象。

**例 15-1** 用两瓦特表法测量三相有功功率，接法如图 15-7(a) 所示。已知两只 0.5 级瓦特表的额定电压  $U_n$  为 150V，额定电流  $I_n$  为 5A，满量程分格数  $\alpha_c$  为 150 分格。 $W_1$  表指示分格数  $\alpha_1$  为 60 分格， $W_2$  表指示分格数  $\alpha_2$  为 110 分格。试求三相有功功率为多少瓦？

**解** 三相有功功率为

$$\begin{aligned}
 P &= P_1 + P_2 = \frac{U_n I_n \alpha_1}{\alpha_c} - \frac{U_n I_n \alpha_2}{\alpha_c} \\
 &= \frac{U_n I_n (\alpha_1 + \alpha_2)}{\alpha_c} = \frac{150 \times 5 \times (60 + 110)}{150} \\
 &= 850(\text{W})
 \end{aligned}$$

如果两表均接有变比为  $K_{TA} = 200/5 = 40$  的电流互感器和变比为  $K_{TV} = 10000/100 = 100$  的电压互感器时，则三相有功功率为

$$P = \frac{K_{TA}K_{TV}U_c I_c (\alpha_1 + \alpha_2)}{\alpha_c}$$

$$= 40 \times 100 \times 850 \text{W} = 3400(\text{kW})$$

### 二、三表法测量三相有功功率的分析

三表法测量三相有功功率的接线图见图 15-8。它适用于三相三线、三相四线电路，不论对称或不对称负载都可用。

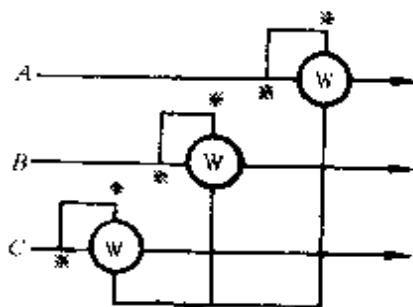


图 15-8 三表法测三相有功功率或有功电度的接线

它实际上是由三只单相表分别测各相有功功率或有功电度，各表读数之和即为三相有功功率或有功电能。

也可根据三表法原理制成三元件瓦特表和有功电度表。

### 三、一表法测量三相无功功率的分析

利用一只瓦特表测量三相无功功率的接线图见图 15-9。它适用于负载完全对称的电路。

由矢量图可知，瓦特表指示值为

$$P_r = U_{BC} I_A \cos(90^\circ - \varphi) = U_{BC} I_A \sin\varphi$$

因为三相无功功率为

$$Q = \sqrt{3} UI \sin\varphi$$

所以  $Q = \sqrt{3} P_r$

即三相无功功率等于瓦特表指示值  $P_r$  的  $\sqrt{3}$  倍。

### 四、两表法测量三相无功功率的分析

在完全对称负载的电路里，可采用图 15-7 的方法，测量三相无功功率。

因为  $P_2 - P_1 = U_{CB} I_C \cos(30^\circ - \varphi) - U_{AB} I_A \cos(30^\circ + \varphi)$

$$= UI[\cos(30^\circ - \varphi) - \cos(30^\circ + \varphi)]$$

$$= UI\sin\varphi$$

所以  $Q = \sqrt{3} UI\sin\varphi = \sqrt{3} (P_2 - P_1)$

即三相无功功率等于两瓦特表指示值之差的  $\sqrt{3}$  倍。

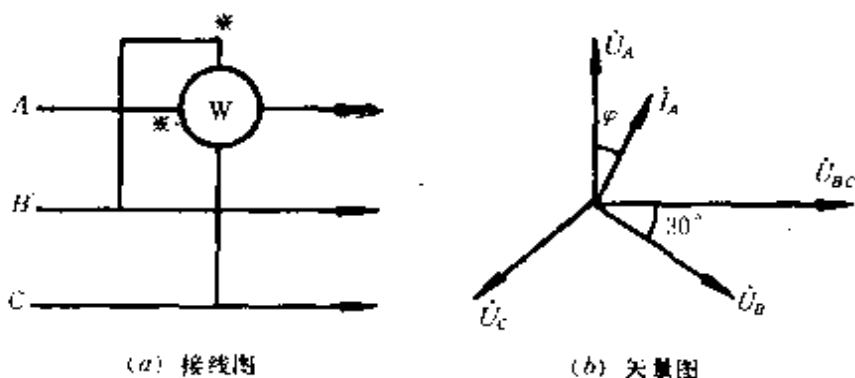


图 15-9 一瓦特表测三相无功功率的接线

### 五、三表法测量三相无功功率的分析

用三只瓦特表测量三相无功功率的接线图见图 15-10。它适用于三相三线制、三相四线制的对称或简单不对称负载。

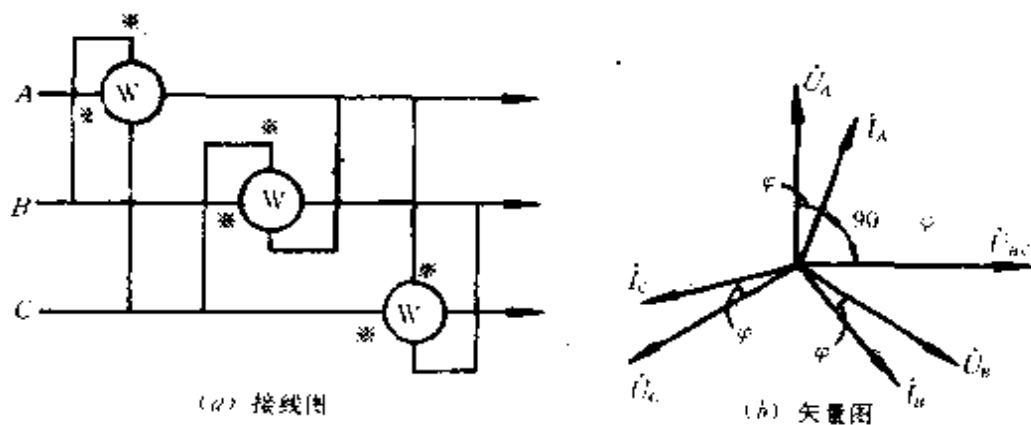


图 15-10 三瓦特表测三相无功功率的接线

由矢量图可知：

$$P_1 = U_{BC} I_A \cos(90^\circ - \varphi)$$

$$P_2 = U_{CA} I_B \cos(90^\circ - \varphi)$$

$$P_3 = U_{AB}I_C \cos(90^\circ - \varphi)$$

当负载对称时

$$P_1 + P_2 + P_3 = 3UI \cos(90^\circ - \varphi) = 3UI \sin\varphi$$

所以 
$$Q = \sqrt{3} UI \sin\varphi = \frac{1}{\sqrt{3}} (P_1 + P_2 + P_3)$$

即三相无功功率等于三瓦特表指示值之和的  $1/\sqrt{3}$  倍。

### 六、具有人工中点的两表法测量三相无功功率的分析

用两只瓦特表按图 15—11 的接法,可测量完全对称或简单不对称负载的三相无功功率

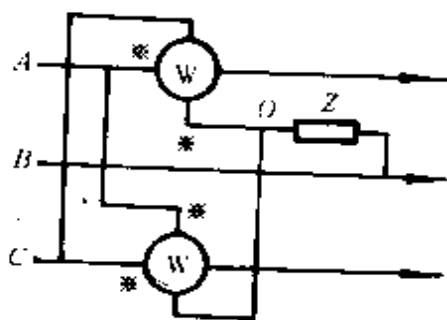


图 15—11 具有人工中点的两瓦特表测三相无功功率的接线  
两瓦特表指示值为

$$P_1 = U_C I_A \cos(60^\circ - \varphi)$$

$$P_2 = U_A I_C \cos(120^\circ - \varphi)$$

当负载对称时

$$\begin{aligned} P_1 + P_2 &= U_C I_A \cos(60^\circ - \varphi) + U_A I_C \cos(120^\circ - \varphi) \\ &= U_s I (2 \sin 60^\circ \sin \varphi) \\ &= \frac{U}{\sqrt{3}} I (\sqrt{3} \sin \varphi) = UI \sin \varphi \end{aligned}$$

式中:  $U_s$ ——相电压。

所以 
$$Q = \sqrt{3} (P_1 + P_2)$$

即三相无功功率等于两瓦特表指示值之和的  $\sqrt{3}$  倍。

### 七、具有 90° 相角差的无功电度表的接线和分析

接线图见图 15—12,其特点是电压回路的工作磁通滞后于外加电压 90°。此结构多用于两元件三相无功电度表,称为内相角为 90° 的无功电度表,如 DXI 型无功电度表。它适用于三相三线制、三相四线制的完全对称或简单不对称负载电路。

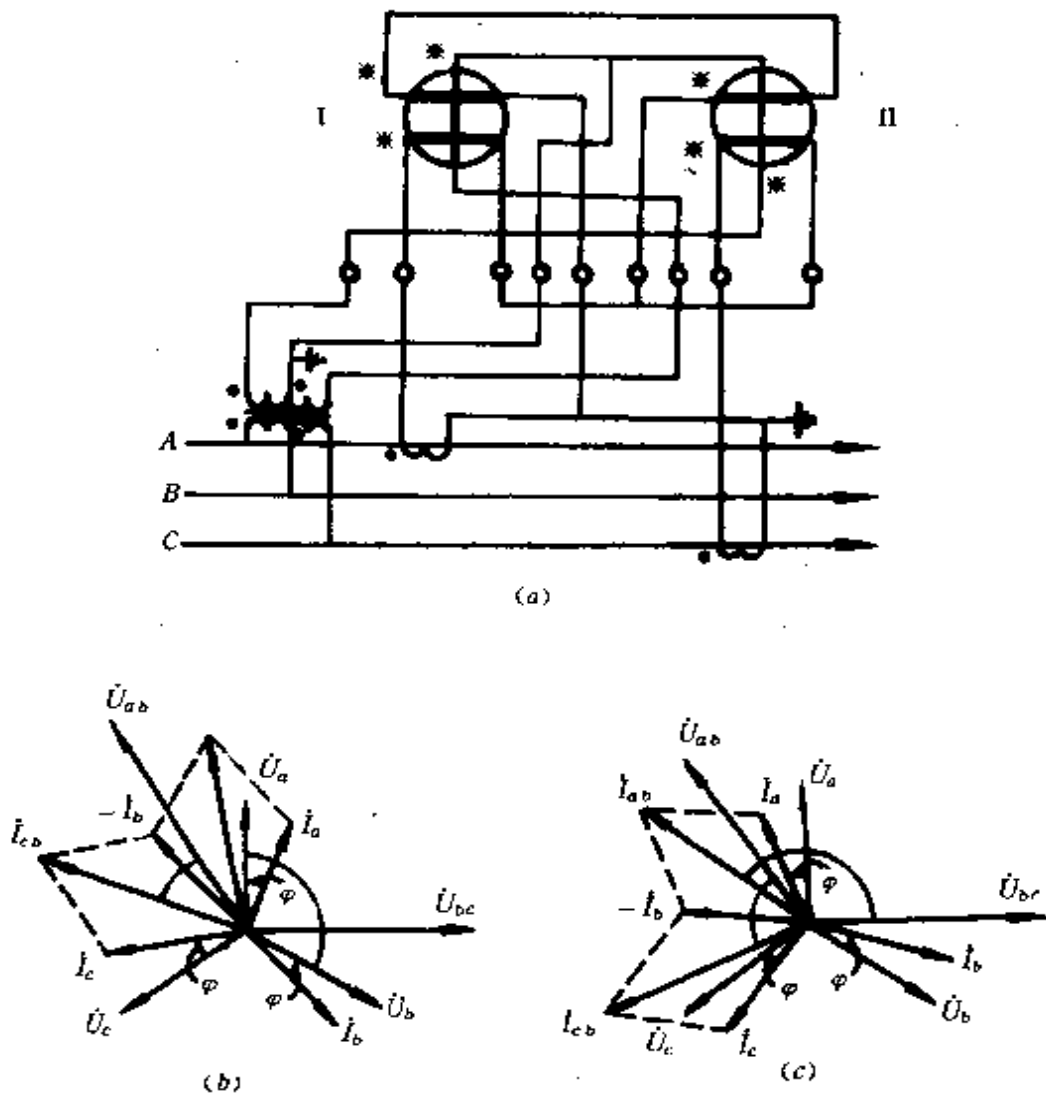


图 15—12 具有 90° 相角差的无功电度表的接线

(a) 接线图 (b) 负载感性时的矢量图 (c) 负载容性时的矢量图

1. 当负载为感性时,由图 15—12(b) 可知

$$Q_1 = K_{TA}K_{TV}U_{bc}I_{ab}\cos(120^\circ - \varphi)$$

$$Q_2 = K_{TA}K_{TV}U_{ab}I_{cb}\cos(60^\circ - \varphi)$$

式中： $K_{TA}$ ——电流互感器变比；

$K_{TV}$ ——电压互感器变比。

当负载对称时

$$\begin{aligned} Q &= Q_1 + Q_2 = K_{TA}K_{TV}[U_b I_{ab}\cos(120^\circ - \varphi) \\ &\quad + U_{ab}I_{cb}\cos(60^\circ - \varphi)] \\ &= UI(2\sin 60^\circ \sin \varphi) = \sqrt{3} UI \sin \varphi \end{aligned}$$

说明该表能直接测量三相无功电能。

须注意：这类表在制造上已考虑齿轮传动比或每个电流线圈的匝数为额定匝数的  $1/\sqrt{3}$ ，所以表计所指示的数值就是实际三相无功电能。

2. 当负载为容性时，由图 15-12(c) 可知

$$Q_1 = K_{TA}K_{TV}U_b I_{ab}\cos(120^\circ + \varphi)$$

$$Q_2 = K_{TA}K_{TV}U_{ab}I_{cb}\cos(60^\circ + \varphi)$$

当负载对称时

$$\begin{aligned} Q &= Q_1 + Q_2 = K_{TA}K_{TV}[U_b I_{ab}\cos(120^\circ + \varphi) \\ &\quad + U_{ab}I_{cb}\cos(60^\circ + \varphi)] \\ &= UI(-2\sin 60^\circ \sin \varphi) = -\sqrt{3} UI \sin \varphi \end{aligned}$$

说明该表在容性负载时，将反转。

3. 电度表 Q 值与  $\varphi$  的关系，见图 15-13。

由图 15-13 可见：

- (1) 当  $\varphi = 0^\circ$  时； $Q_1 = -Q_2$ ，所以  $Q_1 + Q_2 = 0$ ，表停止转动。
- (2) 当  $\varphi = 30^\circ$  时； $Q_1 = 0$ ， $Q_2$  为全部三相无功功率。
- (3) 感性负载时， $Q_1 + Q_2 > 0$ ，表正转。
- (4) 容性负载时， $Q_1 + Q_2 < 0$ ，表反转。
- (5) 当  $\varphi = \pm 90^\circ$  时； $Q_1 + Q_2$  分别达到正的和负的最大值。

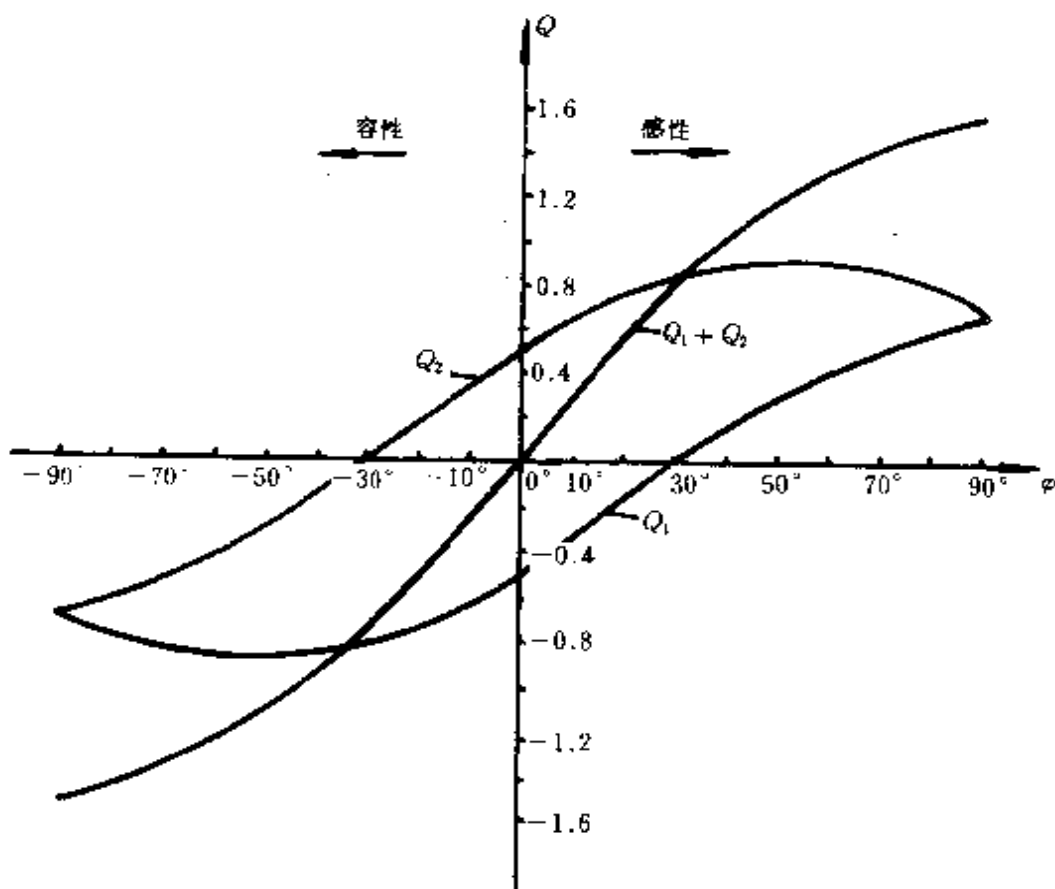


图 15-13 电度表  $Q$  与  $\varphi$  的关系曲线

#### 4. 测量容性负载时的接线

测量调相机、电容器等容性负载的无功电能时，只需将图 15-13 中的电度表端各相电流进出线对调一下（即逆相序接），表即能正转而准确地测量容性的无功电能。

如果用逆相序（如 C、B、A）接法测量感性负载，则矢量图如图 15-14 所示。

由矢量图可知

$$Q_1 = K_{TA}K_{TV}U_{ba}I_{cb}\cos(120^\circ + \varphi)$$

$$Q_2 = K_{TA}K_{TV}U_{cb}I_{ab}\cos(60^\circ + \varphi)$$

当负载对称时

$$Q = Q_1 + Q_2 = K_{TA}K_{TV}[U_{ba}I_{cb}\cos(120^\circ + \varphi)$$

$$+ U_{cb} I_{ab} \cos(60^\circ + \varphi)] = - \sqrt{3} UI \sin\varphi$$

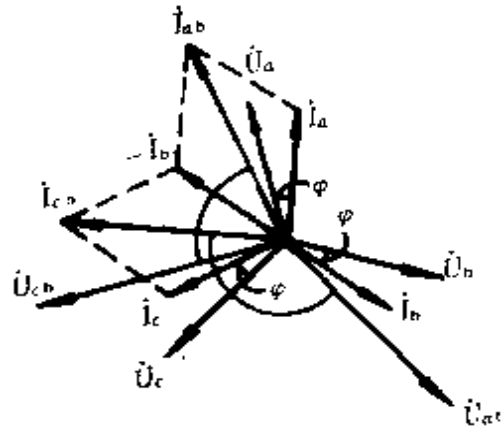


图 15-14 逆相序接法、感性负载的矢量图

说明该表在逆相序感性负载时将反转。同样可求得在逆相序容性负载时表将正转。

### 八、具有 60° 相角差的无功电度表的接线和分析

接线图见图 15-15，其特点是电压回路的工作磁通滞后于

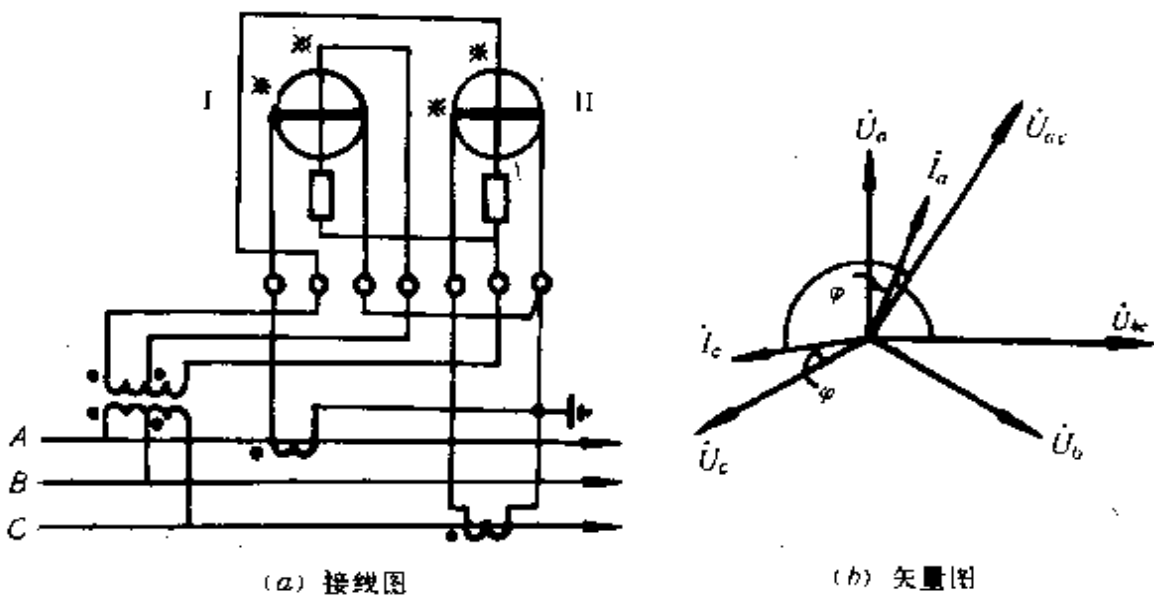


图 15-15 具有 60° 相角差的无功电度表的接线



外加电源电压  $60^\circ$ ，此结构多用于两元件三相无功电度表，称为内相角为  $60^\circ$  的无功电度表，如 DX2 型无功电度表。它适用于三相三线制的完全对称或简单不对称负载电路。

由于这种无功电度表的内相角为  $60^\circ$ ，在进行矢量分析时应将相角减去  $(90^\circ - 60^\circ) = 30^\circ$ ，即电压线圈串入电阻后相当于将相应的电压相位前移了  $30^\circ$ 。

1. 当负载为感性时，由矢量图可知：

$$\begin{aligned} Q_1 &= K_{TA}K_{TV}U_b I_a \cos(90^\circ - 30^\circ - \varphi) \\ &= K_{TA}K_{TV}U_b I_a \cos(60^\circ - \varphi) \\ Q_2 &= K_{TA}K_{TV}U_{ac} I_c \cos(150^\circ - 30^\circ - \varphi) \\ &= K_{TA}K_{TV}U_{ac} I_c \cos(120^\circ - \varphi) \end{aligned}$$

当负载对称时

$$\begin{aligned} Q &= Q_1 + Q_2 = K_{TA}K_{TV}[U_b I_a \cos(60^\circ - \varphi) \\ &\quad + U_{ac} I_c \cos(120^\circ - \varphi)] \\ &= UI(2\sin 60^\circ \sin \varphi) = \sqrt{3} UI \sin \varphi \end{aligned}$$

说明该表能直接测量三相无功电能。

2. 当负载为容性时，同样可分析出，表将反转，要使其正转且正确计量，可按逆相序接法。在逆相序感性负载时，表将反转。

3. 电度表  $Q$  值与  $\varphi$  的关系。只要将 DX1 型无功电度表的  $Q$  值与  $\varphi$  的关系曲线中的  $Q_1$  和  $Q_2$  对调一下，就成了 DX2 型无功电度表的  $Q$  值与  $\varphi$  的关系曲线。

### 九、功率因数的测算

对于没有装设功率因数表的系统，可以用以下几种实用方法测算功率因数。

1. 用有功和无功电度表测算  $\cos \varphi$

装有有功和无功电度表的系统，可先记录同一时间间隔内电度表所指示的有功电能和无功电能的消耗量，然后按下式计算出这段时间内的平均功率因数：

$$\cos\varphi = \frac{A_p}{\sqrt{A_p^2 + A_Q^2}}$$

式中： $A_p$ ——有功电量(kWh)；

$A_Q$ ——无功电量(kVar)。

2. 用单相电度表和秒表法测算  $\cos\varphi$

对于三相负载对称的电路，可将电度表按图 15—16 的接法测算功率因数。

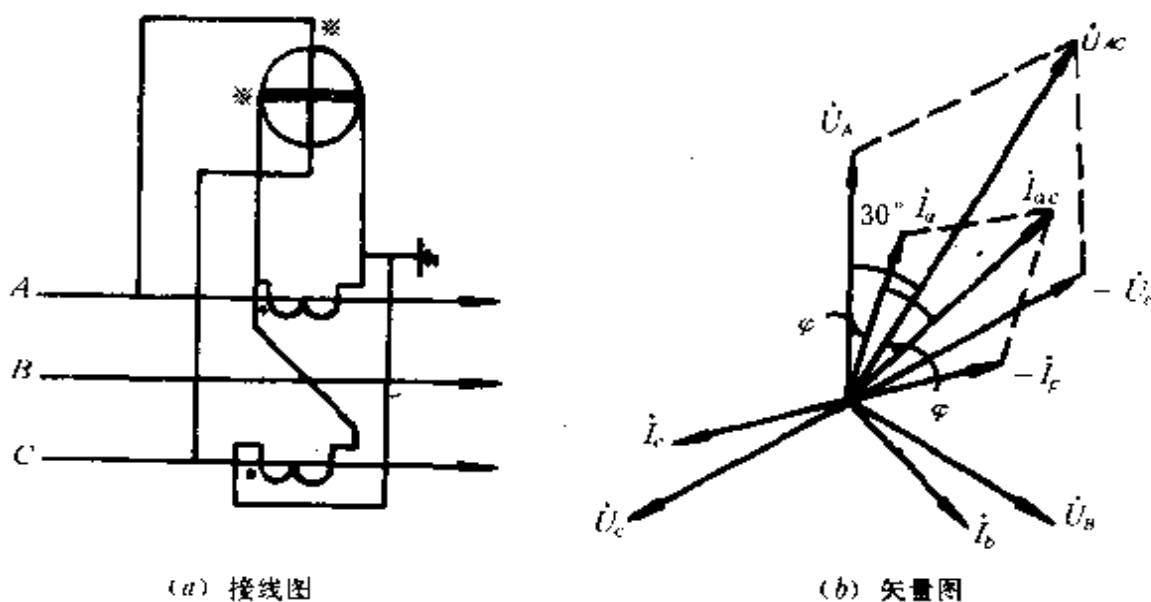


图 15—16 用单相电度表测算  $\cos\varphi$  的接线

由矢量图可知，三相总有功功率  $P$  为

$$P = K_{TA} U_{ac} I_{ac} \cos\varphi$$

当有电压互感器时

$$P = K_{TA} K_{TV} U_{ac} I_{ac} \cos\varphi$$

负载所消耗的有功功率还可按下式计算：

$$P = \frac{3.6nK_{TA}}{K_t} \times 10^6$$

当有电压互感器时

$$P = \frac{3.6nK_{TA}K_{TV}}{Kt} \times 10^6$$

式中： $P$ ——有功功率(W)；

$n$ ——电度表铝盘在 $t$ 时间内的转数；

$K$ ——电度表常数(r/kWh)；

$t$ ——测量时间(s)。

令以上两式相等，经整理得

$$\cos\varphi = \frac{3.6n}{KtU_{AC}I_{ac}} \times 10^6 = \frac{3.6n}{KtUI_2}$$

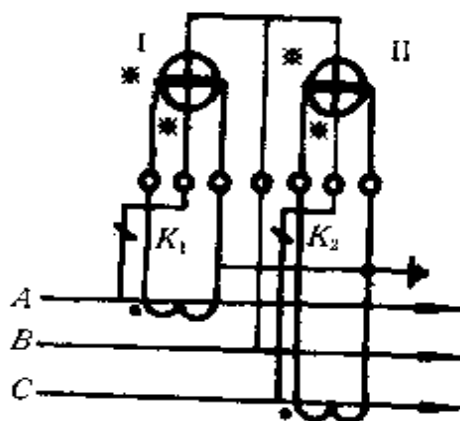
式中： $U$ ——电路的线电压(V)；

$I_2$ ——电流互感器二次侧的线电流(A)。

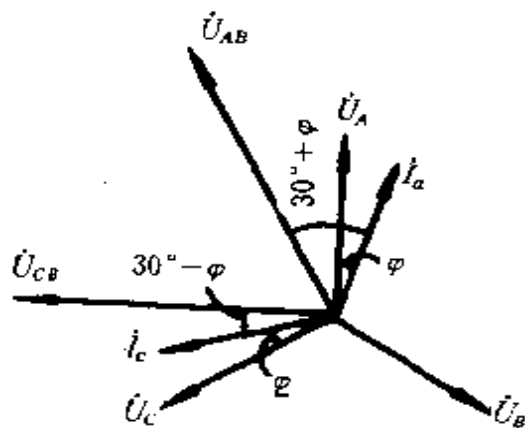
用秒表实测出电度表在 $t$ 时间内铝盘的转数 $n$ ，并测出电路的线电压和电流互感器二次侧的线电流，便可按上式算出负载的功率因数。

### 3. 用三相有功电度表和秒表测算 $\cos\varphi$

接线图如图 15—17 所示。



(a) 接线图



(b) 矢量图

图 15—17 用三相有功电度表测算  $\cos\varphi$  的接线

负载的功率因数

$$\cos\varphi = \frac{t_1 + t_2}{\sqrt{t_1^2 - t_1 t_2 + t_2^2}}$$

式中： $t_1$ ——为  $K_1$  闭合， $K_2$  断开时，电度表铝盘转动一周所需的时间(s)；

$t_2$ ——为  $K_1$  断开， $K_2$  闭合时，电度表铝盘转动一周所需的时间(s)。

测试时，可记录电度表铝盘转数周到十几周所需的时间，再求出转动一周的平均时间。

须注意：应用上式时，当电度表正转时取“+”号代入，反转时取“-”号代入。

#### 4. 用两只单相有功电度表测算 $\cos\varphi$

(1) 三相三线制(接线图见图 15—7)：由前述的两表法测量三相无功功率的分析可知，三相无功功率为

$$Q = \sqrt{3} UI \sin\varphi = \sqrt{3} (P_2 - P_1)$$

故

$$\begin{aligned} \cos\varphi &= \frac{P}{\sqrt{P_2 + Q_2}} \\ &= \frac{P_1 + P_2}{\sqrt{(P_1 + P_2)^2 + [\sqrt{3} (P_2 - P_1)]^2}} \end{aligned}$$

注意：当  $\varphi > 60^\circ$  时，表  $P_2$  反转，上式的  $P_2$  为负值代入。

(2) 三相四线制(接线图见图 15—18)：

由矢量图可知：

$$P_1 = K_{TA} U_A I_a \cos\varphi$$

$$P_2 = K_{TA} U_c I_c \cos(60^\circ - \varphi)$$

$$= K_{TA} U_A I_a \left( \frac{1}{2} \cos\varphi + \frac{\sqrt{3}}{2} \sin\varphi \right)$$

$$2P_2 = K_{TA} U_A I_a (\cos\varphi + \sqrt{3} \sin\varphi)$$

三相无功功率

$$Q = \sqrt{3}UI\sin\varphi = 2P_2 - P_1$$

故 
$$\frac{2P_2 - P_1}{\sqrt{3}P_1} = \frac{\sqrt{3}UI\sin\varphi}{\sqrt{3}UI\cos\varphi} = \operatorname{tg}\varphi$$

由上式可知,当知道  $P_1$ 、 $P_2$  值后,便可算出  $\operatorname{tg}\varphi$ ,从而求得  $\cos\varphi$  值。

注意:当  $\varphi > 30^\circ$  时,表  $P_2$  反转, $P_2$  为负值,上式中  $P_2$  取负号。

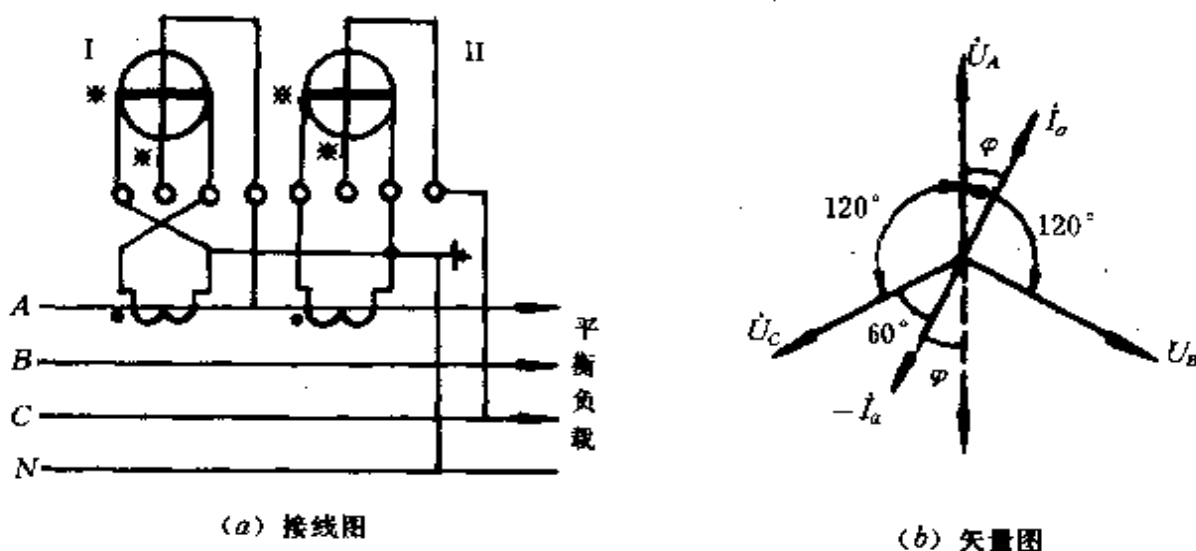


图 15-18 用两只单相有功电度表测算  $\cos\varphi$  的接线

**例 15—2** 按图 15—18 测定某负载的功率因数,测试数据如下:表  $P_1$  铝盘转动 12 圈,走时 18s;表  $P_2$  铝盘转动 8 圈,走时 18s。已知电度表常数  $K$  为 2500r/kWh,电流互感器的变比  $K_{TA}$  为 100/5,试求负载的功率因数。

解

$$\begin{aligned} P_1 &= \frac{3.6nK_{TA}}{Kt} \times 10^6 = \frac{3.6 \times 12 \times 20}{2500 \times 18} 10^6 \\ &= 19200(\text{W}) = 19.2\text{kW} \end{aligned}$$

$$P_2 = \frac{3.6 \times 8 \times 20}{2500 \times 18} \times 10^6 = 12800(\text{W}) = 12.8 \text{ kW}$$

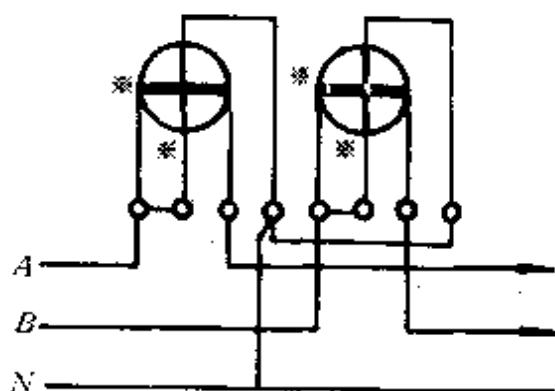
所以  $\text{tg}\varphi = \frac{2P_2 - P_1}{\sqrt{3}P_1} = \frac{2 \times 12.8 - 19.2}{\sqrt{3} \times 19.2} = 0.193$

由此得  $\cos\varphi = 0.982$

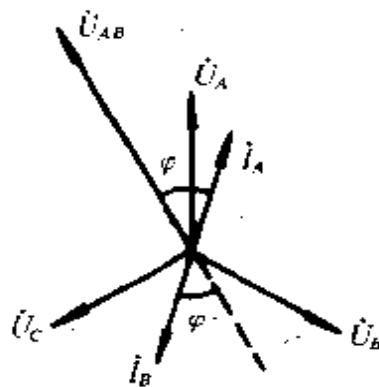
### 十、两相 380V 交流电焊机电度计量接线和分析

两相 380V 交流电焊机电度计量接线有以下几种。

#### 1. 用两只 220V 单相电度表相电压接线法测算



(a) 接线图



(b) 矢量图

图 15—19 用两只 220V 单相电度表相电压的接线

图 15—19 为用两只 220V 单相电度表相电压的接线,交流电焊机可接在任意两相电源(图中接在 A、B 相)。由矢量图可知:

$$P_1 = U_A I_{AB} \cos(30^\circ - \varphi)$$

$$P_2 = U_B I_{BA} \cos(30^\circ + \varphi)$$

$$P = P_1 + P_2 = U_A I_{AB} \cos(30^\circ - \varphi) + U_B I_{BA} \cos(30^\circ + \varphi) = UI \cos\varphi$$

而电焊机的负载功率正好为  $P = U_{AB} I_A \cos\varphi = UI \cos\varphi$ 。因此,电度计量值应是两只单相电度表读数之和。

当  $\cos\varphi > 0.5$  ( $\varphi < 60^\circ$  时),两表正转;当  $\cos\varphi = 0.5$  ( $\varphi =$

60°时),表 $P_1$ 正转,表 $P_2$ 停转( $P_2 = 0$ );当 $\cos\varphi < 0.5$ ( $\varphi > 60^\circ$ 时),表 $P_1$ 正转,表 $P_2$ 反转,此时 $P = P_1 + (-P_2)$ 。

电焊机的功率因数一般为0.6~0.65之间,符合 $\cos\varphi > 0.5$ 时的情况。

2. 用两只220V单相电度表电压串联接线法测算

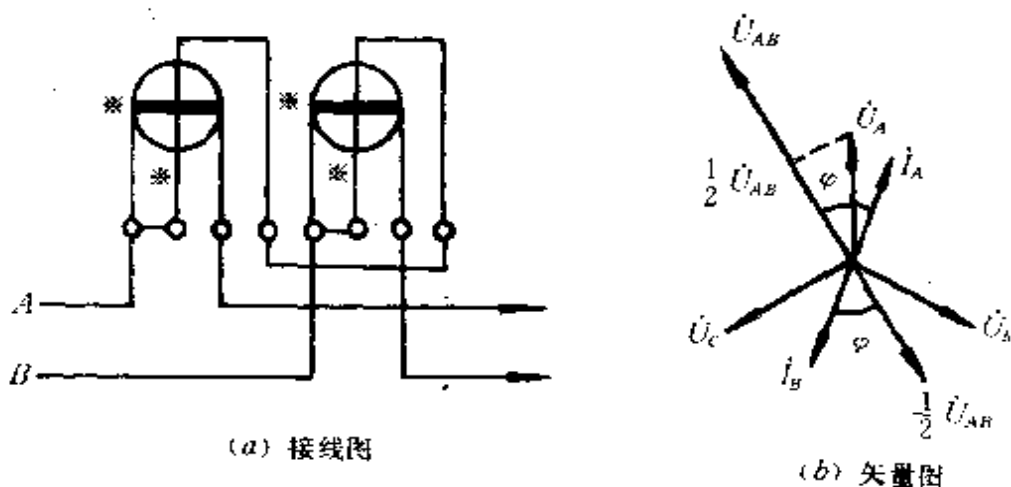


图 15-20 用两只220V单相电度表电压串联的接线

图 15-20 为用两只220V单相电度表电压串联的接线,由矢量图可知:

$$P_1 = \frac{1}{2}U_{AB}I_{AB}\cos\varphi$$

$$P_2 = \frac{1}{2}U_{BA}I_{BA}\cos\varphi$$

$$P = P_1 + P_2 = \frac{1}{2}U_{AB}I_{AB}\cos\varphi + \frac{1}{2}U_{BA}I_{BA}\cos\varphi$$

$$= UI\cos\varphi$$

须注意:两只电度表必须用同一型号、同一厂家生产的,以保证电压线圈阻值相等,使每个电压线圈上承受的电压为190V,否则电压将分配不均,降低计量准确度。为此两只电度表必须在190V电压下校验合格。

### 3. 用三相三线电度表单元件接线法测量

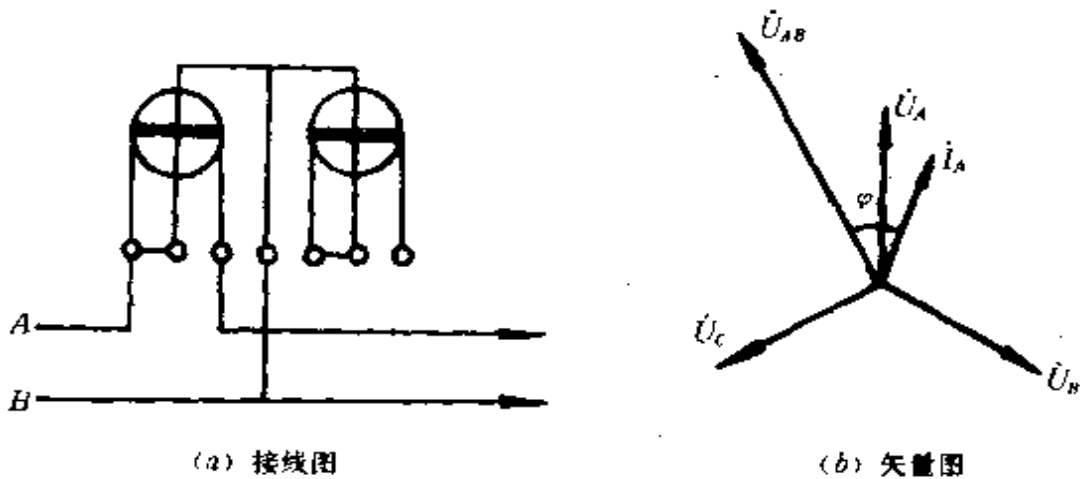


图 15—21 用三相三线电度表单元件的接线

图 15—21 为用三相三线电度表单元件的接线,即只用三相三线电度表的一只电压元件和电流元件,电流线圈串入电源回路内,电压线圈跨接于所用线电压之间,线圈所承受为额定线电压。其功率  $P = UI\cos\varphi$ 。直接读出电度表指示值,就是电焊机负载的功率。

### 4. 用三相三线电度表两元件接线法测量

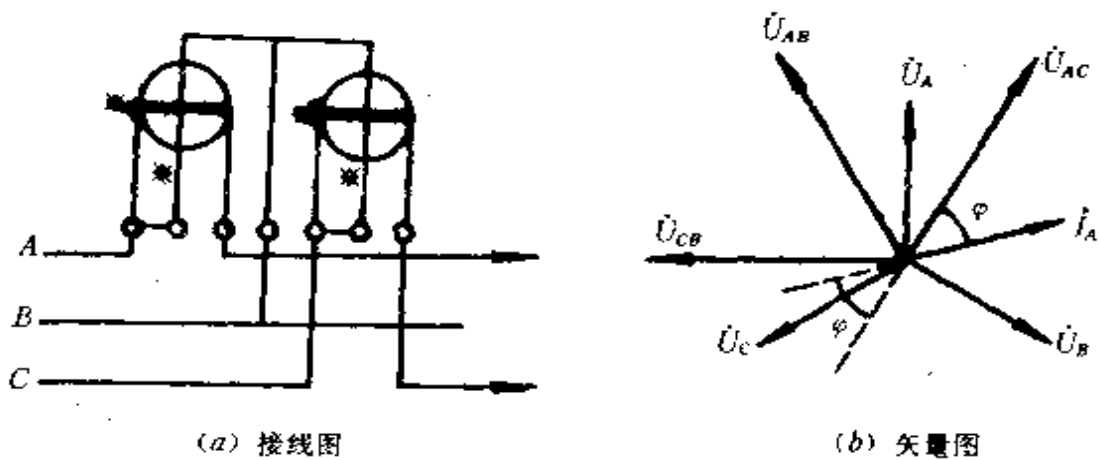


图 15—22 用三相三线电度表两元件的接线

图 15—22 为用三相三线电度表两元件的接线,电焊机可接



在任意两相电源(图中接在 A、C 相),由矢量图可知:

$$P_1 = U_{AB}I_{AC}\cos(60^\circ + \varphi)$$

$$P_2 = U_{CB}I_{CA}\cos(60^\circ - \varphi)$$

$$P = P_1 + P_2 = U_{AB}I_{AC}\cos(60^\circ + \varphi) + U_{CB}I_{CA}\cos(60^\circ - \varphi) = UI\cos\varphi$$

电焊机负载功率正好为  $P = U_{AC}I_{AC}\cos\varphi = UI\cos\varphi$

直接读出电度表指示值,就是电焊机负载的功率。

### 5. 用三相四线电度表接线法测量

用三相四线电度表测量有两种接线法,如图 15—23 和图 15—24 所示。第一种接线法中,三元件中只有两个元件构成转

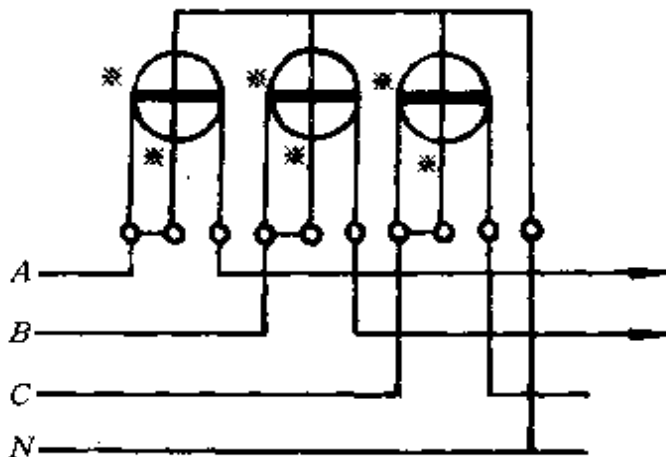


图 15—23 用三相四线电度表的接线(第一种接线法)

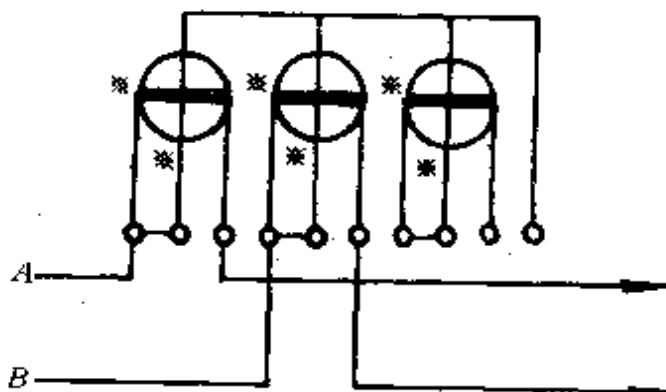


图 15—24 用三相四线电度表的接线(第二种接线法)

动力矩,另一组元件不起作用。负载的功率关系式与用两只 220V 单相电度表相电压的接线情况相同,电度计量为直读值。其矢量图同图 15—19(b);第二种接法实际构成两只电压线圈串联后跨接于线电压上,电流线圈的接法不变,每只电压线圈所受的电压是 190V,为线圈额定电压 220V 的 0.866 倍,对计量准确度稍受影响。负载的功率关系与用两只 220V 单相电度表电压串联的接线情况相同,电度计量为直读值。其矢量图同 15—20(b)。

上述几种测量电焊机负载的方法比较,见表 15—3。

表 15—3 六种电度表接线方法的比较

方法	优点	缺点	电度值
1	计量正确	(1) 需两只单相表 (2) 需接 $N$ 相	两表读数的代数和
2	不必接 $N$ 相	(1) 需两只单相表 (2) 电压线圈的电压只有 0.866 倍额定值	两表读数的代数和
3	(1) 只需一只三相三线表 (2) 不必接 $N$ 相,计量准确、接线简单		直读值
4	(1) 只需一只三相三线表 (2) 不必接 $N$ 相 (3) 电焊机可接任意两相,计量准确		直读值
5	(1) 只需一只三相四线表 (2) 计量准确	需接 $N$ 相	直读值
6	(1) 只需一只三相四线表 (2) 不接 $N$ 线	电压线圈的电压只有 0.866 倍额定值	直读值

### 十一、用单相电度表测量两相 380V 负荷的方法

#### 1. 正确接线

盐浴炉等两相 380V 负荷可以用单相 220V 电度表测量,其正确的接线方法如图 15--25 所示。

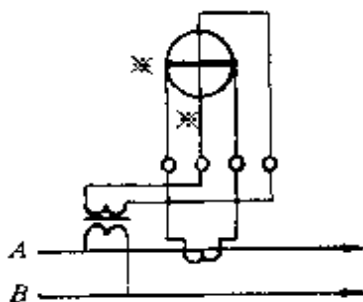


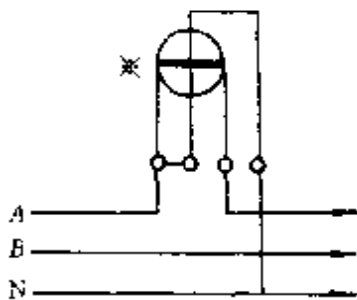
图 15-25 正确接线图

图中采用一只 380/220V、容量为 25VA 以上的变压器作为单相 220V 电度表电压线圈的电源。接线时必须注意变压器、电流互感器和电度表电压线圈及电流线圈的极性。若发现电度表反转,将电压线圈或电流线圈的任一对引线头对调即可。

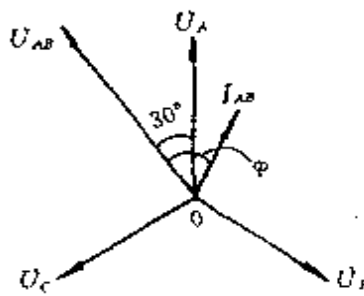
负荷耗电量 = 电度表读数 × 电压比(380/220 = 1.73) × 电流比

#### 2. 错误接线分析

(1) 负载接 A、B 相,而接线如图 15-26(a) 所示。



(a) 接线图



(b) 矢量图

图 15-26 错误接线之一

由矢量图可知,负荷实际消耗功率为

$$P = P_{AB} = U_{AB}I_{AB}\cos\varphi$$

而电度表计量的功率为

$$P' = P_{A0} = U_{A0}I_{AB}\cos(\varphi - 30^\circ)$$

又 
$$U_{AB} = \sqrt{3}U_{A0}$$

由上面三式可得

$$P' = P_{A0} = \frac{\cos(\varphi - 30^\circ)}{\sqrt{3}\cos\varphi}P_{AB}$$

当  $0^\circ < \varphi < 90^\circ$  时,电度表正转,但计量可能不正确。当  $\varphi = 30^\circ$  时,  $P_{A0} = \frac{2}{3}P_{AB}$ , 即  $P' = \frac{2}{3}P$ , 说明电度表读数仅为负荷实际消耗电能的  $\frac{2}{3}$ ; 当  $\varphi = 45^\circ$  时,  $P' = 0.789P$ ; 只有当  $\varphi = 60^\circ$  时,  $P' = P$ 。

(2) 负荷接 A、C 相, 而接线如图 15—27(a) 所示。

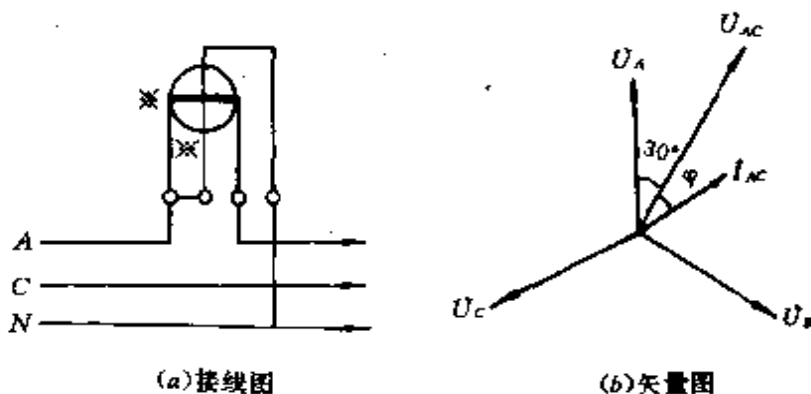


图 15 27 错误接线之二

由矢量图可知,负荷实际消耗功率为

$$P = P_{AC} = U_{AC}I_{AC}\cos\varphi$$

而电度表计量的功率为

$$P' = P_{A0} = U_{A0}I_{AC}\cos(30^\circ + \varphi)$$

故 
$$P' = P_{A0} = \frac{\cos(30^\circ + \varphi)}{\sqrt{3}\cos\varphi}P_{AC}$$

当  $0^\circ < \varphi < 60^\circ$  时,电度表正转;  $\varphi > 60^\circ$  时,电度表反转。当

$\varphi = 30^\circ$  时,  $P' = P/3$ ; 说明电度表读数仅为负荷实际消耗电能的  $1/3$ ; 当  $\varphi = 45^\circ$  时,  $P' = 0.21P$ 。

## 十二、校验及更换表刻度

### 1. 单相电度表的简易校验

单相电度表的正确校验应与标准单相电度表比较进行, 当没有配置标准单相电度表时, 可按以下方法简易校验。该方法需配置一块电压表、一块秒表和一只已知功率的灯泡, 即可进行, 接线图如图 15—28 所示。

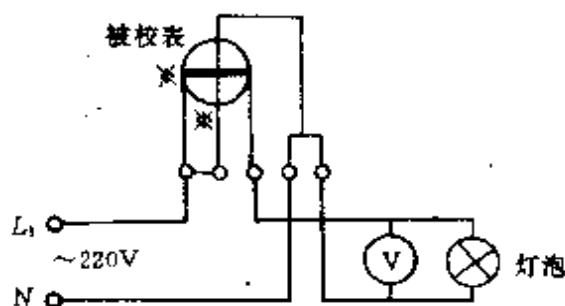


图 15—28 单相电度表校验接线图

(1) 计算公式: 电度表铝盘转  $n$  圈所需理论时间可按下式计算:

$$t_e = \frac{3600n}{KP_e} \left( \frac{U_e}{U} \right)^2$$

式中:  $t_e$ ——铝盘转  $n$  圈所需理论时间(s);

$K$ ——电度表常数(r/kWh);

$P_e$ ——灯泡铭牌功率(kW);

$U_e$ ——灯泡额定电压, 220V;

$U$ ——校验时灯泡两端的实际电压(V)。

电度表误差为

$$\gamma = \frac{t_r - t}{t} \times 100\%$$

式中： $t$ ——实际测得的时间(s)。

(2) 注意事项：为了保证测量精度，要求：

- ① 取  $n$  不少于 3 圈的整数；
- ② 重复测几次，取其平均值；
- ③ 测量期间灯泡端电压应稳定，若通过稳压器则更好。

**例 15—3** 用一只 100W 的灯泡作负荷，校验某单相电度表。已知电度表常数为 1500r/kWh。校验时，灯泡端电压为 230V，用秒表测得 4 次电度表转 5 圈所用平均时间为 99s。求该电度表误差。

**解** 由题意， $n = 5, U = 230V, P_r = 0.1kW, K = 1500r/kWh$

$$t_r = \frac{3600n}{KP_r} \left( \frac{U_r}{U} \right)^2 = \frac{3600 \times 5}{1500 \times 0.1} \times \left( \frac{220}{230} \right)^2 = 109.79(s)$$

电度表误差为

$$\gamma = \frac{t_r - t}{t} = \frac{109.79 - 99}{99} = 0.109 = 10.9\%$$

## 2. 用单相校验台校验三相电度表的方法

在不具备三相校验装置或三只单相标准电度表的情况下，三相电度表可用单相法校验。现以三相三元件为例介绍其检验方法。

(1) 分元件平衡校验：指三组或两组电磁元件分别进行误差调整，即在额定电压、 $\cos\varphi = 1.0$  时，仅对其中一组元件通入标定电流，利用第一组电磁元件的平衡调整装置调整误差。用同样方法依次对第二组和第三组进行通电误差调整，使各元件间误差尽可能相互接近。然后在额定电压、 $\cos\varphi = 0.5$  时，再分别通以电流，进行相位角调整。标准表应得的转数  $n_0$  为

$$n_0 = n_x \frac{C_0}{C_x}$$

式中： $n_x$ ——被试表的转数；

$C_0, C_x$ ——标准表和被试表的电度表常数(r/kWh)。

(2) 三相组合调整：经分元件调整后，将三相元件电流线圈串联，电压线圈并联，分别校验全负载、 $\cos\varphi = 1.0$ 时，轻负载、 $\cos\varphi = 1.0$ 时，及全负载、 $\cos\varphi = 0.5$ 时的误差，使其符合要求。标准表应得的转数为

$$n_0 = \frac{n_x}{3} \cdot \frac{C_0}{C_x}$$

(3) 潜动和启动电流校验与单相表相同。

### 3. 二次测量仪表刻度的改变

当要利用现有的，但与实际使用的电压、电流互感器变比不配套的电压表、电流表或功率表时，可以改变仪表的刻度。具体做法如下：

(1) 电流表：凡与电流互感器配套使用的电流表，其额定电流均为5A，而刻度板上的量程等于5A乘以该表所配电流互感器的变比之积。据此，可以得到电流表更改刻度的计算公式为

$$A' = \frac{AK'_{TA}}{K_{TA}}$$

式中： $A$ ——电流表的原刻度值；

$A'$ ——电流表更改后的刻度值；

$K_{TA}$ ——电流表原配套的电流互感器变比；

$K'_{TA}$ ——实际使用的电流互感器变比。

**例 15—4** 有一块 150/5 电流互感器配套使用的电流表，现要改用在 100/5 的电流互感器上，试更改刻度。

$$\text{解} \quad A' = \frac{AK'_{TA}}{K_{TA}} = \frac{20A}{30} = \frac{2}{3} (\text{A})$$

原刻度值	0	37.5	75	112.5	150
改后刻度值	0	25	50	75	100

(2) 电压表:凡与电压互感器配套使用的电压表,其额定电压均为 100V,而刻度板上的量程等于 100V 乘以该表所配电压互感器的变比之积。因此,电压表更改刻度的计算公式和电流表的相同,只是将公式中的  $K_{TA}$  和  $K'_{TA}$  分别改为  $K_{TV}$  和  $K'_{TV}$ 。

(3) 功率表:其更改刻度的计算公式为

$$A' = \frac{AK'_{TA}K'_{TV}}{K_{TA}K_{TV}}$$

式中:  $A$ ——功率表原刻度值;

$A'$ ——功率表更改后的刻度值;

$K_{TA}$ ——功率表原配套的电流互感器变比;

$K_{TV}$ ——功率表原配套的电压互感器变比;

$K'_{TA}$ ——实际使用的电流互感器变比;

$K'_{TV}$ ——实际使用的电压互感器变比。

#### 4. 温度指示仪表测温值的校正

温度指示仪表的刻度都是按照热电偶冷端处于 0°C 时制造时,因此冷却温度变化会影响被测温度指示的正确性。为了消除冷却温度变化所造成的影响,可采取以下几种方法校正:

(1) 补偿导线法:补偿导线和热电偶在一定温度范围内(一般在 0 ~ 100°C)热电动势与温度关系是一致的,两者连接后在连接点所产生附加电动势的代数和,将不会影响热电偶回路的电动势值。从而使处于被测对象附近的热电偶引出端接点,移到温度近似恒定的仪表处。

常用的补偿导线见表 15—4。



表 15—4 补偿导线规格

热电偶类别	补偿导线材料		100°C 时的 热电动势 (mV)	1m 长的电阻值(Ω)		
	正数	负数		1(mm <sup>2</sup> )	1.5(mm <sup>2</sup> )	2.5(mm <sup>2</sup> )
铂铑—铂	铜	99.4% 铜 + 0.6% 镍	0.64 ± 0.03	0.05	0.03	0.02
镍铬—镍铝	铜	康铜	4.16 ± 0.15	0.52	0.35	0.21
镍铬—考铜	镍铬	考铜	6.95 ± 0.3	1.15	0.77	0.46
铁—考铜	铁	考铜	5.75 ± 0.25	0.61	0.41	0.24
铁—康铜	铁	康铜	5.15	0.61	0.41	0.24
铜—康铜	铜	康铜	4.75 ± 0.15	0.50	0.33	0.20

(2) 计算校正法:当热电偶引出端接点处温度变化很小时,可用此方法。

① 指示仪表温度的校正:

$$t = t_{zs} + Kt_w$$

式中:  $t$ ——校正后的实际温度:(°C);

$t_{zs}$ ——仪表的指示温度(°C);

$t_w$ ——补偿导线(或普通导线)两端的温度差(°C);

表 15—5 校正系数  $K$  值

测量温度 (°C)	热电偶种类				
	铜—考铜	镍铬—考铜	铁—考铜	镍铬—镍铝	铂铑—铂
0	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
20	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
100	0.86	0.9	1.00	1.00	0.82
200	0.77	0.83	0.99	1.00	0.72
300	0.7	0.81	0.99	0.98	0.69
400	0.68	0.83	0.98	0.98	0.66
500	0.65	0.79	1.02	1.00	0.63
600	0.65	0.78	1.00	0.96	0.62
700		0.8	0.91	1.00	0.60
800		0.8	0.82	1.00	0.59
900			0.84	1.00	0.56
1000				1.07	0.55
1100					0.53
1200					0.53
1300					0.52
1400					0.52
1500					0.53
1600					0.53

② 检定热电偶时冷端温度的校正：先按下式求出实际温度所对应的电动势  $E_{(t_{bc}, t_0)}$

$$E_{(t_{bc}, t_0)} = E_{(t_{bc}, t_w)} + E_{(t_w, t_0)}$$

式中： $E_{(t_{bc}, t_w)}$ ——在检定热电偶时读取的被测温度  $t_{bc}$  的相应的电动势；

$E_{(t_w, t_0)}$ ——冷端温度为  $t_w$  所对应的电动势，可由表 15—6

查得。

然后查表 15—6, 得  $E_{(t_x, t_0)}$ , 所对应的温度  $t$  即为实际温度。

此外, 还有采用桥式自动补偿器, 如国产 WBC—57 型, 以及冷端恒温法。

表 15—6 温度与绝对毫伏数据对照表

绝对毫伏 工作端 温度(°C)	热电偶 分度号	铂铑—铂 LB—3	镍铬—镍铝 EU—2	镍铬—考铜 EA—2
0		0	0	0
10		0.056	0.40	0.65
20		0.113	0.80	1.31
30		0.173	1.20	1.98
40		0.235	1.61	2.66
50		0.299	2.02	3.35
60		0.364	2.43	4.05
70		0.431	2.85	4.76
80		0.500	3.26	5.48
90		0.571	3.68	6.21
100		0.643	4.10	6.95
200		1.436	8.13	14.66
300		2.315	12.21	22.90
400		3.250	16.40	31.48
500		4.220	20.65	40.15
600		5.222	24.90	49.01
700		6.256	29.13	57.74

(续表)

绝对 毫伏 工作端 温度(°C)	热电偶 分度号	铂铑—铂 LB—3	镍铬—镍铝 EU—2	镍铬—考铜 EA—2
800		7.322	33.29	66.36
900		8.421	37.33	
1000		9.556	41.27	
1100		10.723	45.10	
1200		11.915	48.81	
1300		13.116	52.37	
1400		14.313		
1500		15.504		
1600		16.688		

注：自由端温度为0°C。

### 第三节 仪表错误接线的分析

#### 一、电度表错误接线的分析与更正

##### 1. 矢量分析法

电度表错误接线引起的计量错误及追加(或退回)电量的计算,可从矢量分析中得出。现举例说明。

**解 15--5** 设有一只两元件的三相有功电度表,电压回路AB相接错,A相电流互感器二次侧反接,试分析计量结果和更正电量。

**解**

(1) 画出接线图和矢量图,见图 15—29。

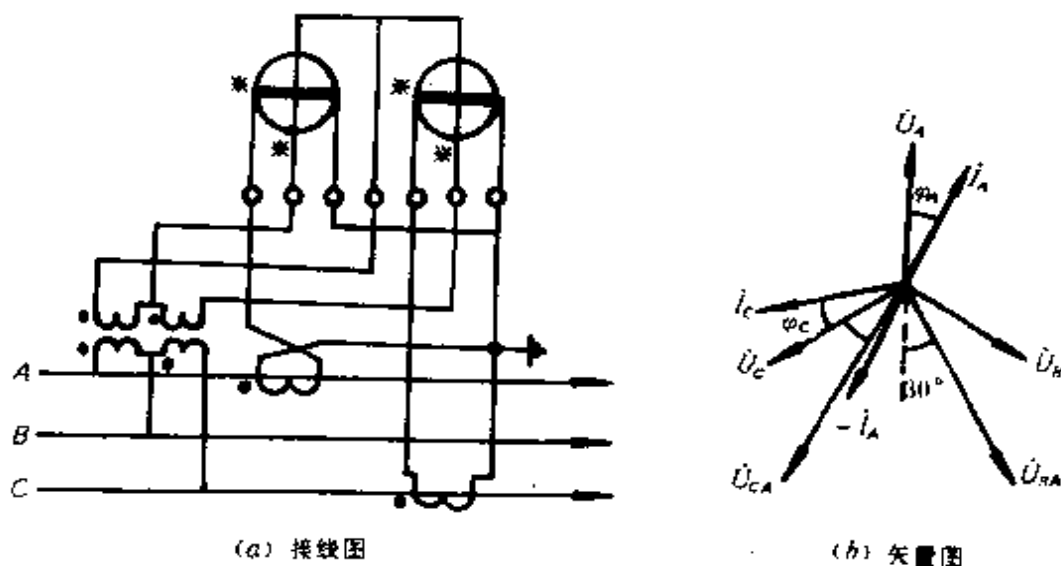


图 15—29 电度表的错误接线

(2) 由矢量图可知：

$$P_1 = U_{BA} I_A \cos(30^\circ + \varphi)$$

$$P_2 = U_{CA} I_C \cos(30^\circ + \varphi)$$

错误接线的电度表的电量为(为方便起见,用功率分析)

$$P_h = P_1 + P_2 = U_{BA} I_A \cos(30^\circ + \varphi) + U_{CA} I_C \cos(30^\circ + \varphi)$$

当三相电压对称,负荷电流平衡时

$$P_h = UI(\sqrt{3} \cos\varphi - \sin\varphi)$$

正确的电量应该为

$$P = \sqrt{3} UI \cos\varphi$$

所以应追加电量的更正率为

$$\epsilon_p = \frac{P}{P_h} - 1 = \frac{\sqrt{3} UI \cos\varphi}{UI(\sqrt{3} \cos\varphi - \sin\varphi)} - 1$$

$$= \frac{\sqrt{3}}{\sqrt{3} - \operatorname{tg}\varphi} - 1$$

此种情况相当于表 15-7 中的 ① ~ 4。

**例 15-6** 同上的电度表,电压互感器二次侧  $U_{AB}$  反接,试分析计量结果和更正电量。

**解**

(1) 画出接线图和矢量图,见图 15-30。

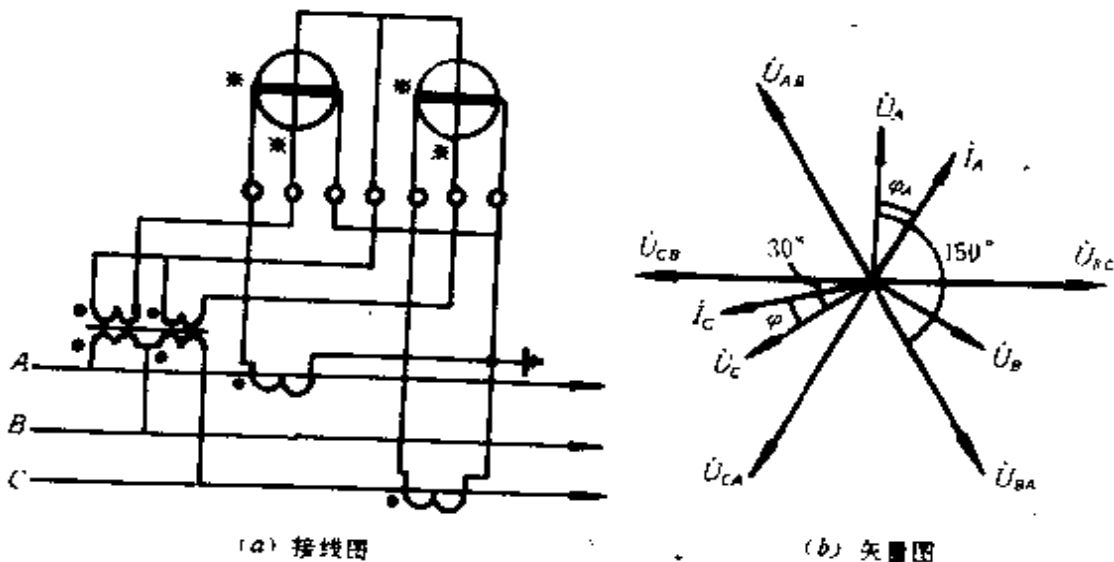


图 15-30 电度表  $U_{AB}$  反接的接线

(2) 由矢量图可知:

$$P_1 = U_{BA}I_A\cos(150^\circ - \varphi)$$

$$P_2 = U_{CB}I_C\cos(30^\circ - \varphi)$$

当负载对称时

$$P_h = U_{BA}I_A\cos(150^\circ - \varphi) + U_{CB}I_C\cos(30^\circ - \varphi)$$

$$= UI(2\sin 30^\circ \sin \varphi) = UI\sin \varphi$$

说明该电度表指示值为无功电度。

应追加电量的更正率为

$$\epsilon_p = \frac{\sqrt{3} UI \cos \varphi}{UI \sin \varphi} - 1 = \frac{\sqrt{3}}{\operatorname{tg} \varphi} - 1$$

其它各种错误接线方式均可按上述矢量分析法加以分析。

## 2. 查表法

将各种错误接线方式下的矢量分析结果列于表 15—7 和表 15—8 中。这样就可以方便地从表中查出所需结果。但象例 15—5 那样因互感器接错的情况未列入表中。

具体步骤如下：

(1) 接表 15—7 查找出错误接线的所属情况；

(2) 查表 15—7 找出在相应功率因数下的电度计量更正率  $\epsilon_p$ ；

(3) 将错误接线时电度表记录的电量乘以  $\epsilon_p$ ，即得追补(或退还)的电量。

**例 15—7** 某厂将两元件的三相有功电度表的电压回路 BC 相接错，1 元件电流极性接反。所测得的月电量为 68200kWh，月平均功率因数为 0.95。试更正电量。

**解** (1) 由表 15—7 可知，上述接线方式为：电压相序属 ②，电流相序属 4，所以第 ② 列与第 4 行交叉对应栏中所注明的  $UI(-\sqrt{3} \cos \varphi - \sin \varphi)$ ，即为此种接线的计量功率表达式。

(2) 根据接线序号 ② ~ 4，查表 15—8，便可找出更正率为

$$\epsilon_p = -\frac{\sqrt{3}}{\sqrt{3} + \operatorname{tg} \varphi} - 1, \text{ 在 } \cos \varphi = 0.95 \text{ 时}$$

$$\epsilon_p = \frac{-1.856 - 1.827}{2} = -1.842, \text{ 负值表示退还。}$$

(3) 退还电度数  $\Delta A_p$  为

$$\Delta A_p = 58200 \times 1.842 = 125624(\text{kWh})$$

**例 15--8** 某厂接有功电度表和无功电度表,在更换电流互感器及电度表时,将 C 相电流互感器变比由 75/5 错误成 100/5,且 A 相电流反极性接入电度表的 C 相回路、C 相电流接入电度表的 A 相回路,如图 15—31(a) 所示。三相三线有功电度表采用 DS15 型,三相三线无功电度表采用 DX8 型(60° 内相角)。供电部门计费倍率为 75/5 = 15。错接期间,有功电度表为 200kWh、无功电度表为 360kVarh(反转)。问如何纠正电量计费?

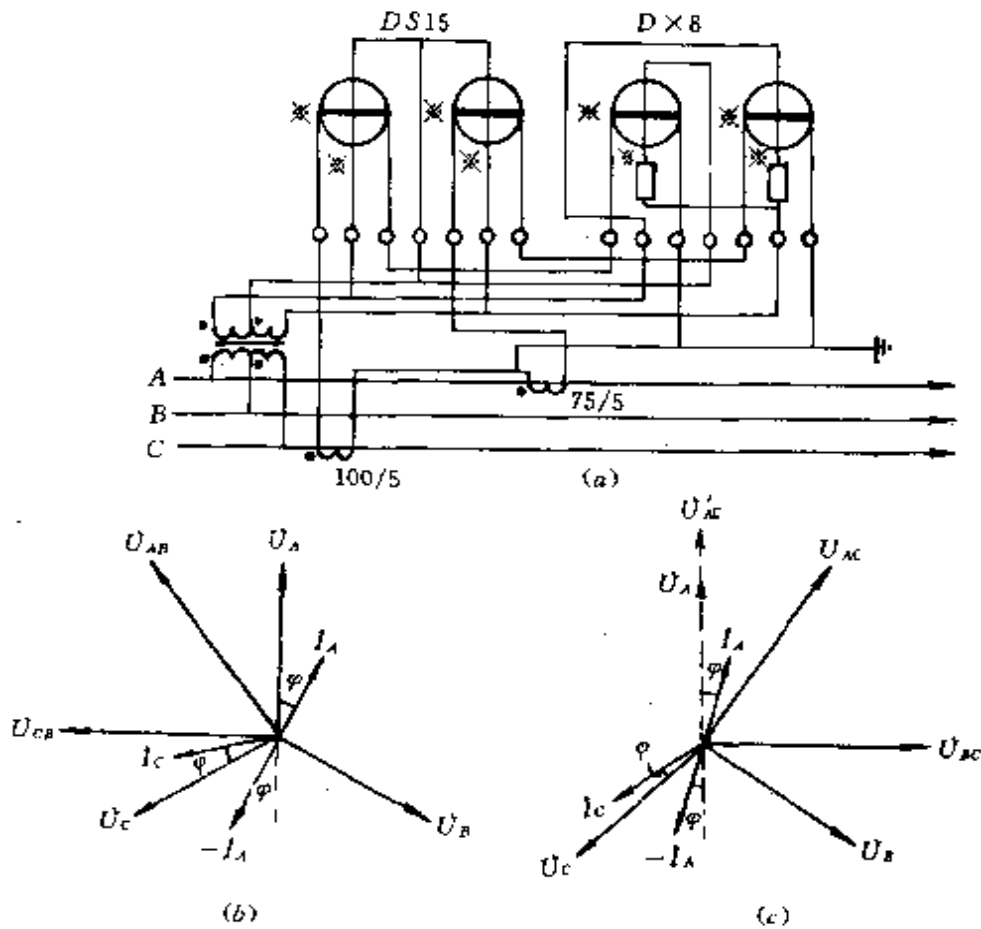


图 15—31 电流互感器弄错及错误接线



**解** 画出接线图和矢量图(见图 15—1)。

由于 A、C 相电流互感器的变比不同,两互感器二次电流也不同,设变比为 75/5 的电流互感器 A 相二次电流为 1,则变比为 100/5 的电流互感器 C 相二次电流为 0.75。

由矢量图可知:

$$\begin{aligned} \text{有功功率 } P_k &= P_1 + P_2 = U_{AB}I_C \times 0.75\cos(90^\circ - \varphi) \\ &\quad + U_{CB}I_A\cos(90^\circ - \varphi) \\ &= 1.75UI\sin\varphi \approx \sqrt{3}UI\sin\varphi \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{无功功率 } Q_k &= Q_1 + Q_2 = U_{BC}I_C \times 0.75\cos(180^\circ - \varphi) \\ &\quad + U_{AC}I_A\cos(180^\circ + \varphi) \\ &= -1.75UI\cos\varphi \approx -\sqrt{3}UI\cos\varphi \end{aligned}$$

可见,错接后,有功电度表计量了无功电能,而无功电度表倒转计量了有功电能。错接期间

$$\text{有功电量 } P_k = 360 \times 75/5 = 5400(\text{kWh})$$

$$\text{无功电量 } Q_k = 200 \times 75/5 = 3000(\text{kvarh})$$

$$\text{tg}\varphi = Q_k/P_k = 3000/5400 = 0.556$$

$$\varphi = 29^\circ$$

$$\text{功率因数 } \cos\varphi = 0.87$$

据此,可按上述电量计算电费。

**例 15—9** 某厂接有有功电度表和无功电度表,接线正确,如图 15—32 所示。三相三线有功电度表采用 DS10 型,三相三线无功电度表采用 DX8 型(60° 内相角)。如果供电线路因检修而将 A、C 互换,则会出现什么现象?如何计算追加电量的更正率?

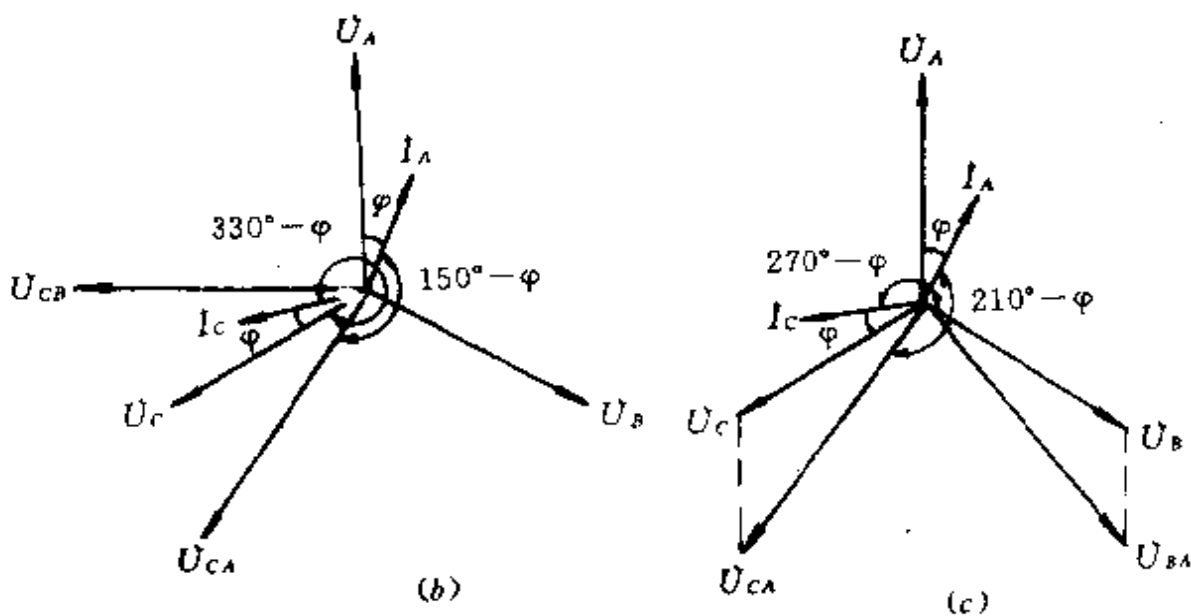
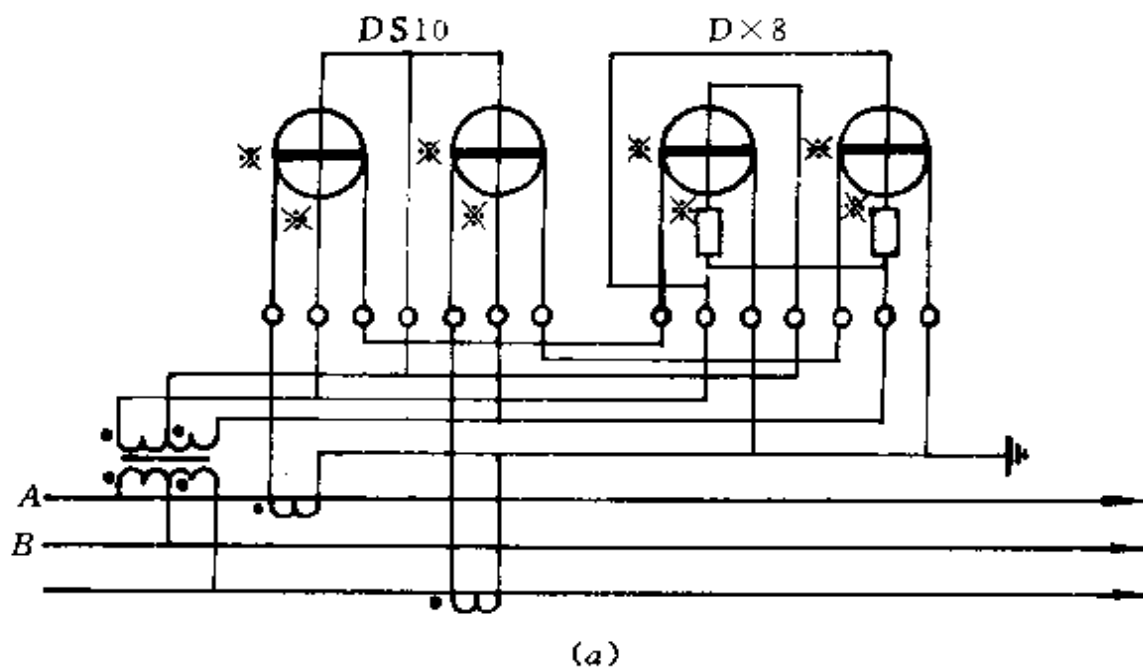


图 15 32 电度表正确接线及换相后矢量分析  
 (a) 正确接线图    (b) 换相后分析有功电度的矢量图    (c) 换相后分析无功电度的矢量图

**解** (1) 画出正确接线图和 A、C 换相后的矢量图〔图 15—32(a)〕。

(2) 换相后有功电度表的电量为〔图 15—32(b)〕:

$$P_k = P_1 + P_2 = U_{CA}I_C \cos(330^\circ + \varphi) + U_{CA}I_A \cos(150^\circ - \varphi) = \sqrt{3}UI \cos\varphi$$

可见与正确接线时相同。

(3) 换相后无功电度表的电量为〔图 15—32(c)〕:

$$Q_k = Q_1 + Q_2 = U_{BC}I_C \cos(270^\circ - 30^\circ - \varphi) + U_{CA}I_A \cos(210^\circ - 30^\circ - \varphi) = UI \left( -\frac{\sqrt{3}}{2} \cos\varphi - \frac{\sqrt{3}}{2} \sin\varphi \right)$$

可见,换相后不论负荷情况如何,无功电度表均反转。所以应追加无功电量的更正率为

$$\begin{aligned} \epsilon_q &= \frac{Q}{Q_k} - 1 = \frac{\sqrt{3}UI \sin\varphi}{UI \left( -\frac{3}{2} \cos\varphi - \frac{\sqrt{3}}{2} \sin\varphi \right)} - 1 \\ &= \frac{-2\sqrt{3}}{3\operatorname{ctg}\varphi + \sqrt{3}} - 1 \end{aligned}$$

## 二、三相电度表电压线圈断路时计量分析与更正

### 1. 三相两元件有功电度表电压线圈断路

(1) 电度表 B 相电压接线端断路,见图 15—33。

这时元件 I 线圈上的电压为  $U_{AC}/2$ ,元件 II 线圈上的电压为  $U_{CA}/2$ ,故当负载对称时所测得的功率为

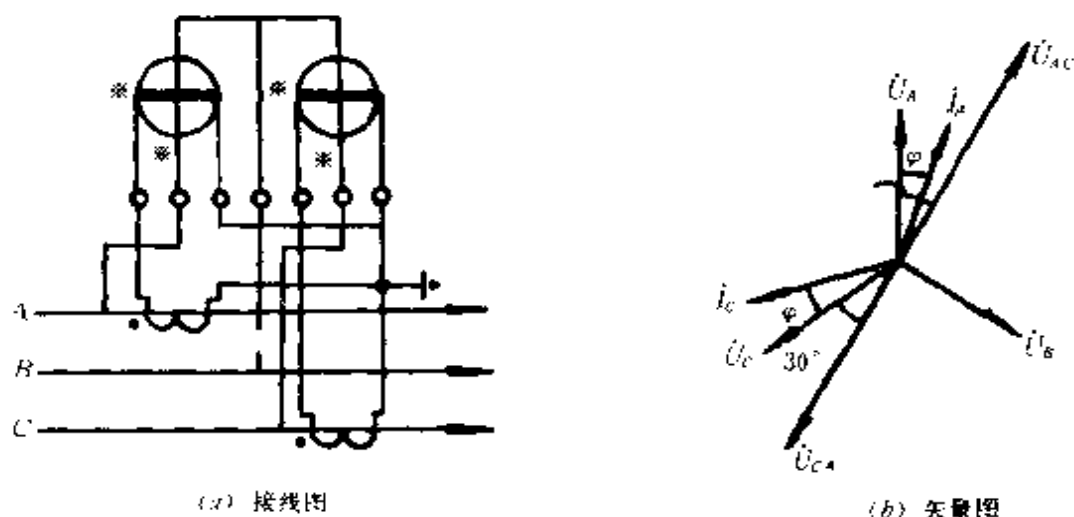


图 15-33 有功电度表 B 相电压回路断路

$$\begin{aligned}
 P &= P_1 + P_2 = \frac{1}{2}U_{AC}I_A\cos(30^\circ - \varphi) \\
 &\quad + \frac{1}{2}U_{CA}I_C\cos(30^\circ + \varphi) \\
 &= \frac{1}{2}\sqrt{3}UI\cos\varphi
 \end{aligned}$$

可见,少计一半电量。在功率因数  $\cos\varphi = 0 \sim 1$  ( $\varphi = 90^\circ \sim 0^\circ$ ) 范围内所测得功率为  $0 \sim \sqrt{3}UI/2$ ,电度表正转。

(2) 电度表 A 相电压接线端断路时所测得的功率为

$$P = P_1 + P_2 = UI\cos(30^\circ - \varphi) (\because P_1 = 0)$$

可见,在功率因数  $\cos\varphi = 0 \sim 1$  ( $\varphi = 90^\circ \sim 0^\circ$ ) 范围内所测得的功率为  $\sqrt{3}UI/2 \sim UI/2$ ,电度表正转。

(3) 电度表 C 相电压接线端断路时所测得的功率为

$$P = P_1 + P_2 = UI\cos(30^\circ + \varphi) (\because P_2 = 0)$$

测得功率范围为  $-UI/2 \sim 0 \sim \sqrt{3}UI/2$ ,即  $\cos\varphi = 0.5$  时电度表停转; $\cos\varphi < 0.5$  时反转; $\cos\varphi > 0.5$  时正转。

须指出：上述分析的是测定功率，而实际测定量是耗电量（即分析电度表），所以在按更正率考核电量时应考虑断相运行的时间。 $A$ 相断路更正率为  $2\sqrt{3} \sim 2$ （视  $\cos\varphi$  值而异）； $B$ 相断路为 2； $C$ 相断路，可能出现反转，这时应根据相邻月份电费酌情计算。

### 2. 三相三元件电度表电压回路断路

如电度表  $A$  相电压接线端断路，则

$$P_1 = 0 (\because U_{A0} = 0)$$

$$P_2 = \frac{1}{2} \sqrt{3} U_{B0} I_B \cos\varphi$$

$$P_3 = \frac{1}{2} \sqrt{3} U_{C0} I_C \cos\varphi$$

当  $U_{B0} = U_{C0} = U_x$ ,  $I_B = I_C = I$  时，

$$P = P_1 + P_2 + P_3 = \sqrt{3} U_x I \cos\varphi$$

$$\text{更正率 } \epsilon_p = \frac{\sqrt{3} U I \cos\varphi}{\sqrt{3} U_x I \cos\varphi} - 1 = \sqrt{3} - 1$$

**例 15—10** 某用户在电度表检查时发现，所用的三相四线总电度表没有接中性线，且  $B$  相电压断路。已知该表在这种情况下运行了三个月，电度表三个月实计用电量  $A$  为 15000kWh。问应再追补多少电量？

**解** 根据上述矢量分析结果，三个月应再追补的电量  $\Delta A_p$  为

$$\begin{aligned} \Delta A_p &= A\epsilon_p = 15000(\sqrt{3} - 1) \\ &= 10980(\text{kWh}) \end{aligned}$$

三个月的实际用电量为  $A(\epsilon_p + 1) = \sqrt{3}A = 1.73 \times 15000 = 25950(\text{kWh})$

用同样方法可以分析出  $B$  相或  $C$  相电压回路断路时的情况。其结果如下：三相四线电度表不接中性线时，不管那一相电压回路断路，其更正率均为  $\epsilon_p = \sqrt{3} - 1$ 。

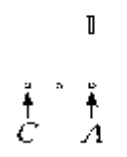
表 15—7

三相两元件有功电度表误差

计 量 电 流 相 序	电压 相 序 功 率	①	②	③
		I II $\dot{A} \dot{B} \dot{C}$	I II $\dot{A} \dot{C} \dot{B}$	I II $\dot{B} \dot{C} \dot{A}$
1	I II $\dot{A} \dot{C}$	$\sqrt{3} UI \cos \varphi$	0	$UI \left( -\frac{\sqrt{3}}{2} \cos \varphi \right. \\ \left. + \frac{3}{2} \sin \varphi \right)$
2	I II $\dot{C} \dot{A}$	0	$2UI \sin \varphi$	0
3	I II $\dot{C} \dot{A}$	$2UI \sin \varphi$	$UI \left( -\frac{\sqrt{3}}{2} \cos \varphi \right. \\ \left. - \frac{1}{2} \sin \varphi \right)$	$UI \left( -\sqrt{3} \cos \varphi \right. \\ \left. - \sin \varphi \right)$
4	I II $\dot{A} \dot{C}$	$UI \sin \varphi$	$UI \left( -\sqrt{3} \cos \varphi \right. \\ \left. - \sin \varphi \right)$	$UI \left( -\frac{\sqrt{3}}{2} \cos \varphi \right. \\ \left. - \frac{1}{2} \sin \varphi \right)$
5	I II $\dot{C} \dot{A}$	$-2UI \sin \varphi$	$UI \left( \frac{\sqrt{3}}{2} \cos \varphi \right. \\ \left. + \frac{1}{2} \sin \varphi \right)$	$UI \left( \sqrt{3} \cos \varphi \right. \\ \left. + \sin \varphi \right)$
6	I II $\dot{A} \dot{C}$	$-UI \sin \varphi$	$UI \left( \sqrt{3} \cos \varphi \right. \\ \left. + \sin \varphi \right)$	$UI \left( \frac{\sqrt{3}}{2} \cos \varphi \right. \\ \left. + \frac{1}{2} \sin \varphi \right)$
7	I II $\dot{A} \dot{C}$	$-\sqrt{3} UI \sin \varphi$	0	$UI \left( \frac{\sqrt{3}}{2} \cos \varphi \right. \\ \left. - \frac{3}{2} \sin \varphi \right)$

接线所计功率查对表

④	⑤	⑥
$\dot{B} \dot{A} \dot{C}$	$\dot{C} \dot{A} \dot{B}$	$\dot{C} \dot{B} \dot{A}$
0	$UI \left( -\frac{3}{2} \cos \varphi - \frac{3}{2} \sin \varphi \right)$	0
$UI \left( -\frac{3}{2} \cos \varphi - \frac{3}{2} \sin \varphi \right)$	0	$\sqrt{3} UI \cos \varphi$
$UI \left( \frac{\sqrt{3}}{2} \cos \varphi - \frac{1}{2} \sin \varphi \right)$	$UI \left( \sqrt{3} \cos \varphi - \sin \varphi \right)$	$UI \sin \varphi$
$UI \left( \sqrt{3} \cos \varphi - \sin \varphi \right)$	$UI \left( \frac{\sqrt{3}}{2} \cos \varphi - \frac{1}{2} \sin \varphi \right)$	$2UI \sin \varphi$
$UI \left( -\frac{\sqrt{3}}{2} \cos \varphi + \frac{1}{2} \sin \varphi \right)$	$UI \left( -\sqrt{3} \cos \varphi + \sin \varphi \right)$	$-UI \sin \varphi$
$UI \left( \sqrt{3} \cos \varphi - \sin \varphi \right)$	$UI \left( -\frac{\sqrt{3}}{2} \cos \varphi + \frac{1}{2} \sin \varphi \right)$	$-2UI \sin \varphi$
0	$UI \left( \frac{\sqrt{3}}{2} \cos \varphi + \frac{3}{2} \sin \varphi \right)$	0

计量 功率	电压 相序	①		②		③	
		I	II	I	II	I	II
电流 相序	相序	$\dot{A}\dot{B}\dot{C}$		$\dot{A}\dot{C}\dot{B}$		$\dot{B}\dot{C}\dot{A}$	
		0		$UI \left( \frac{\sqrt{3}}{2} \cos\varphi + \frac{3}{2} \sin\varphi \right)$		0	
8							

注：表中小圆圈“·”是电压、电流接线端子，排列顺序与实际电度表一致。

表 15-8

三相三线有功电度表误接线时

接线 序号	计量功率	更正率 $\epsilon_p$	1.0	0.98	0.96	0.94	0.92
⑤ ~ 3 ④ ~ 4 ④ ~ 6	$UI(\sqrt{3} \cos\varphi - \sin\varphi)$	$\frac{\sqrt{3}}{\sqrt{3} - \text{tg}\varphi} - 1$	0	0.133	0.203	0.265	0.326
② ~ 6 ③ ~ 5	$UI(\sqrt{3} \cos\varphi + \sin\varphi)$	$\frac{\sqrt{3}}{\sqrt{3} + \text{tg}\varphi} - 1$	0	-0.105	-0.144	-0.173	-0.197
① ~ 3 ② ~ 2 ⑥ ~ 4	$2UI \sin\varphi$	$\frac{\sqrt{3}}{2 \text{tg}\varphi} - 1$	$\infty$	3.265	1.969	1.386	1.033
④ ~ 3 ⑤ ~ 4	$UI \left( \frac{\sqrt{3}}{2} \cos\varphi - \frac{1}{2} \sin\varphi \right)$	$\frac{2\sqrt{3}}{\sqrt{3} - \text{tg}\varphi} - 1$	1	1.266	1.405	1.53	1.652
⑤ ~ 7 ④ ~ 8	$UI \left( \frac{\sqrt{3}}{2} \cos\varphi + \frac{3}{2} \sin\varphi \right)$	$\frac{2}{1 + \sqrt{3} \text{tg}\varphi} - 1$	1	0.479	0.329	0.228	0.151



(续表)

④	⑤	⑥
I I	I I	I I
$\dot{B} \dot{A} \dot{C}$	$\dot{C} \dot{A} \dot{B}$	$\dot{C} \dot{B} \dot{A}$
$UI \left( \frac{\sqrt{3}}{2} \cos\varphi + \frac{3}{2} \sin\varphi \right)$	0	$-\sqrt{3} UI \cos\varphi$

的更正率及各种功率因数下的值

0.90	0.88	0.86	0.84	0.82	0.80	0.75	0.70	0.65	0.60
0.388	0.452	0.521	0.595	0.675	0.764	1.037	1.433	2.077	3.344
-0.219	0.238	-0.255	-0.272	-0.287	-0.302	-0.337	-0.371	-0.403	-0.435
0.788	0.604	0.459	0.341	0.241	0.155	0.018	-0.151	-0.259	-0.351
1.776	1.905	2.042	2.19	2.35	2.527	3.075	3.837	5.154	7.689
0.088	0.034	-0.014	-0.056	-0.095	-0.13	-0.209	-0.277	-0.338	-0.396

接线序号	计量功率	更正率 $\epsilon_p$	1.0	0.98	0.96	0.94	0.92
③ ~ 7 ② ~ 8	$UI \left( \frac{\sqrt{3}}{2} \cos\varphi - \frac{3}{2} \sin\varphi \right)$	$\frac{2}{1 - \sqrt{3} \operatorname{tg}\varphi} - 1$	1	2.085	3.042	4.385	5.629
② ~ 5 ③ ~ 6	$UI \left( \frac{\sqrt{3}}{2} \cos\varphi + \frac{1}{2} \sin\varphi \right)$	$\frac{2\sqrt{3}}{\sqrt{3} + \operatorname{tg}\varphi} - 1$	1	0.79	0.712	0.653	0.605
⑥ ~ 3 ① ~ 4	$UI \sin\varphi$	$\frac{\sqrt{3}}{\operatorname{tg}\varphi} - 1$	$\infty$	7.529	4.938	3.772	3.066
① ~ 5 ⑥ ~ 6	$-2UI \sin\varphi$	$\frac{-\sqrt{3}}{2\operatorname{tg}\varphi} - 1$	$\infty$	-5.265	-3.969	-3.386	-3.033
③ ~ 3 ② ~ 4	$UI(-\sqrt{3} \cos\varphi - \sin\varphi)$	$\frac{-\sqrt{3}}{\sqrt{3} + \operatorname{tg}\varphi} - 1$	-2	-1.895	-1.856	-1.827	-1.803
⑤ ~ 5	$UI(-\sqrt{3} \cos\varphi + \sin\varphi)$	$\frac{\sqrt{3}}{\operatorname{tg}\varphi - \sqrt{3}} - 1$	-2	-2.133	-2.203	-2.265	-2.326

第三节 仪表错误接线的分析

(续表)

0.90	0.88	0.86	0.84	0.82	0.80	0.75	0.70	0.65	0.60
11.41	29.691	71.18	15.84	8.572	5.689	2.792	1.608	0.951	0.527
0.563	0.525	0.49	0.457	0.426	0.325	0.325	0.259	0.199	0.13
2.577	2.209	1.919	1.681	1.481	1.309	0.964	0.698	0.481	0.299
-2.788	-2.604	-2.459	-2.341	-2.241	-2.155	-1.982	-1.849	-1.741	-1.65
-1.781	-1.762	-1.745	-1.728	-1.713	-1.698	-1.663	-1.629	-1.597	-1.565
-2.388	-2.453	-2.521	-2.595	-2.675	-2.764	-3.037	-3.433	-4.077	-5.344

接线序号	计量功率	更正率 $\epsilon_p$	1.0	0.98	0.96	0.94	0.92
① ~ 6 ⑥ ~ 5	$-UI\sin\varphi$	$\frac{-\sqrt{3}}{\operatorname{tg}\varphi} - 1$	$\infty$	- 9.529	- 6.938	- 5.772	- 5.066
② ~ 3 ③ ~ 4	$UI\left(-\frac{\sqrt{3}}{2}\cos\varphi - \frac{1}{2}\sin\varphi\right)$	$\frac{-2\sqrt{3}}{\sqrt{3} + \operatorname{tg}\varphi} - 1$	- 3	- 2.79	- 2.712	- 2.653	- 2.605
④ ~ 5 ⑤ ~ 6	$UI\left(-\frac{\sqrt{3}}{2}\cos\varphi + \frac{1}{2}\sin\varphi\right)$	$\frac{2\sqrt{3}}{\operatorname{tg}\varphi - \sqrt{3}} - 1$	- 3	- 3.266	- 3.405	- 3.53	- 3.653
③ ~ 1	$UI\left(-\frac{\sqrt{3}}{2}\cos\varphi + \frac{3}{2}\sin\varphi\right)$	$\frac{2}{\sqrt{3}\operatorname{tg}\varphi - 1} - 1$	- 3	- 4.085	- 5.042	- 6.385	- 8.629
④ ~ 2 ⑤ ~ 1	$UI\left(-\frac{\sqrt{3}}{2}\cos\varphi - \frac{3}{2}\sin\varphi\right)$	$\frac{-2}{1 + \sqrt{3}\operatorname{tg}\varphi} - 1$	- 3	- 2.479	- 2.329	- 2.228	- 2.151
① ~ 7 ⑥ ~ 8	$-\sqrt{3}UI\cos\varphi$	- 2	- 2	- 2	- 2	- 2	- 2



### 三、电流互感器二次公用线断开时计量分析与更正

与电度表连接的电流互感器二次公用线断路示意图,如图 15-34 所示。

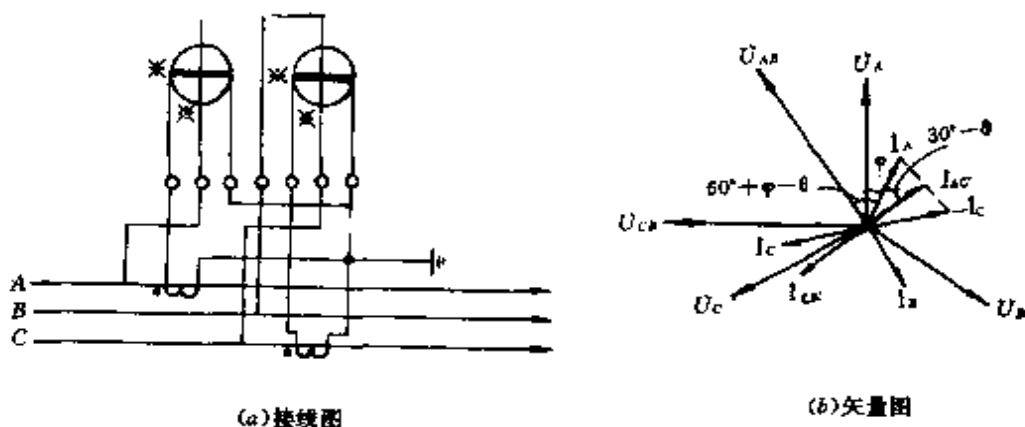


图 15-34 电流互感器二次公用线断路

当电流互感器二次公用线断开时,  $I_A$  和  $I_C$  将通过另一相的电流互感器二次绕组构成回路, 这时电流互感器处于非正常运行状态。通过电度表一、二次元件的电流是  $I_A$  与  $-I_C$ ,  $I_C$  与  $-I_A$  矢量和之一半, 即(参见矢量图)

$$I_{AC} = (I_A - I_C)/2, I_{CA} = (I_C - I_A)/2$$

有效值  $I_{AC} = I_{CA} = (\sqrt{3}/2)I$

负荷对称时, 电度表实际测得的电量为

$$P_1 = U_{AB} I_{AC} \cos(60^\circ + \varphi) = \frac{\sqrt{3}}{4} UI (\cos\varphi - \sqrt{3} \sin\varphi)$$

$$P_2 = U_{CB} I_{CA} \cos(60^\circ - \varphi) = \frac{\sqrt{3}}{4} UI (\cos\varphi + \sqrt{3} \sin\varphi)$$

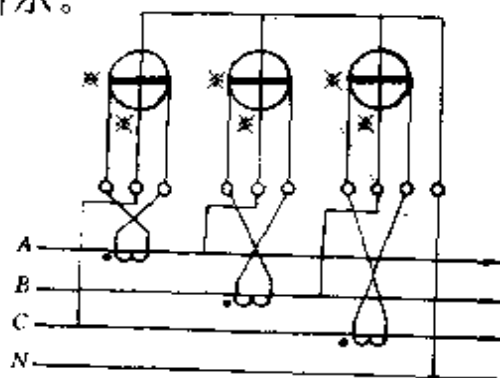
$$P = P_1 + P_2 = \frac{\sqrt{3}}{2} UI \cos \varphi$$

$$\text{更正率 } \epsilon_p = \frac{\frac{\sqrt{3}}{2} UI \cos \varphi}{\frac{\sqrt{3}}{2} UI \cos \varphi} - 1 = 2 - 1 = 1$$

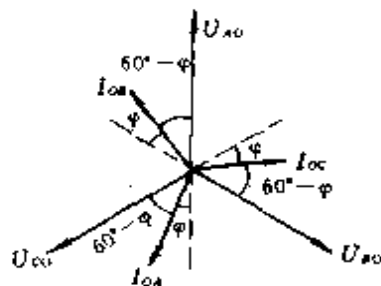
即电流互感器二次公用点断路的场合,所追加的电度数应为原电度数的1倍(实际上应略小于1)。这是由于电流互感器处于非正常运行状态,激磁磁通增加, $I_{AC'}$  滞后  $I_A$  的角度不是  $30^\circ$ , 而是  $30^\circ - \theta$ ;  $I_{AC'}$  滞后  $U_{AB}$  的角度也不是  $60^\circ + \varphi$ , 而是  $60^\circ + \varphi - \theta$ 。其中  $\theta$  值一般为  $1 \sim 3^\circ$ 。

#### 四、三相四线有功电度表错接线时计量分析与更正

有一DT8型三相四线有功电度表,错接成电压、电流不同相,如图15—35所示。



(a) 接线图



(b) 矢量图

图15—35 错接成电压、电流不同相  
由矢量图可知:

$$P_1 = U_{CO} I_{OA} \cos(60^\circ - \varphi)$$

$$P_2 = U_{AC} I_{0B} \cos(60^\circ - \varphi)$$

$$P_3 = U_{BC} I_{0C} \cos(60^\circ - \varphi)$$

当  $U_{A0} = U_{B0} = U_{C0} = U_x, I_{0A} = I_{0B} = I_{0C} = I$  时, 错误接线的电度表所计量为

$$\begin{aligned} P_h &= P_1 + P_2 + P_3 = 3U_x I \cos(60^\circ - \varphi) \\ &= \frac{3}{2} U_x I (\cos\varphi + \sqrt{3} \sin\varphi) \end{aligned}$$

而正确的电量应为

$$P = 3U_x I \cos\varphi$$

$$\begin{aligned} \text{更正率 } \epsilon_p &= \frac{3U_x I \cos\varphi}{\frac{3}{2} U_x I (\cos\varphi + \sqrt{3} \sin\varphi)} - 1 \\ &= \frac{2}{1 + \sqrt{3} \operatorname{tg}\varphi} - 1 \end{aligned}$$

分析:

(1) 当  $0^\circ < \varphi < 30^\circ$  或  $60^\circ < \varphi < 90^\circ$  时,  $\epsilon_p < 0$ , 电度表多计电能;

(2) 当  $30^\circ < \varphi < 60^\circ$  时,  $\epsilon_p > 0$ , 电度表少计电能;

(3) 当  $\varphi = 30^\circ$  或  $90^\circ$  时,  $\epsilon_p = 0$ , 电度表计量正确。

#### 第四节 有关仪表的其它计算

##### 一、电度表与互感器的合成倍率计算

当线路配备的电压互感器与电流互感器的比率与电度表铭牌不同时, 可用下式计算合成倍率(或称实用倍率)  $K$ :

$$K = \frac{K_{TA} K_{TV} K_i}{K_{TAe} K_{TVe}}$$

式中:  $K_{TA}, K_{TV}$  —— 实际使用的电流互感器和电压互感器的变比;

$K_{TAe}, K_{TVe}$  —— 电度表铭牌上规定的电流互感器和电压互



传感器的变比:

$K_i$ ——计度器倍率,即读数盘方框上的倍数。

对于经万用互感器接入和直接接入的电度表,因其铭牌上没有标注电流、电压互感器的额定变比,则  $K_{TA} = K_{TV} = 1$ 。没有标注计度器倍率的电度表,其  $K_i = 1$ 。

**例 15-11** 有一只  $3 \times 5A$ 、 $3 \times 100V$  三相三线有功电度表,现经  $200/5A$  的电流互感器和  $6000/100V$  的电压互感器计量,试求合成倍率。

**解** 合成倍率

$$K = \frac{6000/100 \times 200/5 \times 1}{1 \times 1} = 2400$$

## 二、电度表所测电量的计算

某段时期内电度表测得的电量  $A$  可按下式计算:

$$A = (A_2 - A_1)K$$

式中: $A_1$ 、 $A_2$ ——前一次和后一次抄读数(kWh);

$K$ ——合成倍率。

若后一次抄读数小于前次抄读数(电度表反转除外),说明计度器各位字轮的示值都已超过9的数字,这时测得的电量为

$$A = [(10^n + A_2) - A_1]K$$

式中: $n$ ——整数位的窗口数。

若电度表反转,后一次抄的读数  $A_2$  小于前一次抄的读数  $A_1$ ,则测得的电量为负值。

**例 15-12** 一只三相有功电度表有四位黑色窗口和一位红色窗口,前一次抄的读数为 8235.4,后一次抄的读数为 0153.6,电度表始终正转,合成倍率  $K$  为 2400,试求电度表测得的电量。

**解** 从题意看,各位字轮的示值已超过9的数字,根据  $A_1 = 8235.4$ , $A_2 = 0153.6$ , $K = 2400$ , $n = 4$ ,故所测得的电量为

$$\begin{aligned} A &= [(10^4 + A_2) - A_1]K \\ &= [(10^4 + 153.6) - 8235.4] \times 2400 \\ &= 4603680(\text{kWh}) \end{aligned}$$

**例 15-13** 用三只 DD5 型单相电度表(有四位黑色窗口), 测量三相四线有功电能, 前一次各表抄读数为:  $A_A = 6985.6$ ,  $A_B = 5210.5$ ,  $A_C = 4205.2$ ; 后一次抄读数为:  $A'_A = 156.2$ ,  $A'_B = 5967$ ,  $C$  相电度表反转,  $A'_C = 4123$ , 试求所测得的电量。

**解** 根据以上介绍的计量公式, 所测得的电量为

$$\begin{aligned} A &= [(10^4 + A'_A) - A_A] + (A'_B - A_B) - (A'_C - A_C) \\ &= [(10^4 + 156.2) - 6985.6] + (5967 - 5210.5) \\ &\quad - (4205.2 - 4123) = 3844.9(\text{kWh}) \end{aligned}$$

### 三、直流电流表分流电阻的计算

为了扩大直流电流表的测量范围, 可在直流表并联一分流电阻, 这个电阻叫分流器, 见图 15-36。

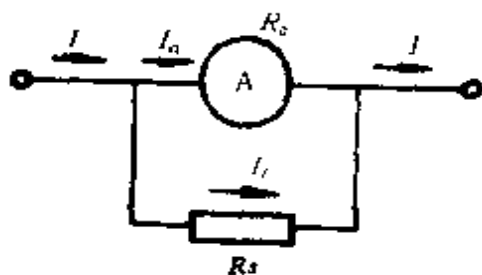


图 15-36 直流电流表分流电阻接线图

分流电阻  $R_s$  可按下式计算:

$$R_s = \frac{R_a}{K - 1}, K = \frac{I}{I_a} = \frac{R_a + R_s}{R_s}$$

式中:  $R_a$  —— 电流表内阻( $\Omega$ );

$K$  —— 分流系数。

**例 15-14** 已知有一表头内阻为  $1500\Omega$ , 满刻度电流为

50 $\mu$ A, 试问要使仪表满刻度电流为 5A 时, 分流电阻应选多大?

**解** 分流系数

$$K = I/I_a = 5/50 \times 10^{-6} = 100000$$

分流电阻为

$$R_s = \frac{R_a}{K-1} = \frac{1500}{100000} \approx 0.015(\Omega)$$

#### 四、直流电压表附加电阻的计算

为了扩大直流电压表的测量范围, 可在直流电压表串联一附加电阻, 见图 15-37。

附加电阻  $R_{fj}$  可按下式计算:

$$R_{fj} = \frac{U_{fj}}{I_a} = \frac{U - U_a}{I_a}$$

式中:  $U_{fj}$  —— 附加电阻上的电压降(V);

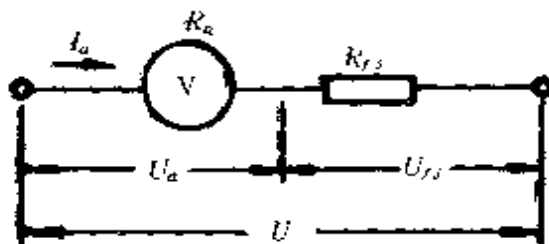


图 15-37 直流电压表附加电阻接线图

$U$  —— 串联电阻为  $R_{fj}$  时, 电压表的满刻度电压值(V);

$I_a$  —— 表头满刻度电流(A)。

**例 15-15** 有一 25 毫安表头, 本身量限为 150V, 试求用该表头测量的最大电压为 500V 时的附加电阻。

**解** 附加电阻为

$$R_{fj} = \frac{U - U_a}{I_a} = \frac{500 - 150}{0.025} = 14000(\Omega)$$

#### 五、电气测量仪表的功率损耗估计

1. 交流有功和无功电度表的功率损耗

(1) 电压线路的功率损耗: 在额定电压、额定频率的条件

下,电度表的每一电压线路的损耗不应超过表 15—9 中的规定值。

表 15—9 电压线路功率损耗极限(GB3924—83 规定)

类别	有功功率损耗和视在功率损耗极限			
	0.5 级	1 级	2 级	3 级
有功电度表 $I_{max} < 4I_b$	3W 12VA	3W 12VA	1.5W 6VA	—
有功电度表 $I_{max} > 4I_b$	—	—	2W 8VA	—
无功电度表	—	—	3W 12VA	1.5W 6VA
无功电度表 (60° 相角差)	—	—	3W 12VA	3W 12VA

注： $I_{max}$ ——最大负荷电流； $I_b$ ——负荷电流。

(2) 电流线路的功率损耗：在标定电流的额定频率的条件下,电度表的每一电流线路的损耗不应超过表 15—10 中规定值。

表 15—10 电流线路功率损耗极限(GB3924—83 规定)

负荷电流(A)	视在功率损耗极限(VA)			
	0.5 级	1.5 级	2 级	3 级
< 40	6	4	2.5*	5
40 ~ 80	—	—	5	—

\* 经电流互感器接通的电度表不应超过 2.0VA。

2. 常用的电气测量仪表,每只每月的有功损耗粗略估计如下:

---

单相电度表 1kWh

三相三线有功、无功电度表 2kWh

三相四线有功、无功电度表 3kWh

功率表、电流表、电压表 3kWh。

## 第十六章 照 明

### 第一节 基础知识

#### 一、照明术语、单位及计算

##### 1. 光通量

光源在单位时间内,向周围空间辐射并引起视觉的能量,称为光通量,用符号 $\phi$ 表示,单位为流明(lm)。

光通量不但与光源的辐射强度有关,而且与辐射的波长有关。人眼在白天或光线较强的地方,对波长为 555nm 的黄、绿光最敏感,光的波长离 555nm 越远,人眼的灵敏度越低。

##### 2. 发光强度(光强)

光源在某一特定方向上单位立体角内(每球面度)辐射的光通量,称为光源在该方向上的发光强度,简称光强,用符号  $I$  表示,单位为坎德拉(cd)。对于向各方面均匀辐射光通量的光源

$$I = \frac{\phi}{\omega}$$

式中: $\phi$ ——光源在 $\omega$ 立体角内所辐射出的总光通量(lm);

$\omega$ ——光源发光范围的立体角(sr)。

立体角是一个锥形的角度,用球面度来测量,单位为球面度(sr),见图 16-1。 $\omega$ 是随看见  $S$  的位置而变化的。图中  $S = 2\pi r^2(1 - \cos\theta)$ ,  $\omega = S/r^2 = 2\pi(1 - \cos\theta)$ 。

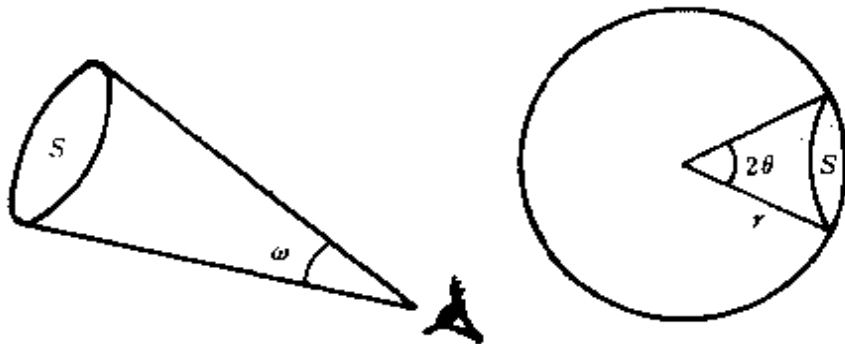


图 16—1 立体角概念

### 3. 照度

单位面积上接收的光通量称为照度,用符号  $E$  表示,单位为勒克司(lx)。

$$E = \phi / S$$

式中:  $\phi$ ——光通量(lm);

$S$ ——受照面积( $m^2$ )。

几种照度单位的换算见表 16—1。

表 16—1 照度单位的换算

单位名称	勒克司 (lx)	辐脱 (pb)	呎烛光 (fc)
1 勒克司 ( $lm/m^2$ )	1	$10^{-4}$	$9.29 \times 10^{-2}$
1 辐脱 ( $lm/cm^2$ )	$10^4$	1	929
1 呎烛光 ( $lm/ft^2$ )	10.76	$10.76 \times 10^{-4}$	1

注:呎烛光是英制照度单位,符号为 fc,  $1fc = 1lm/ft^2$ 。

照度的一些实际概念:

(1) 在 40W 白炽灯下 1m 远处的照度约为 30lx,加搪瓷灯金后增加到 70lx。

(2)晴天中午太阳直射时的照度可达 $(0.2\sim 1)\times 10^5\text{l}x$ 。

(3)无云满月夜晚的地面上照度约为 $0.2\text{l}x$ 。

(4)阴天室外照度约为 $(8\sim 12)\times 10^3\text{l}x$ 。

#### 4. 亮度

发光体在给定方向单位投影面积上的发光强度称为亮度，用符号  $L$  表示，单位为尼特(nt)。

如图 16—2 所示，发光体表面在  $\theta$  方向上的亮度为

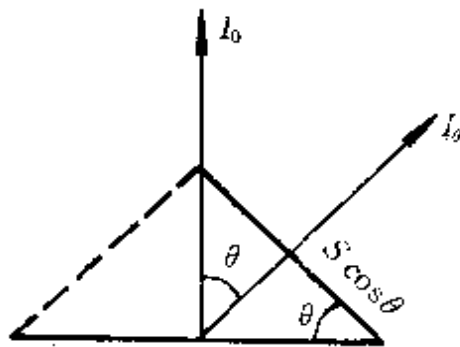


图 16—2 亮度的定义

$$L = \frac{I_{\theta}}{S \cos \theta}$$

式中： $I_{\theta}$ ——与法线成  $\theta$  角的给定方向上的发光强度(cd)；

$S$ ——发光体面积( $\text{m}^2$ )。

物面的亮度不但与光源的强度有关，而且与物面本身的反射能力有关。如白纸反射光线量多，灰纸反射光线量小，所以将它们放在同一光源前面，前者的亮度要比后者大。

几种亮度单位的换算见表 16—2。

亮度的一些实际概念：

(1)40W 荧光灯的表面亮度约为 $0.7\text{sb}$ 。

(2)白炽灯的灯丝亮度约为 $400\text{sb}$ 。



(3) 太阳的亮度高达 20 万 sb。

### 5. 与亮度有关的其它术语

表 16--2 亮度单位的换算

单位名称	尼特 (nt)	熙提 (sb)	阿波熙提 (asb)	呎朗伯 (fl)
1 尼特(cd/m <sup>2</sup> )	1	10 <sup>-4</sup>	6.142	0.2919
1 熙提(cd/m <sup>2</sup> )	10 <sup>4</sup>	1	3.142×10 <sup>4</sup>	0.2919×10 <sup>4</sup>
1 阿波熙提	0.3183	0.3183×10 <sup>-4</sup>	1	0.0929
1 呎朗伯	3.426	3.426×10 <sup>-5</sup>	0.1076	1

注：呎朗伯为英制亮度单位。

(1) 完全扩散面：不论从哪个方向看，亮度都相等的反射面或透过面，称为完全扩散面。

(2) 光效：有光源光效(效率)和综合光效之分，单位为流明/瓦(lm/W)。

$$\text{光源光效} = \frac{\text{光源的总光通量}}{\text{光源(灯)的功率}}$$

$$\text{综合光效} = \frac{\text{光源的总光通量}}{\text{光源(灯)的功率} + \text{镇流器消耗的功率}}$$

### 6. 色温

当光源发光的颜色与黑体加热到某一个温度所发出的光的颜色相同(对于气体放电光源为相似)时，称该温度为光源的颜色温度，简称色温(对于气体放电灯称为相关色温)。

光源中含短波蓝、紫光多的，如蓝天、日光灯等，其色温高；含长波红、橙光多的，如日出，烛光等，其色温低。

### 7. 显色性、显色指数

光源的显色性是指光源能否正确地显现物体颜色的性能。正确与否的标准是该物体在日光下所呈现的颜色。为了对光源的显色性进行定量比较,引入显色指数的概念。显色指数用符号  $Ra$  表示。 $Ra$  值越接近 100,光源的显色性越好。

### 8. 灯泡的寿命

(1)燃点寿命:灯泡在额定电压下,自开始燃点到烧坏为止的时间。

(2)平均寿命或平均燃点寿命:每一批灯泡燃点时间的算术平均值。

(3)有效寿命:灯泡在额定电压下,自开始燃点到其光通量减弱到一定数值(每一类型的灯泡,依照相应的技术条件确定此数值)的这段时间。

## 二、关于照明质量的一些要求

### 1. 照明的均匀度

(1)最低均匀度:场所的最低照度  $E_{min}$  与最高照度  $E_{max}$  之比。

(2)平均均匀度:场所的最低照度  $E_{min}$  与平均照度  $E_p$  之比。

(3)生产厂房照明均匀度要求:采用一般照明时,生产厂房的照明均匀度应不低于表 16—3 中所列的数值。

表 16—3 照明的均匀度要求

厂房的工作性质	最低均匀度 $E_{min}/E_{max}$	平均均匀度 $E_{min}/E_p$
精密工作	0.3	0.7
粗糙工作	0.2	0.4

### 2. 限制眩光

所谓眩光,是指观察高亮度物体时所产生的刺眼的视觉状

态。为了限制直射眩光,灯具一般悬高及保护角应不小于表 16-4 中的规定值。

表 16-4 灯具最低悬挂高度

光源种类	反射器类型	保护角 (deg)	灯泡容量 (W)	最低悬挂高度 (m)
白 炽 灯	搪瓷反射器	10°~30°	100 及以下	2.5
			150~200	3.0
			300~500	3.5
			500 以上	4.0
	乳白玻璃漫射罩		100 及以下	2.0
			150~200	2.5
			300~500	3.0
荧光高压汞灯	搪瓷反射器	10°~30°	250 及以下	5.0
	铝抛光反射器		400 及以上	6.0
卤钨灯	搪瓷反射器	30°及以上	500	6.0
	铝抛光反射器		1000~2000	7.0
荧光灯	无反射器		40 及以下	2.0
金属卤化物灯	搪瓷反射器	10°~30°	400	6.0 <sup>①</sup>
	铝抛光反射器	30°以上	1000	14.0 以上
高压钠灯	搪瓷反射器	10°~30°	250	6
	铝抛光反射器		400	7
低压钠灯	搪瓷反射器	10°~30°	100	4
	铝抛光反射器		180	6

注:①1000W 金属卤化物灯有紫外线防护措施时,悬挂高度可适当降低。

### 3. 显色性

当采用高压汞灯及高压钠灯,其显色性不能令人满意时,为了节能和改善照明场所的光色及显色性,可采用二种光源混光的办法来改善光色,见表 16-5。

表 16—5 常用混光照明种类、效果和适用范围

级别	分类	混光照明所要达到的目的	混光光源种类	光通量比 (%)	一般显色指数 $R_a$	色彩识别效果	适用场所举例
I	对色彩识别要求很高的场所	获得高显色性和高光效	DDG+NGG DDG+NGX DDG+PZ GGY+PZ DCC+RR	50~70 50~70 50~80 <20 40~60	>85	除个别颜色为中等外其余良好	配色间、颜色检验、彩色印刷
II	对色彩识别要求较高的场所	获得较高的显色性和高光效	DDG+NGX DDG+PZ DDG+NG KNG+NGG GGY+NGG ZJD+NGX	30~60 >80 40~80 40~70 <30 40~60	70~85 $R_a$ < 85	除部分颜色为中等外其余良好	色织间、控制室、展览室、体育场馆
III	对色彩识别要求一般的场所	改善显色性和提高发光效率	DDG+PZ KNG+NG GGY+NGG DDG+NG	50~60 50~80 30~50 30~40	60~70 $R_a$ < 7	除部分颜色为中等外可以外其余良好	机电、仪表仪器装配
IV	对色彩识别要求较低的场所	改善显色性和提高光效率	GGY+NG KNG+NG DDG+NG GGY+NGX ZJD+NG	40~60 20~50 20~30 40~60 30~40	40~60 $R_a$ < 60	除个别颜色可以外其余为中等	焊接、冲压、铸造、热处理

注:GGY——荧光高压汞灯,DDG——钠灯,KNG——钠灯,NGG——高显色高压钠灯,

NG 高压钠灯,RR——日色色荧光灯,NGX——改进型高压钠灯,PZ——白炽灯,

HGG 高显色荧光灯,ZJD 金属卤化物灯。

#### 4. 消除灯光的频闪效应

实验证明,当光通量的波动深度降低到 25% 以下时,灯光的频闪效应就可避免。几种常用光源的光通量波动深度见表 16—6。

表 16—6 几种光源的光通量波动深度

光源类型	接入电路的方式	光通量波动深度(%)
日光色荧光灯	一灯接入单相电路	55
	二灯不同相接入电路	23
	二灯移相接入电路	23
	三灯不同相接入电路	5
冷白光色荧光灯	一灯接入单相电路	35
	二灯不同相接入电路	15
	二灯移相接入电路	15
	三灯不同相接入电路	3.1
荧光高压汞灯	一灯接入单相电路	65
	二灯不同相接入电路	31
	三灯不同相接入电路	5
氙灯	一灯接入单相电路	130
	二灯不同相接入电路	65
	三灯不同相接入电路	5
白炽灯	40W	13
	100W	5

### 三、常用电光源特性比较及对电源的要求

#### 1. 常用电光源特性比较(见表 16—7)

表 16-7 常用电光源特性比较

光源名称	普通照明灯炮	卤钨灯	荧光灯	荧光高压汞灯	棒形氙灯	高压钠灯	低压钠灯	金属卤化物灯
额定功率范围(W)	15~1000	500~2000	6~200	50~1000	1300~100000	250~400	18~180	250~3500
光 效(lm/W)	7~19	19.5~21	27~67	32~53	20~37	90~100	75~150	72~80
平均寿命(h)	1000	1500	1500~5000	3500~6000	500~1000	3000	2000~5000	1000~1500
一般显色指数(Ra)	95~99	95~99	70~80	30~40	90~94	20~25	黄色	65~80
启动稳定时间	瞬 时	瞬 时	1~3s	4~8min	1~2s	4~8min	8~10min	4~10min
再启动时间	瞬 时	瞬 时	瞬 时	5~10min	瞬 时	10~20min	25min	10~15min
功率因数	1	1	0.32~0.7	0.44~0.67	0.4~0.9	0.44	0.6	0.5~0.67
频闪效应	不 明 显	不 明 显	不 明 显	不 明 显	明 显	不 明 显	不 明 显	不 明 显
表面亮度	大	大	小	较大	大	较大	较大	大
电压变化对光通量的影响	大	大	较大	较大	较大	大	大	较大
温度变化对光通量的影响	小	小	大	较小	小	较小	小	较小
耐震性能	较差	差	较好	好	好	较好	较好	好
所需附件	无	无	镇流器、启辉器	镇流器	镇流器、触发器	镇流器	镇流器、变压器	镇流器、触发器

## 2. 几种电光源对电源电压的要求

### (1) 白炽灯和卤钨灯:

①电源电压变化不宜大于 $\pm 2.5\%$ ,否则电压升高会明显缩短其寿命,降低其光效。

②钨丝的冷态电阻比热态电阻小得多,起动瞬间最高电流可达额定电流的8倍以上。

③卤钨灯需水平安装,其倾角不得大于 $\pm 4^\circ$ ,否则将严重影响寿命。

(2) 荧光灯:电源电压的变化不宜大于 $\pm 5\%$ 。

(3) 高压汞灯:电源电压如突然降低超过额定电压的 $5\%$ ,可能造成灯泡自行熄灭。

(4) 高压钠灯:电源电压的变化不宜大于 $\pm 5\%$ 。高压钠灯由点亮到稳定工作约需 $4\sim 8\text{min}$ 。当电源中断,灯熄灭后,即使立即恢复供电,灯也不能马上点燃,需经过十几 $\text{min}$ 待双金属片冷却复原闭合后才能再启动。

(5) 金属卤化物灯:电源电压的变化不宜大于 $\pm 5\%$ 。电源电压变化不但会引起光效变化,而且会引起光色的变化。

管形镝灯安装时必须认清灯的方向标记,且灯轴中心的偏离不应大于 $\pm 15^\circ$ 。

## 四、灯具的选择

### 1. 灯具选择的一般原则

选择灯具应根据环境条件、照度要求、限制眩光及与建筑物的协调等条件来进行。

根据环境条件选择如下:

(1) 在干燥且无爆炸性气体的场所,可采用广照型、配照型、深照型和各种乳白玻璃罩灯具。

(2) 在潮湿和特潮的场所,可采用防水防尘型或带防水灯头的开启式灯具。

(3) 在含有大量尘埃, 但为非易燃性或无爆炸性气体的场所, 可采用防水防尘型密闭灯具。

(4) 在有爆炸性气体或尘埃的场所, 可采用防爆型或密闭型灯具。

(5) 在高大厂房(装灯高度 7~8m), 可采用集中配光的直射光灯具(如深照型灯)或高压汞灯。

(6) 在不很高的厂房(装灯高度 5~6m), 可采用余弦配光类的直射光灯具(如配照型灯)。

配照型灯具悬高一般 4~6m; 搪瓷深照型灯具悬高一般 6~20m; 有镜面反射器的深照型灯具悬高一般 15~30m。

(7) 在装灯高度不能满足限制眩光要求的工作地点, 以及要求光线柔和的场所, 可采用有漫射罩的灯具。

## 2. 有爆炸、火灾危险的场所灯具的选择

先确定有爆炸或火灾危险场所的等级, 然后根据爆炸性混合物的级别和组别选择灯具, 参见表 7-5 和表 7-6。

## 五、灯具的分类、配光曲线和效率

### 1. 灯具的分类(表 16-8)

表 16-8 按灯具结构特点分类

结构型式	特 点	
开启型	光源与外界空间直接接触(无罩)	
闭合型	透明罩将光源包合起来, 但内外空气仍能自由流通	
密闭型	透明罩固定处加以严密封闭, 与外界隔绝相当可靠, 内外空气不能流通	
防爆型	隔爆型 (代号 B)	在灯具内部发生爆炸时, 通过一定间隙的防爆面后, 不会引起灯具外部的爆炸
	安全型 (代号 A)	在正常运行时, 不产生火花电弧, 或在危险温度的部件上, 采取适当措施, 以提高其安全程度, 但在正常运行时产生火花电弧的部件应放在单独隔爆室内



## 2. 灯具的配光曲线(光强分布曲线)

电光源装在灯罩中使用,其发光强度在空间的分布由灯罩结构决定。用极坐标来表示,以光源为原点,以各角度上的光强  $I_{\theta}$  为长度的各点所连成的曲线,称为该光源的配光曲线,如图 16-3 所示。灯具的几种典型光强分布曲线如图 16-4 所示。

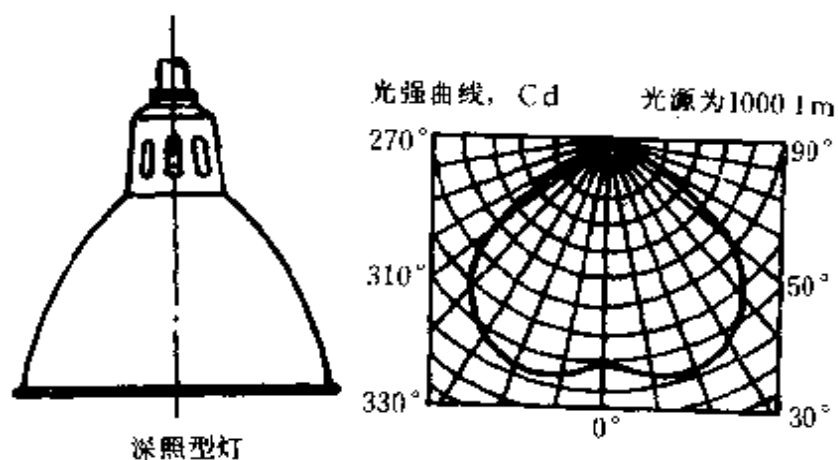


图 16 3 对称配光的极坐标光强分布曲线

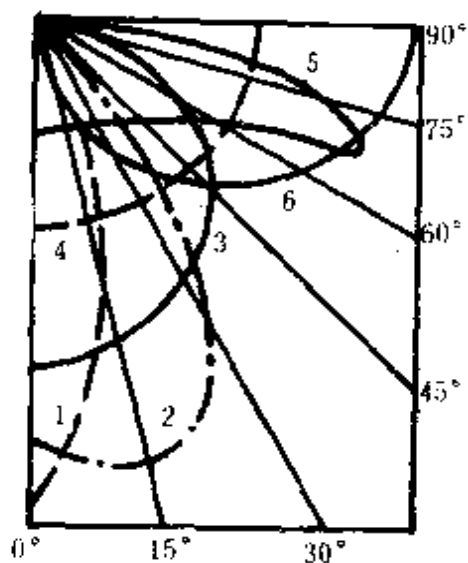


图 16 4 灯具的几种典型光强分布曲线

1—特深照型;2—深照型;3—配照型;4—漫射型;5—广照型;6—正弦配光型

为了便于比较灯具的配光特性,光强分布曲线通常将光源化为为 1000lm 光通量的假想光源来绘制其曲线。实际光源不是 1000lm 时,可按下式换算:

$$I_{\theta} = \frac{1000}{\phi} I'_{\theta}$$

式中:  $I_{\theta}$ ——换算成光源的光通量为 1000lm 时  $\theta$  方向上的光强(cd);

$I'_{\theta}$ ——灯具在  $\theta$  方向上的实际光强(cd);

$\phi$ ——灯具实际配用的光源的光通量(lm)。

灯具的配光情况还可用空间等照度曲线来间接地表示。图 16—5 和图 16—6 是搪瓷深照型和广照型灯具的空间等照度曲线,只要知道灯具的计算高度  $h$  和计算点距灯具的水平距离  $d$ ,就可以从曲线中查出该计算点的照度  $E$ 。图 16—7 是用于线光源计算的漫反射罩开启型直射光灯具的线光源等照度曲线。图中  $L'$ 、 $P'$  的意义,见例 16—5。

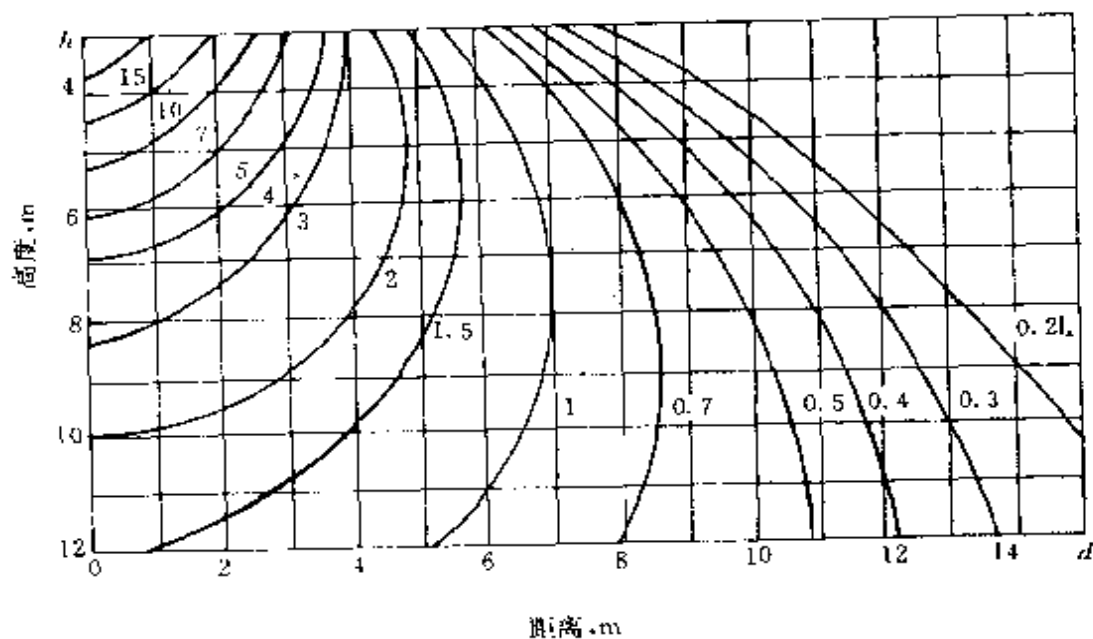


图 16—5 搪瓷深照型灯具的空间等照度曲线

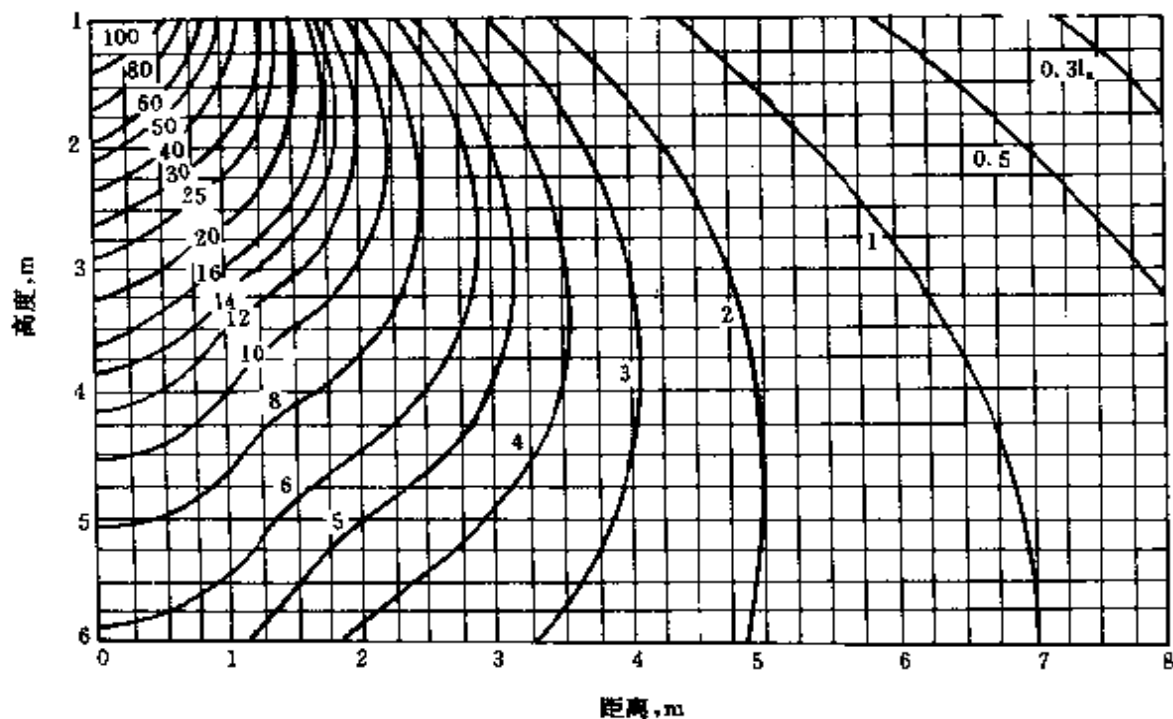


图 16—6 搪瓷广照型灯的空间等照度曲线

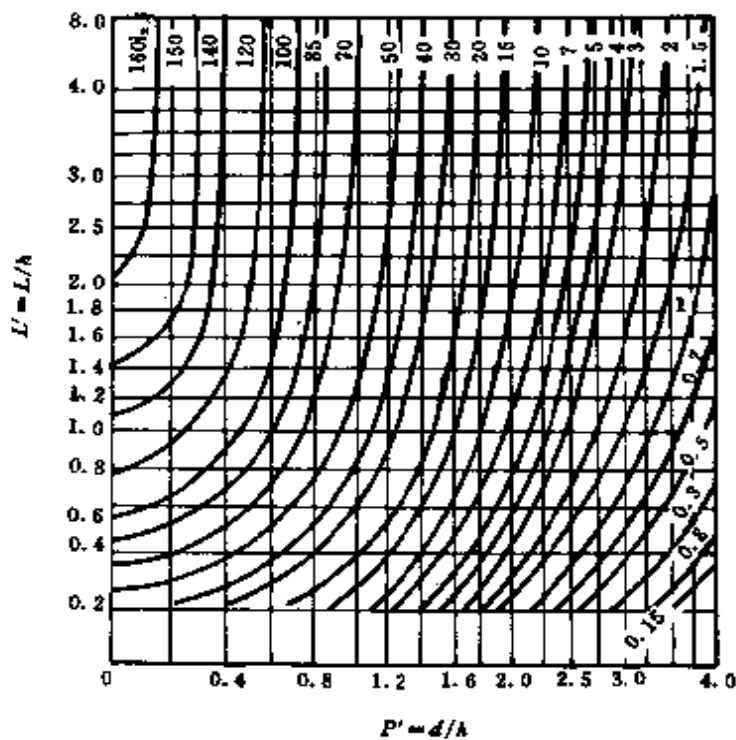


图 16—7 漫反射罩开启型直射灯具的线光源等照度曲线  
3. 保护角

灯具的保护角应配置适当,使工作人员在保护角内看不见光源,以避免直射眩光。

4. 灯具的效率

$$\eta = \frac{\phi_1}{\phi_2} \times 100\%$$

式中:  $\phi_1$ ——灯具辐射的光通量(lm);

$\phi_2$ ——光源的光通量(lm)。

效率  $\eta$  越高,表明光源辐射的光通量损失越小。

六、常用材料的反射、透射和吸收率

常用材料的反射率  $\rho$ 、透射率  $\tau$  和吸收率  $\alpha$ ,见表 16—9。

表 16—9 常用材料的反射、透射和吸收率

材 料 名 称		$\rho$ (%)	$\tau$ (%)	$\alpha$ (%)	备 注	
玻 璃 及 塑 料	普通玻璃 2~6mm	8~10	84~90		光对平滑面	
	磨砂玻璃 1.5mm		76.5		光对磨砂面	
				79.5		光对平滑面
	乳白玻璃 1.5mm		64			
	有机玻璃 1~6mm		91~92			
	聚氯乙烯		75~83			
	聚碳酸脂		74~81			
	聚苯乙烯		75~83			
	塑料安全夹层玻璃(透明)		78		(3+3)mm	
	双层中空隔热玻璃(透明)		64		(3+3)mm	
	蓝色吸热玻璃			64		3mm
				52		5mm
	压花玻璃 3mm			57		花纹深密
			71		花纹浅稀	

(续表)

材 料 名 称		$\rho$ (%)	$\tau$ (%)	$\alpha$ (%)	备 注
金 属	普通铝(抛光)	71~76		24~29	
	高纯铝(电化抛光)	84~86		14~16	
	镀汞玻璃镜	83		17	
	不锈钢	55~60		40~45	
饰 面 材 料	大白粉刷	75			
	白色乳胶漆	84			
	乳黄色调和漆	70			白色调和漆
	白水泥	75			
	水泥砂浆抹面	35			
	红砖	30			
	灰砖	24			
	花岗岩	15~25			
	浅色瓷砖	78			
	白色水磨石	70			
塑料贴面板	30				

(续表)

材 料 名 称		$\rho$ (%)	$\tau$ (%)	$\alpha$ (%)	备 注
饰 面 材 料	混凝土地板	15~32			
	沥青地面	13			
	石膏	90~92		8~10	
	白亮木材	40 以下			
	暗色木材	10 以上			
	白色棉织物	35	57	8	
	深色大理石	40			
搪 瓷 类	白搪瓷	80			
	涂釉瓷器	60~90			
	处理过的铝面	70~80			

注:双层中空玻璃中间的空隙为 5mm。

## 第二节 照度标准及灯具布置计算

### 一、照度标准

一般生产车间和工作场所工作面上的最低照度参考值见表 16—10。办公室、公共用室、生活用室的最低照度参考值见表 16—11。厂区露天工作场所和交通运输线的最低照度参考值见表 16—12。体育建筑中一般房间照明的照度标准见表 16—13。

体育运动场所照明的照度标准见表 16—14。

表 16—10 一般生产车间和工作场所工作面上的最低照度(参考值)

序号	车间名称及工作场所	工作面上的最低照度(lx)		
		混合照明	混合照明中的一般照明	单独使用一般照明
1	金属机械加工车间			
	一般	500	30	—
	精密	1000	75	—
2	机电装配车间			
	大件装配	500	50	—
	精密小件装配	1000	75	—
3	机电装配试车			
	地面	—	—	30
	试车台	500	50	—
4	焊接车间			
	弧焊	—	—	50
	接触焊	—	—	50
	一般划线	—	—	75
5	钣金车间	—	—	50
6	冲压剪切车间	300	30	—
7	锻工车间	—	—	30

(续表)

序号	车间名称及工作场所	工作面上的最低照度(lx)		
		混合照明	混合照明中的一般照明	单独使用一般照明
8	热处理车间	—	—	30
9	铸工车间	—	—	30
	熔化、浇铸	—	—	20
	型砂处理清理造型	—	—	20
10	木工车间	—	—	—
	机床区	300	30	—
	木模区	300	30	—
11	表面处理车间	—	—	50
	电镀槽区	—	—	30
	酸洗	—	—	—
	抛光	500	30	—
	电源(整流器)室	—	—	30
12	喷砂车间	—	—	30
13	检修间	—	—	30
14	喷漆车间	—	—	30
15	电修车间	—	—	—
	一般	300	30	—
	精密	500	50	—



(续表)

序号	车间名称及工作场所	工作面上的最低照度(lx)		
		混合照明	混合照明中的一般照明	单独使用一般照明
16	理化计量实验室	—	—	100
17	动力站	—	—	30
	压缩机	—	—	20
	锅炉房、煤气站	—	—	20
	操作台	—	—	20
	泵房、煤风机房	—	—	20
18	乙炔发生器房	—	—	20
	配电所	—	—	50
	高低压配电房	—	—	20
19	变压器室	—	—	20
	控制室	—	—	75
20	一般控制室	—	—	150
	主控制室	—	—	100
21	热工仪表控制室	—	—	75
22	广播站(室)	—	—	30
23	工具库	—	—	56
23	仓库	—	—	5
	工具库	—	—	20
	大件贮库	—	—	10
	精细件贮库	—	—	10
	小件贮库	—	—	10

(续表)

序号	车间名称及工作场所	工作面上的最低照度(lx)		
		混合照明	混合照明中的一般照明	单独使用一般照明
24	乙炔瓶库、氧气瓶库、电石库	—	—	10
25	汽车库			
	停车间	—	—	10
	充电室	—	—	20
26	电话间			
	人工转换台、转接台	—	—	50
	蓄电池室	—	—	20

表 16--11 办公室、公共用室、生活用室的最低照度(参考值)

序号	房 间 名 称	一般照明的最低照度(lx)	规定照度的平面
1	设计室	100	距地面 0.8m 处
2	阅览室	75	距地面 0.8m 处
3	办公室、会议室、资料室、医务室	50	距地面 0.8m 处
4	托儿所、幼儿园	30	距地面 0.4~0.5m 处
5	车间休息室、单身宿舍、食堂	30	距地面 0.8m 处
6	更衣室、浴室、厕所	10	地面
7	楼梯间、通道	5	地面

表 16—12 厂区露天工作场所和交通运输线的最低照度(参考值)

工作种类和地点		最低照度(lx)	规定照度的平面
露天工作	视觉工作要求较高的工作	20	工作面
	用眼睛检查质量的金属焊接	10	工作面
	用仪器检查质量的金属焊接	5	工作面
	间断视察的仪表	5	工作面
	装卸工作	3	地面
	露天堆场	0.2	地面
道路	主要道路	0.5	地面
	一般道路	0.2	地面
站台	视觉要求较高的站台	3	地面
	一般站台	0.5	地面
	码头	3	地面

表 16—13 体育建筑中一般房间照明的照度标准

场所或类别	照度*(lx)	注
大门厅、观众休息厅	75~100~150	地面照度
会议室	100~150~200	
运动员餐厅	75~100~150	地面照度
运动员休息室、更衣室	75~100~150	
灯光控制室、播音室	100~150~200	地面照度
衣帽间、浴室	30~50~75	
通道、库房	50~70~100	

\*在照度标准值中,国家级训练、比赛应取高值或中值,省市级训练、比赛应取低值。

表 16—14 体育运动场所照明的照度标准

场所或类别	照度 <sup>*</sup> (lx)		注
	训练	比赛	
篮球、排球、羽毛球、网球、手球、田径、体操、艺术体操、技巧、武术、曲棍球	15~200~300	300~500~750	地面照度。室外比赛照度降低一级
保龄球	150~200~300	200~300~500	地面照度
举重	100~150~200	200~500~750	地面照度
击剑	200~300~500	300~500~750	台面照度
柔道	200~300~500	300~500~750	地面照度
中国、国际摔跤	200~300~500	300~500~750	地面照度。宜设局部照明
拳击	200~300~500	1000~1500~2000	地面照度。宜设局部照明
乒乓球	300~500~750	500~750~1000	台面照度。赛区其它部分的照度不应低于台面照度的一半
游泳	150~200~300	300~500~750	尽可能沿游泳池两侧布灯
跳水	150~200~300	300~500~750	水面照度。在跳水区应有附加照明
水球	150~200~300	300~500~750	

(续表)

场所或类别		照度*(lx)		注
		训练	比赛	
花样游泳		200~300~500	300~500~750	水面照度。应设水下照明,其容量为1000lm/m <sup>2</sup>
冰球、速滑、花样滑冰		150~200~300	300~500~750	冰面照明
围棋、中国象棋、国际象棋、桥牌			500~750~1000	台面照明。宜设局部照明
射击	靶心	1000~1500~2000	1000~1500~2000	靶心垂直照度
	通道	75~100~150	75~100~150	
	射击点	75~100~150	75~100~150	0.75m 高处水平照度
足球	观看距离120(m)(指观众席一排到边线距离)		150~200~300	地面照度
	160		200~300~500	地面照度
	200		300~500~750	地面照度
观众席			50~75~100	座面照度
健身房		100~150~200		地面照度
综合体育馆				根据该馆的比赛项目而定

\*同表 16-13

## 二、灯具布置计算

### 1. 室内灯具的布置原则

(1)保证规定的照度：工作面上的照度要均匀，无眩光，安装容量在保证规定的照度条件下尽可能小。

(2)选择合适的灯具布置方式：

①选择性布置方式：局部照明；加强照度；消除阴影或定向照射时用。

②均匀布置方式：除上述以外的照明。

(3)合理的灯具悬挂高度：以不发生眩光为限。

(4)合理的距高比  $L:h$  为了使照度分布均匀。

## 2. 灯具的悬挂高度要求

一般灯具的悬挂尺寸示意图如图 16—8 所示。

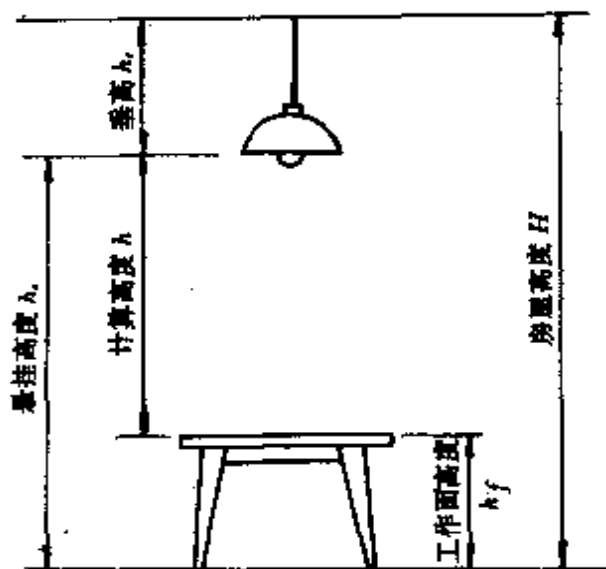


图 16—8 灯具悬挂尺寸示意图

垂度  $h_c$  一般为 0.3~1.5m，大多数取 0.7m。在有行车的车间里或吸顶安装的灯具，其垂度为零。

为限制直接眩光的作用，室内一般照明灯具距地面的最低悬挂高度，不宜低于表 16—4 所规定的数值。

## 3. 均匀照明的灯具布置方式

灯具的平面布置如图 16—9 所示有三种方式,其等效灯距  $L$  的计算如下:

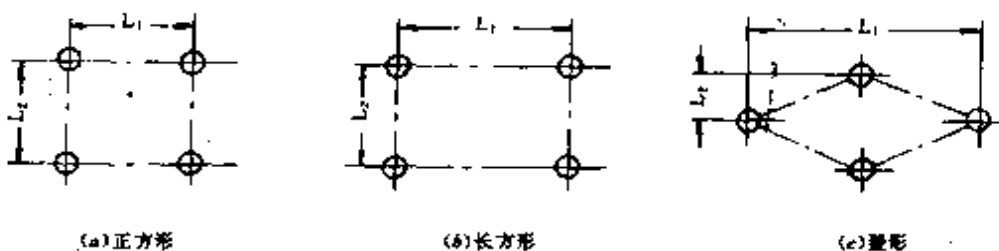


图 16—9 均匀布灯的几种形式

图 16—9(a)  $L = L_1 + L_2$

图 16—9(b)  $L = \sqrt{L_1 L_2}$

图 16—9(c)  $L = \sqrt{L_1 L_2}$

灯具布置是否合理,主要取决于灯具的间距  $L$  和计算高度  $h$  的比值( $L:h$ )是否恰当。 $L:h$  值小,照度均匀度好,但耗电; $L:h$  值过大,又不能满足所规定的照度均匀度。求取最大允许的  $L:h$  值有以下两种方法:

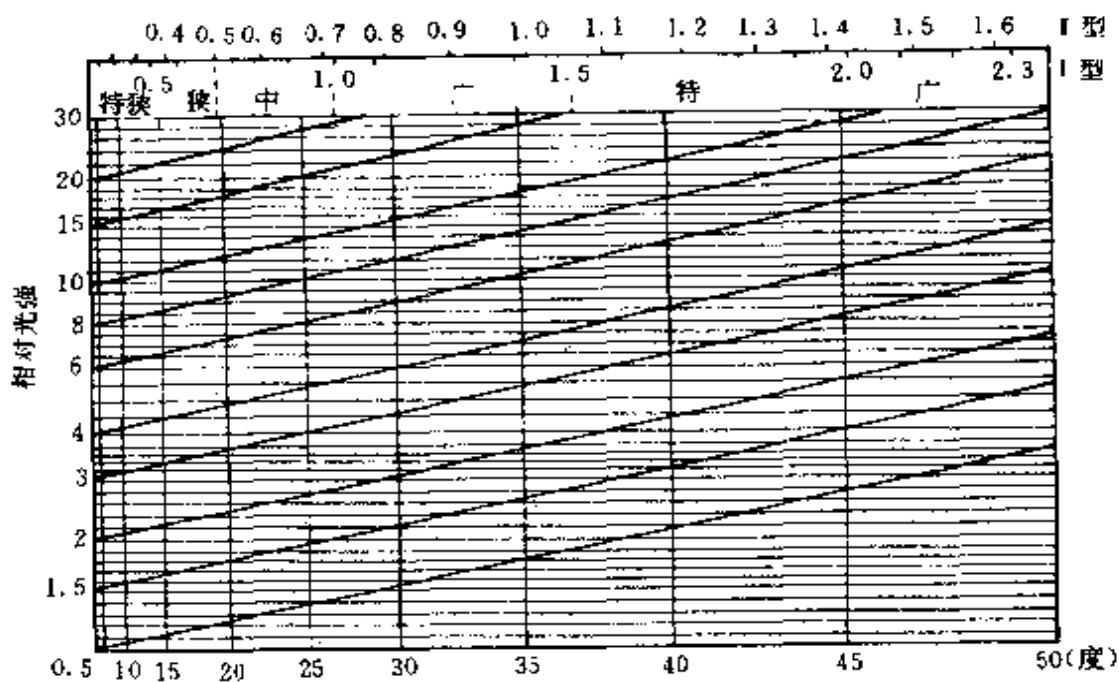
(1)根据各种灯具的配光曲线,利用图 16—10 给出的曲线来求取;

(2)查表法求取。从照明手册中的“照明器技术参数表”查取。表中的  $L:h$  值实际上是由(1)的方法求得的。

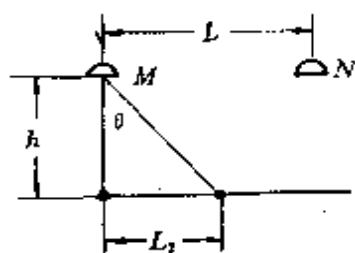
现将用(1)的方法求取  $L:h$  值的步骤介绍如下:

①将灯具配光曲线按相对值画在图 16—10(a)上;

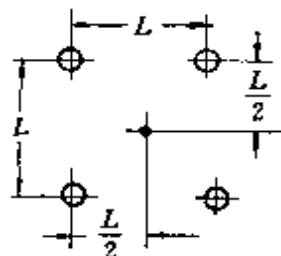
②将灯具配光曲线中  $0^\circ$  光强值的  $1/2$  [适用于图 16—10(b)的 I 型单排排列], 或  $1/4$  [适用于图 16—10(c)的 II 型正方形排列] 点在图 16—10(a)的  $0^\circ$  线(纵轴)相应的光强位置上;



(a) 距高比曲线



(b) I型：单排排列



(c) I型：正方形排列

图 16—10 确定各种灯具  $L : h$  的曲线

③过步骤②作的点，作图 16—10(a)中斜线的平行线，与步骤①中的曲线相交；

④过交点作垂直线与图 16—10(a)上面的标尺相交，上下标尺的读数即是灯具按 I 型或 I 型排列时的距高比。

从图 16—10(a)求得  $L : h$  后，当已知计算高度  $h$ ，便可求得  $L$ ，然后根据具体情况来确定  $L_1$  和  $L_2$ 。

对于房间的边缘地区，灯具距墙的距离一般取  $(1/3 \sim 1/2)L$ ；如果工作位置靠近墙壁时，可将边行灯具距墙的距离取为



$(1/4 \sim 1/3)L$ 。

图书室、资料室、实验室、教室的灯具布置,取  $L:h=1.6 \sim 1.8$  较有利。

各种灯具的距高比推荐值,见表 16—15;嵌入式均匀布置发光带最适宜的距高比,见表 16—16;荧光灯的最大允许距高比,见表 16—17。

表 16—15 各种灯具的  $L:h$  值

灯具类型	$L:h$		单行布置时 房间最大宽度
	多行布置	单行布置	
配照型、广照型	1.8~2.5	1.8~2	1.2h
深照型、镜面深照型乳白玻璃罩灯	1.6~1.8	1.5~1.8	h
防爆灯、圆球灯、吸顶灯、防水防尘灯	2.3~3.2	1.9~2.5	1.3h
栅格荧光灯具	1.2~1.4	1.2~1.4	0.75h
荧光灯具(余弦配光)	1.4~1.5	—	—
块板型(高压钠灯) GC108—NG400	1.6~1.7	1.6~1.7	1.2h

注:第一个数字为最适宜值,第二个数字为允许值。

表 16—16 嵌入式均匀布置发光带最适宜的  $L:h$  值

发光带类型	$L:h$
玻璃面发光带	$\leq 1.2$
栅格式发光带	$\leq 1.0$

表 16-17 荧光灯的最大允许距高比  $L:h$  值

灯具名称	灯具型号	灯具效率 (%)	最大允许距高比 $L:h$		光通量 (lm)	示意图
			A-A	B-B		
筒式 荧光灯	1×40W YG1-1	81	1.62	1.22	2200	
	1×40W YG2-1	88	1.46	1.28	2200	
	2×40W YG2-2	97	1.33	1.28	2×2200	
密封型 荧光灯	1×40W YG4-1	84	1.52	1.27	2200	
	2×40W YG4-2	80	1.41	1.26	2×2200	
吸顶式 荧光灯	2×40W YG6-2	86	1.48	1.22	2×2200	
	3×40W YG6-3	86	1.5	1.26	3×2200	
嵌入式 栅格荧 光灯(塑 料栅格)	3×40W YG15-3	45	1.07	1.05	3×2200	
嵌入式 栅格荧光灯 (铝栅格)	YG15-2	63	1.25	1.20	2×2200	

### 第三节 照度计算

#### 一、各类光源的照度计算

##### 1. 点光源照度计算(图 16-11)

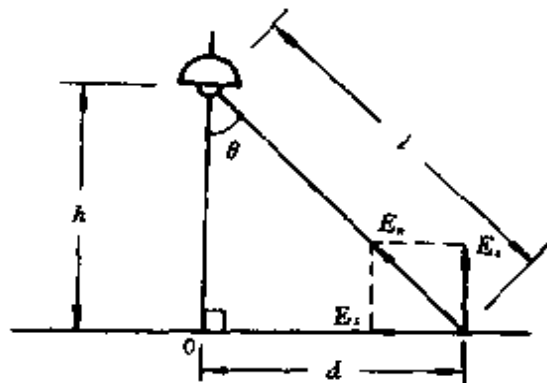


图 16-11 计算点光源照度的示意图

$$E_n = \frac{I_\theta}{l^2} = \frac{I_\theta}{h^2 + d^2}$$

$$E_s = E_n \cos\theta = \frac{I_\theta}{l^2} \cos\theta = \frac{I_\theta}{h^2} \cos^3\theta$$

$$E_x = E_n \sin\theta = \frac{I_\theta}{l^2} \sin\theta = \frac{I_\theta}{d^2} \sin^3\theta$$

如果光源的光强对所有方向均相等,则  $I = I_\theta$ 。

式中:  $E_n$ ——法线照度(lx);

$E_s$ ——水平面照度(lx);

$E_x$ ——垂直面照度(lx);

$I_\theta$ ——光源指向被照点方向的光强(cd);

$\theta$ ——光线的方向与被照面法线间的夹角;

$h$ ——计算高度(m);

$d$ ——水平距离(m)。

当水平距离  $d$  一定时,给出最大水平面照度的条件是  $h = d/\sqrt{2}$ 。

2. 给出立体角时被照面上的照度计算(图 16—12)

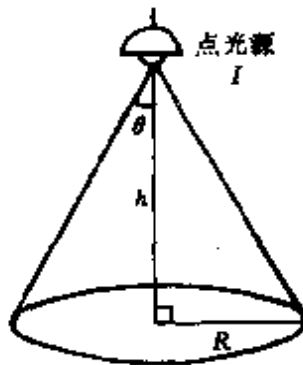


图 16—12 点光源在圆桌面上的照度

$$E_s = \frac{\phi}{S} = \frac{2\pi I(1-\cos\theta)}{\pi R^2} = \frac{2I(1-\cos\theta)}{R^2}$$

$$\omega = 2\pi(1-\cos\theta)$$

式中： $E_s$ ——圆桌面上(水平面)的照度(lx)；

$I$ ——发光强度(cd)；

$R$ ——圆桌半径(m)；

$\omega$ ——从光源处看到的圆桌的立体角(sr)。

例 16—1 如图 16—13 所示的一点光源安装在天花板上，

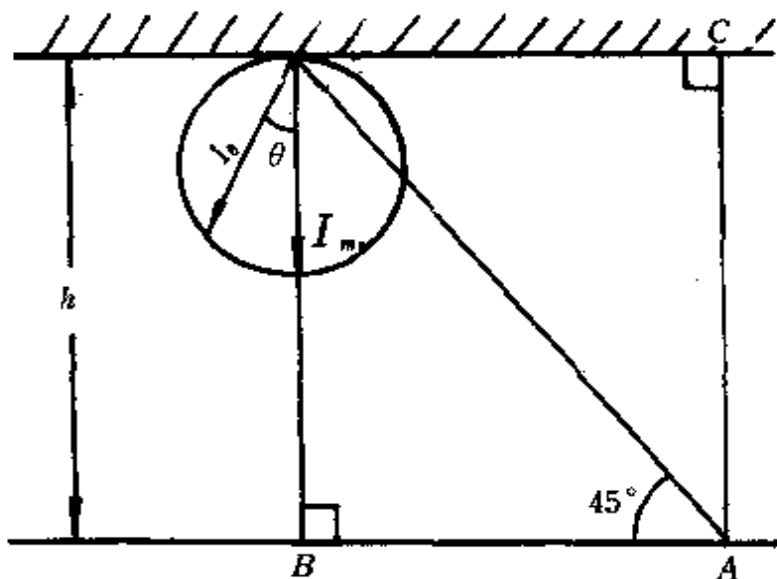


图 16—13 例 16--1 图

发光强度  $I_\theta = I_m \cos\theta$  (单位:cd)。已知 A 点的直射水平面照度为 200lx, 试求 (1) B 点的水平面照度; (2) 若在 C 点增加同样的一点光源时, 则 B 点的水平面照度又为多少? 设以上两种场合, 室内相互反射效果忽略不计。

解

(1) 设距离  $R$  的一点的水平照度为  $E_s$ , 则

$$E_s = \frac{I_m \cos \theta}{R^2} \cos \theta$$

按题意,

$$200 = \frac{I_m \cos 45^\circ}{R^2} \cos 45^\circ, I_m = 400R^2$$

设高度为  $h$ , 则  $B$  点的水平照度为

$$E_B = \frac{I_m \cos \theta}{h^2} \cos \theta$$

这里  $\theta = 0^\circ$ , 故

$$E_B = I_m / h^2 = 400R^2 / h^2$$

而由图有  $h = R \cos 45^\circ = R / \sqrt{2}$ , 故

$$E_B = 400R^2 \left( \frac{\sqrt{2}}{R} \right)^2 = 800 (\text{lx})$$

(2) 在  $C$  点增加点光源后,  $B$  点的照度只要在上述照度下增加  $A$  点的水平照度即可, 即

$$800 + 200 = 1000 (\text{lx})$$

**例 16—2** 有一所有方向光强都均匀的  $270\text{cd}$  的电灯, 装在直径  $40\text{cm}$  的完全扩散性球形灯罩内, 置于离桌子高度  $2\text{m}$  处, 试求该灯垂直下方的桌子上的照度。其中设灯罩的反射率为  $50\%$ , 透射率为  $40\%$ 。

**解** 在一定反射率  $\rho$ 、直径为  $D(\text{m})$  的完全扩散性球形灯罩内的中心位置, 放置光强为  $I(\text{cd})$  的光源时, 由于球形灯罩内的某一点的照度  $E$  为直射照度  $E_1$  和扩散照度  $E_2$  之和, 即

$$\begin{aligned} E &= E_1 + E_2 = \frac{4\pi I}{\pi D^2} + \left( \frac{4\pi I}{1-\rho} - 4\pi I \right) / \pi D^2 \\ &= \frac{1}{1-\rho} \cdot \frac{4I}{D^2} \end{aligned}$$

设透射率为  $\tau$ , 则灯罩的光束发射强度  $E'$  为

$$E' = \tau E = \frac{\tau}{1-\rho} \cdot \frac{4I}{D^2}$$

由于是完全扩散性,故灯罩表面的亮度  $L$  为

$$L = \frac{E'}{\pi} = \frac{\tau}{1-\rho} \cdot \frac{4I}{\pi D^2}$$

设灯罩中心与桌子的距离为  $x$ (m),由于亮度  $L$  的球光源的法线照度与在其中心集中全光通量  $\phi$ (lm)的点光源的场合相同,故

$$\begin{aligned} E_s &= \frac{\phi}{4\pi/x^2} = \frac{\pi D^2 L}{4x^2} \\ &= \frac{\tau}{1-\rho} \cdot \frac{I}{x^2} \end{aligned}$$

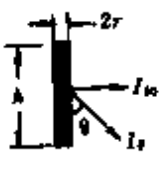

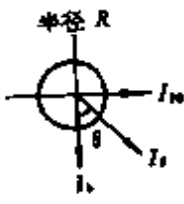
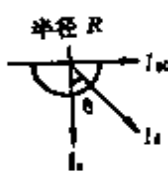




将题意中的各数值代入上式,得桌子上的照度为

$$\begin{aligned} E_s &= \frac{\tau}{1-\rho} \cdot \frac{I}{x^2} = \frac{0.4}{1-0.5} \times \frac{270}{2^2} \\ &= 54(\text{lx}) \end{aligned}$$

### 3. 几何形状简单的光源计算

几何形状简单的光源的配光、发光强度、照度、光通量,列于表 16—18。

表 16—18 几何形状简单的光源的配光、  
发光强度、照度、光通量

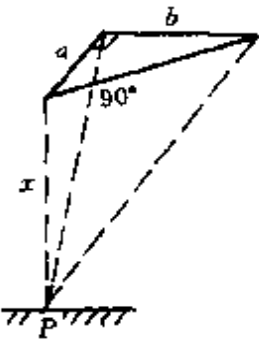
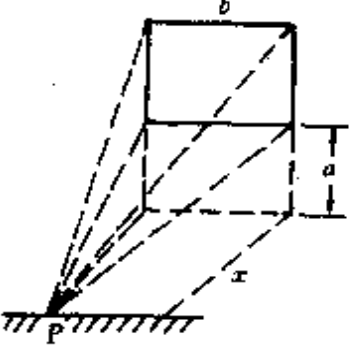

性质		圆柱	圆盘	球	半球
光源轴的取向					
垂直配光曲线					
发光强度 (cd)	$I_\theta$	$I_{90}\sin\theta$	$I_0\cos\theta$	$I_{90}=I_0$	$I_{90}(1+\cos\theta)$
	$I_{90}$	$2rhL$	0	$\pi R^2L$	$\pi R^2L/2$
	$I_0$	0	$SL$	$\pi R^2L$	$\pi R^2L$
平均球面光强 下半球面光强 上半球面光强	平均球面光强	$\pi I_{90}/4$	$I_0/4$	$I_{90}=I_0$	$I_{90}$
	下半球面光强	$\pi I_{90}/4$	$I_0/2$	$I_{90}=I_0$	$3I_0/4$
	上半球面光强	$\pi I_{90}/4$	0	$I_{90}=I_0$	$I_0/4$
水平面照度 $E$ , (lx)		0	$SL/l^2$	$I_0/h^2$	$I_0/h^2$
光通量 (lm)	全光通	$\pi^2 I_{90}$	$\pi I_0$	$4\pi I_0$	$2\pi I_0$
	下半球光通	$\pi^2 I_{90}/2$	$\pi I_0$	$2\pi I_0$	$3\pi I_0/2$
	上半球光通	$\pi^2 I_{90}/2$	0	$2\pi I_0$	$\pi I_0/2$

注：L—每单位长度或每单位面积的亮度(nt)；l—圆盘边缘至圆盘轴线与被照面交点之间的距离(m)；h—球中心至球轴线与被照面交点之间的距离(m)。

#### 4. 面光源的计算

几种面光源的水平面照度计算见表 16—19。

表 16—19 几种面光源的水平面照度

光源	与被照面平行的 直角三角形光源	与被照面成直角的 无限远的方形光源	与被照面下端的高度 相同的方形光源
图			
水平面 照度 $E_s(1x)$	$\frac{La}{2\sqrt{x^2-a^2}} \operatorname{tg}^{-1} \frac{b}{\sqrt{x^2+a^2}}$	$\frac{Lx}{2\sqrt{x^2+a^2}} \operatorname{tg}^{-1} \frac{b}{\sqrt{x^2-a^2}}$	$\frac{L}{2} (\beta - \beta_1 \cos \gamma)$

注： $L$ —亮度( $\text{nt}$ )。

#### 5. 直线光源照度的计算

当光源长度与计算高度之比为  $l/h \geq 0.5$ ，光源宽度与计算高度之比  $b/h \leq 0.5$  时，可认为是直线光源，如荧光灯照明，如图 16—13 所示。



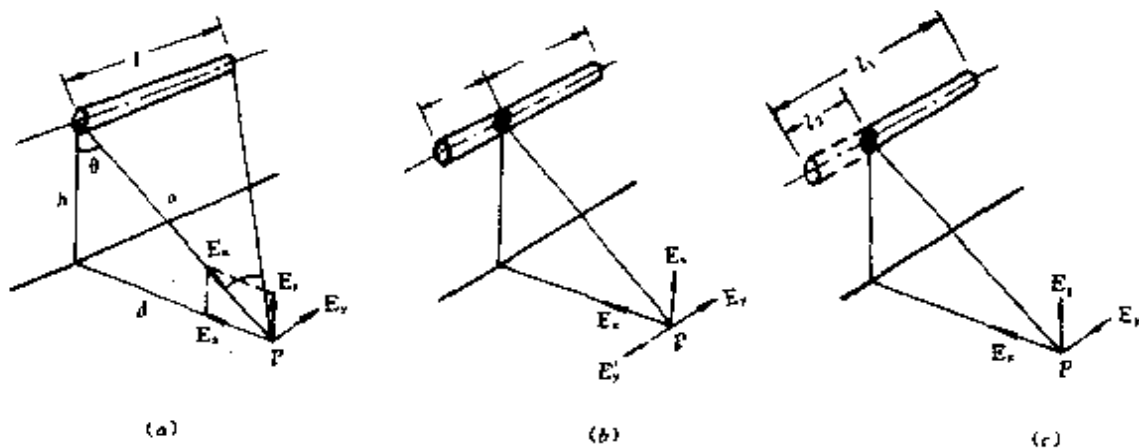


图 16—13 圆柱形光源

(a)圆柱形光源直射照度 (b)P 点在包含光源端的平面上 (c)P 点不在包含光源端的平面上

(1)图 16—13(a),其照度计算公式如下:

$$E_n = \frac{I}{2a} (\alpha + \sin\alpha \cdot \cos\alpha)$$

$$E_r = E_n \cos\theta = K \frac{hI}{a^2}$$

$$E_x = E_n \sin\theta = K \frac{dI}{a^2}$$

$$E_y = \frac{I}{2a} \sin^2\alpha = K' \frac{I}{a}$$

式中:  $E_n$ ——与光源轴线垂直的平面内被照点  $P$  的法线照度 (lx);

$E_r$ —— $P$  点的水平照度 (lx);

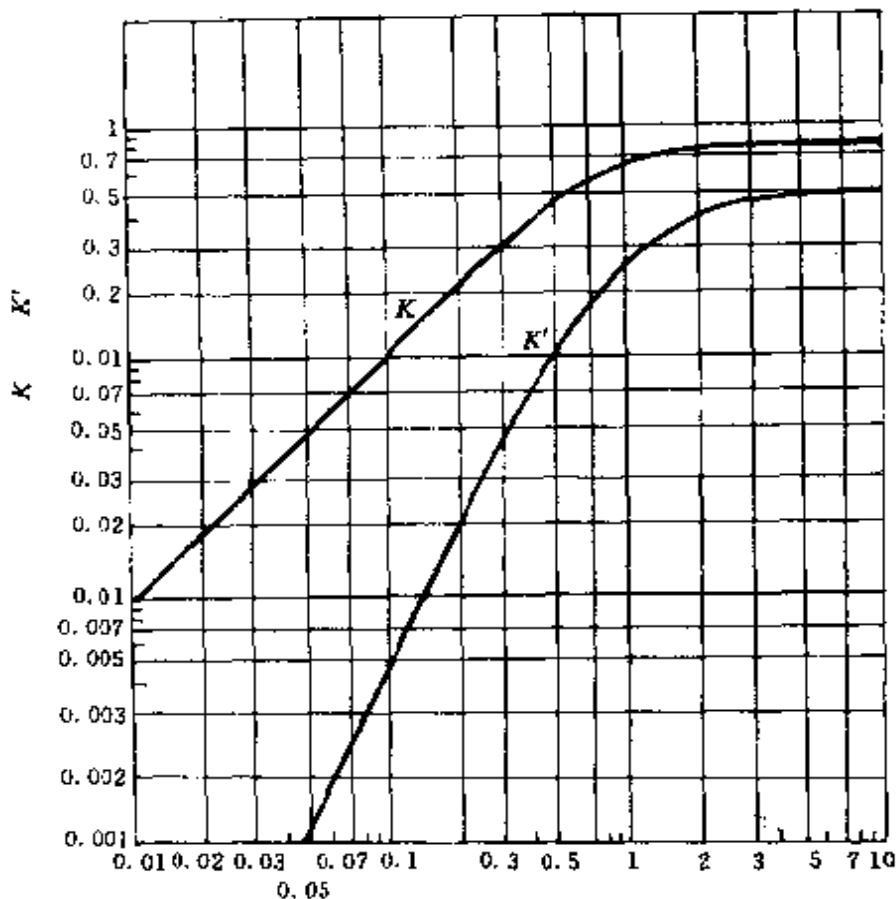
$E_x$ —— $P$  点的垂直照度 (lx);

$E_y$ —— $P$  点的纵向照度 (lx);

$I$ ——单位长度光强 (cd/m);

$K, K'$  ——系数,可由图 16—14 查取;

其它符号见图 16—14。



$$\frac{l}{a} = \frac{l}{\sqrt{h^2 + d^2}}$$

图 16—14 计算直线光源的照度用图。

(2) 图 16—14(b), 其照度计算公式如下:

$$E_s = E_{s1} + E_{s2}$$

$$E_x = E_{x1} + E_{x2}$$

$$E_y = E_{y1}, E'_y = E_{y2}$$

(3) 图 16—14(c), 其照度计算公式如下:

$$E_s = E_{s1} - E_{s2}$$

$$E_x = E_{x1} - E_{x2}$$

$$E_y = E_{y1} - E_{y2}$$

例 16—3 如图 16—15 所示的 30W 荧光灯照明, 求在 P 点的照度。已知灯管长 0.89m, 设垂直于灯管方向的光强为

230cd。  $l_1=2\text{m}$ ,  $l_2=1.11\text{m}$ ,  $h=2\text{m}$ ,  $d=1.5\text{m}$ 。

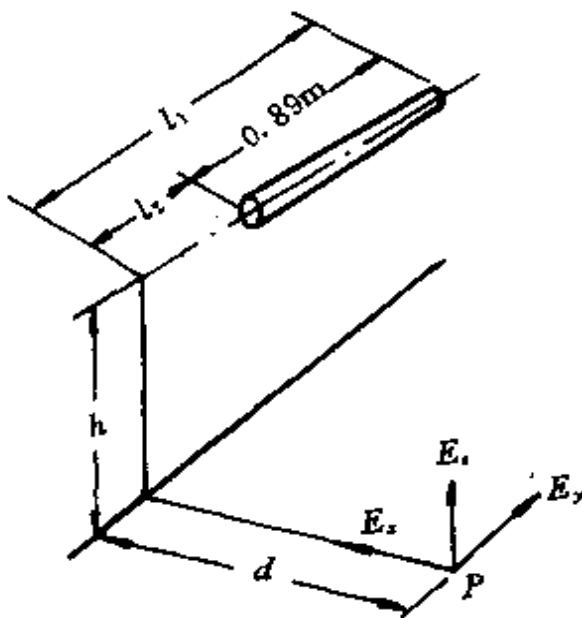


图 16—15

例 16—3 图

**解** 光源单位长度的光强

$$I = 230 / 0.89 = 258 (\text{cd/m})$$

$$a = \sqrt{h^2 + d^2} = \sqrt{2^2 + 1.5^2} = 2.5 (\text{m})$$

$$l_1/a = 2/2.5 = 0.8$$

由图 16—14 曲线查得

$$K_1 = 0.59 \quad K'_1 = 0.2$$

$$E_{n1} = K_1 I / a = 0.59 \times 258 / 2.5 = 60.9 (\text{lx})$$

$$E_{x1} = K_1 \frac{hI}{a^2} = 0.59 \times \frac{2 \times 258}{2.5^2} = 48.7 (\text{lx})$$

$$E_{y1} = K_1 \frac{dI}{a^2} = 0.59 \times \frac{1.5 \times 258}{2.5^2} = 36.5 (\text{lx})$$

$$E_{y1} = K'_1 \frac{I}{a} = 0.2 \times \frac{258}{2.5} = 20.6 (\text{lx})$$

又  $l_2/a = 1.11/2.5 = 0.444$ , 由图 16—14 曲线查得

$$K_2 = 0.4 \quad K'_2 = 0.08$$

$$E_{s2} = K_2 I / a = 0.4 \times 258 / 2.5 = 41.3 (\text{lx})$$

$$E_{s2} = K_2 \frac{hI}{a^2} = 0.4 \times \frac{2 \times 258}{2.5^2} = 0.13 (\text{lx})$$

$$E_{s2} = K_2 \frac{dI}{a^2} = 0.4 \times \frac{1.5 \times 258}{2.5^2} = 24.8 (\text{lx})$$

$$E_{y2} = K' : \frac{I}{a} = 0.08 \times \frac{258}{2.5} = 8.3 (\text{lx})$$

故  $P$  点的水平照度为

$$E_x = E_{x1} - E_{x2} = 48.7 - 0.13 = 48.57 (\text{lx})$$

$P$  点的垂直照度为

$$E_y = E_{y1} - E_{y2} = 36.5 - 24.8 = 11.7 (\text{lx})$$

$P$  点的纵向照度为

$$E_z = E_{z1} - E_{z2} = 20.6 - 8.3 = 12.3 (\text{lx})$$

### 6. 平带状光源照度的计算

当光源的宽度  $b$  与长度  $l$  相比很小时,即可认为是带状光源,如图 16--16 所示。

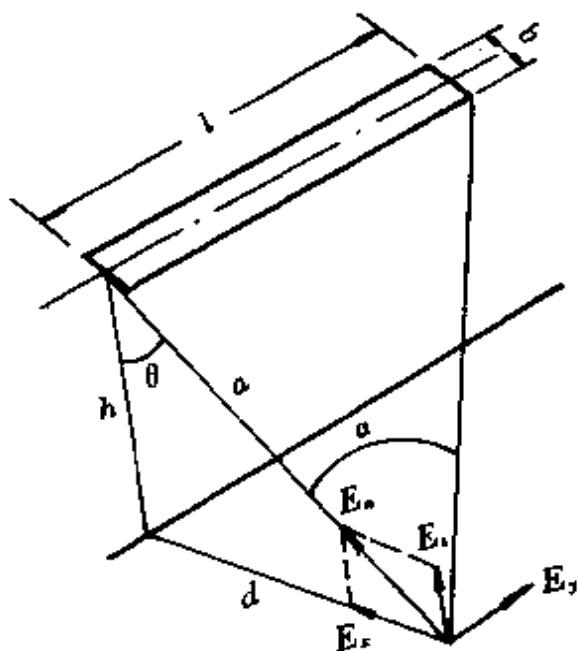


图 16—16 带状光源

带状光源的照度计算公式如下：

$$E_n = K \frac{hI}{a^2} \quad E_y = K' \frac{hI}{a^2}$$

$$E_x = E_n \cos\theta \quad E_z = E_n \sin\theta$$

式中：符号同前。

其中， $K, K'$  可由图 16—14 曲线中查取。

### 7. 圆盘光源照度的计算

图 16—17 为一圆盘光源，其照度计算公式如下：

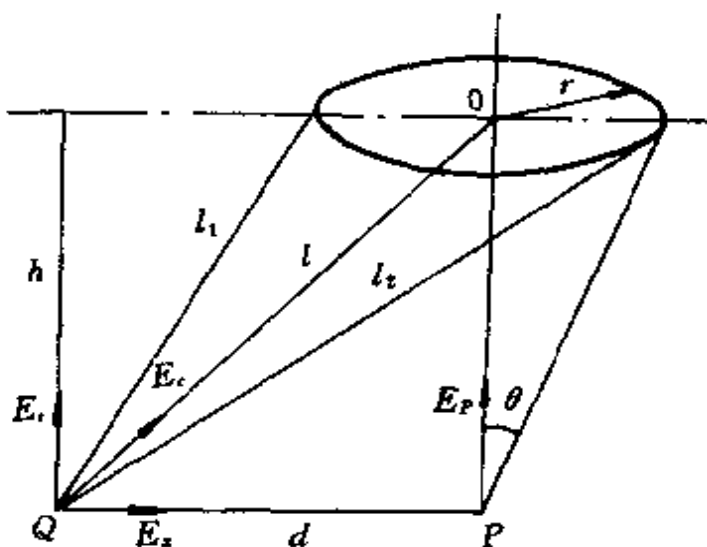


图 16—17 圆盘光源

(1) 光源中心下垂线上  $P$  点的照度：

$$E_p = \frac{\pi r^2 L}{h^2 + r^2}$$

(2) 至光源中心下垂线的距离为  $d$  的  $Q$  点的照度：

$$E_s = \pi L \cdot \frac{4r^2 - (l_1 - l_2)^2}{4l_1 l_2}$$

$$E_x = \frac{\pi h L}{d} \cdot \frac{(l_1 - l_2)^2}{4l_1 l_2}$$

$$E_0 = \frac{\pi r^2 L}{l_1 l_2} \cdot \frac{h}{l}$$

式中： $L$ ——每单位面积的亮度(nt)；

$r$ ——圆盘的半径(m)；

其它符号同前及参见图 16—17。

## 二、逐点法计算照度

该方法主要用于直射型灯具照明，而且反射光对照度影响较小的场所。

### 1. 点光源逐点计算法

(1)公式一：

光源光通量为 1000lm 的灯具，每个灯具在计算点产生的水平照度直射分量为  $e_s$ 。当灯具型式、布置及光源每个灯具的光通量为已知时， $n$  个灯具在任意指定点上产生的总照度  $E_s$  可由下式计算

$$E_s = \frac{\phi}{1000k} \sum_{i=1}^n e_s$$

式中： $E_s$ ——任一点上的总水平照度(lx)；

$\phi$ ——每个灯具的实际光通量(lm)；

$k$ ——照度补偿系数，可由表 16—20 查取；

$e_s$ ——一个光通量为 1000lm 的灯具在被照点产生的水平照度直射分量(lx)，也称假设照度，它可以由下式求得，也可以从空间等照度曲线中查得。

$$e_s = \frac{I_\theta \cos \theta}{l^2} = \frac{I_\theta \cos^3 \theta}{h^2}$$

$I_{\theta}$ ——灯具的垂直面光强分布曲线中与  $\theta$  角对应方向的光强值(cd),其值可从灯具设计计算图表中查得;

$l$ ——光源与受照面上某点的距离(m);

$h$ ——光源与受照水平面的垂直距离(m)。

由于空间等照度曲线是以假设光源的光通量为 1000lm 制作的,所以公式中要除以 1000。

表 16—20 照度补偿系数  $k$  值

分类	环境污染特征	举 例	照明补偿系数 $k$		灯具擦洗次数 (次/月)
			白炽灯、 荧光灯、 荧光高压汞灯	卤钨灯	
I	有微量尘埃 (清洁)	仪器仪表的装配车间,电子元器件的装配车间,实验室,办公室等	1.3	1.2	1
II	有少量尘埃 (一般)	机械加工、装配车间,发动机车间,焊接车间等	1.4	1.3	1
III	有较多尘埃 (污染严重)	锻工、铸工车间等	1.5	1.4	2
IV	室外	道路、堆场等	1.4	1.3	1

例 16—4 图 16—18 平面上有一边长为 4m 的正方形,顶点  $A$ 、 $B$ 、 $C$ 、 $D$  点的正上方高 2m 处各安装一个光强为 800cd 的灯泡,如果同时点燃,试求在  $A$ 、 $B$ 、 $C$ 、 $D$  各点和正方形中心点  $P$  的水平照度各为多少? 设灯泡的光强对所有方向均相等。

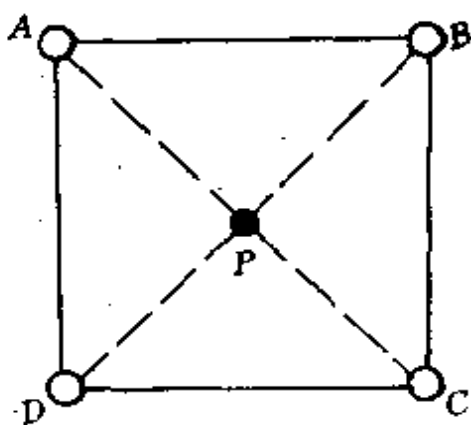


图 16—18 例 16—4 图

解 因 A、B、C、D 中任一点的照度都相等,所以只要求 A 点照度即可。对 A 点而言,有如图 16—19 的情况,其中光源 A 产生的照度为

$$E_A = I/h^2 = 800/2^2 = 200(\text{lx})$$

由光源 B、D 产生的照度为

$$E_B = E_D = \frac{I \cos \theta}{l^2} = \frac{Ih}{l^3} = \frac{800 \times 2}{(\sqrt{2^2 + 4^2})^3} = 17.9(\text{lx})$$

由光源 C 产生的照度为

$$E_C = \frac{800 \times 2}{(\sqrt{2^2 + (4\sqrt{2})^2})^3} = \frac{1600}{216} = 7.4(\text{lx})$$

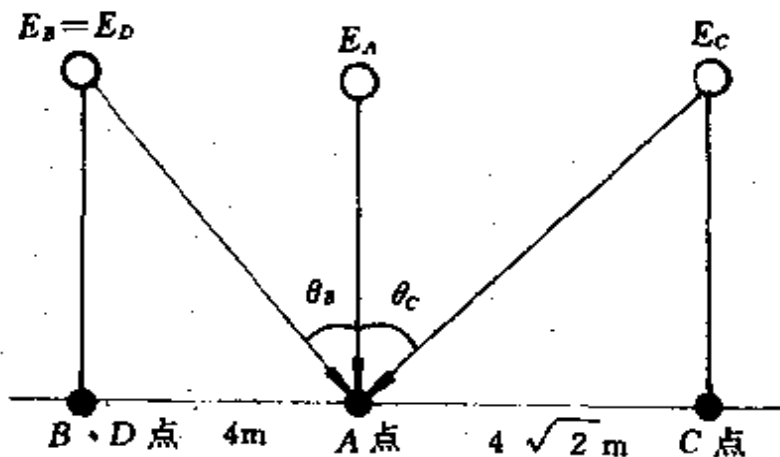


图 16—19



因此, A 点的照度  $E_1$  为 A、B、C、D 各光源所产生的照度之和。即

$$E_1 = E_A + E_B + E_C + E_D$$

$$= 200 + 2 \times 17.9 + 7.4 = 243.2 (\text{lx})$$

其次, P 点的照度  $E_2$  是由各个光源共同照射形成, 其值为光源 A 所产生照度的 4 倍, 如图 16—20 所示。

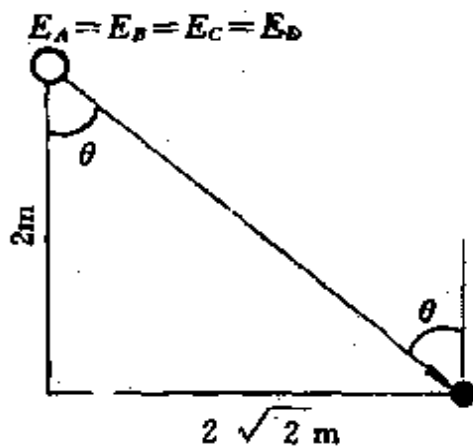


图 16—20

(2)公式二:

$$E_s = \frac{I_\theta \phi}{100 \times 1000 K} \sum_{i=1}^n e_i$$

式中:  $E_s$ ——任一点上的总水平照度(lx);

$I_\theta$ ——当光源的光通量为 1000lm 时,  $\theta$  方向的光强值 (cd), 可由“照明器技术参数表”中查得。其中  $\theta$  角可根据灯具离计算点的水平距离  $d$  和计算高度  $h$ , 由表 16—21 查得;

$e_i$ ——光强为 100cd 时的假设照度(lx), 可由表 16—21 查得;

其它符号同前。

表 16—21 光源至计算点的投射角  $\theta$  及 100cd 光源对水平面上不同计算点的假设照度  $e_s$

$d(m)$ $h(m)$	$1x/100cd$												
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
2	0°0'	27°	45°	56°	63°	68°	71°	74°	76°	78°	79°	80°	81°
	25.00	17.85	8.850	4.275	2.245	1.298	0.802	0.528	0.355	0.255	0.190	0.142	0.113
3	0°0'	18°	34°	45°	53°	59°	63°	67°	69°	72°	73°	75°	76°
	11.11	9.500	6.400	3.933	2.400	1.522	1.000	0.680	0.477	0.356	0.264	0.205	0.161
4	0°0'	14°	27°	37°	45°	51°	56°	60°	63°	66°	68°	70°	72°
	6.250	5.707	4.472	3.200	2.210	1.524	1.006	0.764	0.559	0.419	0.320	0.249	0.198
5	0°0'	11°	22°	31°	39°	45°	50°	54°	58°	61°	63°	66°	67°
	4.000	3.771	3.202	2.522	1.904	1.414	1.050	0.785	0.595	0.458	0.358	0.283	0.228
6	0°0'	9°	18°	27°	34°	40°	45°	49°	53°	56°	59°	61°	63°
	2.778	2.673	2.372	1.987	1.600	1.260	0.982	0.766	0.600	0.474	0.378	0.305	0.249
7	0°0'	8°	16°	23°	30°	36°	41°	45°	49°	52°	55°	58°	60°
	2.041	1.980	1.814	1.585	1.336	1.100	0.893	0.722	0.583	0.473	0.385	0.316	0.261
8	0°0'	7°	14°	21°	27°	32°	37°	41°	45°	48°	51°	54°	56°
	1.563	1.527	1.427	1.283	1.118	0.958	0.800	0.672	0.552	0.458	0.381	0.318	0.267

(续表)

$d(m)$		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
$h(m)$														
$lx/100cd$														
9	0°0'	1.235	1.212	1.148	1.054	0.943	0.825	0.711	0.697	0.515	0.437	0.370	0.314	0.267
	0°0'	5°43'	11°	17°	18°	24°	29°	34°	38°	42°	45°	48°	51°	53°
10	1.000	0.985	0.943	0.879	0.801	0.716	0.631	0.550	0.476	0.411	0.354	0.305	0.263	0.223
	0°0'	4°46'	9°	14°	18°	22°	27°	31°	35°	39°	42°	45°	48°	50°
12	0.694	0.687	0.668	0.634	0.593	0.546	0.497	0.451	0.400	0.356	0.315	0.278	0.246	0.218
	0°0'	4°5'	8°	12°	16°	20°	23°	27°	30°	34°	37°	40°	43°	45°
14	0.510	0.506	0.495	0.477	0.454	0.426	0.396	0.365	0.334	0.304	0.275	0.248	0.223	0.199
	0°0'	3°35'	7°	11°	14°	17°	20°	23°	27°	30°	33°	36°	38°	41°
16	0.391	0.388	0.382	0.371	0.357	0.339	0.321	0.300	0.280	0.259	0.238	0.219	0.200	0.182
	0°0'	3°11'	6°	9°	11°	14°	17°	21°	24°	27°	29°	32°	35°	37°
18	0.309	0.307	0.303	0.297	0.287	0.276	0.264	0.250	0.236	0.221	0.206	0.192	0.178	0.164
	0°0'	2°51'	5°43'	9°	9°	11°	14°	17°	19°	22°	24°	27°	29°	31°
20	0.250	0.249	0.246	0.242	0.236	0.228	0.219	0.210	0.200	0.190	0.179	0.168	0.158	0.148
	0°0'	2°51'	5°43'	9°	11°	14°	17°	19°	22°	24°	27°	29°	31°	34°

(续表)

$d(m)$ $h(m)$	$lx/100cd$												
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
24	0°0'	2°23'	4°45'	7°	10°	12°	14°	16°	18°	21°	23°	25°	27°
	0.174	0.173	0.172	0.170	0.166	0.163	0.158	0.154	0.148	0.143	0.137	0.130	0.124
27	0°0'	2°7'	4°14'	6°	8°	10°	12°	15°	17°	18°	20°	22°	24°
	0.137	0.137	0.136	0.135	0.133	0.130	0.128	0.124	0.121	0.117	0.113	0.109	0.105
30	0°0'	1°54'	3°50'	5°43'	8°	9°	11°	13°	15°	17°	18°	20°	22°
	0.111	0.111	0.111	0.109	0.108	0.107	0.105	0.103	0.100	0.098	0.095	0.092	0.089
36	0°0'	1°36'	3°11'	4°46'	6°	8°	9°	11°	13°	14°	16°	17°	18°
	0.077	0.077	0.077	0.076	0.076	0.075	0.074	0.073	0.072	0.070	0.069	0.067	0.066
40	0°0'	1°26'	2°52'	4°17'	5°43'	7°	9°	10°	11°	13°	14°	15°	17°
	0.063	0.062	0.062	0.062	0.062	0.061	0.060	0.060	0.059	0.058	0.057	0.056	0.055

(续表)

$d(m)$ $h(m)$	13	14	15	16	18	20	22	24	26	28	30	40
$lx/100cd$												
2	81° 0.090	82° 0.070	82° 0.058	83° 0.048	84° 0.038	84° 0.025	85° 0.020	85° 0.015	86° 0.013	86° 0.008	86° 0.007	87° 0.000
3	77° 0.126	78° 0.100	79° 0.084	80° 0.070	81° 0.050	81° 0.036	82° 0.027	83° 0.021	83° 0.016	84° 0.012	84° 0.011	85° 0.004
4	73° 0.159	74° 0.130	75° 0.107	76° 0.090	78° 0.064	79° 0.047	80° 0.037	81° 0.028	81° 0.022	82° 0.018	82° 0.015	84° 0.006
5	69° 0.185	70° 0.152	72° 0.126	73° 0.106	74° 0.077	76° 0.057	77° 0.044	78° 0.034	79° 0.027	80° 0.022	81° 0.017	83° 0.008
6	66° 0.205	67° 0.170	68° 0.142	69° 0.120	71° 0.088	73° 0.066	75° 0.051	76° 0.040	77° 0.032	78° 0.026	77° 0.024	81° 0.009
7	62° 0.218	63° 0.183	65° 0.154	66° 0.131	69° 0.097	71° 0.074	72° 0.057	74° 0.045	76° 0.036	76° 0.029	77° 0.024	80° 0.010

(续表)

$d(m)$ $h(m)$		13	14	15	16	18	20	22	24	26	28	30	40
$lx/100cd$													
8	58°	0.225	0.191	0.163	0.140	0.105	0.080	0.063	0.050	0.040	0.032	0.026	0.012
	55°	0.228	0.196	0.168	0.146	0.110	0.085	0.067	0.053	0.043	0.035	0.029	0.013
10	52°	0.227	0.196	0.171	0.149	0.115	0.089	0.071	0.057	0.046	0.038	0.036	0.017
	47°	0.217	0.191	0.169	0.150	0.119	0.094	0.076	0.062	0.051	0.043	0.036	0.017
14	43°	0.201	0.180	0.162	0.146	0.118	0.096	0.079	0.065	0.054	0.046	0.039	0.018
	39°	0.183	0.167	0.152	0.138	0.115	0.095	0.080	0.067	0.056	0.048	0.041	0.020

第三节 照度计算

(续表)

$d(m)$ $h(m)$		13	14	15	16	18	20	22	24	26	28	30	40
$lx/100cd$													
18		36° 0.165	38° 0.152	40° 0.140	42° 0.129	45° 0.109	48° 0.092	51° 0.079	53° 0.067	55° 0.057	57° 0.049	59° 0.042	66° 0.021
20		33° 0.147	35° 0.137	37° 0.128	39° 0.119	42° 0.103	45° 0.088	48° 0.076	50° 0.066	52° 0.057	54° 0.049	56° 0.043	63° 0.022
24		28° 0.118	30° 0.112	32° 0.106	34° 0.100	37° 0.089	40° 0.079	43° 0.070	45° 0.061	47° 0.054	49° 0.048	51° 0.042	59° 0.024
27		26° 0.100	27° 0.096	29° 0.092	31° 0.087	34° 0.079	37° 0.071	39° 0.064	42° 0.057	44° 0.051	46° 0.046	48° 0.041	56° 0.024
30		23° 0.086	25° 0.083	27° 0.080	28° 0.077	31° 0.070	34° 0.064	36° 0.058	39° 0.053	41° 0.048	43° 0.043	45° 0.039	53° 0.024
36		20° 0.064	21° 0.062	23° 0.061	24° 0.059	27° 0.055	29° 0.052	31° 0.048	34° 0.044	36° 0.041	38° 0.038	40° 0.035	48° 0.023
40		18° 0.054	19° 0.053	21° 0.051	22° 0.050	24° 0.047	27° 0.045	29° 0.042	31° 0.039	33° 0.037	35° 0.034	37° 0.032	45° 0.022

## 2. 线光源逐点计算法

线光源主要指荧光灯。线光源逐点计算法,只适用在一条线上灯具间的距离较小的情况,否则计算误差较大。线光源水平照度计算公式如下:

$$E_s = \frac{\phi}{1000kLh} \sum e_s$$

式中:  $E_s$ ——任一点上的总水平照度(lx);

$\phi$ ——一条线光源的光源总光通量(lm);

$k$ ——照度补偿系数,可由表 16—20 查取;

$L$ ——一条线光源的总长度(m);

$h$ ——计算高度(m);

$e_s$ ——单位长度光源光通量为 1000lm 的一条线光源在被照点产生的水平照度,它可以从空间等照度曲线(见图 16—7)中查得。

**例 16—5** 带有漫反射开启型直射光灯具的 40W 荧光灯照明布置,如图 16—21 所示,求 A 点的水平照度。

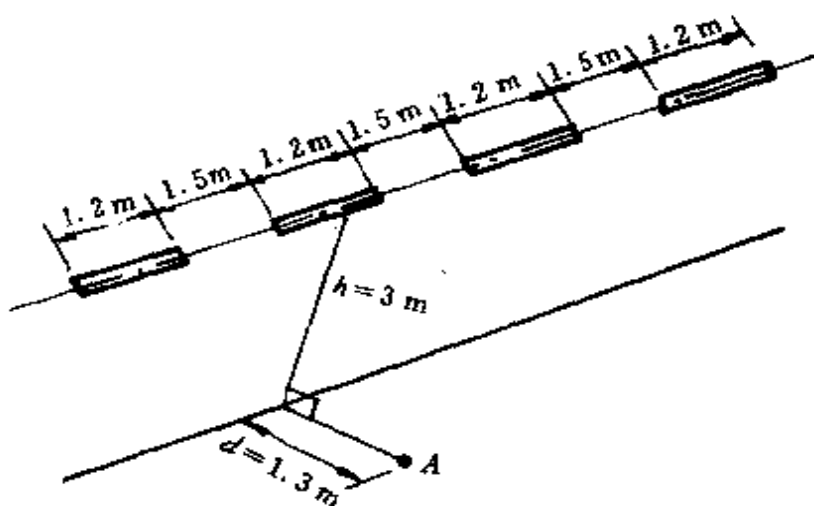


图 16—21 荧光灯布置图

**解** 由表 16—17 查得,40W 荧光灯的光通量为 2200lm,灯管长为 1.2m。



$$\phi = n\phi_1 = 4 \times 2200 = 8800(\text{lm})$$

$$P' = d/h = 1.5/3 = 0.5$$

$$L' = L/h = 9.3/3 = 3.1 \quad [L = 4 \times 1.2 + 3 \times 1.5 = 9.3(\text{m})]$$

由图 16—7 曲线查得  $e_s = 118\text{lx}$

因此 A 点的水平照度为

$$E_s = \frac{\phi}{1000kLh} \sum e_s$$

$$= \frac{8800 \times 118}{1000 \times 1.3 \times 9.3 \times 3} = 28.6(\text{lx})$$

(取  $k = 1.3$ )

### 三、利用系数法计算照度

该方法特别适用于非直射型灯具的室内反光性能较好的场合。

#### 1. 平均照度的计算

$$E_{pj} = \frac{\phi n \mu}{Ak}$$

式中： $E_{pj}$ ——工作面上的平均照度(lx)；

$\phi$ ——每个光源的光通量(lm)；

$n$ ——由布灯方案得出的灯具数量(个)；

$A$ ——房间面积( $\text{m}^2$ )；

$k$ ——照度补偿系数，可由表 16—20 查得；

$\mu$ ——利用系数，可根据房间的室空比(又称空腔系数)、表面反射率和灯具型式等，用下面介绍的方法，便可从有关灯具手册的利用系数表中查得，见表 16—22。

表 16—22 部分灯具的利用系数表

$\rho_{cc}(\%)$	70				50				30				0
	70	50	30	10	70	50	30	10	70	50	30	10	0
RCR	配照型灯 GC1— $\frac{A}{B}-1, \eta=85\%, B150W, 20901m$												
1	0.89	0.85	0.82	0.78	0.85	0.82	0.79	0.76	0.81	0.78	0.76	0.74	0.70
2	0.80	0.73	0.68	0.63	0.76	0.70	0.66	0.61	0.72	0.68	0.63	0.60	0.57
3	0.73	0.64	0.57	0.51	0.68	0.61	0.55	0.50	0.65	0.59	0.54	0.49	0.46
4	0.66	0.56	0.49	0.43	0.63	0.54	0.48	0.43	0.59	0.52	0.46	0.42	0.39
5	0.60	0.50	0.42	0.36	0.57	0.48	0.41	0.36	0.54	0.46	0.40	0.35	0.33
6	0.55	0.44	0.36	0.31	0.52	0.43	0.36	0.31	0.49	0.41	0.35	0.30	0.28
7	0.51	0.39	0.32	0.26	0.48	0.38	0.31	0.26	0.45	0.37	0.30	0.26	0.24
8	0.47	0.35	0.28	0.23	0.44	0.34	0.28	0.23	0.42	0.33	0.27	0.23	0.21
9	0.43	0.32	0.25	0.20	0.41	0.31	0.24	0.20	0.39	0.30	0.24	0.20	0.18
10	0.40	0.29	0.22	0.17	0.38	0.28	0.22	0.17	0.36	0.27	0.21	0.17	0.16
RCR	广照型灯 GC3— $\frac{A}{B}-2, \eta=76\%, G125W, 47501m$												
1	0.75	0.70	0.66	0.62	0.69	0.65	0.62	0.59	0.64	0.61	0.58	0.56	0.51
2	0.66	0.59	0.53	0.48	0.61	0.55	0.50	0.46	0.56	0.52	0.47	0.44	0.40
3	0.60	0.51	0.44	0.39	0.55	0.48	0.42	0.37	0.50	0.45	0.40	0.35	0.32
4	0.55	0.45	0.38	0.32	0.50	0.42	0.36	0.31	0.46	0.39	0.34	0.30	0.27
5	0.50	0.40	0.33	0.27	0.46	0.37	0.31	0.26	0.42	0.35	0.30	0.25	0.22
6	0.46	0.35	0.28	0.23	0.42	0.33	0.27	0.22	0.39	0.31	0.26	0.22	0.19
7	0.42	0.31	0.25	0.20	0.39	0.30	0.23	0.19	0.36	0.28	0.22	0.18	0.16
8	0.39	0.28	0.22	0.17	0.36	0.27	0.21	0.17	0.32	0.25	0.20	0.16	0.14
9	0.36	0.26	0.19	0.15	0.33	0.24	0.19	0.15	0.31	0.23	0.18	0.14	0.12
10	0.34	0.23	0.17	0.13	0.31	0.22	0.17	0.13	0.29	0.21	0.16	0.12	0.11

(续表)

$\rho_r(\%)$	70				50				30				0
$\rho_w(\%)$	70	50	30	10	70	50	30	10	70	50	30	10	0
RCR	深照型灯 GC5— $\frac{A}{B}$ —4, $\eta=67\%$ , 330W, 4610lm 500W, 8300lm												
1	0.71	0.69	0.66	0.64	0.68	0.66	0.64	0.62	0.65	0.63	0.61	0.60	0.57
2	0.65	0.60	0.56	0.52	0.62	0.58	0.54	0.51	0.59	0.55	0.52	0.50	0.47
3	0.59	0.52	0.47	0.43	0.56	0.50	0.46	0.42	0.53	0.48	0.45	0.41	0.39
4	0.54	0.46	0.40	0.36	0.51	0.44	0.39	0.36	0.48	0.43	0.39	0.35	0.33
5	0.49	0.40	0.35	0.30	0.46	0.39	0.34	0.30	0.44	0.38	0.33	0.30	0.28
6	0.44	0.36	0.30	0.26	0.42	0.34	0.29	0.25	0.40	0.33	0.29	0.25	0.23
7	0.41	0.32	0.26	0.22	0.38	0.31	0.25	0.21	0.36	0.30	0.25	0.21	0.20
8	0.37	0.28	0.23	0.19	0.35	0.28	0.22	0.19	0.34	0.27	0.22	0.18	0.17
9	0.35	0.26	0.20	0.16	0.33	0.25	0.20	0.16	0.31	0.24	0.19	0.16	0.15
10	0.32	0.23	0.18	0.14	0.30	0.22	0.17	0.14	0.29	0.22	0.17	0.14	0.13
RCR	吸顶式荧光灯 YG6—3, $\eta=86\%$ , $3 \times 4W$ $3 \times 2400lm$												
1	0.82	0.77	0.73	0.69	0.73	0.70	0.66	0.63	0.65	0.63	0.60	0.58	0.49
2	0.74	0.67	0.61	0.56	0.66	0.60	0.55	0.51	0.58	0.54	0.50	0.47	0.40
3	0.67	0.58	0.52	0.46	0.60	0.53	0.47	0.43	0.53	0.48	0.43	0.39	0.33
4	0.61	0.51	0.44	0.39	0.54	0.46	0.40	0.36	0.48	0.42	0.37	0.33	0.28
5	0.56	0.46	0.38	0.33	0.50	0.41	0.35	0.30	0.44	0.37	0.32	0.28	0.24
6	0.52	0.41	0.34	0.28	0.46	0.37	0.31	0.26	0.41	0.34	0.29	0.25	0.21
7	0.48	0.37	0.30	0.25	0.42	0.33	0.27	0.23	0.38	0.30	0.25	0.21	0.18
8	0.44	0.33	0.26	0.21	0.39	0.30	0.24	0.20	0.35	0.28	0.22	0.19	0.15
9	0.41	0.30	0.23	0.19	0.36	0.28	0.22	0.18	0.33	0.25	0.20	0.16	0.13
10	0.37	0.27	0.20	0.16	0.33	0.24	0.19	0.15	0.30	0.22	0.17	0.14	0.11

(续表)

$\rho_{cc}(\%)$	70				50				30				0
$\rho_{ww}(\%)$	70	50	30	10	70	50	30	10	70	50	30	10	0
RCR	平圆型吸顶灯 JXD5-2, $\eta=57\%$ , 100W, 1250lm 60W, 630lm												
1	0.52	0.49	0.47	0.44	0.45	0.42	0.41	0.39	0.38	0.36	0.35	0.34	0.36
2	0.47	0.42	0.39	0.36	0.40	0.37	0.34	0.31	0.34	0.31	0.29	0.27	0.21
3	0.42	0.37	0.33	0.29	0.36	0.32	0.29	0.26	0.31	0.28	0.25	0.23	0.17
4	0.39	0.32	0.28	0.24	0.33	0.28	0.25	0.22	0.28	0.24	0.21	0.19	0.14
5	0.35	0.29	0.24	0.21	0.30	0.25	0.21	0.18	0.25	0.22	0.19	0.16	0.12
6	0.32	0.26	0.21	0.18	0.28	0.22	0.19	0.16	0.24	0.19	0.16	0.14	0.11
7	0.30	0.23	0.18	0.15	0.26	0.20	0.16	0.14	0.22	0.17	0.14	0.12	0.09
8	0.28	0.21	0.16	0.13	0.24	0.18	0.14	0.12	0.20	0.16	0.13	0.10	0.08
9	0.26	0.19	0.14	0.12	0.22	0.16	0.13	0.10	0.19	0.14	0.11	0.09	0.07
10	0.23	0.17	0.13	0.10	0.20	0.15	0.11	0.09	0.17	0.13	0.10	0.08	0.05
RCR	筒式双层卤钨灯 DD6-500, $\eta=70\%$ , 500W 9750lm												
1	0.77	0.75	0.73	0.71	0.74	0.72	0.70	0.69	0.70	0.69	0.68	0.66	0.63
2	0.72	0.68	0.65	0.62	0.69	0.66	0.63	0.61	0.66	0.64	0.61	0.59	0.57
3	0.67	0.62	0.58	0.55	0.64	0.60	0.57	0.54	0.62	0.58	0.56	0.53	0.51
4	0.63	0.57	0.53	0.49	0.60	0.55	0.51	0.48	0.58	0.54	0.51	0.48	0.46
5	0.59	0.52	0.47	0.44	0.56	0.51	0.47	0.43	0.54	0.49	0.46	0.43	0.41
6	0.55	0.48	0.43	0.39	0.53	0.46	0.42	0.39	0.51	0.45	0.42	0.39	0.37
7	0.51	0.43	0.38	0.35	0.49	0.42	0.38	0.35	0.47	0.41	0.37	0.34	0.33
8	0.48	0.40	0.35	0.31	0.46	0.39	0.34	0.31	0.44	0.38	0.34	0.31	0.30
9	0.44	0.36	0.31	0.28	0.43	0.36	0.31	0.28	0.41	0.35	0.31	0.28	0.27
10	0.41	0.33	0.29	0.25	0.40	0.33	0.28	0.25	0.38	0.32	0.28	0.25	0.24

(续表)

$\rho_{cc}(\%)$	70				50				30				0
$\rho_w(\%)$	70	50	30	10	70	50	30	10	70	50	30	10	0
RCR	筒式荧光灯 YG1-1, $\eta=81\%$ , $1 \times 40W$ , $2400lm$												
1	0.75	0.71	0.67	0.63	0.67	0.63	0.60	0.57	0.59	0.56	0.54	0.52	0.43
2	0.68	0.61	0.55	0.50	0.60	0.54	0.50	0.46	0.53	0.48	0.45	0.41	0.34
3	0.61	0.53	0.46	0.41	0.54	0.47	0.42	0.38	0.47	0.42	0.38	0.34	0.28
4	0.56	0.46	0.39	0.34	0.49	0.41	0.36	0.31	0.43	0.37	0.32	0.28	0.23
5	0.51	0.41	0.34	0.29	0.45	0.37	0.31	0.26	0.39	0.33	0.28	0.24	0.20
6	0.47	0.37	0.30	0.25	0.41	0.33	0.27	0.23	0.36	0.29	0.25	0.21	0.17
7	0.43	0.33	0.26	0.21	0.38	0.30	0.24	0.20	0.33	0.26	0.22	0.18	0.14
8	0.40	0.29	0.23	0.18	0.35	0.27	0.21	0.17	0.31	0.24	0.19	0.16	0.12
9	0.37	0.27	0.20	0.16	0.33	0.24	0.19	0.15	0.29	0.22	0.17	0.14	0.11
10	0.34	0.24	0.17	0.13	0.30	0.21	0.16	0.12	0.26	0.19	0.15	0.11	0.09
RCR	筒式荧光灯 YG2-1, $\eta=88\%$ , $1 \times 40W$ , $2400lm$												
1	0.93	0.89	0.86	0.83	0.89	0.85	0.83	0.80	0.85	0.82	0.80	0.78	0.73
2	0.85	0.79	0.73	0.69	0.81	0.75	0.71	0.67	0.77	0.72	0.69	0.65	0.62
3	0.78	0.70	0.63	0.58	0.74	0.67	0.61	0.57	0.70	0.65	0.60	0.56	0.53
4	0.71	0.61	0.54	0.49	0.67	0.59	0.53	0.48	0.64	0.57	0.52	0.47	0.45
5	0.65	0.55	0.47	0.42	0.62	0.53	0.46	0.41	0.59	0.51	0.45	0.41	0.39
6	0.60	0.49	0.42	0.36	0.57	0.48	0.41	0.36	0.54	0.46	0.40	0.36	0.34
7	0.55	0.44	0.37	0.32	0.52	0.43	0.36	0.31	0.50	0.42	0.36	0.31	0.29
8	0.51	0.40	0.33	0.27	0.48	0.39	0.32	0.27	0.46	0.37	0.32	0.27	0.25
9	0.47	0.36	0.29	0.24	0.45	0.35	0.29	0.24	0.43	0.34	0.28	0.24	0.22
10	0.43	0.32	0.25	0.20	0.41	0.31	0.24	0.20	0.39	0.30	0.24	0.20	0.18

(续表)

$\rho_{cr}(\%)$	70				50				30				0
$\rho_w(\%)$	70	50	30	10	70	50	30	10	70	50	30	10	0
RCR	筒式荧光灯 YG2-2, $\eta=97\%$ , $2 \times 40W$ , $2 \times 2400lm$												
1	1.04	1.0	0.96	0.93	0.99	0.96	0.93	0.90	0.94	0.92	0.89	0.87	0.83
2	0.95	0.88	0.83	0.78	0.91	0.85	0.80	0.76	0.86	0.82	0.78	0.74	0.71
3	0.87	0.79	0.72	0.67	0.83	0.76	0.70	0.65	0.79	0.73	0.68	0.64	0.61
4	0.80	0.70	0.62	0.57	0.76	0.67	0.61	0.56	0.72	0.65	0.60	0.55	0.52
5	0.74	0.63	0.55	0.49	0.70	0.60	0.54	0.48	0.67	0.59	0.52	0.48	0.45
6	0.68	0.56	0.48	0.43	0.65	0.55	0.48	0.43	0.62	0.53	0.47	0.42	0.40
7	0.63	0.51	0.43	0.37	0.60	0.49	0.42	0.37	0.57	0.48	0.41	0.37	0.34
8	0.58	0.46	0.38	0.32	0.55	0.44	0.37	0.32	0.53	0.43	0.37	0.32	0.30
9	0.54	0.42	0.34	0.29	0.51	0.40	0.33	0.29	0.49	0.39	0.33	0.28	0.26
10	0.49	0.36	0.29	0.24	0.46	0.35	0.28	0.24	0.44	0.34	0.28	0.23	0.22
RCR	配照型灯 GC1- $\frac{A}{B}$ -1, $\eta=72\%$ , $G125W$ , $475Clm$												
1	0.75	0.72	0.68	0.66	0.71	0.69	0.66	0.63	0.68	0.66	0.64	0.62	0.58
2	0.67	0.62	0.57	0.52	0.64	0.59	0.55	0.51	0.61	0.56	0.53	0.50	0.47
3	0.61	0.53	0.47	0.42	0.57	0.51	0.46	0.42	0.54	0.49	0.44	0.41	0.38
4	0.55	0.47	0.40	0.35	0.52	0.45	0.39	0.35	0.49	0.43	0.38	0.34	0.32
5	0.50	0.41	0.34	0.30	0.47	0.39	0.34	0.29	0.45	0.38	0.33	0.29	0.27
6	0.46	0.36	0.30	0.25	0.43	0.35	0.29	0.25	0.41	0.34	0.28	0.24	0.23
7	0.42	0.32	0.26	0.21	0.39	0.31	0.25	0.21	0.37	0.30	0.25	0.21	0.19
8	0.39	0.29	0.23	0.18	0.37	0.28	0.22	0.18	0.35	0.27	0.22	0.18	0.16
9	0.36	0.26	0.20	0.16	0.34	0.25	0.20	0.16	0.32	0.24	0.19	0.15	0.14
10	0.33	0.24	0.18	0.14	0.31	0.23	0.17	0.14	0.30	0.22	0.17	0.13	0.12

第三节 照度计算

(续表)

$\rho_{cc}(\%)$	70				50				30				0
$\rho_w(\%)$	70	50	30	10	70	50	30	10	70	50	30	10	0
RCR	深照型灯 GC5-A <sub>B</sub> -4, $\eta=65\%$ , G400W, 20000lm												
1	0.68	0.65	0.62	0.59	0.64	0.62	0.59	0.57	0.61	0.59	0.57	0.56	0.52
2	0.61	0.56	0.51	0.47	0.58	0.53	0.49	0.46	0.55	0.51	0.48	0.45	0.43
3	0.55	0.48	0.43	0.38	0.52	0.46	0.41	0.38	0.49	0.44	0.40	0.37	0.35
4	0.50	0.42	0.36	0.32	0.47	0.40	0.35	0.31	0.44	0.39	0.35	0.31	0.29
5	0.45	0.37	0.31	0.27	0.43	0.35	0.30	0.26	0.40	0.34	0.30	0.26	0.24
6	0.41	0.33	0.27	0.22	0.39	0.31	0.26	0.22	0.37	0.30	0.25	0.22	0.20
7	0.38	0.29	0.23	0.19	0.35	0.28	0.22	0.18	0.33	0.27	0.22	0.18	0.17
8	0.35	0.26	0.20	0.16	0.33	0.25	0.20	0.16	0.31	0.24	0.19	0.16	0.14
9	0.32	0.23	0.18	0.14	0.30	0.22	0.17	0.14	0.28	0.22	0.17	0.14	0.12
10	0.30	0.21	0.15	0.12	0.28	0.20	0.15	0.12	0.26	0.20	0.15	0.12	0.10
RCR	吸顶式荧光灯 YG6-2, $\eta=86\%$ , 2×40W 2×2400lm												
1	0.82	0.78	0.74	0.70	0.73	0.70	0.67	0.64	0.65	0.63	0.60	0.58	0.49
2	0.74	0.67	0.62	0.57	0.66	0.61	0.56	0.52	0.59	0.54	0.51	0.48	0.40
3	0.68	0.59	0.53	0.47	0.60	0.53	0.48	0.44	0.53	0.48	0.44	0.40	0.34
4	0.62	0.52	0.45	0.40	0.55	0.47	0.41	0.37	0.49	0.43	0.38	0.34	0.28
5	0.56	0.46	0.39	0.34	0.50	0.42	0.36	0.31	0.45	0.38	0.33	0.29	0.24
6	0.52	0.42	0.35	0.29	0.46	0.38	0.32	0.27	0.41	0.34	0.30	0.25	0.21
7	0.48	0.37	0.30	0.25	0.43	0.34	0.28	0.24	0.38	0.31	0.26	0.22	0.18
8	0.44	0.34	0.27	0.22	0.40	0.31	0.25	0.21	0.35	0.28	0.23	0.19	0.16
9	0.41	0.31	0.24	0.19	0.37	0.28	0.22	0.18	0.33	0.26	0.21	0.17	0.14
10	0.38	0.27	0.21	0.16	0.34	0.25	0.19	0.15	0.30	0.22	0.18	0.14	0.11

注: B—白炽灯炮; G—荧光高压汞灯炮。



若照度标准为最低照度值时,必须将平均照度值  $E_p$  换算成最低照度值  $E$ 。换算公式如下:

$$E = E_p / Z$$

式中:  $E$ ——工作面上的最低照度(lx);

$Z$ ——最小照度系数,可查阅有关照明手册和图表。这里

列举部分灯具的最小照度系数,见表 16—23。

表 16—23 部分灯具的最小照度系数  $Z$  值

灯具名称	灯具型号	光源种类 及容量 (W)	距高比 $L : h$				$L : h / z$ 的 最大允许值
			0.6	0.8	1.0	1.2	
			Z 值				
配照型灯具	GC1-A B-1	B150	1.30	1.32	1.33		1.25/1.33
		G125		1.34	1.33	1.32	1.41/1.29
广照型灯具	GC3-A B-2	G125	1.28	1.30			0.98/1.32
		B200 150	1.30	1.33			1.02/1.33
深照型灯具	GC5-A B-3	B300		1.34	1.33	1.30	1.40/1.29
		G250		1.35	1.34	1.32	1.45/1.32
	GC5-A B-4	B300 500		1.33	1.34	1.32	1.40/1.31
		G400	1.29	1.34	1.35		1.23/1.32
筒式荧光灯具	YG1-1	1×40	1.34	1.34	1.31		1.22/1.29
	YG2-1			1.35	1.33	1.28	1.28/1.28
	YG2-2	2×40		1.35	1.33	1.29	1.28/1.29
吸顶荧光灯具	YG6-2	2×40	1.34	1.36	1.33		1.22/1.29
	YG6-3	3×40		1.35	1.32	1.30	1.26/1.33
嵌入式荧光灯具	YG15-2	2×40	1.34	1.34			
	YG15-3	3×40	1.37	1.33			1.05/1.30
房间较矮		灯排数 ≤ 3	1.15~1.20				
反射条件较好		灯排数 > 3	1.10				
其它白炽灯(B)的灯布置合理时			1.10~1.20				



## 2. 利用系数 $\mu$ 的确定

(1) 房间结构及其表示系数: 利用系数  $\mu$  是表示室内工作面上, 由灯具的照射和墙、顶棚的反射而得到的光通量与光源发出的光通量之比值。

可将房间分成三个空间, 如图 16—22 所示。

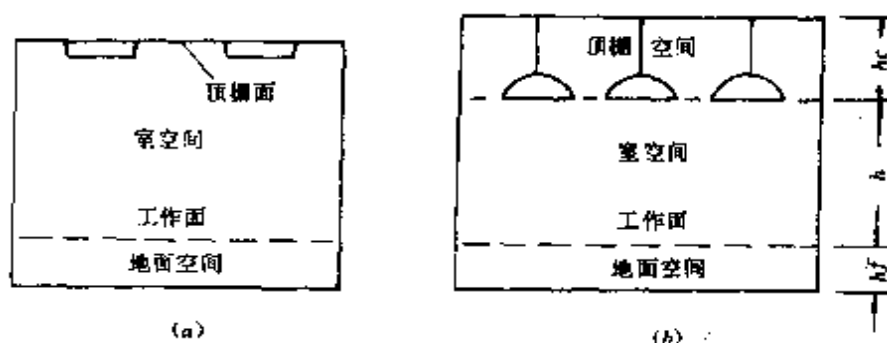


图 16—22 室内三个空间的划分

(a) 灯具吸顶安装 (b) 灯具悬吊安装

三个空间形状大小分别由三个系数来表示:

$$\text{室空比} \quad \text{RCR} = \frac{5h(L+W)}{LW}$$

$$\text{顶空比} \quad \text{CCR} = \frac{5h_c(L+W)}{LW}$$

$$\text{地空比} \quad \text{FCR} = \frac{5h_f(L+W)}{LW}$$

式中:  $L$ ——房间长度(m);

$W$ ——房间宽度(m);

$h$ ——室空间的高度, 即计算高度(m);

$h_c$ ——顶棚空间的高度(m);

$h_f$ ——地面空间的高度, 即工作面高度(m)。

(2) 顶棚空间有效反射率  $\rho_{ce}$ : 根据顶棚反射率  $\rho_c$  和墙壁反射率  $\rho_{w1}$  以及顶空比 CCR, 查图 16—23 计算曲线, 便可求得  $\rho_{ce}$  值。

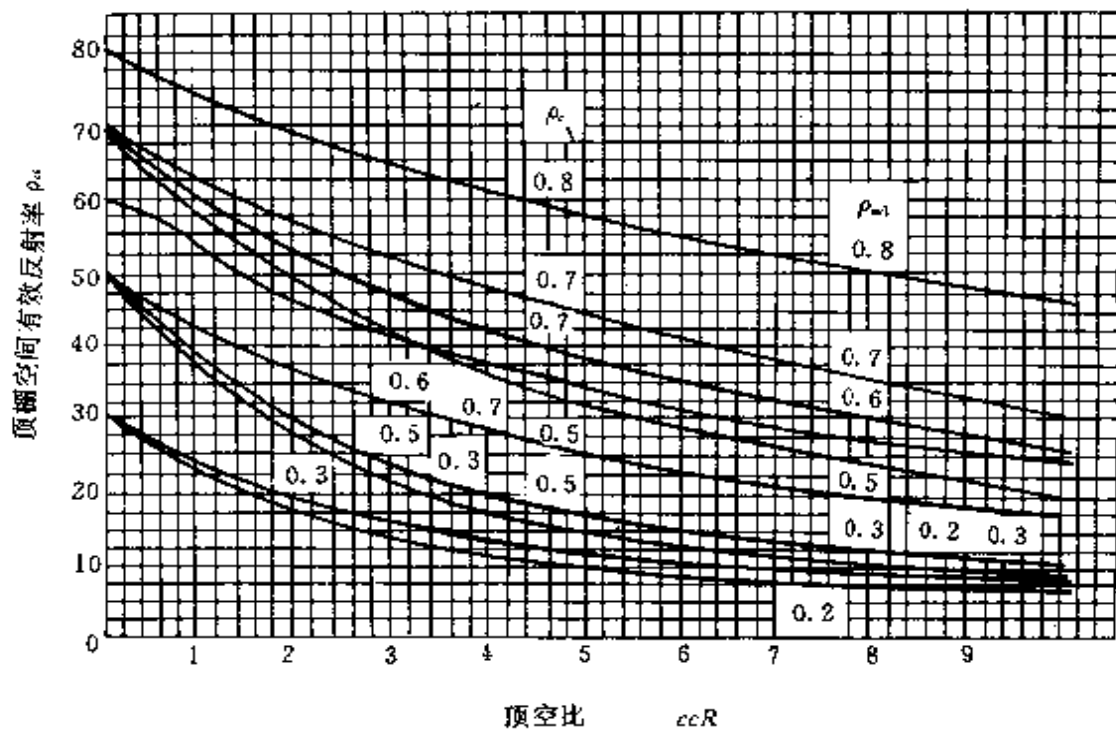


图 16—23 顶棚空间有效反射率计算曲线

(3) 墙面平均反射率  $\rho_w$ : 整个墙面的平均反射率可按下式计算:

$$\rho_w = \frac{\rho_{w1}(A_w - A_p) + \rho_p A_p}{A_w}$$

式中:  $\rho_{w1}$ ——墙面反射率, 参见表 16—9;

$\rho_p$ ——玻璃窗反射率, 参见表 16—9;

$A_w$ ——整个墙的面积( $m^2$ );

$A_p$ ——玻璃窗面积( $m^2$ )。

(4) 利用系数  $\mu$  的查取: 按上述方法求出室空比(RCR)、顶棚空间有效反射率( $\rho_{ce}$ )、墙面平均反射率( $\rho_w$ )值以后, 便可从照

明设计手册或图表中(如表 16--22)用插值法查取该型灯具的利用系数  $\mu$ 。

将有关数据代入  $E_{pj} = \frac{\phi n \mu}{Ak}$ , 便可进行照度计算。

部分灯具的利用系数, 见表 16--22。

### 3. 查概算曲线求所需灯具数

所谓概算曲线, 是假设被照面上的平均照度为 100lx 时, 房间面积与所用灯具数量的关系曲线。利用概算曲线可直接求出所需灯具的数量。概算曲线是利用系数法计算而得。

应用概算曲线首先要知道下列条件:

(1) 计算高度  $h$ 。

(2) 房间面积  $A$ 。

(3) 房间顶棚、墙壁、地面的反射率(当墙上开窗时, 墙壁反射率应为墙及窗的加权平均反射率)。

(4) 灯具类型及光源的种类和容量。有了上述已知条件, 便可从概算曲线中查得所需灯具的数量  $N$ 。但由于概算曲线是按假设被照面上的平均照度为 100lx 绘制的, 因此须按下式换算成实际应采用的灯具数:

$$n = \frac{E_{pj} k}{100 k'} N$$

式中:  $n$ ——实际应采用的灯具数量(个);

$E_{pj}$ ——工作面上的平均照度(lx);

$N$ ——由概算曲线查得的灯具数量(个);

$k'$ 、 $k$ ——分别为概算曲线和实际照度的补偿系数。

工厂常用的几种灯具的概算曲线, 如图 16--24~图 16--32 所示。

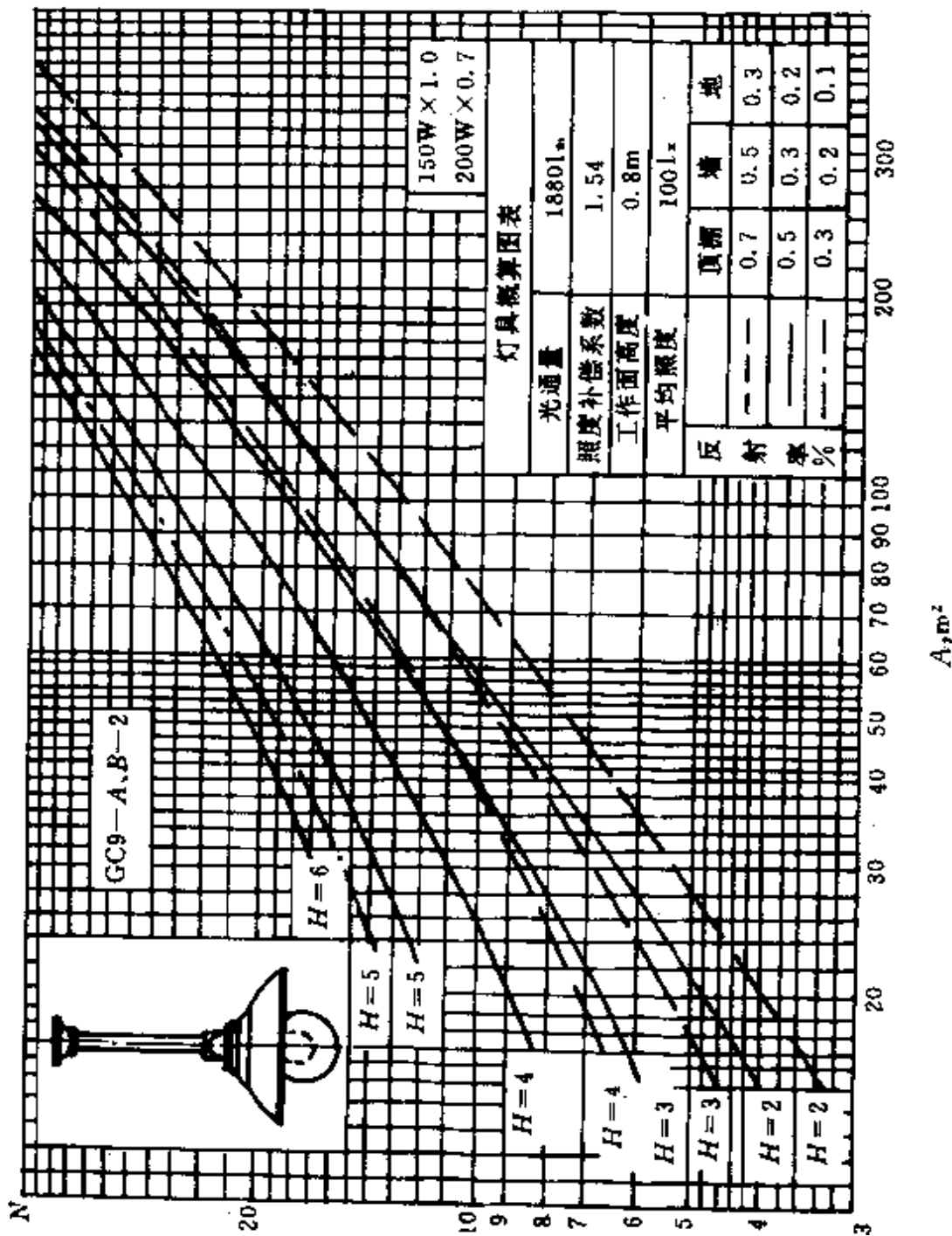


图 16-24 广照型防水防尘灯(150W、200W 白炽灯)概算曲线

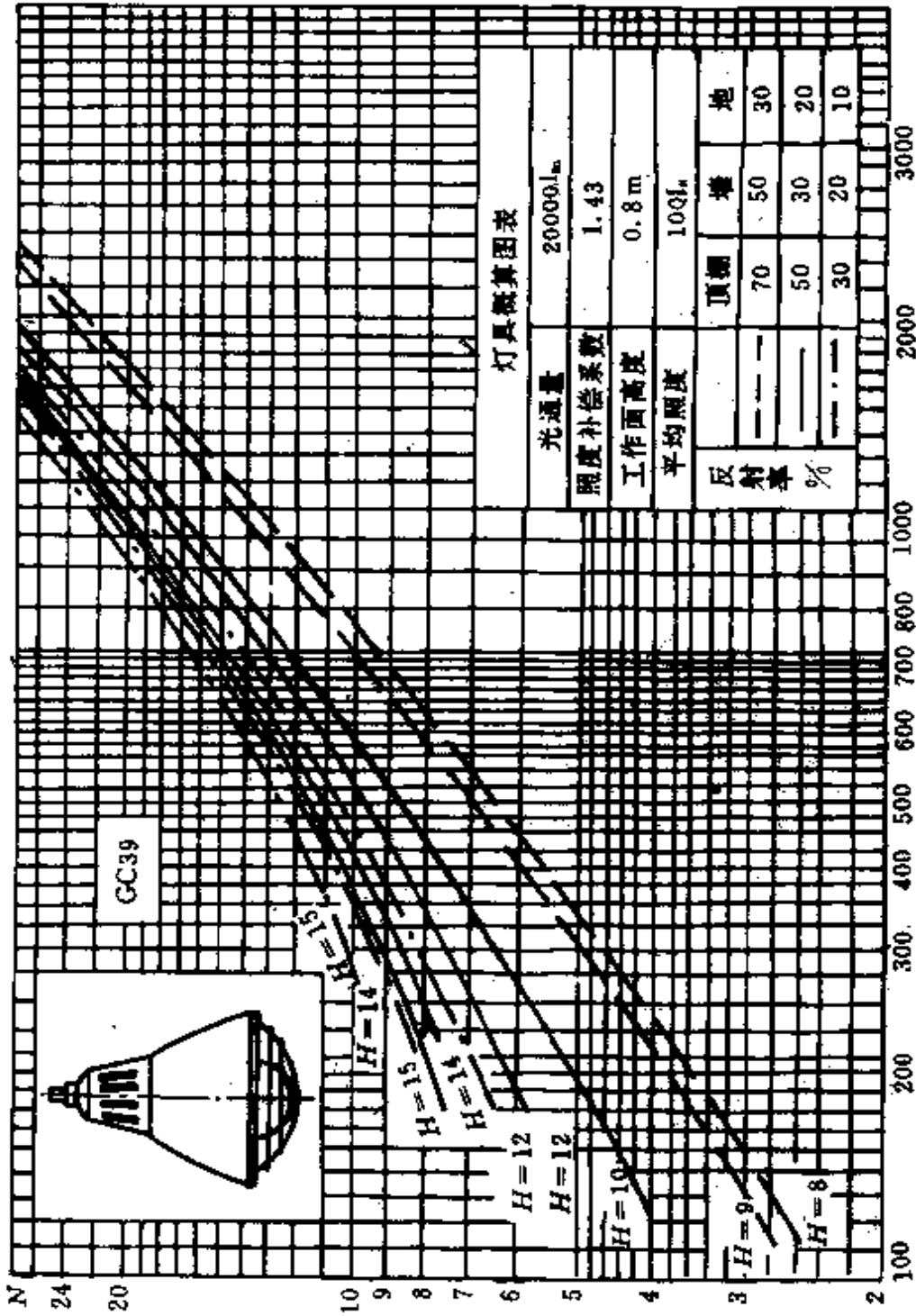


图 16-25 深照型防震灯(400W 荧光高压汞灯)概算曲线

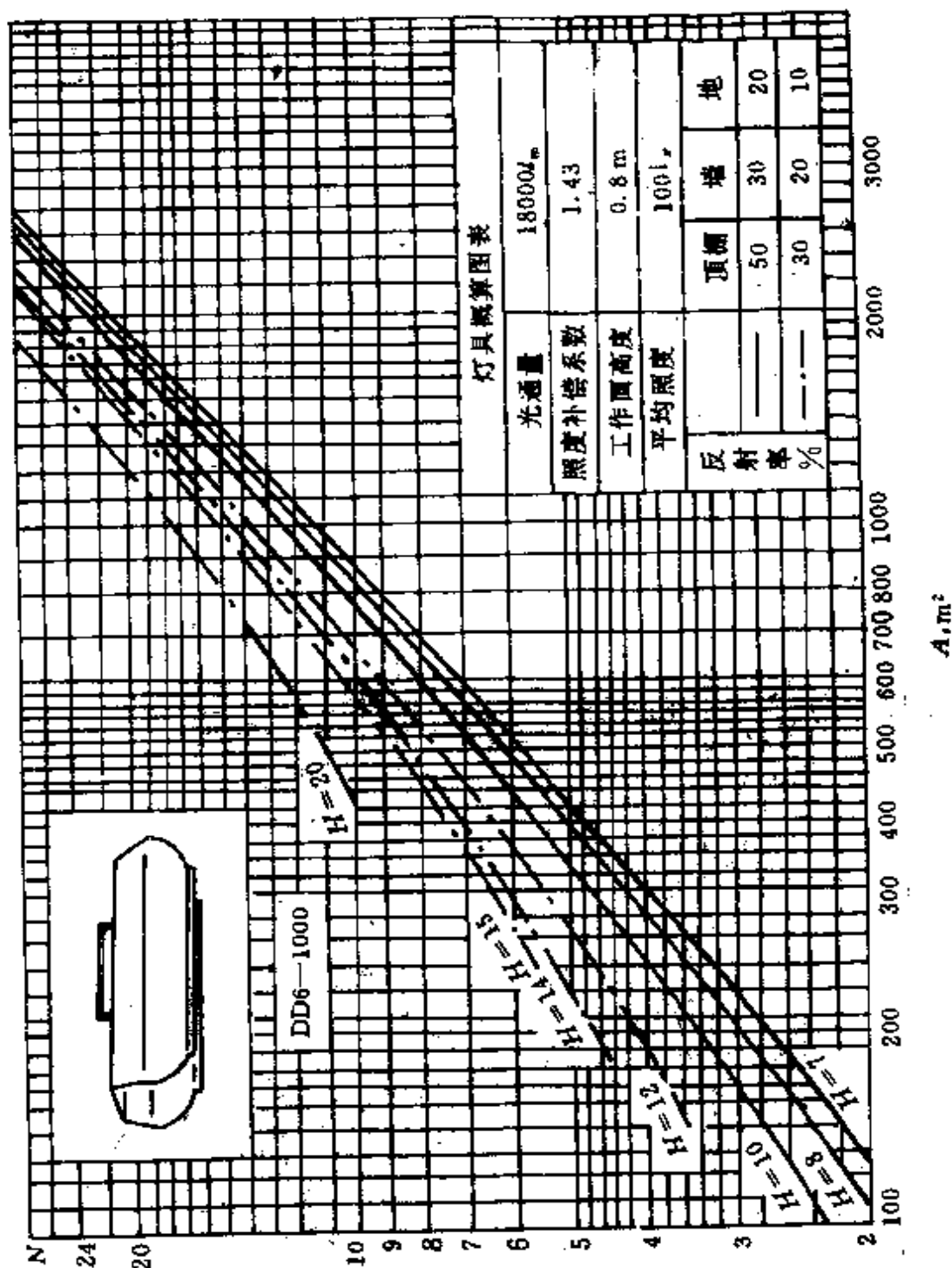


图 16-26 筒式双层卤钨灯(1000W)概算曲线

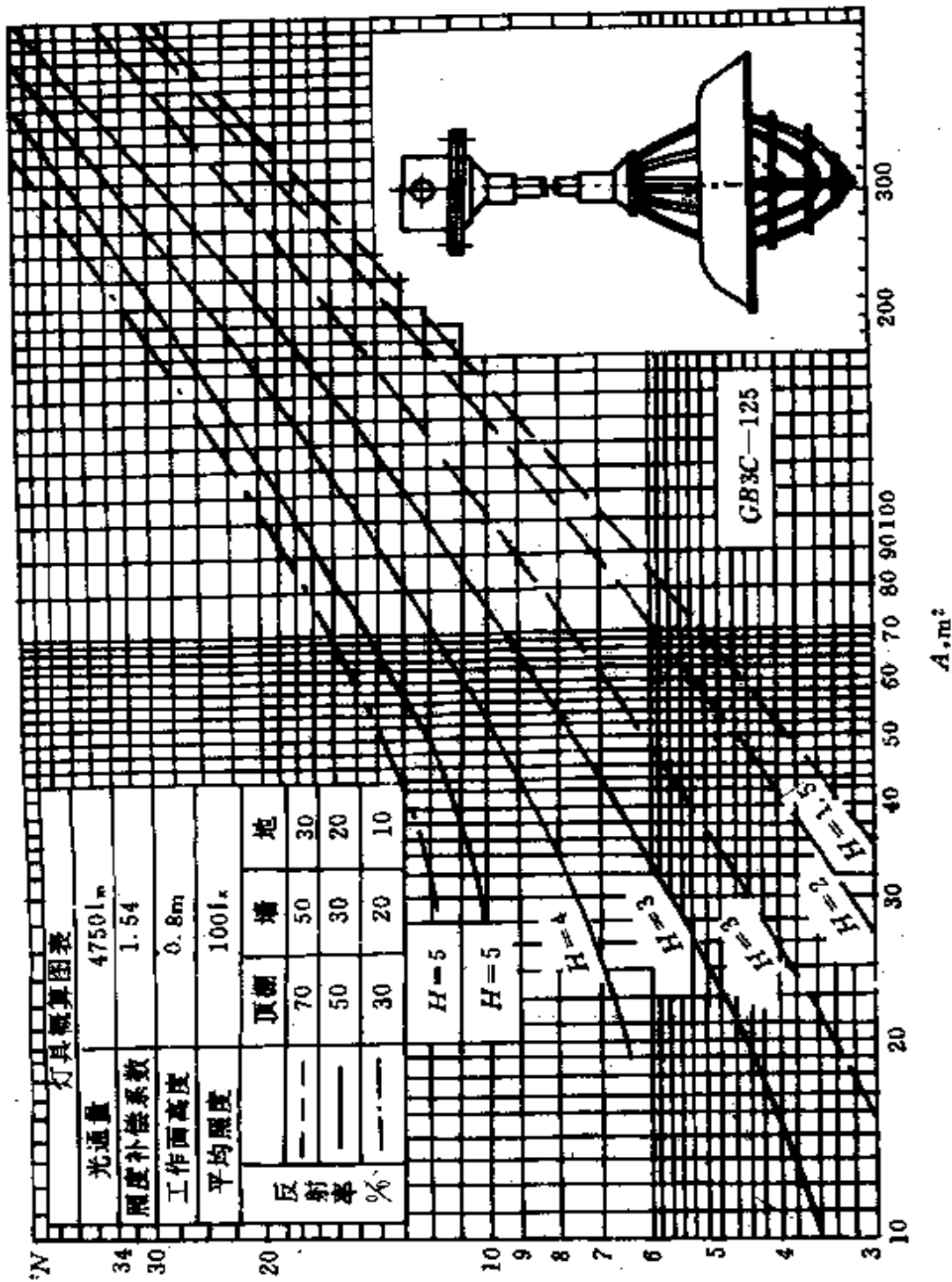


图 16—27 隔爆型防爆灯(125W 荧光高压汞灯)概算曲线



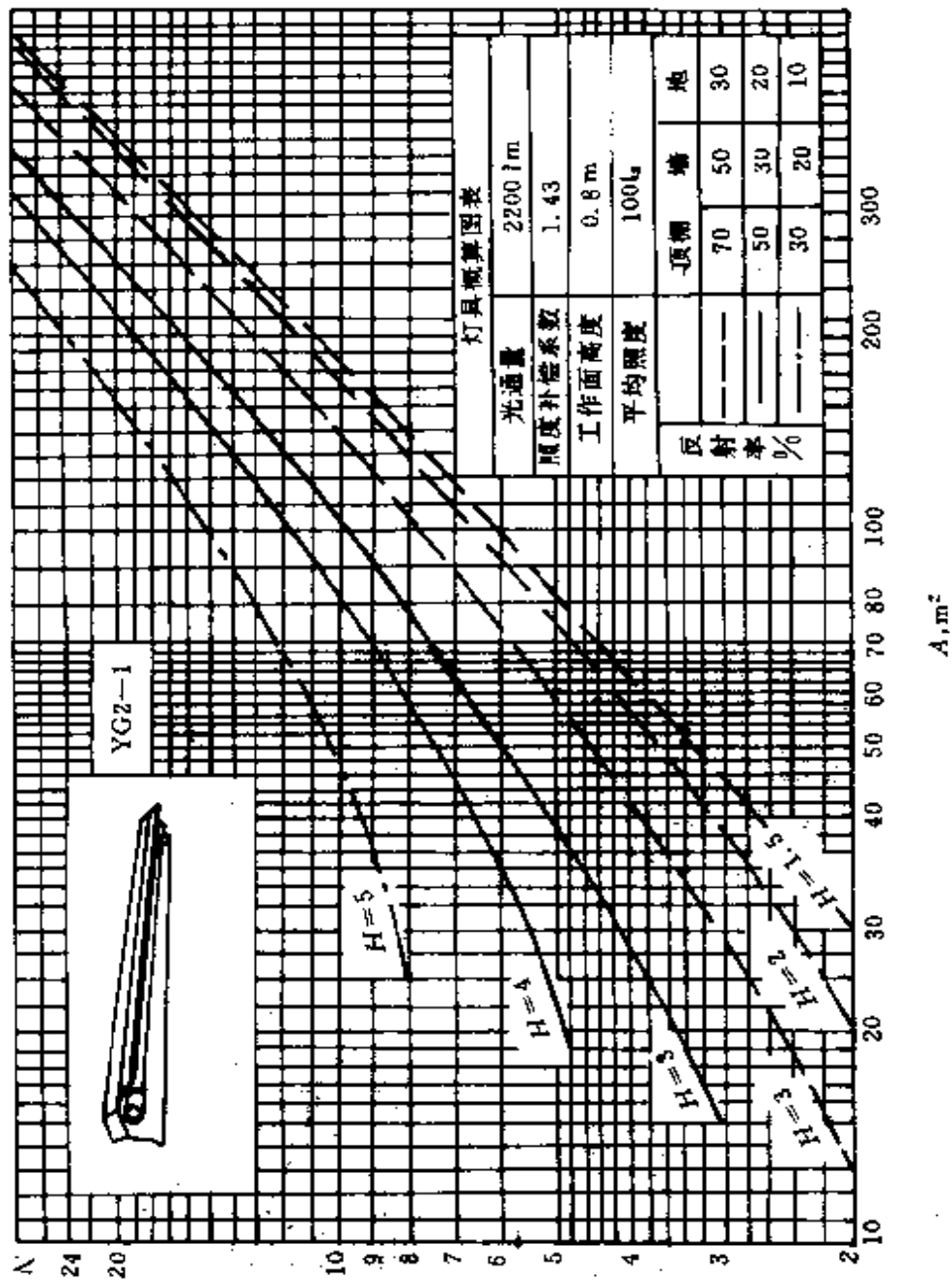


图 16-28 YG2-1 型筒式荧光灯(1×40W)概算曲线



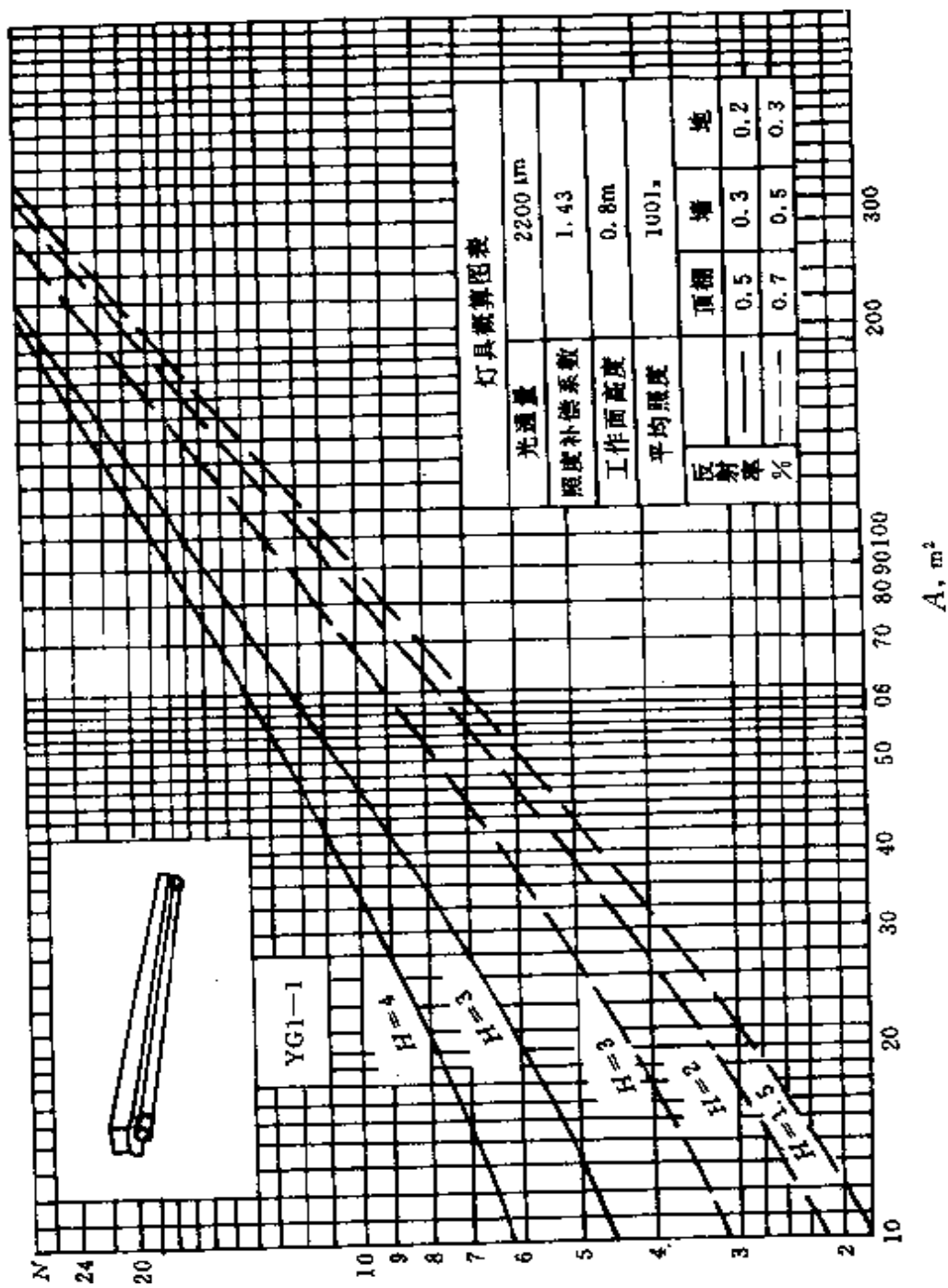


图 16 29 YG1-1 型筒式荧光灯(1×40W)概算曲线

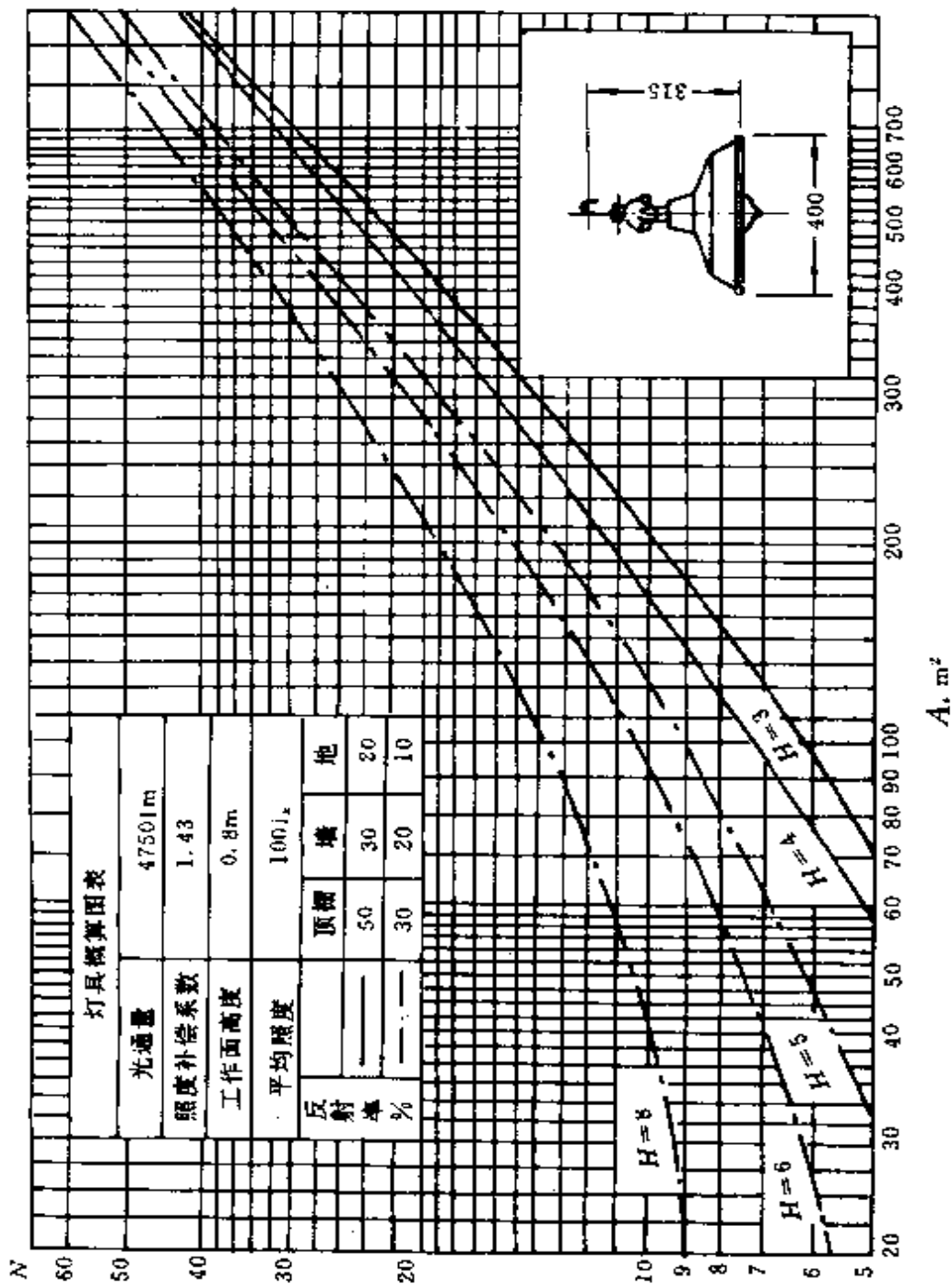


图 16—30 配照型工厂灯(125W 荧光高压汞灯)概算曲线

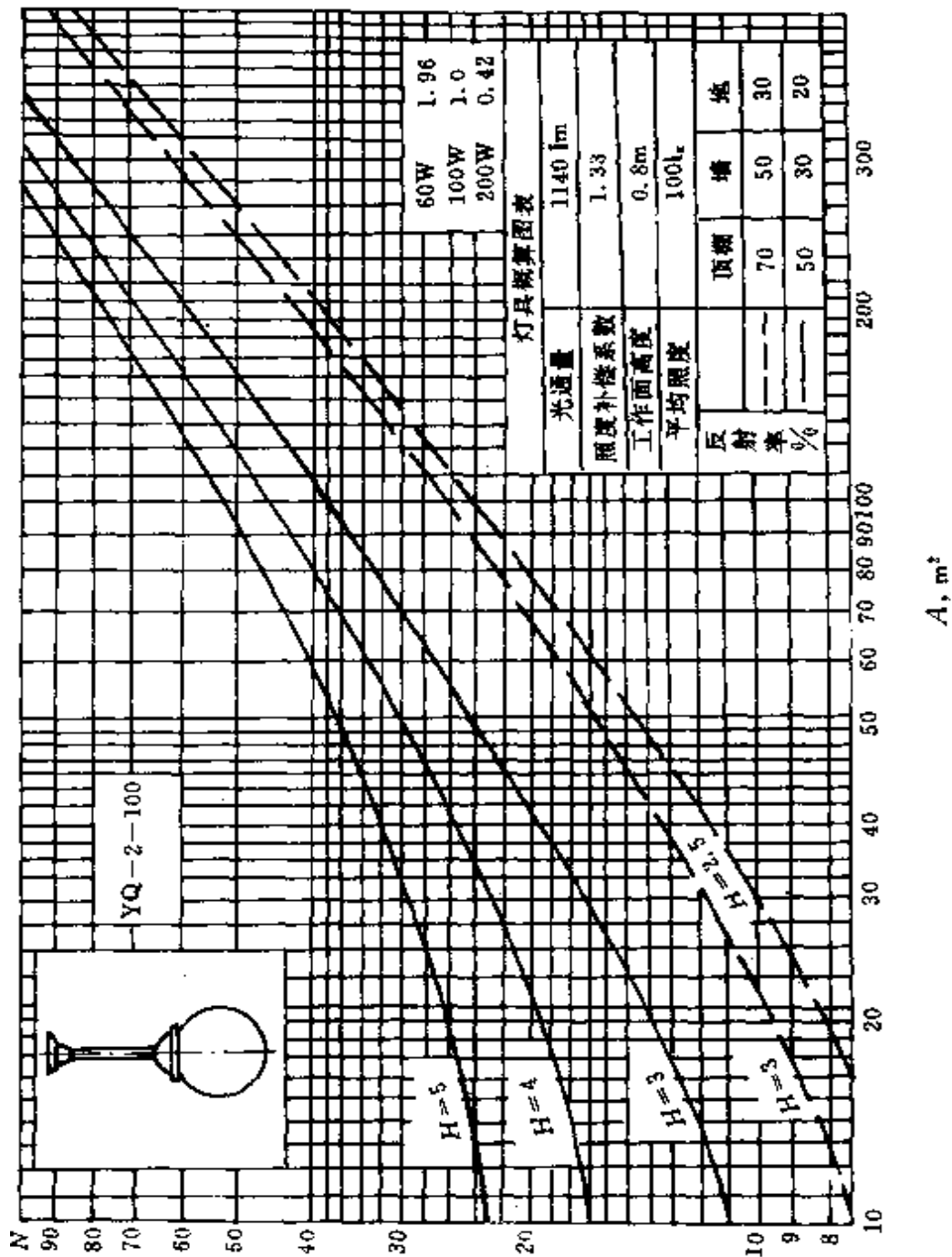


图 16—31 圆球吊灯(100W 白炽灯)概算曲线

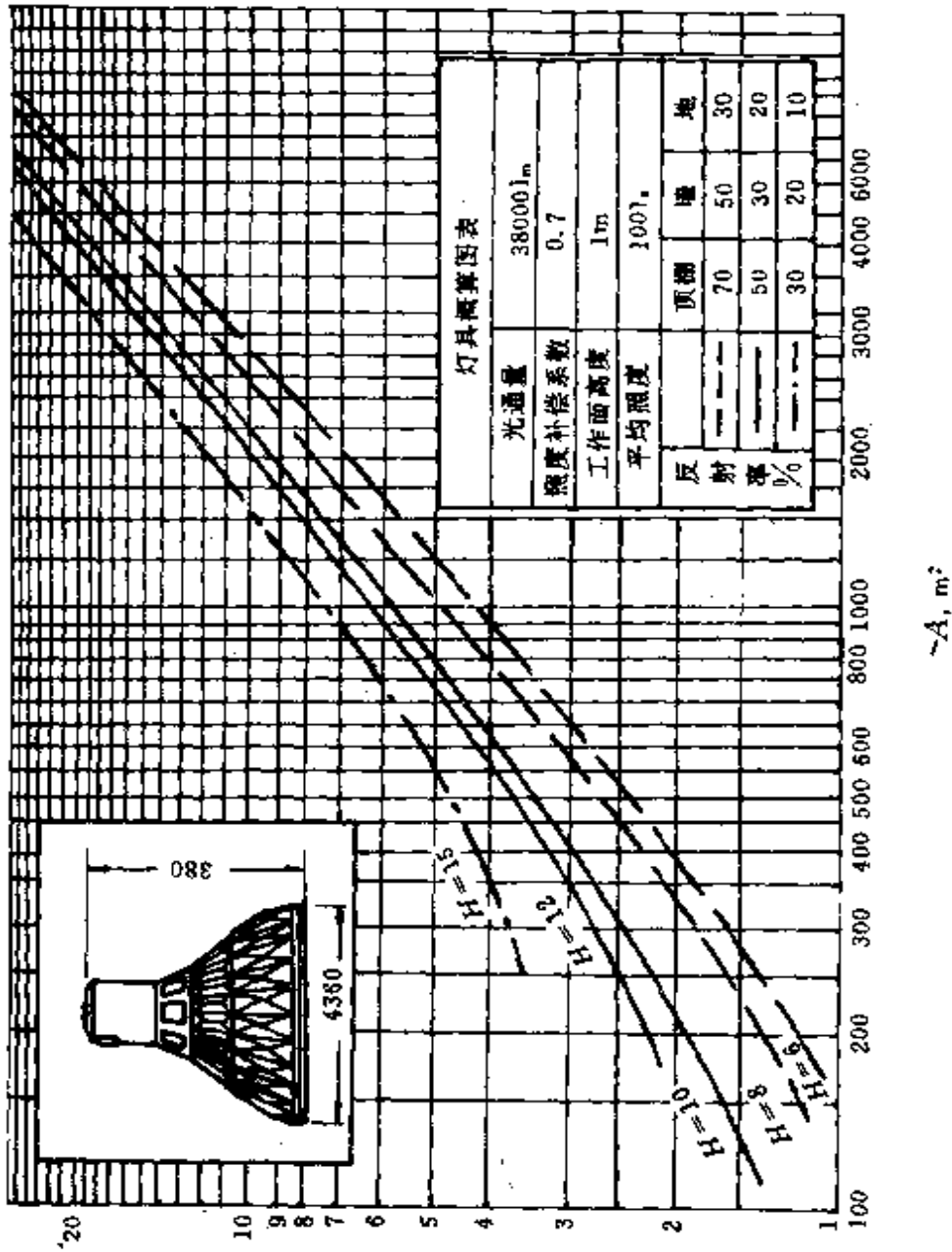


图 16-32 块板型工/灯(GC108—NG400,400W 高压钠灯)概算曲线

例 16—6 有一培训室长为 12m、宽为 6m、层高为 4m。双侧开窗,玻璃窗面积占墙面的 50%,顶棚和墙均为大白粉刷,混凝土地面。课桌的平均照度为 150lx。试用利用系数法确定布灯方案和灯具数量。

解

(1)选用灯型及考虑布灯:

房间面积  $A=12\times 6=72(\text{m}^2)$

采用 YG2—1 型 1×40W 荧光灯具,由表 16—17 查得

灯具效率  $\eta=88\%$

最大允许距高比  $L/h$  A—A 1.46

B—B 1.28

光通量  $\phi=2200\text{lm}$

灯具的轴线与窗线平行,安装两排灯,面对黑板的左行灯距墙为  $1/3L$ ,右行灯距墙为  $1/2L$ ,两行灯的间距为  $L$ ,则

$$L+1/2L+1/3L=6\text{m}$$

所以  $L=3.3\text{m}, 1/2L=1.6\text{m}, 1/3L=1.1\text{m}$

灯具悬挂距离  $h_c=0.5\text{m}$

课桌桌面高度为 0.75m

灯具计算高度  $h=4-0.5-0.75=2.75(\text{m})$

培训室属于清洁环境,查表 16—20 得照度补偿系数  $k=1.3$

(2)室空比和顶空比分别为:

$$\text{RCR}=\frac{5h(L+W)}{LW}=\frac{5\times 2.75\times (12+6)}{12\times 6}=3.4$$

$$\text{CCR}=\frac{5h_c(L+W)}{LW}=\frac{5\times 0.5\times (12+6)}{12\times 6}=0.63$$

(3)室内各表面的有效反射率:

查表 16—9 得

顶棚、墙面的反射率均为

$$\rho_c = 75\%, \rho_{w1} = 75\%$$

地面的有效反射率  $\rho_f = 20\%$

玻璃窗的反射率  $\rho_p = 9\%$

墙的总面积  $A_w = 2(L+W)H = 2 \times (12+6) \times 4 = 144$   
( $m^2$ )

玻璃窗面积  $A_p = 0.5A_w = 0.5 \times 144 = 72(m^2)$

房间面积  $A = LW = 12 \times 6 = 72(m^2)$

由  $\rho_c = 75\%$ 、 $\rho_{w1} = 75\%$ 、 $CCR = 0.63$ , 查图 16—23 曲线, 得顶棚空间有效反射率为  $\rho_{cc} = 70\%$ 。

墙平均有效反射率为

$$\rho_w = \frac{\rho_{w1}(A_w - A_p) + \rho_p A_p}{A_w}$$

$$= \frac{0.75 \times (144 - 72) + 0.09 \times 72}{144} = 39.5\%$$

(4) 确定利用系数  $\mu$ ;

根据  $RCR = 3.4$ ,  $\rho_{cc} = 70\%$ ,  $\rho_w = 39.5\%$ , 查表 16—22 中 YG2—1 荧光灯的利用系数表, 插入法得利用系数  $\mu = 0.65$

(5) 将有关数据代入下式得:

$$n = \frac{E_p A k}{\phi \mu} = \frac{150 \times 72 \times 1.3}{2200 \times 0.65} = 9.8$$

取 YG2—1 型  $1 \times 40W$  荧光灯 10 只。

⑥ 布灯方案和照度验算:

YG2—1 型灯具长度为 1280mm, 灯具布置方案如图 16—

33 所示。

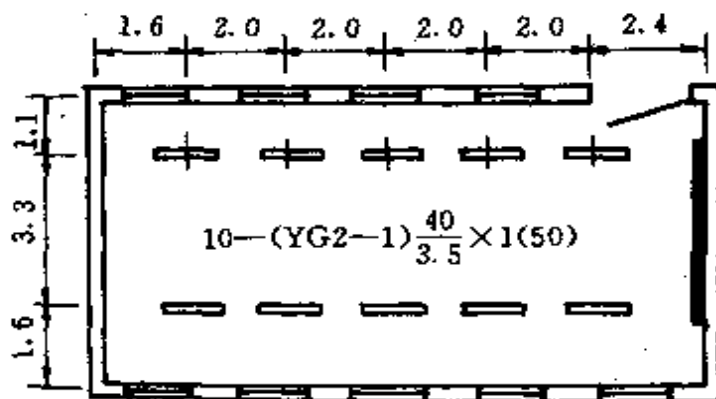


图 16—33 培训室一般均匀照明灯具布置图

图中  $10-(YG2-1) \times \frac{40}{3.5} \times (150)$  的标注意义:

灯具数—灯具型号  $\frac{\text{光源容量(W)}}{\text{安装高度(m)}}$  吊线式安装(设计照度)

黑板有局部照明,所以灯具距黑板的距离为 2.4m;距房间后墙的距离为 1.6m。灯具横向间距为 2m,纵向间距为 3.3m。

横向  $L:h=2/2.75=0.73 < 1.28$

纵向  $L:h=3.3/2.75=1.2 < 1.46$

布灯均匀合理。

照度验算

$$E_{pi} = \frac{n\phi\mu}{Ak} = \frac{10 \times 2200 \times 0.65}{72 \times 1.3} = 152.8 (\text{lx})$$

#### 四、单位容量法计算照度

灯具的单位容量值计算公式如下:

$$\omega = P/A$$

式中:  $\omega$ ——在某最低照度值下的单位容量值 ( $\text{W}/\text{m}^2$ );

$P$ ——房间内照明总安装容量(包括镇流器功耗在内) ( $\text{W}$ );

$A$ ——房间面积 ( $\text{m}^2$ )。

已知房间面积  $A$ 、计算高度  $h$  和房间的照度标准(最低照度

值 $\lambda$ ,便可由表 16—24~表 16—30 查得所采用灯具的单位容量值 $\omega$ ,再由上式求出房间的总照明安装容量 $P$ 。

若房间的照度标准为平均照度值 $E_{av}$ 时,则应由表 16—23 查出最小照度系数 $Z$ 值,再按下式求得房间的总照明安装容量 $P$ :

$$P = \frac{\omega}{Z} A$$

于是由下式算出需要安装的灯具数:

$$n = P / \omega'$$

式中: $n$ ——在规定的照度下所需的灯具数;

$\omega'$ ——每盏灯具的灯泡数 $\times$ 灯泡功率(包括镇流器功耗在内)(W)。

各种型式灯具的一般均匀照明单位容量值及一般小房间安装灯泡的容量,见表 16—24 至表 16—30。其中照度标准均为最低照度值。查表时,若碰到房间长度 $L > 2.5W$ 时( $W$ 为宽度),按 $2.5W^2$ 的房间面积来查取单位容量值 $\omega$ 。计算时仍以房间实际面积 $A$ 进行计算。

**例 16—7** 试用单位容量法计算例 16—6。

**解** 由 $A = 72\text{m}^2$ 、 $h = 2.75\text{m}$ 、 $E = 150\text{lx}$ ,查表 16—23,得 YG2—1 型荧光灯的 $Z = 1.28$ 。

查表 16—24 得单位容量 $\omega = 8.6\text{W}/\text{m}^2$ ,因此房间总照明安装容量为

$$P = \frac{\omega}{Z} A = \frac{8.6}{1.28} \times 72 = 483.75(\text{W})$$

40W 荧光灯的有功功耗为 $\omega' = 48\text{W}$ (包括镇流器),故安装灯具数为

$$n = P / \omega' = 483.75 / 48 = 10.1$$

取 10 只 40W 日光色 YG2—1 型荧光灯。

该结果与采用利用系数法所得的结果相差不大。



表 16—24 日光色荧光灯均匀照明近似单位容量值 ( $W/m^2$ )

计算高度 $h(m)$	$E(lx)$ $A(m)$	30W、40W 带灯罩						30W、40W 不带灯罩					
		30	50	75	100	150	200	30	50	75	100	150	200
		2~3	2.5 2.1 1.8 1.7 1.6 1.5	4.2 3.6 3.1 2.8 2.6 2.4	6.2 5.4 4.8 4.3 3.9 3.2	8.3 7.2 6.4 5.7 5.2 4.9	12.5 10.9 9.5 8.6 7.8 7.3	16.7 14.5 12.7 11.5 10.4 9.7	2.8 2.5 2.1 1.9 1.7 1.6	4.7 4.2 3.5 3.1 2.9 2.8	7.1 6.3 5.4 4.7 4.3 4.2	9.5 8.3 7.2 6.3 5.7 5.6	14.3 12.5 10.9 9.5 8.6 8.4
3~4	3.7 3 2.5 2.1 1.8 1.7 1.6	6.2 5 4.2 3.6 3.1 2.8 2.7	9.3 7.5 6.2 5.4 4.8 4.3 3.9	12.3 10 8.3 7.2 6.4 5.7 5.3	18.5 15 12.5 10.9 9.5 8.6 7.8	24.7 20 16.7 14.5 12.7 11.5 10.5	4.3 3.4 2.8 2.5 2.1 1.9 1.7	7.1 5.7 4.7 4.2 3.5 3.1 2.9	10.6 8.6 7.1 6.3 5.4 4.7 4.3	14.2 11.5 9.5 8.3 7.2 6.3 5.7	21.2 17.1 14.3 12.5 10.9 9.5 8.6	28.2 22.9 19 16.7 14.5 12.7 11.5	
4~6	5.5 4.0 3.3 2.6 2.3 2.0 1.8 1.6	9.2 6.7 5.5 4.4 3.9 3.4 3 2.7	13.4 9.9 8.2 6.6 5.7 5.1 4.4 4.0	18.3 13.3 11 8.8 7.7 6.9 6 5.4	27.5 19.9 16.5 13.3 11.5 10.1 9 8.0	36.6 26.5 22 17.7 15.5 13.5 11.9 11	6.3 4.6 3.8 3.1 2.6 2.3 2.0 1.8	10.5 7.6 6.4 5.1 4.4 3.9 3.4 3.0	15.7 11.4 9.5 7.6 6.6 5.7 5.1 4.5	20.9 15.2 12.7 10.1 8.8 7.7 6.9 6	31.4 22.9 19 15.2 13.3 11.5 10.1 9	41.9 30.4 25.4 20.2 17.7 15.5 13.5 12	

表 16—25 广照型灯一般均匀照明单位容量值(W/m<sup>2</sup>)

计算高度 <i>h</i> (m)	<i>E</i> (lx) <i>A</i> (m <sup>2</sup> )	白 炽 灯			白炽灯/荧光高压汞灯		
		5	10	20	30	50	75
2~3	10~15	3.3	6.2	11	15/5	22/7.3	30/10
	15~25	2.7	5	9	12/4	18/6	25/8.3
	25~50	2.3	4.3	7.5	10/3.3	15/5	21/7
	50~150	2	3.8	6.7	9/3	13/4.3	18/6
	150~300	1.8	3.4	6	8/2.7	12/4	17/5.7
	300以上	1.7	3.2	5.8	7.5/2.5	11/3.7	15/5.3
3~4	10~15	4.3	7.5	12.7	17/5.7	26/8.7	36/12
	15~20	3.7	6.4	11	14/4.7	22/7.3	31/10.3
	20~30	3.1	5.5	9.3	13/4.3	19/6.3	27/9
	30~50	2.5	4.5	7.5	10.5/3.5	15/5	22/7.3
	50~120	2.1	3.8	6.3	8.5/2.8	13/4.3	18/6
	120~300	1.8	3.3	5.5	7.5/2.5	12/4	16/5.3
	300以上	1.7	2.9	5	7/2.3	11/3.7	15/5
4~6	10~17	5.2	8.9	15	21/7	33/11	48/16
	17~25	4.1	7	12	16/5.3	27/9	37/12.3
	25~35	3.4	5.8	10	14/4.7	22/7.3	32/10.7
	35~50	3	5	8.5	12/4	19/6.3	27/9
	50~80	2.4	4.1	7	10/3.3	15/5	22/7.3
	80~150	2	3.3	5.8	8.5/2.8	12/4	17/5.7
	150~400	1.7	2.8	5	7/2.3	11/3.7	15/5
	400以上	1.5	2.5	4.5	6.3/2.1	10/3.3	14/4.7

表 16—26 配照型灯一般均匀照明单位容量值(W/m<sup>2</sup>)

计算高度 h (m)	E(lx) A(m <sup>2</sup> )	白 炽 灯			白炽灯/荧光高压汞灯		
		5	10	20	30	50	75
3~4	10~15	4.3	7.3	12.1	16.2/	25.2/8.4	35.2/11.7
	15~25	3.7	6.4	10.5	13.8/	21.8/7.3	30.8/10.3
	25~30	3.1	5.5	8.9	12.4/4.1	18.4/6.1	26.4/8.8
	30~50	2.5	4.5	7.3	10/3.3	14.5/4.8	21.5/7.2
	50~120	2.1	3.8	6.3	8.3/2.8	12.8/4.3	17.8/5.9
	120~300	1.7	3.3	5.5	7.3/2.4	11.8/3.9	15.8/5.3
	300以上	1.3	2.9	5.0	6.8/2.3	10.8/3.6	14.8/4.9
4~6	10~17	5.2	8.6	14.3	20/6.7	32/10.7	47/15.7
	17~25	4.1	6.8	11.4	15.7/5.2	26.7/8.9	36.7/12.3
	25~35	3.4	5.8	9.5	13.3/4.4	21.3/7.1	31.3/10.4
	35~50	3.0	5.0	8.3	11.4/3.8	18.4/6.1	26.4/8.8
	50~80	2.4	4.1	6.8	9.5/3.2	14.5/4.8	21.5/7.2
	80~150	2.0	3.3	5.8	8.3/2.8	11.8/3.9	16.8/5.6
	150~400	1.7	2.8	5.0	6.8/2.3	10.8/3.6	14.8/4.9
6~8	25~35	4.2	6.9	11.7	16.6/6.5	27.6/9.2	37.6/12.5
	35~50	3.4	5.7	10.0	14.7/4.9	22.7/7.6	31.7/10.5
	50~65	2.9	4.9	8.7	12.4/4.1	18.4/6.1	26.4/8.8
	65~90	2.5	4.3	7.8	10.9/3.6	15.4/5.1	22.4/7.5
	90~135	2.2	3.7	6.5	8.6/2.9	12.1/4	17.1/5.7
	135~250	1.8	3.0	5.4	7.3/2.4	11.8/3.9	15.8/5.3
	250~500	1.5	2.6	4.6	6.5/2.2	10.2/3.4	14.2/4.7
	500以上	1.4	2.4	4.0	5.5/1.8	9.8/3.1	13.8/4.6

表 16--27 搪瓷深照型灯一般均匀照明  
单位容量值(W/m<sup>2</sup>)

计算高度 h(m)	E(lx) A(m <sup>2</sup> )	白 炽 灯			白炽灯/荧光高压汞灯		
		5	10	20	30	50	75
6~8	25~35	4.2	7.2	12.8	18/6	28/9.3	40/13.3
	35~50	3.5	6	10.8	15/5	23/7.7	34/11.3
	50~65	3	5	9.1	13/4.3	20/6.7	29/9.7
	65~90	2.6	4.4	8	11.5/3.8	18/6	25/8.3
	90~135	2.2	3.8	6.8	10/3.3	15/5	21/7
	135~250	1.9	3.3	5.8	8.2/2.7	12.5/4.2	17/5.7
	250~500	1.7	2.8	5.1	7.2/2.4	11/3.7	15/5
	500 以上	1.4	2.5	4.4	6.2/2.1	9.5/3.2	13/4.3
8~12	50~70	3.7	6.3	11.5	17/5.7	27/9	40/13.3
	70~100	3	5.3	9.7	15/5	23/7.7	34/11.3
	100~130	2.5	4.4	8	12/4	19/6.3	28/9.3
	130~200	2.1	3.8	6.9	10/3.3	16/5.3	23/7.7
	200~300	1.8	3.2	5.8	8.2/2.7	13/4.3	19/6.3
	300~600	1.6	2.8	5	7/2.3	11/3.7	17/5.7
	600~1500	1.4	2.4	4.3	6/2	9.5/3.2	15/5
	1500 以上	1.2	2.2	3.8	5.2/1.7	8.5/2.8	12.5/4.2

表 16—28 乳白玻璃明月罩吊灯一般照明  
单位容量值(W/m<sup>2</sup>)

计算高度 h(m)	E(lx) A(m <sup>2</sup> )	白 炽 灯				
		10	20	30	50	75
2~3	10~15	6.3	11.2	15.4	24.8	35.3
	15~25	5.3	9.8	13.3	21.0	30.0
	25~50	4.4	8.3	11.2	17.3	24.8
	50~150	3.6	6.7	9.1	13.5	19.5
	150~300	3.0	5.6	7.7	11.3	16.5
	300以上	2.6	4.9	7.0	10.1	15.0
3~4	10~15	7.2	12.6	18.5	31.5	45.0
	15~20	6.1	10.5	15.4	27.0	37.5
	20~30	5.2	9.5	13.3	21.0	32.2
	30~50	4.4	8.1	11.2	18.0	26.3
	50~120	3.6	6.7	9.1	14.3	21.0
	120~300	2.9	5.6	7.6	11.3	17.3
	300以上	2.4	4.6	6.3	9.4	14.3

表 16—29 乳白玻璃罩天棚灯一般照明  
单位容量值(W/m<sup>2</sup>)

计算高度 h(m)	E(lx) A(m <sup>2</sup> )	白炽灯 $\rho_{cc}=70\%, \rho_w=50\%$			
		5	10	20	30
2~3	10~15	4.9	8.8	16	22
	15~25	4.1	7.5	13.6	18
	25~50	3.6	6.4	11.3	15.6
	50~150	2.9	5.1	8.8	12.4
	150~300	2.4	4.3	6.9	10.2
	300 以上	2.2	3.9	6.2	9.2
3~4	10~15	6.2	10.7	18	26
	15~20	5.1	8.7	15	22
	20~50	4.3	7.2	13	19
	30~50	3.7	6.2	11.2	16
	50~120	3	5.3	9.3	13
	120~300	2.3	4.1	7.3	10
	300 以上	2	3.5	5.9	8.5

表 16—30 一般小房间安装灯泡的容量(W)

E(lx) A(m <sup>2</sup> )	白 炽 灯					荧 光 灯	
	5	10	20	30	50	75	100
2	15	15	25	40	60	—	—
4	15	15	25	60	75	—	—
6	25	25	40	60	100	30	40
8	25	40	60	100	100	2×30	2×40
3×4	40	60	100	2×60	2×75	2×30	2×40
3×6	40	60	2×40	2×75	2×100	2(2×30)	2(2×40)
4×6	60	2×40	2×60	2×75	2×100	2(2×30)	2(2×40)
6×6	60	2×60	4×60	4×60	4×75	4(2×30)	4(2×40)
6×8	2×40	2×60	4×60	4×75	4×100	4(2×30)	4(2×40)

注：白炽灯用碗形灯罩、搪瓷平盘罩或裸灯泡等。荧光灯为裸灯管。

## 第四节 生产厂房及室外照明的设计

### 一、生产厂房照明的设计

#### 1. 照明种类及其选择

(1)正常照明:正常工作时使用的室内、外照明。正常照明可单独使用,也可与事故照明、值班照明同时使用,但控制部分应分开。

(2)事故照明:当正常照明因事故熄灭后,供部分工作(尤其是爆炸、火灾等危险工作)及安全通行的照明。事故照明应设在可能引起事故的设备、材料周围及主要通行处。事故照明一般采用白炽灯或卤钨灯。

(3)值班照明:在非生产时间内供值班人员使用的照明。对于非三班制生产的重要车间和重要仓库,应设置值班照明。值班照明可与正常照明同时使用,但控制部分应分开,也可利用事故照明的一部分作为值班照明。

(4)警卫照明:作为警卫地区所使用的照明。

(5)障碍照明:作为障碍标志用的照明。

#### 2. 照度选择

工业企业的照度可参照表 16—10~表 16—12 选用。

### 二、道路照明的设计

#### 1. 道路照明的布置原则

(1)道路照明可采用光强分布宽阔的灯具或保护角大于 $10^\circ$ 的配照型灯具。

(2)道路照明,当路面宽度小于 9m,或照度要求不高时,可采用单侧布灯方式;大于 9m,或照度要求较高时,可采用双侧布灯。一般厂区道路照明的灯杆间距以 30~40m 为宜,在与电力线路共杆时,应取较大的档距。

(3)灯具悬挂高度见表 16—31。

表 16—31 道路灯具悬挂高度要求

道路类型	主干路及交叉路口		次要道路	
	灯具	125~250W 荧光高压汞灯	400W 荧光高 压汞灯或 250 ~400W 高压 钠灯	60~100W 白 炽灯或 50~ 80W 荧光高压 汞灯
悬高(m)	≥5	≥6	4~6	4~6

(4)悬臂吊挂式灯具,其悬臂长一般为 1.5~3.5m。

(5)为了防止眩光,道路照明灯具有的采用半截光型(适合周围比较亮的街道),有的采用截光型(适合周围比较暗的街道)。

表 16—32 和表 16—33 为日本 JISC8131“道路照明器”中规定的配光型式。

表 16—32 道路灯具型式和配光的规定(眩光控制)

灯具型式	光 强(cd/1000lm)	
	与垂直线成 90°	与垂直线成 80°
截光型	10 以下	30 以下
半截光型	30 以下	120 以下

注:水平角 90°时也适用此表。



表 16—33 道路灯具型式和配光的规定(最大光强控制)

灯具型式	光 强(cd/1000lm)	
	与垂直线成 65°	与垂直线成 60°
截光型	—	200(180)以上
半截光型	190(170)以上	—

注:水平角 60°~90°范围内的任何角度都在本表值内。括弧内数字指低压钠灯及荧光灯。

## 2. 路面平均照度计算

路面平均照度可按下式简易计算:

$$E_{pj} = \frac{\phi NU}{kBD}$$

式中:  $E_{pj}$ ——路面平均照度(lx);

$\phi$ ——光源总光通量(lm);

$N$ ——灯柱的列数,单侧排列及交错排列时  $N=1$ ,对称排列时  $N=2$ ;

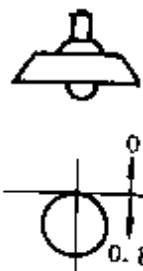
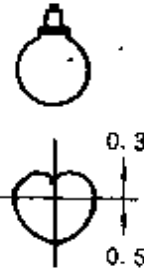
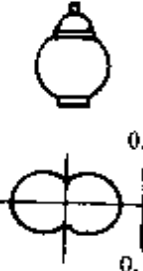
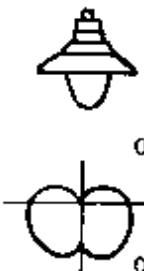
$U$ ——照明率(即从光源总光通量中投射到整个宽度路面上的光通量比例),见表 16—34;

$k$ ——照度补偿系数,通常为 1.3~2.0,对于混凝土路面取小值,沥青路面取大值;

$B$ ——路面宽度(m);

$D$ ——电杆间距(m)。

表 16—34 室外照明的照明率  $U$

灯具 配光	反射罩	球状灯泡	柱头式灯泡	悬挂式灯泡	三棱形灯泡 (非对称)
	$B/h$				
0.5	0.09	0.05	0.04	0.09	0.18
1.0	0.20	0.11	0.07	0.16	0.31
1.5	0.25	0.15	0.10	0.20	0.38
2.0	0.30	0.20	0.12	0.22	0.43
2.5	0.31	0.20	0.13	0.24	0.47
3.0	0.35	0.25	0.14	0.25	0.48
4.0	0.35	0.25	0.16	0.26	0.51
5.0	0.35	0.25	0.16	0.27	0.52
10.0	0.39	0.27	0.18	0.28	0.53
20.0	0.39	0.27	0.19	0.30	0.53

注： $B$  为道路宽度(m)。

$h$  为灯具安装高度(m)。

**例 16—8** 在宽 30m 的道路两侧按 50m 间距交错布置路灯,如图 16--34 所示。灯具悬挂高度为 7m。为了使道路上的平均照度达到 15lx,试求每一盏路灯的光通量多大? 设照度补偿系数 k 为 1.4。

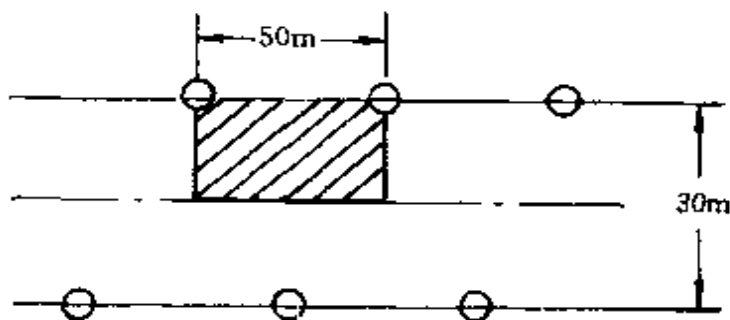


图 16—34 例 16- 8 图

**解** 图中画影线部分为每盏路灯的光照面积 A。

$$A = 50 \times 15 = 750(\text{m}^2)$$

每盏路灯的光通量为

$$\phi = \frac{E_p k B D}{N U} = \frac{15 \times 1.4 \times 30 \times 50}{2 \times 0.35} = 42000(\text{lm})$$

### 3. 工厂道路照明速查表

工厂道路宽度一般不大于 9m,一般采用单侧布灯方式。为了简化设计,将计算结果列于表 16—35。该表是按路灯单侧布置、灯具倾角为零,照度补偿系数按 1.5 计算所得。当已知路面宽度和照度要求时,即可从表中查得杆距、灯具类型、灯具悬挂高度及灯泡功率。

表 16—35 杆距、灯具悬挂高度、灯具种类、光源容量及路面照度表

杆 距(m)		30											
悬挂高度(m)		5			6			7			8		
道路宽度(m)		4	6	9	4	6	9	4	6	9	4	6	9
灯具型号及光源种类容量		路 面 照 度 (lx)											
GC1-1	100B	0.2		0.3	0.2	0.3		0.4		0.3			
	150B	0.4		0.5	0.4	0.5	0.4	0.6					
	200B	0.6	0.5	0.7	0.6	0.8	0.7	0.8					
JTY-19	300B	0.9		1.2	1.0	1.3	1.1	1.3					
	80G	0.3		0.4	0.3	0.4		0.6					
	125G	0.3		0.5	0.4	0.7	0.6	0.9					
	250G	1.9		2.8	2.3	3.2	2.7	3.6					
	400G	—		4.5	3.8	5.0	4.4	5.3					
	400K	—		7.1	5.8	8.4	7.1	8.8	8.7				
	400N	—		11.9	10.6	12	10.8	13.1					

(续表)

杆 距(m)		30											
悬挂高度(m)		5			6			7			8		
道路宽度(m)		4	6	9	4	6	9	4	6	9	4	6	9
灯具型号及光源种类容量		路 面 照 度 (lx)											
JTY—23	125G	—	0.5		—	0.7	0.6	—	0.7	0.6	—	0.8	
	250G	—	2.1	1.5	—	2.6	1.8	—	2.8	2.2	—	3.4	2.4
	400G	—		—	2.9	2.4	—	3.4	2.8	—	3.8	3.2	
JTY—26	250G	—	3.0	3.7	—	5.3	5.2	—	6.6		—	6.8	8.0
	400G	—		—	8.8	7.1	—	10.2	8.2	—	10.2	9.7	
GC—1	100B	—		0.2	—	0.2		0.2		0.2			
	150B	0.3	0.2	0.3		0.4		0.3	0.4		0.4		
	200B	0.4	0.3	0.5	0.4	0.5		0.6		0.5			
JTY—19	300B	0.6	0.5	0.7	0.6	0.9	0.7	1.0		0.9			
	80G	0.2	—	0.2		0.3	0.2	0.3		0.3			
	125G	0.2		0.3	0.2	0.4	0.3	0.5	0.4				
	250G	1.2	0.9	1.8	1.3	2.0	1.7	2.5	2.1				

(续表)

杆 距(m)		35											
悬挂高度(m)		5			6			7			8		
道路宽度(m)		4	6	9	4	6	9	4	6	9	4	6	9
灯具型号及光源种类容量		路 面 照 度 (lx)											
JTY—19	400G	—			2.7	2.2	3.3	2.8	3.9	3.4			
	400K	—			3.6	3.0	5.2	4.3	6.4	5.5			
	400N	—			7.5	5.5	8.8	7.8	9.2	8.3			
JTY—23	125G	—	0.3	0.4	—	0.4	0.3	—	0.5	0.4	—	0.6	0.5
	250G	—	1.2	1.6	—	1.5	1.4	—	1.8	1.4	—	2.1	1.6
	400G	—			—	1.8	1.7	—	2.3	1.8	—	2.6	2.2
JTY—26	250G	—	1.6	1.3	—	2.6	2.5	—	3.7	3.9	—	4.9	5.3
	400G	—			—	5.1	4.2	—	6.4	5.4	—	7.9	6.6
GC—1	100B	—			—			—			—		
	150B	0.2			0.2			0.2			0.2		
	200B	0.3			0.3			0.3			0.3		
JTY—19	200B	0.4			0.5	0.4	0.5			0.6			

(续表)

杆 距(m)		40													
悬挂高度(m)		5			6			7			8				
道路宽度(m)		4	6	9	4	6	9	4	6	9	4	6	9		
灯具型号及光源种类容量		路 面 照 度 (lx)													
JTY-19	80G	—			—			0.2		—		0.2			
	125G	—			0.2		—		0.2			0.3		0.2	
	250G	0.7			1.0		0.8		1.3			1.3			
	400G	—			1.8		1.4		2.0			2.2			
	400K	—			2.3		1.7		2.7		2.6		3.2		
	400N	—			4.4		3.2		5.4			5.9			
JTY-23	125G	—	0.2		—	0.3	0.2	—	0.3		—	0.3			
	250G	—	0.9	0.8	—	1.0	1.0	—	1.3	1.0	—	1.4	1.4		
	400G	—			—	1.2	1.0	—	1.3		—	1.4			
JTY-26	250G	—	0.8	1.0	—	1.5	1.3	—	1.8	2.4	—	2.2	2.8		
	400G	—			—	3.2	2.7	—	3.7	3.8	—	4.1	4.2		

注：①表列照度值超过国家照明标准规定部分，仅供参考；②表中光源代号说明：B—白炽灯；G—荧光高压汞灯；K—金属卤化物灯；N—高压钠灯；③JTY-23-250G为改进产品。

### 三、投光灯照明计算

在大面积的露天堆场,警卫照明或大型露天作业场所等,可采用投光灯。

投光灯所需数量可按下式计算:

$$n = \frac{E_{pj} k A}{\phi \eta \eta_1 z}$$

式中: $E_{pj}$ ——被照面要求的平均照度(lx);

$k$ ——照度补偿系数,可由表 16—20 查得;

$A$ ——照明场地面积( $m^2$ );

$\phi$ ——每盏投光灯泡的光通量(lm);

$\eta$ ——光通利用系数,照明面积大时, $\eta \approx 0.9$ ;

$\eta_1$ ——投光灯效率, $\eta_1 = 0.35 \sim 0.38$ ;

$z$ ——照明不均匀系数,等于最小照度与平均照度之比,

$$z \approx 0.75。$$

投光灯容量也可按下式估算:

$$P = m E_{pj}$$

式中: $P$ ——投光灯单位容量( $W/m^2$ );

$m$ ——投光灯系数,一般为  $0.2 \sim 0.28$ ;

$E_{pj}$ ——同前。



第五节 照明线路、设备及其它

一、照明导线截面的选择

1. 线路工作电流的计算

计算步骤如下：

(1) 按下式求出各类光源的计算容量：

$$P_{\mu} = K_x P_e$$

式中： $P_{\mu}$ —— 各类光源的计算容量(包括镇流器损耗)(kW)；

$K_x$ —— 需要系数,见表 16—36；

$P_e$ —— 光源的安装容量(kW)。

表 16—36 需要系数  $K_x$

类 别	$K_x$	类 别	$K_x$
小型厂房及小型仓库	1.0	学校、医院、托儿所、实验	
大厂房	0.95	楼、生活用房	0.8
行政办公楼	0.9	事故照明、室外照明	1.0
多数小房间组成的厂房	0.85	支线	1.0
大型仓库、配变电所	0.6		

(2) 分相计算出各种光源的有功电流和无功电流：

$$I_a = \frac{P_{\mu}}{220} \times 10^{-3}$$

$$I_r = I_a \operatorname{tg} \varphi$$

式中： $I_a$ 、 $I_r$ —— 有功电流和无功电流(A)。

(3) 求出该相线路的工作电流和功率因数:

$$I_g = \sqrt{(\Sigma I_a)^2 + (\Sigma I_r)^2}$$

$$\cos\varphi = \Sigma I_a / I_g$$

式中:  $\Sigma I_a$ ——该相线路上各种光源的有功电流之和(A);

$\Sigma I_r$ ——该相线路上各种光源的无功电流之和(A);

$\cos\varphi$ ——线路的功率因数。

取其最大一相的工作电流作为三相四线制线路的工作电流。若为三相对称负载电路,计算其中一相即可。

常用照明设备的功率因数数值见表 16—37。

表 16—37 照明用电设备的  $\cos\varphi$  及  $\text{tg}\varphi$

光源类别	$\cos\varphi$	$\text{tg}\varphi$
白炽灯、卤钨灯	1	0
荧光灯(无补偿)	0.55	1.52
荧光灯(有补偿)	0.9	0.48
高压水银灯	0.45 ~ 0.65	1.98 ~ 1.16
高压钠灯	0.45	1.98
低压钠灯	0.6	1.33
金属卤化物灯	0.4 ~ 0.61	2.29 ~ 1.29
镝灯	0.51	1.6
氙灯	0.9	0.48

## 2. 导线截面的选择

(1) 选用截面的载流量应满足下式要求:

$$I \geq I_g$$

式中： $I$ —— 选用导线的允许载流量(A)；

$I_k$ —— 线路的工作电流(A)。

(2) 根据机械强度选择导线截面,见表 16—38。

(3) 验算线路电压损失:要求线路末端电压不低于规定的允许值。

表 16—38 根据机械强度允许的最小导线截面

导线敷设方式	支持点距离 (m)	截面(mm <sup>2</sup> )	
		铜芯	铝芯
吊灯用软线		0.5	
瓷卡配线	0.8	1	2.5
瓷珠配线	1.5	1	2.5
	2.0	1.5	4
瓷瓶配线	3.0 以下	1.5	4
	6.0 以下	2.5	4
槽板配线		1	2.5
穿管配线		1	2.5
铝卡片配线	0.3 以下	1	2.5
建筑物内裸导线		2.5	6
建筑物外沿墙敷设绝缘导线	20 以下	4	10
引下线(绝缘导线)	10 以下	2.5	4
	25 以下	4	6
移动式用电设备绝缘软线	生活用	0.5	
	生产用	1	
380/220V 架空裸导线		6	16

### 3. 电压损失的校验

(1) 照明线路允许电压损失率的规定:

- ① 对视觉工作要求较高的室内照明,为 2.5%;
- ② 一般工作场所的室内照明、露天工作场所的照明,为 5%;
- ③ 道路照明、事故照明、警卫值班照明及低压照明(电压为 36 ~ 12V),为 10%;
- ④ 为了保护光源寿命,要求灯具的最高电压应不高于其额定值的 105%。

(2) 电压损失的验算:三相四线制对称负载的电压损失率可按下式计算:

$$\Delta U \% = K_i I_g L$$

式中: $K_i$ ——与负荷功率因数对应的每  $1\text{A} \cdot \text{km}$  电流负荷矩的电压损失百分数,三相四线制,查表 16—35;二相三线制为查得的  $K_i$  值乘以 1.5 倍;单相二线制为  $K_i$  乘以 2 倍;

$I_g$ ——线路的工作电流(A);

$L$ ——线路长度(m)。

例 16—9 某车间照明用电灯总功率为 15kW(单相),由距该车间 120m 的变电所供电,供电端电压为 235V,受电侧电压要求不低于 215V,试求铝导线的最小截面积为多少?

解 负荷电流为

$$I = P/U_2 = 15 \times 10^3 / 215 \approx 69.7(\text{A})$$

输电线路允许的电压降为

$$\Delta U = U_1 - U_2 = 235 - 215 = 20(\text{V})$$

因此线路电阻(不计电抗)为

$$R = \Delta U / I = 20 / 69.7 = 0.286(\Omega)$$

铝导线的电阻率  $\rho = 0.0328\Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$ , 故得输电线的最小截面为

$$S = \rho \frac{2L}{R} = 0.0328 \frac{2 \times 100}{0.286} = 22.9(\text{mm}^2)$$

可选用标准为  $25\text{mm}^2$  的铝导线。

## 二、电感式镇流器的计算

电感式镇流器的铁芯尺寸如图 16—39 所示。镇流器计算步骤如下:

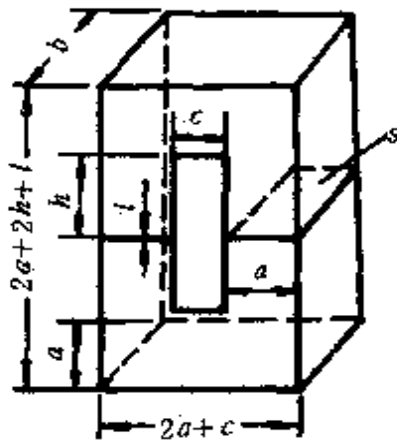


图 16—35 电感式镇流器的铁芯

### 1. 镇流器工作电压

$$U_B \approx \sqrt{\frac{U^2 - 1.5U_L^2}{K_1}}$$

式中:  $U_B$ ——镇流器工作电压(V);

$U$ ——电源电压(V);

$U_L$ ——灯管的额定工作电压(V), 见表 16—42;

$K_1$ ——荧光灯镇流器取 1.2; 汞灯镇流器取 1.0。

表 16—39 三相四线 380V 铝芯导线及电缆每 1Akm 的电压损失 %

截 面 (mm <sup>2</sup> )	铝芯导线明敷(线间距离 150(mm))										铝芯电缆或铝芯导线穿管																																																																																																																																															
	cosφ										cosφ																																																																																																																																															
	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0																																																																																																																																					
2.5	2.67	3.3	3.93	4.54	5.17	5.8	6.34	2.575	3.2	3.84	4.47	5.1	5.76	6.34	1.71	2.105	2.49	2.87	3.25	3.62	3.96	1.62	2.015	2.408	2.8	3.18	3.57	3.96	1.182	1.42	1.695	1.95	2.2	2.43	2.64	1.092	1.355	1.616	1.88	2.13	2.382	2.64	0.751	0.906	1.055	1.195	1.35	1.538	1.583	0.662	0.82	0.955	0.13	1.29	1.495	1.58	0.508	0.601	0.693	0.782	0.865	0.94	0.99	0.423	0.522	0.628	0.715	0.81	0.90	0.99	0.36	0.418	0.474	0.534	0.577	0.612	0.634	0.281	0.343	0.404	0.47	0.525	0.583	0.634	0.283	0.324	0.362	0.398	0.43	0.453	0.452	0.207	0.251	0.295	0.338	0.378	0.418	0.452	0.243	0.274	0.303	0.33	0.354	0.37	0.362	0.171	0.206	0.245	0.274	0.306	0.337	0.362	0.184	0.202	0.217	0.231	0.243	0.245	0.226	0.116	0.138	0.158	0.178	0.198	0.215	0.226	0.156	0.169	0.179	0.187	0.193	0.191	0.167	0.0916	0.107	0.125	0.137	0.150	0.161	0.167	0.14	0.15	0.155	0.16	0.163	0.158	0.132	0.0786	0.09	0.101	0.112	0.122	0.129	0.132

注:

- ① 导线工作温度为 50℃。
- ② 电压为单相 220V 时,表中数据应乘以系数 2;二相三线 380/220V 时,则应乘以系数 1.5。
- ③ 表列数值未计及气体放电灯奇次谐波电流在零线中引起的电压损失。

2. 铁芯截面

$$S = K_2 \sqrt{U_B I}$$

式中： $S$ ——铁芯截面( $\text{cm}^2$ )；

$K_2$ ——铁芯截面系数，荧光灯镇流器取  $0.5 \sim 0.6$ ；汞灯镇流器取  $0.5 \sim 0.7$ ；

$I$ ——灯管的额定工作电流(A)，见表 16—42。

3. 绕组匝数

$$W = \frac{45U_B}{B_m S}$$

式中： $B_m$ ——最大磁通密度(T)，荧光灯镇流器取  $1.10 \sim 1.55\text{T}$ ；汞灯镇流器取  $0.95 \sim 1.05\text{T}$ 。

4. 绕组导线直径  $d$

$$d = K_3 \sqrt{I}$$

式中： $d$ ——导线直径(mm)；

$K_3$ ——电流密度系数，荧光灯镇流器取  $0.54 \sim 0.58$ ；汞灯镇流器取  $0.6 \sim 0.7$ 。

5. 绕组厚度

$$c' = \frac{2W(d + 0.03)^2}{H}$$

式中： $c'$ ——绕组厚度(mm)；

$H$ ——绕组骨架高度(mm)。

6. 铁芯窗口尺寸

窗口宽度(mm)： $c = c' + 1$

窗口高度(mm)： $h = H/2 + 0.5$

7. 铁芯选厚

$$b = 1.03S/a$$

式中： $b$ ——铁芯选厚(cm)；

$a$ ——铁芯片腿宽(cm)。

8. 空气隙长度

$$\delta = \frac{IW \times 10^{-3}}{1.59B_m}$$

式中： $\delta$ ——一个空气隙的长度，即每个空气隙间塞入的调节纸片厚度(mm)。

9. 镇流器的功率损耗

$$P_d = I^2R, P_0 = V_0\gamma G$$

式中： $P_d$ ——铜耗(W)；

$P_0$ ——铁耗(W)；

$R$ ——绕组冷态电阻( $\Omega$ )；

$V_0$ ——铁芯体积( $\text{cm}^3$ )；

$\gamma$ ——硅钢片比重，约  $7.55\text{g}/\text{cm}^3$ ；

$G$ ——硅钢片比耗(W/kg)，见表 16—40。

当频率为 50Hz、厚度为 0.5mm 的 D11 的比耗如表 16—40 所示。对于其它钢号，表 16—40 中的数值尚须乘上一个系数  $k$ ，见表 16—41。

表 16—40 硅钢片的比耗(W/kg)

B(T)	0	0.01	0.02	0.03	0.04	0.05	0.06	0.07	0.08	0.09
0.50	1	1.04	1.08	1.11	1.14	1.2	1.2	1.25	1.31	1.35
0.60	1.4	1.45	1.5	1.55	1.6	1.65	1.7	1.75	1.8	1.85
0.70	1.9	1.95	2	2.05	2.1	2.15	2.15	2.15	2.2	2.25
0.80	2.3	2.35	2.4	2.45	2.5	2.55	2.6	2.65	2.7	2.75



(续表)

B(T)	0	0.01	0.02	0.03	0.04	0.05	0.06	0.07	0.08	0.09
0.90	2.8	2.85	2.9	2.95	3	3.05	3.1	3.15	3.2	3.25
1.00	3.3	3.35	3.4	3.45	3.5	3.6	3.7	3.78	3.86	3.94
1.10	4	4.05	4.1	4.2	4.3	4.4	4.5	4.6	4.7	4.8
1.20	4.9	5	5.1	5.2	5.3	5.4	5.5	5.6	5.7	5.8
1.30	5.9	6	6.1	6.2	6.3	6.4	6.5	6.6	6.7	6.8
1.40	6.9	7	7.1	7.2	7.3	7.4	7.5	7.6	7.7	7.8
1.50	7.9	8	8.1	8.2	8.3	8.4	8.5	8.6	8.7	8.8
1.60	8.9	9	9.1	9.2	9.3	9.4	9.5	9.6	9.7	9.8
1.70	9.9	10	10.1	10.3	10.4	10.5	10.6	10.7	10.76	10.88
1.80	11	11.15	11.3	11.45	11.6	11.75	11.9	12.15	12.2	12.35

表 16—40 的使用:要求  $B_m = 1.15T$  下的比耗,可先从竖列中找到 1.10,再从横行中找到 0.05,两行列交叉的数值 4.4 便是 1.15T 下的比耗。

表 16—41 系数  $k$  值

硅钢片号	D12	D13	D21	D22	D23	D31	D31	D41	D41
厚度(mm)	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.35	0.5	0.35
系数 $k$	0.85	0.8	0.76	0.71	0.66	0.61	0.49	0.49	0.41

荧光灯的主要性能及技术数据,见表 16—42。

表 16—42 荧光灯主要性能及技术数据

灯管名称	型号	光 电 参 数					尺 寸(mm)					灯头 型号	
		额定功率 (W)	工作电压 (V)	工作电流 (mA)	启动电流 (mA)	光通量 (lm)	平均寿命 (h)	$L_1$	$L$	$d$	$D_1$		$D$
直管形 日光灯 (荧光色)	YZ6RR	6	50 ± 6	140	180	160	1500	211.9	226.7	15			G <sub>5</sub>
	YZ8RR	8	60 ± 6	150	200	250	1500	288.1	302.4	15			G <sub>5</sub>
	YZ12RR	12	90 ± 5	160	200	550	1500	485.4	500	38			G <sub>5</sub>
	YZ15RR	15	51 ± 7	330	500	450	3000	437.4	451.6	38			G <sub>13</sub>
	YZ20RR	20	57 ± 7	370	550	775	3000	589.8	604	38			G <sub>13</sub>
	YZ30RR	30	81 ± 10	405	620	1295	5000	894.6	908.8	38			G <sub>13</sub>
	YZ40RR	40	103 ± 10	430	650	2200	5000	1199.4	1213.6	38			G <sub>13</sub>
	YZ65RR	65	110 ± 10	670	1800	3510	3000	1500	1514.2	38			G <sub>13</sub>
	YZ85RR	85	120 ± 10	800		4760	3000	1763.4	1778.0	38			G <sub>13</sub>
	YZ100RR	100	92 ± 11	1500		4400	2000	1199.4	1213.6	38			G <sub>13</sub>
	YZ125RR	125	140 ± 15	940		7500	3000	2374.9	2389.1	38			G <sub>13</sub>

(续表)

灯管名称	型号	光 电 参 数				尺 寸(mm)					灯头 型号	
		额定功率 (W)	工作电压 (V)	工作电流 (mA)	启动电流 (mA)	光通量 (lm)	平均寿命 (h)	$L_1$	$L$	$d$		$D_1$
日光色细 管荧光灯	YZS20RR	20	59 ± 7	360	550	1000	3000	539.8	604.0	25		G <sub>13</sub>
	YZS40RR	40	107 ± 10	420	650	1256	5000	1199.4	1213.6	25		G <sub>13</sub>
日光色快 启动荧光灯	YZK15RR	15	51 ± 7	330		450	3000	437.4	451.6	38		G <sub>13</sub>
	YZK20RR	20	51 ± 7	370		775	3000	539.8	664.0	38		G <sub>13</sub>
	YZK40RR	40	103 ± 10	430		2000	5000	1199.4	1213.6	38		G <sub>13</sub>
三光色 荧光灯	SJS40	40	103 ± 10	430	650	3000	5000	1199.4	1213.6	38		G <sub>13</sub>
U 型荧光灯 (日光色)	YU30	30	89	350	560	1550	2000	410	417	20		
	YU40	40	108	410	650	2200	2000	619	626	20		
圆环型 荧光灯 (日光色)	YH20	20	60	350	500	930	2000				145207	
	YH30	30	89	350	560	1350	2000				244308	
	YH40	40	108	410	650	2200	2000				333397	

注： $L_1$ —灯管长度； $L$ —包括两端管脚在内的管长； $d$ —灯管直径。

**例 16—10** 试计算 220V、50Hz、20W 荧光灯镇流器的基本参数。

**解** 采用如图 16—34 结构的铁芯,硅钢片采用 D12。由表 16—40 查得 20W 日光灯管的额定工作电压  $U_L$  为 57V,额定工作电流  $I$  为 370mA,最大磁通密度  $B_m$  为 1.20T,选取  $K_1$  为 1.12,铁芯截面系数  $K_2$  为 0.6,电流密度系数  $K_3$  为 0.54。

(1) 镇流器的工作电压为

$$U_B = \sqrt{\frac{U^2 - 1.5U_L^2}{K_1}} = \sqrt{\frac{220^2 - 1.5 \times 57^2}{1.12}} \\ = 197.1(\text{V}), \text{取 } 198\text{V}$$

(2) 铁芯截面为

$$S = K \sqrt{U_B I} = 0.6 \sqrt{198 \times 0.37} = 4.99(\text{cm}^2), \text{取 } 5\text{cm}^2$$

(3) 绕组匝数为

$$W = \frac{45U_B}{B_m S} = \frac{45 \times 198}{1.20 \times 5} = 1485(\text{匝})$$

(4) 绕组导线直径为

$$d = K_3 \sqrt{I} = 0.54 \sqrt{0.37} = 0.328(\text{mm})$$

选标称直径为 0.33mm 的漆包线。

(5) 绕组厚度为

$$c' = \frac{2W(d + 0.03)^2}{H} = \frac{2 \times 1485 \times (0.33 + 0.03)^2}{35} \\ = 10.9(\text{mm})$$

其中设绕组骨架高度  $H = 35\text{mm}$ 。

(6) 铁芯窗口尺寸:

窗口宽度  $c = c' + 1 = 10.9 + 1 = 11.9(\text{mm})$ ,取 12mm

窗口高度  $h = H/2 + 0.5 = 35/2 + 0.5 = 18(\text{mm})$

(7) 铁芯迭厚为

设铁芯片脚宽  $a = 1.4\text{cm}$ , 则

$$b = 1.03S/a = 1.03 \times 5/1.4 = 3.68(\text{cm}), \text{取 } 3.7\text{cm}$$

(8) 空气隙长度为

$$\delta = \frac{IW \times 10^{-3}}{1.59B_m} = \frac{0.35 \times 1470 \times 10^{-3}}{1.59 \times 1.20} = 0.27(\text{mm})$$

(9) 镇流器的功率损耗:

若绕组的冷态电阻  $R = 33\Omega$ , 则铜耗为

$$P_d = I^2R = 0.37^2 \times 33 = 4.52(\text{W})$$

铁耗  $P_0$  计算如下:

$$\begin{aligned} \text{铁芯体积 } V_0 &= 2 \times (4 \times 3.7 \times 3.2 - 1.2 \times 3.7 \times 1.8) \\ &= 78.74(\text{cm}^3) \end{aligned}$$

比重  $\gamma = 7.55\text{g/cm}^3$ , 查表 16—40 得硅钢片的比耗  $G = 4.9\text{W/kg}$ , 所以

$$P_0 = V_0\gamma G = 78.74 \times 7.55 \times 4.9 \times 10^{-3} = 2.91(\text{W})$$

$$\text{总损耗 } P_z = P_d + P_0 = 4.52 + 2.91 = 7.43(\text{W})$$

### 三、荧光灯和附件的技术参数及计算

1. 电感式镇流器的技术数据, 见表 16—43。
2. 荧光灯起辉器的电参数, 见表 16—44。
3. 各种荧光灯的耗电量, 见表 16—45。

表 16—43 荧光灯镇流器的技术数据

所配灯管的 功率(W)	工作电压 (V)	工作电流 (mA)	起动电压 (V)	起动电流 (mA)	功率损耗 (W)
6	203	140 <sub>-5</sub>	215	180 ± 10	≤ 4
8	200	150 <sub>-10</sub>	215	190 ± 10	≤ 4
15	202	330 <sub>-30</sub>	215	440 ± 30	≤ 8
20	196	350 <sub>-30</sub>	215	460 ± 30	≤ 8

(续表)

所配灯管的 功率(W)	工作电压 (V)	工作电流 (mA)	起动电压 (V)	起动电流 (mA)	功率损耗 (W)
30	180	360-30	215	560 ± 30	≤ 8
40	165	410-30	215	650 ± 30	≤ 8
100	185	1500-100	215	1800 ± 100	≤ 20

规格 (220V)	线径 (mm)	匝数	铁心截面 (cm <sup>2</sup> )	铁心间隙 (mm)
6(W)	0.19 ~ 0.2	2200 ~ 2400	1.5 × 1.7	0.08 ~ 0.09
8(W)	0.19 ~ 0.2	2400; 3200 ~ 3460	1.4 × 1.4; 1.5 × 1.7	0.05 ~ 0.1
15(W)	0.31 ~ 0.33	1680 ~ 1780	1.7 × 2.4	0.05 ~ 0.08
20(W)	0.31 ~ 0.33	1650 ~ 1720	1.7 × 2.4	0.08 ~ 0.12
50(W)	0.34 ~ 0.35	1420 ~ 1500	1.7 × 2.4	0.23
40(W)	0.34 ~ 0.35	1230 ~ 1290	2.0 × 2.4	0.4 ~ 0.5

表 16-44 荧光灯起辉器的电参数

类 别 (W)	电源电压 (V)	欠 压 启 动		起辉电压 (V)
		电压(V)	时间(s)	
4 ~ 8	220	198	< 5	≥ 75
15 ~ 20			< 4	≥ 75
30 ~ 40			< 4	≥ 130
100			< 5	≥ 130

表 16—45 各种荧光灯的耗电量

灯管的自身耗电 (W)	配用的镇流器耗电 (W)	总耗电量 (W)	规格直径 (mm)
4	4	8	16
6	4	10	16
8	4	12	16
10	5	15	25
12	5	17	18
15	7.5	22.5	38
20	8	28	38
30	8	38	38
40	8	48	38
110	20	130	38

#### 4. 荧光灯电容器的选用

由于电感式荧光灯有一个电感元件——镇流器，因此功率因数很低，一般只有 0.5 ~ 0.6。为了提高功率因数，可在电源侧并联电容器加以补偿，其电容量可按下式计算：

$$C = \frac{3183I \sin\varphi}{U}$$

式中：C——补偿电容器电容量(μF)；

I——灯管的额定工作电流(A)；

sinφ——补偿前功率因数角的正弦值；

$$\sin\varphi = \sqrt{1 - \cos^2\varphi}$$

U——电源电压(V)。

电容器的耐压值应大于工作电压。由于电容器上标的耐压

值是指最大值,因此电容器的耐压应大于  $\sqrt{2}U = \sqrt{2} \times 220 = 380(\text{V})$ 。

荧光灯选配电容量参表 16—46。

表 16—46 荧光灯选配电容量表

电源电压(V)	荧光灯功率(W)	选配电容量( $\mu\text{F}$ )
220	15	2.5
220	20	2.5
220	30	3.75
220	40	4.75

#### 四、感容式镇流器和自耦漏抗变压镇流器的设计

##### 1. 感容式镇流器的设计

感容式镇流器具有产生脉冲高电势,使灯管易于启辉、功耗小,并具有接近恒电流的特性(即对电源电压的变动不很敏感)等优点,其原理电路见图 16—36。图 16—36(b) 为改善启动特性,增加了附加电感  $L'$ ,一般取  $L' = 0.7L$ 。

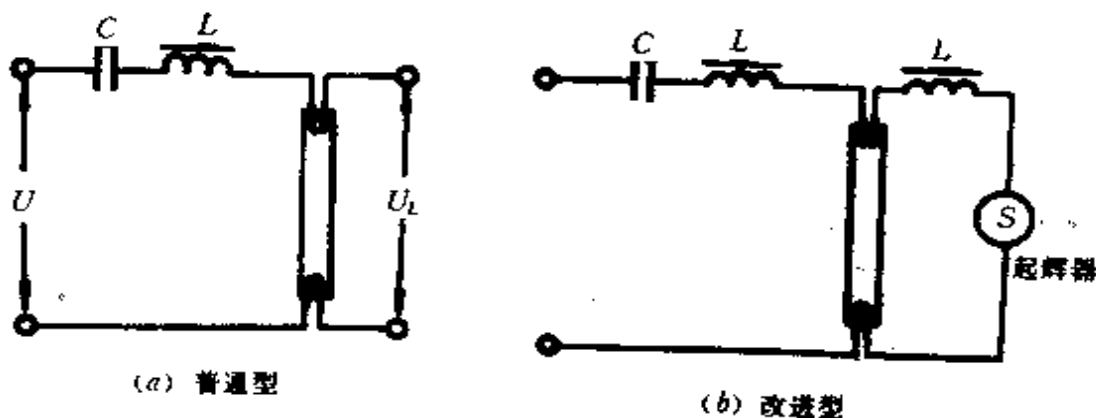


图 16—36 感容式镇流器基本电路



感容式镇流器的设计,主要是确定电感量  $L$  和电容量  $C$  的大小。计算步骤如下:

(1) 确定比例系数  $m$  和  $K$ :

$$\text{电压比 } m = U_L/U$$

$$\text{电抗比 } K = \frac{X_C}{X_L} = \frac{1}{4\pi^2 f^2 LC}$$

式中:  $U_L$ ——灯管的额定工作电压(V);

$U$  —— 电源电压(V);

$X_C$ ——容抗( $\Omega$ );

$X_L$ ——感抗( $\Omega$ );

$f$ ——电源频率,市电为  $f = 50\text{Hz}$ ;

$L, C$ ——电感和电容(H, F)。

当  $m < 0.5$ 、 $K < 3$  时,灯电流基本上是正弦波,符合要求;而  $K > 3$  时,电流将变为不对称,不符合要求。

(2) 电容电感的选取:一般要求容抗大于感抗。

**例 16—11** 试设计 15W 环形荧光灯的感容式镇流器参数。

**解** 15W 环形荧光灯管的额定工作电压  $U_L = 51\text{V}$ , 工作电流  $I = 0.3\text{A}$ , 则

$$\text{电压比 } m = U_L/U = 51/220 = 0.23$$

经试验选择  $C = 3\mu\text{F}/400\text{V}$ ,  $L = 1\text{H}$ , 可得到满意的效果。

校对电抗比

$$K = \frac{1}{4\pi^2 f^2 LC} = \frac{10^6}{4\pi^2 \times 50^2 \times 1 \times 3} = 3.01, \text{符合要求。}$$

(3) 铁芯截面计算:感容式镇流器结构有芯式和壳式两种,图 16—37 为芯式结构。

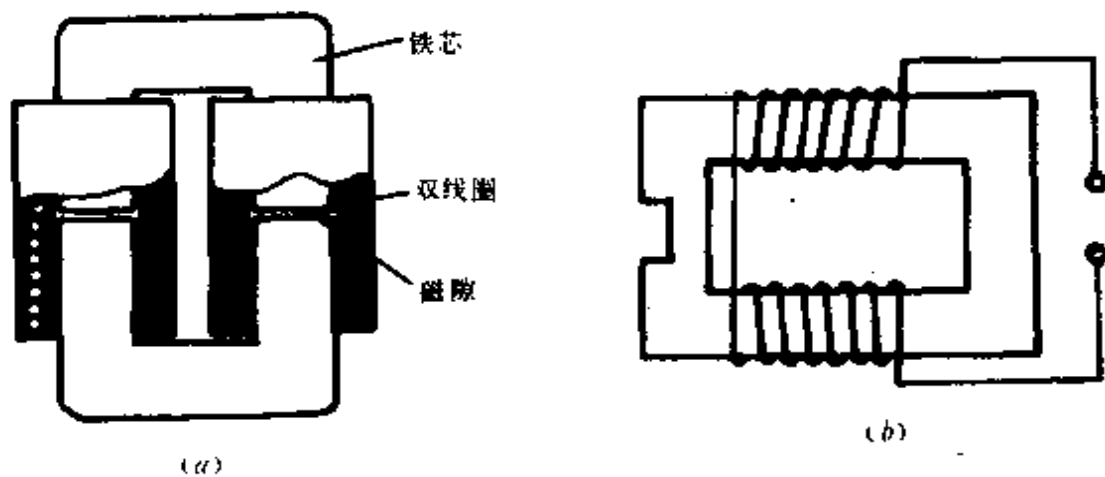


图 16—37 感容式镇流器结构  
(a) 芯式结构 (b) 改进启动特性的铁芯

由于感容式镇流器的功耗只有电感式镇流器的一半,故可按下式选取铁芯截面:

$$S = K \sqrt{0.5P}$$

式中:  $S$ ——铁芯截面( $\text{cm}^2$ );

$K$ ——铁芯系数,对于 Z10—0.35 冷轧硅钢片取 0.5;对于 D43—0.35 热轧硅钢片取 0.75;

$P$ ——灯管功率(W)。

如上例,  $S = 0.5 \sqrt{0.5 \times 15} = 1.36(\text{cm}^2)$ 。

选取铁芯规格  $\text{CD}10 \times 12.5 \times 25$ ,采用两只匝数相等的双绕组插入 U 型铁芯内,铁芯空气隙中垫有调节纸片,以便调节工作电流。

为改进镇流器的启动特性,可将铁芯开一小槽,如图 16—37(b) 所示。

## 2. 自耦漏抗变压镇流器的计算

当灯管电压较高及电源波动较大的场合,适用于漏抗变压

镇流器。

自耦漏抗镇流器与普通漏抗镇流器相比,有许多优点,其中最主要的优点是节省材料 15 ~ 30%,一般适用于电压比小于 3 的场合,其结构电路如图 16—38 所示。

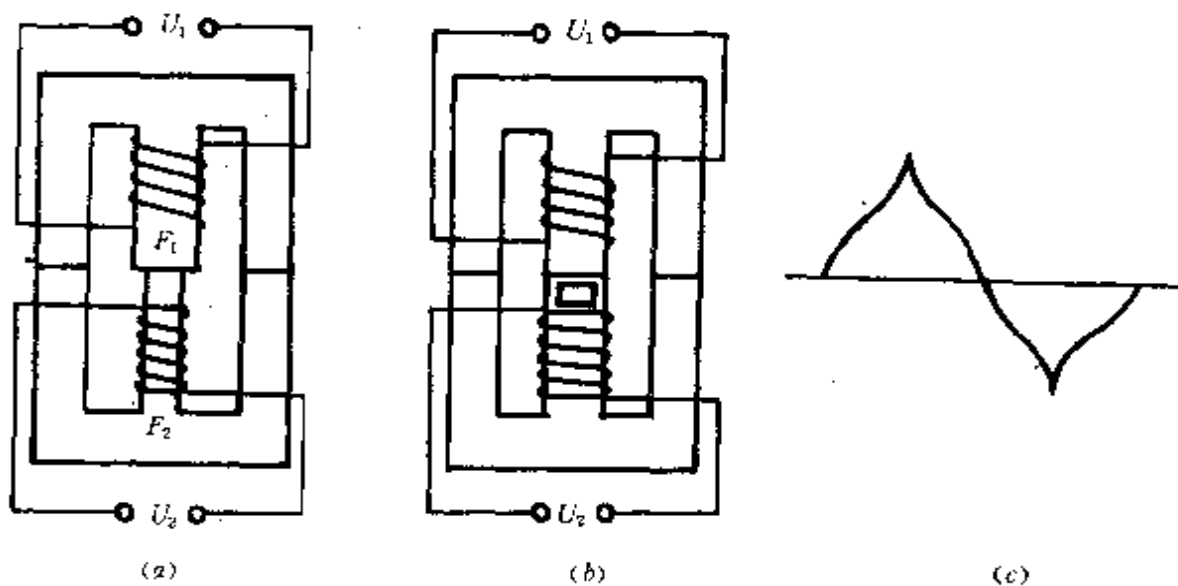


图 16—38 自耦漏抗变压器镇流器  
(a) 方案一 (b) 方案二 (c) 二次电压波形

图 16—38(a) 的特点是:受电源波动影响小,能延长灯泡寿命,变压器次级设计的铁芯磁化曲线浅饱和区,初级设计在线性区;图 16—38(b) 的特点是:启动快速,为此在漏抗变压镇流器次级铁芯上开个窄链。开槽后电压峰—峰值高,而有效值不大,所以铁芯截面可适当减小。

计算步骤如下:

(1) 确定自耦漏磁变压器的功率:

$$P_s = U_{20} I_2$$

式中:  $P_s$ ——漏磁变压器的功率(W);

$U_{20}$ ——灯管启动电压(V);

$I_2$ ——灯管工作电流(A)。

(2) 折算到普通变压器的标准功率  $P_m$  (对自耦升压镇流器)：

$$P_m = 1.1P_s(1 - 1/n)$$

式中： $n$ ——自耦漏磁镇流器变压系数，取  $n = 1.86$ 。

(3) 初级电流  $I_1$ ：

$$I_1 = P_m/U_1$$

式中： $U_1$ ——电源电压(V)。

(4) 初级绕组匝数  $W_1$

$$W_1 = \frac{U_1 \times 10^4}{4.44fBS}$$

式中： $f$ ——电源频率(Hz)；

$B$ ——磁通密度(T)；

$S$ ——铁芯截面( $\text{cm}^2$ )。

(5) 次级绕组  $W_2$

$$W_2 = W_1 \frac{U_{20}}{U_1}$$

注意：作为漏抗变压器，铁芯窗口长度要比标准铁芯尺寸放大一倍。

## 第十七章 小型发电

### 第一节 小水电站计算

#### 一、水力发电的一般公式

##### 1. 水电站的保证出力

$$P = 9.81QH\eta = AQH$$

式中： $P$ ——保证出力(kW)；

$Q$ ——通过水电站的流量(m<sup>3</sup>/s)；

$H$ ——作用于水电站的水头(设计水头)(m)；

$A$ ——水电站的出力系数， $A = 9.81\eta$ ，大中型水电站取 8.0 ~ 8.5；小型水电站当单机容量大于 500kW 以上的时取 8.0；小于 500kW，按表 17—1 选取；

$\eta$ ——电站机组效率，

$$\eta = \eta_f \eta_s；$$

$\eta_f$ ——发电机效率；

$\eta_s$ ——水轮机效率。

表 17—1 出力系数  $A$  值

水轮机与发电机间传动方式	系 数 $A$
同轴连接	7.0 ~ 8.0
皮带传动	6.5 ~ 7.5
齿轮传动	6.3
两次传动	6.0

## 2. 调节池容量

$$V = 3600(Q_2 - Q_1)T$$

$$= \frac{3600A}{9.81H\eta} = \frac{3600(P_2 - P_1)}{9.81H\eta}$$

式中:  $V$ ——调节池容量( $m^3$ );

$Q_2$ ——高峰负荷时的流量( $m^3/s$ );

$Q_1$ ——平均负荷时的流量( $m^3/s$ );

$T$ ——高峰负荷持续时间(h);

$A$ ——用调节池的有效贮水量发出的电量(kWh);

$P_2$ ——高峰负荷时的输出功率(kW);

$P_1$ ——平均负荷时的输出功率(kW);

其它符号同前。

## 3. 扬水发电站计算

(1) 扬水泵用电动机所需功率:

$$P = \frac{9.81QH_{ux}}{\eta}$$

式中:  $P$ ——电动机功率(kW);

$Q$ ——扬水量( $m^3/s$ );

$H_{ux}$ ——有效扬程(m),

$$H_{ux} = H + h;$$

$H$ ——实际落差(m);

$h$ ——损失水头(m);

$\eta$ ——综合效率,

$$\eta = \eta_p \eta_m;$$

$\eta_p$ ——扬水泵效率;

$\eta_m$ ——扬水电动机效率。

(2) 扬水电能:

$$A = \frac{9.81VH_{ux}}{3600\eta}$$

式中： $A$ ——扬水电能(kWh)；

$V$ ——总扬水量( $m^3$ )；

其它符号同前。

#### 4. 压力水管内径

$$d = \sqrt{\frac{4Q}{\pi v}}$$

式中： $d$ ——水管内径(m)；

$Q$ ——流量( $m^3/s$ )；

$v$ ——流速(m/s)。

#### 5. 压力水管厚度

$$t = \frac{P_{\max} dk}{2\sigma_m \eta}$$

式中： $t$ ——水管厚度(m)；

$P_{\max}$ ——最大设计水压( $N/m^2$ )；

$d$ ——水管内径(m)；

$k$ ——安全系数；

$\sigma_m$ ——管壁最大抗拉强度( $N/m^2$ )；

$\eta$ ——联轴节效率。

#### 6. 有关水轮机的计算

(1) 比转速：

$$n_s = n_e \frac{P^{1/2}}{H^{3/4}}$$

式中： $n_s$ ——水轮机比转速( $m \cdot kW$ )；

$n_e$ ——水轮机额定转速(r/min)；

$H$ ——有效水头(m)；

$P$ ——最大输出功率(kW)，为每一叶轮或每一叶喷嘴的输出功率，但对于复流式则取每一叶轮输出功率的1/2。

(2) 转速变化率:

$$\Delta n \% = \frac{n_m - n_1}{n_e} \times 100$$

式中:  $n_m$  —— 负载减少时的最大转速, 负载增加时的最小转速 (r/min);

$n_1$  —— 某输出功率时的转速 (r/min), 无特别指出时,  $n_1 = n_e$ ;

$n_e$  —— 额定转速 (r/min)。

(3) 速度变化率:

$$\varepsilon \% = \frac{45600P(2\tau + t)}{Jn_e^2}$$

式中:  $P$  —— 水轮机的满负荷功率 (kW);

$\tau$  —— 调速器不动时间 (s);

$t$  —— 关闭时间 (s);

$J$  —— 惯性矩,

$$J = GD^2/4;$$

$GD^2$  —— 飞轮转矩 ( $t \cdot m^2$ )。

(4) 单位惯量常数:

$$M = \frac{10.96Jn_0^2 \times 10^{-6}}{S_f}$$

式中:  $M$  —— 单位惯量常数 (kW s/kVA);

$J$  —— 惯性矩 ( $t \cdot m^2$ );

$n_0$  —— 满负荷时的转速 (r/min);

$S_f$  —— 发电机容量 (kVA)。

(5) 调速率:

$$\delta \% = \frac{(n_2 - n_1)/n_e}{(P_1 - P_2)/P_e} \times 100$$

式中:  $n_1$  —— 负荷  $P_1$  (kW) 时的转速 (r/min);

$n_2$  —— 负荷  $P_2$  (kW) 时的转速 (r/min);



$n_e$ —— 额定输出  $P_e$ (kW) 时的额定转速

一般取  $n_1 = n_e, P_1 = P_e$ 。

## 二、小型水电站流量水头和发电量的计算

### 1. 设计流量的计算

当缺乏水文资料的小型水电站,可采用以下各方法计算设计流量(即一年中有 7 ~ 9 个月均能保证的流量)。

(1) 利用已有的水碾、水磨、水轮泵站和小水电站估算流量;

(2) 利用石河堰溢水部分宽顶堰估算流量

$$Q = MbH_z^{3/2}$$

式中: $Q$ —— 设计流量( $m^3/s$ );

$b$ —— 溢流堰顶宽度(m);

$M$ —— 流量系数;

$H_z$ —— 堰上总水头(m),  $H_z = H_s + \frac{\alpha_0 v_0^2}{2g}$  (一般流速水头

$\frac{\alpha_0 v_0^2}{2g}$  很小,可忽略不计);  $H_s$  为堰上水头(m)。

(3) 利用梯形量水堰测流量

$$Q = 1.86\delta_y B H_s^{3/2}$$

式中: $\delta_y$ —— 淹没系数,当下游水位低于堰底时取 1,高于堰底时取小于 1;

$B$ —— 堰口底宽(m),一般  $B > 3H$ 。

(4) 利用浮标法测流量:

$$Q = \kappa v F$$

式中: $\kappa$  —— 由表面速度换算为横断面中的平均速度时所用的系数,见水力学专著;

$v$ —— 由浮标测得的表面两最大流速之平均值(m/s);

$F$ ——河道过水断面面积( $m^2$ )。

(5) 利用流速仪测流量:

$$Q = v \Sigma F_i$$

$$v = \frac{\Sigma v_i}{\Sigma_i}$$

式中: $W_i$ ——将河流断面分成几部分,各部分的面积( $m^2$ );

$v$ ——平均流速( $m/s$ );

$v_i$ ——由流速仪测得的各部分流速( $m/s$ )。

(6) 利用水文站资料推算流量:

$$Q = \frac{MA}{1000} \text{ 或 } Q = \frac{I_0 A \alpha_0}{31600}$$

式中: $M$ ——年平均径流模数( $I/s/km^2$ );

$A$ ——集水面积( $km^2$ );

$I_0$ ——多年平均降雨量( $mm$ );

$\alpha_0$ ——年径流系数,对丘陵山区可取  $0.5 \sim 0.7$ 。

## 2. 设计水头的计算

对于引水式水电站

$$H = \nabla_s - \nabla_x - (h_y + h_k + h_i)$$

对于堤坝式水电站

$$H = \frac{1}{2}(H_{\max} + H_{\min}) - (h_y + h_k + h_i)$$

$$h_y = \frac{\lambda}{d} \cdot \frac{v^2}{2g}, h_k = f \frac{v^2}{2g}, h_i = f_{s0} \frac{v^2}{2g}$$

式中: $H$ ——设计水头( $m$ );

$\nabla_s$ ——上游前池水位( $m$ );

$\nabla_x$ ——下游水位( $m$ );

$H_{\max}$ ——最大毛水头( $m$ );

$H_{\min}$ ——最小毛水头( $m$ );

$h_y$ ——压力管道的沿程水头损失( $m$ );

- $h_k$  —— 压力管道进水口损失(m);
- $h_j$  —— 压力管道局部水头损失(弯道损失)(m);
- $l$  —— 管道长(m);
- $d$  —— 管道内径(m);
- $\lambda$  —— 沿程阻力系数;
- $f$  —— 取 0.1 ~ 0.2;
- $f_{b0}$  —— 弯道阻力系数。

采用冲击式水轮机的设计水头为压力前池正常蓄水位与水轮机喷嘴中心高程之差,再减去输水管道损失。

### 3. 年发电量的计算

#### (1) 方法一:

$$W = \left[ \frac{1}{2}(P_m + P_n) \times 270 + P_m \times 95 \right] \times 24$$

$$P_m = 9.81Q_m H \eta, P_n = 9.81Q_n H \eta$$

式中: $E$ ——年发电量(kWh);

$P_m$ ——水电站最大出力(kW);

$P_n$ ——水电站最小出力(kW);

$Q_m$ ——最大可用流量,即丰水量,是一年中持续 95 天的流量( $m^3/s$ );

$Q_n$ ——最小可用流量,即枯水量,是一年中持续 355 天的流量( $m^3/s$ )。

#### (2) 方法二:

$$W = 9.81Q_p H \eta \times 365 \times 24$$

**例 17—1** 某河上一径流式电站的流量曲线如图 17—1 所示。小于丰水量的流量  $Q(m^3/s)$  与天数  $n$  的关系可由图中的函数式表示。该电站最大耗水量等于丰水量,有效水头为 100m,水轮机、发电机组总效率为 88%,假设总效率为定值,与水轮机的过流量无关。试求该电站的(1)最大出力;(2)枯水期间的最小

出力;(3)年发电量。

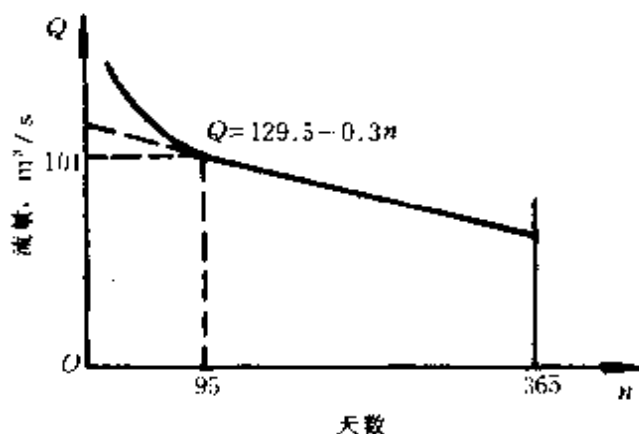


图 17—1 某水电站的流量曲线

解

(1) 最大可用水量

$$Q_m = 129.5 - 0.3n = 129.5 - 0.3 \times 95 = 101(\text{m}^3/\text{s})$$

最大出力为

$$P_m = 9.81Q_m H \eta = 9.81 \times 101 \times 100 \times 0.88 \\ = 87191(\text{kW})$$

(2) 枯水期流量为

$$Q_n = 129.5 - 0.3n = 129.5 - 0.3 \times 355 = 23(\text{m}^3/\text{s})$$

枯水期的出力为

$$P_n = 9.81Q_n H \eta = 9.81 \times 23 \times 100 \times 0.88 = 19855(\text{kW})$$

(3) 全年最小流量为

$$Q_{\min} = 129.5 - 0.3n = 129.5 - 0.3 \times 365 = 20(\text{m}^3/\text{s})$$

全年最小出力为

$$P_{\min} = 9.81Q_{\min} H \eta = 9.81 \times 20 \times 100 \times 0.88 \\ = 17266(\text{kW})$$

因此在第 95 天至 365 天时间内的平均出力为

$$P_p = (P_m + P_{\min})/2 = (87191 + 17266)/2 = 52229(\text{kW})$$

全年可能发电量为

$$W = (52229 \times 270 + 87191 \times 95) \times 24$$

$$= 537236160(\text{kWh})$$

#### 4. 水电站特征水头计算

(1) 水电站特征水头:包括电能加权平均水头,最大水头和最小水头。它们是选择水轮发电机组的重要依据。

① 电能加权平均水头:若已知水库调节后的多年各月平均出力  $P_i$  及相应水头  $H_i$ ,则加权平均水头为

$$H_p = \frac{\sum_{i=1}^n P_i H_i}{\sum_{i=1}^n P_i}$$

② 最大水头:一般出现在洪水期开始,为设计蓄水位与电站按保证出力进行日调节所出现的下游最低尾水位之差。

③ 最小水头:一般出现在洪水期末,为死水位与电站发预想出力时相应下游尾水位之差。

低水头电站最小水头可能出现在洪水期。此时应选某一频率洪水作为计算最小水头的标准(如1%洪水),而以水库宣泄该频率洪水时所出现的上下游最小水位差为电站最小水头。

(2) 水头变化对水轮机转速、流量及出力的影响:

① 水头变化与流量的关系:

$$\frac{Q'}{Q} = \left( \frac{H'}{H} \right)^{\frac{1}{2}}$$

② 水头变化与转速的关系:

$$\frac{n'}{n} = \left( \frac{H'}{H} \right)^{\frac{1}{2}}$$

③ 水头变化与出力的关系:

$$\frac{P'}{P} = \left( \frac{H'}{H} \right)^{\frac{3}{2}}$$

由于  $Q = Sv$ , 而  $v = c_1 \sqrt{2gH}$

故  $Q = Sc_1 \sqrt{2gH} = K_1 \sqrt{H}$

又, 轮缘切线速度  $u = C_2 v = \pi Dn/60$

故转速  $n = C_1 C_2 \sqrt{2gH} \cdot \frac{60}{\pi D} = K_2 \sqrt{H}$

出力  $P = 9.81QH\eta$

$$= 9.81K_1 \sqrt{H} \cdot H\eta = K_3 H^{\frac{3}{2}}$$

式中:  $n, H, Q, P$ ——分别为变化前的转速、水头、流量和出力  
(r/min, m, m<sup>3</sup>/s, kW);

$n', H', Q', P'$ ——分别为变化后的转速、水头、流量和  
出力, 单位同上;

$S, v$ ——水轮机进水口断面和流速 (m<sup>2</sup>, m/s);

$D, u$ ——转轮直径和轮缘切线速度 (m, m/s);

$C_1, C_2$ ——系数;

$g$ ——重力加速度 (m/s<sup>2</sup>)

**例 17—2** 某地拟修建径流式水电站的河流, 已知集水面积  $S$  为 200km<sup>2</sup>, 年降雨量  $B$  为 1300mm, 蒸发、渗透等损失量为 35%。假设引水口水位标高为 670m, 尾水位标高为 540m, 水头损失是总落差的 5%, 电站的总效率为 80%。试求取该电站在最大可用水量为年平均流量的 2 倍, 枯水量为年平均流量的 1/4 的情况下的最大及最小出力。

**解** 设径流系数  $C$  为 0.7, 则河流的年平均流量为

$$Q_p = \frac{SBC}{31536} = \frac{200 \times 1300 \times 0.7}{31536} \approx 5.77 (\text{m}^3/\text{s})$$

按题意, 最大可用流量为

$$Q_m = 2Q_p = 2 \times 5.77 = 11.54 (\text{m}^3/\text{s})$$

总落差  $H_0 = 670 - 540 = 130 (\text{m})$

有效水头  $H = H_0 - h_H = 130(1 - 0.05)$

$$= 123.5 (\text{m})$$

所以最大出力为

$$P_n = 9.81Q_n H \eta = 9.81 \times 11.54 \times 123.5 \times 0.8$$

$$= 11185(\text{kW})$$

最小可用流量  $Q_n = Q_p/4 = 5.77/4 = 1.44(\text{m}^3/\text{s})$  所以  
最小出力为

$$P_n = 9.81Q_n H \eta = 9.81 \times 1.44 \times 123.5 \times 0.8$$

$$= 1396(\text{kW})$$

**例 17-3** 某水电站有一压力管道如图 17-2 所示。假设电站的总效率为 85%，压力管道的沿程阻力系数  $\lambda$  为 0.001，压力管道的进水口损失系数  $f$  为 0.15，弯道阻力系数  $f_{90}$  为 0.04，电站利用率  $\eta$  为 70%。试计算在总落差为 210m、压力水管总长为 400m、平均半径为 0.6m、流量为  $20\text{m}^3/\text{s}$  情况下的水头总损失、水电站最大出力及年发电量。

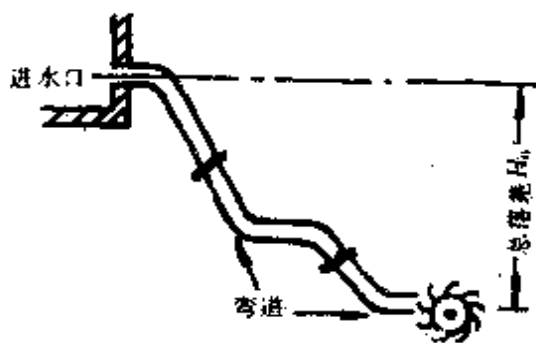


图 17-2 某水电站的压力管道

**解** 管内径  $d = 2 \times 0.6 = 1.2(\text{m})$

流速  $v = \frac{Q}{\pi(d/2)^2} = \frac{20}{\pi \times 0.6^2} = 17.7(\text{m/s})$

压力水管的沿程损失为

$$h_t = \lambda \frac{l}{d} \cdot \frac{v^2}{2g} = 0.001 \times \frac{400}{1.2} \times \frac{17.7^2}{2 \times 9.81}$$

$$= 5.3(\text{m})$$

压力水管进水口损失为

$$h'_l = f \frac{v^2}{2g} = 0.15 \times \frac{17.7^2}{2 \times 9.81} = 2.4(\text{m})$$

压力水管的弯道损失为

$$\begin{aligned} h''_l &= f_{m0} \frac{v^2}{2g} \times 3 = 0.04 \times \frac{17.7^2}{2 \times 9.81} \times 3 \\ &= 1.92(\text{m}) \end{aligned}$$

水头总损失为

$$\begin{aligned} H_l &= h_l + h'_l + h''_l = 5.3 + 2.4 + 1.92 \\ &= 9.62(\text{m}) \end{aligned}$$

有效水头为

$$H = H_0 - H_l = 210 - 9.62 = 200.4(\text{m})$$

因此,水电站最大出力为

$$\begin{aligned} P_m &= 9.81QH\eta = 9.81 \times 20 \times 200.4 \times 0.85 \\ &= 33421(\text{kW}) \end{aligned}$$

年发电量

$$\begin{aligned} W &= P_m \eta t = 33421 \times 0.7 \times 24 \times 365 \\ &= 204937572(\text{kWh}) \end{aligned}$$

## 二、小型水轮机和发电机的选择

### 1. 小型水轮机的选择

(1) 选择水轮机所需的资料

- ① 电站的开发方式、调节性能在日负荷图上的工作位置。
- ② 电站的最大、最小、平均及加权平均水头和设计水头。
- ③ 电站引出流量、装机容量及保证出力。
- ④ 上下游水位及尾水水位流量关系。
- ⑤ 水质及含砂量。

(2) 选择步骤:

- ① 根据电站的计算水头  $H$ 、计算流量  $Q$  等,得计算出力  $P$ 。
- ② 根据计算水头和单机功率,查水轮机产品参数及发电机



配套表,或查各类水轮机应用范围表,初选出一种或二、三种适用的机组。

③ 作出初步方案,并计算各方案的总投资和年发电效益,进行技术经济比较,最后选定机组机型及其配套设备。

水轮机最大允许吸出高度按下式计算:

$$H_{sm} = h_s - \frac{\nabla}{900}$$

式中: $H_{sm}$ ——水轮机最大允许吸出高度(m);

$h_s$ ——理论吸出高度(m),由“各类水轮机应用范围表中的辅助曲线  $h_s = f(H)$  决定。

$\nabla$ ——水电站的海拔高程(m)。

卧式机组,最大允许吸出高度按下式计算:

$$H_{sm} = h_s - \frac{\nabla}{900} - \frac{D_1}{2}$$

式中: $D_1$ ——水轮机的标称直径(m)。

例 17-4 某地区计划建一水电站,已知水头  $H$  为 13m,流量  $Q$  为  $0.3\text{m}^3/\text{s}$ ,试问应选用何种水轮机和发电机?

解 水电站出力

$$P = 9.81QH\eta = 9.81 \times 0.3 \times 13 \times 0.73 = 28(\text{kW})$$

查水轮机应用范围表,当  $H$  为 13m,  $P$  为 28kW 时,水轮机型号可取 HL<sub>310</sub>-WG-25,查产品目录,水轮机转速为 1370r/min,发电机转速为 1500r/min。

如果现成有功率相符而转速不同的发电机,欲与上述水轮机配套,则可以采用间接传动方式。传动比  $i$  可按下式计算:

$$i = n_f/n_s = D_s/D_f$$

式中: $n_f, n_s$ ——现成发电机和水轮机的转速;

$D_f, D_s$ ——发电机和水轮机皮带轮的直径。

## 2. 水型水轮发电机的选择

小水电多数配用同步发电机,少数配用电容器的异步发电

机。

(1) 发电机的功率  $P_f$ ：

$$P_f = P_s \eta_f \eta_t$$

式中： $P_s$ ——水轮机输出的功率(kW)；

$\eta_f$ ——发电机效率，500kW 以下取 0.9，500kW 以上取 0.95 ~ 0.97；

$\eta_t$ ——机组传动效率，直联取 1.0，三角皮带传动取 0.95，平皮带传动取 0.9。

(2) 发电机的额定电压  $U$ ：当  $P_f \leq 400$ kW 时， $U$  取 400V；当  $400 \leq P_f \leq 10000$ kW 时， $U$  取 6.3kV 或 3.15kV。

功率因数一般为  $\cos\varphi = 0.8$ 。

(3) 转速：

$$n = 60f/p = 3000/p$$

式中： $n$ ——转速(r/min)；

$p$ ——发电机磁极对数；

$f$ ——频率，50Hz。

直联机组应采用接近水轮机最优转速的同步转速。若发电机转速大于水轮机转速，应采用间接传动。150kW 以下的发电机，可采用皮带传动或三角皮带传动；150 ~ 300kW 的发电机可采用齿转传动。

水轮发电机新型号用字母、功率及数字表示。例如：SF500 16/3250，表示为水轮发电机，功率为 500kW，磁极 16 个(8 对极)，定子铁芯外径为 3250mm。

### 3. 调速器的选择

小型机组按调速功选择调速器。调速功可按下列公式估算：

反击式水轮机

$$A = (195 \sim 245)Q \sqrt{H_{\max} D_1}$$

冲击式水轮机

$$A = 9.81Z_0 \left( d_0 + \frac{d_0^3 H_{\max}}{6000} \right)$$

式中： $A$ ——调速功(N·m)；

$Q$ ——水轮机流量(m<sup>3</sup>/s)；

$H_{\max}$ ——最大水头(m)；

$D_1$ ——反击式水轮机的转轮直径(m)；

$Z_0$ ——喷嘴个数；

$d_0$ ——射流直径(cm)。

小型调速器的主要参数,见表 17—2。

表 17—2 小型调速器的主要参数

型号	型式	接力器调速功 (N·m)	调速器飞摆的驱动方式
TT—35	单调节 通流式	343	异步电动机 皮带 异步电动机 异步电动机
TT—75		735	
TT—150		735 ~ 1520	
TT—300		1373 ~ 2942	
YT—300	单调节压 力罐	1520 ~ 2942	异步电动机
YT—600		3089 ~ 5884	
YT—1000		5148 ~ 9709	

第二节 余热发电计算

一、工厂余热能量的估算

1. 高温气余热能源的估算

高温气余热数量最大,广泛分布在冶金、化工、机械、建材、玻璃、搪瓷、电力等行业。工业窑炉的高温烟气余热大约相当于窑炉本身燃料消耗量的 30 ~ 40% 以上。

(1) 每小时高温烟气的总余热量:

$$Q_{zy} = BV_v t_y C_y$$

式中:  $Q_{zy}$ ——每小时高温烟气的余热量(kJ/h);

$B$ ——每小时燃料消耗量(kg/h)(固体或液体)或(Nm<sup>3</sup>/h)(气体);

$V_v$ ——燃烧每 kg(固体或液体)或 Nm<sup>3</sup>(气体)燃料所产生的烟气量,数值可以实测或由表 17—3 至表 17—6 查得, (Nm<sup>3</sup>/kg)(固体或液体); 或(Nm<sup>3</sup>/Nm<sup>3</sup>)(气体);

$t_y$ ——烟气温度,可实测(°C);

$C_y$ ——烟气平均比热(kJ/Nm<sup>3</sup>·°C),可由表 17—6 查得。

(2) 每小时可回收利用的余热量:

$$Q_{yy} = Q_{zy} \frac{t_y - t_p}{t_y}$$

式中:  $Q_{yy}$ ——每小时可收回的余热量(kJ/h);

$t_p$ ——排烟温度(°C),如一般余热锅炉的排烟温度为 200 ~ 250°C;轮窑用烟气干燥砖坯的排烟温度可取 40°C。

(3) 全年可回收的余热量:

$$Q_{ym} = Q_{yy} T$$

式中:  $Q_{ym}$ ——全年可回收的余热量(kJ/年);

$T$ ——设备全年运行小时数。

表 17—3 煤炭燃烧每 kg 所产生的烟气体积  $V_y$  ( $\text{Nm}^3/\text{kg}$ )

热值 $Q_R$ ( $\text{kJ}/\text{kg}$ )	4187	8374	12561	16748	18842	20935	23029	25122	27216	29309
$V_0$ ( $\text{Nm}^3/\text{kg}$ )	1.51	2.52	3.53	4.54	5.05	5.55	6.06	6.56	7.06	7.57
不同过剩空气系数 $\alpha$ 下的 $V_y$	1.20	2.84	3.93	5.08	6.12	6.60	7.21	7.77	8.31	8.85
	1.30	2.99	4.19	5.38	6.53	7.16	7.76	8.38	8.96	9.55
	1.40	3.14	4.44	5.75	7.02	7.66	8.32	8.97	9.61	10.25
	1.50	3.29	4.69	6.08	7.48	8.17	8.88	9.58	10.27	10.96
	1.60	3.45	4.94	6.44	7.93	8.67	9.43	10.18	10.93	11.67
	1.70	3.60	5.19	6.79	8.39	9.18	9.98	10.79	11.57	12.37
	1.80	3.75	5.44	7.14	8.84	9.69	10.54	11.39	12.23	13.08

注:

- ① 煤炭值  $Q_R$ : 工业统煤 23000kJ/kg; 大同煤 27200kJ/kg; 开滦二号原煤 23000kJ/kg; 阳泉三号混煤 27600kJ/kg。
- ② 固体燃料燃烧的过剩空气系数  $\alpha$  值约为 1.30 ~ 1.70; 对于机械燃烧方式  $\alpha$  值应取小一些, 对于手工燃烧炉应取大一些。
- ③  $\text{Nm}^3$  即标准立方米。

表 17—4 液体燃料燃烧每 kg 所产生的烟  
气量  $V_v$  (Nm<sup>3</sup>/kg)

热值 $Q_p$ (kJ/kg)		29307	33494	37681	39776	41853
$V_v$ (Nm <sup>3</sup> /kg)		7.95	8.80	9.65	10.07	10.50
不同过剩 空气系数 $\alpha$ 下的 $V_v$	1.05	8.17	9.32	10.47	11.05	11.63
	1.10	8.57	9.76	10.95	11.56	12.15
	1.15	8.96	10.20	11.44	12.06	12.68
	1.20	9.36	10.64	11.91	12.56	13.20
	1.25	9.76	11.08	12.40	13.07	13.72
	1.30	10.15	11.52	12.88	13.57	14.25
	1.40	10.95	12.40	13.85	14.58	15.30

注:

- ① 液体燃料的热值  $Q_p$ : 重油 39400 ~ 41000kJ/kg; 焦油 29300 ~ 37700kJ/kg; 原油 41000 ~ 44000kJ/kg。
- ② 液体燃料燃烧的过剩空气系数  $\alpha$  值约为 1.10 ~ 1.30。

表 17—5 气体燃料燃烧每 m<sup>3</sup> 所产生的烟气体量 V<sub>y</sub> (Nm<sup>3</sup>/Nm<sup>3</sup>)

热值 Q <sub>d</sub> (kJ/Nm <sup>3</sup> )	4187	6280	8374	12561	16748	20935	34960	35588	37581	39776	41868
V <sub>y</sub> (Nm <sup>3</sup> /Nm <sup>3</sup> )	0.875	1.31	1.75	2.63	4.11	5.20	9.25	9.41	9.97	10.52	11.07
1.02	1.743	2.12	2.49	3.23	4.89	6.05	10.45	10.61	11.19	11.75	12.32
1.05	1.769	2.16	2.54	3.31	5.01	6.21	10.72	10.90	11.49	12.07	12.65
1.10	1.813	2.22	2.63	3.44	5.22	6.47	11.18	11.37	11.98	12.57	13.21
1.15	1.857	2.29	2.71	3.58	5.43	6.73	11.65	11.85	12.49	13.12	13.75
1.20	1.900	2.35	2.80	3.71	5.63	6.99	12.11	12.32	12.99	13.65	14.32
1.30	1.987	2.48	2.98	3.97	6.04	7.51	13.03	13.26	13.97	14.70	15.42

不同过剩空气  
系数 α 下的  
V<sub>y</sub>

注:

① 气体燃料发热值 Q<sub>d</sub>: 高炉煤气 3770 ~ 4190kJ/m<sup>3</sup>; 发生炉煤气 4610 ~ 10470kJ/m<sup>3</sup>; 混合煤气 5440 ~ 10470kJ/m<sup>3</sup>; 煤焦煤气 16750kJ/m<sup>3</sup>; 天然气 35590kJ/m<sup>3</sup>; 油田伴生气 39780kJ/m<sup>3</sup>; 液化石油气 41870kJ/m<sup>3</sup>。

② 气体燃料燃烧的过剩空气系数 α 值约为 1.02 ~ 1.20。

表 17—6 烟气平均比热的近似值  $C_y$

烟气温度 $t_y$ (°C)	100	200	300	400	500	600	700	800	900
$C_y$ (kJ/Nm <sup>3</sup> ·°C)	1.38	1.40	1.42	1.44	1.46	1.48	1.50	1.52	1.54
烟气温度 $t_y$ (°C)	1000	1100	1200	1300	1400	1500	1500	1700	1800
$C_y$ (kJ/Nm <sup>3</sup> ·°C)	1.56	1.57	1.59	1.60	1.62	1.63	1.64	1.65	1.67

(4) 余热回收利用标准: 根据 GB3486—83《评价企业合理用热技术导则》, 工业锅炉排烟温度标准见表 17—7; 烟气余热回收利用管理标准见表 17—8。

表 17—7 工业锅炉排烟温度标准

锅炉容量 (t/h)	排烟温度(°C)
< 1	< 320
> 1	< 250
4	< 200
> 6	< 180

注:

① 表中所列排烟温度为定期检查的运行锅炉, 在环境温度为 25°C 满负荷情况下进行燃烧时, 在锅炉出口处所测的数值。

② 表中所列排烟温度不作为下列锅炉的标准:

(a) 每小时蒸发量小于 0.2t/h, 或额定热负荷  $< 5 \times 10^5$ kJ/h 的锅炉。

(b) 余热锅炉。

(c) 用稻壳、干蔗渣、木屑或其他工业废物与燃料混合燃烧的锅炉。

(d) 年平均运行时间不超过 1000h 的锅炉。



表 17-8 工业炉烟气余热回收率标准

烟气出炉温度 (°C)	使用低发热量燃料时			使用高发热量燃料时		
	余热回收 标准(%)	排气温度 (°C)	预热空气 温度(°C)	余热回收 标准(%)	排气温度 (°C)	预热空气 温度(°C)
500	20	350	170	22	340	150
600	23	400	220	27	380	200
700	24	460	260	27	440	230
800	24	530	300	26	510	250
900	26	580	350	28	560	300
1000	23	670	350	25	650	300
> 1000	26 ~ 48	710 ~ 470	450 ~ 750	30 ~ 55	670 ~ 400	400 ~ 700

注:

- ① 低发热量燃料指高炉煤气、发生炉煤气及发热量  $< 8360\text{kJ/标米}^3$  的混合煤气等。高发热量燃料指焦炉煤气、煤、重油等。
- ② 表中余热回收率标准,是根据烟气出炉温度及现有换热器情况,选定空气预热的经济温度,计算出回收率(即空气所获热量与进入换热器的烟气的载热量之比),再根据热量平衡计算出烟气出口温度,又由于燃料热值不同,各项数值差异较大,故对几种常用燃料的计算值,按发热值分高、低两组,取平均值列入表中。
- ③ 经换热器后的烟气余热可根据具体条件安装煤气预热器、余热锅炉、热泵等装置或直接预热被加热物,进一步回收利用。
- ④ 表中所列余热回收率标准,不适于下述工业炉窑:
  - (a) 额定热负荷低于  $5 \times 10^6\text{kJ/h}$  者。
  - (b) 年运行时间不足 1000h 者。
- ⑤ 作为参考的烟气温度(即烟气离开换热器的温度)与预热空气温度,是按下述条件由余热回收率标准计算的:
  - (a) 炉膛排出的烟气,在由炉子出口至空气换热器之间,由于散热及吸入冷空气等热损失,其温度下降 10%。
  - (b) 空气系数为 1.2。
  - (c) 外界温度为  $20^\circ\text{C}$ 。

## 2. 冷却介质余热能源的估算

冷却介质的余热约占余热总量 20% 左右。工厂中主要是冶金炉的冷却余热。冷却余热有冷却水中的余热和汽化冷产生的蒸汽中的余热等。

### (1) 冷却水中余热的计算：

#### ① 每小时冷却水的总余热量：

$$Q_{zs} = G_s t_s C_s$$

式中： $Q_{zs}$ ——每小时冷却水的余热量(kJ/h)

$G_s$ ——每小时冷却水量(kg/h)，可实测；

$t_s$ ——冷却水温度(°C)，可实现；

$C_s$ ——冷却水比热(kJ/kg·°C)，一般取 1。

#### ② 每小时从冷却水可回收利用的余热量：

$$Q_{ys} = Q_{zs} \frac{t_s - t}{t}$$

式中： $Q_{ys}$ ——每小时从冷却水可回收的余热量(kJ/h)；

$t$ ——冷水温度，指普通河水、井水、自来水的常温，一般可取 20°C(年平均数)。

### (2) 汽化冷却产生的余热的计算：

#### ① 每小时汽化冷却总余热量：

$$Q_{zq} = D_q i_q$$

式中： $Q_{zq}$ ——每小时汽化冷却余热量(kJ/h)；

$D_q$ ——每小时汽化冷却产生气量(kg/h)；

$i_q$ ——蒸汽的热焓量(kJ/kg)，可根据蒸汽的汽压和汽温从蒸汽表上查得。

#### ② 每小时从汽化冷却可回收利用的余热量：

$$Q_{yw} = Q_{zq} \frac{i_q - i_s}{i_q}$$

式中： $Q_{yw}$ ——每小时从汽化冷却水可回收的余热量(kJ/h)；

$i_s$ ——冷水的焓,即每 kg 冷水在  $t^\circ\text{C}$  时的热量(kJ/kg)。

3. 废汽、废水余热能源的估算

凡使用蒸汽和热水的工厂都有这种余热,约占余热总量的 10% 以上。

废汽余热估算方法与汽化冷却相同;废水余热估算与冷却水相同。

4. 高温产品和炉渣余热能源的估算

像金属冶炼、熔化和加工;煤的汽化和炼焦;石油炼制;烧水泥、砖瓦、玻璃、陶瓷、搪瓷等生产过程需高温加热,最后出来的产品及其炉渣废料都具有很高的温度,含有大量余热。

每小时高温产品的总余热量

$$Q_{zx} = G_g t_g C_g$$

或

$$Q_{zx} = G_g i_g$$

式中: $Q_{zx}$ ——每小时高温产品的余热量(kJ/h);

$G_g$ ——每小时高温产品的数量(kg/h)(固体或液体)或( $\text{Nm}^3/\text{h}$ )(气体);

$t_g$ ——高温产品的温度( $^\circ\text{C}$ );

$C_g$ ——高温产品的平均比热(kJ/kg· $^\circ\text{C}$ )(固体或液体)或(kJ/ $\text{Nm}^3$ · $^\circ\text{C}$ )(气体),可查有关资料;

$i_g$ ——高温产品的热焓量(kJ/kg),可查有关资料。

如系高温炉渣,则每小时高温炉渣的总余热量为

$$Q_{zz} = G_z t_z C_z + G_z q_z$$

或

$$Q_{zz} = G_z i_z + G_z q_z$$

式中: $Q_{zz}$ ——每小时高温炉渣的余热量(kJ/h);

$q_z$ ——高温炉渣熔化潜热(kJ/kg),可查有关资料;

$i_z$ ——高温炉渣的热焓量(kJ/kg);

$G_z, t_z, C_z$ ——含义分别与上述高温产品相同,不过产品是炉渣而已。

可回收利用的余热能源的计算,要扣除余热量中不能回收的部分。

### 5. 化学反应余热能源的估算

这种余热主要存在于化工行业,占余热总量的 10% 以下。

每小时化学反应总余热量

$$Q_{Zk} = G_k q_k$$

式中:  $Q_{Zk}$  —— 每小时化学反应余热量(kJ/h);

$G_k$  —— 每小时化工产品产量(kg/h);

$q_k$  —— 产品化学反应所放出的热量(kJ/kg),可用化学反应式计算。

能回收利用的化学反应余热能源  $Q_{yk}$  的计算,要扣除热量中不能回收的部分。如高温气体,可扣去 200 ~ 250°C,计算方法同前;生产 1 吨硫酸,可利用化学反应的余热约相当于 1 吨蒸气,即 2.85 百万 kJ;生产 1 吨硝酸,可利用化学反应的余热约稍大于 1 吨蒸气;生产 1 吨合成氨,可利用化学反应的余热相当于 0.8 吨蒸气,即 2.18 百万 kJ。

### 6. 可燃废气余热能源的估算

这种余热约占余热总量的 80%。

每小时放掉的可燃气体总余热量为

$$Q_{Zk} = V_k Q_k^0$$

式中:  $Q_{Zk}$  —— 每小时放掉的可燃气体余热量(kJ/h);

$V_k$  —— 每小时放掉的可燃气体数量(Nm<sup>3</sup>);

$Q_k^0$  —— 放掉的可燃气体的热值(kJ/Nm<sup>3</sup>)。

## 二、余热发电装机容量的计算

一般可利用余热锅炉来回收余热热量并变成蒸汽,再通过汽轮机发电。汽轮机有凝汽式、抽气式和背压式三种。在不需要蒸汽的工厂,可采用凝汽式;需用少量蒸汽的工厂,可采用抽气式;需用大量低压蒸汽的工厂,则可采用背压式。

1. 全余热利用作动力的汽轮机容量的计算

全部余热用于汽轮机作动力的场合,先按前述方法计算出可回收利用的余热,然后依照拟采用汽轮机的蒸汽汽压和汽温等参数,并估算出管道的汽压和汽温下降值,确定余热锅炉的蒸汽汽压和汽温等参数;再由拟选择的锅炉效率估算出锅炉的蒸发量,由汽轮机的进汽量按下式确定汽轮机的容量:

$$\text{汽轮机容量} = \frac{\text{锅炉的蒸发量} - \text{漏气损耗}}{\text{汽轮机的汽耗率}}$$

2. 部分余热利用作动力的汽轮机容量的计算

(1) 余热锅炉的蒸汽部分直接用于生产,部分用作动力的场合:

汽轮机容量 =

$$\frac{\text{锅炉蒸发量} - \text{直接用于生产的用气量} - \text{漏气损耗}}{\text{汽轮机的气耗率}}$$

(2) 采用抽气式汽轮机将汽轮机的抽气用于生产的场合:

首先决定生产用抽气的参数和用气量,然后从产品目录中选择合适的抽气式汽轮机,再按下式计算装机容量:

$$\begin{aligned} & \text{汽轮机容量} \times \text{气耗率} + \text{抽气量} \\ & = \text{锅炉蒸发量} - \text{漏气损耗} \end{aligned}$$

3. 蒸汽综合利用(即余压利用)的场合汽轮机的选择

首先要统计好生产工艺过程中所用蒸汽的最大需要量及蒸汽汽压和汽温等参数,然后选择接近的背压式汽轮机的乏气参数,并选定型号、容量及进气参数。根据汽轮机的气耗来决定锅炉的蒸发量及蒸汽参数,再选定锅炉的型号。

4. 余热回收加热锅炉给水和蒸汽综合利用的场合汽轮机的选择

首先要调查出可回收的余热,以及可用于加热锅炉给水的余热量和温度。这些余热能加热低压锅炉给水的最高温度,一般不得超过 100°C,否则在大气压下要汽化。

温度较高的余热,可用于高压加热器加热锅炉给水泵后面的高压给水。但给水温度也不能超过锅炉省煤器进口的给水温度,否则会影响省煤器的效率。

由生产工艺过程中需用的蒸汽量来决定锅炉的蒸发量,由锅炉高压给水温度决定所选用锅炉省煤器的进水温度,从而确定锅炉的汽压和汽温等参数,选择合适的锅炉,以及匹配的汽轮机、发电机型号及容量。

余热计算部分有关参考数据,见表 17—9。

表 17—9 余热计算有关参考数据

100 万 kJ	$10^6$ kJ,折标煤 0.033916t
1t 标准煤发热量	2931 万 kJ
1t 饱和蒸汽热量	272 万 kJ
1t 焦炭发热量	2784 万 kJ
1t 重油发热量	3965 万 kJ
1t 沥青发热量	3768 万 kJ
焦炉煤气 1000m <sup>3</sup> 发热量	1708 万 kJ
天然气 1000m <sup>3</sup> 发热量	3529 万 kJ
镍渣热含量	1300 ~ 1400°C 1675 ~ 1800kJ/kg
高炉渣热含量	1300 ~ 1400°C ~ 1675kJ/kg
铜渣热含量	1250 ~ 1300°C 1591 ~ 1675kJ/kg

注:碳钢渣的平均比热在 0 ~ 1640°C 为 1.231kJ/kg·°C

### 5. 同步发电机容量的计算

同步发电机容量的选择应与汽轮机配套,其容量可按下列式计算:

$$P_{fc} = \eta_{fc} \eta_z P_{ge}$$

式中: $P_{fc}$ ——同步发电机的额定容量(kW);

$P_{ge}$ ——汽轮机的额定容量(kW);



$\eta_{jt}$ ——同步发电机的额定效率；

$\eta_z$ ——减速齿轮箱或其它传动装置的效率。

然后从产品目录中查得接近并稍大于上述计算出的  $P_{jt}$  作为选定的发电机容量。

同步发电机电压的选择视工厂变电所电压和电动机的电压而定。如果工厂中没有高压电动机，而发电机容量又较小（750kW 以下）时，可选用低压 400V。如果工厂中有 6kV 高压电动机，则发电机宜采用 6.3kV；如果发电机容量较大，除了本厂使用外还有较大裕量反馈电网，则宜采用 10.5kV 发电机。

### 三、汽轮机基本参数及其计算

汽轮机有单级和复级。单级汽轮机一般为背压式，其功率范围在 0.5 ~ 3000kW 之间，结构简单、运行可靠、热效率高，是工厂余热发电的一种主要方式。下面作重点介绍。

1. 双列复速单级汽轮机的损失、功率和效率，见表 17-10。

2. 汽轮机的各种效率计算

(1) 理想汽轮机的效率：

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{相对效率} \quad 1.0 \\ \text{绝对效率} \quad \eta_i = \frac{H_0}{q_1} = \frac{h_0 - h_{k2}}{h_0 - h_k} \text{ (热效率)} \end{array} \right.$$

(2) 内效率：

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{相对效率} \quad \eta_{oi} = H_i/H_0 \\ \text{绝对效率} \quad \eta_i = \eta_c \eta_{oi} \end{array} \right.$$

(3) 有效效率：

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{相对效率} \quad \eta_{oe} = \eta_{oi} \eta_m \\ \text{绝对效率} \quad \eta_e = \eta_c \eta_{oe} = \eta_c \eta_{oi} \eta_m \end{array} \right.$$

(4) 电效率：

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{相对效率} \quad \eta_{eT} = \eta_{oi} \eta_m \eta_f \\ \text{绝对效率} \quad \eta_e = \eta_c \eta_{eT} = \eta_c \eta_{oi} \eta_m \eta_f \end{array} \right.$$

表 17—10 双列复速单级汽轮机的损失、功率和效率

派生的损失	损失项目	符号	计算根据和公式	单位	效率名称及功率名称
汽轮机损失 透平级损失 轮周损失 部分进气损失 机械损失 轴封漏气	节流损失 { 进气节流 排气节流 喷嘴 动叶 I 转向导叶 动叶 II 余速 结构 轮面摩擦 鼓风 弧端 机械损失	$\xi_c, h_c$ $\xi_A, h_A$ $\xi_H, h_H$ $\xi'_A$ $h'_A$ $\xi_{c2}, h_{c2}$ — $\xi_m, h_m$ $\xi_B, h_B$ $\xi_k, h_k$ —	取 $0.05P_0$ 极小 $h_c = \xi_c h_0$ $h_A = \xi_A h_0$ $h_H = \xi_H h_0$ $h'_A = \xi'_A h_0$ $h_{c2} = \xi_{c2} h_0$ $1 - 0.975\eta_u$ $h_m = \xi_m h_0$ $h_B = \xi_B h_0$ $h_k = \xi_k h_0$ 试验曲线 $(1 - \eta_m)N_i$	$\text{Pa}$ $\text{Pa}$ $\text{kJ/kg}$ $\text{kJ/kg}$ $\text{kJ/kg}$ $\text{kJ/kg}$ — $\text{kJ/kg}$ $\text{kJ/kg}$ $\text{kJ/kg}$ $\text{kW}$ $\text{kg/s}$	级效率 $\eta_{0i}$ 或相对 实际轮周功率 $N_u$ 轮周效率 $\eta_u$ 汽轮机内效率 $\eta_i N_i$ 汽轮机内效率 $\eta_i N_i$ 汽轮机有效功率 $N_e$ 机械效率 $\eta_m$

注： $\xi_c, \xi_A, \xi_H, \xi'_A$ ——各种损失系数，根据实验数据或理论分析由专门公式求得； $h_c, h_A, h_H, h'_A$ ——相应的各种损失；  
 $h_0$ ——级绝热焓降。



式中： $h_0$ ——汽轮机进口焓(kJ/kg)；

$h_{ka}$ ——汽轮机理想绝热等熵膨胀之排气焓(kJ/kg)；

$H_0$ ——汽轮机的理想焓降(kJ/kg)，

$$H_0 = h_0 - h_{ka}；$$

$h_k$ ——锅炉给水焓(kJ/kg)；

$q_1$ ——锅炉中工质吸收的热量(kJ/kg)；

$H_i$ ——实际汽轮机的可用焓降(kJ/kg)；

$\eta_m$ ——考虑汽轮机机械损失项  $\Delta N_m$  的机械效率；

$\eta_f$ ——考虑发电机损失  $\Delta N_f$  项的发电机效率。

### 3. 汽轮机的各种功率计算

(1) 汽轮机的理想功率：

$$N_0 = \frac{QH_0}{3600}$$

式中： $N_0$ ——汽轮机的理想功率(kW)；

$Q$ ——通过汽轮机的蒸汽流量(kg/h)。

(2) 汽轮机的内功率：

$$N_i = \frac{QH_i}{3600} = \frac{QH_0\eta_{oi}}{3600}$$

(3) 汽轮机有效功率(轴功率)：

$$N_e = N_i - \Delta N_m = \eta_m N_i$$

(4) 汽轮发电机电功率：

$$N_f = N_e - \Delta N_f = \eta_f N_e = \eta_m \eta_f N_i$$

式中： $N_i$ 、 $N_e$ ——汽轮机的内功率和有效功率(kW)；

$N_f$ ——汽轮发电机电功率(kW)。

### 4. 蒸汽消耗量、气耗率、热耗量的计算

(1) 蒸汽消耗量(单位：kg/h)：

$$Q = \frac{3600N_f}{H_0\eta_{oi}\eta_m\eta_f}$$

(2) 气耗率  $dT$ (单位：kg/kWh)：

$$dT = \frac{Q}{N_f} = \frac{3600}{H_0 \eta_\alpha \eta_m \eta_f}$$

(3) 热耗量  $q_T$ , 即每生产 1kWh 电能所需要的热量:

$$\begin{aligned} q_T &= dT \cdot q_1 = \frac{3600}{H_0 \eta_\alpha \eta_m \eta_f} (h_0 - h_k) \\ &= \frac{3600}{\eta_T} \end{aligned}$$

式中:  $q_T$  —— 热耗量(kJ/kWh)。

汽轮机的功率和蒸汽消耗量也可由图 17-3 ~ 17-5 计算求得。

#### 四、余热发电燃料节约量的计算

余热发电燃料节约量可按下式计算:

$$\begin{aligned} \Delta B_{rdc} &= \frac{0.123}{\eta'_{gl} \eta_{gf}} \left\{ \frac{N_{fz}}{\eta_i} - \left( N_{gr} + \frac{N_n}{\eta_{i(n)}} \right) \right\} \\ &\quad + \frac{Q_{gr}}{29307.6} \left( \frac{1}{\eta_{glgr}} - \frac{1}{\eta'_{gl} \eta_{rw}} \right) \end{aligned}$$

式中:  $\Delta B_{rdc}$  —— 燃料节约量(kg 标准煤);

$N_{fz}$  —— 热电站发电量(kWh),

$$N_{fz} = N_{gr} + N_n;$$

$N_{gr}$  —— 供热抽气部分发电量(kWh);

$N_n$  —— 调节抽气汽轮机凝气部分的发电量(kWh);

$Q_{gr}$  —— 供热量(kJ/h);

$\eta'_{gl}$  —— 热电站锅炉管道效率,  $\eta'_{gl} = \eta_{gl} \eta_{gd}$ ;

$\eta_{gf}$  —— 汽轮机、发电机效率,  $\eta_{gf} = \eta_g \eta_f$ ;

$\eta_i$  —— 被替代的凝气式汽轮机的绝对内效率,  $\eta_i = \eta_c \eta_{ci}$ ;

$\eta_{i(n)}$  —— 调节抽气汽轮机凝气部分的绝对内效率;

$\eta_{glgr}$  —— 分散供热的锅炉效率;

$\eta_{rw}$  —— 考虑调节抽气汽轮机气封漏气及机组和管网散热损失的供热效率。

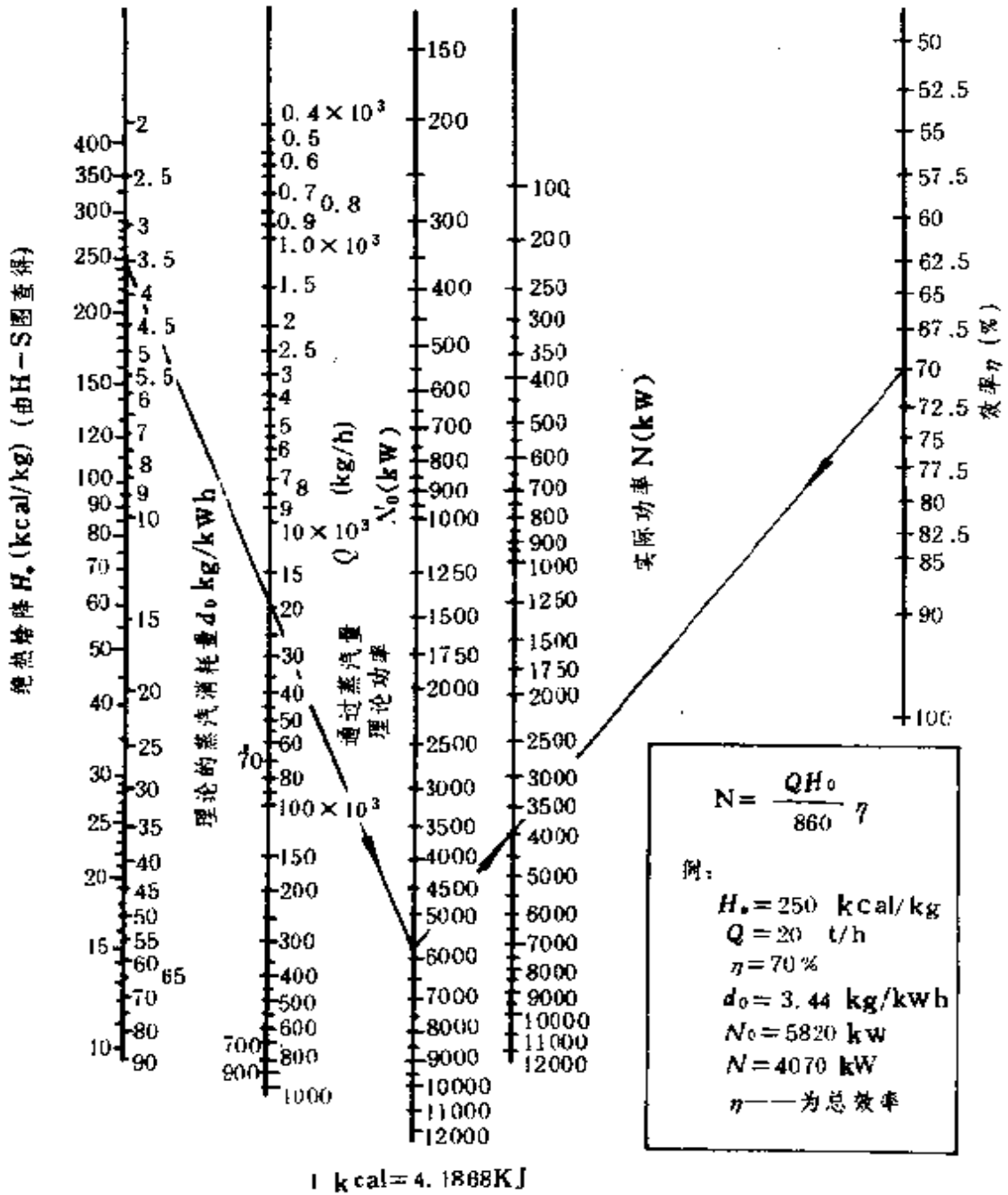


图 17-3 汽轮机的功率计算图

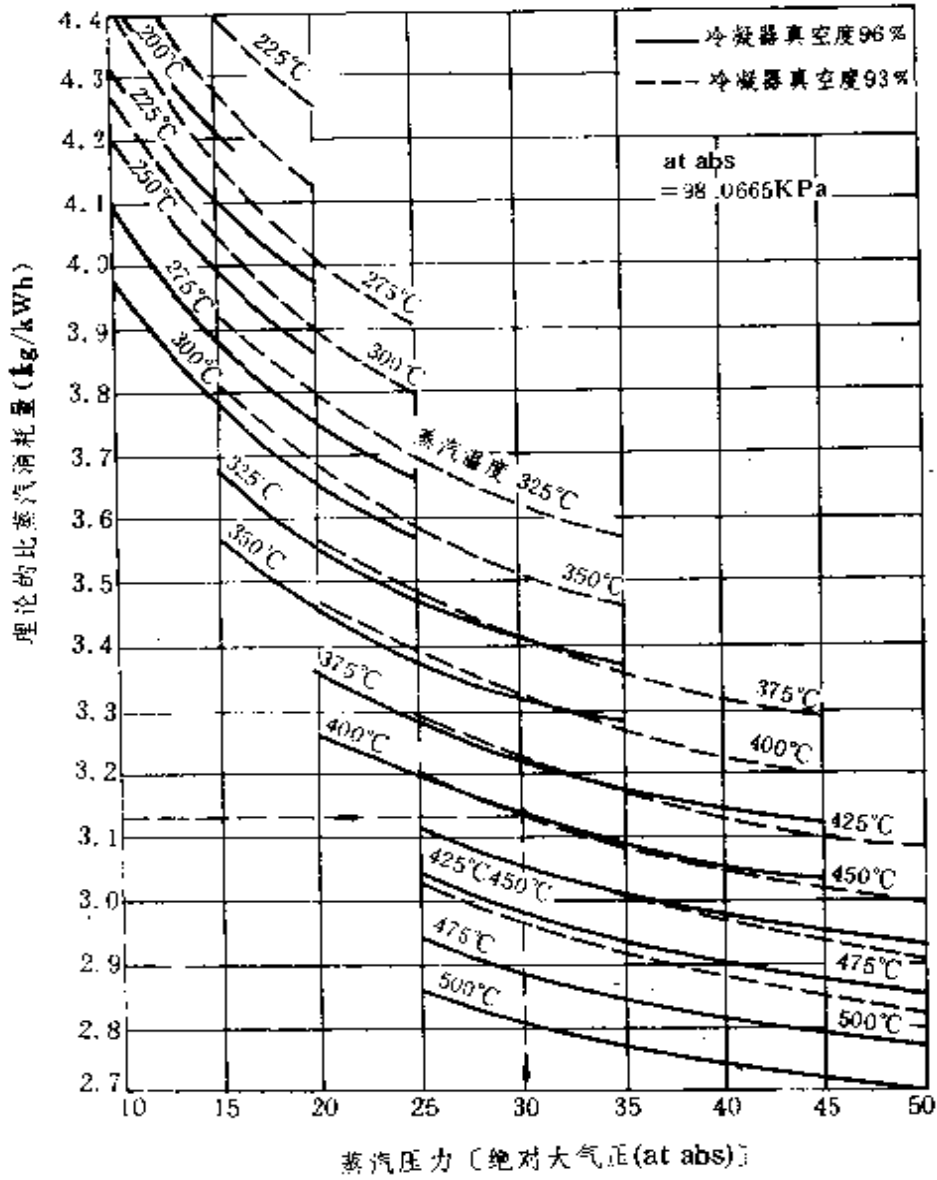


图 17-4 凝汽式汽轮机的理论蒸汽消耗量

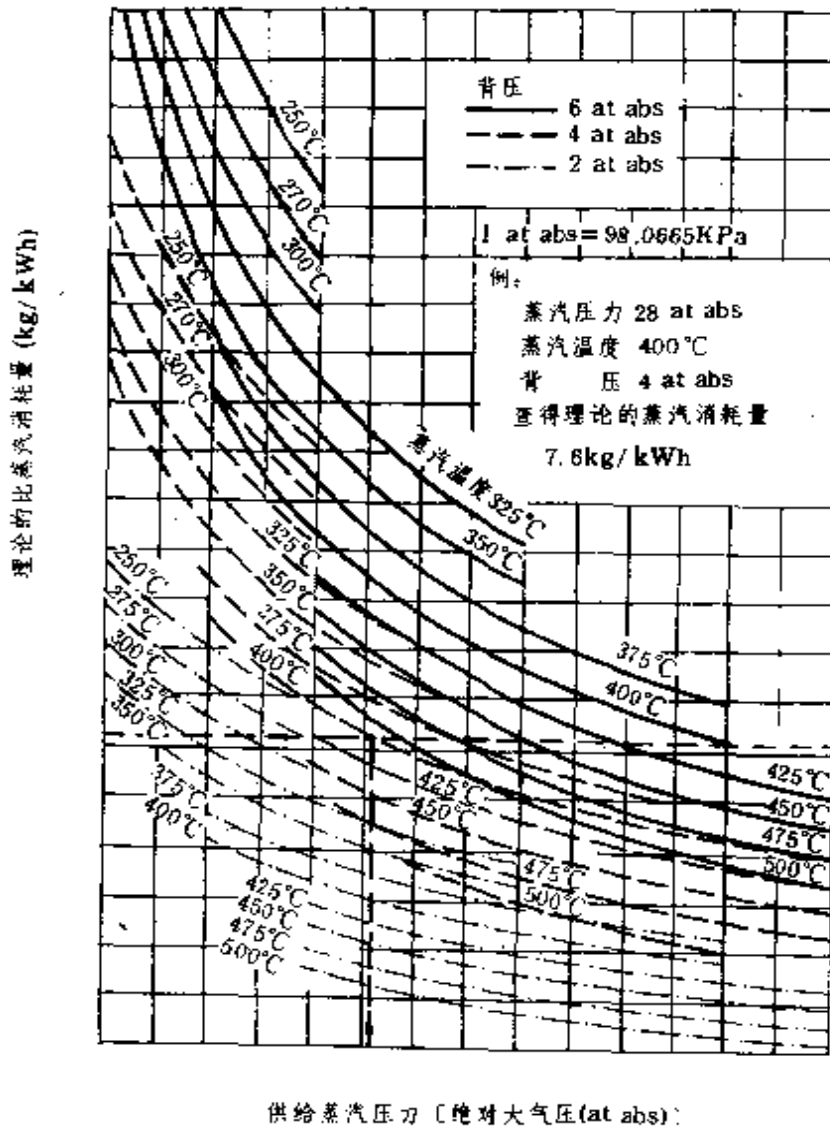
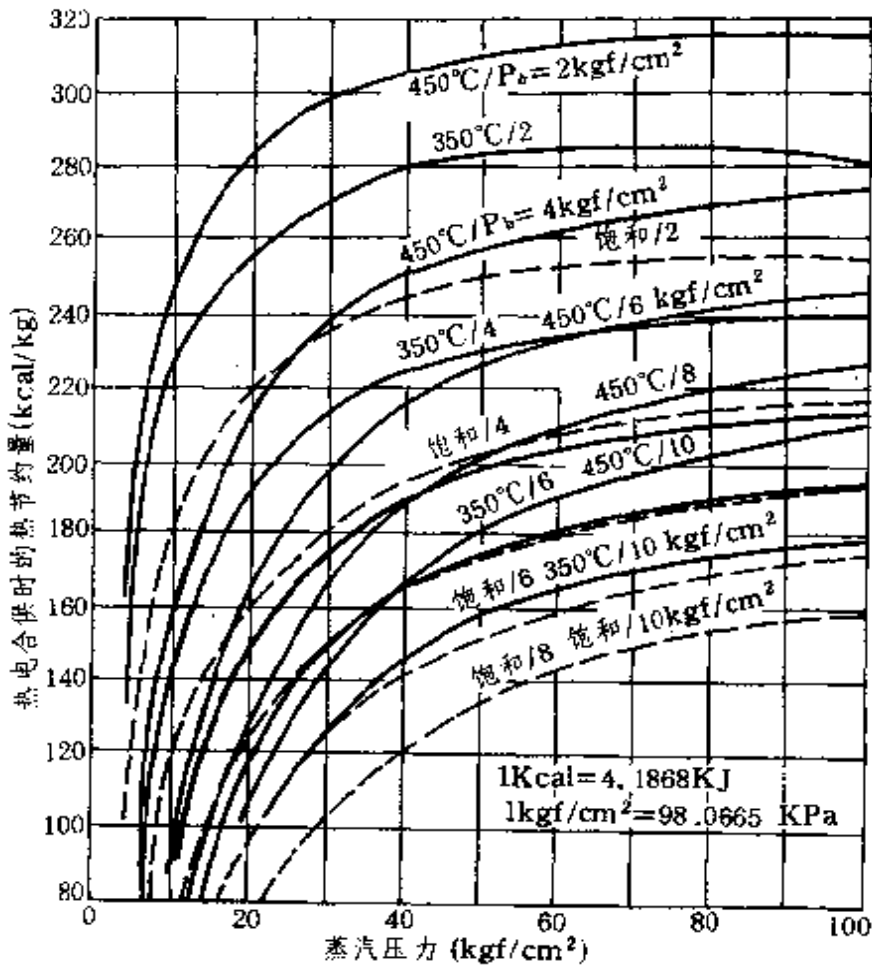


图 17—5 背压式汽轮机的理论蒸汽消耗量

背压式汽轮机由于  $N_s = 0$ , 发电部分的燃料节约量最大。背压式汽轮机的热节约量可由图 17—6 查得。



$P_c = 0.05 \text{ kgf/cm}^2$ ,  $\eta_l = 0.78$ ,  $\eta_{lc} = 0.82$ .  
 图中数值是蒸汽的初始温度,  $P_b$  表示背压,  
 $P_c$  冷凝器内压力,  $\eta_l$  背压运行效率,  $\eta_{lc}$  冷凝运行效率

图 17—6 背压式汽轮机的热经济性

(图中数值是蒸汽的初始温度;  $P_b$ ——背压;  $P_c$ ——冷凝器内压力;  $\eta_l$ ——背压运行的效率;  $\eta_{lc}$ ——冷凝运行的效率)

### 五、背压式汽轮发电机组的技术参数

背压式汽轮发电机组机型、进气、乏气与发电功率表, 见表

17—11;非调整抽气背压式汽轮发电机组机型、进气、乏气、抽气量与发电功率表,见表 17—12;背压式汽轮机型号及参数,见表 17—13;低压余热发电机组参数,见表 17—14。

背压式汽轮发电机组机型、  
表 17—11 进气、乏气与发电功率表

机型	Y01		Y02A	Y02	Y01	Y03	
进气参数(ata/°C)	13/340		24/390			35/435	
乏气压力(ata)	3	6	3	3	6	3	6
进气量(t/h)	发电功率 (kW)						
10	410	200	550		360	800	600
12.9	570	300	730		530	1100	850
13.85				980			
15	680	380		1050	600	1310	1030
20	970	570		1380	958	1820	1440
25	1260	760			1220	2330	1850
30	1550	960			1510	2850	2260
35						3000*	2410*

注:

① Y02A 适用于进气量 13t/h 以内的机组。

② Y02 适用于气量 13t/h 以内的机组。

③ 有 \* 号数字为进气参数低至 32ata/420°C 时的发电功率。

④ 1ata = 98.0665kPa

表 17—12 非调整抽气背压式汽轮机机组型、进气、乏气、抽气量与发电功率表

机 型	Y02A			Y02			Y03		
	抽气量 (t/h)	抽气压力 (ata)	发电功率 (kW)	抽气量 (t/h)	抽气压力 (ata)	发电功率 (kW)	抽气量 (t/h)	抽气压力 (ata)	发电功率 (kW)
进气参数(ata/°C)	24/390								
乏气压力(ata)	3								
进气量(t/h)	3	9.35	445	5.5	9.54	1045	9.5	8.9	2360
	4.5	13.5	720	6.5	10.1	1210	10	9.4	2450
	5.5	16.3	800	8	12.5	1450	11.5*	10.9*	2740*
				9	13.9	1580			
10									
15									
18									
20									
25									
27.6									
28.4									
30									
35									

注:

①Y02A 适用于乏气量在 13t/h 以内的机组。

②Y02 适用于乏气量在 13t/h 以内的机组。

③有 \* 号数字为进气参数所低至 32ata/420°C 时的数值。

④1ata = 98.0665kPa。



表 17—13 背压式汽轮机型号及参数(一)

型号	额定功率 (kW)	进气参数		额定背压 (kgf/cm <sup>2</sup> )	转速 (r/min)	汽耗 (kg/h)	机组 总重 (t)	外形尺寸 (mm) (长×宽×高)
		压力 (kgf/cm <sup>2</sup> )	温度 (°C)					
1C—60	400	10	230	3	3000	30	1.5	1095×1262×1000
	500	10	230	3	3000	30		
1C—50	300~500	24	390	3	8000/1400	16	5	2500×970×2043
	750~1000	24	390	3	6500/1500	14	7	
1C—62	1500	24	390	3	6500/1500	13	7	2764×1900×1901
	750	35	435	10	1000	21	4.5	
1C—45	1000	35	435	10	1200	20	4.5	2478×1910×2265
	1500	35	435	10	8600/1500	14.5	5.5	
1C—45	2000	35	435	10	1000	19	4.5	2918×2159×1815
	2500	35	435	10	8000	19	6.3	
1C—45	3000	35	435	10	9800/4350	19	7.5	

注：  
 ① 背压变化范围最好不要超过 15%，如超过需加旁路补充，采取自动调节(电动、气动均可)。  
 ② 上列型号及参数根据杭州汽轮机厂产品规范。  
 ③ 1kgf/cm<sup>2</sup> = 98.0665kPa

背压式汽轮机型号及参数(二)

产品名称	型号	额定功率(kW)	进气参数		背压	
			压力(ata)	温度(°C)	额定调节范围(ata)	
低压 200kW 单级双支点背压式汽轮机	1A-60-1	125 ~ 200	10	220 ~ 250	3	
中压 200kW 单级悬臂背压式汽轮机	1D-40-1	200	$35^{+2}_{-3}$	$435^{+10}_{-15}$	1 ~ 2	
低压 500kW 单级双支点背压式汽轮机	1C-60-1	500	$10^{+3}_{-2}$	230 ~ 250	3	
低压 500kW 背压式汽轮机	B0.5-12/2.5	500	$12^{+1}$	$270^{+20}$	2.5	
次中压 500kW 背压式汽轮机	B0.5-24/3	500	$24 \pm 2$	$390^{+10}_{-15}$	3	2 ~ 4
次中压 750kW 背压式汽轮机	B0.75-24/3	500	$12 \pm 2$	$300^{+10}_{-15}$	3	2 ~ 4
次中压 1500kW 背压式汽轮机	B1.5-24/3	1500	$24 \pm 2$	$390^{+10}_{-15}$	3	2 ~ 4
次中压 500kW 背压式汽轮机	B0.5-24/5	500	$24 \pm 2$	$390^{+10}_{-15}$	5	4 ~ 6
次中压 750kW 背压式汽轮机	B0.75-24/5	750	$24 \pm 2$	$390^{+10}_{-15}$	5	4 ~ 6
次中压 500kW 背压式汽轮机	B0.5-24/8	500	$24 \pm 2$	$390^{+10}_{-15}$	8	
次中压 750kW 背压式汽轮机	B0.75-24/8	750	$24 \pm 2$	$390^{+10}_{-15}$	8	
中压 300kW 背压式汽轮机	B3-35/11	3000	$35^{+2}_{-3}$	$435^{+10}_{-15}$	11	8 ~ 13

背压式汽轮机型号及参数(三)

产品名称	蒸汽温度 (°C)	额定 转速 (r/min)	转向	汽耗 (kg/kwh)	外型尺寸 (mm) (长×高×高)	总重 (t)
低压 200kW 单级 双支点背压式汽轮机		3000	顺 时 针	32.0	1217 × 950 × 1010	~ 0.83
中压 200kW 单级悬 臂背压式汽轮机	195 ~ 280	6500/3000	逆 时 针	16.8	1420 × 1205 × 1785	2
低压 500kW 单级双支 点背压式汽轮机		3000	顺 时 针	30.4	1100 × 1230 × 985	~ 1.5
低压 500kW 背压式 汽轮机	15.9	6500/1000		21.0	2665 × 1880 × 1900	~ 5.5
次中压 500kW 背压式 汽轮机	237	6500/1000		14.8	2665 × 1880 × 1900	~ 5.5

(续表)

产品名称	蒸汽温度 (°C)	额定 转速 (r/min)	转 向	汽耗 (kg/kwh)	外型尺寸 (mm) 长×高×高	总重 (t)
次中压 750kW 背压式 汽轮机	224	6500/1500	顺 时 针	13.98	2665 × 1880 × 1900	~ 5.5
次中压 1500kW 背压式 汽轮机	223	6500/1500		13.52	2665 × 1880 × 1900	~ 5.5
次中压 500kW 背压式 汽轮机	260	6500/1500		17.4	2665 × 1880 × 1900	~ 5.5
次中压 750kW 背压式 汽轮机	260	6500/1500		16.75	2665 × 1880 × 1900	~ 5.5
次中压 500kW 背压式 汽轮机	300	6500/1500		26.7	2665 × 1880 × 1900	~ 5.5
次中压 750kW 背压 式汽轮机	310	6500/1500		25.65	2665 × 1880 × 1900	~ 5.5
中压 300kW 背压式 汽轮机	319	3000		18.63	3722 × 3063 × 2440	15

注：  
 ①表中“转向”均指从汽轮机端看被拖动机时输出轴的旋向方向。  
 ②上列型号及号数根据广州汽轮机厂产品规范。  
 ③ $Q_{data} = 98.0665kPa$ 。

背压式汽轮机型号及参数(四)

名 称	单 位	B3 - 35/10	B3 - 35/5
额定功率	kW	3000	3000
额定耗气量	t/h	69.6	—
汽轮机转速	r/min	3000	3000
进气压力	ata	$35 \begin{smallmatrix} +2 \\ -3 \end{smallmatrix}$	$\begin{smallmatrix} +2 \\ -3 \end{smallmatrix}$
进气温度	°C	$435 \begin{smallmatrix} +10 \\ -15 \end{smallmatrix}$	$435 \begin{smallmatrix} +10 \\ -15 \end{smallmatrix}$
背压	ata	$10 \begin{smallmatrix} +2 \\ -2 \end{smallmatrix}$	$5 \begin{smallmatrix} +2 \\ -1 \end{smallmatrix}$
排气温度	°C	303	—
额定汽耗	kg/kwh	15.93	10.7
汽机本体总重	t	15.9	17.8
最大件重	t	6.6	7.3
外形尺寸(长 × 宽 × 高)	mm	2923 × 2803 × 2515	2923 × 2803 × 2595

注:

① 上列型号及参数根据青岛汽轮机厂产品规范。

② 1 ata = 98.0665kPa。

表 17—14 低压余热发电机组参数

汽轮机型号	B0.75—13/3		发电机型号	TQT0.75—4—400	
进气压力	ata	13	额定容量	kW	750
进气温度	°C	340	额定电压	V	400
排气压力	ata	2 ~ 4	额定电流	A	1355
转速	r/min	4800	功率因数		0.8
临界转速	r/min	5974	转速	r/min	1500
旋转方向	顺汽流管	顺时针	定子接线	—	Y
进气流量	t/h	14.5	绝缘等级	—	B/B
功率	kW	750	励磁电压	V	27.6
进气口径	mm	φ200	励磁电流	A	227
排气口径	mm	φ300	副绕组电压	V	40
重量	kg	6200	重量	kg	5320

注: 1 ata = 98.0665kPa。

## 六、同步发电机的特性及基本参数计算

### 1. 同步发电机的特性曲线

在转速  $n$  等于同步转速  $n_s$ 、功率因数  $\cos\varphi = \text{常值}$  的条件下, 保持端电压  $U$ 、电枢电流  $I$  和励磁电流  $I_f$  三个量中任一个量为常数, 其他二个量之间的函数关系, 称为同步发电机的特性曲线。

#### (1) 空载特性:

$$I = 0, E_0 (\text{或 } U_0) = f(I_f)$$

式中:  $E_0$  (或  $U_0$ ) —— 空载电势 (或空载电压) (V)。

由于  $E \propto \phi$  (磁通),  $I_f \propto F_f$  (励磁磁势), 所以空载特性曲线实质上也就是整个电机的磁化曲线。

同步发电机的空载特性如图 17—7 所示。

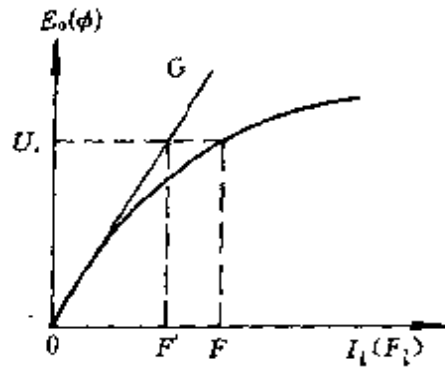


图 17—7 同步发电机空载特性

图中  $OF$  表示空载电势为  $U$  时所需的励磁磁势； $OF'$  表示消耗在气隙中的磁势； $F'F$  为克服铁芯磁阻所需的磁势。

(2) 负载特性：

$$I = \text{常值}, U = f(I_f)$$

表示负载电流和功率因数等于常值时发电机的端电压和励磁电流或励磁势的关系。

同步发电机的负载特性如图 17—8 所示。

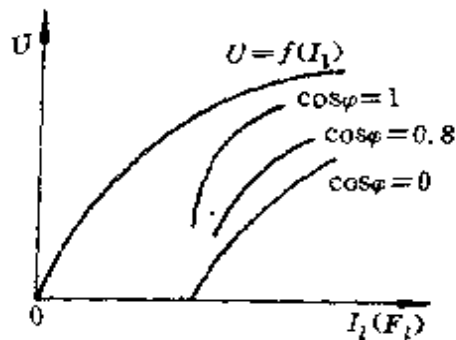


图 17—8 不同功率因数时的负载特性

由图可见，感性负载时，功率因数越低，产生同样的端电压

时所需的励磁电流就越大。

(3) 短路特性:

$$U = 0, \quad I_f = f(I)$$

表示电枢端点短路时,电枢电流和励磁电流或励磁磁势的关系。

同步发电机的短路特性如图 17—9 所示。

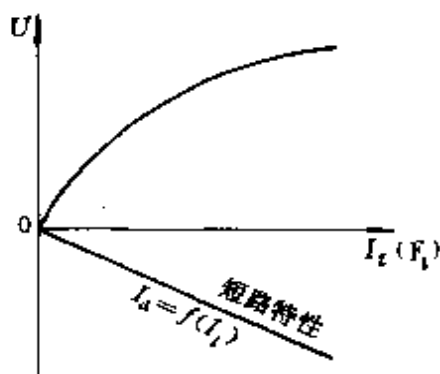


图 17- 9 同步电机的短路特性

由于短路时气隙电势和相应的气隙磁通较小,整个电机的磁路处于不饱和状态,所以短路曲线通常为一直线。

(4) 调整特性:

$$U = \text{常值}, \quad I_f = f(I)$$

调整特性表示端电压和负载的功率因数不变时,励磁电流和负载电流的关系。

同步发电机的调整特性如图 17—10 所示

在感性和纯电阻性负载时,调整特性都是上升的,但在容性负载时,调整特性也可能是下降的。

(5) 外特性:

$$I_f = \text{常值}, \quad U = f(I)$$



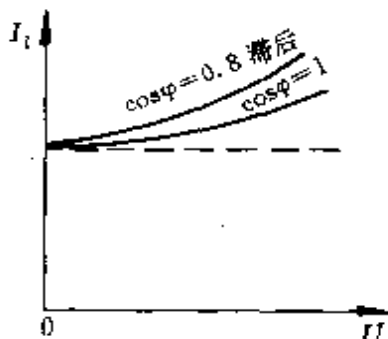


图 17-10 同步发电机的调整特性

表示励磁电流和负载的功率因数不变时,发电机的端电压和负载电流的关系。

同步发电机的外特性如图 17-11 所示。

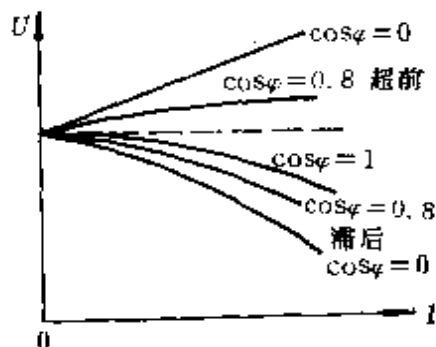


图 17-11 同步发电机的外特性

在感性和纯电阻性负载时,外特性都是下降的,但在容性负载时,外特性也可能是上升的。

### 2. 同步发电机的电压调整率、矢量图及基本参数的计算

(1) 同步发电机的电压调整率:所谓电压调整率,是指调节励磁使额定功率因数负载下发电机的端电压为额定电压,然后在保持励磁电流和转速不变的条件下卸去发电机的负载,此时端电压升高的标么值。它是表征同步发电机运行特性的重要数

据之一,用公式表示为

$$\Delta U \% = \frac{E_0 - U_e}{U_e} \times 100$$

电压调整率的大小取决于发电机本身的参数、负载的大小和性质。负载越大,功率因数角越滞后,电压调整率越大。容性负载时,电压调整率也可能是负值。通常所说的电压调整率一般均指发电机的额定电压调整率,即从额定负载到空载时端电压升高的标么值。

(2) 同步发电机矢量图如图 17—12 所示。

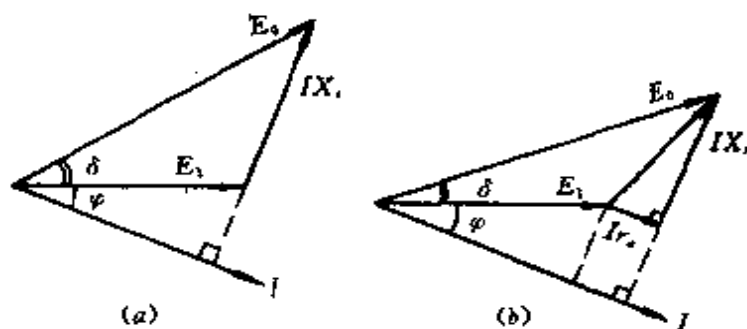


图 17—12 同步发电机矢量图

(a) 忽略电枢电阻 (b) 不忽略电枢电阻

图中:  $E_0$ ——在额定功率下运行时的内部感应相电压(V);

$E_1$ ——发电机端子上的额定相电压(V);

$I$ ——额定电枢电流(A);

$X_s$ ——同步电抗( $\Omega$ );

$r_a$ ——电枢电阻( $\Omega$ );

$\delta$ ——功率因数角。

(3) 同步发电机的基本参数计算:

① 同步阻抗:

(a) 同步电抗  $X_s(\Omega)$ , 为漏电抗与电枢反作用阻抗之和。

(b) 同步阻抗  $Z_s = r_a + jx_s (\Omega)$ ,  $r_a$  为电枢电阻 ( $r_a < x_s$ )。

(c) 同步阻抗百分比

$$Z_s \% = \frac{\sqrt{3} I_n Z_s}{U_n} \times 100$$

式中  $I_n, U_n$  —— 分别为额定电流和额定端电压(A、V)。

② 短路电流: 在同步发电机端子中发生三相短路时, 流过发电机的电流。即

$$I_s = \frac{U}{\sqrt{3} X_s} = \frac{I_n}{X_s \%}$$

式中:  $I_s$  —— 三相短路电流(A);

$X_s \%$  —— 同步电抗百分数,

$$X_s \% = \frac{\sqrt{3} U_n X_s}{U_n} \times 100。$$

③ 短路比(图 17—13): 产生额定空载电压和产生额定短路电流所需励磁电流之比, 称为同步发电机的短路比。即

$$K_s = \frac{I_{f0}(U_0=U_n)}{I_{fa}(I_a=I_n)} = \frac{I_{f0}}{I_{fa}} = \frac{1}{X_s \%}$$

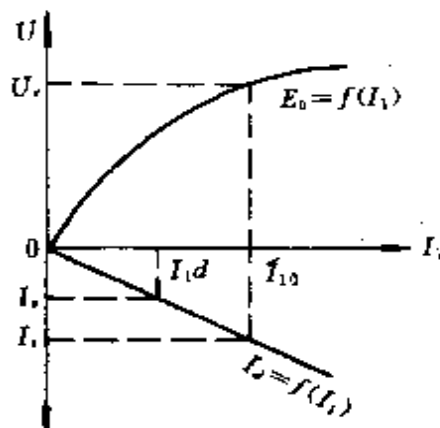


图 17—13 由空载和短路特性决定的短路比

### 3. 同步发电机的损耗及效率计算

同步发电机的损耗分为基本损耗和附加损耗两类。基本损耗包括定子基本铜耗  $P_{Cu}$ 、基本铁耗  $P_{Fe}$ 、磁场铜耗  $P_l$  和机械损耗  $P_j$ 。附加损耗  $P_{fj}$  又可分为许多项,但很难准确计算。对于 100kVA 以下的同步发电机,额定负载时附加损耗可按额定有功输出的 0.5% 来估算;其他负载时,附加损耗可按电枢电流的平方来修正。即

$$P_{fj} \approx 0.5\% \cdot P_e \left( \frac{I}{I_e} \right)^2$$

对于额定容量大于 100kVA 的同步发电机,则应通过详细计算或按规定的方法来测定。

发电机的效率可按式计算:

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{P_2}{P_2 + \Sigma \Delta P} = \frac{P_2}{P_2 + I^2 r_a + P_{Fe} + P_l + P_j} \times 100\%$$

式中:  $P_1$ —— 发电机输入功率(kW);

$P_2$ —— 发电机输出功率(kW),

$$P_2 = \sqrt{3} UI \cos \varphi \times 10^{-3};$$

$U$ —— 发电机端子上的额定线电压(V);

$I$ —— 负载电流(A);

$\cos \varphi$ —— 功率因数;

$r_a$ —— 同前。

**例 17—5** 有额定容量相同的 A、B 两台同步发电机并联运行,平均分担功率因数为滞后 0.8 的 2800kW 负荷。现增加发电机 A 的励磁,使其功率因数为 0.7,试求发电机 B 的功率因数及 A 和 B 发电机所发出的无功功率各为多少?

**解** 励磁改变前,A、B 发电机每台视在功率和无功功率分别为

$$S = P/\cos\varphi = 2800/2 \times 0.8 = 1750(\text{kVA})$$

$$Q = S\sin\varphi = 1750 \times 0.6 = 1050(\text{kVar})$$

设 A 发电机在功率因数  $\cos\varphi_A$  为 0.7 时的无功功率为  $Q_A$ , B 发电机的无功功率为  $Q_B$ , 功率因数  $\cos\varphi_B$ , 则

$$\begin{aligned} Q_A &= P\sin\varphi_A/\cos\varphi_A = 2800 \times 0.7/2 \times 0.7 \\ &= 1420(\text{kVar}) \end{aligned}$$

无功环流为

$$\Delta Q = Q_A - Q = 1420 - 1050 = 370(\text{kVar})$$

由矢量图 17—14 得 B 发电机的无功功率为

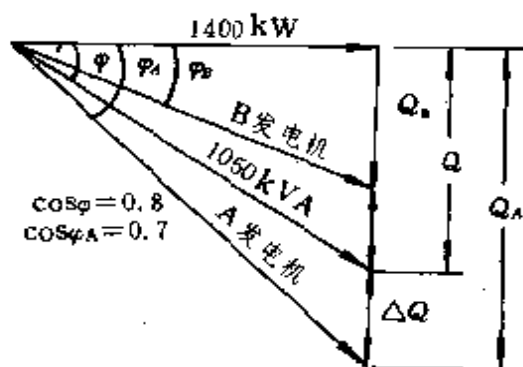


图 17—14 矢量图

$$Q_B = Q - \Delta Q = 1050 - 370 = 680(\text{kVar})$$

因此, B 发电机的功率因数为

$$\cos\varphi_B = \frac{1400}{\sqrt{1400^2 - 680^2}} = 0.9$$

### 第三节 电动机改成发电机 和柴油发电机的计算

在偏远地区或缺乏电源的情况下,可以用鼠笼式感应电动

机和绕线式感应电动机,加装适当的电容器,由动力带动,作为发电机使用。

带动感应发电机所需的转速,在配足适当电容器的情况下,是按照定子极对数来配置的。一对极配 3000r/min,二对极配 1500r/min,三对极配 1000r/min 等。

感应发电机最好容量在 25kVA 以内,如超过 28kVA 时,因所并联电容器的容量太大,经济性性能低,故一般不宜采用。

### 一、异步电动机改作发电机的计算

#### 1. 空载励磁电容的计算

励磁电容器的接法有 Y 形和  $\Delta$  形,一般多采用  $\Delta$  形接法,因为 Y 形接法的电容器是  $\Delta$  形接法的 3 倍。不过电容器的耐压, $\Delta$  形接法等于 Y 形接法的  $\sqrt{3}$  倍。

(1) 电容器 Y 形接法的计算(图 17—15):

$$C_0 = \frac{\sqrt{3} I_0}{2\pi f U_e} \times 10^6$$

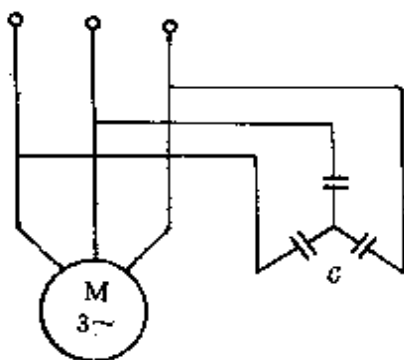


图 17—15 电容器 Y 形接法

(2) 电容器  $\Delta$  形接法的计算(图 17—16):

$$C_0 = \frac{I_0}{2\pi f \sqrt{3} U_e} \times 10^6$$

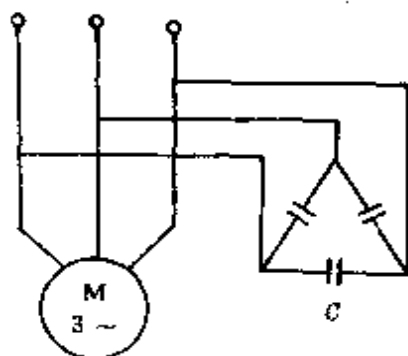


图 17—16 电容器  $\Delta$  形接法

式中： $C_0$ ——空载励磁电容器容量(每相)( $\mu\text{F}$ )  
 $U_e$ ——电动机的额定线电压(V)；  
 $I_0$ ——电动机在  $U_e$  下的空载励磁电流(A)；  
 $f$ ——频率， $f = 50\text{Hz}$ 。

(3) 电容器容量还可根据电动机的空载无功功率值计算：

$$C_0 = \frac{Q_0}{3 \times 2\pi f U_x^2} \times 10^9$$

式中： $Q_0$ ——电动机空载无功功率(kVar)；  
 $U_x$ ——电动机相电压，为 220V；  
其它符号同前。

## 2. 负载电容的计算

负载电容器的作用是补偿加上负载时电动机端电压的下降，接在负载侧。

(1) 当负载功率因数  $\cos\varphi = 1$ ，且满载时，用以补偿负载有功部分引起的无功损耗所需的负载补偿电容值，可按下式估算：

$$C_1 = 1.25C_0$$

式中： $C_0$ ——同前。

若为灯负荷，该电容接在灯负荷侧。

(2) 当负载功率因数  $\cos\varphi < 1$ , 且满载时, 必须再增加一部分补偿电容量, 以补偿负载的无功部分  $Q_1$ :

$$Q_1 = S_e \sin\varphi = S_e \sqrt{1 - \cos^2\varphi} \text{ kVar}$$

所增加这部分补偿电容量, 可按下列式计算:

$$C_2 = \frac{Q_1}{2\pi f U_e^2} \times 10^9$$

式中:  $C_2$ ——补偿负载无功部分所增加的补偿电容量( $\mu\text{F}$ );

$S_e$ ——异步发电机的额定容量(kVA),

$$S_e = P_e / \cos\varphi_e;$$

$P_e$ ——电动机额定功率(kW);

$\cos\varphi_e$ ——电动机额定功率因数。

若为电动机负荷, 该电容接在电动机负荷侧。

(3) 带额定负荷时总的负载补偿电容量  $C$ :

$$C = C_1 + C_2 = 1.25C_0 + C_2$$

3. 励磁电容产生的励磁电流的计算

$$I_{Iz} = \frac{\pi f' U_e' C}{500000}$$

式中:  $I_{Iz}$ ——励磁电容产生的励磁电流(A);

$U_e'$ ——异步发电机的额定电压(V),  $U_e' \approx U_e$ ;

$f'$ ——异步发电机的频率(Hz),  $f' \approx f$ ;

$C$ ——励磁电容器的电容量( $\mu\text{F}$ )。

4. 励磁电容、负载补偿电容的耐压要求

电容器  $\Delta$  接法时, 若采用交流电容器, 耐压不低于 380V; 若采用直流电容器(有正负极的直流电解电容器不能使用), 耐



压不低于 600V。

电容器采用 Y 接法时,交流或直流电容器的耐压分别不低于 220V 和 380V。

电容器最好采用绝缘较好、使用寿命较长的纸质、金属膜介质的静电油浸电容器。

当异步发电机主要用于照明或对频率质量要求不高的场合时,可以用提高转速的方法来稳定电压。经验表明,在仅接入空载励磁电容  $C_0$  的情况下,当负荷由零到满载时,将转速提高 10% 左右,就可以维持电压不变。

**例 17—6** 有一台 Y 形接法的三相异步电动机,额定功率  $P_e$  为 3kW,额定功率因数  $\cos\varphi_e$  为 0.81,额定转速  $n$  为 1420r/min,额定电压  $U_e$  为 380V,额定电流  $I_e$  为 6.8A,空载励磁电流  $I_0$  为 3.4A。求改为异步发电机时空载电容和负载电容。

**解** 电容器采用  $\Delta$  形接法

(1) 空载励磁电容:

$$C_0 = \frac{\sqrt{3}I_0}{2\pi fU_e} \times 10^6 = \frac{\sqrt{3} \times 3.4}{314 \times 380} \times 10^6 \approx 49(\mu\text{F})$$

(2) 负载补偿电容:

$$C_1 = 1.25C_0 = 1.25 \times 49 = 61.3(\mu\text{F})$$

$$C_2 = \frac{3Q}{2\pi fU_e^2} \times 10^6 = \frac{3P_e \sqrt{1 - \cos^2\varphi}}{2\pi fU_e^2 \cos\varphi} \times 10^6$$

$$= \frac{3 \times 3 \times 10^3 \sqrt{1 - 0.81^2}}{314 \times 380^2 \times 0.81} \times 10^6 = 84.3(\mu\text{F})$$

$$C = C_1 + C_2 = 61.3 + 84.3 = 145.6(\mu\text{F}), \text{取 } 146\mu\text{F}$$

5. 三相 380V 异步发电机励磁电容量的选用,见表 17—5 和表 17—16。

表 17—15 三相四级 380V 异步发电机  
励磁电容量选用参考表

功率 P (kW)	额定电流 I <sub>e</sub> (A)	△形接法		Y形接法	
		每相电容量 (μF)	总电容量 (μF)	每相电容量 (μF)	总电容量 (μF)
0.2	0.6	2.5 ~ 4	7.5 ~ 12	7.5 ~ 12	22.5 ~ 36
0.35	0.98	4 ~ 6	12 ~ 18	12 ~ 18	36 ~ 54
0.6	1.4	5 ~ 8	15 ~ 24	15 ~ 24	45 ~ 72
1	2.4	8 ~ 12	24 ~ 36	24 ~ 36	72 ~ 108
1.7	3.7	10 ~ 15	30 ~ 45	30 ~ 45	90 ~ 135
2.8	6	18 ~ 24	54 ~ 72	54 ~ 72	162 ~ 216
4.5	9.5	22 ~ 30	66 ~ 90	66 ~ 90	198 ~ 270
7	14	32 ~ 42	96 ~ 126	96 ~ 126	288 ~ 478
10	20	40 ~ 56	120 ~ 168	120 ~ 168	360 ~ 504
14	27	54 ~ 74	162 ~ 222	162 ~ 222	486 ~ 666
20	38	66 ~ 86	198 ~ 258	198 ~ 258	594 ~ 774
28	53	90 ~ 120	270 ~ 360	270 ~ 360	810 ~ 1080
40	75	110 ~ 140	330 ~ 420	330 ~ 420	990 ~ 1260
55	102	150 ~ 180	450 ~ 540	450 ~ 540	1350 ~ 1620

表 17—16 三相 380V、750 ~ 1500r/min  
的异步发电机在额定转速  
时,励磁所需的电容器(△  
接法)的三相总电容表

发电机容量 (kVA)	空 载		满 载			
	电容量 ( $\mu\text{F}$ )	无功功率 (kVar)	$\cos\varphi = 1$		$\cos\varphi = 0.8$	
			电容量 ( $\mu\text{F}$ )	无功功率 (kVar)	电容量 ( $\mu\text{F}$ )	无功功率 (kVar)
1	16	0.73	20.5	0.93	32	1.45
1.5	22.5	1.04	28.5	1.29	46.5	2.11
2	28	1.27	36	1.63	60	2.72
2.5	34	1.54	43	1.95	74	3.34
3	40	1.81	48	2.18	87	3.94
3.5	45	2.04	56	2.54	100	4.53
4	50	2.26	62	2.81	112	5.08
4.5	54	2.44	70	3.14	124	5.62
5	60	2.72	75	3.4	138	6.25
6	69	3.14	87	3.94	159	7.21
7	74	3.16	98	4.44	182	8.25
8	80	3.62	108	4.9	204	9.25
10	92	4.18	130	5.9	245	11.1
12	102	4.62	144	6.53	282	12.8
15	120	5.44	172	7.8	342	15.5

## 二、绕线式电动机改作发电机的计算

若在绕线式电动机的转子回路配上直流励磁机或加上硅整流电压,实际上就相当于同步发电机。绕线式电动机的绕组,一

般接成 Y 型

1. 直流励磁机容量的计算

(1) 采用图 17—17(a) 的接法时:

$$E_x = 1.41S_0U_{20}$$

$$I_x = 1.23I_{e20} \approx 1.23 \frac{570P_e}{U_{20}(1-s_0)}$$

(2) 采用图 11—15(b) 的接法时:

$$E_x = 1.23S_0U_{20}$$

$$I_x = 1.41I_{e20} \approx 1.41 \frac{570P_e}{U_{20}(1-s_0)}$$

根据以上所得的  $E_x(V)$  和  $I_x(A)$ , 便可选择电压和电流分别接近, 且不小于  $E_x$  和  $I_x$  值的直流机作励磁机。

式中:  $U_{20}$ ——电动机静止时的转子电压(两环间的值)(V);

$s_0$ ——电动机在额定转速下的转差率;

$I_{e20}$ ——转子额定电流(A)。

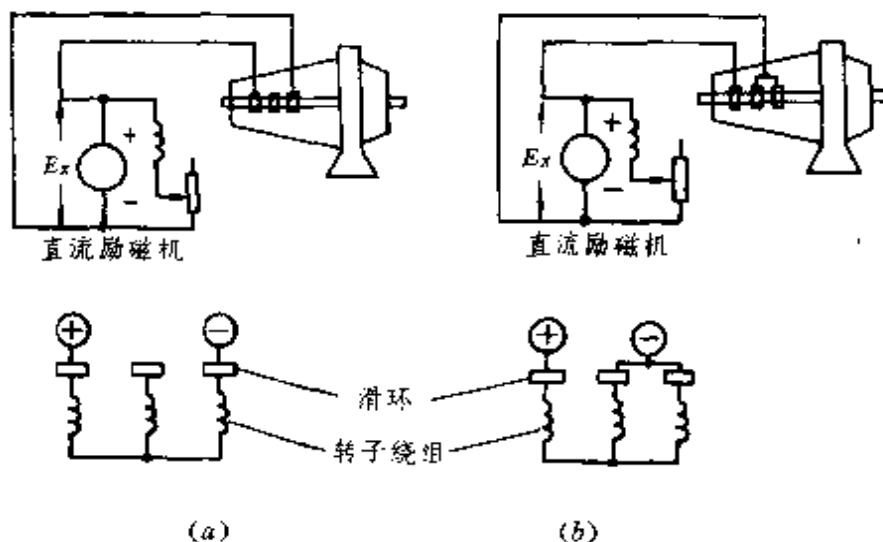


图 17 -17 励磁机的接线图

2. 硅整流变压器的输出电压和转子励磁电流的计算

绕线式异步电动机改为发电机的原理电路, 如图 17—18 所示。

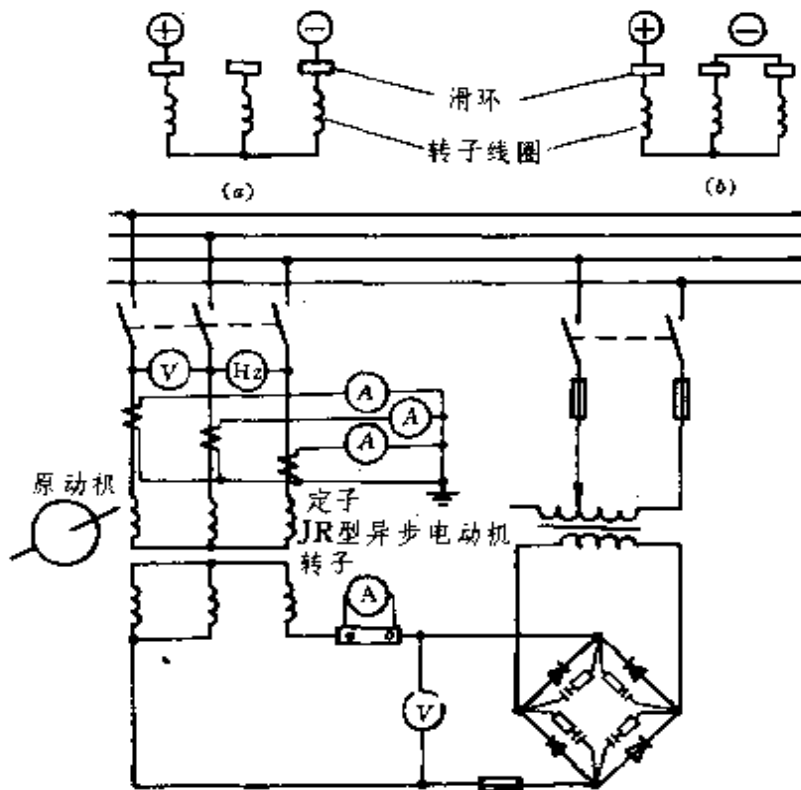


图 17—18 电动机改为发电机的原理图

采用图 17—18(a) 的接法时:

$$U_l = 1.4E_{2e}s_e$$

$$I_l = 1.23I_{2e} \approx 1.23 \frac{570P_e}{E_{2e}(1-s_e)}$$

采用图 11—16(b) 的接法时:

$$U_l = 1.2E_{2e}s_e$$

$$I_l = 1.4I_{2e} \approx 1.4 \frac{570P_e}{E_{2e}(1-s_e)}$$

式中:  $U_l$  —— 硅整流变压器的输出电压(V);

$I_l$  —— 电动机转子的励磁电流(A);

$s_e$  —— 额定异步转速的转差率,

$$s_e = \frac{n_{1e} - n_{2e}}{n_{1e}};$$

$n_{1e}$  —— 定子磁场额定转速(r/min);

$n_{2e}$ —— 转子磁场额定转速(r/min);

$E_{2e}$ —— 作异步运行时的转子滑环开路电压(V), 见铭牌;

$I_{2e}$ —— 作异步运行时的转子额定电流(A), 见铭牌;

$P_e$ —— 作异步运行时, 电动机额定出力(kW), 见铭牌。

### 3. 硅整流元件的选择

每个硅整流元件所承受的反向电压最大值及平均电流, 可按下列式计算:

$$U_{a/m} = \sqrt{2} U_t$$

$$I_a = \frac{I_t}{2}$$

式中:  $U_{a/m}$ —— 反向电压最大值(V);

$I_a$ —— 平均电流(A)。

例 17—7 有一台 JR127—8 绕线式异步电动机, 已知额定参数如下:

$P_e$  为 130kW,  $n_{2e}$  为 792r/min,  $U_e$  为 380/220V,  $I_e$  为 240/415A, 接法 Y/ $\Delta$ , 转子电压  $E_{2e}$  为 296V, 转子电流  $I_{2e}$  为 261A, 如何改成同步发电机运行?

解

(1) 绕线转子励磁接线的选择: 选用图 17—17(a) 和 (b) 任一种接法均可。现以图 17—17(a) 的接法为例说明。

(2) 选择整流变压器: 按图 17—17(a) 的接法, 转子励磁电流  $I_t$  及整流变压器次级电压  $U_t$  可按下列公式计算:

$$I_t = 1.4 I_{2e} = 1.4 \times 261 = 365.4(\text{A})$$

$$U_t = 1.2 E_{2e} s_e = 1.2 \times 296 \times (750 - 729) / 750 \\ \approx 10(\text{V})$$

整流变压器容量近似值为

$$U_t I_t = 370 \times 10 \times 10^{-3} = 3.7(\text{kVA})$$

考虑到适当裕量, 可选择 5kVA, 220/24V 的整流变压器。

整流变压器一次侧用一台单相自耦变压器来调压(5kVA)。

(3) 选择硅整流元件:由于选择单相整流变压器,所以只能采用单相桥式全波整流(有条件可采用三相桥式全波整流)。采用这种接法,每个元件所承受的反向电压(最大值)及平均电流可按下列公式计算:

$$U_{afm} = \sqrt{2}U_i \approx 1.4 \times 10 = 14(\text{V})$$

$$I_a = I_i/2 = 370/2 = 185(\text{A})$$

考虑到硅元件的裕量,可选择 2CZ200A/30V 的硅元件(电流大些、电压高的硅元件也可代用,但不能小于 185A/20V)。

(4) 硅整流元件的保护:如图 17—18(c) 所示。

(5) 原动机的选择:由于发电机是 130kW,750r/min,所以可选择 200 马力左右、转速在 750 ~ 800r/min 的柴油机或其他原动机,即能带动。

**例 17—8** 有一台单相并励发电机,额定功率为 20kW,额定转速为 1200r/min,额定电压为 230V,励磁电阻为 50.5Ω,电枢电阻为 0.05Ω。现要用它作为电动机使用,接到 220V 电源上,电枢电流保持原额定值。试求作为电动机时的额定转速和额定功率。设电动机的效率为 0.85,并假定在这两种运行方式下磁通基本不变。

**解** 发电机时电枢的额定电流为

$$\begin{aligned} I_a &= P_e/U_e + U_e/R_f \\ &= 20 \times 10^3/230 + 230/50.5 = 91.5(\text{A}) \end{aligned}$$

感应电动势为

$$\begin{aligned} E_a &= U_e + I_a R_a = 230 + 91.5 \times 0.05 \\ &= 234.6(\text{V}) \end{aligned}$$

因  $E_a = C_e \phi n$ ,故

$$C_e \phi = E_a/n = 234.6/1200 = 0.196$$

当作为电动机使用时,电动机的反电势为

$$E'_a = U' - I'_a R_a$$

按题意,  $U' = 220\text{V}$ ,  $I'_a = I_a$

所以  $E'_a = 220 - 91.5 \times 0.05 = 215.4(\text{V})$

又因两种运行方式下的磁通不变, 即  $C_e \phi' = C_e \phi$ , 故电动机额定转速为

$$n'_e = \frac{E'_a}{C_e \phi'} = \frac{215.4}{0.196} = 1099(\text{r/min})$$

电动机的输入功率为

$$\begin{aligned} P'_1 &= U' I'_a = U' (I'_{I2} + I'_a) \\ &= 220 \times (220/50.5 + 91.5) \times 10^{-3} = 21.1(\text{kW}) \end{aligned}$$

电动机的额定功率为

$$P'_2 = P'_1 \eta = 21.1 \times 0.85 = 17.9(\text{kW})$$

### 三、柴油发电机计算

#### 1. 柴油发电机组的选型

(1) 电站的总容量: 为了适应负荷的变化, 电站运行机组实际输出功率应有一定的富裕容量。富裕容量一般为实际运行容量的  $10 \sim 15\%$ 。电站总容量包括实际运行机组的容量与备用机组容量之和。

(2) 机组台数: 机组台数应根据电力负荷的大小、供电可靠性的要求等条件来决定, 一般应不少于两台, 不多于  $6 \sim 7$  台。当发电机组采用自动电压调整器时, 同时并列运行的机组台数不宜超过  $4 \sim 5$  台。

#### (3) 单机容量:

① 内燃机功率的标定值, 按其用途和使用特点可分为:  $15\text{min}$  功率、 $1\text{h}$  功率、 $12\text{h}$  功率和持续功率四种。

② 陆用固定电站用柴油机铭牌标定的是  $12\text{h}$  功率和持续功率两种。

③  $12\text{h}$  功率为柴油机允许连续运行  $12\text{h}$  的最大有效功率, 其



中包括超过 12h 功率 10% 的情况下连续运行 1h。

④ 持续功率为柴油机允许长期连续运行的最大有效功率，通常持续功率为 12h 功率的 90%。

⑤ 柴油机的标定功率是指规定大气状况下发出的功率。

陆用柴油机：环境温度为 20°C，大气压力为 101.325kPa，相对湿度为 60%。

船用柴油机：环境温度为 30°C，大气压力为 101.325kPa，相对湿度为 60%。

⑥ 当柴油机运行在与标准大气状况不一致的场合，应修其功率。修正后发电机的功率按下式计算：

$$P_e = K_1 \eta (K_2 K_3 N_e - N_p)$$

式中： $P_e$ ——发电机的额定功率(kW)；

$K_1$ ——功率变换系数，为 0.736kW/PS；

$\eta$ ——发电机效率；

$K_2$ ——柴油机功率修正系数，见表 17—17；

$K_3$ ——环境修正系数，见表 17—18；

$N_e$ ——柴油机额定功率(PS)；

$N_p$ ——柴油机风扇消耗功率(PS)。

表 17—17 功率修正系数  $K_2$

连续工作时间	$K_2$
在 12h 以内	1.0
持续运行	0.9

表 17—18 环境修正系数  $K_3$

海拔高度(m)	环境温度 °C	$K_3$
0	20	1.0
0	40	0.87
1000	20	0.87

(4) 燃油耗油量计算:柴油机每小时耗油量可按下式计算:

$$g_u = \frac{1.36N_f}{\eta_f\eta_t}q_c \times 10^{-3}$$

式中: $g_u$ ——柴油机耗油量(kg/h);

$N_f$ ——发电机负荷(kW);

$\eta_f$ ——发电机效率(%),由制造厂提供。如无资料,可参下述数值选取:功率为48~200kW时

$\eta_f = 89.5 \sim 92\%$ ;功率为300~1000kW时  $\eta_f = 92 \sim 95\%$ ;

$\eta_t$ ——传动效率(%);

$q_c$ ——柴油机的燃油消耗率(g/HP·h),由制造厂提供。

(5) 日用油箱容积计算:日用油箱一般可按每班上一次油来考虑。为防火安全,机房内燃油总贮油量不宜超过5t。

日用油箱容积可按下式计算:

$$V = \frac{g_u\tau}{\gamma A}$$

式中: $V$ ——油箱容积( $m^3$ );

$\tau$ ——供油时间,一般可取9~10h;

$\gamma$ ——燃油比重( $kg/m^3$ );

$A$ ——容积系数,一般可取0.9;

$g_u$ ——同前。

(6) 润滑油耗油量计算:柴油机润滑油耗油量可按下式计算:

$$g_r = \frac{1.36N_f}{\eta_f\eta_t}q_r \times 10^{-3}$$

式中: $g_r$ ——润滑油耗油量(kg/h);

$q_r$ ——柴油机在额定功率时的润滑油消耗率(g/HP·h),可参表17—19;

其它符号同前。

表 17—19 柴油机标定功率时润滑油消耗率

柴油机系列	135	160	250	350
润滑油消耗率 g/HP·h	≤ 2.5	2 ~ 4	< 3	< 4

(7) 冷却水量的计算：

$$g_s = \epsilon N_e \frac{q_c Q_H}{C(t_2 - t_1)}$$

式中： $g_s$ ——冷却水量(kg/h)；

$\epsilon$ ——冷却水带走的热量与燃料在气缸中燃烧放热量的百分比(%)，一般四冲程柴油机  $\epsilon = 25 \sim 40\%$ ；

$Q_H$ ——燃油低位发热量，可取 41868kJ/kg；

$C$ ——水的比热(kj/kg·°C)；

$t_1$ ——柴油机进水温度(°C)；

$t_2$ ——柴油机出水温度(°C)，它受冷却水硬度的限制，可参表 17—20；

其它符号同前。

表 17—20 柴油机允许出水温度

水的暂时硬度		允许出水温度
(epm)	(德国度)	(°C)
< 1.4	< 4	< 90
1.4 ~ 2.5	4 ~ 7	< 70
> 2.5	> 7	< 60

(8) 冷却水泵的选择：

① 冷却水泵流量  $G$ ：

$$G = KG,$$

式中： $K$ ——裕度系数，可取 1.2 ~ 1.3；

$G$ ——在额定负荷下柴油机每小时所需的全部冷却水量 ( $\text{m}^3/\text{h}$ )。

② 冷却水泵扬程  $H$ ：

$$H = H_1 + H_2 + H_3 + H_4 + H_5 + H_6$$

式中： $H_1$ ——水泵轴中心至吸水管最低水位的高度 (m)；

$H_2$ ——吸水管的阻力损失 (m)；

$H_3$ ——水泵轴中心至冷却装置出口水管中心线的高度差 (m)；

$H_4$ ——柴油机冷却水套内部阻力要求的最小水头 (m)；

$H_5$ ——压力管路阻力损失 (m)；

$H_6$ ——冷水塔或喷水池喷嘴所需压力 (m)。

一般中小型柴油机内部阻力损失及要求最小水头，见表 17-21。

表 17-21 柴油机内部阻力损失及要求最小水头

柴油机系列	阻力损失 (m)	要求最小水头 (m)
135	3 ~ 4	6
160	3 ~ 5	6
250	5 ~ 7	10
350	10	13

(9) 空压机的选择：电站的空压机是供柴油发电机启动用的，一般应不少于两台。选择空压机时，应满足下列条件：

① 空压机的工作压力应满足柴油机最大启动压力的要求，一般固定式柴油机的最大启动压力为 1960 ~ 2940kPa。

国产柴油机的启动压力值见表 17-22。

表 17—22 柴油机空气起动的参数

柴油机 系 列	起 动 压 力 (kPa)		空气瓶容积 (L)	连续起 动 次 数	环 境 温 度 (°C)
	最 高	最 低			
160	2452	1373	80	6	≥ 8
250	2059	1471	306	6	≥ 8
300	2942	1177	500	6	≥ 8
350	2452	1961	740	6	≥ 5

② 空压机的容量应能在 15 ~ 30min 内充满最大的起 动空 气瓶。容量按下式计算：

$$V_c = \frac{V_p(H_1 - H_3) \times 10^{-3}}{\tau H_a}$$

式中： $V_c$ ——空压机的容量(m<sup>3</sup>/h)；

$V_p$ ——起 动空 气瓶容积(L)；

$H_a$ ——大 气压力(kPa)；

$H_1$ ——最 高起 动压力(kPa)；

$H_3$ ——空 气瓶最 小充 气压力(kPa)，一般取 490kPa；

$\tau$ ——充 满最 大一个空 气瓶所 需小 时数，一般取 0.25 ~ 0.5h。

(10) 空 气瓶容积计算：

$$V_p = \frac{zqV_cH_a}{H_1 - H_2}$$

式中： $V_p$ ——空 气瓶容积(L)；

$z$ ——起 动次 数，一般取 6；

$q$ ——起 动时 的空 气耗 量与 气 缸容 积之 比，可 取 6 ~ 9；

$V_c$ ——柴 油机 气 缸的 总容 积(L)；

$H_2$ ——最 低起 动压力(kPa)；

其它符号同前。

空气瓶的总容积也可按  $1 \sim 1.5L/HP$  估算

#### 第四节 励磁机及直流系统计算

##### 一、自动调整励磁装置参数的选择

1. 发电机空载时调整装置的输出电流和磁场变阻器整定值的计算

$$I_{0zt} = (0.15 \sim 0.20)I_{0f}$$

$$R_{cz} = \frac{U_{0zf} - U_{0z}}{I_{0f} - I_{0zt}}$$

式中： $I_{0zt}$ ——发电机空载时自动调整励磁装置输出电流(A)；

$R_{cz}$ ——磁场变阻器的电阻整定值( $\Omega$ )；

$I_{0f}$ ——发电机空载时励磁机的励磁电流(A)；

$U_{0zf}$ ——发电机空载励磁电压(V)；

$U_{0z}$ ——发电机空载时励磁机的励磁电压(V)。

2. 发电机额定负载时调整装置的输出电流和励磁机自励系统的计算

$$I_{ext} = I_{ef} - \frac{U_{ef} - U_{ef}}{R_{cz}}$$

$$K_t = \frac{U_{ef} - U_{ef}}{R_{cz}I_{ef}}$$

式中： $I_{ext}$ ——发电机额定负载时自动调整励磁装置的输出电流(A)；

$K_t$ ——发电机额定负载时励磁机自励系数；

$I_{ef}, U_{ef}$ ——发电机额定负载时励磁机的励磁电流和励磁电压(A、V)；

$U_{ef}$ ——发电机额定负载时的励磁电压(V)；

$R_{cz}$ ——同前。

3. 调整装置的输出电压和输出电流的计算

$$I_{etz} \leq 0.75I_{zsm}$$

$$U_{etz} \leq 0.75U_{zsm}$$

式中： $I_{etz}$ 、 $U_{etz}$ ——发电机额定负载时调整装置的输出电流和电压(A、V)；

$I_{zsm}$ 、 $U_{zsm}$ ——调整装置的最大输出电流和最大输出电压(A、V)。

4. 电流互感器的选择

强励时，电流互感器的二次电压应满足下式要求：

$$U_{2im} \geq \frac{(1 - K_1)K_{TA}I_d U_d}{0.58K_2K_3I_{ef}K_{lx}}$$

式中： $U_{2im}$ ——强励时电流互感器的最大电压(V)；

$K_1$ ——励磁机自励系数；

$K_2$ ——调整装置调节能力系数，取 0.48 ~ 0.58；

$K_3$ ——调整装置强励能力系数，取 0.3 ~ 0.4；

$K_{TA}$ ——电流互感器变比；

$K_{lx}$ ——接线系数，两相差接时为 1.73；两相电流和第三相差接时为 2；

$I_{ef}$ ——发电机额定电流(A)。

强励时，电流互感器所能保证的最大电压可按下式近似计算：

$$U_{2im} = 0.022W_{2l}S_l(1000 + 0.25IW_{1l}) \times 10^{-3}$$

式中： $W_{2l}$ ——电流互感器二次线圈匝数；

$S_l$ ——电流互感器铁芯截面(mm<sup>2</sup>)；

$IW_{1l}$ ——电流互感器一次安匝(A)。

二、发电机和励磁机灭磁电阻的计算

1. 发电机灭磁电阻的计算

为了限制灭磁时发电机转子两端产生的过电压,并保证必要的灭磁速度,装设发电机灭磁电阻。灭磁电阻可按下式选取:

$$R_{mf} = (4 \sim 5)R_{rf}$$

式中: $R_{mf}$ ——发电机灭磁电阻( $\Omega$ );

$R_{rf}$ ——发电机转子绕组热态电阻( $\Omega$ ),由制造厂提供,或

$$\text{按下式换算: } R_{rf} = R_1 \frac{234.5 + t_r}{234.5 + t_1}$$

$R_1$ ——发电机转子绕组在测定温度  $t_1$  时的电阻( $\Omega$ );

$t_r$ ——热态温度,按制造厂规定取  $75^\circ\text{C}$  或  $105^\circ\text{C}$ ;

$t_1$ ——测定温度( $^\circ\text{C}$ )。

灭磁电阻长期热稳定电流  $I_r$  可按下式计算:

$$I_r = (0.2 \sim 0.25)I_{df}$$

式中: $I_{df}$ ——发电机额定励磁电流(A)。

灭磁电阻应按下式校验动稳定:

$$I_{ch} = (4 \sim 5)I_{df}$$

式中: $I_{ch}$ ——允许冲击电流(A)。

## 2. 励磁机灭磁电阻的计算

为了防止灭磁开关断开后励磁机端电压过高,以及便于处理励磁回路故障等,装设励磁机灭磁电阻。灭磁电阻可按下式选取:

$$R_{md} = 10R_{rd}$$

式中: $R_{md}$ ——励磁机灭磁电阻( $\Omega$ );

$R_{rd}$ ——励磁机励磁绕组热态电阻( $\Omega$ ),由制造厂提供,或按前述方法换算。

励磁机灭磁电阻长期热稳定电流  $I_R$  可按下式计算:

$$I_R = 0.05I_d$$

式中: $I_d$ ——励磁机的额定励磁电流(A)。

## 三、备用励磁机的选择



备用励磁机的选择应满足下述要求:

1. 额定电压  $U_c$  和额定容量  $P_c$  的要求

$$U_c \geq I_{\varphi} R_r$$

$$P_c \geq I_{\varphi}^2 R_r$$

式中:  $R_r$ ——最大一台发电机励磁绕组的热态阻值( $\Omega$ );

$I_{\varphi}$ ——最大一台发电机低功率因数( $\cos\varphi = 0.7$ )运行时的励磁电流(A),估算可按  $1.1I_d$  考虑;

$I_d$ ——最大一台发电机额定励磁电流(A)。

2. 最小工作电压  $U_{\min}$  和功率  $P_{\min}$  的要求

$$U_{\min} \leq I_{0l} R$$

$$P_{\min} \leq I_{0l}^2 R$$

式中:  $I_{0l}$ ——最小一台发电机的空载励磁电流(A);

$R$ ——最小一台发电机转子绕组冷态电阻( $\Omega$ )。

3. 备用励磁机的最大输出电压  $U_{\max}$  和功率  $P_{\max}$  的要求

$$U_{\max} \geq 2I_c R_r$$

$$P_{\max} \geq 4I_c^2 R_r$$

式中符号同前。

备用励磁机在最大输出电压和最大输出功率下工作时间一般应不小于 1min;当磁场变阻器被短路后,电压上升率应满足每秒 2 倍额定电压的要求。

4. 备用励磁机的电动机容量  $P_d$  的要求

$$P_d \geq 2U_c I_c$$

或

$$P_d \geq 0.5P_{\max}$$

式中:  $U_c$ 、 $I_c$ ——备用励磁机额定电压和额定电流(V、A);

$P_{\max}$ ——备用励磁机最大输出功率(W)。

5. 备用励磁机飞轮力矩的要求

$$GD^2 \geq \frac{42.85 \times 10^6}{n_r^2}$$

式中： $GD^2$ ——飞轮力矩( $N \cdot m^2$ )；

$n_c$ ——备用励磁机额定转速(r/min)；

$P_c$ ——备用励磁机额定容量(kW)。

当机组的固有力矩  $GD_0^2$  小于  $GD^2$  时，则应装附加飞轮。附加飞轮力矩  $GD_f^2$  为

$$GD_f^2 = GD^2 - GD_0^2$$

#### 6. 兼作蓄电池充电机时的要求

(1) 满足电压调整范围，最高为 320 ~ 360V。

(2) 满足最大充电电流(以充电时间为 6 ~ 7h 计算)的要求。

7. 副励磁机的参数，必须满足备用励磁机的要求。

### 四、蓄电池组的选择

发电站或变电所中一般采用 GG 型或 GGF(GGM) 型铅酸式固定蓄电池。

#### 1. 蓄电池组容量的确定

蓄电池组为浮充电运行方式时，其容量按下述条件确定：

(1) 满足发电站或变电所事故全停电状态时的放电容量：

$$Q_c \geq 36I_{sg}/I_{d1}$$

式中： $Q_c$ ——蓄电池的 10h 放电容量(Ah)；

$I_{sg}$ ——事故负荷电流(A)；

$I_{d1}$ ——单位容量蓄电池在放电假想时间  $t_1$  内所允许的放电电流(A)，可由图 17—19 查得， $t_1 = \frac{K_A Q_{sg}}{I_{sg}}$  (单位：h)， $Q_{sg}$  为事故负荷计算容量(Ah)； $K_A$  为可靠系数，事故放电曲线为水平者，取 1.15；事故放电曲线为阶梯形者，取 1.1。

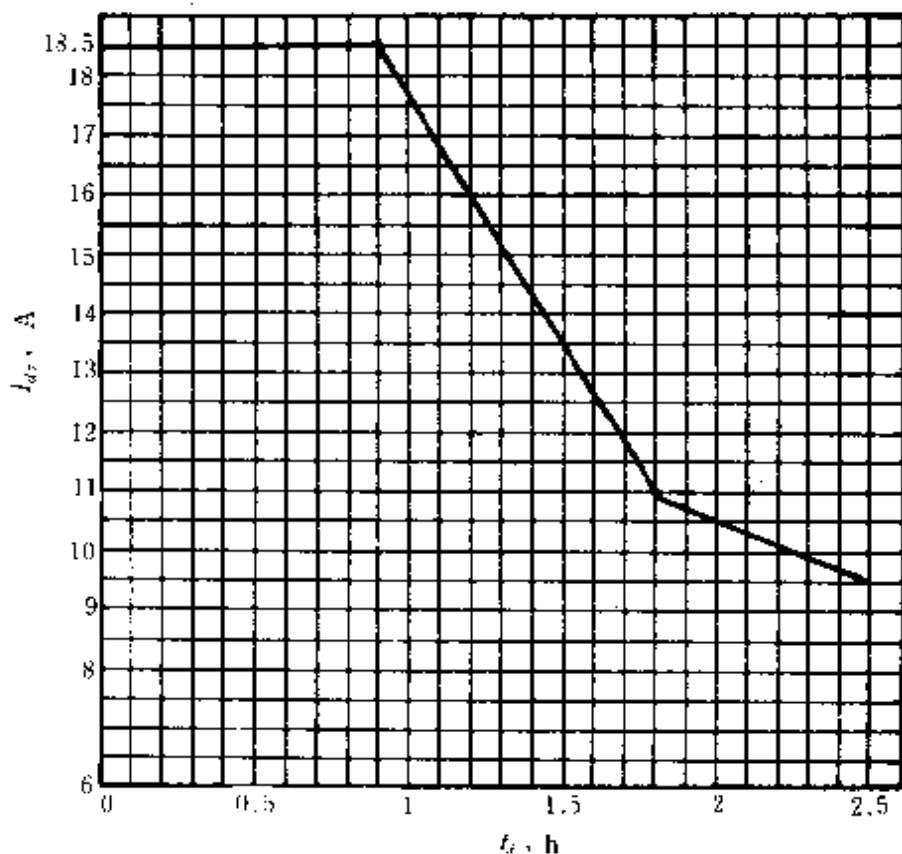


图 17—19 GG 型或 GGM 型蓄电池放电假想时间与放电电流曲线 (T = 15°C)

注:按本图选用 GGF 型蓄电池时,容量应增大 10%。

(2) 满足最大允许冲击负荷:

$$Q_c \geq 0.78(I_{sg} + I_{ch})$$

式中:  $I_{ch}$  —— 断路器最大合闸冲击电流(A)。

取上述计算结果的大者作为蓄电池的选择容量。

## 2. 蓄电池数量的确定

(1) 蓄电池数量的确定原则: 蓄电池数量应保证直流母线电压  $U_c$  在事故放电终了和充电末期维持在比受电设备电压高 5% 的水平。对于 110V 直流系统,  $U_c$  取 15V; 对于 220V 直流系

统,  $U_e$  取 230V。

蓄电池总数由事故放电末期确定。

(2) 蓄电池数量  $n$  的计算:

① 变电站:

$$n = U_e / U_{fm} = 230 / 1.75 = 130(\text{个})$$

式中:  $U_{fm}$ ——事故放电末期每个电池电压(V)。

② 变电所:

$$n = U_e / U_{fm} = 230 / 1.95 = 118(\text{个})$$

(3) 基本电池数  $n_0$  的计算: 基本电池数由充电末期确定, 在充电末期每个电池电压  $U_{cm}$  为 2.7V

$$n_0 = U_e / U_{cm} = 230 / 2.7 = 88(\text{个})$$

(4) 端电池数  $n_d$  的计算:

① 发电站:

$$n_d = n - n_0 = 130 - 88 = 42(\text{个})$$

② 变电所:

$$n_d = 118 - 88 = 30 \text{ 个}$$

(5) 浮充电时连接在直流母线上的蓄电池数  $n_v$  的计算:

$$n_v = U_e / U_v = 230 / 2.15 = 107(\text{个}), \text{实际为 } 106 \sim 108 \text{ 个。}$$

式中:  $U_v$ ——每个蓄电池在浮充电状态下的电压, 取 2.15V。

## 五、硅整流充电及浮充电设备的选择

### 1. 硅整流充电设备的选择

(1) 充电设备的电流  $I_c$ : 在发电站或变电所中, 蓄电池组的充电通常采用两段制。第一阶段的充电电流(即最大充电电流)可按下式计算:

$$I_{c1} = (0.1 \sim 0.125)Q_c$$

式中:  $I_{c1}$ ——第一阶段的充电电流(A);

$Q_c$ ——蓄电池组的 10h 放电容量(Ah)。

充电设备的电流  $I_c$  为

$$I_e = I_{c1} + I_{jc}$$

式中： $I_{jc}$ ——直流系统的经常负荷电流(A)。

(2) 充电设备的电压  $U_c$ ：

$$U_c = nU_{cm}$$

式中： $n$ ——蓄电池数量；

$U_{cm}$ ——充电末期每个电池的电压(V)。

对于 110V 直流系统, 选用 110 ~ 165V; 对于 220V 直流系统, 选用 220 ~ 330V, 最高电压最好选用 360V。

(3) 充电设备的容量  $P_c$ ：

$$P_c = I_c U_c = (0.1Q_e + I_{jc}) U_c$$

## 2. 硅整流浮充电设备的选择

(1) 浮充电设备的工作电流  $I_{fc}$ ：

$$I_{fc} = 0.0042Q_e + I_{jc}$$

(2) 浮充电设备的电压  $U_{fc}$ ；与充电机选择相同。

(3) 浮充电设备的容量  $P_{fc}$ ：

$$P_{fc} = I_{fc} U_c = (0.0042Q_e + I_{jc}) U_c$$

对于中小型变电所, 可采用一套硅整流设备, 兼作蓄电池组的充电和浮充电用; 对于大型变电所, 则应分开。

硅整流充电及浮充电设备见表 17—23。

## 六、控制信号馈线电缆和断路器合闸电流的选择

### 1. 控制信号馈线电缆截面的选择

(1) 按机械强度选择: 一般铜芯 电缆截面不小于  $2.5\text{mm}^2$ , 铝芯电缆截面不小于  $4\text{mm}^2$ 。

(2) 按允许电压降选择:

$$S \geq \frac{2\rho t_{js} I_{max}}{\Delta U_{ur}}$$

表 17—23 硅整流充电及浮充电设备

型 号	交流输入		直流输出		浮充稳压 范 围 (V)	调 压 方 式	外形尺寸 长 × 宽 × 高 (mm)
	相 数	电 压 (V)	电 流 (A)	电 压 (V)			
GVA-6/220 ~ 330	3	380	6	220 ~ 330	220 ~ 300	电抗 器或 自耦 变压 器调 压          可控 硅调 压	500 × 550 × 1500
GVA-12/220 ~ 330	3	380	12	220 ~ 330	220 ~ 300		500 × 550 × 1500
GVA-20/220 ~ 330	3	380	20	220 ~ 330			800 × 550 × 2360
GVA-25/110 ~ 165	3	380	25	110 ~ 165	110 ~ 130		500 × 550 × 1500
GVA-25/220 ~ 330	3	380	25	220 ~ 330	220 ~ 300		650 × 700 × 1500
GVA-50/110 ~ 165	3	380	50	110 ~ 165	110 ~ 130		650 × 700 × 1500
GVA-50/220 ~ 330	3	380	50	220 ~ 330	220 ~ 300		650 × 700 × 1500
KGVA-13.5/220 ~ 330	3	380	13.5	220 ~ 330			800 × 550 × 2360
KGCA-20.5/198 ~ 330	3	380	20.5	198 ~ 330	198 ~ 330		800 × 550 × 2360
KGCA-30/100 ~ 200	3	380	30	100 ~ 200			800 × 550 × 2360
KGCA-50/100 ~ 200	3	380	50	100 ~ 200			800 × 550 × 2360
KGCA-50/198 ~ 360	3	380	50	198 ~ 360			800 × 550 × 2360
KGCA-70/100 ~ 200	3	380	70	100 ~ 200			800 × 550 × 2360
KGCA-70/198 ~ 360	3	380	70	198 ~ 360		800 × 550 × 2360	
KGCA-100/198 ~ 360	3	380	100	198 ~ 360		800 × 550 × 2360	

式中：S—— 电缆或小母线最小截面(mm<sup>2</sup>)；

$\rho$ —— 电阻率，铜为 0.0184 $\Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$ ，铝为 0.031 $\Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$ ；

$L_{js}$ —— 电缆或小母线的计算长度(m)；

$I_{\max}$ —— 回路最大负荷电流(A)；

$\Delta U_{\text{允许}}$ —— 允许电压降(V)，对 220V 系统为 11V；对 110V 系统为 5.5V。

## 2. 断路器合闸电缆截面的选择

合闸网络电缆截面 应按断路器合闸时所允许的电压降这

一条件进行选择。计算步骤如下：

(1) 求出当蓄电池承受冲击负荷时，直流母线上的电压：

$$U_{chm} = nU_{dch}$$

式中： $U_{chm}$ ——冲击负荷时直流母线电压(V)；

$n$ ——冲击负荷时接至母线的蓄电池数；

$U_{dch}$ ——冲击负荷时单个蓄电池的电压(V)，可由图 17—20 查得。

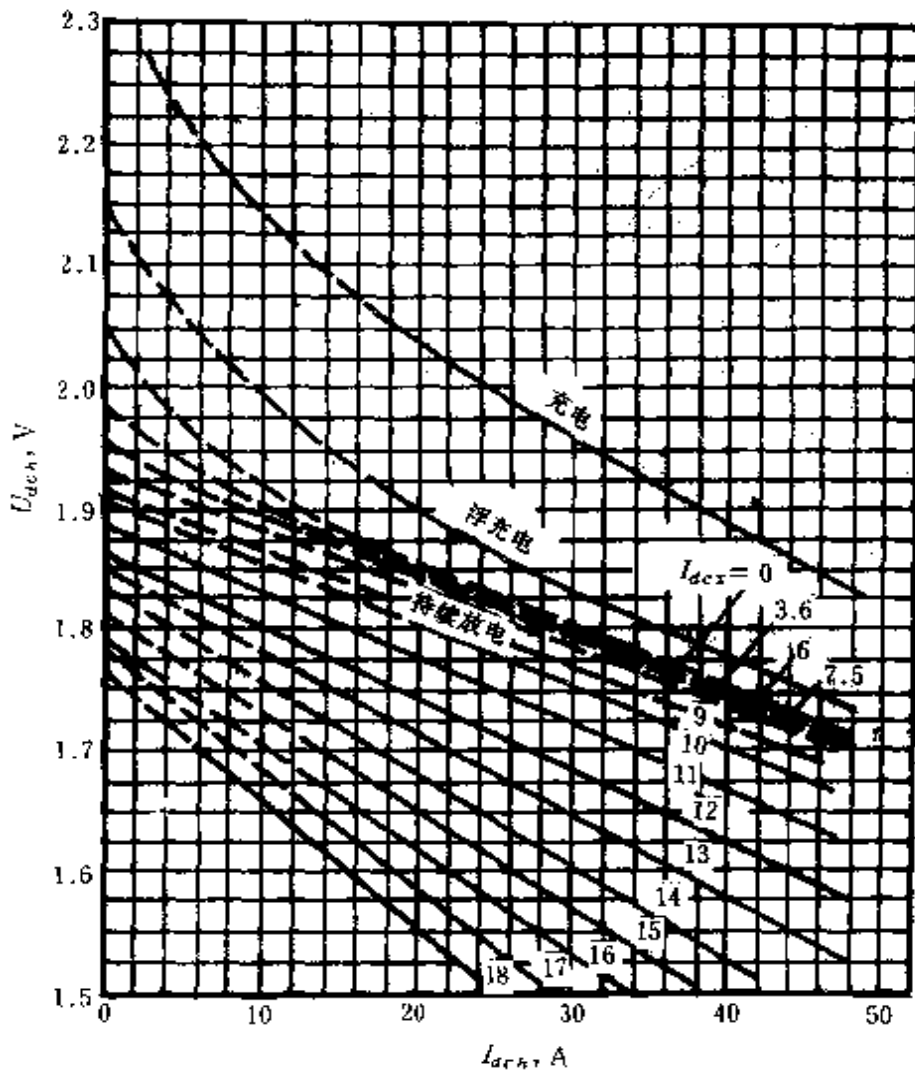


图 17-20 持续电流为  $I_{dxc}$  GG 型或 GGF(GGM) 型  
蓄电池短时冲击放电曲线

图 17—20 中单位容量蓄电池的持续放电电流  $I_{dex}$  和单位容量蓄电池的冲击电流  $I_{dch}$  为

$$I_{dex} = 36I/Q_e$$

$$I_{dch} = 36I_{ch}/Q_e$$

式中： $I$ —— 蓄电池组的负荷电流(A)；

$Q_e$ —— 蓄电池组 10h 放电容量(Ah)；

$I_{ch}$ —— 断路器合闸冲击电流(A)。

设计中可按浮充电曲线计算，此时  $n$  为 106 ~ 108 个。对于合闸网络接入专用合闸母线的直流系统，应按事故放电的曲线计算，相应式中的负荷电流  $I$  应改为事故负荷电流  $I_{sg}$ ，而  $n$  取与合闸母线固定联接的蓄电池个数。

(2) 计算电缆允许的电压降  $\Delta U_{ux}$ ：

$$\Delta U_{ux} = U_{eth} - K_i U_{de}$$

式中： $K_i$ —— 断路器最低允许合闸电压百分值；

$U_{de}$ —— 断路器合闸线圈额定电压(V)。

(3) 确定合闸电缆截面：

$$S = \frac{2Pl_{is}I_{ch}}{\Delta U_{ux}}$$

式中： $S$ —— 合闸电缆截面(mm<sup>2</sup>)。

其它符号同前。



## 第十八章 接地接零

### 第一节 基础知识及计算

#### 一、接地与接零的种类

电力系统和电气设备的接地与接零,按其用途可分(见图18—1):

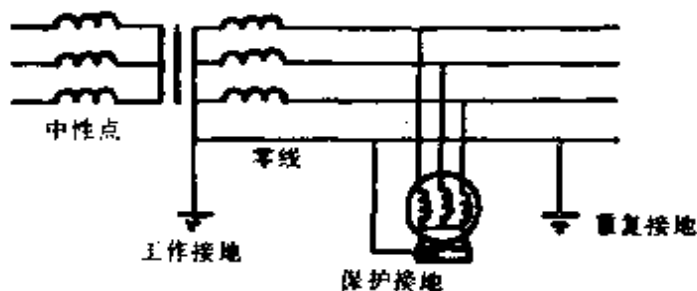


图 18—1 工作接地、重复接地和保护接地示意图

#### 1. 工作接地

将电力系统中运行需要的接地(如变压器或发电机的中性点、防止过电压的避雷器的引下线等)直接与地作金属连接,称工作接地。

#### 2. 重复接地

与变压器或发电机直接接地的中性点连接的中性线,称为零线;将零线上的一点或多点与地再次做电气连接,称重复接地。

### 3. 保护接零

在中性点直接接地的低压电网中,电气设备的金属外壳等与零线连接,称保护接零。

### 4. 保护接地

电气设备的金属外壳、钢筋混凝土电杆和金属杆塔由于绝缘损坏可能带电,为了防止这种电压危及人身安全而设置的接地,称保护接地,如图 18—2 所示。

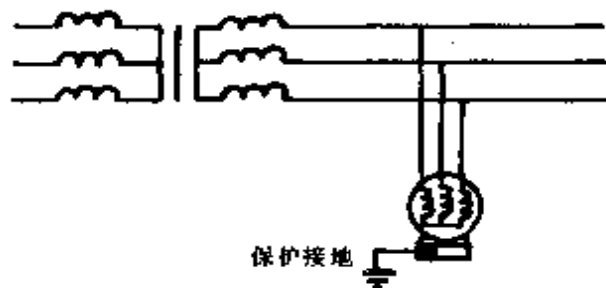


图 18—2 保护接地示意图

### 5. 过电压保护接地

为了消除雷击和过电压的危险影响而设的接地,称过电压保护接地。

### 6. 静电接地

为了消除生产过程中产生的静电而设的接地,称静电接地。

### 7. 屏蔽接地

为了防止电磁感应而对电气设备的金属外壳、屏蔽罩、屏蔽线的外皮或建筑物金属屏蔽体进行的接地,称屏蔽接地。

### 8. 电法保护接地

为了保护管道不受腐蚀,采用阴极保护或牺牲阳极保护等的接地,称电法保护接地。

此外,还有其它一些特殊设备的接地。

## 二、保护接地与保护接零的范围

保护接地适用于不接地(对地绝缘)电网;保护接零适用于低压中性点直接接地、电压为 380/220V 的三相四线制电网。

1. 应采取保护接地与保护接零的范围(除另有规定外)

(1)电机、变压器、电器、携带式及移动式用电器具等的底座和外壳。

(2)电力设备传动装置。

(3)互感器的二次绕组。

(4)配电屏与控制屏框架。

(5)屋内外配电装置的金属架构和钢筋混凝土架构,以及靠近带电部分的金属围栏和金属门。

(6)交、直流电力电缆的接线盒、终端盒外壳和电缆外皮,穿线钢管等。

(7)装有避雷线的电力线路杆塔。

(8)在非沥青地面的居民区内,无避雷线、小接地短路电流架空电力线路的金属杆塔和钢筋混凝土杆塔。

(9)安装在配电线路上的开关、电容器等电力设备。

(10)铠装控制电缆的外皮、非铠装或非金属护套电缆的 1~2 根屏蔽芯线。

2. 可不采取保护接地与保护接零的范围(除另有规定外)

(1)在木质、沥青等不良导电地面的干燥房间内,交流额定电压 380V 及以下、直流额定电压 440V 及以下的电力设备外壳。但当维护人员可能同时触及电力设备外壳和接地物件时除外。

(2)安装在配电屏、控制屏和配电装置上的电气测量仪表、继电器和其它低压电器等的外壳,以及当发生绝缘损坏时,在支持物上不会引起危险电压的绝缘子金属底座等。

(3)安装在已接地的金属架构上的设备,如套管等(应保证

电气接触良好)。

(4)与已接地的机床底座之间有可靠电气接触的电动机和电器的外壳。

(5)额定电压 220V 及以下的蓄电池室内的支架。

保护接地与保护接零的范围见表 18—1。

表 18—1 保护接地与保护接零的范围

序号	对地电压	房屋特征			
		无高度危险	有高度危险	特别危险包括有着火危险及室外装置	有爆炸危险
1	2	3	4	5	
I	65V 以下	不需要接地或接零(在固定式 36V 或 12V 低压装置中,常将线路的一相接地作为变压器绝缘击穿和一次电压窜入二次绕组的保护装置)			防止静电荷引起火花, Q—1、Q—2 级房屋中,应将保存易燃体的金属容器或含有这些液体的器械、运送这些液体的管子、过滤器及液体流过时与金属包皮摩擦的部分,予以接地
II	65~150V	不需要接地或接零	手柄、飞轮及与机床有连接的电机外壳	在正常情况下,与带电部分绝缘的器械、电机及配电屏的金属外壳及构架、电缆接头盒、中间接线盒的金属外壳、电缆的金属包皮及金属保护管等	同序号 I—5 及 I—4 中的元件
III	150~1000V	同序号 I—4 中的元件	同序号 I—4 中的元件	同序号 I—4 中的元件	同序号 I—5 及 I—4 中的元件
IV	1000V 以上	在正常条件下,与带电部分绝缘的金属部分、电气设备的支架和围栅结构的所有金属部分及房架、平台和可能带电且人能接触的结构部分			同序号 I—5、II—3 及 II—4 的元件

### 三、接触电压、跨步电压和对地电压等计算

#### 1. 接触电压和跨步电压的计算

接触电压和跨步电压的计算目前尚无统一规定,下面介绍几种常用的计算方法

(1)大接地短路系统的允许值:

$$\text{接触电压 } E_i = \frac{250 + 0.25\rho_s}{\sqrt{t}}$$

$$\text{跨步电压 } E_k = \frac{250 + \rho_s}{\sqrt{t}}$$

式中:  $E_i$ 、 $E_k$ ——接触电压和跨步电压(V);

$\rho_s$ ——人足站立地面的土壤电阻率( $\Omega \cdot m$ );

$t$ ——短路电流持续时间(s)。

(2)小接地短路电流系统的允许值:

$$\text{接触电压 } E_i = 50 + 0.05\rho_s$$

$$\text{跨步电压 } E_k = 50 + 0.2\rho_s$$

在特别潮湿的接地装置附近,人体的接触电压应不超过10V,跨步电压应不超过20V。大牲畜如牛等的跨步电压应不超过8V。

(3)实际计算值:接地装置水平敷设时,最大接触电压及跨步电压可按下列公式计算:

$$\text{最大接触电压 } E_{im} = K_m K_i \rho \frac{I}{l}$$

$$\text{最大跨步电压 } E_{km} = K_s K_i \rho \frac{I}{l}$$

式中:  $E_{im}$ 、 $E_{km}$ ——最大接触电压和最大跨步电压(V);

$\rho$ ——平均土壤电阻率( $\Omega \cdot m$ );

$I$ ——流经接地装置的最大单相短路电流(A);

$K_m$ 、 $K_s$ ——与接地网布置方式有关的系数,可取  $K_m = 1$ 。

$$K_s = 0.1 \sim 0.2;$$

$K_f$  —— 接地电流不均匀修正系数, 可取 1.25;

$l$  —— 接地网全长 (m)。

## 2. 各种接地、接零保护的的对地电压计算

(1) 中性点不接地系统, 电气设备接地和不接地 (图 18—3):

① 中性点不接地系统, 电气设备不接地: 图 18—3(a) 为

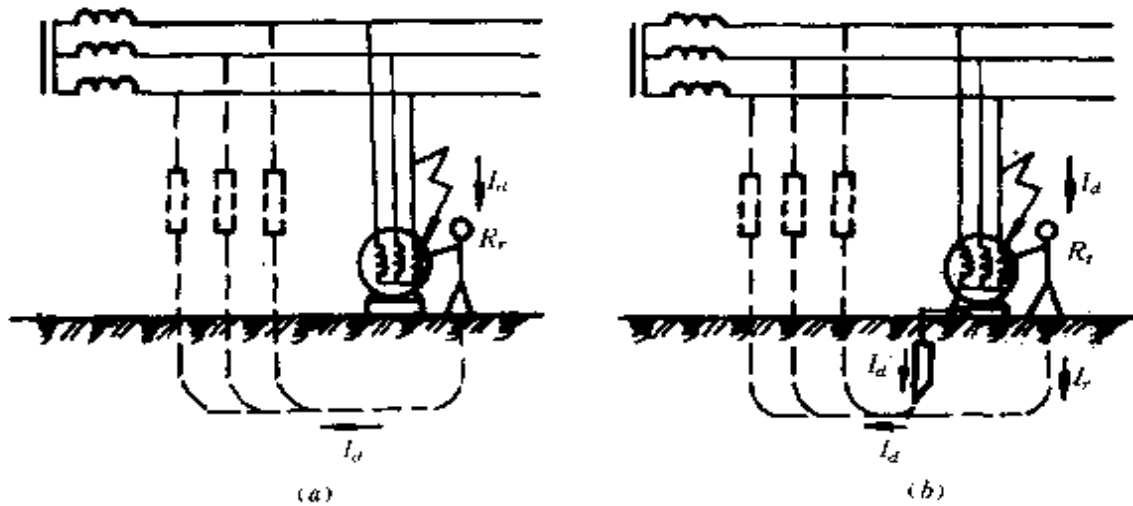


图 18—3 设备不接地或接地  
(a) 设备不接地 (危险); (b) 设备接地保护 (安全)

电气设备不接地的情况。如果电网各相对地绝缘阻抗相等, 则漏电设备对地电压  $U_d$  为

$$U_d = \frac{3UP_r}{|3R_r + Z|}$$

式中:  $U$  —— 电网相电压 (V);

$R_r$  —— 人体电阻 ( $\Omega$ );

$Z$  —— 电网每相对地绝缘阻抗 ( $\Omega$ )。

当系统的绝缘电阻大大高于分布电容的容抗时, 对地电压

为

$$U_d = \frac{3UR_r}{|3R_r + jX_c|} = \frac{3UR_r}{\sqrt{9R_r^2 + \frac{1}{\omega^2 C^2}}}$$

式中：C——电网每相对地分布电容(F)；

$X_c$ ——电网每相对地容抗( $\Omega$ )；

$\omega$ ——电源角频率， $\omega = 2\pi f$ 。

流过人体的电流  $I_r$  为

$$I_r = I_d = \frac{U_d}{R_r} = \frac{3U}{\sqrt{9R_r^2 + \frac{1}{\omega^2 C^2}}}$$

② 中性点不接地系统，采取保护接地，图 18—3(b) 为电气设备采取保护接地的情况。漏电设备外壳对地电压  $U_d$  为

$$U_d = \frac{3UR_d}{|3(R_d // R_r) + Z|}$$

式中： $R_d$ ——保护接地电阻( $\Omega$ )；

其它符号同前。

因  $R_d \ll R_r$ ，故有

$$U_d = \frac{3UR_d}{|3R_d + Z|}$$

因为  $R_d \ll Z$ ，所以漏电设备对地的电压大大降低。

流过人体的电流为

$$I_r = \frac{U_d}{R_r} \approx \frac{R_d}{R_r + R_d} I_0$$

式中： $I_d$ ——接地电流(A)。

当  $R_d$  足够小时,  $I_r$  很小, 能起到保安作用。

(2) 中性点接地系统, 电气设备不接地或接零、保护接地、保护接零(图 18—4):

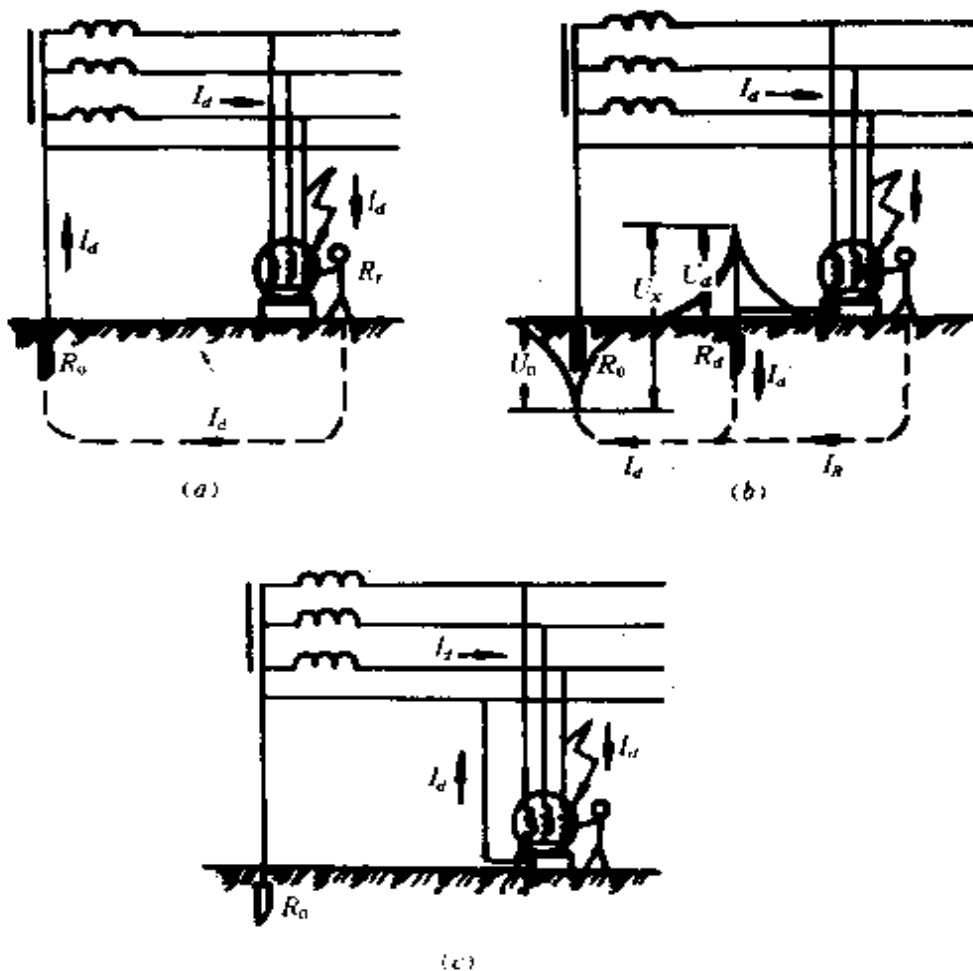


图 18—4 设备不接地、接零与保护接地、接零

(a) 设备不接地或接零(危险) (b) 设备接地保护

(不安全) (c) 设备接零保护(安全)

① 中性点接地系统, 电气设备不接地或接零: 图 18—4(a) 为电气设备不接地或接零的情况。流过人体的电流为

$$I_r = \frac{U}{R_r + R_0}$$



式中： $R_0$ ——工作接地装置的电阻( $\Omega$ )。

$R_0$  通常比  $R_r$  小得多 ( $R_r$  约为  $1000 \sim 1500\Omega$ )，若  $U = 220V$ ，则通过人体的电流约为  $147 \sim 220mA$ ，足以使人死亡。

② 中性点接地系统，采取保护接地：图 18—4(b) 为电气设备采取保护接地的情况。忽略导线及设备电阻的影响时，故障电流为

$$I_d \approx \frac{U}{R_0 + R_d}$$

漏电设备对地电压为

$$U_d = \frac{R_d U}{R_0 + R_d}$$

零线对地电压为

$$U_0 = \frac{R_0 U}{R_0 + R_d}$$

通过人体的电流为

$$I_r = U_d / R_r$$

例如，设  $R_0 \approx R_d = 4\Omega$ ， $R_r = 1000\Omega$ ，则  $I_d = \frac{220}{4} + 4 =$

$$27.5(A), U_d = \frac{4 \times 220}{4 + 4} = 110(V),$$

$$U_0 = \frac{4}{4 + 4} \times 220 = 110(V), I_r = \frac{110}{1000} = 0.11(A) = 110mA。$$

由此可见  $110mA$  电流对人体还是十分危险的。

若要控制安全接触电压  $U_d$  不超过  $60V$ ，则保护接地电阻应为

$$R_d = \frac{60R_0}{U-60} = \frac{60 \times 4}{220-60} = 1.5(\Omega)$$

要达到如此低的接地电阻,需付出很高的代价,显然经济上不合算,技术上不合理。

③中性点接地系统,采取保护接零:图 18—4(c)为电气设备采取保护接地的情况。当一相绝缘损坏并与电气设备外壳相碰时,便形成了一个由相线—设备外壳—零线的闭合回路。由于该回路的电阻很小,所以短路电流很大,从而引起保护电器(如熔断器等)动作,迅速切断故障设备的电源,消除触电的危险。

(3)中性点接地系统中的个别设备接地(图 18—5):

中性点接地系统中,不允许个别设备接地而不接零。图 18—5中,设备D接地而未接零,当设备D漏电时,其电流通过

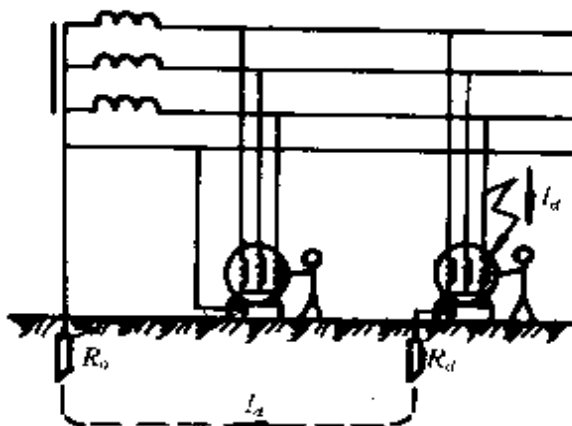


图 18—5 个别设备不接零(危险)

$R_d$  和  $R_0$  构成回路。由于该电流可能不太大,而不能引起保护装置动作,故障将长时间存在。这时,漏电设备外壳对地电压为

$$U_d = \frac{R_d U_0}{R_0 + R_d}$$

零线对地电压为

$$U_0 = \frac{R_0 U}{R_0 + R_d}$$

$U_d$  和  $U_0$  都可能是危险电压, 从而造成与该设备相连的其它所有接零设备都可能带上危险电压。

(4) 中性点接地系统, 零线未重复接地和有重复接地(图 18—6): 零线重复接地的作用:

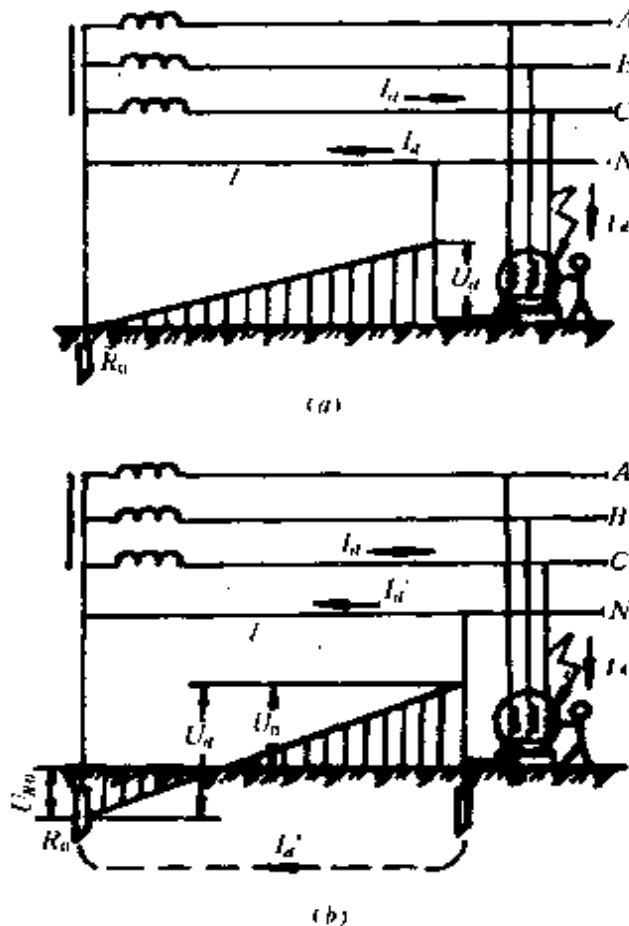


图 18—6 零线未重复接地和有重复接地

(a) 零线未重复接地(不安全) (b) 零线有重复接地(安全)

①当系统发生碰壳短路时,可降低漏电设备的对地电压:在

没有重复接地时,短路电流  $I_d$  在零线部分产生的电压降  $U_l$ , 等于漏电设备对地电压  $U_d$ 。即

$$\dot{U}_d = \dot{U}_l = \dot{I}_d \dot{Z}_0$$

式中:  $Z_0$ ——零线  $l$  段的阻抗( $\Omega$ )。

通常,零线的导电能力不低于相线导电能力的 50%,若忽略其它电阻,则设备外壳对地电压为(低压线路电抗成分很小)

$$\begin{aligned} U_d = I_d Z_0 &= \frac{U}{Z_0 + Z_x} \cdot Z_0 = \frac{U}{Z_0 + 0.5Z_0} \cdot Z_0 \\ &= \frac{2}{3} U = \frac{2}{3} \times 220 = 146.7(\text{V}) > \text{安全电压} \end{aligned}$$

式中:  $Z_x$ ——相线的阻抗( $\Omega$ )

146.7V 已大于安全电压,所以在单纯接零的情况下,还有触电危险。

有重复接地时,短路电流  $I_d$  将沿着零线和流经重复接地和工作接地两个并联电阻  $R_n$ 、 $R_0$  流入大地。

流入大地的电流  $I''_d$  为

$$I''_d = \frac{U_0}{R_0 + R_n}$$

工作接地装置上的对地电压  $U_{R_0}$  为

$$U_{R_0} = \frac{R_0 U_0}{R_0 + R_n}$$

重复接地装置上的对地电压  $U_{R_n}$  为

$$U_{R_n} = \frac{R_n U_0}{R_0 + R_n}$$

通常,  $R_0 \leq 4\Omega$ ,  $R_n \leq 10\Omega$ , 若  $U_0 = 146.7\text{V}$ , 则漏电设备对地电压为

$$U_d = \frac{10 \times 146.7}{4 + 10} = 104.8(\text{V})$$

104.8V 电压仍对人体有危险,但比没有重复接地时的危险性已大为减少。一般重复接地不止一处,所以接地电阻可降低。

②当零线断线、且断线处后面某些电气设备碰壳短路时,能减轻触电的危险(图 18—7):在没有重复接地时,断线处两边接

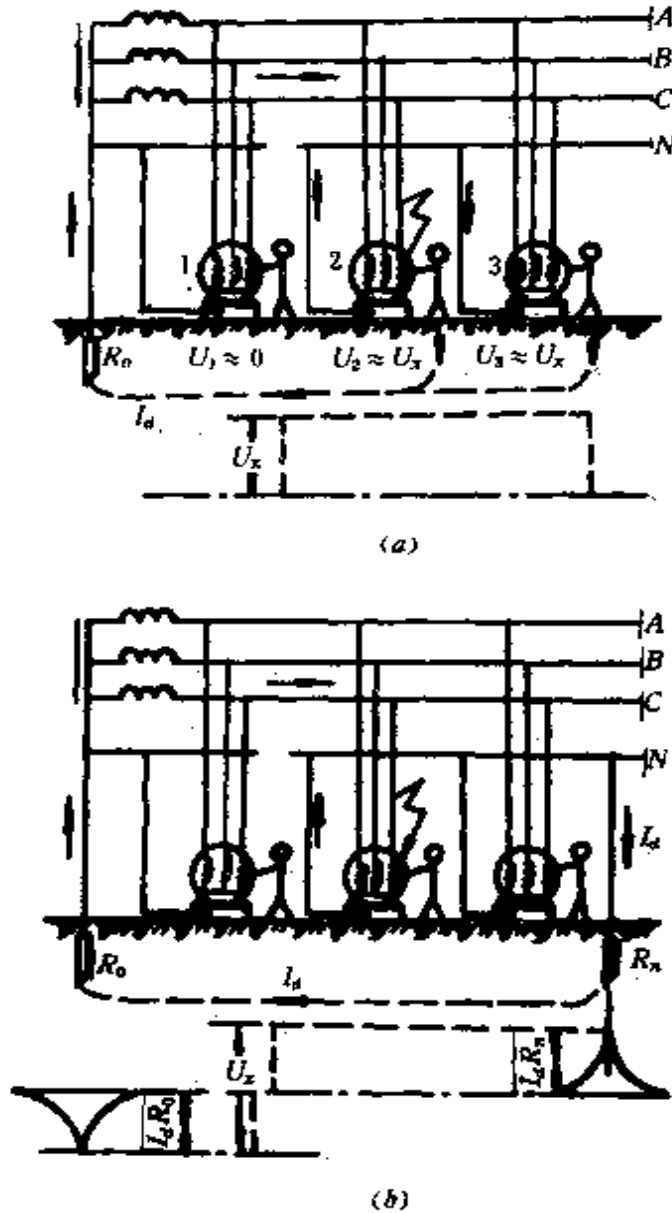


图 18—7 未重复接地与有重复接地时零线断线情况

(a)未重复接地时零线断线(不安全)

(b)有重复接地时零线断线(较安全)

零设备的对地电压分别接近于零和相电压。

在有重复接地时,接在断线处后面的电气设备外壳对地电压为

$$U_n = I_d R_n \frac{R_n U}{R_0 + R_n}$$

接在断线处前面的电气设备外壳对地电压为

$$U_0 = I_d R_0 = \frac{R_0 U}{R_0 + R_n}$$

例如,当  $R_n$  等于  $R_0$  时,断线处前后对地电压均为  $U/2$ 。由于断线处后面的设备外壳对地电压降低了一半,从而减轻触电危险程度。但  $U/2$  电压对人体仍然不安全,因此应避免零线断线。

采取重复接地,还能缩短碰壳或接地短路持续时间,以及改善架空线路的防雷性能。

#### 四、等化对地电压的计算

等化对地电压是采用特殊的接地方式等化大地各点的电位,降低接触电压和跨步电压,从而达到安全用电的目的。

##### 1. 网络接地体总长度的估算

网络接地体可分长孔网络和方孔网络两种,如图18—8所

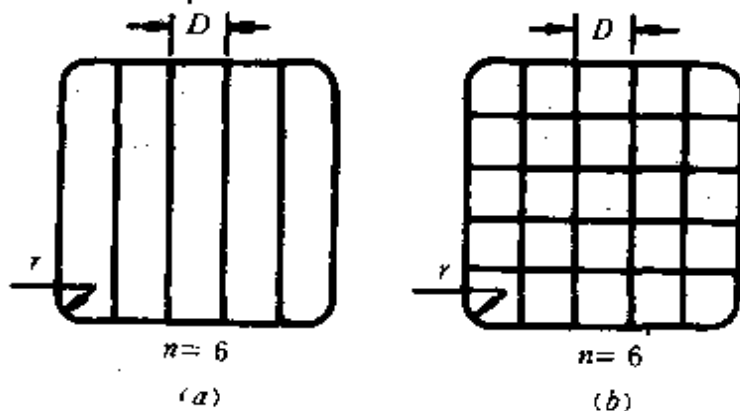


图 18—8 网络接地体

(a)长孔网络 (b)方孔网络

示。图中,  $n$  为网络一边均压条数,  $D$  为网络均压条间距离,  $r$  为圆弧半径。网络接地体总长度可按下式估算:

$$L = K_x K_t \rho \frac{I_d}{E_{jux}}$$

式中:  $L$ ——网络接地体总长度(m);

$K_x$ ——网络接地体形状系数, 计算见后;

$K_t$ ——网络接地体调整系数, 见表 18—2;

$\rho$ ——土壤电阻率( $\Omega \cdot m$ );

$I_d$ ——接地短路电流(A);

$E_{jux}$ ——接触电势允许值(V)。

表 18—2 接地装置的调整系数

网络短边均压条数	1	2	3	4	5	6	7	8以上
$K_t$	1	1.16	1.32	1.47	1.6	1.73	1.87	2

网络接地体形状系数  $K_x$ , 由下式计算:

$$K_x = 0.366 \lg \frac{D}{16hd} + 0.366 \lg \left(\frac{3}{4}\right) \left(\frac{5}{6}\right) \left(\frac{7}{8}\right) \dots$$

式中:  $D$ ——网络均压条间距离, 一般大于 400cm;

$h$ ——埋入地下深度, 一般为 60~80cm;

$d$ ——圆钢接地体直径或扁钢宽度的一半(cm)。

上式右边第二项乘积的项数等于网络短边均压条数减去 2。

## 2. 网络内接触电势 $E_j$ 的计算

$$E_j = K_j I_d R_t$$

式中:  $K_j$ ——接触系数;

$I_d$ ——接地短路电流(A);

$R_d$ ——接地装置的接地电阻( $\Omega$ )。

当埋入深度  $h=60\sim 80\text{cm}$  时,接地系数可按下式计算:

$$K_j = K_n K_d K_s$$

式中: $K_n$ 、 $K_d$ 、 $K_s$ ——分别为考虑均压条数  $n$ 、接地体直径  $d$  和网络面积  $S$  影响的系数,见表 18—3。

表 18—3 系数  $K_n$ 、 $K_d$ 、 $K_s$

系数类别	长孔网络	方孔网络	备注
$K_n$	$\frac{0.97}{n} + 0.096$	$\frac{1.03}{n} + 0.047$	$n \leq 9$
	$\frac{0.545}{n} + 0.137$	$\frac{0.55}{n} + 0.105$	$n \geq 10$
$K_d$	1.2—10d		d 的单位 m
$K_s$	1.0		$S \leq 1600\text{m}^2$
	$1.23 - 0.23 \times \frac{40}{\sqrt{S}}$		$S > 1600\text{m}^2$

注: $n$  为均压条数; $d$  为圆钢接地体直径或扁钢宽度的一半; $S$  为网络的面积。

### 3. 网络外跨步电势的计算

网络外最大跨步电势  $E_k$  可按下式计算:

$$E_k = K_k I_d R_d$$

式中: $K_k$ ——最大跨步系数;

$I_d$ 、 $R_d$ ——同前。

当埋入深度分别为 0.6m 和 0.8m 时,方形网络的跨步系数为

$$K_{k(0.6)} = 1.28 \left( \frac{L-L_1}{L} \cdot \frac{0.477}{S^{0.25}} + \frac{L_1}{L} \cdot \frac{0.61}{\ln \frac{9.02 \sqrt{S}}{d}} \right)$$



$$K_{k(0.3)} = 1.28 \left( \frac{L - L_1}{L} \cdot \frac{0.41}{S^{0.25}} + \frac{L_1}{L} \cdot \frac{0.476}{\ln \frac{9.02 \sqrt{S}}{d}} \right)$$

式中：L——网络接地体总长(m)；

$L_1$ ——网络接地体周长(m)；

S——网络面积(m<sup>2</sup>)；

d——接地体直径或扁钢宽度的一半(m)。

### 五、屏蔽的种类和要求

作为对电磁干扰抑制的一种措施,可采用屏蔽方法。所谓屏蔽,就是把干扰源、载扰线路、易受干扰的设备或线路,用金属板(铝板、铜板、钢板)或金属网(钢板拉网、铜丝编织网)包围起来,以降低辐射干扰传播。屏蔽的种类和要求见表 18—4。

表 18—4 屏蔽的种类和要求

类型	简单说明	基本要求	常用材料	适用频段
静电屏蔽	把电场终止在屏蔽金属物表面,而将电荷传送到接地的机壳上,可以封闭干扰电场	屏蔽外壳与干扰源机壳相连	铜或铝	低频
磁屏蔽	利用屏蔽层有高导磁率,把磁场封闭在屏蔽层厚度内,可封闭干扰电场	屏蔽层具有高导磁率	铁或铁镍合金	直流或低频
电磁屏蔽	利用在金属表面的反射和金属内部的吸收,或利用在屏蔽层中的涡流现象,以削弱干扰电磁场	屏蔽层具有高导磁率和高导电系数	铜、铝、铁	高频

### 六、接地电阻允许值的规定

1. 流散电阻、接地电阻、工频接地电阻、冲击接地电阻的区别

(1)流散电阻:电流自接地体的周围向大地流散所遇到的全

部电阻。

(2)接地电阻:接地体的流散电阻与接地线电阻之和。由于接地线电阻很小,可忽略不计,因此可以认为流散电阻等于接地电阻。

(3)工频接地电阻:通常所说的接地电阻是对于工频电流而言的,因此也叫工频接地电阻。

(4)冲击接地电阻:雷电流通过接地体时的接地电阻。

在接地电阻前没有注明“冲击”两字时,一般均指工频接地电阻(流散电阻)。

## 2. 电力线路及电力设备接地电阻要求

电力线路及电力设备接地电阻要求见表 18—5。表中接地装置流入大地的接地短路电流(计算值) $I_{jd}$ 的计算方法如下:

(1)在中性点经消弧线圈接地的网络中,短路电流应等于消弧线圈额定电流的 1.25 倍。

(2)在中性点不接地的网络中,短路电流采用单相接地电容电流,按下式计算:

$$I_{jd} = \frac{U_e(35L_l + L_j)}{\sqrt{3}50}$$

式中:  $I_{jd}$ ——单相接地电容电流(A);

$U_e$ ——网络额定电压(kV);

$L_l$ ——电缆线路长度(km);

$L_j$ ——架空线路长度(km);

(3)计算接地短路电流应按运行中可能发生最大接地短路电流的接地方式确定。

表 18—5 电力线路及电力设备接地电阻要求

序号	名称	接地装置特点	接地电阻(Ω)
1	1kV 以上大接地电流电力线路	仅用于该线路的接地装置	$R \leq \frac{2000}{I_{jd}}$ , 当 $I_{jd} > 4\text{KA}$ , 可取 $R \leq 0.5^{\text{①}}$
2	1kV 以上小接地电流电力线路	仅用于该线路的接地装置	$R \leq \frac{250}{I_{jd}} \leq 10$
3		与 1kV 以下线路的共同接地装置	$R \leq \frac{125}{I_{jd}} \leq 10$
4	1kV 以下中性点直接接地的电力线路	与 100kVA 以上发电机或变压器相连的接地装置	$R \leq 4$
5		序号 4 的重复接地	$R \leq 10$
6		与 100kVA 及以下发电机或变压器相连的接地装置	$R \leq 10$
7		序号 6 的重复接地	$R \leq 30$
8	1kV 以下中性点不接地的电力线路	与 100kVA 以上发电机或变压器相连的接地装置	$R \leq 4$
9		序号 8 的重复接地装置	$R \leq 10$
10		与 100kVA 及以下发电机或变压器相连的接地装置	$R \leq 10$
11		序号 10 的重复接地装置	$R \leq 10$
12	引入线装有 25A 以下熔断器的线路	任何供电系统	$R \leq 10$
13	电弧炉、工业电子设备、电压互感器及等	高低压电气设备联合接地	$R \leq 4$
14		电流、电压互感器二次线圈	$R \leq 10$
15		高压线路的保护网或保护线	$R \leq 10$
16		电弧炉	$R \leq 4$
17		工业电子设备	$R \leq 10$
18		静电接地	$R \leq 100$
19		$\rho$ 大于 $500\Omega \cdot \text{m}$ 高土壤电阻率地区	1kV 以下小接地系统的电气设备
20	发电厂和变电所的接地装置		$R \leq 10$
21	大接地电流系统发电厂和变电所装置		$R \leq 5$

(续表)

序号	名称	接地装置特点	接地电阻(Ω)
22	无避雷线的架空线路	小接地电流系统钢筋混凝土杆、金属杆	$R \leq 30$
23		低压线路钢筋混凝土杆、金属杆	$R \leq 30$
24		零线重复接地	$R \leq 10$
25		低压进户线绝缘子铁脚	$R \leq 10$

注:指单台或并联运行的总容量而言。

### 3. 建筑物和构筑物过电压保护的接地电阻要求(表 18—6)

表 18—6 建筑物和构筑物过电压保护接地电阻要求

建筑物、构筑物分类		直击雷冲击接地电阻(Ω)	感应雷工频接地电阻(Ω)	利用基础钢筋工频接地电阻(Ω)	电气设备与避雷器的共用工频接地电阻(Ω)	架空引入线间隙及金属管道的冲击接地电阻(Ω)
工业建筑	第一类	$\leq 10$	$\leq 10$		$\leq 10$	$\leq 20$
	第二类	$\leq 10$	与直击雷共同接地 $\leq 10$		$\leq 5$	入户处 10, 第一根杆 20, 第二根杆 20, 架空管道 10
	第三类	20~30		$\leq 5$		$\leq 30$
	烟囱	20~30				
	水塔	$\leq 30$				

(续表)

建筑物、构筑物分类		直击雷冲击接地电阻 ( $\Omega$ )	感应雷工频接地电阻 ( $\Omega$ )	利用基础钢筋工频接地电阻 ( $\Omega$ )	电气设备与避雷器的共用工频接地电阻 ( $\Omega$ )	架空引入线间隙及金属管道的冲击接地电阻 ( $\Omega$ )
民用建筑	第一类	5~10		1~5	$\leq 10$	第一根杆 10, 第二根杆 30
	第二类	20~30		$\leq 5$	20~30	$\leq 30$

4. 防雷保护设备的接地电阻要求(表 18—7)

表 18—7 防雷保护设备的接地电阻要求

序号	防雷保护设备名称	接地电阻 (不大于)( $\Omega$ )
1	保护变电所的室外独立避雷针	25
2	装设在变电所架空进线上的避雷针	25
3	装设在变电所与母线连接的架空进线上的管型避雷器 (电气上与旋转电机无联系者)	10
4	同上(但电气上与旋转电机有联系者)	5
5	装设在 20kV 以上架空线路交叉处跨越电杆上的管型避雷器	15
6	装设在 35~110kV 架空线路中,以及在绝缘较薄弱处木质电杆上的管型避雷器	15
7	装设在 20kV 以下架空线路电杆上的放电间隙,以及装设在 20kV 及以上架空线路相交叉的通信线路电杆上的放电间隙	25

5. 通信线用户保安器及分线箱保安器的接地电阻要求

用户保安器的接地电阻要求与保安器数有关：当保安器数1~2个时不大于50Ω，3个时不大于30Ω，4个时不大于20Ω，4个以上时不大于10Ω。

分线箱内保安器接地装置的电阻要求，见表18—8。

表 18 -8 分线箱内保安器接地电阻要求

土壤种类	土壤电阻率 $\rho(\Omega \cdot m)$	用户引入线线条数 n					
		5 以下	6~10	11~12	21~40	41~60	60 以上
接地电阻(不大于)(Ω)							
黑土地,泥炭	<50	12	9	7	6	5	4
黄土地,砂质粘土	50~100	14	10	8	7	6	5
夹砂土地	100~300	17	13	10	9	7	6
砂土地	300~500	24	18	14	12	10	8
夹石土地	500~1000	30	22	17	15	12	10

6. 3kV 及以上架空线路杆塔的接地电阻要求(表18—9)。

表 18—9 3kV 及以上架空线路杆塔接地电阻要求

土壤电阻率 $\rho(\Omega \cdot m)$	接地电阻(不大于)(Ω)
100 及以下	10
100~500	15
500~1000	20
1000~2000	25
2000 以上	敷设 6~8 根射线,接地电阻 30Ω, 或连续伸长接地,阻值不作规定

## 七、土壤和水的电阻率

### 1. 土壤和水的电阻率

在工程设计中,土壤和水的电阻率应以实测为依据。当缺乏资料时,可参表 18—10。

表 18—10 土壤和水的电阻率

类别	名 称	含 水 量	电 阻 率( $\Omega \cdot \text{cm}$ )
岩 石	花岗石		$2.07 \times 10^7$
	多岩石地		$4 \times 10^5$
	砾石,碎石		$2 \times 10^6$
砂	砂 子	干 的	$2.5 \times 10^5$
	砂 子	湿 的	$1 \times 10^5$
	砂 子	很 湿	$2.5 \times 10^4$
泥  土	黄 土	干的(湿的)	$2.5 \times 10^5 (1 \sim 2 \times 10^4)$
	多石土壤	—	$4 \times 10^4$
	含砂粘土	含有 75%水分 (按重量计)	$2.5 \times 10^4$
	黑 土	湿的	$1.9 \times 10^4$
	混合土(粘土、石灰 石、碎石)		$1 \times 10^4$
	粘 土		$0.6 \times 10^4$
	砂质粘土		$0.8 \times 10^4$
	砂 土		$3 \times 10^4$
	陶 土	含有 20%水分 (按体积计)	$(0.4 \sim 0.8) \times 10^4$
	园 土	含有 20%水分 (按体积计)	$0.5 \times 10^4$
捣碎的木炭	—	$0.4 \times 10^4$	
泥 炭	—	$0.2 \times 10^4$	

(续表)

类别	名称	含水量	电阻率( $\Omega \cdot \text{cm}$ )
水	河水		$1 \times 10^4$
	地下水		$(0.2 \sim 0.7) \times 10^4$
	泉水		$(0.4 \sim 0.5) \times 10^4$
	海水		$(0.01 \sim 0.05) \times 10^4$
	湖水(池水)		$0.03 \times 10^4$

### 2. 土壤干湿对电阻率的影响

土壤电阻率在一年中是变化的,考虑季节(干湿)因素,电阻率可按下式计算:

$$\rho = \psi \rho_0$$

式中:  $\rho_0$  —— 实测土壤电阻率( $\Omega \cdot \text{cm}$ );

$\psi$  —— 季节系数,见表 18-11。

表 18-11 土壤的季节系数  $\psi$

土壤性质	深度(m)	$\psi_1$	$\psi_2$	$\psi_3$
粘土	0.5~0.8	3	2	1.5
粘土	0.8~3	2	1.5	1.4
陶土	0~2	2.4	1.36	1.2
砂砾盖于陶土	0~2	1.8	1.2	1.1
园地	0~3	—	1.32	1.2
黄沙	0~2	2.4	1.56	1.2
杂以黄沙的砂砾	0~2	1.5	1.3	1.2
泥炭	0~2	1.4	1.1	1.0
石炭石	0~2	2.5	1.51	1.2

注:  $\psi_1$  —— 测量前数天下过较长时间的同时用之;  $\psi_2$  —— 测量时土壤具有中等含水量时用之;  $\psi_3$  —— 测量时土壤干燥或测量前降雨不大时用之。



## 第二节 接地体接地电阻的计算

### 一、人工接地体的接地电阻计算

人工接地电阻可按下列公式计算。须注意,计算结果还需与实地测量的接地电阻,核实,以确定实际接地电阻是否符合接地要求。

#### 1. 单根垂直接地体的接地电阻 $R_c$ 的计算

$$\text{钢管} \quad R_c = \frac{\rho}{2\pi l} \ln \frac{4l}{d}$$

$$\text{等边角钢} \quad R_c = \frac{P}{2\pi l} \ln \frac{4l}{0.84b}$$

$$\text{不等边角钢} \quad R_c = \frac{P}{2\pi l} \ln \frac{2l}{0.515b}$$

$$\text{槽钢} \quad R_c = \frac{P}{2\pi l} \ln \frac{2l}{r}, r = 0.46 \sqrt[3]{b^2 h^3 (b^2 + h^2)^2}$$

式中:  $R_c$ ——垂直接地体的接地电阻( $\Omega$ );

$\rho$ ——土壤电阻率( $\Omega \cdot \text{cm}$ );

$l$ ——接地体长度(cm);

$d$ ——管子的直径(cm);

$b$ ——等边角钢或槽钢的边长,或不等边角钢的较小边边长(cm)

$h$ ——槽钢高度(cm);

$r$ ——等效尺寸(cm)。

当接地板采用直径为 50mm,长度为 250cm 的钢管,管顶离

开地面为 50~70cm 时,可以采用简化算法。其它尺寸的接地体均应折算后方可按简化式计算。

各种垂直接地体接地电阻的简化计算公式为

$$R_c = K\rho$$

式中:K——简化计算系数,见表 18—12;

其它符号同前。

表 18—12 各种接地极的 K 值

极形	规 范 (mm)	计算外径 (mm)	长 度 (cm)	K 值
管子	φ38	48	250	$34 \times 10^{-4}$
	φ38	48	200	$40.7 \times 10^{-4}$
	φ50	60	250	$32.6 \times 10^{-4}$
	φ50	60	200	$39 \times 10^{-4}$
角钢	∠40×40×4	33.6	250	$36.3 \times 10^{-4}$
	∠40×40×4	33.6	200	$43.6 \times 10^{-4}$
	∠50×50×5	42	250	$34.85 \times 10^{-4}$
	∠50×50×4	42	200	$41.8 \times 10^{-4}$
槽钢	C80×43×5	68	250	$31.8 \times 10^{-4}$
	C80×43×5	68	200	$38 \times 10^{-4}$
	C100×48×5.3	82	250	$30.6 \times 10^{-4}$
	C100×48×5.3	82	200	$36.5 \times 10^{-4}$

## 2. 单根水平埋设接地体的接地电阻 $R_s$ 的计算

$$\text{扁钢 } R_s = \frac{P}{2\pi l} \ln \frac{2l^2}{bh}$$

$$\text{圆钢 } R_s = \frac{P}{2\pi l} \ln \frac{l^2}{2rh}$$

式中:b——扁钢宽度(cm);

$h$ ——埋设深度(cm)；

$r$ ——圆钢半径(cm)；

$l, \rho$ ——同前。

3. 构成环形回路的水平埋设接地体的接地电阻  $R_s$  的计算当长短边之比不超过三倍的长方形时,可按下列公式计算:

$$\text{扁钢 } R_s = \frac{\rho}{2\pi l} \ln \frac{8l^2}{\pi b h}$$

$$\text{圆钢 } R_s = \frac{\rho}{2\pi l} \ln \frac{2l^2}{\pi r h}$$

式中符号同前。

4.  $n$  根钢管或钢棒的总接地电阻  $R_{\Sigma}$  的计算

$$R_{\Sigma} = \frac{R_c}{n\eta_c}$$

式中:  $R_c$ ——单根钢管或钢棒的扩散电阻( $\Omega$ );

$n$ ——接地体数目;

$\eta_c$ ——接地体利用系数,即考虑到多根接地体间的屏蔽影响,可由表 18—13 至表 18—17 查得。

表 18—13 成排垂直敷设的管形接地体的利用系数

管间 距离 与管 长之 比	管子根数					
	2	3	5	10	15	20
1	0.84~0.87	0.76~0.80	0.67~0.72	0.56~0.62	0.51~0.56	0.47~0.50
2	0.90~0.92	0.85~0.88	0.79~0.83	0.72~0.77	0.66~0.73	0.63~0.70
3	0.93~0.95	0.90~0.92	0.85~0.88	0.79~0.83	0.76~0.80	0.74~0.79

注:该表数据未计入联结扁钢的影响。

表 18—14 环形垂直敷设的管形接地体的利用系数

管间距离与管长之比	管子根数						
	4	6	10	20	40	60	100
1	0.66~0.72	0.58~0.65	0.52~0.58	0.44~0.50	0.38~0.44	0.36~0.42	0.33~0.39
2	0.76~0.80	0.71~0.75	0.66~0.71	0.61~0.66	0.55~0.61	0.52~0.58	0.49~0.55
3	0.84~0.86	0.78~0.82	0.74~0.78	0.63~0.73	0.64~0.69	0.62~0.67	0.59~0.65

注：该表数据未计入联结扁钢的影响。

表 18—15 管子成排垂直敷设时联结扁钢的利用系数

管间距 高与管 长之比	管子根数					
	2	3	5	10	15	20
1	0.87	0.80	0.74	0.62	0.50	0.42
2	0.92	0.88	0.86	0.75	0.65	0.56
3	0.95	0.92	0.90	0.82	0.74	0.65

表 18—16 管子环形垂直敷设时联结扁钢的利用系数

管间距 高与管 长之比	管子根数						
	4	6	10	20	40	60	100
1	0.45	0.40	0.34	0.27	0.22	0.20	0.19
2	0.55	0.48	0.40	0.32	0.28	0.27	0.24
3	0.70	0.64	0.55	0.45	0.38	0.36	0.33

表 18—17 水平敷设的扁钢接地体的利用系数

并联敷 设的扁 钢数	每条扁 钢长度 (m)	并联敷设的扁钢间的距离(m)				
		1	2.5	5.0	10.0	15.0
5	15	0.37	0.49	0.60	0.73	0.79
	25	0.35	0.45	0.55	0.66	0.73
	30	0.33	0.40	0.48	0.58	0.65
	75	0.31	0.38	0.45	0.53	0.58
	100	0.30	0.36	0.43	0.51	0.57
	200	0.28	0.32	0.37	0.44	0.50

(续表)

并联敷 设的扁 钢数	每条扁 钢长度 (m)	并联敷设的扁钢间的距离(m)				
		1	2.5	5.0	10.0	15.0
10	15	0.25	0.37	0.49	0.64	0.72
	25	0.23	0.31	0.43	0.57	0.66
	50	0.20	0.27	0.35	0.46	0.53
	75	0.18	0.25	0.31	0.41	0.47
	100	0.17	0.23	0.28	0.37	0.44
	200	0.14	0.20	0.23	0.30	0.36
20	15	0.16	0.27	0.39	0.57	0.64
	25	0.14	0.23	0.33	0.47	0.57
	50	0.12	0.19	0.25	0.36	0.44
	75	0.11	0.16	0.22	0.31	0.38
	100	0.10	0.15	0.20	0.28	0.35
	200	0.09	0.12	0.15	0.22	0.27

注：该表数据相应于扁钢宽度 20~40mm、埋设深度 0.3~0.8m 的情况。

5. 在水平埋设接地体上连有棒形接地体时，水平接地体的接地电阻  $R'_s$  的计算

$$R'_s = R_s / \eta_s$$

式中： $\eta_s$ ——考虑到水平接地体的接地棒间的屏蔽作用的水平接地体利用系数，可由表 18—17 查得。

6. 由接地棒和水平接地体所组成的复式接地装置的接地电阻  $R_f$  的计算

$$R_f = \frac{1}{\frac{1}{R_{\Sigma c}} + \frac{1}{R'_s}} = \frac{1}{\frac{n\eta_s}{R_c} + \frac{\eta_s}{R_s}}$$

式中符号同前。

$R_f$  还可按下面方法估算：

以接地棒为主的接地装置，在计算中可以不单独计算水平接地体的接地电阻，而直接由接地电阻要求值按下式求出接地棒的数目：

$$n \geq \frac{0.9R_s}{R\eta}$$

式中： $R_s$  —— 接地电阻要求值( $\Omega$ )；

0.9 —— 考虑到水平接地体的接地电阻作用的系数。

对于大接地短路电流系统，在选择接地导线和接地母线时，尚须进行热稳定校验：

$$S \geq \frac{I_{jd}}{C} \sqrt{t}$$

式中： $S$  —— 接地导线与母线的最小允许截面( $\text{mm}^2$ )；

$I_{jd}$  —— 单相接地电流，为计算简便， $I_{jd}$ 可取用起始短路电流  $I''$ (A)；

$t$  —— 短路的切除时间(S)；

$C$  —— 由材料性能决定的计算系数，对于低压中性点直接接地的电网，可按表 18—18 选取。

表 18—18 校验热稳定用的计算系数  $C$  值

种 类	材 料		
	钢	铝	铜
零 线	60	100	180
接地线	90	155	270

**例 18—1** 某厂变电所 10/0.38kV 的变压器,10kV 侧线路为中性点不接地系统,在该系统中与它有电气联系的架空线路 10km,电缆线路 0.5km,380V 侧为中性点直接接地系统;已知该地区土壤为粘土,土壤电阻率为  $1.1 \times 10^4 \Omega \cdot \text{mm}$ ,试计算接地装置。

**解** 在中性点不接地的网络中,单相接地电容电流为

$$I_{jd} = \frac{U(35L_c + L_j)}{350} = \frac{10(35 \times 0.5 + 10)}{350} = 0.786(\text{A})$$

由表 18—5 查得总接地电阻  $R \leq \frac{125}{I} \leq 10\Omega$ ,即

$R \leq 120/0.786 = 152.7(\Omega)$ ,应取不大于  $10\Omega$ ;而对于低压电气设备要求不大于  $4\Omega$ ,选择两者中较小的,即接地装置的电阻在一年内任何季节不得大于  $4\Omega$ 。

现采用等边角钢  $\angle 50 \times 50 \times 5$ ,长度 250mm,埋深 0.7m。查表 18—12 得  $K = 34.85 \times 10^{-4}$ 。

垂直接地体的接地电阻为

$$R_c = K\rho = 34.85 \times 10^{-4} \times 1.1 \times 10^4 = 38.3(\Omega)$$

暂假设采用 13 根角钢作接地体,管间距离 2.5m。连接扁钢总长度为  $l_n = 13 \times 2.5 = 32.5\text{m}$ ,采用  $40 \times 4$  扁钢,扁钢埋深 0.6m。扁钢接地电阻为

$$R_s = \frac{\rho}{2\pi l_n} \ln \frac{8l_n^2}{\pi b h} = \frac{1.1 \times 10^4}{2\pi \times 32.5} \ln \frac{8 \times 32.5^2}{\pi \times 4 \times 60} = 6.3(\Omega)$$

接地装置采用环形方式, $a/l = 2.5/2.5 = 1$ ,查表 18—17 得  $\eta = 0.32$ (用内插法求得),故扁钢的接地电阻为



$$R'_s = R_s / \eta_s = 6.3 / 0.32 = 19.7 (\Omega)$$

接地装置的总电阻为

$$R_{\Sigma} = \frac{R'_s R}{R'_s + R} = \frac{19.7 \times 4}{19.7 + 4} \approx 5 (\Omega)$$

由表 18—13, 当  $n=14$  及  $a/l=1$  时查得  $\eta_c=0.54$ , 故接地体数为

$$n = \frac{R_c}{\eta_c R_{\Sigma}} = \frac{38.3}{0.54 \times 5} = 14.2$$

可以确定采用 14 根角钢作为接地体, 这样构成的接地装置的接地电阻不会超过所要求的数值  $4\Omega$ 。

## 二、人工接地坑和接地沟的流散电阻的计算

在高土壤电阻率 ( $\rho > 5 \times 10^4 \Omega \cdot \text{cm}$ ) 地区, 可采用人工接地坑或接地沟等方法降低接地电阻值。

### 1. 人工接地坑〔图 18—9(a)〕

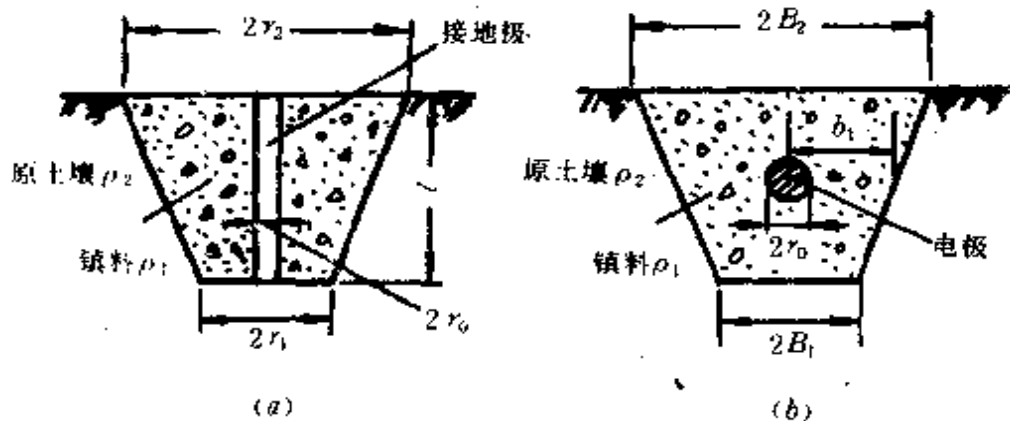


图 18—9 人工接地坑和接地沟的几何尺寸

(a) 人工接地坑 (b) 人工接地沟

根据计算和试验, 最大电位梯度发生在离接地极边缘  $0.5 \sim 1\text{m}$  处, 因此接地坑的坑径不必过大, 一般取  $r_1$  为  $500\text{cm}$ ,  $r_2$  为  $1000\text{cm}$ ,  $l$  为  $200 \sim 300\text{cm}$ , 其流散电阻可按下式计算:

$$R = \frac{\rho_1}{2\pi l} \ln \frac{r_1}{r_0} + \frac{\rho_2}{2\pi l} \ln \frac{2l}{r_1}$$

式中： $R$ ——流散电阻( $\Omega$ )。

2. 人工接地沟〔图 18—9(b)〕

接地沟的几何尺寸,通常采用外切于以接地带为中心以 0.5m 为半径圆的梯形断面。其流散电阻可按下列公式计算:

(1) 接地带为圆钢时:

$$R = \frac{\rho_1}{2\pi l} \ln \frac{l}{2r_0} + \frac{\rho_2}{2\pi l} \ln \frac{l}{b_1}$$

式中： $l$ ——接地带长度。

(2) 接地带为扁钢时:

$$R = \frac{\rho_1}{2\pi l} \ln \frac{2l}{b} + \frac{\rho_2}{2\pi l} \ln \frac{l}{b_1}$$

式中： $b$ ——扁钢宽度。

3. 短接地带组合的接地装置组合方式及结果(表 18—19)

表 18—19 短接地带组合的接地装置

土壤电阻率 $\rho(\Omega \cdot \text{cm})$	组合方式 (根数×单根长度)	钢带总长 (m)	阻抗值 $R$ ( $\Omega$ )
$(1 \sim 1.2) \times 10^5$	$2 \times 60 // 2 \times 40$	200	14.6
	$5 \times 40$	200	13.8
	$4 \times 60$	240	12.5
$2 \times 10^5$	$6 \times 40$	240	21.6
	$4 \times 60$	240	20.7
	$2 \times 60 // 2 \times 100$	320	16.2
$5 \times 10^5$	$8 \times 60$	480	34
	$10 \times 60$	600	28
	$4 \times 60 // 4 \times 100$	640	27

短接地带组合接地装置,适用于  $\rho$  等于  $(1\sim 5)\times 10^4\Omega\cdot\text{cm}$  的土壤。对于  $\rho$  不小于  $10^6\Omega\cdot\text{cm}$  的土壤,可采用伸长接地带的方法效果较好。

### 三、岩石地区接地装置的处理方法

在土壤电阻率高的砂质、岩盘等土壤中,要达到所要求的接地电阻往往会有困难,需采取一些特殊的施工方法,以降低人工接地体的接地电阻。

#### 1. 几种常用的降低接地电阻的方法

(1)利用低电阻率的土壤:该方法是利用粘土、黑土及砂质粘土等代替原有较高电阻率的土壤。置换范围见图 18—10。

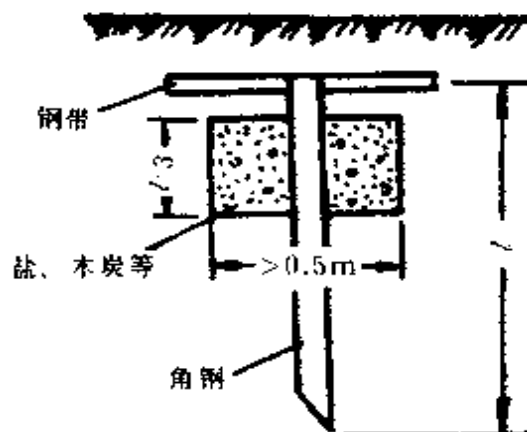


图 18—10 土壤置换法

(2)采用人工处理方法:该方法是在接地体周围土壤中加入食盐、煤渣、木炭、炉灰、焦碳等,以提高土壤的导电率。最常用的是食盐,食盐对改善土壤电阻率有较好效果,受季节性变动的影  
响较小,价格也低廉。处理方法如下:将盐和土壤一层隔一层地依次填入坑内,一般盐层的厚度为 1cm。每层盐都用水湿润。一根接地体的耗盐量为 30~40kg。若再加入 10kg 左右的木炭效果更好。因为木炭是固体的导体,不会被溶解、渗透和腐蚀,因此有效时间较长。

经食盐处理土壤,会因盐溶化流失而使接地电阻逐渐变大,

故一般在处理后两年需要进行再处理。这是它的缺点。

对于扁钢、圆钢等平行接地体,采用上述方法处理也可得到较好的效果。

(3)采用外引式接地:在山区,当接地电阻值要求较小,附近如有水源或电阻率较小的土壤可利用时,采用外引式接地十分有效。

外引接地体的引接长度(外引接地体中心至接地点的距离)不宜超过 500m,否则引线本身电阻太大,会使外引接地体的利用率降低,对降低冲击接地电阻也不利。引接线一般采用双根,若采用钢筋,直径不得小于 10mm;若采用扁钢,截面不得小于  $100\text{mm}^2$ 。引接线埋深不得小于 0.3m。

(4)采用导电性混凝土:该方法是在水泥中混入碳纤维作为接地极使用。如在  $1\text{m}^3$  水泥中混入 100kg 左右的碳纤维,半径 1m,其半球状的接地电极的电阻与普通混凝土比较,工频电阻值的降低情况如图 18—11 所示。该方法常用于防雷接地装置。

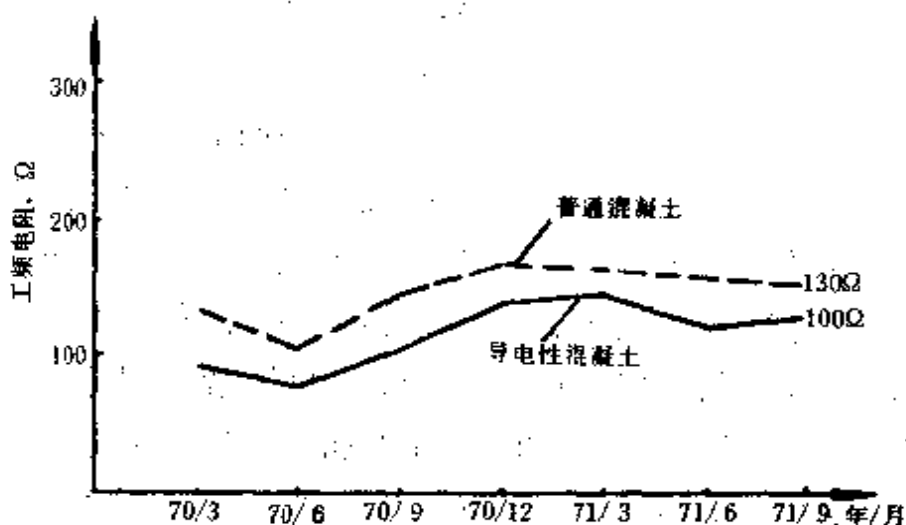


图 18—11 半径 1m 的半球状接地电极的工频电阻值的经年变化

为了进一步降低冲击电阻,可在导电性混凝土中埋入针状接地极。这样放电电晕能从针尖连续地波及碳纤维,从而显著地降低接地电阻。

(5)采用接地电阻降低剂:由碳粉和生石灰作为主要原料的接地电阻降低剂,因没有电介质物质,能在土壤中长期使用,不会因地下水而流失,故能得到长期无公害、稳定的低接地电阻值。对于坚硬的岩盘地带,采用埋设接地线和接地电阻降低剂并用的方法相当有效。如国外试用一种降阻剂,其主要成分配比是:水泥2份,石墨粉2份,生石灰1份,均匀混合后加入适量的食盐,其接地电阻值比只埋接地线的场合降低40%。我国研制并推广的化学降阻剂有尿醛树脂型、聚丙烯酰胺型、丙烯酰胺型、铬—木质素型、石膏型、水玻璃型、石墨型等。试验表明,对于简单的垂直或水平敷设的接地体,可使工频接地电阻降低70%左右;对于中小型接地网,可使工频接地电阻降低30~50%、冲击接地电阻降低20~70%。降阻剂的有效使用期可达5年以上。

## 2. 钻孔深埋法

该方法所采用的垂直接地体长度视地质条件而导,一般为5~10m,也有采用更长的。但大于10m,则效果不明显,同时给施工带来困难。接地体通常采用 $\phi 20 \sim \phi 75$ 的圆钢,但不同圆钢直径对接地电阻影响很小。

深埋法所采用的垂直接地体的电阻值可按下式估算:

$$R = \frac{\rho}{2\pi l} \ln \frac{4l}{d} \approx K\rho$$

式中: $\rho$ ——土壤电阻率( $\Omega \cdot \text{cm}$ );

$l, d$ ——接地体的长度和直径(圆钢)(cm)。

垂直接地体的电阻值还可以图18—12所示的K值曲线中

近似求得。

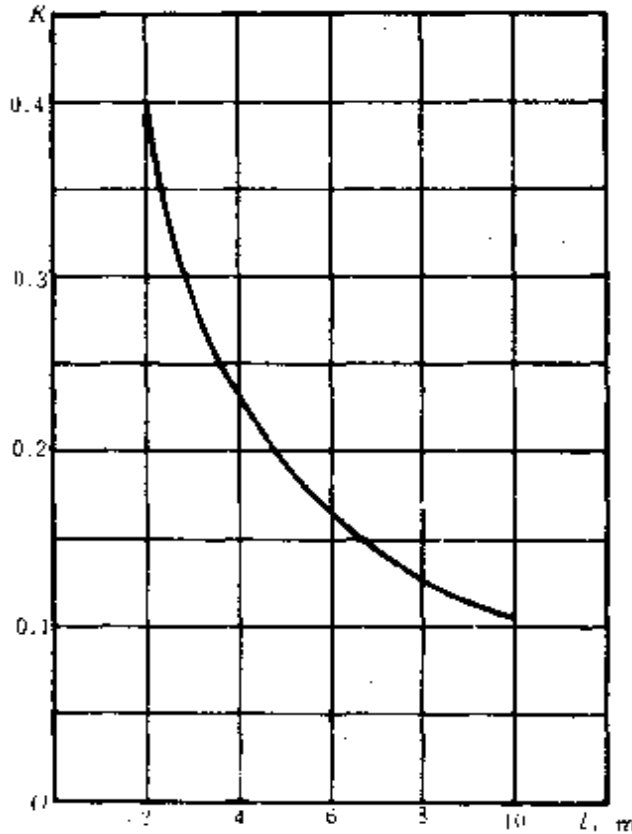


图 18-12 求垂直接地体的接地计算系数  $K$  曲线

施工时,可采用  $\phi 50$  及以上的小型人工螺旋钻或钻机打孔,在打出的孔穴中埋设  $\phi 20 \sim \phi 75$  的圆钢接地体,再灌入导电性混凝土或降阻剂,最后将同样处理的数个接地体并联,就成了完整的接地体。

经钻孔深埋法施工的接地体,受季节变化小,可以获得稳定的接地电阻。同时由于深埋,能显著减少跨步电压,有利人身安全。该方法施工方便,成本也低。

3. 采用固体复合材料型长效降阻剂的接地电阻和降阻剂用量计算

(1) 接地体尺寸: 对于垂直接地体, 施用降阻剂的孔穴直径为  $\phi 50 \sim \phi 75$ ; 对于水平接地体, 可作成梯形横截面接地沟, 深度为  $0.6 \sim 0.8\text{m}$ 。降阻剂施用厚度为  $60 \sim 100\text{mm}$ , 水平接地体安置在降阻剂中间。降阻剂的上底宽为  $120 \sim 160\text{mm}$ , 下底宽为  $50 \sim 100\text{mm}$ 。

(2) 接地电阻计算: 当接地体用圆钢直径不小于  $10\text{mm}$ , 或扁钢尺寸不小于  $25 \times 4\text{mm}^2$  时, 施用降阻剂(如“富兰克林—民生”降阻剂)后, 接地体的接地电阻可按下列经验公式计算:

① 垂直接地体的接地电阻:

$$R_c = k \frac{\rho}{2\pi l} \ln \frac{l \sim 4l}{d_1}$$

式中:  $R_c$ ——垂直接地体的接地电阻( $\Omega$ );

$k$ ——降阻剂系数, 对于“富兰克林—民生”降阻剂, 取  $0.7 \sim 0.9$ ;

$\rho$ ——原土壤电阻率( $\Omega \cdot \text{cm}$ );

$d$ ——接地孔穴直径( $\text{cm}$ ), 一般取  $d_1 \geq (2.5 \sim 3)d$ ;

$b$ ——接地体的直径或等效直径( $\text{cm}$ );

$l$ ——接地体长度( $\text{cm}$ )。

式中  $\frac{l \sim 4l}{d_1}$  的值, 当原土壤电阻率较低时, 取大值; 反之取小值。

$l$  一般小于  $3\text{m}$ , 超过  $5\text{m}$  的为深埋方式。

② 水平接地体的接地电阻:

$$R_s = k \frac{\rho}{2\pi l} \ln(0.5 \sim 0.13)l$$

式中:  $R_s$ ——水平接地体的接地电阻( $\Omega$ );

$l$ ——水平接地体长度( $\text{cm}$ );



其它符号同前。

式中 $(0.05 \sim 0.03)l$  的值,当土壤电阻率较高时,取小值。反之取大值。

(3)降阻剂用量计算:

①垂直接地体施用“富兰克林—民生”降阻剂用量:

$$G=1.3\pi\left(\frac{d_1}{2}\right)^2\frac{l}{2000}$$

式中:  $G$ ——降阻剂用量(kg);

1.3——降阻剂干比重;

1/2——加一倍量的水;

$d_1$ ——降阻剂直径(cm);

$l$ ——垂直接地体长度(cm)。

②水平接地体施用“富兰克林—民生”降阻剂用量

$$G=1.3\left(\frac{a+b}{2}\right)h\frac{l}{2000}$$

式中:  $G$ ——降阻剂用量(kg);

$l$ ——水平接地体长度(cm);

$a+b$ ——梯形的上底加下底(cm)

$h$ ——梯形截面高度(cm);

其它同前。

根据上述公式,“富兰克林—民生”降阻剂用量估算如下:集中处理接地坑为 16~24kg;垂直接地体为每米 2~4kg;水平接地体为每米 4~10kg。

#### 四、自然接地体的接地电阻的计算

凡埋在地下的金属水管和其它各种金属管道(易燃液体、气体及易爆气体的管道除外)、建筑物和构筑物的地下金属结构、



以及电缆金属外皮等,都可作为自然接地体。

1. 避雷线和拉线的接地电阻计算

(1)架空避雷线的接地电阻:当带避雷线的杆塔数  $n$  小于 20 时,架空避雷线的工频接地电阻可按下式计算:

$$R = \sqrt{rr_x} \operatorname{cth} \left( \sqrt{\frac{r_x}{r}} \cdot n \right)$$

当  $n$  不小于 20 时,可按简化式计算:

$$R = \sqrt{rr_x}$$

式中:  $r$ ——有避雷线的每基杆塔工频接地电阻( $\Omega$ );

$r_x$ ——一档避雷线的电阻( $\Omega$ ),  $r_x = \rho_{be} L / S$ ;

$\rho_{be}$ ——避雷线的电阻率,钢绞线的电阻率为  $150 \times 10^{-3} \Omega \cdot \text{mm}^2 / \text{m}$ ;

$L$ ——档距(m);

$S$ ——避雷线截面( $\text{mm}^2$ );

$\operatorname{cth} \left( \sqrt{\frac{r_x}{r}} \cdot n \right)$ ——双曲线函数。

(2)拉线的接地电阻:拉线的接地电阻可按下式近似计算:

$$R = 0.336 \frac{\rho}{l} \ln \frac{4l}{d}$$

式中:  $\rho$ ——土壤电阻率( $\Omega \cdot \text{cm}$ );

$l$ ——埋于土中部分的拉线棒长度(cm);

$d$ ——拉线棒直径(cm)。

当采用  $\phi 16$  拉线棒,埋于土中部分长度为 1.5m 时,代入上式得

$$R = 0.577 \rho$$

2. 地下管道和电缆外皮的接地电阻计算

(1)地下管道的接地电阻:当管道长度  $l$  小于 2km 时,接地电阻按下式计算:

$$R = \frac{\rho}{2\pi l} \ln \frac{l^2}{dh}$$

式中： $l$ ——管道长度(cm)；  
 $d$ ——管道直径(cm)；  
 $h$ ——埋设深度(cm)；  
 $\rho$ ——同前。

当  $l$  不小于 2km 时，

$$R = K \sqrt{r r_p} \text{cth} \left( \sqrt{\frac{r_p}{r}} \cdot l \right)$$

式中： $K$ ——考虑麻护层对接地电阻影响的系数，取 1.2~1.8；不包护层的管道  $K=1$ ；  
 $r$ ——管道直径方向每 1cm 土壤的电阻( $\Omega/\text{cm}$ )，一般取  $r=1.69\rho$ ；  
 $r_p$ ——沿管道直线方向每 1cm 管道的电阻( $\Omega/\text{cm}$ )，对于钢管可查表 18—20；  
 $l$ ——管道长度(cm)。

表 18—20 钢管电阻( $\Omega/\text{km}$ )

规 格		管子种类		规 格		管子种类	
(mm)	(in)	黑铁管	电线管	(mm)	(in)	黑铁管	电线管
13	1/2	1.24	—	38	1 1/2	0.405	0.733
15	5/8	—	3.04	50	2	0.317	0.438
20	3/4	0.955	2.54	63	2 1/2	0.234	0.36
25	1	0.65	1.87	75	3	0.185	0.264
32	1 1/4	0.496	1.28				

(2) 电缆外皮的接地电阻：计算公式同  $l$  不小于 2km 的地下管道的计算公式。但式中  $k$ ，为了考虑电缆外皮麻层对接地电阻影响的系数，一般取 1.2~1.8； $r$ 、 $r_p$  和  $l$  应相应由“管道”改为电缆的数值。

电缆金属外皮等值电阻  $r_p$  见表 18--21。

表 18—21 三芯电缆金属外皮等值电阻 ( $\Omega/\text{km}$ )

电缆截面 ( $\text{mm}^2$ )	铅 包 皮		铝 包 皮	
	1KV	6kV	1kV	6kV
3×10	5.65	3.24	0.719	0.421
3×16	4.82	2.71	0.627	0.362*
3×25	4.39	2.64	0.583	0.357
3×35	3.95	2.17	0.485	0.302
3×50	3.19	1.97	0.378	0.264
3×70	2.56	1.79	0.334	0.246
3×95	1.99	1.51	0.276	0.223*
3×120	1.76	1.29	0.245	0.192*
3×150	1.48	1.18		
3×185	1.26	1.08		

注：1. \*为近似值；2. 表中按 40°C 电阻值计算。

如果是一束  $n$  根同截面的电缆，则其总接地电阻  $R_z$  为

$$R_z = \frac{R}{\sqrt{n}}$$

式中： $R$ ——每根电缆外皮的接地电阻 ( $\Omega$ )。

### 3. 钢筋混凝土基础的接地电阻计算

$$R = 0.366K \frac{\rho}{h} \ln \frac{4h}{d}$$

式中： $R$ ——接地电阻 ( $\Omega$ )；

$d$ ——钢筋混凝土杆钢筋骨架的外径 (cm)；

$h$ ——钢筋混凝土杆埋入地下深度 (cm)；

$K$ ——考虑混凝土影响和钢筋网格与光滑圆筒差别的校

正系数,取 1.4。  
钢筋混凝土基础接地电阻的简化计算式见表 18—22。

表 18—22 钢筋混凝土基础的接地电阻简化计算式

接 地 体 类 型		简化计算式
钢筋混凝土杆的自然接地体	单 杆	$R \approx 0.003\rho$
	双 杆	$R \approx 0.002\rho$
	拉线单、双杆	$R \approx 0.001\rho$
	一个拉线盘	$R \approx 0.0028\rho$
装配式基础的自然接地体	单柱式杆塔	$R \approx 0.001\rho$
	门型杆塔	$R \approx 0.0006\rho$
	V 型拉线门型杆塔	$R \approx 0.0009\rho$
沿装配式基础周围敷设的深埋式接地体	单柱式杆塔	$R \approx 0.0007\rho$
	门型杆塔	$R \approx 0.0004\rho$
	V 型拉线门型杆塔	$R \approx 0.00045\rho$
深埋式接地与装配式基础自然接地的综合接地体	单柱式杆塔	$R \approx 0.0005\rho$
	门型杆塔	$R \approx 0.0003\rho$
	V 型拉线门型杆塔	$R \approx 0.0004\rho$

注:表中土壤电阻率  $\rho$  一律以  $\Omega \cdot \text{cm}$  为单位。

#### 4. 井管的接地电阻

钻井的加固管和自流井的插入管,在低电阻率地区,其接地电阻可按  $1 \sim 2\Omega$  估计。

#### 五、防雷保护接地电阻的计算

防雷保护接地电阻,即冲击接地电阻,可按下列公式计算:

##### 1. 单独接地体的冲击接地电阻 $R_{ch}$

$$R_{ch} = \alpha R$$

式中： $\alpha$ ——单独接地体的冲击系数，见表 18—24～表 18—26；  
 $R$ ——单独接地体在工频小电流下测出的或按稳态公式算出的电阻值( $\Omega$ )。

计算中所用的土壤电阻率  $\rho$ ，应取雷雨期中最大可能的土壤电阻率，可按下式计算：

$$\rho = \psi \rho_y$$

式中： $\rho_y$ ——雷雨季节中无雨水时所测得的土壤电阻率( $\Omega \cdot \text{cm}$ )；  
 $\psi$ ——由于大地晒干，电阻率增大的系数。见表 18—23。

表 18—23 电阻率增大系数  $\psi$  值

接 地 体	测量时土壤情况	
	湿	干
埋深 0.5m 水平接地	1.8	1.4
埋深 0.8~1m 水平接地	1.45	1.25
长 2~3m 垂直水平接地	1.3	1.15
埋深 2.5~3m 深埋接地	1.1	1.0

宽 2~4cm 的扁钢或直径 1~2cm 的圆钢水平环形接地体，由环的中心引入雷电流，引入处与环有 3~4 个联线，冲击电流波头 3~6 $\mu\text{m}$  下的冲击系数  $\alpha$  值，见表 18—24。

表 18—24 水平环形接地体的  $\alpha$  值

土壤电 阻率 $\rho(\Omega \cdot \text{cm})$	$10^4$			$5 \times 10^4$			$10^5$			
	$I_f(\text{kA})$	20	40	80	20	40	80	20	40	80
环 $D=4\text{m}$	0.6	0.45	0.35	—	—	—	—	—	—	—
环 $D=8\text{m}$	0.75	0.65	0.50	0.55	0.45	0.30	0.40	0.30	0.25	
环 $D=12\text{m}$	0.8	0.70	0.60	0.60	0.50	0.35	0.45	0.40	0.30	

长 2~3m、直径 6cm 以下的垂直接地体,冲击电流波头 3~6 $\mu\text{s}$  下的冲击系数  $\alpha$  值见表 18—25。

表 18—25 垂直接地体的  $\alpha$  值

土壤电阻率 $\rho(\Omega \cdot \text{cm})$	流向大地的电流幅值 $I_f(\text{kA})$			
	5	10	20	40
$10^4$	0.85~0.90	0.75~0.85	0.6~0.75	0.5~0.6
$5 \times 10^4$	0.6~0.7	0.5~0.6	0.35~0.45	0.25~0.3
$10^5$	0.45~0.55	0.35~0.45	0.25~0.30	—

注:表中较大的数值用于 3m 长的接地体,较小者用于 2m 长的接地体。

宽 2~4cm 扁钢或直径 1~2cm 圆钢水平接地体,由一端引入雷电流,冲击电流波头 3~6 $\mu\text{s}$  下的冲击系数  $\alpha$  值见表 18—26。

表 18—26 水平接地体(一端引入雷电流)的  $\alpha$  值

土壤电阻率 $\rho$ ( $\Omega \cdot \text{cm}$ )	$l$ (m)	流向大地的电流幅值 $I_f$ (kA)		
		10	20	40
$10^4$	5	0.75	0.65	0.50
	10	1.00	0.90	0.80
	20	1.15	1.05	0.95
$5 \times 10^4$	5	0.55	0.45	0.30
	10	0.75	0.60	0.45
	20	0.90	0.75	0.60
	30	1.00	0.90	0.80
$10^5$	10	0.55	0.45	0.35
	20	0.75	0.60	0.50
	40	0.95	0.85	0.75
	60	1.15	1.10	0.95
$2 \times 10^5$	20	0.60	0.50	0.40
	40	0.75	0.65	0.55
	60	0.90	0.80	0.75
	80	1.05	0.95	0.90
	100	1.20	1.10	1.05

2. 由  $n$  个相同的水平射线接地体所组成的接地装置的冲击接地电阻  $R_{ch}$

$$R_{ch} = \frac{R_{ch}}{n} \times \frac{1}{\eta}$$

式中： $R_b$ ——每根射线的冲击接地电阻( $\Omega$ )，计算与单独接地体的冲击接地电阻计算公式相同；

$\eta$ ——考虑接地装置各射线相互影响的利用系数，见表 18-27。

3. 由水平接地体联结的  $n$  个垂直接地体组成的接地装置的冲击接地电阻  $R_{ch\Omega}$

$$R_{ch\Omega} = \frac{\frac{R_{chc}}{n} \times R_{chs}}{\frac{R_{chc}}{n} + R_{chs}} \times \frac{1}{\eta}$$

式中： $R_{chc}$ ——单个垂直接地体的冲击接地电阻( $\Omega$ )；

$R_{chs}$ ——水平接地体的冲击接地电阻( $\Omega$ )；

$n$ ——垂直接地体数目；

$\eta$ ——利用系数，见表 18-28。

表中所有的环形接地装置的利用系数  $\eta$  值，均可按照周长相等的原则〔即  $\pi D = 2(A+B)$ 〕用于矩形接地装置的计算中。其中  $D$  为圆环直径， $A$ 、 $B$  为矩形两边长。

表 18-27  $n$  个水平射线接地装置的利用系数


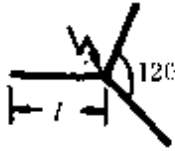
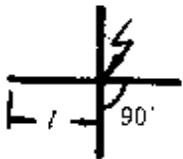
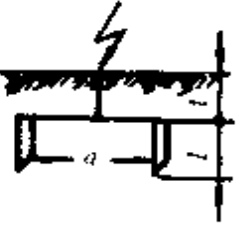
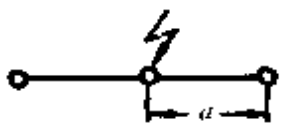



接地装置	射线数 $n$	长度 $l$ (m)	利用系数 $\eta$
	2	任何长度的射线	1
	3	10	0.75
		20	0.80
		40	0.85
		80	0.90
	4	10	0.65
		20	0.70
		40	0.75
		80	0.80



表 18—28  $n$  个垂直接地体组成、并以水平接地体联结的接地装置的利用系数

接地装置	$a/l$	垂直电极数目 $n$	利用系数 $\eta$
	2 3	2 2	0.80 0.85
	2 3	3 3	0.75 0.80
	2 3	3 3	0.70 0.75
	2 3	4 4	0.70 0.75
	2 3	6 6	0.65 0.70

**例 18—2** 变电所的接地装置如图 18—13 所示。已知接地装置埋深 0.5m, 计算用雷电流为 100kA, 在雷雨季节无雨水时测量的土壤电阻率为  $10^4 \Omega \cdot \text{cm}$  (土壤潮湿)。试计算该变电所防雷接地电阻。

**解**

(1) 求土壤电阻率: 根据已知条件, 查表 18—23 得电阻率增大系数  $\psi$  为 1.8。

垂直接地体  $\rho_c = \psi\rho = 1.4 \times 10^4 (\Omega \cdot \text{cm})$

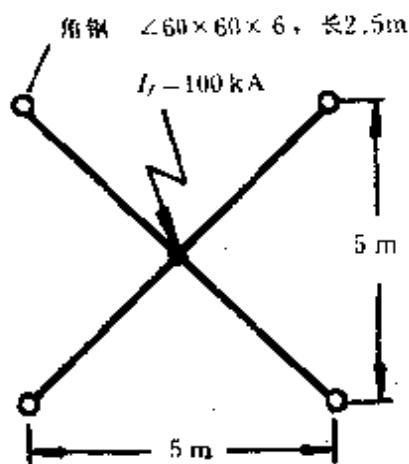


图 18-13 某变电所的防雷接地装置布置图

水平接地体  $\rho_s = \psi\rho = 1.8 \times 10^4 (\Omega \cdot \text{cm})$

(2) 计算工频接地电阻:

① 垂直接地体:

$$R_c = \frac{\rho_c}{2\pi l} \ln \frac{4l}{0.84b} = \frac{1.4 \times 10^4}{2\pi \times 250} \ln \frac{4 \times 250}{0.84 \times 60} = 26.6 (\Omega)$$

② 水平接地体: 水平接地体, 每条长度为

$$l = 500 \sqrt{2} / 2 = 211.5 (\text{cm})$$

$$R_s = \frac{\rho_s}{2\pi l} \ln \frac{2l^2}{bh} = \frac{1.8 \times 10^4}{2\pi \times 211.5} \ln \frac{2 \times 211.5^2}{20 \times 50} = 44.7 (\Omega)$$

(3) 求接地体流向大地的电流: 因为  $R$  等于  $1.7R_c$ , 故可认为由垂直接地体和水平接地体流向大地的电流分别为

$$\frac{100}{2.7} \times 1.7 = 63 (\text{kA}) \text{ 和 } \frac{100}{2.7} \times 1 = 37 (\text{kA})$$

每根垂直接地体与每条水平接地体流向大地的电流分别为

$$\frac{63}{4} \approx 15.7(\text{kA}) \text{ 和 } \frac{37}{4} \approx 9.3(\text{kA})$$

(4)求每根角钢的冲击电阻:由表 18—26 可知,当角钢长 2.5m、流向大地的电流幅值  $I_f$  为 20kA、且  $\rho$  为  $10^4\Omega \cdot \text{cm}$  时,则冲击系数  $\alpha$  为 0.75;当  $\rho$  为  $5 \times 10^4\Omega \cdot \text{cm}$  时, $\alpha$  为 0.45。现  $I_f$  为 15.7kA,用内插法得上述两种情况的  $\alpha$  值分别为 0.8 和 0.5;当  $\rho_c$  为  $1.4 \times 10^4\Omega \cdot \text{cm}$  时,用内插法得  $\alpha$  为 0.6,故每根角钢的冲击接地电阻为

$$R_{chc} = 0.6 \times 26.6 \approx 16(\Omega)$$

(5)求整个接地装置的冲击接地电阻:由表 18—26 估计,当水平射线长约 5m、流向大地的电流幅值  $I_f$  为 10kA、且  $\rho$  为  $10^4\Omega \cdot \text{cm}$  时, $\alpha$  为 0.75; $\rho$  为  $5 \times 10^4\Omega \cdot \text{cm}$  时, $\alpha$  为 0.55。现水平射线长约 2m,由表 18—26 得上述两种情况的  $\alpha$  值分别为 0.55 和 0.3;当  $\rho_c$  为  $1.8 \times 10^4\Omega \cdot \text{cm}$  时,用内插法可取  $\alpha$  为 0.45,又由表 18—27 取  $\eta$  为 0.6 故水平接地体的冲击接地电阻为

$$R_{chs} = \frac{\alpha_s R_s}{n} \times \frac{1}{\eta} = \frac{0.45 \times 44.7}{4} \times \frac{1}{0.6} = 8.4(\Omega)$$

$\alpha/l = 500/250 = 2$ ,由表 18—28 取  $\eta$  为 0.7,整个接地装置的冲击接地电阻为

$$R_{ch\Sigma} = \frac{\frac{R_{chc}}{n} \times R_{chs}}{\frac{R_{chc}}{n} + R_{chs}} \times \frac{1}{\eta} = \frac{\frac{16}{4} \times 8.4}{\frac{16}{4} + 8.4} \times \frac{1}{0.7} = 3.9(\Omega)$$

### 六、接地装置截面的要求

1. 人工接地极最小尺寸(表 18—29)。

表 18—29 人工接地极的最小尺寸

接 地 极 类 别		最 小 尺 寸(mm)
圆 钢 直 径		16
角 钢		40×40×4
钢 管	管 壁 厚 度	2.5
	内 径	13

2. 接地线最小尺寸

按机械强度并考虑防腐要求,接地线、接零线的允许最小尺寸见表 18—30 和表 18—31。

表 18—30 接地线的最小尺寸

导体类别	钢			铜	铝
	屋 内	屋 外	地 下		
圆钢直径(mm)	5	6	8	—	—
扁钢截面(mm <sup>2</sup> )	24(厚 3mm)	48(厚 4mm)	48(厚 4mm)	—	—
角钢边厚(mm)	2	2.5	4	—	—
钢管管壁厚(mm)	2.5	2.5	3.5	—	—
露天敷设的导体	—	—	—	4	6
绝缘导体	—	—	—	1.5	2.5
电缆的接地芯线或具有公共保护包皮的多芯导线的接地芯线	—	—	—	1	1.5

表 18—31 铜、铝接零线或接地线的最小尺寸

导体类别	铜(mm <sup>2</sup> )	铝(mm <sup>2</sup> )
明设的裸导体	4	6
绝缘导线	1.5	2.5
电缆接地芯或与相线包在同一保护外套内的多芯导线的接地芯	1	1.5

携带式、移动式电气设备,其接地线或接零线应采用 0.75~1.5mm<sup>2</sup> 以上的多股铜线。

### 3. 热稳定校验

根据热稳定条件,零线或接地线的最小截面应符合下式要求:

$$S \geq \frac{I_d^{(1)}}{C} \sqrt{t}$$

式中:  $S$ ——零线或接地线的最小截面(mm<sup>2</sup>);

$I_d^{(1)}$ ——单相短路电流或接地短路电流(A);

$t$ ——短路持续时间(s);

$C$ ——决定于材料性能的计算系数,低压中性点直接接地电网, $C$ 值可按表 18—32 选取。

表 18—32 校验热稳定用的计算系数 C 值

种 类	材 料		
	钢	铜	铝
零 线	60	180	100
接 地 线	90	270	155

4. 关于防雷保护接地装置的要求,见第十九章第一节。

### 七、保护接零计算

保护接零的零线,除上面所述的要求外,还要符合相零回路阻抗的要求,以满足线路保护要求。

#### 1. 单相短路电流计算

计算方法见第六章第二节 1kV 以下低压电网不对称短路电流的计算

#### 2. 线路保护装置的整定

当发生单相短路时,保护装置应迅速动作。

自动开关  $I_{kz} \leq I_d^{(1)}/1.5$

式中:  $I_{kz}$ ——自动开关瞬时(或短延时)动作过电流脱扣器整定值(A)。

熔断器  $I_r \leq I_d^{(1)}/4$

式中:  $I_r$ ——熔体的额定电流(A)。

#### 3. 接零线路允许长度计算

相零回路阻抗不能过大,否则就不能保证足够的单相短路电流以促使线路保护装置迅速动作。相零回路阻抗(此处不包括变压器阻抗)允许值  $Z_{0x}$ 可按下式估算:

$$Z_{0x} = \frac{U}{1.5I_{kz}} - Z_b$$

$$Z_{0r} = \frac{U}{4I_{er}} - Z_b$$

式中： $U$ ——相电压(V)；

$Z_b$ ——变压器阻抗(折算到低压侧)( $\Omega$ )。

单一截面的相零回路，只要查取回路单位长度阻抗值，便可按上式计算；各段截面不同的相零回路，可按照类似方法分段进行计算。

## 第十九章 防雷保护

### 第一节 基础知识及防雷要求

#### 一、基础知识

##### 1. 雷电流和雷电压的概念

(1) 雷电流幅值:即主放电时雷电流的最大值,一般可达几十 kA,最高可达几百 kA。作防雷设计时可按 100kA 考虑。雷电流幅值概率  $P$  由下式表示:

$$\lg P = - \frac{I_f}{108}$$

式中: $I_f$ ——雷电流幅值(kA)。

我国雷电流幅值的概率曲线如图 19—1 所示。

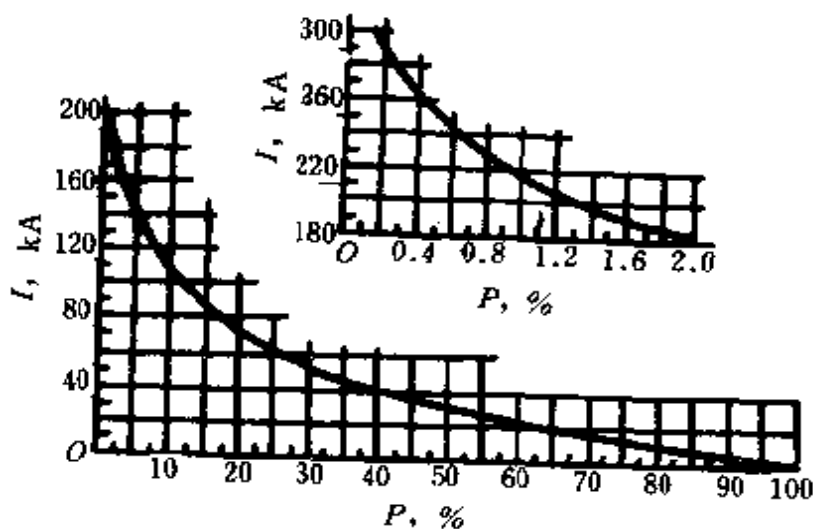


图 19 1 我国雷电流幅值概率曲线



(2) 雷电流波头:雷电流在  $1 \sim 4\mu\text{s}$  (平均约  $2\mu\text{s}$ ) 内增长到最大值,这段电流增长称为波头。

(3) 雷电流波尾:雷电流由最大值衰减到其  $1/2$  值时所经历的时间。

(4) 雷电流陡度:即雷电流增长速度。雷电流陡度可高达  $50\text{kA}/\mu\text{s}$ ,平均陡度约  $30\text{kA}/\mu\text{s}$ 。

(5) 雷电放电时间:即一次雷电放电持续时间,大约为几万分之  $s$  到几百  $ms$ 。作防雷设计时一般取波头为  $2.6\mu\text{s}$ ,波头形状为斜角形。

(6) 冲击波的特征:一般用波幅值 ( $kA$  或  $kV$ )、波头 ( $\mu\text{s}$ ) 对波尾 ( $\mu\text{s}$ ) 的比值来表示。如图 19—2 所示的雷电流的冲击波可表示为  $50kA/35\mu\text{s}$ 。

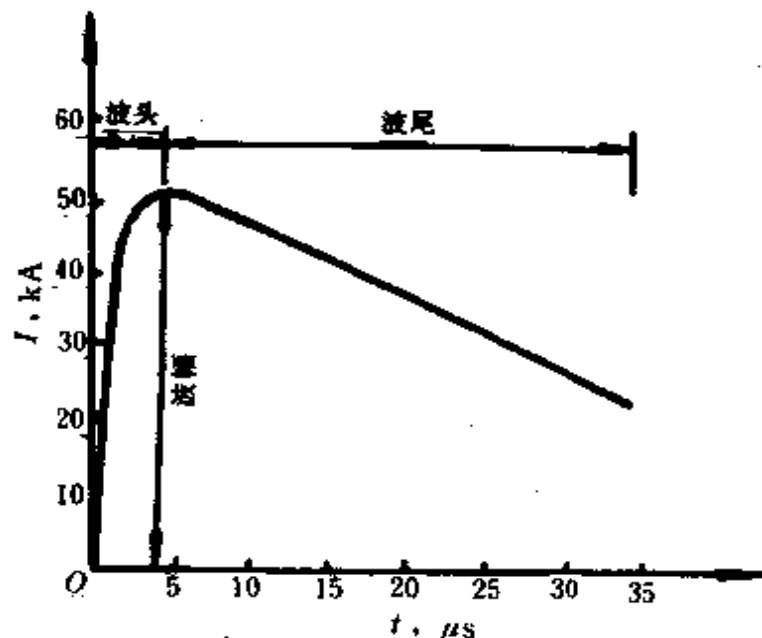


图 19—2 雷电流波形

(7) 雷电冲击过电压:系指雷电压的最大值。在发生对地雷

闪时, 雷云离地高度仅几  $km$ , 此时雷电压高达 1 亿  $V$  左右。直击雷的冲击过电压可由下式计算:

$$U_z = I_f R_{ck} + L \frac{di}{dt}$$

式中:  $U_z$ ——冲击过电压(kV);

$i, I_f$ ——雷电流和雷电流幅值(kA);

$R_{ck}$ ——防雷装置的冲击接地电阻( $\Omega$ );

$L$ ——雷电流通路的电感(H)  $L = 1.3l \times 10^{-6}$ ;

$l$ ——电流通路长度(m)。

雷电的极性约占 85% 左右为负的, 少数为正的或振荡的。但设计中一般按正极性考虑。

我国海南岛的澄迈县年雷暴日在 133 天; 辽宁约为 26 ~ 42 天; 浙江为 29 ~ 67 天; 广东为 35 ~ 124 天; 上海为 32 天左右。

## 2. 导线落雷数和感应过电压的计算

(1) 导线落雷数: 根据经验, 送电线路每年遭受直击雷的总数可按下式估算:

$$N = 0.15hl^n \times 10^{-3}$$

式中:  $h$ ——避雷线或导线平均悬挂高度(m);

$l$ ——线路长度(km);

$n$ ——线路通过地区每年平均雷电日数, 根据当地气象台、站资料确定。

(2) 雷电对导线的感应过电压的计算: 雷击点距电力线路 50m 以外时, 线路上雷电感应的冲击过电压可按下式近似计算:

$$U_x = \frac{25I_f h}{S}$$

式中:  $U_x$ ——线路上雷电感应冲击过电压(kV);

$I_f$ ——雷击点雷电流幅值(kA);

$h$ ——导线平均高度(m);

$S$ ——线路距雷击点的水平距离(m)。

雷电感应的冲击过电压只在极少情况下达到 500 ~ 600kV。

**例 19—1** 某厂厂区 10kV 供电线路,其导线平均悬高为 10m,如受雷电感应,其雷电流幅值取 100kA,线路距雷击点的水平距离为 50m,试求线路上感应过电压的大小。

**解** 线路上感应过电压为

$$U_g = \frac{25I_f h}{S} = \frac{25 \times 100 \times 10}{50} = 500(\text{kV})$$

### 3. 建筑物落雷数的计算

建筑物每年遭受直击雷的总数可按下式估算:

$$N = 0.015nk(l + 5h)(b + 5h) \times 10^{-6}$$

式中: $n$ ——建筑物所处地区每年平均雷电日数,根据当地气象台、站资料确定;

$l, b, h$ ——建筑物的长、宽、高(m);

$k$ ——雷击次数校正系数,一般可取 1,在下列情况下取 1.5 ~ 2:位于旷野孤立的建筑物或金属屋面的砖木结构建筑物;位于河边、湖边、山坡下或山地中土壤电阻率较小处、地下水露头处、土山顶部、山谷风口等处的建筑物,以及特别潮湿的建筑物;建筑群中高于 25m、旷野高于 20m 的建筑物。

## 二、各种防雷设施的要求和规定

### 1. 独立避雷针与被保护设备之间的距离规定(图 19—3)

(1) 独立避雷针与配电装置导电部分或其它金属物体之间的空中距离应符合下式要求:

$$S_k \geq 0.3R_{ca} + 0.1h$$

式中: $R_{ca}$ ——独立避雷针的冲击接地电阻( $\Omega$ );

$h$ ——配电装置等的高度(m)。

$S_k$ 一般不得小于 5m。为降低避雷针落雷时所产生的感应过

电压,在条件许可时  $S_d$  宜增大至 10m。

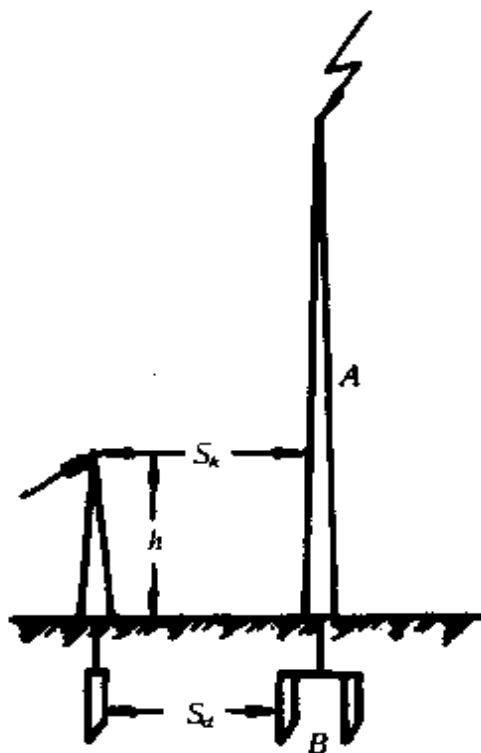


图 19—3 独立避雷针与构架及其接地回路间的允许距离

(2) 独立避雷针的接地装置与变电所接地网间最近的地中距离  $S_d$  (以一般土壤的冲击放电强度为 300kV/m 计) 应符合下式要求:

$$S_d \geq 0.5R_{ch}$$

经验表明,  $S_d > 0.3R_{ch}$  就可确保安全,  $S_d$  一般不应小于 3m。

## 2. 避雷线与被保护设备之间的距离规定

(1) 避雷线与配电装置导电部分之间, 以及与变电所电气设备和构架接地部分或其它金属物体之间的空中距离  $S_k$  应符合以下要求:

① 一端绝缘而另一端接地的避雷线：

$$S_k \geq 0.3R_{ch} + 0.16(h + \Delta)$$

式中： $\Delta$ ——校验点到接地杆柱的距离(m)；

$h$ ——避雷线接地端杆柱的高度(m)。

② 两端都接地的避雷线：

$$S_k \geq \beta[0.3R_{ch} + 0.16(h + \Delta')]$$

$$\beta = \frac{1 + \frac{\tau R_{ch}}{1.24(h + l_2)}}{1 + \frac{h + \Delta'}{h + l_2} + \frac{\tau R_{ch}}{6.2(h + l_2)}} \approx \frac{h + l_2}{2h + l_2 + \Delta'}$$

式中： $\beta$ ——分流系数；

$\Delta'$ ——校验点到较近一端杆柱的距离(m)；

$l_2$ ——校验点与较远一端杆柱的距离(m)；

$h$ ——避雷线杆柱高度(m)；

$\tau$ ——雷电流波头，一般取  $2.6\mu\text{s}$ 。

$S_k$  一般亦不应小于 5m，在条件许可时可适当增大。

(2) 避雷线的接地装置与变电所最近接地网或其它地下金属物之间的地中距离  $S_d$  应符合以下要求：

① 一端绝缘而另一端接地的避雷线：

$$S_d \geq 0.3R_{ch}$$

② 两端接地的避雷线：

$$S_d \geq 0.3\beta R_{ch}$$

$S_d$  一般亦不应小于 3m。

(3) 避雷线与电源线之间的垂直距离  $h$  应符合下式要求(图 19—4)：

$$h \geq \frac{D}{2\text{tg}\alpha}$$

式中： $D$ ——两电源边线间的水平距离(m)；

$\alpha$ ——保护角，要求不大于  $30^\circ$ 。

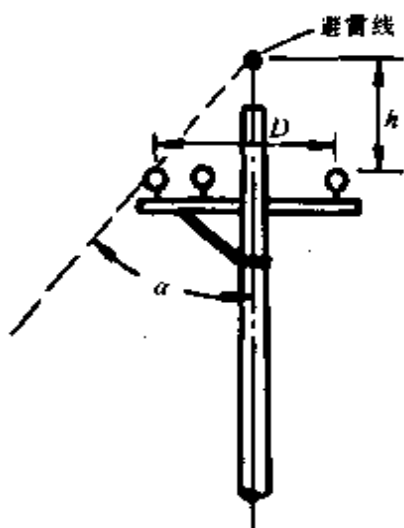


图 19-4

3. 避雷器与 3 ~ 10kV 主变压器的最大电气距离(表 19—1)

表 19—1 避雷器与 3 ~ 10kV 主变压器最大电气距离(不宜大于)(m)

雷季经常运行的进线路数	1	2	3	4 及以上
最大距离	15	23	27	30

4. 工业和民用建筑物、构筑物的防雷要求

(1) 建筑物和构筑物的防雷分类: 建筑物和构筑物可分为工业和民用两类。

① 工业建筑物和构筑物: 根据生产性质、发生雷电事故的可能性和后果, 按防雷要求分为三类(主管部门另有规定者除外):

第一类

A. 建筑物和构筑物中制造、使用或贮存大量爆炸物质, 如炸药、火药、起爆药、火工品等, 因电火花引起爆炸, 会造成巨大破坏和人员伤亡者。

B. 建筑物和构筑物中在正常情况下能形成爆炸性混合物, 如

气体、蒸汽或粉末与空气的混合物,因火花引起爆炸者,即 Q - 1 级或 G - 1 级危险场所。如炸药仓库、雷管仓库、乙炔发生间等。

### 第二类

A. 建筑物和构筑物中制造、使用或贮存爆炸物质,但火花不易引起爆炸或不造成巨大破坏和人身伤亡者;

B. 建筑物和构筑物中在不正常情况下能形成爆炸性混合物,因火花引起爆炸者,即 Q - 2 级或 G - 2 级危险场所。如洗罐库(棚)、汽油库、危险品货物等。

### 第三类

A. 除第一类、第二类建筑物和构筑物以外的爆炸、火灾危险场所,按雷击可能性及其后果对国民经济的影响确定需要防雷者:

a. 建筑物和构筑物中在不正常情况下只能在局部地形成爆炸性混合物,因电火花引起爆炸,即 Q - 3 级场所;

b. 有可燃物质的建筑物、构筑物因电火花引起火灾,即 H - 1 级、H - 2 级、H - 3 级火灾危险场所;

c. 保存有小量金属包装的爆炸物的房屋。

B. 历史上有雷害事故较多地区的重要建筑物和构筑物。

C. 高度在 15m 及以上的烟囱、水塔等孤立的高耸建筑物和构筑物;在年雷暴日数小于 30 的地区,高度为 20m 及以上。

D. 根据建筑物年可能雷击次数为  $N \geq 0.01$  次/年及当地雷击情况,确定需要防雷的建筑物。

② 民用建筑物:从政治影响、重要性、人员多少及国民经济上、科学文化或建筑艺术上的价值可分为两类:

第一类 具有重大政治意义的建筑物,如人民大会堂、国家重要的机关办公楼、接见外国元首的迎宾馆、大型火车站、国际机场、大型体育馆、大型展览馆、历史上有价值的古文物建筑物等。

### 第二类

A. 重要的公共建筑物,如大型百货公司、大型影剧院等,按



当地雷击情况需要防雷者。

B. 同第三类工业建筑物中的 B、D 项的规定。

C. 高度在 15m 以上的孤立建筑物。

(2) 建筑物和构筑物的防雷措施(表 19—2):第一、二类工业建筑物和构筑物应有防直击雷、防感应雷和防雷电波侵入的措施;第三类的工业及第一、二类民用建筑物和构筑物应有防直击雷和防雷电波侵入的措施;不属于一、二、三类的工业和第一、二类民用建筑物和构筑物,可只设防雷电波沿低压架空线侵入的措施。

### 三、关于避雷装置的一些要求

#### 1. 接闪器常用材料的最小尺寸

避雷针、避雷网(带)的材料一般采用圆钢和扁钢。接闪器应镀锌或涂漆,以免锈蚀。当接闪器截面锈蚀 30% 以上时,应予更换。避雷线一般采用截面不小于  $35\text{mm}^2$  的镀锌钢绞线。

#### 2. 引下线要求

引下线一般采用圆钢或扁钢,其尺寸和防腐蚀要求与避雷网(带)相同。当采用钢绞线时,其截面不应小于  $25\text{mm}^2$ 。

为了便于测量接地电阻,在引下线距地面高约 1.8m 处设断接卡。

在易受机械损坏的地方,距地面约 1.7m 至地面下 0.3m 的一段引下线和接地线应加角钢、竹管等保护。

互相连接的避雷针、避雷网(带)等接地引下线,一般不应小于两根,其间距离不应大于表 19—2 所列数值。

当引下线截面锈蚀 30% 以上时,应予更换。

#### 3. 接地体要求

为了防止跨步电压伤人,防直击雷接地装置距建筑物和构筑物出入口和人行道的距离不应小于 3m。当达不到时,可采取下列措施之一:

(1) 水平接地体局部深埋 1m 以上。



表 19-2 工业和民用建筑物和构筑物的防雷措施

措施	工业第一类		工业第二类	工业第三类	民用第一类	民用第二类
	类别	措施	措施	措施	措施	措施
防 直 击 雷	接闪器	<p>装设独立避雷针</p> <p>当难于装设独立避雷针时,可将避雷针或网格不大于<math>6 \times 6m</math>的避雷网直接装设在建筑物或构筑物上。</p>	<p>装设避雷网或避雷针。避雷网应沿易受雷击的部位敷成不大于<math>6 \times 10m</math>的网格。所有避雷带应用连接</p>	<p>在易受雷击的部位装设避雷带或避雷针</p>	<p>装设避雷网或避雷带,应沿易受雷击的部位敷设,网格要求不大于<math>6 \times 10m</math>。避雷带间、屋面上任何一点距离避雷带均不应大于<math>5m</math>。当有三条及以上平行避雷带时,每隔不大于<math>24m</math>处,应将平行避雷带连接起来</p>	<p>同工业第三类</p>
	引下线	<p>引下线不应少于两根,其间距不应大于<math>18m</math>,沿建筑物外墙均匀布置</p>	<p>引下线不应少于两根,其间距不宜大于<math>24m</math></p>	<p>引下线不应少于两根,其间距不宜大于<math>40m</math>。周长和高度均不超过<math>40m</math>的建筑物和构筑物,可只设一根引下线</p>	<p>引下线不应少于两根,其间距不宜大于<math>24m</math></p>	

(续表)

类别		工业第一类	工业第二类	工业第三类	民用第一类	民用第二类
措施	接地装置	<p>围绕建筑物和构筑物敷设闭合回路,其接地电阻①不应大于<math>10\Omega</math>,并和电气设备接地装置及所有进入建筑物和构筑物的金属管道相连,并可兼作防雷之用</p>	<p>防直击雷和感应雷共用接地装置,其冲击接地电阻不应大于<math>10\Omega</math>,并和电气设备接地及埋地金属管道相连</p>	<p>其冲击接地电阻不宜大于<math>30\Omega</math>,并与电气设备接地装置及埋地金属管道相连</p>	<p>宜围绕建筑物敷设,其冲击接地电阻不应大于<math>10\Omega</math></p>	<p>主要的公共建筑物防雷接地装置的冲击接地电阻不应大于<math>10\Omega</math></p>
	防直击雷	<p>独立避雷针应有独立的接地装置,其冲击接地电阻不应大于<math>10\Omega</math></p>	<p>为防止雷电流经引下线时产生的高电位对附近金属物的反击,金属物至引下线的距离应符合下列要求:  <math>S_k \geq 0.05l</math>                      式中,<math>l</math>为引下式</p>	<p>防雷电装置与电气设备及埋地金属管道相连,如不相连时,则(1)两者间的距离应符合下列要求:  <math>S_d \geq 0.2R_{ak}</math>                      (2)防雷装置的</p>	<p>防雷接地装置与电气设备及埋地金属管道相连,如不相连时,两者间距离不宜小于<math>2m</math></p>	<p>防雷接地装置与电气设备及埋地金属管道相连,如不相连时,两者间距离不宜小于<math>2m</math></p>
	反击	<p>独立避雷针至被保护建筑物和构筑物之间的空中距离:  <math>S_k \geq 0.3R_{ak} + 0.1</math>                      hm                      地下部分距离:  <math>S_d \geq 0.3R_{ak}</math></p>	<p>建筑物和构筑物应均压环,环间垂直距离不应大于<math>12m</math>,所有引下线,建筑物内的金属结构和金属设备均应连在环上。可利用电气设备接地干线环作为均压环。</p>			

(续表)

类别		工业第一类	工业第二类	工业第三类	民用第一类	民用第二类
措施	防直击雷	<p>式中, <math>R_d</math> 为冲击接地电阻(<math>\Omega</math>);  <math>h</math> 为被保护物的高度(m)  <math>S_k</math> 不应小于 5m;  <math>S_d</math> 不应小于 3m</p>	<p>线计算点到地面的长度(m)</p>		<p>的引下线与金属物之间的距离应符合下列要求:  <math>S_k \geq 0.2R_{dA} + 0.05/m</math>  <math>S_d</math> 不应小于 2m</p>	
	防反击	<p>如树木高于建筑物且不在避雷针保护范围内时,建筑物和树木的净距不应小于 5m</p>				
措施	防感应雷	<p>建筑物、构筑物内的金属物和突出屋面的金属物,均应接到防雷感应的接地装置上。金属屋面每隔 24m 用引下线接地一次。现场浇制的或由预制构件组成的钢筋混凝土屋面,其钢筋宜绑扎或焊接成闭合回路,并每隔 24m 用引下线接地一次</p>	<p>建筑物和构筑物内的主要金属物应与接地装置相连</p>			
	防静电感应					

(续表)

类别 措施		工业第一类		工业第二类	工业第三类	民用第一类	民用第二类
		<p>平行敷设的长金属物，其净距小于100mm时，应每隔30m用金属线跨越，交叉净距小于100mm时，其交叉处应跨越。当管道连接处不能保持良好的金属接触时，在连接处应用金属线跨越。防感应的接地电阻不应大于10Ω，并和电气设备接地装置共用。屋内接地干线与防感应雷接地装置的连接，不应少于两处</p>	<p>平行敷设的长金属物，其净距小于100mm时，应每隔30m用金属线跨越，交叉净距小于100mm时，其交叉处应跨越</p>				
防电磁感应							
防感应雷							

(续表)

类别 情况	工业第一类	工业第二类	工业第三类	民用第一类	民用第二类
防 雷 电 波 侵 入	<p>低压线路宜全长采用电缆直埋敷设,在入户端应将电缆的金属外皮接到防感应雷的接地装置上。架空线采用不小于50m铠装电缆埋地引入时,换线处应装设阀型避雷器,避雷器、电缆金属外皮和绝缘子铁脚等应连在一起接地,其冲击接地电阻不应大于10Ω。架空金属管道在进入建筑物和构筑物处,应与防感应雷的接地装置相连。在靠近建筑物和构筑物100m的管道,应在每隔约25m接地一次,其冲击接地电阻不应大于20Ω。埋地或地沟内的金属管道,在进入建筑物和构筑物处也应与防感应雷的接地装置相连</p>	<p>低压架空线埋地引入一段电缆埋地引入时,与工业第一类相同。 爆炸危险性较小或年平均雷日数在30日以下时,可采用低压架空线直接引入建筑物和构筑物内的方式,但应符合下列要求: (1)在入户处装设阀型避雷器或2~3mm的空气间隙。并与绝缘子铁脚连在一起接到防雷接地装置上,其总冲击接地电阻不应大于5Ω。 (2)入户端的三基电杆绝缘子</p>	<p>在入户处应将绝缘子铁脚接到防雷及电气设备的接地装置上。进入建筑物的架空金属管道在入户处宜和上述接地装置相连</p>	<p>当低压线路采用电缆直埋引入时,在入户端应将电缆金属外皮与接地装置相连。当架空线埋地引入一段电缆埋地引入时,与工业第一类相同。 由架空线直接引入时,在入户处应加装避雷器,并将其和绝缘子铁脚连在一起接到电气设备的接地装置上。靠近建筑物上的两基电杆上的绝缘子铁脚还应接地,其冲击接地电阻不大于</p>	<p>同工业第三类</p>

(续表)

类别 措施	工业第一类	工业第二类	工业第三类	民用第一类	民用第二类
防 雷 电 波 侵 入		铁脚也应接地,靠近建筑物和构筑物的电杆,其中击接地电阻不应大于10Ω,其余两基电杆不应大于20Ω。 架空和直埋地的金属管道,在入户处应与接地装置相连,架空金属管道和构筑物约25m处还应接地一次,其冲击接地电阻不应大于10Ω		30Ω。 进入建筑物的架空金属管道,应在入户处与接地装置相连	

注:①未标明冲击接地电阻时,均指工频接地电阻。

(2) 水平接地体局部包以绝缘物,如包以 50 ~ 80mm 厚的沥青层。

(3) 采用沥青碎石地面或在接地体上方敷设 50 ~ 80mm 厚的沥青层,敷设宽度应超出接地装置的 2m。

(4) 采用均压带。

接地装置的导体最小允许尺寸见表 19—3。

表 19—3 接地装置的导体最小允许尺寸

防雷装置		圆钢直径 (mm)	钢管直径 (mm)	扁钢截面 (mm <sup>2</sup> )	角钢厚度 (mm)	钢绞线 截面 (mm <sup>2</sup> )	备注
接闪器	避雷针在 1m 及以下时	φ12	φ20				镀锌或涂漆,在腐蚀性较大的场所应增大一级或采取其它防腐蚀措施
	避雷针在 1 ~ 2m 时	φ16	φ25				
	避雷针装在烟囱顶端	φ20					
	避雷带(网)	φ8		48, 厚 4mm			
	避雷带装在烟囱顶端	φ12		100, 厚 4mm			
	避雷线					35	
引下线	明设	φ8		48, 厚 4mm			同上
	暗设	φ10		60, 厚 5mm			
	装在烟囱上时	φ12		100, 厚 4mm			
接地体	水平埋设	φ12		100, 厚 4mm			在腐蚀性土壤中应镀锌或加大截面
	垂直埋设		φ50 壁厚 3.5		4		

## 第二节 避雷装置及其计算

### 一、避雷针保护范围计算

#### 1. 单支避雷针保护范围(见图 19—5)

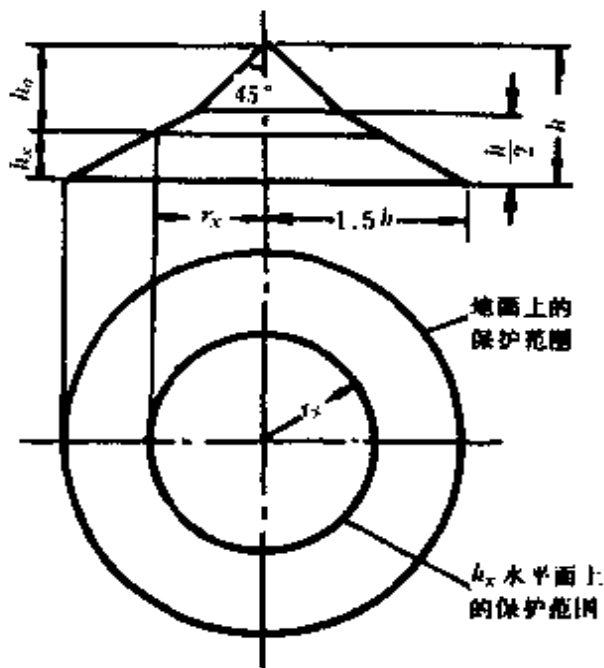


图 19—5 单支避雷针的保护范围

(1) 地面上的保护半径  $r_0$ :

$$r_0 = 1.5h$$

式中： $h$ ——避雷针高度(m)。

(2) 高度  $h_x$  水平面上的保护半径  $r_x$ :

$$\text{当 } h_x \geq h/2 \text{ 时, } r_x = (h - h_x)P$$

$$\text{当 } h_x < h/2 \text{ 时, } r_x = (1.5h - 2h_x)P$$

式中： $P$ ——高度影响系数，当  $h \leq 30\text{m}$  时， $P = 1$ ；当  $30 < h \leq 120\text{m}$  时， $P = 5.5 / \sqrt{h}$ 。



2. 两支等高避雷针的保护范围(图 19—6)

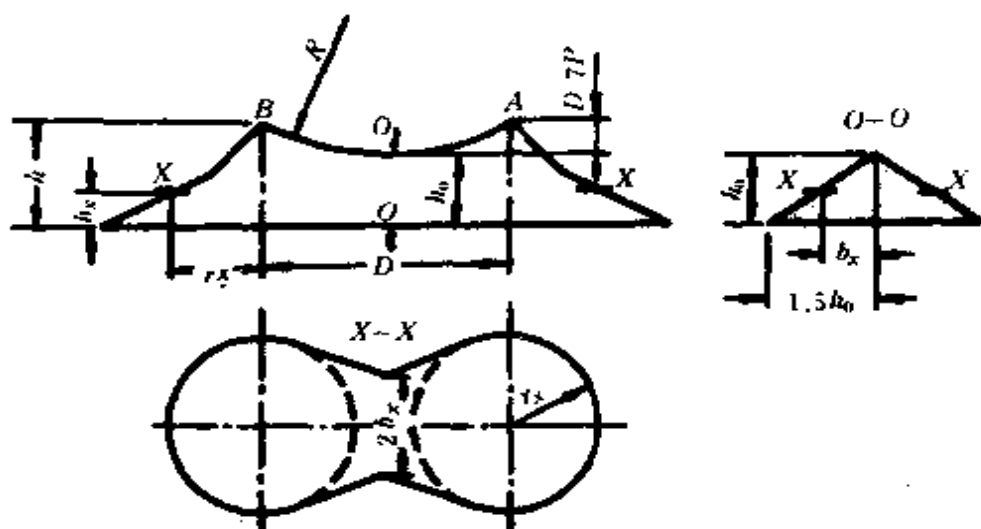


图 19—6 两支等高避雷针的保护范围

(1) 两针外侧保护范围：计算方法与单支避雷针的计算相同。

(2) 两针之间的保护范围：

① 两针之间保护范围的最低点高度  $h_0$ ，按下式计算：

$$h_0 = h - D/7P$$

式中： $D$ ——两避雷针间的距离(m)；

$P$ ——同前。

② 两针之间高度  $h_x$  水平面上最小保护宽度的一半  $b_x$ ，按下式计算：

$$b_x = 1.5(h_0 - h_x)$$

两针间距离与针高之比( $D/h$ ) 不宜大于 5。

3. 两支不等高避雷针的保护范围(图 19—7)

(1) 两针外侧保护范围：计算方法与单支避雷针的计算相同。

(2) 两针之间的保护范围：先确定较高针  $A$  的保护范围，再

找到与较低针  $B$  等高的等效避雷针  $A'$  的位置, 然后按两支等高避雷针的计算方法确定其间保护范围。

两针之间保护范围最低点高度  $h_0$ , 按下式计算:

$$h_0 = h_B - \frac{D'}{7P}$$

式中:  $h_B$  —— 较低避雷针的高度(m);

$D'$  —— 较低避雷针与等效避雷针之间的距离(m)。

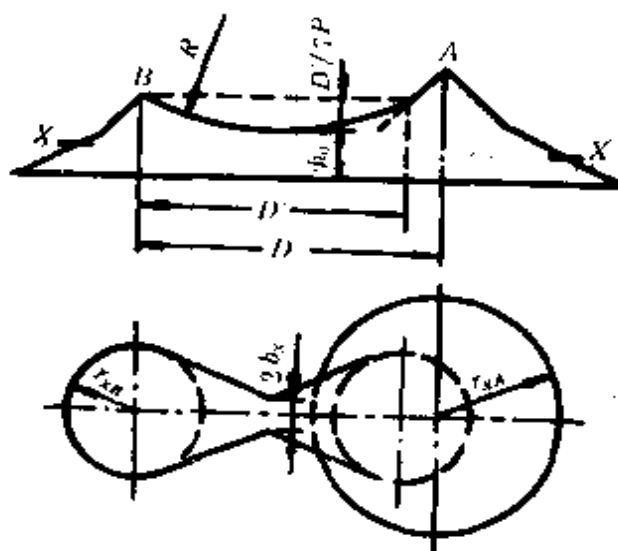


图 19-7 两支不等高避雷针的保护范围

#### 4. 多支等高避雷针的保护范围(图 19—8)

##### (1) 三支等高避雷针:

① 三针形成三角形外侧保护范围, 按单支和两支等高避雷针确定。

② 三针形成三角形内侧保护范围, 也按两支等高避雷针确定。如果每两针之间都能满足  $b_x \geq 0$  的条件, 则高度为  $h_x$  的水平面上全部面积在三针保护范围之内。

(2) 四支及四支以上等高避雷针: 可以将它们分成几组三支等高避雷针, 按三支等高避雷针的计算方法确定其保护范围。

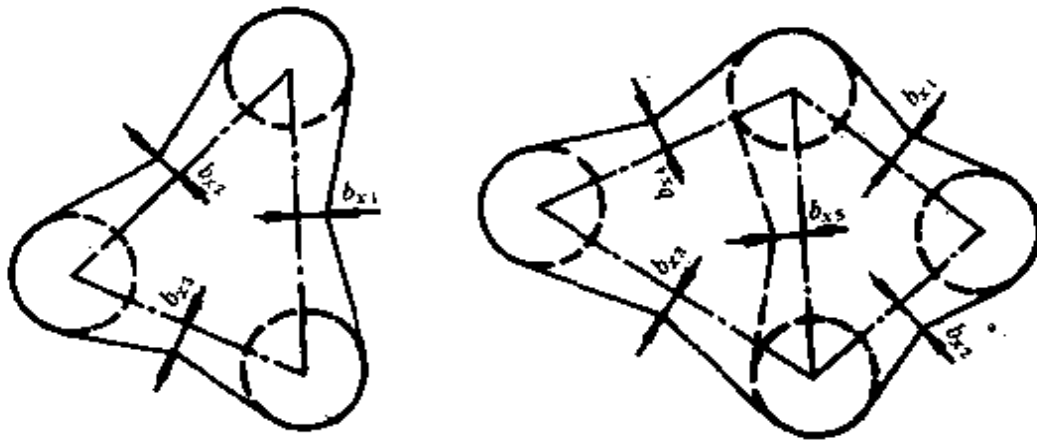


图 19-8 多支等高避雷针在  $h_x$  水平面上的保护范围

5. 多支不等高避雷针的保护范围

可按图 19—7 和图 19—8 的类似方法计算。

二、避雷线保护范围计算

1. 单条避雷线保护范围(图 19—9)

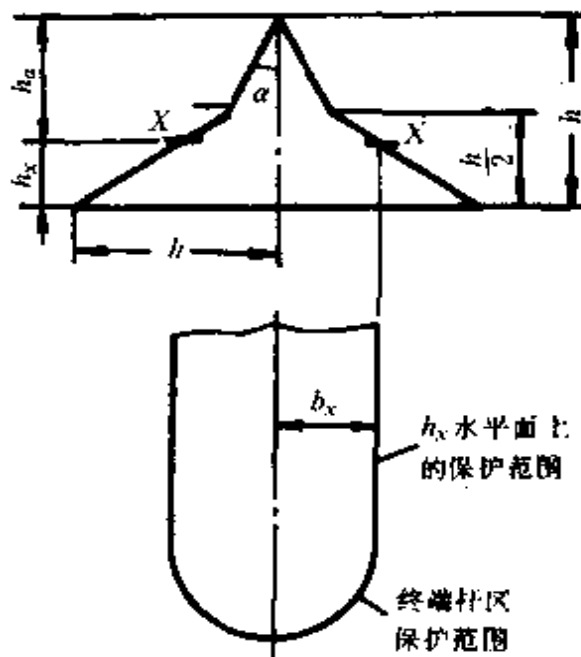


图 19-9 单条避雷线的保护范围

图 19—9 中,  $h$  为避雷线最大弧垂点的高度,  $\alpha$  为避雷线保护角。  $\alpha$  越小, 保护效果越好, 一般取  $20 \sim 30^\circ$ 。

(1) 避雷线两侧的保护范围:

$$\text{当 } h_x \geq h/2 \text{ 时 } b_x = a(h - h_x)P$$

$$\text{当 } h_x < h/2 \text{ 时 } b_x = (h - bh_x)P$$

式中:  $h_x$ ——被保护物高度(m);

$h$ ——避雷线高度(m);

$h_x$ ——高度  $h_x$  水平面上保护宽度的一半(m);

$a, b$ ——考虑取不同保护角时的计算系数, 可由表 19—4 查得。

表 19—4 避雷线保护范围的计算系数

保护角 $\alpha$	$20^\circ$	$25^\circ$	$30^\circ$
$a$	0.36	0.47	0.58
$b$	1.64	1.53	1.42

(2) 单根避雷线的端部保护范围: 计算方法与两侧保护范围计算相同。

## 2. 两条平行避雷线的保护范围(图 19—10)

图 19—10 中,  $a, b$  点为两避雷线最大弧垂点, 一般情况下,  $h_a = h_b = h_0$

(1) 两避雷线外侧保护范围: 计算方法与单条避雷线的计算相同。

(2) 两避雷线内侧保护范围: 两避雷线之间的保护范围最低高度  $h$  可按下式计算:

$$h_0 = h - \frac{D}{4P}$$

式中:  $D$ ——两避雷线间的距离(m)。

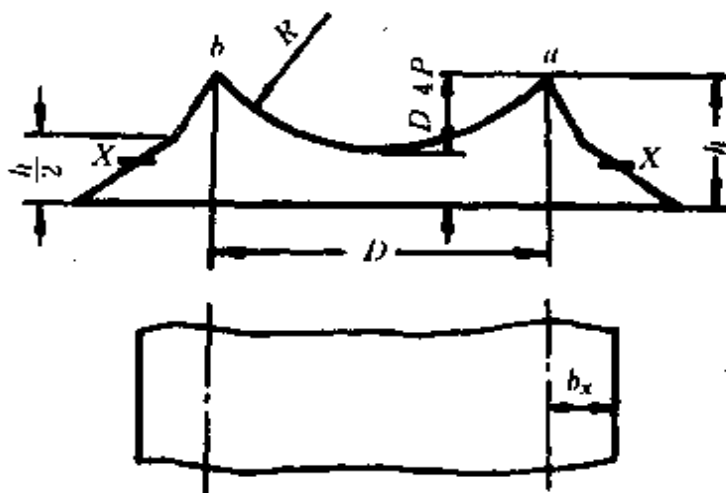


图 19—10 两条平行避雷线的保护范围

(3) 两避雷线端部保护范围: 计算方法与两支等效避雷针的计算相同, 等效避雷针的高度约为避雷线高度的 0.8 倍。

### 三、部分特殊建筑物和构筑物的防雷要求

#### 1. 露天可燃气体贮气柜的防雷要求

(1) 贮气柜壁厚大于 4mm 时, 可不装设接闪器, 但应接地, 柜壁上接地点不应少于 2 处, 其间距不应大于 30m, 冲击接地电阻不大于  $30\Omega$ 。

(2) 对放散管和呼吸阀宜在管口或附近装设避雷针, 高出管顶应不小于 3m, 管口上方 1m 应在保护范围内。

(3) 活动的金属柜顶, 可用  $25\text{mm}^2$  的软铜线或钢绞线与金属柜体相连, 接地装置应离闸门室 5m 以上。

#### 2. 露天油罐的防雷要求

(1) 易燃液体的贮罐或建筑物, 应设独立避雷针, 避雷针离开敞面不小于 23m, 保护范围按敞面向外水平距离 20m, 高 3m 进行计算, 冲击接地电阻不大于  $10\Omega$ 。

(2) 带有呼吸阀的易燃液体贮罐, 罐顶钢板厚不小于 4mm 时, 可在罐顶直接安装避雷针, 避雷针与呼吸阀的水平距离不小

于 3m, 保护范围高出呼吸阀不得小于 2m。罐上接地点不少于 2 处, 其间距不应大于 24m, 冲击接地电阻不大于  $10\Omega$ 。

(3) 可燃液体贮罐, 当壁厚不小于 4mm 时, 可不装避雷针, 但应接地, 冲击接地电阻不大于  $30\Omega$ 。

(4) 浮顶油罐、球形液化气贮罐壁厚大于 4mm 时, 只作接地, 但浮顶与罐体用  $25\text{mm}^2$  软铜线或钢绞线连接。

(5) 埋地式油罐, 在地下 0.5m 以下者不必防雷, 但若有呼吸阀引出地面者, 需在呼吸阀处作局部防雷措施。

### 3. 户外架空管道的防雷要求

(1) 输送可燃气体、易燃或可燃液体的管道, 可在管道的始、终端、分支处、转角处, 以及直线部分每隔 100m 处接地, 每处接地电阻不大于  $30\Omega$ 。

(2) 当上述管道与爆炸危险厂房平行敷设且相距小于 10m 时, 在接近厂房的一段, 其两端及每隔 30 ~ 40m 应接地, 接地电阻不大于  $20\Omega$ 。

(3) 当上述管道的弯头、阀门、法兰盘等处不能保持良好的电气通路时, 应用金属线跨接。

(4) 接地装置可以利用电气设备保护接地装置, 接地引下线可以利用金属支架。

### 4. 水塔的防雷要求

(1) 可以利用水塔顶上铁围栏作为接闪器, 也可以装设环形避雷带保护水塔边缘, 在塔顶中心装一支 1.5m 高的避雷针。

(2) 引下线一般不少于 2 根, 其间距不大于 30m。当水塔周长和高度均不超过 40m 时, 可只设一根引下线。冲击接地电阻不大于  $30\Omega$ 。

(3) 可利用铁爬梯作引下线。

### 5. 烟囱的防雷要求

(1) 烟囱直径小于 1.2m、高度不大于 35m 时, 用 1 根 2.2m

高的避雷针；当直径不大于 1.7m、高度不超过 50m 时，用 2 根 2.2m 高的避雷针；当直径大于 1.7m、高度不低于 60m 时，用环形避雷带保护。

(2) 当烟囱高度不超过 40m 时，设一根引下线；超过 40m 时，应设 2 根引下线。

(3) 高度超过 100m 的烟囱，在离地 30m 处及以上，每隔 12m 加装一个均压环，并与引下线连接。

(4) 可利用铁爬梯作引下线。

## 第二十章 逻辑电路

### 第一节 基础知识及基本运算

#### 一、逻辑代数及其基本运算

##### 1. 0 和 1 代表的工作状态

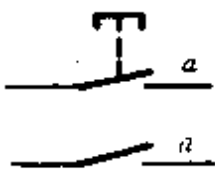
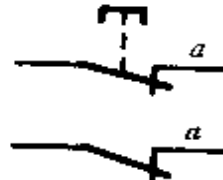
逻辑代数的任何变量只有两个值：0 和 1。例如在继电器电路中，用 0 代表继电器线圈断电（继电器触头断开），用 1 代表继电器线圈通电（触头闭合）。

在逻辑控制中 0 和 1 代表的两种不同工作状态，见表 20—1。

##### 2. 逻辑代数的基本运算

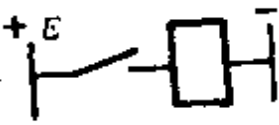
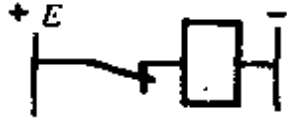
(1)“或”、“与”、“非”运算：逻辑代数中最常用的基本运算有三种：即“或”运算（逻辑加）、“与”运算（逻辑乘）和“非”运算（逻辑非）。三种基本运算见表 20—2。

表 20—1 0 和 1 代表的工作状态

变量值	0	1
开关的接点	在动合（常开）状态 	在动断（常闭）状态 



(续表)


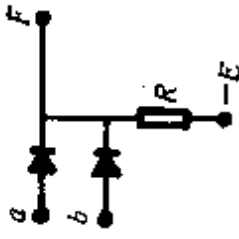

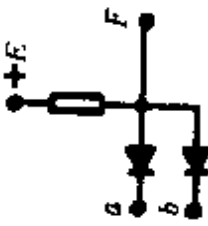
变量值		0	1
继电器线圈		在失电状态 	在得电状态 
电 位	正逻辑	电位为低电位时	电位为高电位时
	负逻辑	电位为高电位时	电位为低电位时
输入(或输出)		无输入时(或无输出)	有输入时(或有输出)

(2) 其它运算：“或非”、“与非”、“异或”、“与或非”等其它运算,见表 20-3。


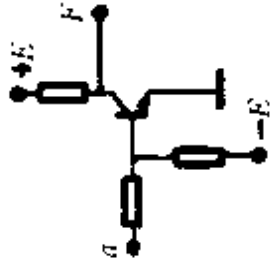
(3) 逻辑代数常用的运算规则:

$a + 0 = a$	$a \cdot 0 = 0$
$a + 1 = 1$	$a \cdot 1 = a$
$a + a = a$	$a \cdot a = a$
$a + b = b + a$	$a \cdot b = b \cdot a$
$(a + b) + c = a + (b + c)$	$(ab) \cdot c = a \cdot (bc)$
$ab + ac = a(b + c)$	$(a + b)(a + c) = a + bc$
$a + \bar{a} = 1$	$\bar{\bar{a}} = a$
$a \cdot \bar{a} = 0$	$a + \bar{a}b = a + b$
$\overline{a \cdot b} = \bar{a} + \bar{b}$	$\bar{a} \cdot \bar{b} = \overline{a + b}$
$\overline{a \cdot b \cdot c \cdot \dots} = \bar{a} + \bar{b} + \bar{c} + \dots$	
$\overline{\bar{a} \cdot \bar{b} \cdot \bar{c} \cdot \dots} = a + b + c + \dots$	

表 20—2 “或”、“与”、“非”运算

运算	逻辑式	读法	逻辑符号	逻辑电路示例	真值表	工作原理															
或 (逻辑加)	$F = a + b$ 或写为 $F = a \vee b$	$F$ 等于 $a$ 加 $b$ ( $F$ 等于 $a$ 或 $b$ )			<table border="1" data-bbox="459 654 810 945"> <tr> <td><math>a</math></td> <td><math>b</math></td> <td><math>F = a + b</math></td> </tr> <tr> <td>0</td> <td>0</td> <td>0</td> </tr> <tr> <td>0</td> <td>1</td> <td>1</td> </tr> <tr> <td>1</td> <td>0</td> <td>1</td> </tr> <tr> <td>1</td> <td>1</td> <td>1</td> </tr> </table>	$a$	$b$	$F = a + b$	0	0	0	0	1	1	1	0	1	1	1	1	只要有一个输入变量为 1, 就有输出只当全部输入变量都为 0, 才无输出
$a$	$b$	$F = a + b$																			
0	0	0																			
0	1	1																			
1	0	1																			
1	1	1																			
与 (逻辑乘)	$F = a \cdot b$ 或写为 $F = a \wedge b$ $F = a \times b$ $F = ab$	$F$ 等于 $a$ 乘 $b$ ( $F$ 等于 $a$ 与 $b$ )			<table border="1" data-bbox="938 654 1289 945"> <tr> <td><math>a</math></td> <td><math>b</math></td> <td><math>F = a \cdot b</math></td> </tr> <tr> <td>0</td> <td>0</td> <td>0</td> </tr> <tr> <td>0</td> <td>1</td> <td>0</td> </tr> <tr> <td>1</td> <td>0</td> <td>0</td> </tr> <tr> <td>1</td> <td>1</td> <td>1</td> </tr> </table>	$a$	$b$	$F = a \cdot b$	0	0	0	0	1	0	1	0	0	1	1	1	只当全部输入变量都为 1, 才有输出 只要有一个输入变量为 0, 就无输出
$a$	$b$	$F = a \cdot b$																			
0	0	0																			
0	1	0																			
1	0	0																			
1	1	1																			

(续表)

运算	逻辑式	读法	逻辑符号	逻辑电路示例	真值表	工作原理						
非 (逻辑 非)	$F = \bar{a}$	$F$ 等于 $a$ 非 ( $F$ 等于 $a$ 反)			<table border="1" data-bbox="622 694 1037 963"> <tr> <td><math>a</math></td> <td><math>F = \bar{a}</math></td> </tr> <tr> <td>0</td> <td>1</td> </tr> <tr> <td>1</td> <td>0</td> </tr> </table>	$a$	$F = \bar{a}$	0	1	1	0	没有输入时有输出, 有输入时无输出
$a$	$F = \bar{a}$											
0	1											
1	0											

注: 表中逻辑电路系正逻辑。

其它逻辑运算

表 20-3

运算	或非	与非	异或	与或非																																																																																																																											
逻辑符号																																																																																																																															
真值表	$F = \overline{a+b+c}$ <table border="1"> <thead> <tr><th>a</th><th>b</th><th>c</th><th>F</th></tr> </thead> <tbody> <tr><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>1</td></tr> <tr><td>0</td><td>0</td><td>1</td><td>0</td></tr> <tr><td>0</td><td>1</td><td>0</td><td>0</td></tr> <tr><td>0</td><td>1</td><td>1</td><td>0</td></tr> <tr><td>1</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td></tr> <tr><td>1</td><td>0</td><td>1</td><td>0</td></tr> <tr><td>1</td><td>1</td><td>0</td><td>0</td></tr> <tr><td>1</td><td>1</td><td>1</td><td>0</td></tr> </tbody> </table>	a	b	c	F	0	0	0	1	0	0	1	0	0	1	0	0	0	1	1	0	1	0	0	0	1	0	1	0	1	1	0	0	1	1	1	0	$F = \overline{abc}$ <table border="1"> <thead> <tr><th>a</th><th>b</th><th>c</th><th>F</th></tr> </thead> <tbody> <tr><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>1</td></tr> <tr><td>0</td><td>0</td><td>1</td><td>1</td></tr> <tr><td>0</td><td>1</td><td>0</td><td>1</td></tr> <tr><td>0</td><td>1</td><td>1</td><td>1</td></tr> <tr><td>1</td><td>0</td><td>0</td><td>1</td></tr> <tr><td>1</td><td>0</td><td>1</td><td>1</td></tr> <tr><td>1</td><td>1</td><td>0</td><td>1</td></tr> <tr><td>1</td><td>1</td><td>1</td><td>0</td></tr> </tbody> </table>	a	b	c	F	0	0	0	1	0	0	1	1	0	1	0	1	0	1	1	1	1	0	0	1	1	0	1	1	1	1	0	1	1	1	1	0	$F = a \oplus b = \overline{ab} + a\overline{b}$ <table border="1"> <thead> <tr><th>a</th><th>b</th><th>F</th></tr> </thead> <tbody> <tr><td>0</td><td>0</td><td>0</td></tr> <tr><td>0</td><td>1</td><td>1</td></tr> <tr><td>1</td><td>0</td><td>1</td></tr> <tr><td>1</td><td>1</td><td>0</td></tr> </tbody> </table>	a	b	F	0	0	0	0	1	1	1	0	1	1	1	0	$F = \overline{a\overline{b}c + ab\overline{c}}$ <table border="1"> <thead> <tr><th>a</th><th>b</th><th>c</th><th>F</th></tr> </thead> <tbody> <tr><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>1</td></tr> <tr><td>0</td><td>0</td><td>1</td><td>0</td></tr> <tr><td>0</td><td>1</td><td>0</td><td>1</td></tr> <tr><td>0</td><td>1</td><td>1</td><td>0</td></tr> <tr><td>1</td><td>0</td><td>0</td><td>1</td></tr> <tr><td>1</td><td>0</td><td>1</td><td>0</td></tr> <tr><td>1</td><td>1</td><td>0</td><td>0</td></tr> <tr><td>1</td><td>1</td><td>1</td><td>0</td></tr> </tbody> </table>	a	b	c	F	0	0	0	1	0	0	1	0	0	1	0	1	0	1	1	0	1	0	0	1	1	0	1	0	1	1	0	0	1	1	1	0
a	b	c	F																																																																																																																												
0	0	0	1																																																																																																																												
0	0	1	0																																																																																																																												
0	1	0	0																																																																																																																												
0	1	1	0																																																																																																																												
1	0	0	0																																																																																																																												
1	0	1	0																																																																																																																												
1	1	0	0																																																																																																																												
1	1	1	0																																																																																																																												
a	b	c	F																																																																																																																												
0	0	0	1																																																																																																																												
0	0	1	1																																																																																																																												
0	1	0	1																																																																																																																												
0	1	1	1																																																																																																																												
1	0	0	1																																																																																																																												
1	0	1	1																																																																																																																												
1	1	0	1																																																																																																																												
1	1	1	0																																																																																																																												
a	b	F																																																																																																																													
0	0	0																																																																																																																													
0	1	1																																																																																																																													
1	0	1																																																																																																																													
1	1	0																																																																																																																													
a	b	c	F																																																																																																																												
0	0	0	1																																																																																																																												
0	0	1	0																																																																																																																												
0	1	0	1																																																																																																																												
0	1	1	0																																																																																																																												
1	0	0	1																																																																																																																												
1	0	1	0																																																																																																																												
1	1	0	0																																																																																																																												
1	1	1	0																																																																																																																												
工作原理	只有输入变量全为 0 时才 有输出	只有输入变量全为 1 时才 有输出	只有当两输入变量异值时才 有输出	任何一组与门的输入变量 全为 1 时无输出																																																																																																																											

(4) 几个常用公式及证明:

$$\textcircled{1} \quad ab + a\bar{b} = a$$

$$\text{证明: } ab + a\bar{b} = a(b + \bar{b}) = a \cdot 1 = a$$

$$\textcircled{2} \quad ab + \bar{a}c + bc = ab + \bar{a}c$$

$$\begin{aligned} \text{证明: } ab + \bar{a}c + bc &= ab + \bar{a}c + (a + \bar{a})bc \\ &= ab + \bar{a}c + abc + \bar{a}bc \\ &= (ab + abc) + (\bar{a}c + \bar{a}bc) \\ &= ab + \bar{a}c \end{aligned}$$

$$\textcircled{3} \quad \overline{a\bar{b}} + \bar{a}b = \bar{a}\bar{b} + ab$$

$$\begin{aligned} \text{证明: } \overline{a\bar{b}} + \bar{a}b &= (\bar{a} + b)(a + \bar{b}) = \bar{a}a + \bar{a}\bar{b} + ba \\ &\quad + b\bar{b} = \bar{a}\bar{b} + ab \end{aligned}$$

$$\textcircled{4} \quad \overline{ab + \bar{a}c} = \bar{a}\bar{b} + \bar{a}\bar{c}\bar{b}$$

$$\begin{aligned} \text{证明: } \overline{ab + \bar{a}c} &= (\bar{a} + \bar{b})(\bar{a} + \bar{c}) \\ &= \bar{a}\bar{a} + \bar{a}\bar{c} + \bar{b}\bar{a} + \bar{b}\bar{c} \\ &= \bar{a}\bar{b} + \bar{a}\bar{c} + \bar{b}\bar{c} = \bar{a}\bar{b} + \bar{a}\bar{c} \end{aligned}$$

(5) 基本定理:

定理一:  $n$  个变量的  $2^n$  个最小项的逻辑加等于 1。

$$\begin{aligned} \text{例: 函数 } f(a, b) &= ab + a\bar{b} + \bar{a}b + \bar{a}\bar{b} \\ &= a(b + \bar{b}) + \bar{a}(b + \bar{b}) = a + \bar{a} = 1 \end{aligned}$$

定理二:  $n$  个变量的  $2^n$  个最大项的逻辑相乘等于 0。

$$\begin{aligned} \text{例: 函数 } f(a, b) &= (\bar{a} + \bar{b})(\bar{a} + b)(a + \bar{b})(a + b) \\ \text{因 } (\bar{a} + \bar{b})(\bar{a} + b) &\text{ 可简化为: } \bar{a}\bar{a} + \bar{a}b + \bar{a}\bar{b} + b\bar{b} = \bar{a} \\ (a + \bar{b})(a + b) &\text{ 可简化为: } aa + ab + a\bar{b} + b\bar{b} = a \\ \text{故 } \bar{a} \cdot a &= 0 \end{aligned}$$

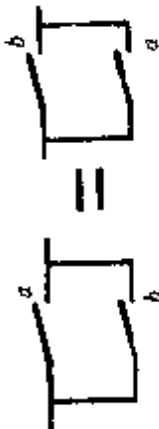


其中最小项和最大项的概念见第二节逻辑关系式的简化。

(6) 逻辑代数的基本公式与等效电路关系, 见表 20—4。

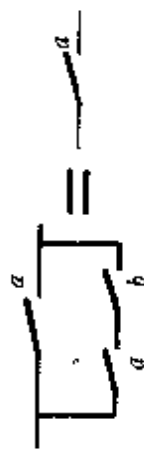

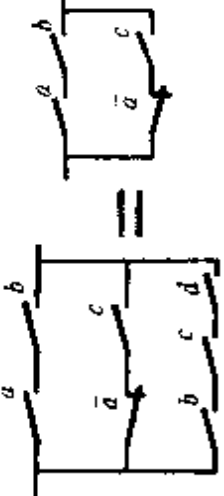
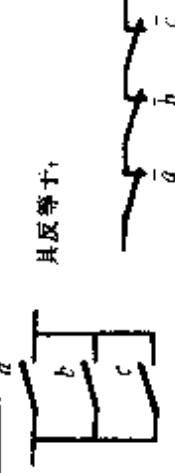
表 20—4 逻辑代数的基本公式与等效电路

编号	公式	等效电路	说明
1a	$a+1=1$		吸收律
2a	$a+0=a$		吸收律
3a	$a+a=a$		重复律
4a	$a+\bar{a}=1$		反项吸收律

(续表)






编号	公式	等效电路	说明
5a	$\bar{\bar{a}}=a$	相当于一个常开接点闭合之后又打开	双重否定律
6a	$a+b=b+a$		交换律,与普通代数相同
7a	$(a+b)+c$ $=a+(b+c)$		结合律,与普通代数相同
8a	$ab+ac$ $=a(b+c)$		分配律,与普通代数相同

(续表)




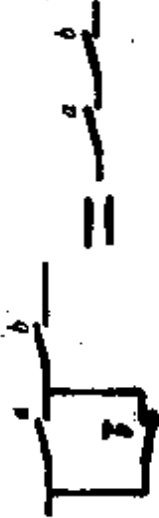
编号	公式	等效电路	说明
9a	$a + ab = a$		<p>在一个“与-或”式中,如果一个与项是另一个与项的因子,则包含因子的与项是多余的</p>
10a	$a\bar{b} + b = a + b$		<p>在一个“与-或”式中,如果一个与项之反是另一与项的因子,则该因子是多余的</p>
11a	$ab + \bar{a}c + bcd = ab + \bar{a}c$		<p>在一个“与-或”式中,如果某项的因子分别存在于其他两个与项之中,而且这两个与项的其余因子又是互反的,则某项是多余的</p>
12a	$\frac{a+b+c}{a+b\bar{c}} = \bar{a} + \bar{b} + \bar{c}$	 <p>具反等于:</p>	<p>反演律,又称摩根定律</p>



(续表)

编号	公式	等效电路	说明
1b	$a \cdot 0 = 0$		吸收律
2b	$a \cdot 1 = a$		吸收律
3b	$a \cdot a = a$		重复律
4b	$a \cdot \bar{a} = 0$		反项吸收律
5b	$\bar{\bar{a}} = a$	相当于一个常开接点闭合之后又打开	双重否定律
6b	$ab = ba$		交换律,与普通代数相同

(续表)

编号	公式	等效电路	说明
7b	$(ab)c = a(bc)$		结合律,与普通代数相同
8b	$(a+b)(a+c)$ $= a^2 + ab + ac + bc$ $= a + bc$		分配律,原则上与普通代数相同,但由于应用了公式 $a^2 = a$ , $3b$ 结果就不同了
9b	$a(a+b) = a$		在一个“或—与”式中,如果一个或项包含在另一个或项之中,则后…或项是多余的
10b	$(a+\bar{b})b = ab$		在一个“或—与”式中,如果一个或项之反包含在另一个或项之中,则该或项之反是多余的

(续表)

编号	公式	等效电路	说明
11b	$(a+b)(a+c)(b+c+d) = (a+b)(a+c)$		<p>在一个“或”与“与”式中,如果某项包含的变量存在于其他两项或项之中,而且这两项的其余变量又是互反的,则某项是多余的</p>
12b	$\overline{a \cdot b \cdot c} = \bar{a} + \bar{b} + \bar{c}$		<p>反演律,又称摩根定律</p>

表 20-4 中同一编号的公式,其编号  $a$  与编号  $b$  互为对偶关系。

现举表中的几个定律加以证明。


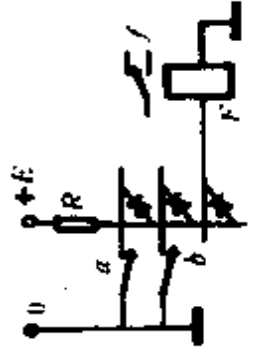
- ①  $a + ab = a(1 + b) = a \cdot 1 = a$
- ②  $\bar{a}\bar{b} + b = \bar{a}\bar{b} + (ab + b) = b + (\bar{a} + \bar{b})a$

$$\begin{aligned}
 &= b + 1 \cdot a = a + b \\
 \textcircled{3} \quad &ab + \bar{a}c + bcd = ab + \bar{a}c + (a + a)bcd \\
 &= ab + \bar{a}c + abcd + \bar{a}bcd \\
 &= ab(1 + cd) + \bar{a}c(1 + bd) \\
 &= ab + \bar{a}c
 \end{aligned}$$


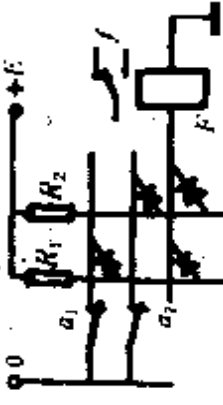

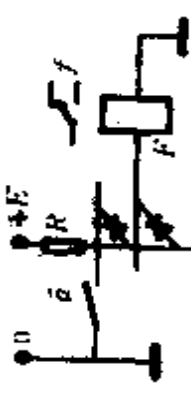
二、逻辑控制与电器控制、矩阵控制的对应关系

逻辑控制与电器控制、矩阵控制的对应关系，见表 20—5。


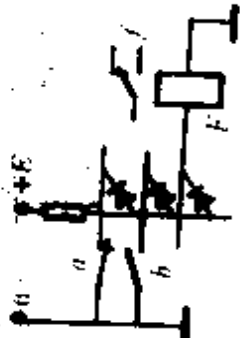
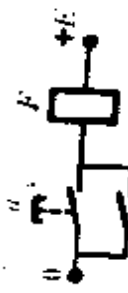

表 20—5 逻辑控制与电器控制、矩阵控制的对应关系

电路名称	逻辑式	电器控制电路	矩阵控制电路	工作原理
与逻辑	$F = a \cdot b$			<p>1. 电器控制: <math>a, b</math> 都接通后, 继电器 <math>F</math> 动作</p> <p>2. 矩阵控制: <math>a, b</math> 都断开, 继电器 <math>F</math> 动作。在插销板结构中, 行母线只需要一条, 列母线等于“与”条件数目(负载列母线除外)。隔离二极管接在列母线与行母线的交点上</p>



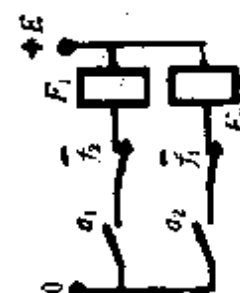
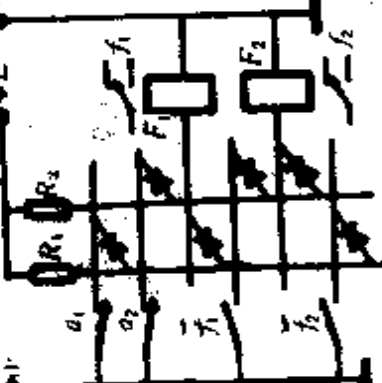
(续表)

电路名称	逻辑式	电器控制电路	矩阵控制电路	工作原理
或逻辑	$F = a + b$			<p>1. 电器控制: <math>a_1, a_2, \dots</math> 各条件中只要有一个及以上接通, 继电器 <math>F</math> 动作</p> <p>2. 矩阵控制: <math>a_1, a_2, \dots</math> 中只要有一个断开, 继电器便动作。其行母线数与“或”条件数相等, 列母线数等于“或”条件数加 1。隔离二极管接在“或”条件所决定的相应的交叉点上</p>
非逻辑	$F = \bar{a}$			<p><math>\bar{a}</math> 动作后继电器释放(在电器控制线路中为 <math>\bar{a}</math> 打开, 在矩阵控制中, <math>\bar{a}</math> 合上时)。又称“否”、“反”逻辑</p>

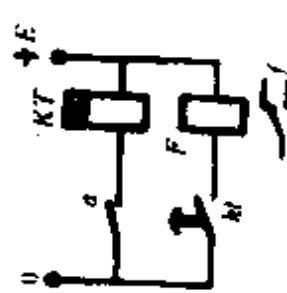
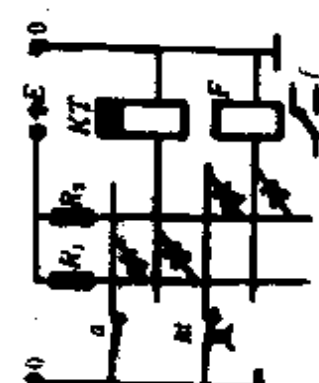

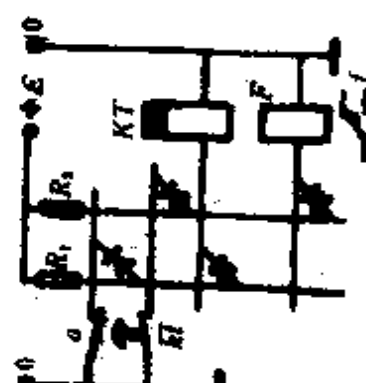
(续表)

电路名称	逻辑式	电器控制电路	矩阵控制电路	工作原理
<p>与逻辑</p>	$F = a\bar{b}$			<p>当禁令条件存在(即 <math>\bar{b}</math> 动作)时,继电器 <math>F</math> 不可能动作,当禁令条件除去后,才有可能动作(视 <math>a</math> 而定)。<math>\bar{b}</math> 相当于一个“停止”信号,在它出现时, <math>F</math> 停止工作</p>
<p>自锁逻辑</p>	$F = a + f$			<p><math>a</math> 相当于一个“启动”信号。继电器动作后, <math>f</math> 起自锁作用</p>

(续表)

电路名称	逻辑式	电器控制电路	矩阵控制电路	工作原理
记忆逻辑	$F = \bar{b}(a + f)$			<p>能记忆条件信号,直到解除记忆信号到来之前为止。在 <math>\bar{b}</math> 不动作的前提下, <math>a</math> 动作, <math>F</math> 就开始工作, <math>a</math> 相当于一个“起动”信号,继电器 <math>F</math> 动作后, <math>f</math> 起自锁作用</p>
互锁逻辑	$F_1 = a_1 \bar{f}_2$ $F_2 = a_2 \bar{f}_1$			<p>当 <math>F_1</math> 动作后, <math>F_2</math> 即使接到动作指令也不会动作; 当 <math>F_2</math> 动作后, <math>F_1</math> 也不可能动作, 故 <math>F_1</math> 和 <math>F_2</math> 不可能同时工作, 相互封锁, 简称“互锁”</p>

(续表)

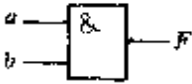
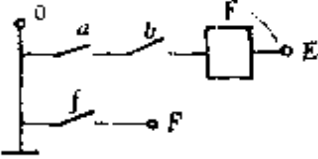

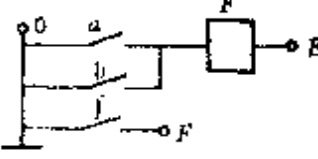

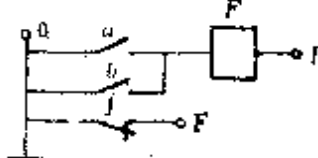

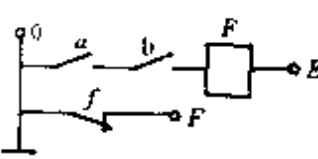

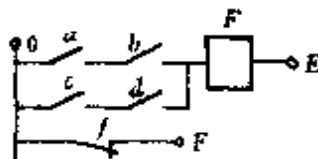
电路名称	逻辑式	电器控制电路	矩阵控制电路	工作原理
延时动作逻辑	$KT = a$ $F = kt$			<p>当 <math>a</math> 不动作时, 时间继电器 <math>KT</math> 不工作, 故 <math>F</math> 也不工作 (<math>a=0; KT=0; kt=0; F=0</math>), 从 <math>a</math> 动作开始起计算时间, <math>KT</math> 工作, <math>kt</math> 经一定延时而才动作, 使 <math>F</math> 工作</p>
延时释放逻辑	$KT = \bar{a}$ $F = \bar{kt}$			<p>当 <math>a</math> 不动作时, <math>KT</math> 不工作, 故 <math>F</math> 工作 (<math>a=0; KT=0; \bar{kt}=1; F=1</math>), 从 <math>a</math> 动作开始起计算时间, <math>KT</math> 工作, <math>\bar{kt}</math> 延时而经一定时间后 <math>\bar{kt}</math> 才动作, 从而使 <math>F</math> 释放</p>



### 三、逻辑元件与有触点电路的功能对应关系

几种逻辑元件与有触点电路的功能对应关系,见表 20-6。

表 20-6 几种逻辑元件与有触点电路的功能对应关系

电路名称	逻辑式	逻辑元件	电气控制电路	说明
与门	$F = a \cdot b$			(1) 只要1个或几个为“0”态, $F = 0$ (2) 全部为“1”态, $F = 1$
或门	$F = a + b$			(1) 全部为“0”态, $F = 0$ (2) 只要有1个或几个为“1”态, $F = 1$
或非门	$F = \overline{a + b}$			(1) 全部为“0”态, $F = 1$ (2) 只要有1个或几个为“1”态, $F = 0$
与非门	$F = \overline{a \cdot b}$			(1) 只要1个或几个为“0”态, $F = 1$ (2) 全部为“1”态, $F = 0$
与或非门	$F = \overline{ab + cd}$			(1) $a, b$ 不同时为“1”态及 $c, d$ 也不同时为“1”态, $F = 1$ (2) $a, b$ 同时为“1”态或 $c, d$ 同时为“1”态, $F = 0$

(续表)

电路名称	逻辑式	逻辑元件	电气控制电路	说明
	$F = 0$ $\bar{F} = 1$			解除状态 (1) $a, b$ 为“0”态, $c, d$ 有任一个为“1”态信号之后, 不管信号是否已消失, 元件处于解除状态。(置“0”) (2) 即使 $a, b$ 为“1”态, 当 $c, d$ 有任一个为“1”态时, 则元件保持解除状态(置“0”)
	$F = 1$ $\bar{F} = 0$			记忆状态 只有当 $c, d$ 全部为“0”态, 当 $a, b$ 有任一个为“1”态之后(不管信号是否已消失), 则元件始终保持记忆状态(置“1”)

## 第二节 逻辑电路的简化和设计

### 一、逻辑关系式的简化

逻辑关系式的简化有以下一些方法:

1. 利用逻辑代数的运算法则和基本定律来简化

例如, 可以直接用表 20-4 中的公式, 使逻辑关系式简化。

2. “积之和”的逻辑关系式的简化

所谓“积之和”，即关系式为数项相加，每一项为一个变量或数个变量相乘。简化步骤如下：

(1) 比较各乘积项，凡某一乘积项包含了其它乘积项，则包含了其它乘积项的是多余的。实际上是定律  $a + ab = a$  的应用。

(2) 再次比较各乘积项，如果某一项包含了其它乘积项的“非”运算，则该“非”运算是多余的。实际上是定律  $a + \bar{a}b = a + b$  的应用。

(3) 将每个乘积项依次与其它乘积项进行比较，如果某两项中有一个变量代号相同，但一个为另一个的“非”运算，则将两项中其余变量记下来，再与其它乘积项比较，如果任何一项包含了所记下的全部因子，则该项是多余的。实际上是定律  $ab + \bar{a}c + bc = ab + \bar{a}c$  的应用。

(4) 从由第三步简化出的关系式中提出公因子，使公共的触头(假设应用于继电器电路)共用。

**例 20-1** 试简化逻辑关系式  $F = a + ab + \bar{a}c + bd + ace + \bar{b}e + edf$

**解**

(1) 从最简单的项  $a$  开始进行比较，凡包含  $a$  的项均为多余的，即  $ab$  和  $ace$  都是多余的，故简化后为

$$F = a + \bar{a}c + bd + \bar{b}e + edf$$

(2)  $\bar{a}c$  中包含了  $a$  的“非”运算，该“非”运算是多余的，即  $\bar{a}c$  可简化为  $c$ ，故简化后为

$$F = a + c + bd + \bar{b}e + edf$$

(3) 由上式可见， $bd$  项中有  $b$ ， $\bar{b}e$  项中有  $\bar{b}$ ，记下这两项的其余因子为  $de$ ，任何含有  $de$  的项均为多余的，故  $edf$  可去掉，即

$$F = a + c + bd + \bar{b}e$$

(4) 上式已不能继续简化。

**例 20-2** 试简化逻辑关系式  $F = ac + abc + cde$

**解**

(1)  $abc$  项包含有  $ac$  项, 故  $abc$  是多余的

$$F = ac + cde$$

(2) 继续简化

$$F = c(a + de)$$

**例 20—3** 试简化逻辑关系式  $F = ad + bc\bar{d} + (\bar{a} + \bar{b})c$

$$\begin{aligned} \text{解 } F &= ad + bc\bar{d} + (\bar{a} + \bar{b})c \\ &= ad + bc\bar{d} + \bar{a}c + \bar{b}c \\ &= ad + \bar{a}c + c(\bar{b} + \bar{d}) \\ &= ad + \bar{a}c + \bar{b}c + c\bar{d} \quad (\because \bar{b} = b) \\ &= ad + \bar{b}c + c(\bar{a} + \bar{d}) \\ &= ad + \bar{b}c + c \quad (\because \bar{a} + \bar{d} \text{ 为 } ad \text{ 的“非”运算}) \\ &= ad + c \quad (\because \bar{b}c \text{ 包含 } c) \end{aligned}$$

**例 20—4** 试简化逻辑关系式  $F = \bar{a}b + a\bar{b}c + bc$

$$\begin{aligned} \text{解 } F &= \bar{a}b + a\bar{b}c + bc = \bar{a}b + c(a\bar{b} + b) \\ &= \bar{a}b + c(a + b) = \bar{a}b + ac + bc = \bar{a}b + ac \end{aligned}$$

### 3. 利用桥接线路公式简化

桥接线路的公式特征为

$$F = a(b + ec) + d(c + ed)$$

相应的线路如图 20—1(b) 所示。在设计线路时可以根据这一特征来判断应用桥接线路的可能性。

例如, 对于逻辑关系式  $F = ab + dc + aec + deb$ , 按前述简化方法可写成

$$F = a(b + ec) + d(c + ed)$$

如果按逻辑关系式画图, 则线路如图 20—1(a) 所示, 需 8 个触头。若记住桥接线路的公式, 则如图 20—1(b) 所示, 只需 5 个触头。

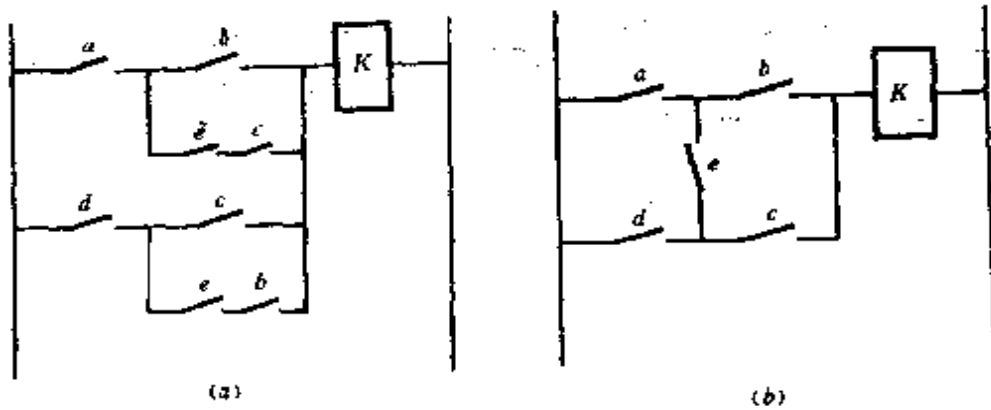


图 20—1 对应简化关系式的线路

(a) 按逻辑关系式画的线路 (b) 按桥接线路公式画的线路

#### 4. 从线路两端合并触头

**例 20—5** 试设计三处控制一个灯的控制线路。

**解** 设三处的相应开关为  $a, b, c$ 。

第一步：分析开关的动作状况，写出逻辑关系式。设  $a, b, c$  初始状态灯不亮；当任意拨动某一开关，灯应亮；若再拨动一个开关，灯应熄；继续拨动一个开关，灯又亮。据此写出逻辑关系式如下：

$$F = abc + \bar{a}\bar{b}c + \bar{a}b\bar{c} + a\bar{b}\bar{c}$$

第二步：由上式便可直接画出初步接线图如图 20—2(a) 所示。

第三步：经整理、简化（从两边向中间简化），得图 20—2(b)。

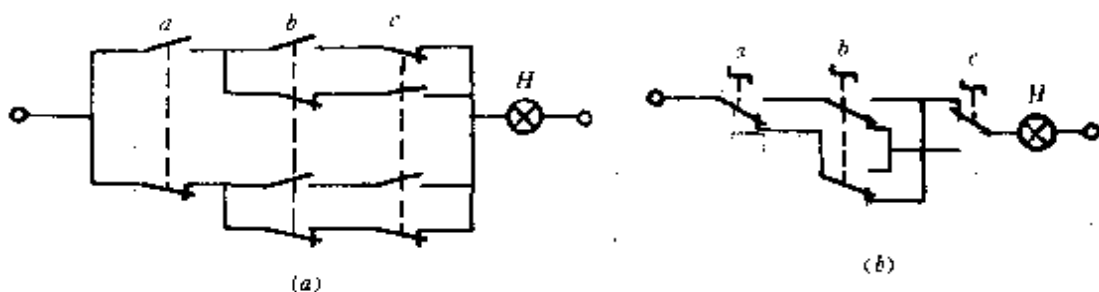


图 20—2 例 20—5 接线图

(a) 第一次简化 (b) 第二次简化

**例 20—6** 试简化逻辑关系式  $F = abc + d\bar{b}c + \bar{a}be + dbe$  所对应的线路图〔图 20—3(a)〕。

**解** 从线路一端合并公共触头  $c$  和  $e$ , 得到图 20—3(b) 线路; 再将图 20—3(b) 线路另一端的触头  $a$  和  $d$  合并, 得到图 20—3(c) 线路。该线路为上述逻辑关系式的最简线路。

5. 几个逻辑关系式的简化

**例 20—7** 试简化如图 20—4(a) 所示的控制线路。

**解**

(1) 写出各逻辑关系式如下:

$$K_1 = abc, K_2 = b(\bar{a} + d), K_3 = be$$

(2) 将它们写成复合逻辑关系式:

$$\begin{aligned} f(K_{1-3}) &= abcK_1 + b(\bar{a} + d)K_2 + beK_3 \\ &= b[acK_1 + (\bar{a} + d)K_2 + eK_3] \end{aligned}$$

因此可画出简化后的线路, 如图 20—4(b) 所示。

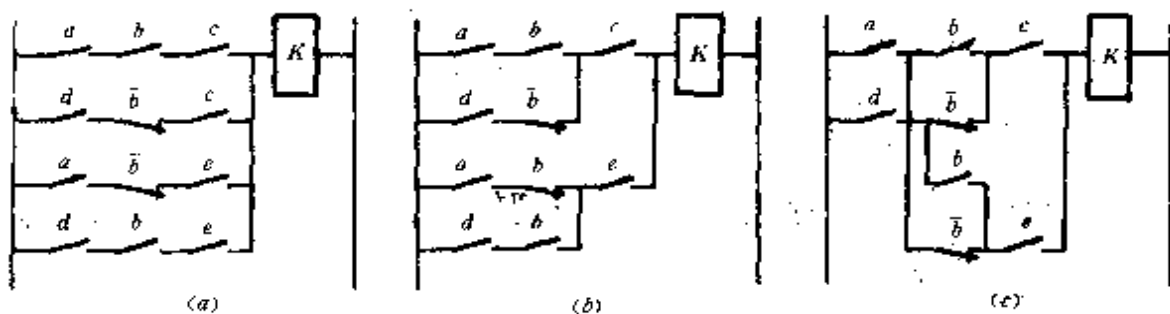


图 20—3 从线路两端合并触头

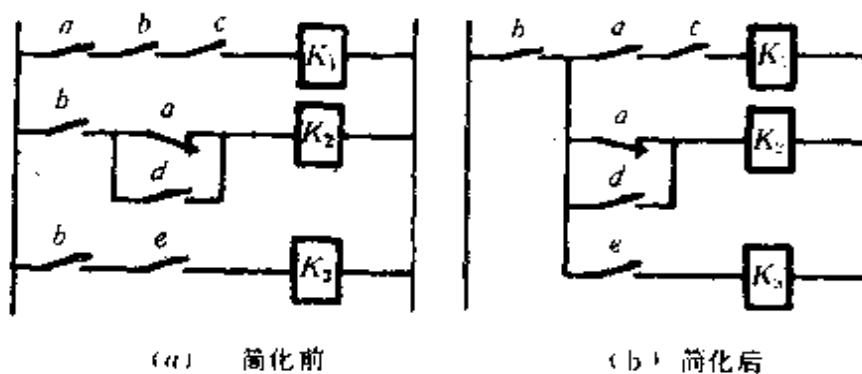


图 20—4 几个逻辑关系式的简化

注意：对于简化继电器类控制线路时，复合逻辑关系式简化后，代表继电器线圈的符号  $K$  只能在关系式中出现一次，也就是说，对几个逻辑关系式的简化一般只限于提出公因子。

例 20—8 试简化下列逻辑关系式：

$$K_1 = ab + bd + ac + cd$$

$$K_2 = b + c$$

解 写出复合逻辑关系式

$$f(K_{1,2}) = (ab + bc + ac + bd)K_1 + (a + b)K_2$$

$$\begin{aligned}
 &= [a(b+c) + d(b+c)]K_1 + (b+c)K_2 \\
 &= (b+c)(a+d)K_1 + (b+c)K_2 \\
 &= (b+c)[(a+d)K_1 + K_2]
 \end{aligned}$$

### 6. 表格简化法

表格简化法虽然较繁复,但当逻辑关系式的变量较多时,采用表格法很有效。

(1) 最小项和最大项的概念:

① 最小项:一个  $n$  变量的最小项是所有  $n$  个变量之积。其中每个变量必须出现一次,且仅出现一次。例如  $a, b$  两变量所构成的最小项是  $a\bar{b}, \bar{a}b, \bar{a}\bar{b}$  和  $ab$  共  $2^2$ (四)个。对  $n$  个变量来说,最小项共  $2^n$  个。最小项通常用字母  $m$  表示。

② 最大项:一个  $n$  变量的最大项是所有  $n$  个变量之和。其中每个变量必须出现一次,且仅出现一次。例如  $a, b$  两变量所构成的最大项是  $\bar{a} + \bar{b}, a + \bar{b}, \bar{a} + b$  和  $a + b$  共四个。最大项通常用字母  $M$  表示。

最小项与最大项是互为反演的(互补)。例如表 20—6 所示,  $m_7 = abc$ , 它的反演:  $\overline{m_7} = \overline{abc} = \bar{a} + \bar{b} + \bar{c} = M_0$ ;  $M_2 = \bar{a} + b + \bar{c}$ , 它的反演为  $\overline{M_2} = \overline{\bar{a} + b + \bar{c}} = a\bar{b}c = m_5$ 。

③ 相邻最小项:指所有变量之积彼此只有一个变量不同,而且此不同变量又是互补的。

三变量  $a, b, c$  的全部最小项和最大项见表 20—7。



三变量的最小项和最大项

表 20—7

变量组合	二进制数	十进制数	最小项 $m$	最大项 $M$
$\bar{a}\bar{b}\bar{c}$	000	0	$m_0 = \bar{a}\bar{b}\bar{c}$	$M_0 = \bar{a} + \bar{b} + \bar{c}$
$\bar{a}b\bar{c}$	001	1	$m_1 = \bar{a}b\bar{c}$	$M_1 = \bar{a} + b + \bar{c}$
$\bar{a}bc$	010	2	$m_2 = \bar{a}bc$	$M_2 = \bar{a} + a + b + \bar{c}$
$abc$	011	3	$m_3 = abc$	$M_3 = \bar{a} + a + b + c$
$a\bar{b}\bar{c}$	100	4	$m_4 = a\bar{b}\bar{c}$	$M_4 = a + \bar{b} + \bar{c}$
$a\bar{b}c$	101	5	$m_5 = a\bar{b}c$	$M_5 = a + b + c$
$a\bar{b}\bar{c}$	110	6	$m_6 = a\bar{b}\bar{c}$	$M_6 = a + a + b + \bar{c}$
$abc$	111	7	$m_7 = abc$	$M_7 = a + a + b + c$

(2) 表格简化法的方法和步骤:下面举例说明其简化步骤。

① 将逻辑关系式用最小项形式表示,如

$$F = abc\bar{d} + a\bar{b}cd + ab\bar{c}\bar{d} + a\bar{b}c\bar{d} + abcd + \bar{a}bcd + abcd$$

② 作一表格,见表 20—8。

③ 逐项寻找“相邻最小项”,它们可以合并为一项而消去不同变量。把每次找出的“相邻最小项后面划上  $\checkmark$ ,同时把合并项填在第二次简化的纵列中,以便第二次简化。

④ 第二次简化的方法同上。以后再作第三次简化,直到不再有“相邻最小项”为止。

⑤ 把表中凡属没打  $\checkmark$  的项,即蕴涵项相加,得到简化式

$$F_1 = abcd + \bar{a}bc + acd + b\bar{d}$$

⑥ 为进一步消除多余项,作第二个表如表 20—9 所示。将上式各蕴涵项排成纵列。

逐行逐列地检查,看纵列的哪些项是横行各项的因子,并在相应的行列中打上  $\checkmark$ ,这表明该列的最小项已由该行有关蕴涵项所代替了。若发现某一系列的最小项下有两个或两个以上的  $\checkmark$ ,则表示它已由多个蕴涵项所代替,这意味着有可能消去一个或几个的蕴涵项,但实际能否消去,还要看此蕴涵项所代替的最小项是否已全部被其他的蕴涵项所代替;如果这些最小项已全部被其他蕴涵项所代替,则此蕴涵项可以消去。

在表 20—9 中,最小项  $m_{10}$  和  $m_{11}$  下有两个  $\checkmark$ ,且蕴涵项(5)所包括的最小项  $m_{10}, m_{11}$  可分别由蕴涵项(6)和(7)所代替,所以消去蕴涵项(5)不影响  $F$  的逻辑关系,因此得

$$F = abcd + acd + b\bar{d}$$

简化第一表

表 20-8

最小项	第一次简化						第二次简化			
	相邻最小项						合并项	相邻最小项		合并项
	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)		(7)	(8)	
$m_0 = \bar{a}\bar{b}\bar{c}d$	✓	✓					(1) $\bar{a}\bar{b}d$	✓		(7) $bd$
$m_2 = \bar{a}bcd$	✓		✓				(2) $\bar{b}cd$		✓	(8) $bd$
$m_3 = abcd$							(3) $bcd$		✓	
$m_6 = \bar{a}bcd$		✓		✓			(4) $a\bar{b}d$	✓		
$m_{10} = abcd$			✓	✓	✓		(5) $abc$			
$m_{11} = \bar{a}bcd$					✓	✓	(6) $aed$			
$m_{15} = abcd$						✓				

表 20—9 简化第二表

第一表简化项 (蕴涵项)	原始未简化项(原始最小项)							
	$m_0$ $\bar{a}bcd$	$m_2$ $\bar{a}b\bar{c}d$	$m_5$ $\bar{a}bcd$	$m_4$ $\bar{a}b\bar{c}\bar{d}$	$m_{10}$ $\bar{a}bc\bar{d}$	$m_{11}$ $\bar{a}bcd$	$m_{15}$ $abcd$	
$m_5 = \bar{a}b\bar{c}d$			✓					
(5) = $\bar{a}bc$					✓	✓		
(6) = $acd$						✓	✓	
(7) = $\bar{b}d$	✓	✓		✓	✓			

## 二、逻辑电路的设计

1. 简单逻辑电路(电器控制电路)的设计可利用表 20—5 中的关系式。

### 2. 简单电器控制电路设计

**例 20—9** 试设计一个开关电路:共有  $H_1$ 、 $H_2$ 、 $H_3$ 、 $H_4$  和  $H_5$  五只灯,要求: $H_1$ 、 $H_2$  都亮,则  $H_5$  亮; $H_1$  亮,则  $H_5$  亮; $H_2$ 、 $H_3$  都不亮,且  $H_3$  亮时,则  $H_5$  亮。 $H_1 \sim H_4$  的相应开关设为  $a$ 、 $b$ 、 $c$ 、 $d$ 。

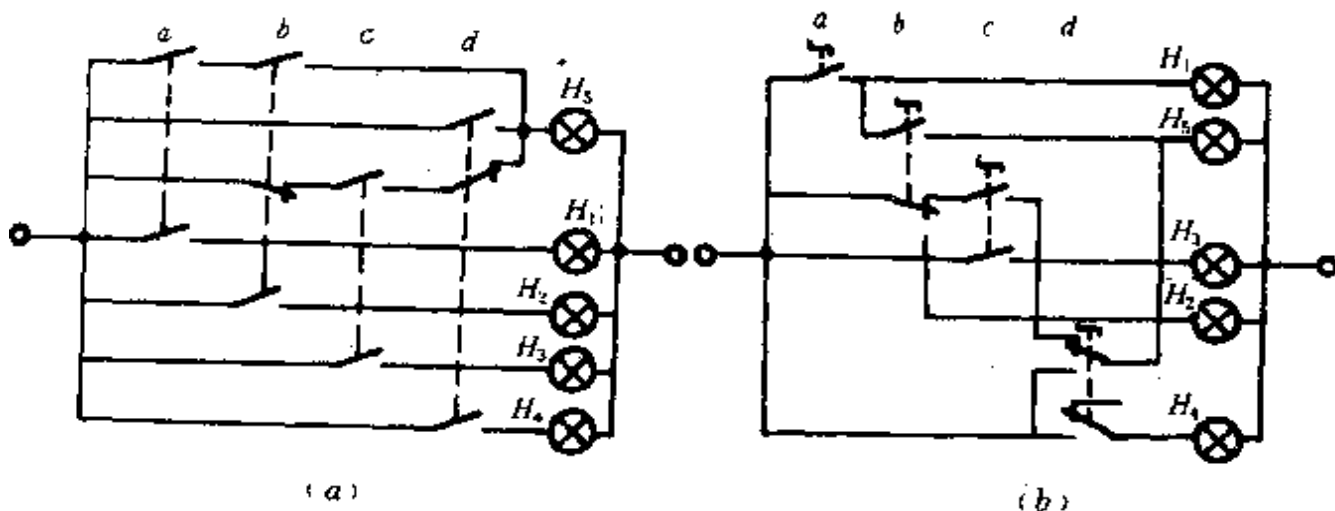


图 20—5 例 20—9 接线图  
(a) 初步接线图 (b) 简化后接线图

**解** 第一步,对  $H_5$  写出逻辑关系式

$$F_{H_5} = ab + d + \bar{b}\bar{d}c$$

第二步:画出初步接线图如图 20—5(a)。

第三步:经整理、简化,得图 20—5(b)。

**例 20—10** 试设计一个开关电路:共有  $a$ 、 $b$ 、 $c$ 、 $d$ 、 $e$  五个开关(均有甲乙两个位置状态),及  $H_1$ 、 $H_2$ 、 $H_3$  三只灯。要求:将  $a$ 、 $b$ 、 $c$  拨向甲,则  $H_1$  应亮;将  $b$  拨向甲、 $a$  拨向乙,或  $b$ 、 $d$  拨向甲,则

$H_2$  应亮; 将  $b, e$  拨向甲, 则  $H_3$  应亮。

**解** 分别对  $H_1, H_2$  和  $H_3$  写出逻辑关系式

$$F_{H_1} = abc; F_{H_2} = \bar{a}b + bd; F_{H_3} = be$$

将它们写成复合函数式

$$\begin{aligned} F_{(H_1, H_2, H_3)} &= abcH_1 + (\bar{a}b + bd)H_2 + beH_3 \\ &= b[acH_1 + (\bar{a} + d)H_2 + eH_3] \end{aligned}$$

由上式便可画出接线图如图 20-6。

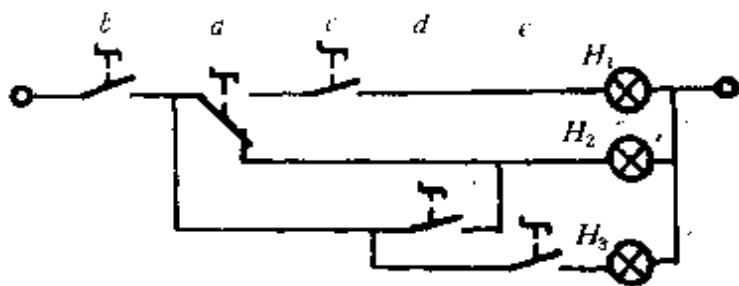


图 20-6 例 20-10 接线图

**例 20-11** 试设计一个开关电路: 有  $a, b, c, d$  四个开关 (均有甲、乙两个位置状态), 及  $H_1, H_2$  和  $H_3$  三只灯。要求:

- (1) 将  $a, c$  或  $b, c$  拨向甲, 或  $b$  拨向甲、 $a$  拨向乙, 则  $H_1$  应亮;
- (2) 将  $a, c$  或  $b, c$  或  $a, d$  或  $b, d$  拨向甲, 则  $H_2$  应亮;
- (3) 将  $a$  或  $b$  拨向甲, 则  $H_3$  应亮。

**解**

第一步: 分别对灯  $H_1, H_2$  和  $H_3$  写出逻辑关系式

$$\begin{aligned} F_{H_1} &= ac + \bar{a}b + bc; F_{H_2} = ac + bc + ad + bd; F_{H_3} \\ &= a + b \end{aligned}$$

第二步: 观察以上各式, 运用逻辑代数法则加以简化

$$\begin{aligned} F_{H_1} &= ac + \bar{a}b + bc = ac + \bar{a}b + (a + \bar{a})bc \\ &= ac + \bar{a}b + abc + \bar{a}bc = ac(1 + b) + \\ &+ \bar{a}b(1 + c) = ac + \bar{a}b \end{aligned}$$

上式表明  $b, c$  拨向甲,  $H_1$  亮的假设条件已包括在  $a, c$  拨向甲或  $a$  拨向乙、 $b$  拨向甲的条件内。

$$\begin{aligned} F_{(H_2 \sim H_3)} &= (ac + bc + ad + bd)H_2 + (a + b)H_3 \\ &= [c(a + b) + d(a - b)]H_2 + (a + b)H_3 \\ &= (a + b)(c + d)H_2 + (a + b)H_3 \\ &= (a + b)[(c + d)H_2 + H_3] \end{aligned}$$

故  $F_{(H_1 \sim H_3)} = (ac + \bar{a}b)H_1 + (a + b)[(c + d)H_2 + H_3]$

第三步:由上式便可直接画出电路图如图 20—7 所示。

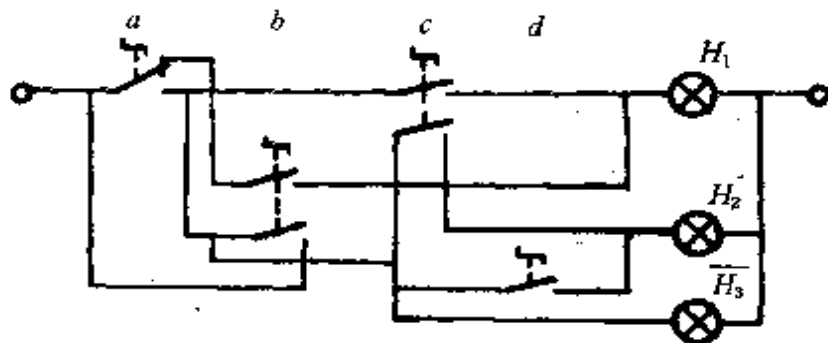


图 20—7 例 20—11 接线图

### 3. 利用逻辑关系设计抢答电路

下面仅以简单的抢答电路为例介绍这种方法的设计思想。

抢答电路的要求:当最先按下任何一个抢答组的按钮时,该组的指示灯亮,铃响。在放开该按钮前,不管再按其他按钮,均不起作用(指示灯不亮)。放开按钮,电路复原。

#### 例 20—12 三个抢答组电路

第一步:列出逻辑关系,见表 20—10。列表时尽可能把同一列的“1”紧挨一起排列,以简化接线。

表 20—10 逻辑关系

	$K_2$	$K_1$
$S_1$	0	1
$S_2$	1	1
$S_3$	1	0

第二步：按表 20—10 画出信号回路接线，如图 20—8(a) 所示。其中表中的“1”对应于接触器的常开触头，并将它们以各按钮的行加以串联，然后接入指示灯。

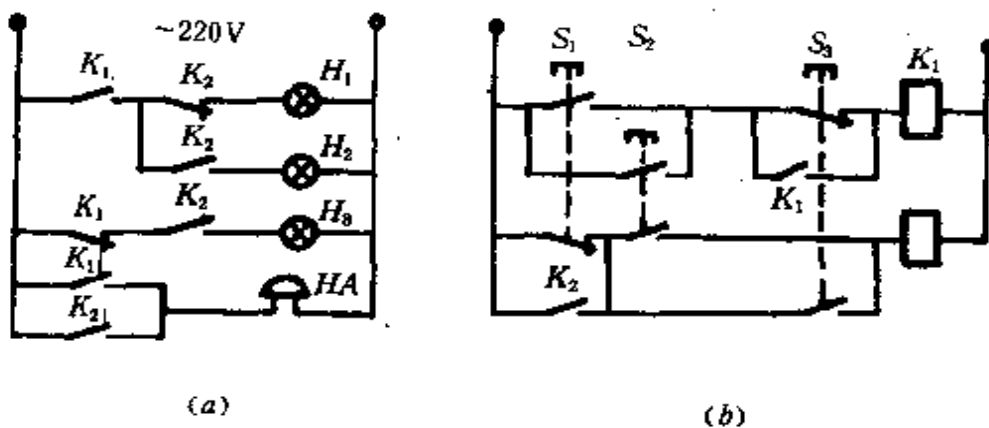


图 20—8 例 20—12 的信号和控制线路

(a) 信号回路 (b) 接触器及按钮连线图

第三步：按表 20—10 画出接触器及按钮连线，如图 20—8(b) 所示，其中表中的“1”对应于各按钮的常开触头，并加以并联；“0”对应于各按钮的常闭触头。然后将以上常开、常闭触头串联后接入对应的接触器线圈，并在常闭触头上并联相应接触器的常开触头。

第四步：校验接触器及按钮的触头数是否满足所选型号。将所用去的触头数列于表 20—11。



表 20—11 用去的触头数

$S_3$	$K_1$	$K_2$	$S_1$	$S_2$	$S_3$
常开触头数	3	4	1	2	1
常闭触头数	1	1	0	0	1

由表 20—11 可见,  $K_1$ 、 $K_2$  可选用普通交流接触器, 如 JC—5A, 220V; 按钮  $S_1 \sim S_3$  可选用具有二个常开、二个常闭触头的任何型式的按钮, 如 LA—18—22 型; 或选用具有一个常开、一个常闭触头的 LA18—11 型(这时需将接入  $K_2$  线圈回路中的按钮  $S_2$  的触头用  $K_1$  的常开触头代替, 代替后不影响动作的正确性)。

第五步: 分析动作的正确性。如按下  $S_1$ , 则  $K_2$  线圈回路断开,  $K_1$  吸合, 其常开触头闭合, 指示灯  $H_1$  亮, 若再按  $S_2$  或  $S_3$  均无影响; 按下  $S_2$ ,  $K_1$ 、 $K_2$  吸合, 常开触头闭合,  $H_2$  亮, 若再按  $S_1$  或  $S_3$  均无影响; 按下  $S_3$ ,  $K_2$  吸合,  $K_1$  回路断开,  $K_2$  吸合, 常开触头闭合,  $H_3$  亮, 若再按  $S_1$  或  $S_2$  均无影响。

### 例 20—13 四个抢答组电路

第一步: 列出逻辑关系, 见表 20—12。

第二、三步: 按表 20—12 分别画出信号回路图和接触器及按钮连线, 如图 20—9 所示。

第四步: 校验触头数。用去的触头数列于表 20—13。由表可见,  $K_1 \sim K_3$  可选用 JC—5A、220V;  $S_1 \sim S_4$  可选用 LA18—22 型。

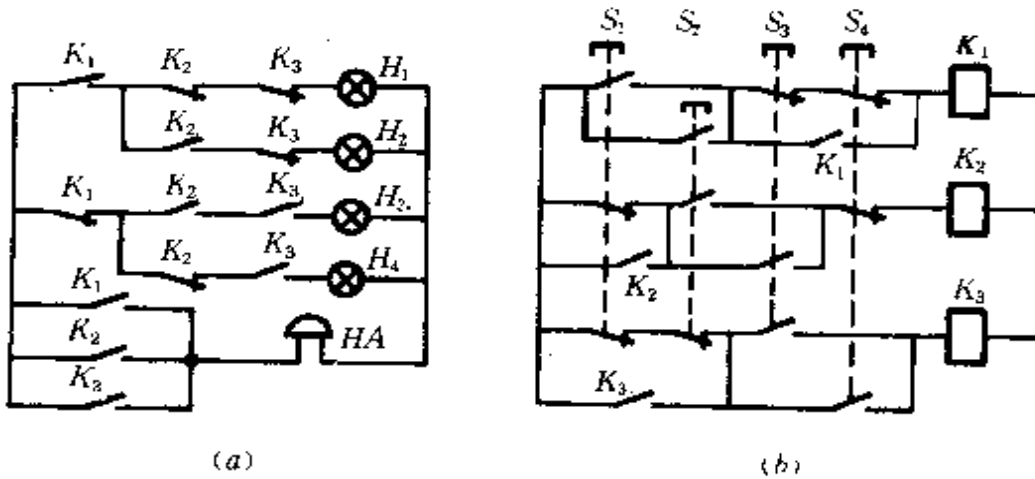


图 20-9 例 20-13 的信号和控制线路  
(a) 信号回路 (b) 接触器及按钮连线图

第五步:分析动作的正确性(略)。

表 20-12 逻辑关系

	$K_3$	$K_2$	$K_1$
$S_1$	0	0	1
$S_2$	0	1	1
$S_3$	1	1	0
$S_4$	1	0	0

表 20-13 用去的触头数

	$K_1$	$K_2$	$K_3$	$S_1$	$S_2$	$S_3$	$S_4$
常开触头数	3	4	4	1	2	2	1
常闭触头数	1	2	2	2	2	1	1

## 第二十一章 其它

### 第一节 节电工程经济效益计算

#### 一、节电工程投资效果计算

以往,我国在计算节电工程投资效果时,通常采用投资回收年限法,又称静态计算法。投资以工程完成后的收益的形式回收,所需要的年限,称为投资回收年限。当投资回收年限小于或等于某一规定年限时,则工程在经济上是合理的,否则是不可取的。当然,回收年限越短越好。静态计算法的缺点是没有考虑资金的时间价值,即没有考虑资金的利率,因此,已逐渐被计及资金利率的投资利率法,也称动态计算法所代替。

##### 1. 静态计算法

投资回收期限计算公式:

$$T = \frac{C}{\Delta L} = \frac{C}{L_2 - L_1} = \frac{C}{A\delta - S}$$

式中:  $T$  —— 投资回收期限(年);

$C$  —— 实现节电措施所需的投资(元),包括用于建筑、购置各种设备、安装及管理费用;

$\Delta L$  —— 实现节电措施后的年节电效益(元);

$L_1$  —— 实现节电措施前的年收益(元);

$L_2$  —— 实现节电措施后的年收益(元);

$A$  —— 年节电总量(kWh);

$\delta$  —— 电价(元/kWh);

$S$  —— 节电工程投入后的年维护保养费用(元)。

用节能产品更换老产品的资金回收期限,应按下式计算:

$$T = \frac{C - d}{\Delta L}$$

式中: $C$  —— 购置节能产品费用(元);

$d$  —— 老产品报废后的回收资金(元);

$\Delta L$  —— 更换后年节电效益(元)。

一般认为,当  $T \leq 1/2 \sim 2/3$  节能产品寿命周期时,在经济上是合理的,否则不可取。

**例 21—1** 某化工厂一个节能小组提出一项改变工艺流程的建议,能保证年节电 100 万 kWh,改变工艺流程所需费用为 45 万元;每年花在吸附剂上的费用降低了 2 万元;年设备折旧费降低 3 万元。要求投资回收期限为 4 年。试用静态法验证该项建议是否应采纳? 设电价为 0.1 元/kWh。

**解** 实现节电措施所需投资为  $C = 45$  万元

实现节电措施后的年节电效益(包括吸附剂及折旧费的降低)为

$$\begin{aligned} \Delta L &= A\delta + \Delta L_1 + \Delta L_2 \\ &= 100 \times 0.1 + 2 + 3 = 15(\text{万元/年}) \end{aligned}$$

故投资回收期限为

$T = C/\Delta L = 45/15 = 3$  年  $< 4$  年(允许的投资回收期限)。

因此,该建议应该采纳。

## 2. 动态计算法

动态计算法即投资利率法,系根据按投资利率  $i$  折现的投

资  $C$  和收益  $L$ , 在工程使用寿命年限  $n$  年内相等的原则, 来确定投资利率  $i$ 。当工程投资利率  $i$  高于某一规定值  $i_0$  时, 则工程是可行的, 否则不可取。 $i$  越高, 则方案越佳。

(1) 已知确定资本回收期限后, 如何决定投资限额, 设节电改造工程的投资为  $C$  (元), 年利率为  $i$ , 采取节电工程后的年节约费用 (即年收益) 为  $L$  (元 / 年), 则 1 年后的未收回资金为

$$C(1+i) - L$$

2 年后的未收回资金为

$$\begin{aligned} & [C(1+i) - L](1+i) - L \\ & = C(1+i)^2 - L(1+i) - L \end{aligned}$$

$n$  年后的未收回资金为

$$\begin{aligned} & C(1+i)^n - L(1+i)^{n-1} - L(1+i)^{n-2} - \dots - L(1+i) - L \\ & = C(1+i)^n - L \sum_{k=1}^n (1+i)^{k-1} \end{aligned}$$

若  $n$  年后收回了投资额 ( $n$  年为使用寿命年限), 则

$$C(1+i)^n - L \sum_{k=1}^n (1+i)^{k-1} = 0$$

即 
$$\frac{L}{C} = \frac{(1+i)^n i}{(1+i)^n - 1}$$

假设已确定资本回收期限为  $T = n$  年, 便可由表 21—1 决定投资限额 (即最高可以接受的投资额)。

表 21—1 资本回收系数  $L/C$  和现值系数  $C/L$  表

资本回收 期限 $n$ (年)	资本回收系数 $\frac{i(1+i)^n}{(1+i)^n - 1}$	现值系数 $\frac{(1+i)^n - 1}{i(1+i)^n}$	资本回收系数 $\frac{i(1+i)^n}{(1+i)^n - 1}$	现值系数 $\frac{(1+i)^n - 1}{i(1+i)^n}$
	利率 $i = 0.5\%$		利率 $i = 1\%$	
1	1.00500	0.995	1.01000	0.990
2	0.50375	1.985	0.50751	1.970
3	0.33667	2.970	0.34002	2.941
4	0.25313	3.950	0.25628	3.902
5	0.20301	4.926	0.20604	4.853
6	0.16960	5.896	0.17255	5.795
7	0.14573	6.862	0.14883	6.728
8	0.12783	7.823	0.13069	7.652
9	0.11391	8.779	0.11674	8.566
10	0.10277	9.730	0.10558	9.471
	利率 $i = 2\%$		利率 $i = 3\%$	
1	1.02000	0.930	1.03000	0.971
2	0.51505	1.942	0.52261	1.913
3	0.34675	2.884	0.35353	2.829
4	0.26262	3.808	0.26903	3.717
5	0.21216	4.713	0.21835	4.580
6	0.17835	5.601	0.18460	5.417
7	0.15451	6.472	0.16051	6.230
8	0.13651	7.325	0.14246	7.020
9	0.12252	8.162	0.12843	7.786
10	0.11133	8.983	0.11723	8.530

(续表)

资本回收 期限 $n$ (年)	资本回收系数	现值系数	资本回收系数	现值系数
	$\frac{i(1+i)^n}{(1+i)^n - 1}$	$\frac{(1+i)^n - 1}{i(1+i)^n}$	$\frac{i(1+i)^n}{(1+i)^n - 1}$	$\frac{(1+i)^n - 1}{i(1+i)^n}$
	利率 $i = 4\%$		利率 $i = 5\%$	
1	1.04000	0.962	1.05000	0.952
2	0.53020	1.886	0.53780	1.859
3	0.36035	2.775	0.36721	2.723
4	0.27549	3.630	0.28201	3.546
5	0.22463	4.452	0.23097	4.329
6	0.19076	5.242	0.19702	5.075
7	0.16661	6.002	0.17282	5.786
8	0.14853	6.733	0.15472	6.463
9	0.13449	7.435	0.14069	7.108
10	0.12329	8.111	0.12950	7.722
	利率 $i = 6\%$		利率 $i = 8\%$	
1	1.06000	0.943	1.08000	0.926
2	0.54544	1.833	0.56077	1.783
3	0.37411	2.673	0.38803	2.577
4	0.28859	3.465	0.30192	3.312
5	0.23740	4.212	0.25046	3.993
6	0.20336	4.917	0.21632	4.623
7	0.17914	5.582	0.19207	5.206
8	0.16104	6.210	0.17401	5.747
9	0.14702	6.802	0.16008	6.247
10	0.13587	7.360	0.14903	6.710

(续表)

资本回收 期限 $n$ (年)	资本回收系数	现值系数	资本回收系数	现值系数
	$\frac{i(1+i)^n}{(1+i)^n - 1}$	$\frac{(1+i)^n - 1}{i(1+i)^n}$	$\frac{i(1+i)^n}{(1+i)^n - 1}$	$\frac{(1+i)^n - 1}{i(1+i)^n}$
	利率 $i = 10\%$		利率 $i = 12\%$	
1	1.10000	0.909	1.12000	0.893
2	0.57619	1.736	0.59170	1.690
3	0.40211	2.487	0.41635	2.402
4	0.31547	3.170	0.32923	3.037
5	0.26380	3.791	0.27741	3.605
6	0.22961	4.355	0.24323	4.111
7	0.20541	4.868	0.21912	4.564
8	0.18744	5.335	0.20130	4.968
9	0.17364	5.759	0.18768	5.328
10	0.16275	6.144	0.17698	5.650
	利率 $i = 15\%$		利率 $i = 20\%$	
1	1.15000	0.870	1.20000	0.833
2	0.61512	1.626	0.65455	1.528
3	0.43798	2.283	0.47473	2.106
4	0.35027	2.855	0.38629	2.589
5	0.29832	3.352	0.33438	2.991
6	0.26424	3.784	0.30071	3.326
7	0.24036	4.160	0.27742	3.605
8	0.22285	4.487	0.26061	3.837
9	0.20957	4.772	0.24808	4.031
10	0.19925	5.019	0.23852	4.192



(续表)

资本回收 期限 $n$ (年)	资本回收系数	现值系数	资本回收系数	现值系数
	$\frac{i(1+i)^n}{(1+i)^n - 1}$	$\frac{(1+i)^n - 1}{i(1+i)^n}$	$\frac{i(1+i)^n}{(1+i)^n - 1}$	$\frac{(1+i)^n - 1}{i(1+i)^n}$
	利率 $i = 25\%$		利率 $i = 30\%$	
1	1.25000	0.800	1.30000	0.769
2	0.69444	1.440	0.73478	1.361
3	0.51230	1.952	0.55063	1.816
4	0.42344	2.362	0.46163	2.266
5	0.37185	2.689	0.41058	2.436
6	0.33882	2.951	0.37839	2.643
7	0.31634	3.161	0.35687	2.802
8	0.30040	3.329	0.34192	2.925
9	0.28876	3.463	0.33124	3.019
10	0.28007	3.571	0.32346	3.092
	利率 $i = 40\%$		利率 $i = 50\%$	
1	1.40000	0.714	1.50000	0.667
2	0.81667	1.224	0.90000	1.111
3	0.62936	1.589	0.71053	1.407
4	0.54077	1.849	0.62308	1.605
5	0.49136	2.035	0.57583	1.737
6	0.46126	2.168	0.54812	1.824
7	0.44192	2.263	0.53108	1.883
8	0.42907	2.331	0.52030	1.922
9	0.42034	2.379	0.51335	1.948
10	0.41432	2.414	0.50882	1.965

**例 21—2** 某节电改造工程,预计改造后年收益(节约)10万元/年,已知年利率*i* = 10%,若要求二年收回投资,问最高可以接受的投资额为多少?

**解** 由表 21—1 查得  $L/C = 0.57619$ ,故得

$$C = \frac{L}{0.57619} = \frac{10 \text{ 万元}}{0.57619} \approx 17.36 \text{ 万元}$$

最高可以接受的投资额为 17.36 万元。

**例 21—3** 某节电工程,投资 8 万元,第一年至第四年的收益分别为 3 万元、3.3 万元、3.6 万元和 4 万元。试分析该节电工程是否可行?设利率为 15%,要求 4 年收回投资。

**解** 设投资为  $C$ ,年收益为  $\Delta L$ ,利率为  $i\%$ ,则折现率为  $\left(\frac{1}{1+i}\right)^n$ ,第  $n$  年的净收益为  $\Delta L_n = \Delta L \left(\frac{1}{1+i}\right)^n$ , $n$  年扣除投资后的净收益为  $C - \sum \Delta L_n$ 。

按题意列表,见表 21—2。

表 21—2 某节电工程投资和收益表

年份	投资 $C$ (万元)	收益 $\Delta L$ (万元/年)	$i = 15\%$ 时 折现率 $\left(\frac{1}{1+i}\right)^n$	第 $n$ 年的净 收益 $\Delta L_n = \Delta L$ $\left(\frac{1}{1+i}\right)^n$ (万元)	$n$ 年扣除投资 后的净收益 $C - \sum \Delta L_n$ (万元)
0	8		1.0	- 8	
1		3	0.870	2.61	- 5.39
2		3.3	0.750	2.49	- 2.9
3		3.6	0.658	2.37	- 0.53
4		4	0.572	2.29	+ 1.76

由表可见,第4年累计净收益已为正值,故工程是可行的。

(2) 合理投资利率  $i$  的确定: 设节电改造工程的投资为  $C$ (元), 年利率为  $i$ 。采取节电工程后的第一年开始每年收益为  $L$ (元/年), 工程使用寿命年限为  $n$ , 则可根据现值系数  $C/L$ (数值上正好等于投资回收年限), 查表 21—1 或按下式求得工程投资利率  $i$ :

$$\frac{C}{L} = \frac{(1+i)^n - 1}{(1+i)^n i}$$

当查得  $i > i_0$  时, 则节电工程是可行的, 否则不可取。

**例 21—4** 一台 35kV、7500kVA 高损耗变压器, 最大负荷为 7000kVA, 平均负荷为 4000kVA。自投入运行已 28 年, 继续运行则需彻底大修。试确定是大修还是用目前生产的低损耗变压器予以更换合算? 设投资平均利率为  $i = 14\%$ 。

**解** 现将大修或更换两种方案的投资和年运行费用列于表 21—3 中。

表 21—3 大修与更换工程比较

方 案	空载 损耗 (kW)	短路 损耗 (kW)	年电能 损耗 (万 kWh)	年运行 费用(减 少部分 即收益) (万元)	购置费 (万元)	大修费 (万元)	残值 (万元)	投资(增 加部分 即投资) (万元)
更换为 8000kVA 的变压器	10.9	57	23.8	-0.79	6.29		0.94	+3.47
7500kVA 旧变压器 大修	19	71	36.9			1.88		

注:

①电价按 0.06 元/kWh 计算;

②变压器的残值按新变压器价格的 15% 计算。

由表可知,投资为  $C = 3.47$  万元;年收益为  $L = 0.79$  万元,故现值系数为

$$C/L = 3.47/0.79 = 4.39$$

根据现值系数  $C/L = 4.39$ ,变压器使用寿命  $n = 20$  年,可由式:

$$\frac{C}{L} = \frac{(1+i)^n - 1}{(1+i)^n i} = \frac{(1+i)^{20} - 1}{(1+i)^{20} i} = 4.39 \text{ 或查表得}$$

工程投资利率为  $i = 22\% < 14\% = i_0$  (年利率)。

因此,更换变压器方案是经济的。

(3) 投资回收期限的计算:如果节电工程在建设期内投资每年分别为  $C_1, C_2, C_3 \dots C_n$ ,该工程在第  $n$  年建成后,年收益为  $L$ ,该工程  $n$  年内按复利计算的投资本利和为  $\sum C$ ,年利率为  $i$ ,假定当年投资是从第二年开始计息,则

$$\sum C = C_1(1+i)^{n-1} + C_2(1+i)^{n-2} + \dots + C_{n-1}(1+i) + C_n$$

投资回收期限按下式计算:

$$Y = \frac{i \sum C}{-\lg(1 - \frac{L}{\sum C}) \lg(1+i)}$$

## 二、产品用电单耗及节电量的计算

### 1. 产品用电单耗的计算

影响产品用电单耗(产品电耗)的因素很复杂,主要与原料、设备及操作方法有很大关系。另外,产品质量的波动,对用电单耗也有较大的影响。但是在类似的条件下,对本厂的过去与现在进行比较时,能够以具体的数值表示出工厂的生产成绩及节电效果。为了比较各行业同一产品之间的用电单耗,可用可比电耗来表示。

有关产品电耗的定义、分类及计算等,请参照 GB5623—85

《产品电耗定额制定和管理导则》。

(1) 对于生产单一产品的企业,可采用统算法:

① 无在制品(或半成品)的产品用电单耗:

$$\text{产品用电单耗} = \frac{\text{产品生产的用电量}}{\text{合格产品产量}(m, m^2, m^3, t \text{ 个等})}$$

② 有在制品(或半成品)的产品用电单耗:

产品用电单耗 =

$$\frac{\text{本期产品生产全部用电量} - \text{本期在制品用电量} + \text{上期在制品用电量}}{\text{本期合格产品}}$$

在制品或半成品的用电量是指在制品生产所经过的全部生产工艺过程中消耗的电量。一般可用在制品的产量乘以在制品所经过的各个生产工艺电耗之和来确定。

(2) 对于生产多品种而又无法将用电量分开的企业,可采用分摊法。即

先按照上级规定,选择一种产品作为标准产品,列出各个产品相互间的用电单耗换算系数,再具体分摊计算各个产品的实际用电单耗。例如:

产品甲产量为  $P$ , 工序理论用电单耗为  $a$

产品乙产量为  $Q$ , 工序理论用电单耗为  $b$

产品丙产量为  $R$ , 工序理论用电单耗为  $c$

产品乙折合成产品甲的用电单耗换算系数为  $b/a$

产品丙折合成产品甲的用电单耗换算系数为  $c/a$

则产品甲的实际用电单耗为

$$a' = \frac{\text{全部用电量}}{P + \frac{b}{a}Q + \frac{c}{a}R}$$

产品乙的实际用电单耗为

$$b' = \frac{b}{a}a'$$

产品丙的实际用电单耗为

$$c' = \frac{c}{a} a'$$

## 2. 节电量的计算方法

### (1) 用电单耗同期对比法:

节电量 = (去年同期单耗 - 本期实际单耗) × 本期产量  
此方法适用于产品比较固定的企业。

### (2) 用电定额对比法:

节电量 = (用电定额指标 - 实际用电单耗) × 产量  
如果是生产多种产品的企业,分品种计算节电量之和,即为  
全厂总节电量。

### (3) 同期产值单位耗电计算法:

节电量 = (去年同期单位产值用电数 - 本期单位产值用  
电数) × 本期实际产值  
当产品繁多,不易计算用电定额时,可用此法计算。

### (4) 单项措施节电效果计算法:

节电量 = (改进前耗电负荷 - 改进后耗电负荷)  
× 使用时间 × 推广机台  
由于工艺、技术、设备等方面的革新和改进时,可用此法计  
算。

### (5) 照明设备节电计算:

#### ① 设备容量对比法:

节电量 =  
$$\frac{(\text{换前灯光总瓦数} - \text{换后灯光总瓦数}) \times \text{平均使用时间}}{1000}$$

此方法适用于大灯泡换小灯泡后的节电计算。

生活照明用电时间,一般按每日 4~6h 计算;生产厂房照  
明,一般约 12h 左右(二班或三班制生产企业),日数为企业工作  
日。

#### ② 实际用电量法:

节电量 = 本期用电量 - 同期用电量

### 三、机电产品节能效益计算

机电产品节能效益计算有以下几种方法：

#### 1. 效率折算法

(1) 风机、水泵采用以下公式计算：

$$A = P \Delta \eta \tau n$$

式中：A —— 年节电效益(kWh)；

P —— 单台设备平均功率(kW)；

$\Delta \eta$  —— 单台设备效率提高数， $\Delta \eta = \eta_2 - \eta_1$ ；

$\eta_2$  —— 节能产品效率；

$\eta_1$  —— 参比产品效率(或老产品效率)；

$\tau$  —— 年运行小时数；

n —— 设备台数。

20 种风机新产品的节能效益计算结果见表 21—4。

表 21—4 风机 20 种新产品节能效益计算结果

项目 风机	老产品(参比产品)		节能产品		平均 功率 (kW)	年运行 时间 (h)	单台年 节能 (kWh)
	型号	效率 (%)	型号	效率 (%)			
高压离心通风机 9—19	8—18	65	9—19	84	20	6000	2.28 万
高压离心通风机 9—26	9—27	65	9—26	82	25	6000	2.55 万

(续表)

项目 风机	老产品(参比产品)		节能产品		平均 功率 (kW)	年运行 时间 (h)	单台年 节能 (kWh)
	型号	效率 (%)	型号	效率 (%)			
高压离心通风机 新 9—35 系列	9—35	65	新 9—35	81	20	3000	9000
小氮肥离心通风机 10—19 系列	8—18 4—72 串联	65	10—19	84	100	6000	30 万
中压离心通风机 5—48 系列	9—35 4—65 4—70	65 80 81~82	5—48	87	10	3000	3000
低压离心通风机 6—48 系列	6—46	62	6—48	82	8	6000	9600
一般轴流通风机 新 T30 系列	T—30	65	新 T30	78.6	1	2000	400
矿井轴流主通风机 2K60 系列	70B <sub>2</sub>	72	2K60	81.7	500	6000	35 万
矿井轴流局部通风机 BKJ66—1	JBT52	65	BKJ66 —1	90	8	4000	1.2 万
20 万 kW 以下电 站离心风机 G4—73 Y4—73	G4—73 Y4—73	75~80	G4—73 Y4—73	80~85	100	7000	3.5 万



(续表)

项目 风机	老产品(参比产品)		节能产品		平均 功率 (kW)	年运行 时间 (h)	单台年 节能 (kWh)
	型号	效率(%)	型号	效率(%)			
30.60万kW电站 离心风机			G4-73 Y4-73	80~85	300	7000	10.5万
矿井轴流主通风 机	70B <sub>2</sub>	70	GAF	83~88	500	7000	45万
30.60万kW电站 轴流风机 FAF、 SAF	7-11	78	FAF SAF	83~88	2000	2000	140万
隧道轴流风机 TAF	SD50	80	TAF	83~88	100	6000	4.8万
纺织轴流风机 FZ40-11	FZ40 -11	87	FZ40 -11	92	30	6000	1.8万
高温风机	FW9-27 FW9-25	65		81	70	6000	63万
罗次鼓风机	D14×20 -100×95	60~70	D14×20 -100×95	70~80	10	5000	5000
石油炼厂尾气回 收透平					2000	6000	1200万
高炉煤气余压回 收发电装置 (TRT)					3000	6000	1800万
制氧用空气透平 压缩机 DH型	DA350 -1250	60~69	DH45 -112	67~75	4000	6000	120万

(2)小型异步电动机采用以下公式计算:

$$A = P(\frac{1}{\eta_1} - \frac{1}{\eta_2})\tau n$$

式中符号同前。

(3)高效电动机采用以下公式计算:

$$A = P_2(\frac{1}{\eta_1} - \frac{1}{\eta_2})\tau\beta$$

式中:  $A$  —— 单台电动机年节电效益(kWh);

$P_2$  —— 电动机额定输出功率(kW);

$\beta$  —— 负荷率;

其它符号同前。

### 2. 单耗计算法

空压机、制氧机等产品采用以下公式计算:

$$A = \Delta P Q n$$

式中:  $A$  —— 年节电效益(kWh);

$\Delta P$  —— 单耗的减少量(kW/m<sup>3</sup>·min);

$Q$  —— 年产气量(m<sup>3</sup>);

$n$  —— 设备台数。

### 3. 空载损耗计算法

工业电阻炉等产品采用以下公式计算:

$$A = P\tau\eta n$$

式中:  $P$  —— 每台电阻炉的平均功率(kW);

$\tau$  —— 年运行小时数(h);

$\eta$  —— 单台设备平均节电效果;

其它符号同前。

### 4. 十年运行费用法

中小型电力变压器采用以下公式计算:

$$A = \tau(\Delta P_0 + \Delta P_d\beta^2)$$

式中： $\tau$ ——年运行小时数，可取 8760h；

$\Delta P_0$ ——变压器空载损耗降低值；

$\Delta P_d$ ——变压器短路损耗降低值；

$\beta$ ——变压器负荷率，10kV 级取 53.42%，35kV 级取 67.57%；

其它符号同前。

**例 21—5** 一台普通 10kW 电动机，效率为 84%，现改用高效电动机，可降低损耗 20%，设电动机年运行小时数为 4000h，平均负荷率为 0.85。试求改成高效电动机后年节电效果。

**解** 原电动机时输入功率为

$$P_1 = P_2 / \eta = \beta P_e / \eta$$

所以原损耗为

$$\begin{aligned} \Delta P &= P_1 - P_2 = \beta P_e \left( \frac{1 - \eta}{\eta} \right) = 0.85 \times 10 \times \frac{1 - 0.84}{0.84} \\ &= 1.62 \text{ (kW)} \end{aligned}$$

采用高效电动机后，损耗降低

$$1.62 \times 20\% = 0.324 \text{ (kW)}$$

因此年节电为

$$A = 0.324 \times 4000 = 1296 \text{ (kWh)}$$

## 第二节 传动装置计算

### 一、平皮带传动计算

1. 平皮带传动不同布置形式及主要特性(表 21—5)

2. 平皮带轮直径与宽度计算

(1) 皮带轮直径根据传动比来确定：

① 不考虑皮带打滑时：

$$\frac{D_1}{D_2} = \frac{n_2}{n_1} = i$$

表 21—5 平皮带传动不同布置形式的主要特性

布置形式	开口传动	交叉传动	半交叉传动
布置形式			
采用场合	用于两轴平行，皮带轮同向转动（卧式水轮机传动 卧式发电机）	用于两轴平行反向传动	用于两轴垂直，单向传动（立式水轮机传动 卧式发电机）
小皮带轮上的包角 $\alpha^\circ$	$180 - 60 \frac{D_1 - D_2}{A}$	$180 + 60 \frac{D_1 + D_2}{A}$	$180 + 60 \frac{D_2}{A}$
皮带的几何长度 $L$	$2A + \frac{\pi}{2} (D_1 + D_2) + \frac{(D_1 - D_2)^2}{4A}$	$2A + \frac{\pi}{2} (D_1 + D_2) + \frac{(D_1 + D_2)^2}{4A}$	$2A + \frac{\pi}{2} (D_1 + D_2) + \frac{D_1^2 + D_2^2}{2A}$
最大的实用传动比 $i$	5	6	3
最大的皮带速度 $v$ (m/s)	按皮带材料而定	15	15
工作特点	双向传动；皮带只受单向弯曲	双向传动；皮带受双向弯曲及附加扭曲，交叉处皮带易磨损	只能单向传动；皮带受附加扭曲

注：1 为主动轮；2 为被动轮； $D_1$  为主动轮直径； $D_2$  为被动轮直径； $A$  为皮带轮中心距。搭接长度一般为 0.4~0.5m。

式中： $D_1$ 、 $D_2$  —— 主动轮和被动轮直径(mm)。

$n_1$ 、 $n_2$  —— 主动轮和被动轮转速(r/min)

$i$  —— 传动比，在开口传动中一般不宜大于 5，否则应通过传动轴作两次传动。

②实际情况考虑皮带打滑时：

$$D_1 = K \frac{D_2 n_2}{n_1}$$

式中： $K$  —— 打滑系数，取 1.02~1.05。

③被动轮(小轮)直径计算：

小轮直径应满足以下两个条件：

第一个条件： $D_2 = \frac{v}{\pi n_2}$

式中： $v$  —— 皮带线速度，一般可取 10~20m/s (600~1200m/min)。

第二个条件：小轮的最小直径不宜小于表 21—6 所列数值，否则影响皮带的使用寿命。

(2)皮带轮宽度的确定：皮带轮宽度根据皮带宽度决定，开口传动轮宽应比皮带宽 10~15%。

### 3. 皮带轮中心距计算

在开口传动中，两皮带轮中心距最小值  $A_{\min}$  可按下式计算：

$$A_{\min} = 2(D_1 + D_2)$$

中心距不宜过大，否则会增大厂房面积，在运转时可能使振动加剧。一般实际采用的皮带轮中心距  $A$  值略大于  $A_{\min}$ 。

### 4. 皮带尺寸计算

皮带尺寸(宽度和厚度)决定于皮带需要的传递力和皮带本身允许的传递力。为简化计算，可以根据传递功率和皮带线速度(查表 21—7)直接利用表 21—8 来选择皮带尺寸。表 21—8 适用于小轮包角  $\alpha$  为 180°时的情况。当  $\alpha$  小于 180°时，表 21—8 中所列的传递功率值应乘以修正系数(见表 21—9)。

表 21—6 橡胶平皮带在各种运转速度时  
最小皮带轮直径(mm)

皮带 速度 层数	速度		
	600m/min	600~1200m/min	1200m/min 以上
3	75	100	125
4	125	150	200
5	175	200	250
6	250	300	350
7	350	400	450
8	450	500	550
9	550	600	650
10	700	800	900
12	900	1050	1200

表 21—7 皮带线速度计算表

皮带 轮直 径 D (mm)	皮带轮转速 $n$ (r/min)									
	250	300	450	600	750	900	1000	1200	1500	2000
	皮带轮线速度 $v$ (m/min)									
75										470
100							314	377	470	628
125						353	392	470	590	785
150					353	425	470	565	705	940
175				330	413	495	550	660	825	1100
200				377	472	565	630	755	905	1260

(续表)

皮带 轮直 径 D (mm)	皮带轮转速 $n(r/min)$									
	250	300	450	600	750	900	1000	1200	1500	2000
	皮带轮线速度 $v(m/min)$									
250			354	472	590	707	787	940	1180	1570
300			425	565	707	848	940	1130	1410	1880
350		330	495	660	825	990	1100	1320	1650	
400	315	377	565	755	945	1130	1255	1510	1885	
450	354	425	637	850	1060	1270	1415	1700		
500	393	472	708	935	1180	1416	1570	1890		
550	432	518	778	1030	1300	1550	1730			
600	472	565	850	1130	1415	1700	1890			
650	511	612	920	1225	1530	1840				
700	550	660	990	1320	1630					
800	628	755	1180	1510	1880					
900	706	800	1270	1700						
1000	786	940	1410	1880						

注：铸铁皮带轮允许最大传动线速度为 1800m/min。木制皮带轮允许最大传动线速度为 900m/min。

表 21—8 国产橡胶平皮带传动功率表

皮带宽度 (mm)	皮带厚度 (层数)	传递功率 (kW)	皮带速度(m/min)									
			300	400	500	600	700	800	900	1000	1100	1200
100	3		3.6	4.5	5.5	6.7	7.7	8.7	9.8	10.7	11.8	12.1
	4		5.1	6.2	7.8	9.0	10.7	12.2	13.4	14.6	16.1	16.5
125	4		6.1	7.9	9.9	11.4	13.4	15.3	16.7	18.3	20.1	21.1
	5		7.5	9.9	12.3	14.6	16.8	19.2	21.0	23.4	25.8	26.8
150	5		9	11.7	14.5	17.6	20.3	23.6	25.1	28.0	31.0	32.2
	6		11.5	14.8	18.4	22.3	25.2	29.4	32.1	34.7	38.0	40.2
200	5		12.0	15.7	19.6	23.3	26.9	30.6	33.5	37.5	41.2	42.8
	6		15.3	19.7	24.6	29.6	33.4	39.2	42.7	46.2	50.8	53.6
	7		17.6	22.7	28.4	34.2	39.8	46.1	47.6	54.3	59.6	61.0
250	5		15.0	19.6	24.5	29.1	33.6	38.2	42.0	46.8	51.5	53.5
	6		19.2	24.6	31.8	37.0	43.0	49.0	53.5	37.7	63.5	67.0
	7		22.0	28.4	35.5	42.8	49.8	56.6	62.0	68.0	74.6	76.3
300	6		23.0	29.5	38.0	44.0	51.7	58.8	64.0	69.0	76.0	80.0
	7		27.4	34.0	42.5	51.2	59.6	67.8	74.2	81.5	88.0	91.5

注：国产橡胶平皮带每层厚度 1.25mm。



表 21—9 小皮带轮包角小于 180°时的传递功率修正系数

包角 $\alpha$	180°	170°	160°	150°	140°	130°	120°
修正系数 $K$	1.0	0.98	0.96	0.93	0.90	0.87	0.83

**例 21—6** 欲建一小水电站,已知水轮机额定转速为 582r/min,发电机额定转速为 1000r/min,额定功率为 26kW,均为横卧式安装,采用开口式平皮带传动,试设计传动装置。

**解**

(1) 传动比:

$$i = n_2/n_1 = 1000/582 = 1.72$$

(2) 设皮带线速度  $v$  为 800m/min,则小轮直径为

$$D_2 = \frac{v}{\pi n_2} = \frac{800}{\pi \times 1000} = 0.255(\text{m}) = 255\text{mm}$$

取  $D_2 = 250\text{mm}$ ,相应皮带线速度  $v$  为 785m/min

(3) 根据  $P = 26\text{kW}$ 、 $v = 785\text{m/min}$ ,查表 21—8,选用厚度为 6 层、宽度为 150mm 的皮带。

在包角为 180°时传递功率约 29.4kW,大于 26kW,可不必进行包角影响修正。

(4) 查表 21—8,当皮带层数为 6 层、 $v$  为 600~1200m/min 时,最小皮带轮直径为 300mm,故按上述选定的小轮直径 250mm 不符合要求。

(5) 重选小轮直径:  $D_2$  取 330mm,则皮带线速度为  $v$  为 618m/min。

根据  $P = 26\text{kW}$ 、 $v = 618\text{m/min}$ ,查表 21—8,选用厚度为 6 层、宽度为 200mm 皮带。

包角为 180°时传递功率约 29.6kW,大于 26kW,可不必进行包角影响修正。

(6) 水轮机皮带轮直径  $D_1$  :

取  $K = 1.03, D_1 = K \frac{n_2}{n_1} D_2 = 1.03 \frac{1000}{582} \times 330 = 584.6$   
(mm), 取 580mm。

(7) 皮带轮宽  $B$  :

$$B = 1.1 \times 200 = 220(\text{mm})$$

(8) 皮带轮最小中心距:

$$A_{\min} = 2(D_1 + D_2) = 2 \times (580 + 330) = 1820(\text{mm})$$

根据实际情况, 取  $A = 2\text{m}$ 。

(9) 皮带长度  $L$  :

$$\begin{aligned} L &= 2A + \frac{\pi}{2}(D_1 + D_2) + \frac{(D_1 - D_2)^2}{4A} \\ &= 2 \times 2000 + \frac{\pi}{2}(580 + 330) + \frac{(580 - 330)^2}{4 \times 2000} \\ &= 5436.5(\text{mm}) \end{aligned}$$

考虑皮带接头余量, 取  $L$  为 6m。

## 二、三角皮带传动计算

### 1. 三角皮带轮直径及皮带速度选择

(1) 皮带轮直径: 三角皮带可不计打滑影响; 皮带轮计算直径(算至三角皮带的截面重心)可按下式计算:

$$D_1 = \frac{n_2}{n_1} D_2$$

三角皮带轮最小直径与皮带型号有关, 见表 21—10。

表 21—10 三角皮带轮最小直径(mm)

皮带型号	A	B	C	D	E
小轮最小计算直径	100	140	200	250	400

(2) 皮带速度: 按上式求得小轮直径后, 再计算皮带速度  $v$ 。如果  $v$  小于 10m/s, 则应适当加大小皮带轮直径, 以提高线速度, 减少皮带根数。

2. 三角皮带的型号及选择

常用的甲种三角皮带型号有 A、B、C、D、E 等几种，皮带剖面如图 21—1 所示，其尺寸见表 21—11。

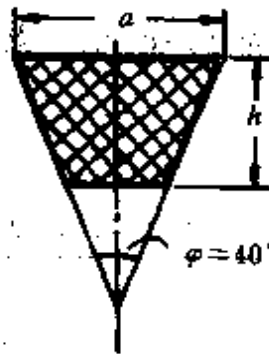


图 21—1 甲种三角皮带剖面

表 21—11

甲种三角皮带剖面尺寸

尺 寸	型 号				
	A	B	C	D	E
$a$ (mm)	13	17	22	32	38
$h$ (mm)	8	10.5	13.5	19.0	23.5
断面积 $\text{cm}^2$	0.81	1.38	2.30	4.76	6.92

根据传递功率和皮带速度由表 21—12 选择皮带型号。

表 21—12 不同工作条件下三角皮带型号选择

传递功率(kW)	皮带速度 10m/s 以下	皮带速度 10m/s 以上
7.5 以下	A·B	A·B
20 以下	B·C	B·C
40 以下	C·D	C·D
75 以下	D·E	C·D
75 以上	E	D·E

3. 三角皮带根数和皮带长度的计算

(1) 皮带根数  $N$ ;

$$N = P/P_0$$

式中:  $P$  —— 传递功率(kW);

$P_0$  —— 单根皮带所能传递的功率(kW), 可由表 21—13 查得。

表 21—13 单根三角皮带所能传递的功率  $P_0(\alpha=180^\circ)$

皮 带 型 号	常用 小轮 直径 (mm)	传递功率 kW		皮带速度(m/s)						
		5	6	8	10	12	14	16	18	20
A	100~112	0.65	0.76	1.0	1.3	1.5	1.7	1.8	2.1	2.2
B	140~160	1.1	1.4	1.8	2.2	2.6	3.1	3.3	3.8	4.0
C	160~180	1.2	1.5	2.0	2.4	2.8	3.3	3.5	4.0	4.0
C	~200	1.8	2.1	2.8	3.4	4.1	4.8	5.0	5.6	5.9
C	~250	2.1	2.5	3.4	4.1	4.9	5.7	6.2	6.9	7.3
D	250~280	2.7	3.3	4.4	5.3	6.3	7.4	8.0	8.9	9.2
D	~315	3.6	4.3	5.8	6.9	8.4	9.8	10.6	11.3	12.1
D	~355	4.2	4.7	6.6	7.6	9.7	11.3	11.9	13.6	14.0
D	~400	4.3	5.0	6.8	8.0	9.8	11.3	12.3	13.9	14.3
D	>400	4.5	5.2	7.2	8.5	10.4	12.0	13.1	14.9	15.6
E	400~450	3.8	4.5	6.1	7.3	8.8	10.1	10.8	12.4	12.9
E	~500	5.3	6.5	8.5	10.3	12.3	14.0	15.0	17.0	17.7
E	~560	6.0	7.2	9.7	11.4	13.7	16.5	17.6	19.8	20.9
E	>500	6.7	8.0	10.7	12.9	15.5	18.0	19.0	21.0	22.0
E	710~800	8.6	10.3	13.7	16.5	19.8	23.8	25.6	28.8	30.0

当  $\alpha$  小于  $180^\circ$  时,应作包角修正(查表 21—9)。一般三角皮带包角要求不小于  $120^\circ$ 。皮带根数不宜超过 8 根。

(2)三角皮带长度  $L$ :计算方法与开口传动式平皮带计算相同,见表 21—5。

#### 4. 皮带轮中心距计算

皮带轮中心距  $A$  可以在最小中心距  $A_{\min}$  和最大中心距  $A_{\max}$  间选择。

$$A_{\min} = \frac{1}{2}(D_1 + D_2) + 3h$$

$$A_{\max} = 2(D_1 + D_2)$$

式中:  $h$  —— 皮带截面高度。

### 三、直齿圆柱齿轮传动计算

#### 1. 标准直齿圆柱齿轮尺寸的计算

我国标准直齿圆柱齿轮尺寸的计算公式见表 21—14(参图 21—2)。

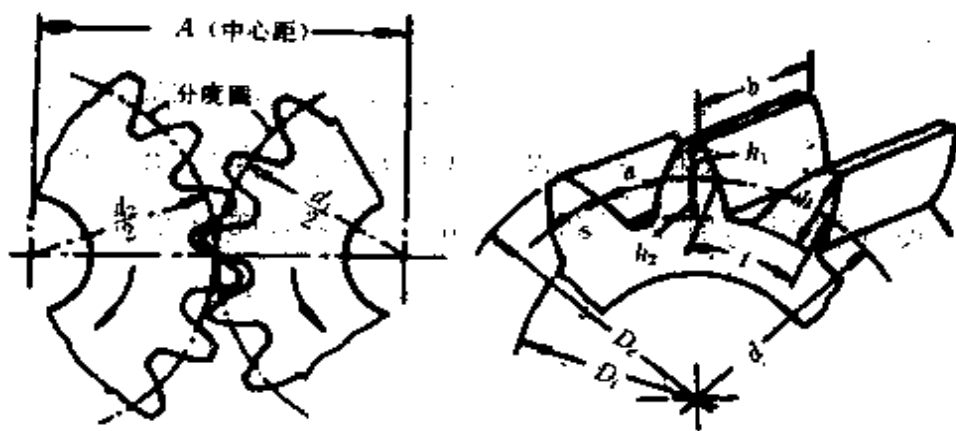


图 21—2 直齿圆柱齿轮的各部尺寸和啮合图

表 21—14 标准直齿轮各部尺寸的计算公式

各部分名称	代号	计算公式
分度圆直径	$d$	$d = mz$ ( $z$ — 齿数)
齿顶高	$h_1$	$h_1 = m$ (短齿 $h_1 = 0.8m$ )
齿根高	$h_2$	$h_2 = 1.25m$ (短齿 $h_2 = 1.1m$ )
全齿高	$h$	$h = 2.25m$ (短齿 $h = 1.9m$ )
齿顶圆直径	$D_e$	$D_e = m(z + 2)$ (短齿 $D_e = m(z + 1.6)$ )
齿根圆直径	$D_i$	$D_i = m(z - 2.5)$ (短齿 $D_i = m(z - 2.2)$ )
周节	$t$	$t = \pi m$

注:  $m$  为模数 (mm)。

2. 圆柱齿轮传动的简单计算

45 号调质钢圆柱齿轮在不同模数和不同齿数情况下允许传递功率值, 见表 21—15。制表条件:

$$\text{传动比 } i = \frac{\text{大齿轮齿数}}{\text{小齿轮齿数}} = 1$$

$$\text{齿宽 } b = 10m \text{ (齿宽系数 } \phi = b/m = 10)$$

$$\text{转速 } n = 1000 \text{ r/min}$$

表中  $P_i$  —— 为根据接触强度算出的允许传递功率;

$P_w$  —— 为根据弯曲强度算出的允许传递功率。

当实际情况与制表条件不同时, 允许传递功率应按下列公式修正:

$$P_i = P_i \cdot \frac{2i}{1+i} \cdot \frac{\phi}{10} \cdot \frac{n}{1000} \cdot K_c$$

$$P_w = P_w \cdot \frac{\phi}{10} \cdot \frac{n}{1000} \cdot K_c$$

表 21—15 45 号调质钢圆柱齿轮允许传递功率(kW)

齿数 $z$	$P_i/P_w$	模数 $m$					
		4.0	4.5	5.0	6.0	8.0	10.0
16		5.165	7.354	10.08	17.43	41.32	80.69
		21.56	30.70	42.12	72.94	162.9	318.2
17		5.831	8.302	11.39	19.68	46.65	91.11
		23.39	33.31	45.70	79.15	176.7	345.3
18		6.537	9.308	12.77	22.06	52.30	102.2
		25.25	36.01	49.40	85.38	191.1	373.2
19		7.284	10.37	14.23	24.58	58.27	113.8
		27.19	38.78	53.21	91.96	205.8	401.9
20		8.069	11.49	15.76	27.24	64.56	126.1
		29.25	41.65	57.13	98.69	221.0	431.7
21		8.898	12.67	17.38	30.03	71.18	139.0
		31.31	44.59	61.16	105.6	236.6	462.2
22		9.761	13.90	19.08	32.95	78.15	152.6
		33.12	47.16	64.69	111.8	250.2	488.8
23		10.67	15.20	20.85	36.02	85.39	166.8
		34.95	49.77	68.27	118.0	264.0	515.9
24		11.62	16.55	22.70	39.22	93.0	181.6
		36.82	52.43	71.91	124.3	278.2	543.4

(续表)

齿数 $z$	$P_i/P_w$	模数 $m$					
		4.0	4.5	5.0	6.0	8.0	10.0
25		12.61	17.45	24.63	42.56	100.9	197.0
		38.71	55.12	75.60	130.7	292.5	571.3
26		13.64	19.42	26.64	46.03	109.1	213.1
		40.82	58.12	79.69	137.8	308.5	602.5
27		14.71	20.94	28.73	49.64	117.7	229.8
		42.97	61.18	83.89	145.0	324.7	634.2
28		15.81	22.52	30.89	53.38	126.5	247.2
		44.97	64.02	87.85	151.8	339.8	663.6
29		16.97	24.16	33.14	57.27	135.7	265.1
		46.97	66.90	91.76	157.0	355.0	693.4
30		18.15	25.85	35.47	61.28	145.3	283.8
		49.04	69.82	95.77	163.9	370.5	723.7
32		20.66	29.42	40.35	69.73	165.3	322.8
		53.22	75.78	103.9	179.6	402.2	785.5
34		23.32	33.21	45.55	78.72	186.6	364.4
		57.52	81.90	112.3	194.1	434.7	849.0
36		26.15	37.23	51.07	88.23	209.2	408.5
		61.95	88.15	121.0	209.1	468.0	914.1
38		29.13	41.48	56.80	98.33	233.1	455.2
		66.47	94.64	129.8	222.1	502.2	981.0
40		32.28	45.96	63.05	108.9	258.2	504.4
		70.89	100.9	138.5	239.2	535.7	1046.0



式中： $K_c$ ——材料系数，见表 21—16。

求得的  $P_j$  和  $P_w$  中的较小值，应大于或等于齿轮实际传递的功率。否则要重新选择模数。

表 21—16 材料系数  $K_c$  值

系数 $K_c$	材料	45 号钢	45 号钢	40 铬钢	40 铬钢	40 铬钢	20 铬钢	18 铬锰	铸铁
		正火	调质	调质	调质	正体 高频 淬火	渗炭 淬火	钛钢渗 炭淬火	
条件									HT20 -40
按接触强度时		0.56	1	1.17	5.48	6.35	8.20	9.22	2.03
按弯曲强度时		0.78	1	1.22	2.28	1.92	1.92	2.40	0.33

此外，允许传递功率大，齿轮寿命较短，反之则长。

**例 21—7** 某发电机额定功率  $P$  为 75kW，转速  $n_f$  为 1000r/min，水轮机转速  $n_s$  为 330r/min，用一对现有直齿圆柱齿轮传动，已知大齿轮齿数  $z_1$  为 54，小齿轮齿数  $z_2$  为 18，齿宽  $b$  均为 80mm，模数  $m$  均为 8mm，齿轮材料为 45 号调质钢。试判断这对齿轮是否适用。

**解**

(1) 所需传动比：

$$i = n_f/n_s = 1000/330 = 3.03$$

实际传动比为

$$i = z_1/z_2 = 54/18 = 3$$

两者基本相符，可用。

(2) 允许传递功率计算：

① 小齿轮： $z_2$  为 18， $m$  为 8mm， $b$  为 80mm，查表 21—15 得  $P_j'$  为 52.3kW， $P_w$  为 191kW

齿宽系数 ( $\psi = b/m = 80/8 = 10$ )、齿轮材料、转速  $n$  与表 21—11 相同，传动比不同，故允许传递功率为

$$P_j = P_j' \frac{2i}{1+i} = 52.3 \times \frac{2 \times 3.03}{1+3.03} = 80^*(\text{kW})$$

$$P_w = P_w' = 191 \text{ kW}$$

② 大齿轮:  $z_1$  为 54, 而表 21—15 最多是 40 齿, 因为允许传递功率已接近直线变化, 可以用外插法求得。当  $z_1$  为 54,  $m$  为 8 时, 算得  $P_j'$  为 240 kW,  $P_w'$  为 630 kW, 故大齿轮允许传递功率为

$$P_j = P_j' \frac{2i}{1+i} \cdot \frac{n}{1000} = 240 \times \frac{2 \times 3.03}{1+3.03} \times \frac{300}{1000} = 116(\text{kW})$$

$$P_w = 630 \times \frac{300}{1000} = 189(\text{kW})$$

计算结果表明, 这对齿轮最小允许传递功率为 80 kW, 大于实际传递功率 75 kW, 可以采用。

#### 四、传动轴直径的计算

一般情况下传动轴的直径主要决定于作用于轴上的扭转力矩大小。传动轴的材料为 45 号钢时可用简化公式计算:

$$d = (140 \sim 180) \sqrt[3]{P/n}$$

式中:  $d$  —— 传动轴所需直径 (mm);

$P$  —— 传递功率 (kW);

$n$  —— 传动轴转速 (r/min)。

如果轴比较长, 则要考虑轴的弯曲力矩的影响。

#### 五、摩擦力计算及传动效率

##### 1. 滑动摩擦力的计算

最大静摩擦力  $F = \mu_0 N$

动摩擦力  $F = \mu N$

式中:  $N$  —— 垂直正压力 (N);

$\mu_0$  —— 静止的摩擦系数, 见表 21—17;

$\mu$  —— 滑动的摩擦系数, 见表 21—17。

正压力  $N$  和拉力  $P$  的计算如下:

(1) 平地搬运物体〔图 21—3(a)〕:

$$N = G, P = F = \mu_0 N = \mu_0 G$$

(2) 在斜坡上搬运物体〔图 21—3(b)〕:

$$N = G \cos \alpha$$

$$P = F + G_s = \mu G \cos \alpha + G_s$$

式中:  $G$  ——物体重量(N);

$G_s$  ——水平分力(N)。

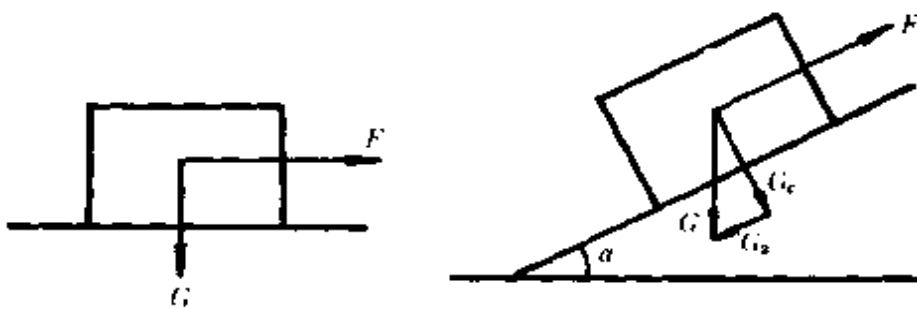


图21—3 滑动摩擦力示意图

(a)平地搬运物体 (b)斜坡上搬运物体

式中:  $G$  ——物体的重量(N),  $1\text{kg} = 9.81\text{N}$ 。

· 常用材料及塑料的滑动摩擦系数,见表21--17~表21--19,供参考。

**例 21--8** 如图 21—3 所示,一个 10t 重的钢块,放在坡度为  $15^\circ$  的碎石沙面上,求须多大力才能使物体向上滑动(初始起动力)?

**解** 查表 21--19 得  $\mu_0 = 0.37$

垂直压力为

$$\begin{aligned} N = G_c &= G \cos \alpha = 10 \times 9.81 \cos 15^\circ \\ &= 94.56 \text{ (kN)} \end{aligned}$$

水平分力为

$$G_y = G \sin \alpha = 10 \times 9.81 \times \sin 15^\circ = 25.39 \text{ (kN)}$$

摩擦力为

$$F = \mu_0 G_c = 0.37 \times 94.56 = 34.99 \text{ (kN)}$$

拉力为

$$P = G_y + F = 25.39 + 34.99 = 60.38 \text{ (kN)}$$

所以拉力须大于 60.38kN, 才能使物体移动。

表 21—17 各种工程塑料的摩擦系数

下试样的塑料名称	上试样(钢)		上试样(塑料)		
	静滑动摩擦系数 $\mu_0$	动滑动摩擦系数 $\mu$	静滑动摩擦系数 $\mu_0$	动滑动摩擦系数 $\mu$	
聚四氟乙烯	0.10	0.05	0.04	0.04	
聚全氟乙烯	0.25	0.18	—	—	
聚乙烯 {	低密度	0.27	0.26	0.33	0.33
	高密度	0.18	0.08~0.12	0.12	0.11
聚甲醛	0.14	0.13	—	—	
聚偏二氟乙烯	0.33	0.25	—	—	
聚碳酸酯	0.60	0.53	—	—	
聚苯二甲酸乙二醇酯	0.29	0.28	0.27①	0.20①	
聚酰胺(尼龙 66)	0.37	0.34	0.42①	0.35①	
聚三氟氯乙烯	0.45①	0.33①	0.43①	0.32①	
聚氯乙烯	0.45①	0.40①	0.50①	0.40①	
聚偏二氟乙烯	0.68①	0.45①	0.90①	0.52①	

①粘滑运动。

表 21—18 常用材料的摩擦系数

摩擦材料	滑动摩擦系数 $\mu$ (或 $\mu_r$ )	
	无润滑	有润滑
钢—钢	0.1 (0.15)	0.05~0.1 (0.1~0.12)
钢—软钢	0.2	0.1~0.2
钢—铸铁	0.16~0.18 (0.2~0.3)	0.05~0.15
钢—黄铜	0.19	0.03
钢—青铜	0.15~0.18	0.07 (0.1~0.15)
钢—铝	0.17	0.02
钢—夹布胶木	0.22	
硬木—铸铁或钢	0.20~0.35	0.12~0.16
软木—铸铁或钢	0.30~0.50	0.15~0.25
软钢—铸铁	0.18 (0.2)	0.05~0.15
软钢—青铜	0.18 (0.2)	0.07~0.15
铸铁—铸铁	0.15	0.07~0.12 (0.15~0.16)
铸铁—青铜	0.15~0.21 (0.28)	0.07~0.15 (0.16)
铸铁—橡皮	0.8	0.5
铜—淬火的 T8 钢	0.15	0.03

(续表)

摩擦材料	滑动摩擦系数 $\mu$ (或 $\mu_0$ )	
	无润滑	有润滑
铜—铜	0.20	—
黄铜—淬火的 T8 钢	0.14	0.02
黄铜—黄铜	0.17	0.02
黄铜—硬橡胶	0.25	—
黄铜—石板	0.25	—
黄铜—绝缘物	0.27	—
青铜—黄铜	0.16	—
青铜—青铜	0.15~0.20	0.04~0.10
青铜—钢	0.16	—
青铜—夹布胶木	0.23	—
青铜—硬橡皮	0.36	—
青铜—石板	0.33	—
青铜—绝缘物	0.26	—
铝—淬火的 T8 钢	0.17	0.02
铝—黄铜	0.27	0.02
铝—青铜	0.22	—
铝—钢	0.30	0.02
铝—夹布胶木	0.26	—
钢—粉末冶金	(0.35~0.55)	—
木材—木材	纹路平行时	0.07~0.10 (0.1)
	纹路垂直时	
麻绳—木材	0.5(0.5~0.8)	—
45号淬火钢—尼龙 9(加 3% $MoS_2$ 填充料)	0.57	0.02

表 21—19 滑动摩擦系数

摩擦物体	滑动摩擦系数	
	静止的 $\mu_0$	运动的 $\mu$
轮缘与钢轨间 (1) 起动时 (2) 速度 $v = 5\text{m/s}$ 运动时	0.20	0.15
钢锭与钢制辊子间 (1) 热金属 (2) 冷金属	0.3~0.25 0.15	
滑动轴承 (1) 热轧机带有金属轴衬 (2) 冷轧机带有金属轴衬 (3) 带有木质塑料制轴衬 (4) 液体摩擦系数		0.07~0.10 0.05~0.07 0.01~0.03 0.003~0.005
滚动轴承(有润滑油时) (1) 减速机 (2) 吊车车轮 (3) 辊道辊子与热金属 (4) 辊道辊子与冷金属		0.005 0.008 0.015 0.010
钢—卵石 钢—压实沥青沙面 钢—花岗岩沙面 硬木—卵石 钢—碎石沙面 钢—硬木沙面	0.42~0.49 0.4~0.45 0.27~0.35 0.6 0.36~0.39 0.55~0.6	

## 2. 滚动摩擦力的计算

(1) 无滚杠时滚动摩擦力的计算(见图 21—4):

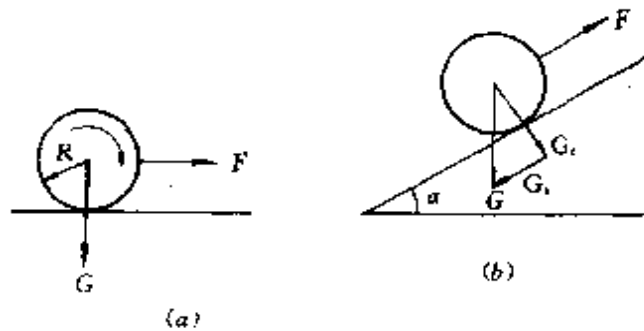


图 21—4 无滚杠滚动摩擦示意图  
(a) 平地搬运物体 (b) 斜坡上搬运物体

(a) 平地搬运物体〔图 21—4(a)〕

$$N = G, P = F = \rho N = \rho G$$

(b) 在斜坡上搬运物体〔图 21—4(b)〕

$$N = G \cos \alpha$$

$$P = F + G_s = \rho G \cos \alpha + G_s$$

式中:  $N$  —— 垂直正压力(N);

$P$  —— 拉力(N);

$F$  —— 滑动摩擦力(N);

$G$  —— 物体重量(N);

$G_s$  —— 水平分力(N)。

(2) 有滚杠时滚动摩擦力的计算(图 21—5):



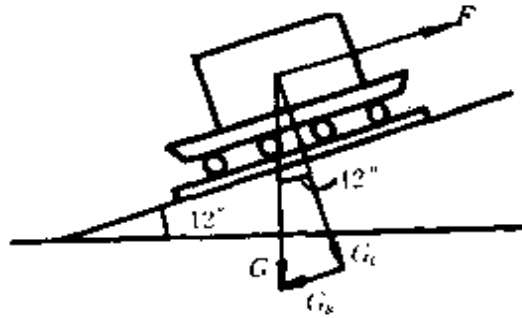


图 21—5 有滚杠滚动摩擦示意图

$$F = \frac{(N + g)\rho_1 + N\rho_2}{d}$$

式中： $g$  —— 滚杠重量(N)；

$\rho_1$  —— 滚杠与柏子面的摩擦系数；

$\rho_2$  —— 滚杠与地面的摩擦系数；

$d$  —— 滚杠直径(cm)。

常用材料的滚动摩擦系数，见表 21—20，供参考。

**例 21—9** 如图 21—5 所示，在坡度为  $12^\circ$  的沙面上移动 15t 重的物体，物体置于木柏子上，柏子下面垫有滚杠( $\phi 200$  钢管)，钢管下面铺枕木，试求移动该物体所须的拉力？

**解** 查表 21—20，得  $\rho_1 = \rho_2 = 0.03$

垂直正压力为

$$N = G_c = 15 \times 9.81 \cos 12^\circ = 143.93 \text{ (kN)}$$

水平分力为

$$G_s = 15 \times 9.81 \sin 12^\circ = 30.60 \text{ (kN)}$$

表 21- 20 滚动摩擦系数

摩擦物体	滚动摩擦系数 $\rho$ (cm)
车轮与钢轨间(起重机大车行走时) (1)车轮加工良好 (2)车轮粗加工 (3)平均值	0.08~0.05 0.10 0.08
铁路轮对	0.025~0.015
滚动轴承中的滚柱和滚珠	0.001~0.003
辘道的辘子在运输过程中 (1)900~1200°C 热钢锭包覆一层厚氧化铁皮 (2)冷钢锭, 包覆氧化铁皮 (3)500~1000°C 的轧件 (4)冷轧件	0.25 0.20 0.15 0.10
汽车轮胎 (1)对沥青路面 (2)对土路面	0.25 1.0~1.5
淬火钢—淬火钢 铸铁—铸铁 木材—钢 木材—木材 铁或钢质车轮—木面 钢质车轮—钢轨	0.001 0.05 0.03~0.04 0.05~0.08 0.15~0.25 0.05

忽略滚杠的重量时,摩擦力为

$$F = \frac{(N + G)\rho_1 + N\rho_2}{d}$$

$$\approx \frac{143.93 \times 0.03 + 143.93 \times 0.03}{20} = 0.43 \text{ (kN)}$$

拉力为

$$P = G_s + F = 30.60 + 0.43 = 31.03 \text{ (kN)}$$

所以拉力须大于 31.03kN,才能使物体移动。

3. 常用机械传动效率(表 21—21)

表 21 - 21 机械传动效率平均值

传动装置	效率 $\eta$	传动装置	效率 $\eta$	
齿轮传动(圆锥形、圆柱形、伞形)一般数据	0.96~0.98	钢绳传动	0.99	
		皮带传动	0.94~0.98	
圆柱形齿轮传动 磨制过的正齿轮 车削加工的正齿轮 粗加工的正齿轮 人字齿轮	0.99 0.98 0.96 0.985	三角皮带传动	0.90	
		绳索及链条圈筒	包括支座的摩擦损耗	0.96
		绳索及链条滑车		0.94~0.96
		复式滑车		0.92~0.98
伞齿轮减速机	0.97~0.98			
链条传动	0.98			
摩擦传动	0.7~0.8	支座轴颈		
蜗轮传动( $\mu=0.1$ ) 螺纹角为 $4^\circ\sim 6^\circ$ 螺纹角为 $8^\circ\sim 10^\circ$ 螺纹角为 $15^\circ\sim 20^\circ$	0.41 0.55 0.66	(1)滚动轴承	0.99	
		(2)滑动轴承	0.97	
		(3)滑动轴承,但润滑不良	0.94	
		(4)带油环润滑	0.98	

### 第三节 蓄电池等计算

#### 一、蓄电池有关知识及计算

##### 1. 法拉弟电解定律

$$n = It/F = Q/F, \text{ 或 } Q = It = nF$$

式中： $n$ ——电极上生成(或消耗)的物质克当量数；

$Q$ ——通过电池的电量或产生的电量(C)；

$I$ ——电流强度(A)；

$t$ ——时间(s)。

通常，电池的容量用安培小时(A·h)单位来表示，即1A电流通过1h所流过的电量。安时与法拉弟之间的关系如下：

$$1F = 96520/3600 = 26.8A \cdot h$$

##### 2. 使用蓄电池的一些规定

(1)碱性蓄电池在环境温度15~35°C时，电性能应符合表21-22的规定。

表 21-22 GB7170-87 规定

额定电压 (V)	额定容量 (A·h)	8小时率充电		5小时率放电	
		电流 (A)	终止电压 (V)	电流 (A)	终止电压 (V)
1.5	20	2.5	2.0~2.05	4	1.0

(2)碱性蓄电池接8小时率充电后，在-20±2°C的环境中，以4A放电，其输出容量不低于10A·h。

(3)碱性蓄电池按8小时率充电后，在环境温度20±5°C下搁置30昼夜，其荷电保持能力应大于或等于85%。

(4)碱性蓄电池灌入电解液后,一年充放电循环不应少于100次。

(5)电解液使用要求。碱性蓄电池的电解液是氢氧化钾或氢氧化钠溶液,一般使用比重为1.20~1.25,当使用环境温度低于-15℃时,要求比重为1.27~1.30。

铅蓄电池使用硫酸溶液,起动用电池的比重为1.27~1.29,搬运车用的为1.25~1.27,固定式电池为1.21~1.22。

一般南方地区的比重取低限值,北方取高限值。比重太低,放电劲不足,比重过高,影响电池寿命。

碱性蓄电池充放电50次或使用半年以上时,需更换一次电解液。

(6)蓄电池充电要求。应注意以下四项:

①新电池初充电:目前常用硅整流器作恒电流充电。具体充电要求如下:

碱性蓄电池灌入电解液比重要求,见电解液使用要求。

铅蓄电池灌入电解液比重较电解液使用要求中的低限值再低约0.02,如搬运车用铅蓄电池注入电解液的比重是1.23~1.24。

电解液面均要高出极板0.7~1.5cm;注入电解液后搁置2~3h再开始充电。

充电机电压应高于串接单体电池所需的电压之和。

充电电流:碱性蓄电池按(0.2×容量)的电流值充电,时间约7~8h。密闭式电池按(0.1×容量)小电流值充电,充电时间约14~16h。

铅蓄电池按(0.1×容量)的电流值充电,时间约30~40h。充电电压升到2.4V时,减半电流再充电20~30h。

一般初充电的充入电量是电池容量的4~5.5倍,初充电时间约为 $(4\sim 5.5)\times\text{容量}\div\text{充电电流值}$ 。

印有“QA”标志的铅蓄电池表示极板是干(式)荷电型,不必初充电。

②蓄电池正常充电:当蓄电池对外工作放出电量(放电电流×放电时间)超过容量一半时,必须及时充电。充电电流值与新电池充电值相同,充电时间按充入电量是放出电量的1.2~1.4倍来定。

③如何判定电池已充好电:碱性单个电池充电电压上升到1.5~1.8V,并稳定1~2h,充入电量是放电量的1.2~1.4倍,即认为电池已充足电。

铅蓄电池单个的充电电压上升到2.5~2.7V,并稳定1~2h,电解液比重上升到电解液使用要求中的规定范围,充入电量是放电量的1.2~1.4倍,即认为电池已充足电。

④充电注意事项:碱性电池电压上升到1.6V,或铅蓄电池充电电压上升到2.4V时,可以把充电电流减小一半。若发现电解液量不足,要及时补加纯水或比重为1.02~1.05电解液,充电终止前要求调整电解液比重到规定范围。

为了加速充电,允许用大于正常充电电流值1~3倍的大电流值充电,但该法不宜常用,以免损坏极板。

充电过程中电解液温度不应超过45°C,否则应采用冷水或冰块冷却,也可采取减小充电电流或暂停充电等措施。

(7)蓄电池放电要求。蓄电池放电电流与容量的关系如下:

$$Q = Q_0 \left( \frac{I_0}{I} \right)^{n-1}$$

式中:Q——放电电流为I时的容量(A·h);

$Q_0$ ——10h放电率的额定容量(A·h);

$I_0$ ——10h放电率的额定放电电流(A);

I——非10h率放电电流(A);

n——蓄电池放电容量指数,当 $I/I_0 < 3$ 时, $n = 1.313$ ;当

$I/I_0 \geq 3$  时,  $n=1.414$ 。

放电率越高则容量越小。以铅酸蓄电池为例,10h 放电率放出容量为 100%,3h 放电率放出容量近 75%,1h 放电率放出容量为 51.4%。

碱性蓄电池放电终止电压,通常规定不低于 0.9~1V;铅蓄电池规定不低于 1.5~1.7V。放电电压在带负载下测得。放电电压不允许降低到 0V,深放电会损害极板的性能。

新电池正常使用不久,按(0.1×容量)的电流值放电到规定的终止电压。如果放电电流×放电时间的数值小于 60%,说明电池有毛病。

(8) 蓄电池贮存要求。使用过的蓄电池或带电解液出厂的蓄电池带液保存时,每 1~2 月需按蓄电池正常充电要求补充一次。

需长时间贮存的蓄电池,应先将蓄电池放电,再用纯水冲洗几遍,把电解液倒净,采用自然风干或放在 45~50°C 烘房中烘干后保存。

新蓄电池密封好并放在温度为 5~40°C 的干燥室内贮存 2~3 年,仍可正常使用。

新的干态出厂的蓄电池或贮存很久的碱性电池,在使用前需进行 2~3 次充放电循环,判定容量达到要求(一般要求高于 80%)后方可使用。

### 3. 电解液的电导及其与浓度和温度的关系

(1) 电解液的电导按下式计算:

$$G = \frac{1}{R} = \frac{1}{\rho} \cdot \frac{S}{l} = \sigma \frac{S}{l}$$

式中:  $G$  —— 电解液的电导(S);

$R$  —— 电解液的电阻( $\Omega$ );

$\rho$  —— 电解液的电阻率( $\Omega \cdot \text{cm}$ );

- $l$  —— 导电长度(cm);
- $S$  —— 导电横截面( $\text{cm}^2$ );
- $\sigma$  —— 电解液的电导率(S/cm)。

电解液的电导率是面积为  $1\text{cm}^2$ , 距离为  $1\text{cm}$  的两电极间溶液所具有的电导。

(2) 电解液的电导率与浓度的关系:

在  $18^\circ\text{C}$  时由实验测得的几种不同电解液电导率与浓度的关系, 如图 21-6 所示。

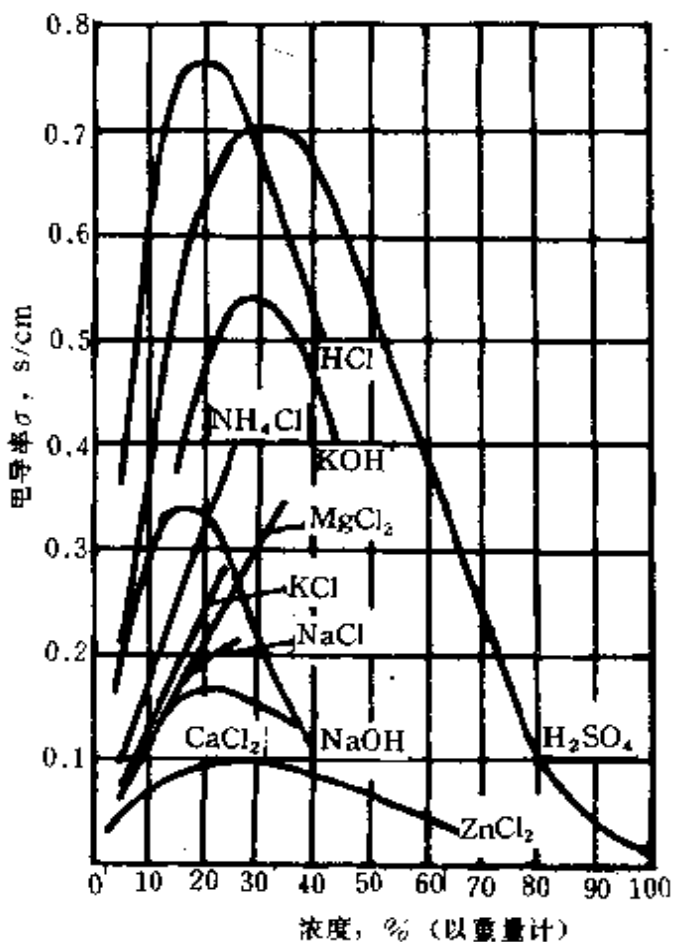


图 21-6 电解液的电导率与浓度的关系( $18^\circ\text{C}$ )



表 21—23 各种温度不同电解液的电阻率( $\Omega \cdot \text{cm}$ )

电解液组成	+50°C	+20°C	0°C	-20°C	-30°C	-40°C
普通干电池电解液	1.57	2.42	4.10	8.4	结冰	
NH <sub>4</sub> Cl 饱和水溶液	—	2.24	3.78	结冰		
ZnCl <sub>2</sub> 10% 水溶液	9.54	13.35	20.1	结冰		
ZnCl <sub>2</sub> 30% 水溶液	6.90	10.31	15.7	29.7	结冰	176
ZnCl <sub>2</sub> 50% 水溶液	8.30	14.2	23.8	15.8	87.5	
CH <sub>3</sub> NH <sub>2</sub> Cl 48%, H <sub>2</sub> O 25%	2.23	3.39	49.7	8.40	11.8	
CH <sub>3</sub> NH <sub>2</sub> Cl 40%, ZnCl <sub>2</sub> 2.5%, NH <sub>4</sub> Cl 15%, H <sub>2</sub> O 4.25%	2.18	3.34	5.13	8.54	12.1	20.8
NH <sub>4</sub> Cl 39%, ZnCl <sub>2</sub> 26.5%, H <sub>2</sub> O 54.5%	1.57	2.42	4.10	8.4	结冰	
NH <sub>4</sub> Cl 7.2%, ZnCl <sub>2</sub> 10.8%, LiCl 13.5%, H <sub>2</sub> O 68.5%	2.92	4.68	7.32	13.6	20.7	35.2
CaCl <sub>2</sub> · 2H <sub>2</sub> O 35.4%, H <sub>2</sub> O 64.5%	—	5.48	—	—	25.0	42.2
CaCl <sub>2</sub> · 2H <sub>2</sub> O 34%, ZnCl <sub>2</sub> 14%, H <sub>2</sub> O 52%	—	6.78	—	—	32.9	58.8
CaCl <sub>2</sub> · H <sub>2</sub> O 34%, ZnCl <sub>2</sub> 14%, H <sub>2</sub> O 52% 加 15g NH <sub>4</sub> Cl	—	6.65	—	—	45.5	79.7
CaCl <sub>2</sub> · H <sub>2</sub> O 31.6%, ZnCl <sub>2</sub> 23.8%, H <sub>2</sub> O 44.6% 加 15g NH <sub>4</sub> Cl	10.9	—	—	—	61.1	119
CaCl <sub>2</sub> · 2H <sub>2</sub> O 8%, ZnCl <sub>2</sub> 60%, H <sub>2</sub> O 32%	39	—	—	—	640	1720
CaCl <sub>2</sub> · 2H <sub>2</sub> O 8%, ZnCl <sub>2</sub> 60%, H <sub>2</sub> O 32% 加 15g NH <sub>4</sub> Cl	23	—	—	—	230	500

(3) 电解液的电导率与温度的关系：电解液的电导率随温度的升高而增大。各种温度下不同电解液的电阻率(即电导率的倒数)，见表 21—23。

电解液的电阻率在不同温度下是不同的，因此温度会影响电池的放电容量。温度越高，电解液的导电能力越强，蓄电池的有效电压将升高，输出的能量增大。温度每升高 1°C，容量增加千分之八。

容量与温度的关系如下：

$$Q_{25} = \frac{Q_t}{1 + 0.008(t - 25)}$$

式中： $Q_{25}$  —— 电解液平均温度为 25°C 时的容量(A·h)；

$t$  —— 放电过程中电解液的实际平均温度(°C)。

上式适用于温度在 -15~+35°C 之间的电解液，如果温度降低，容量将显著减少，但当温度超过 35°C 时，容量反而减少。

圆筒形干电池的使用温度一般在 -10°C~+40°C 范围。R20 电池在不同温度下的放电容量见表 21--24。

表 21—24 R20 电池在不同温度下放电性能

电性能	不同放电温度(以 5Ω 电阻放到终止电压 0.75V)			
	40±2°C (连放)	21±2°C (连放)	21±2°C (间放)	-10±2°C (连放)
开路电压(V)	1.62	1.63	1.61	1.59
工作电压(V)	1.54	1.53	1.51	1.43
短路电流(A)	5.8	5.88	5.17	3.7
放电时间(min)	841	541	1207	292

## 二、电解中物质析出量的计算

根据法拉第电解定律，电解中物质的析出量可按下式计算：

$$m = \frac{M}{F}Q$$

式中： $m$  —— 物质的析出质量(g)；

$M$  —— 析出物质的化学当量(原子量/原子价)；

$F$  —— 法拉第常数，为 96520C；

$M/F$  —— 电化学当量(g/C)；

$Q$  —— 电极上流过的电量(电荷)(C)。

**例 21—10** 已知铜的电化学当量为  $3.292 \times 10^{-4} \text{g/C}$ 。问在硫酸铜溶液中通过 12A 的电流 1min，电极上能析出多少铜？

**解** 电极上流过的电量为

$$Q = It = 12 \times 60 = 720 \text{ (C)}$$

铜的析出量为

$$m = \frac{M}{F}Q = 3.292 \times 10^{-4} \times 720 = 0.237 \text{ (g)}$$

**例 21—11** 已知电流密度为  $1.2 \text{mA/mm}^2$ ，银的密度为  $10.3 \text{g/cm}^3$ ，银的电化学当量为  $11.18 \times 10^{-4} \text{g/C}$ ，试求将半径为 2cm 的铜板两面均镀上  $8 \mu\text{m}$  厚的银，需要多长时间？

**解** 按题意，铜板半径  $r = 2 \text{cm}$ ，镀银厚度  $b = 8 \times 10^{-4} \text{cm}$ ，银的密度  $\rho = 10.3 \text{g/cm}^3$ ，

故银的析出量为

$$m = \pi r^2 b \rho = \pi \times 2^2 \times (8 \times 10^{-4}) \times 10.3 = 0.1035 \text{ (g)}$$

电流为

$$I = js = (1.2 \times 10^{-3}) \times \pi \times (2 \times 10)^2 = 1.5 \text{ (A)}$$

所需时间为

$$t = \frac{Q}{I} = \frac{m}{\frac{M}{F}I} = \frac{0.1035}{11.18 \times 10^{-4} \times 1.5} = 61.7 \text{ (S)}$$

### 三、直流母线限流电阻和逆止阀的计算

合闸母线和控制母线之间装有逆止阀和限流电阻，图 21—7 为变电站硅整流接线示意图

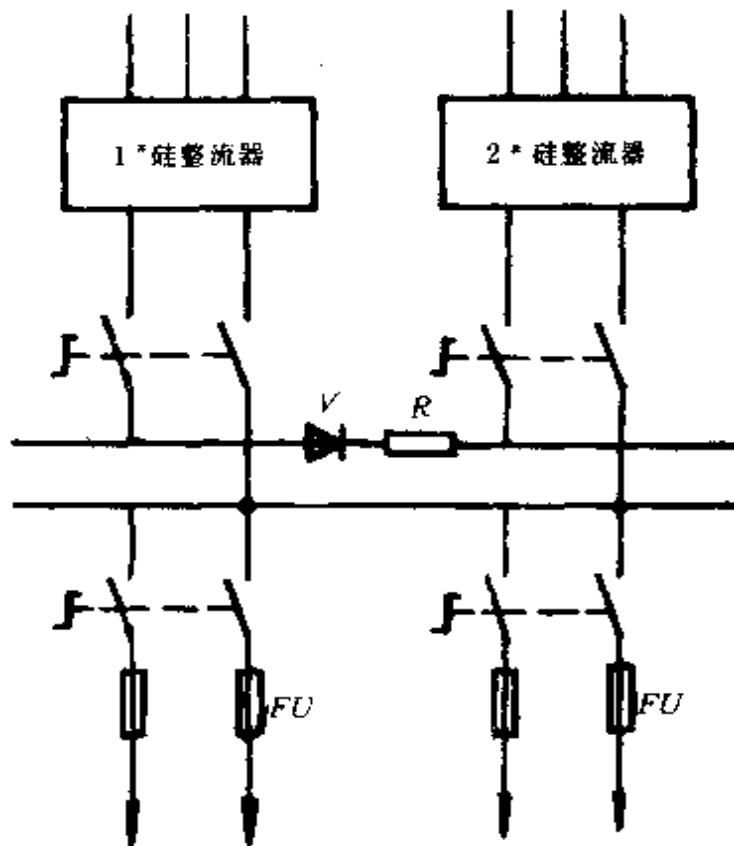


图 21-7 变电站硅整流接线示意图

### 1. 逆止阀的选择

逆止阀的选择应使通过它的最大电流不大于额定值的一倍,一般应不小于 20A。硅二极管的选择由下列公式确定:

$$I_F \geq \frac{U_e}{2R}$$

$$U_{RM} \geq 1.2U_{max}$$

式中:  $I_F$  —— 硅二极管额定正向平均电流(A);

$U_{RM}$  —— 硅二极管额定反向峰值电压(V);

$U_{max}$  —— 硅二极管可能承受的最大工作电压峰值(V);

$U_e$  —— 母线额定电压(V);

$R$  —— 限流电阻( $\Omega$ )。

2. 限流电阻的选择 最大工作电流通过限流电阻时,电阻上的压降不应大于  $0.1U_e$ ,可按下列公式选择:

$$\text{电阻 } R = 0.1U_e / I_{g\max}$$

$$\text{功率 } P \geq I_{g\max}^2 R$$

式中： $I_{g\max}$ ——最大正常工作电流(A)。

## 第四节 安全用电知识及计算

### 一、安全用电的基本知识

#### 1. 基本资料

(1) 电流对人体的作用：

① 工频电流对人体的作用，见表 21—25。

表 21—25 工频电流对人体的作用

电流(mA)	通电时间	人 体 生 理 反 应
0~0.5	连续通电	没有感觉
0.5~5	连续通电	开始有感觉,手指手腕等处有痛感,没有痉挛,可以摆脱带电体
5~30	数分钟以内	痉挛,不能摆脱带电体,呼吸困难,血压升高,是可忍受的极限
30~50	数秒到数分	心脏跳动不规则,昏迷,血压升高,强烈痉挛,时间过长即引起心室颤动
50~数百	低于心脏搏动周期	受强烈冲击,但未发生心室颤动
	超过心脏搏动周期	昏迷,心室颤动,接触部位留有电流通过的痕迹
超过数百	低于心脏搏动周期	在心脏搏动周期特定的相位触电时,发生心室颤动,昏迷,接触部位留有电流通过的痕迹
	超过心脏搏动周期	心脏停止跳动,昏迷,可能致命的电灼伤

②通电时间长短对人体危害性：通电时间越长，引起心室颤动的可能性越大，致命危险越大。根据统计分析表明，当发生心室颤动的概率为 0.5% 时，引起心室颤动的工频电流与通电时间的关系可由下式表达：

$$I = \frac{116 \sim 185}{\sqrt{t}}$$

式中： $I$ ——工频电流(mA)；

$t$ ——通电时间(s)。

上式的允许时间范围为 0.01~5s。该式也可用下式表达：

$$t \geq 1s \text{ 时, } I = 50mA$$

$$t < 1s \text{ 时, } I = 50/t \text{ mA}$$

③直流电流对人体的作用，见表 21—26 和表 21—27。

表 21—26 直流电流对人体的作用(一)

感 觉 情 况	被试者百分数		
	5%	50%	95%
手表面及指尖端稍有连续刺感	6	7	8
手表面发热，有剧烈连续针刺感，手关节有轻度压迫感	10	12	15
手关节及手表面有针刺似的强烈压迫感，上肢有连续针刺感，手关节有压痛，手有刺痛，强烈的灼热感	18	21	25
手关节有强度压痛，直到肩部有连续针刺感	25	27	30
手关节有剧烈压痛，手上似针刺般疼痛	30	32	35
手关节有剧烈压痛，手上似针刺般疼痛	30	35	40

表 21-27 直流电流对人体的作用(二)

电 流 姓 别	最小感知电流 (mA)	平均摆脱电流 (mA)	可能引起心室颤动电流 (mA)
男	5.2	75	{ 1300(通电时间 0.3s) { 500(通电时间 3s)
女	3.5	51	

①高频电流对人体的作用:电流的频率愈高,遭受电击的危险性愈小,频率为 40~60Hz 的交流电对人体最危险;200Hz 以上对人体危害较轻;1kHz 以上对人体伤害程度明显减轻,但高压高频电流也有电击致命的危险。

10kHz 高频交流电对人体的作用见表 21-28。

表 21-28 10kHz 高频交流电对人体的作用

电 流 姓 别	最小感知电流 (mA)	平均摆脱电流 (mA)	可能引起心室颤动电流 (mA)
男	12	75	{ 1100(通电时间 0.03s) { 500(通电时间 3s)
女	8	50	

(2)人体电阻:人体电阻随条件不同变化范围很大,皮肤表面 0.05~0.2mm 厚的角质层的电阻高达  $10 \times 10^3 \sim 10 \times 10^4 \Omega$ ;当角质失去时,人体的电阻可降低到 1800~1000 $\Omega$ ;皮肤电阻受外界因素影响很大(见表 21-29),但体内电阻基本不变,约为 500 $\Omega$ 。

表 21--29 不同条件下的人体电阻

人体 电阻 (Ω)	皮肤 状况	接触电压(V)			
		皮肤干燥①	皮肤潮湿②	皮肤湿润③	皮肤浸入 水中④
10		7000	3500	1200	600
25		5000	2500	1000	500
50		4000	2000	875	440
100		3000	1500	770	375
250		1500	1000	650	325

注:

- ①相当干燥场所的皮肤,电流途径为单手至双足。
- ②相当潮湿场所的皮肤,电流途径为单手至双足。
- ③相当有水蒸汽等特别潮湿场所的皮肤,电流途径为双手至双足。
- ④相当游泳池或浴池中的情况,基本上为体内电阻。

## 2. 安全电压值

(1)为防止触电事故而采用的有特定电源的电压系列。这个电压系列的上限在任何情况下,两导体间或任一导体与地之间均不得超过交流(50~500Hz)有效值 50V。

①除采用独立电源外,安全电压供电电源的输入电路与输出电路必须实行电路上的隔离。

②工作在安全电压下的电路,必须与其它电气系统和任何无关的可导电部分实行电气上的隔离。

(2)上述标准不宜用于水下等特殊场所,也不适用于有带电部分能伸入人体内的医疗设备。

(3)安全电压额定值的等级为 42、36、24、12、6V。



(4)当电气设备采用超过 24V 的安全电压时,必须采取防直接接触带电体的保护措施。

### 3. 电磁场对人体的作用

射频电磁场强度超过一定限度,会对人体的健康产生不良影响。

(1)射频电磁场的划分:见表 21—30。

表 21—30 射频电磁场的频段和波段

频段	频率(MHz)	波长(m)	波段
高频	0.1 以下	3000 以上	长波
	0.1~1.5	3000~200	中波
	1.5~6	200~50	中短波
超高频	6~30	50~10	短波
	30~300	10~1	超短波
特高频 (微波)	300~3000	1~0.1	分米波
	3000~30000	0.1~0.01	厘米波
	30000 以上	0.01 以下	毫米波

产生高频波段的电磁辐射源有高频淬火、高频熔炼、高频焊接、高频切割等高频设备。这些设备的主要辐射元件是感应加热器、高频变压器、振荡器及输电线等。这些设备产生的电磁辐射,其电场强度在作业区可达数 V~数十 V/m,而磁场强度可达数 A~数十 A/m。然而磁场强度在空间衰减很快,多数情况在 3m 以外就能衰减到约 1V/m、1A/m 以下。

(2)电磁辐射对人体的危害:研究表明,对人体机体最为有害的临界波长位于 3/15m 的波段中。

工作人员在电场强度不超过每米数十V的工作场所或即使在 3~15m 波段内工作 2h 以上,均无任何明显不适反应;如果电场强度为 100~150V/m,在上述波长和同样的逗留时间,则会引起不显著的发烧、无力、头痛等反应,但很快会消除;如果电场强度为 200~300V/m,即使逗留时间较短(超过 1h),即会引起类似的反应;若电场强度超过 4000V/m,逗留时间仅 10~20min 即会引起上述反应,并使体温迅速上升。

(3)电磁场安全标准参考值:见表 21—31。

表 21—31 电磁场安全标准参考值

电磁场频率 (MHz)	电场强度 (V/m)	磁场强度 (A/m)	功率密度 ( $\mu\text{W}/\text{cm}^2$ )
0.1~30 30~300	不大于 20 不大于 5	不大于 5 —	— —
10 以上 300 以上	— —	— —	不超过 10 不超过 0.01~1

## 二、静电安全知识及计算

### 1. 物质的带电性

物质的带电性可由其体电阻率来评价,同时与漏电阻有关,见表 21--32 和表 21--33。

表 21—32 物体的电阻率和带电性

不导电体	体电阻率 ( $\Omega \cdot m$ )	$10^8$	$10^{10}$	$10^{12}$	$10^{14}$	
	导电率 (S/m)	$10^{-8}$	$10^{-10}$	$10^{-12}$	$10^{-14}$	
	表面电阻率 ( $\Omega$ )	$10^{10}$	$10^{12}$	$10^{14}$	$10^{16}$	
导体	漏电阻 ( $\Omega$ )	$10^6$	$10^8$	$10^{10}$	$10^{10}$	
物体带电性		非常小	小	大	很大	非常大

表 21—33 绝缘物质的电阻率( $\Omega \cdot m$ )

名称	电阻率	名称	电阻率
云 母	$10^{13} \sim 10^{15}$	羊 毛	$10^9 \sim 10^{11}$
钠 玻 璃	$10^9 \sim 10^{15}$	丙 烯 纤 维	$10^{10} \sim 10^{12}$
硬 橡 胶	$2.7 \times 10^{14}$	木 棉	$10^9$
酚 醛 树 脂	$1.3 \times 10^{13}$	汽 油	$2.5 \times 10^{13}$
天 然 橡 胶	$2 \times 10^{15}$	苯	$4.2 \times 10^{12}$
聚 氯 乙 烯	$2.5 \times 10^{12}$	煤 油	$7.3 \times 10^{14}$
聚 乙 烯	$4.5 \times 10^{15}$	轻 油	$1.3 \times 10^{14}$
尿 素 树 脂	$1.5 \times 10^{13}$	航 空 汽 油	$2.1 \times 10^{14}$
聚 苯 乙 烯	$3.3 \times 10^{16}$	二 甲 苯	$2.4 \times 10^{12}$
木 材	$2.5 \times 10^{16}$	甲 苯	$1.1 \times 10^{12}$
尼 龙 布	$10^{11} \sim 10^{13}$	庚 烷	$4.9 \times 10^{13}$
纸	$10^5 \sim 10^{10}$	石 油 乙 醚	$8.4 \times 10^{14}$

## 2. 最小着火能

当静电放电能大于可燃性物质的最小着火能时,便可能成为火源。最小着火能因物质不同而异,对于气体和液体蒸汽约为0.01~1mJ,其中碳氢化合物等大多为0.2mJ左右。粉尘最小着火能约10~1000mJ,多数为10~100mJ。

对于可燃性物质,电晕放电的着火能力最弱,它有可能成为气体或蒸汽的着火源,而不能成为粉尘的着火源。火花放电、表面放电和雷状放电均可成为气体、蒸汽或粉尘的着火源。当然,要引起可燃物质着火,其浓度必须不低于爆炸限界浓度值,否则着火源的能量再大也不会着火。

## 3. 静电序列

不同材料接触—分离时产生的静电是不同的,有以下两个典型的静电序列:

(1)第一个序列:(+)玻璃—头发—尼龙—羊毛—人造纤维—绸—醋酸人造丝—人造棉混纺—纸浆和滤纸—黑橡胶—维纶—沙纶—聚酯纤维—电石—聚乙烯—可耐可纶—赛璐珞—玻璃纸—聚氯乙烯—聚四氟乙烯(-)

(2)第二个序列:(+)石棉—玻璃—云母—羊毛—猫皮—铅—镉—锌—铝—铬—铁—铜—镍—银—金—铂(-)

根据静电序列,可以选用适当的材料,以减少静电产生。选择序列中相近的材料作为相互摩擦的材料可以减少静电产生。

## 4. 绝缘体上静电电量与时间的关系

绝缘体上的静电通过自身消散,有如下关系:

$$Q = Q_0 e^{-\frac{t}{\tau}}$$

式中:Q——绝缘体上的电量(C);

$Q_0$ —— $t = 0$ 时绝缘体上的电量(C);

$t$ ——静电消散时间(s);

$\tau$ ——时间常数(s), $\tau = \epsilon\rho$ ;

$\epsilon$  为绝缘体介电常数(F/m),见表 21—34;

$\rho$  为绝缘体电阻率( $\Omega \cdot m$ )。

表 21—34 电介质的相对介电常数

名 称	相对介电常数	名 称	相对介电常数
空 气	1.000586	硼 硅 玻 璃	4.5
氢	1.000264	石 英 玻 璃	3.5~4.5
二 氧 化 碳	1.000985	块 滑 石	5.6~6.5
石 蜡	1.5~2.5	瓷	5~6
纸	1.2~2.6	水 晶	3.6
硅 油	2.5	云 母	5~9
变 压 器 油	2.2~2.4	聚 氯 乙 烯	5.8~6.4
干 木 材	2~3	聚 乙 烯	2.25~2.3
硬 橡 胶	3.0	水	75~81
酚 醛 塑 料	4~6	钛 酸 钡	2000~3000
赛 璐 珞	3.0	氧 化 钛 陶 瓷	60~100
钠 钙 玻 璃	6~8	有 机 玻 璃	3~3.6

电阻率为  $10^6 \Omega \cdot \text{cm}$  以下的材料,接地后静电容易通过自身消散而不会积累;电阻率为  $10^6 \sim 10^9 \Omega \cdot \text{cm}$  的材料,静电也不易积累;电阻率为  $10^9 \Omega \cdot \text{cm}$  以上的材料,静电易积累;电阻率为  $10^{11} \sim 10^{12} \Omega \cdot \text{cm}$  时,应采取静电防护措施。

带静电的物体与接地导体接触并静置一段时间,带电量会逐渐减少以至消失,必要的静置时间见表 21—35。

表 21—35 静置时间 (min)

带电物体的体电阻率 ( $\Omega \cdot \text{cm}$ )	带电物体的容积( $\text{m}^3$ )			
	<10	10~50	50~5000	>5000
< $10^8$	1	1	1	2
$10^8 \sim 10^{12}$	2	3	10	30
$10^{12} \sim 10^{14}$	4	5	60	120
> $10^{14}$	10	15	120	140

### 5. 人体静电电容

人体对地电容约为数十至数百 PF。站立在地面上的人体对地电容参见表 21—36。人体对地电容与鞋底厚薄的关系见表 21—37。

表 21—36 人体对地电容(pF)

地 面	水泥	红 橡 皮	木板	铁板
解放鞋	450	200	60	1000
棉胶鞋	1100	220	53	3500

表 21—37 人体电容与鞋底厚度的关系

鞋底厚度 (mm)	0.25	0.5	1.1	12.8	46	89	155
人体电容 (pF)	6800	2300	850	190	130	100	75

### 三、用万用表应急测量绝缘电阻的方法及计算

正确测定电气设备的绝缘电阻是保证安全用电的重要手段,电气设备的绝缘电阻应该用兆欧表测量,以保证其正确性。然而,在应急使用的场合,有时用万用表来判断电气设备的绝缘电阻。这时应该注意以下问题。

(1)用兆欧表测量时,其测量电压是直流高压,如 600V 兆欧表,能输出 600V 直流高压;而万用表则不能输出直流高压。由于万用表输出电压低,即使被测电器的绝缘耐压很低,也不能反映出来。

(2)由于万用表(如 500 型)是以 380V、50Hz 交流电作为测量电压而设计的,所以只有当被测电器是纯电阻性时,才与用兆欧表测得的值相一致(假定电器绝缘耐压良好)。

(3)若用万用表测量电动机等非电阻性电气设备,由于电感、电容的作用,其测量结果与用兆欧表测得的值相差甚远。且电气设备功率越大,绝缘电阻越高,误差也越大。

(4)不能用万用表直接测量电气设备的绝缘电阻只能作如下判断:用万用表直接测得的绝缘电阻良好,实际不一定好;当然测得值不合格,可以肯定该电器绝缘良好。

(5)用万用表测量绝缘电阻的正确方法(间接法)如图 21-8 所示。

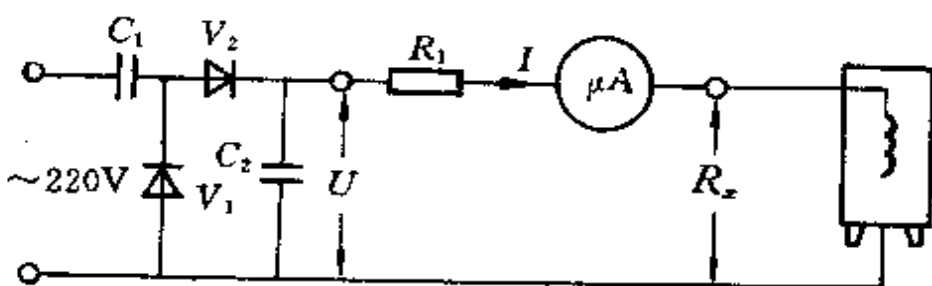


图 21-8 电压—电流测电器的绝缘电阻

即通过倍压整流电路在电容  $C_2$  上获得一个约 500~600V 的直流高压(对于 380V 及以下的低压电器是符合要求的)。图中,二极管  $V_1$ 、 $V_2$  的耐压要大于 700V,电容  $C_1$ 、 $C_2$  可用 0.2~0.47 $\mu$ F/630V,限流电阻  $R_1$  取 0.1~1M $\Omega$ 。

测量时,先断开与被测电器的连线,用万用表测出  $C_2$  上的电压  $U$ ,并记录下来。然后打在直流  $\mu$ A 档,接在如图位置,接通电源,记下电流  $I$ 。最后按下式计算被测绝缘电阻:

$$R_x = \frac{U}{I} - R_1$$

式中: $R_x$ ——被测电器的绝缘电阻(M $\Omega$ );

$U$ ——电容  $C_2$  两端的直流电压(V);



$I$  —— 通过万用表的直流电流( $\mu\text{A}$ )；

$R_1$  —— 限流电阻( $\text{M}\Omega$ )。

注意：测量时，万用表及倍压整流电路各元件要与工作台之间绝缘，操作时注意安全。

用此法测量的绝缘电阻，与兆欧表相比，误差不超过10%。

## 第五节 广播与电视等

### 一、有线广播喇叭的匹配

#### 1. 定阻抗输出型式的扩大机

定阻抗输出型式的扩大机，其喇叭接法有如下一些类型：

(1) 所接喇叭的功率与阻抗都相同，喇叭总功率与扩大机输出功率相同

**例 21-12** 有一台 30W 扩大机，输出阻抗为  $16\Omega$  和  $500\Omega$ ，欲使用两只 15W $8\Omega$  的喇叭，应如何接线？

**解** 喇叭总功率为  $2 \times 15 = 30(\text{W})$ ，与扩大机输出功率相同。若将两喇叭串联，其总阻抗为  $2 \times 8 = 16(\Omega)$ ，正好与扩大机输出  $16\Omega$  阻抗相同，因此接线图如图 21-9 所示。

**例 21-13** 有一台 50W 扩大机，输出阻抗为  $8\Omega$  和  $500\Omega$ ，欲使用四只 12.5W、 $8\Omega$  的喇叭，应如何接线？

**解** 喇叭总功率为  $4 \times 12.5 = 50(\text{W})$ ，与扩大机输出功率相同。若将四只喇叭按 2 只串联后再并联于扩大机  $8\Omega$  输出端，如图 21-10 所示。

这时喇叭总阻抗  $(8+8)/2 = 8(\Omega)$  正好与扩大机的输出阻抗相同。

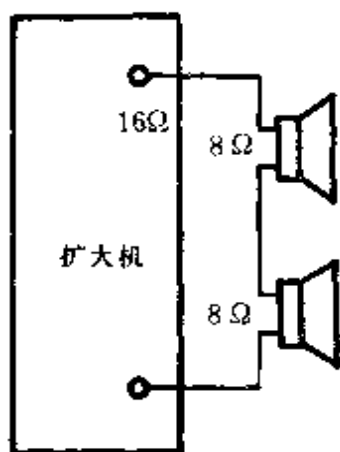


图 21—9 例 21—12 的喇叭接线

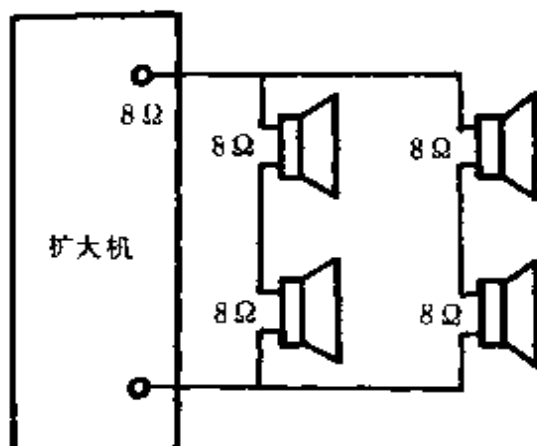


图 21—10 例 21—13 的喇叭接线

(2) 所接喇叭的功率与阻抗相同, 采用喇叭变压器, 且喇叭功率与扩大机输出功率相同。

所配用的喇叭变压器, 次级阻抗应与喇叭阻抗相同, 初级阻抗应与扩大机输出阻抗相同。

**例 21—14** 有一 100W 扩大机, 输出阻抗为 250Ω, 欲使用 4 只 25W 16Ω 喇叭, 应如何接线?

**解** 喇叭总功率为  $4 \times 25 = 100(\text{W})$ , 与扩大机输出功率相

同。采用 4 只初级为  $250\Omega$ ，次级为  $16\Omega$  的喇叭变压器，按图 21—11 接线。这时喇叭变压器串联后总阻抗为  $(250+250)/2=250(\Omega)$ ，与扩大机输出阻抗相同。

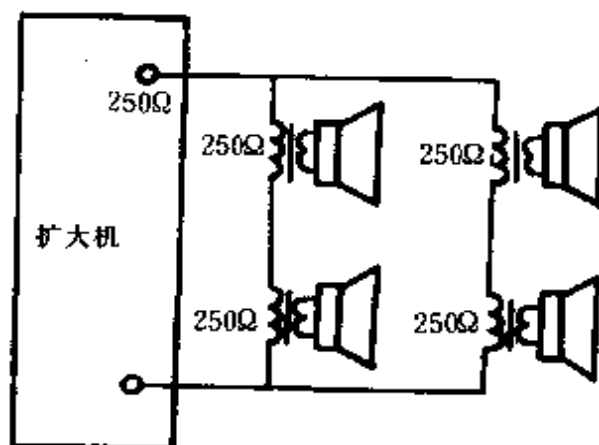


图 21—11 例 21—14 的喇叭接线

(3)所接喇叭的功率与阻抗各不相同，但喇叭总功率与扩大机输出功率相同。

这种场合，不但要考虑阻抗匹配，还要考虑功率分配问题。否则，喇叭的总功率虽然与扩大机的输出功率相同，但也会使某些喇叭因受功率太大而损坏，某些喇叭则受功率太小而声音太轻。正确接法应按下式进行：

$$\text{所接的输出端阻抗}(\Omega) = \frac{\text{喇叭的额定功率}(\text{W})}{\text{扩大机额定输出功率}(\text{W})} \times \text{喇叭阻抗}(\Omega)$$

**例 21—15** 有一台  $50\text{W}$  扩大机，输出阻抗为  $2\Omega$  和  $8\Omega$ ，欲使用 1 只  $25\text{W}$ 、 $16\Omega$  喇叭和  $12.5\text{W}$ 、 $8\Omega$  喇叭两只，应如何接线？

**解** 喇叭总功率为  $25+2\times 12.5=50(\text{W})$ ，与扩大机输出功率相同。将 2 只同型式的喇叭并联，其阻抗为  $8/2=4(\Omega)$ ，则

它应接到扩大机输出端的  $\frac{2 \times 12.5}{50} \times 4 = 2\Omega$  (上) 而 25W、16Ω 的喇叭应接在扩大机输出端的  $(25/50) \times 16 = 8(\Omega)$  上, 如图 21—12 所示。

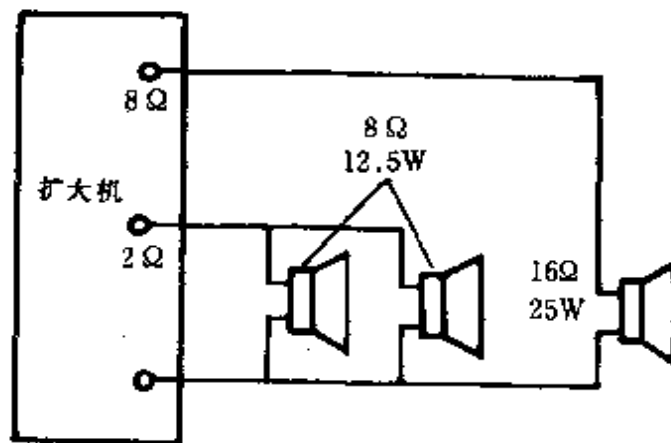


图 21—12 例 21—15 的喇叭接线

(4)喇叭总功率与扩大机输出功率相同,采用喇叭变压器,且喇叭的功率与阻抗各不相同。正确接法应按下式进行:

$$\text{喇叭变压器初级阻抗}(\Omega) = \frac{\text{扩大机输出功率}(W)}{\text{该组喇叭总额定功率}(W)} \times \text{扩大机输出阻抗}(\Omega)$$

**例 21—16** 有一台 50W 扩大机,输出阻抗为 500Ω,欲使用 1 只 20W、16Ω 喇叭,2 只 10W、16Ω 喇叭和 4 只 2.5W、3Ω 喇叭,应如何接线?

**解** 喇叭总功率为  $20 + 2 \times 10 + 4 \times 2.5 = 50(W)$ ,把同类型的喇叭组成三组,用三个喇叭变压器按图 21—13 接线。

各喇叭的初级阻抗:

$$\text{喇叭变压器 } T_1 \text{ 的初级阻抗} = \frac{50}{10 \times 2} \times 500 = 1250(\Omega)$$

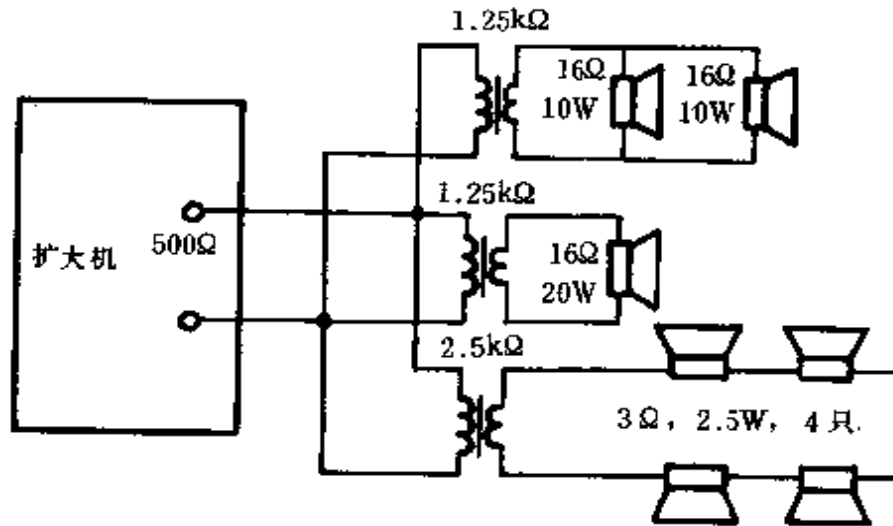


图 21—13 例 21—16 的喇叭接线

$$T_2 \text{ 的初级阻抗} = (50/20) \times 500 = 1250(\Omega)$$

$$T_3 \text{ 的初级阻抗} = \frac{50}{4 \times 2.5} \times 500 = 2500(\Omega)$$

各喇叭的次级阻抗:

$$T_1 \text{ 次级阻抗} = 16/2 = 8(\Omega)$$

$$T_2 \text{ 次级阻抗} = 16(\Omega)$$

$$T_3 \text{ 次级阻抗} = 4 \times 3 = 12(\Omega)$$

三个喇叭变压器初级并联后的总阻抗为:

$$\frac{1250 \times 1250 \times 2500}{1250 \times 1250 + 1250 \times 2500 + 1250 \times 2500} = 500(\Omega)$$

与扩大机的输出阻抗相同。

(5) 用电阻代替喇叭作负荷的办法。

当扩大机功率较大,而所接喇叭功率较小,不符合扩大机的输出阻抗要求时,可用假负荷(电阻)代替喇叭。这时应按下列公式计算假负荷:

假负荷所消耗的功率 = 扩大机额定输出功率 - 所用喇叭总功率

扩大机额定输出电压 =  $\sqrt{\text{额定输出功率} \times \text{输出阻抗}}$

假负荷的电阻值 =  $\frac{(\text{扩大机额定输出电压})^2}{\text{假负荷所消耗的功率}}$

**例 21—17** 有一台 100W 扩大机, 输出阻抗为 250Ω, 使用 6 只 10W 的喇叭, 试求应接多大的假负荷?

**解** 假负荷所消耗的功率 =  $100 - 6 \times 10 = 40(\text{W})$

扩大机输出电压 =  $\sqrt{100 \times 250}(\text{V})$

假负荷的电阻值 =  $(\sqrt{100 \times 250})^2 / 40 = 625(\Omega)$

为了避免电阻过热烧坏, 所用电阻的瓦数应比所消耗功率大一倍左右, 即取 80W 左右。

### 2. 定电压输出型式的扩大机

扩大机采用定电压输出型式, 大大方便了喇叭的接法。对于各种不同功率的喇叭, 只要电压相同就可以任意变动其位置和数量, 不必进行阻抗和功率匹配的计算。当然每个喇叭本身要配有变压器, 变压器初级应与线路电压相符, 次级应与喇叭音圈要求相符。

通常, 短距离广播网采用 15V、30V 的低电压; 长距离采用 80V、120V、240V 等电压; 更长线路采用 240V、360V、480V、960V 电压。定电压输出的广播网中, 用户输入端的标准电压采用 15V 和 30V。

对于 15V、30V 的低电压线路, 喇叭可直接接在线路上; 对于高电压线路, 喇叭应通过喇叭变压器(用户变压器)联接(即把

120V 或 240V 等电压降到喇叭所需的 15V 或 30V 电压值)。但由于目前生产的喇叭都是以所需功率和输入阻抗两个参数来表示的,所以需经过一定的计算。

**例 21—18**

有一 50W 扩大机,以 240V 作定电压输出,欲使用 0.5W、60Ω 的永磁式喇叭,试求能接多少喇叭? 喇叭变压器变比为多少?

**解**

$$\begin{aligned}
 (1) \text{喇叭所需电压} &= \sqrt{\text{喇叭功率} \times \text{喇叭阻抗}} \\
 &= \sqrt{0.5 \times 60} = 1.73(\text{V})
 \end{aligned}$$

(2)喇叭变压器应把 240V 降到 1.73V,此时变压器的变比为  $k=240/1.73=139$

考虑喇叭变压器效率  $\eta=95\%$ ,则变比应略低一些,此时  $k'=k\eta=139 \times 0.95=132$

(3)可接喇叭数为

$$N = \frac{\text{扩大机输出功率}}{\text{喇叭功率}} = \frac{50}{0.5} = 100(\text{只})$$

考虑到变压器损耗约占输出功率的 10%,则实际可接喇叭数为  $N'=N \times 0.9=100 \times 0.9=90(\text{只})$

**二、分频器设计**

**1. 分频频率的选择**

分频频率的选择,应小于高音喇叭的高频界限频率,而大于高音喇叭的共振频率,最好能小于低音喇叭的高频界限频率。

如低音喇叭选用 20cm(8in)纸盆喇叭,高音喇叭用 6.5cm(2.5in)的,则分频频率可取 2500Hz 左右,见表 21—38。

如低音喇叭选用 30cm(12in)的纸盆喇叭,中音喇叭用

13cm (5in) 的,高音喇叭用 6.5cm 或 5cm (2in) 的,则低、中音分频频率可取 1300Hz 左右,中、高音分频频率可取 5000Hz 左右。

纸盆喇叭高频界限频率和共振频率值见表 21—38。

表 21—38 纸盆喇叭频率特性

类别	标称口径 (cm)	均匀指向性的高频界限 频率(Hz)	扬声器共振频率的范围 (Hz)
高音喇叭	5	约为 12000	300~4000
	6.5	约为 9000	300~3000
	8	约为 7000	200~1500
中音喇叭	10	约为 5000	约为 160~220(纸边)
	13	约为 4000	约为 140~180(纸边)
低音喇叭	20	2000~2500	60~100(纸边)
	25	1500~2000	40~80(纸边)
	30	1000~1500	35~70(纸边)
	38	900~1100	25~50(纸边)

## 2. 分频器的设计

(1)单电容形(图 21—14):分频电容器电容量按下式计算:

$$C = \frac{1}{2\pi f_c R_0}$$

式中:C——分频电容器电容量(F);

$f_c$ ——分频频率(Hz);

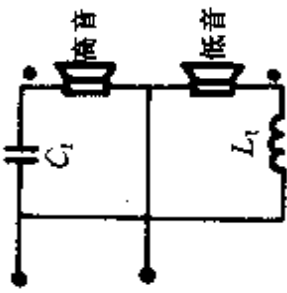
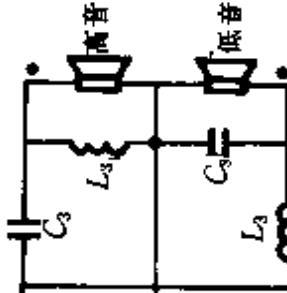
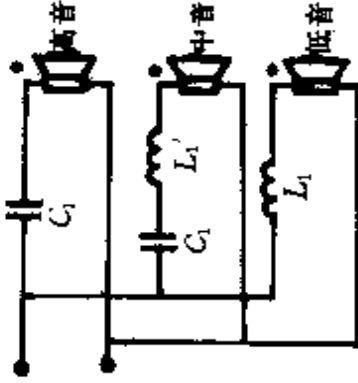
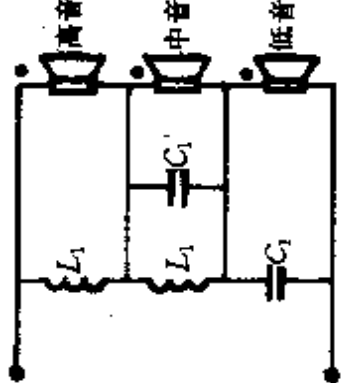
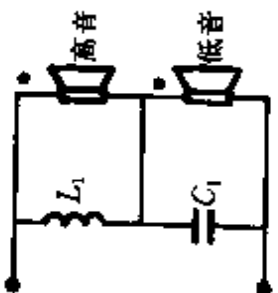
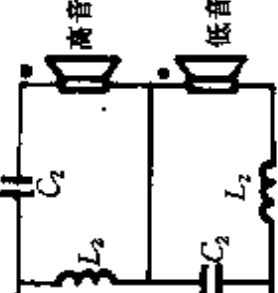
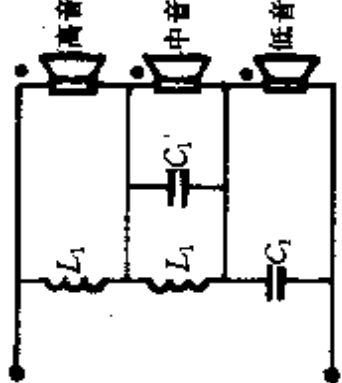
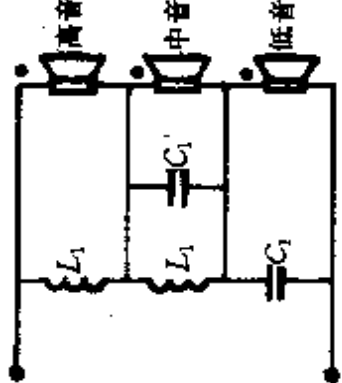
$R_0$ ——高音喇叭的标称阻抗( $\Omega$ )。

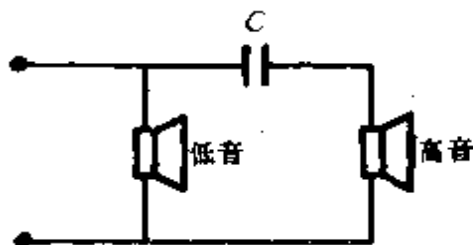
(2)常用分频器的形式(表 21—39)



常用分频器形式

表 21—39

		两 频 道		三 频 道	
衰 减 量	并 联 式	6dB/倍频程	12dB/倍频程	6dB/倍频程	6dB/倍频程
					
	串 联 式				



图·21—14 单电容式分频器

分频器串联式和并联式在使用上并无多大差别。图 21—14 中元件选择（电容单位：F；电感单位：H）：

$$C_1 = \frac{1}{2\pi f_c R_0}, \quad C_2 = \frac{\sqrt{2}}{2\pi f_c R_0}$$

$$C_3 = \frac{\sqrt{2}}{4\pi f_c R_0}, \quad C_1' = \frac{1}{2\pi f'_c R_0}$$

$$L_1 = \frac{R_0}{2\pi f_c}, \quad L_2 = \frac{\sqrt{2} R_0}{2\pi f_c}$$

$$L_3 = \frac{\sqrt{2} R_0}{2\pi f_c}, \quad L_1' = \frac{R_0}{2\pi f'_c}$$

式中： $f_c$ ——低音喇叭和高音喇叭的分频频率(Hz)，在三频道时为低音和中音的分频频率；

$f'_c$ ——三频道时的中音和高音的分频频率(Hz)；

$R_0$ ——低、中和高音三种喇叭的标称阻抗( $\Omega$ )。

图中喇叭的+、—号表示接线端极性；电容器采用金属化纸介电容器，如CJ型或CZJD型。

(3)喇叭极性的确定：将万用表打在 $50\mu\text{A}$ 档，万用表两表笔接于喇叭接线端，用手迅速轻按一上纸盆，若两只喇叭纸盆按动方向一致时，表针摆动的方向一致，则表示两喇叭接于同一表

笔的一端为同相。

### 三、电视天线最远接收距离和天线架空高度的计算

#### 1. 电视天线最远接收距离

$$L=4.12\left(\sqrt{H_1}-\sqrt{H_2}\right)$$

式中： $L$ ——天线最远接收距离(km)；

$H_1$ ——电视台发射天线高度(m)；

$H_2$ ——电视接收天线架设高度(m)。

例如，电视台发射天线高度为 120m，电视接收天线架设高度为 16m，则最远接收距离为

$$L=4.12\times\left(\sqrt{120}-\sqrt{16}\right)=61.6(\text{km})$$

由上式可见，天线愈高，收看距离愈远。但在有些情况下增加天线的高度，反而会降低收看效果。这是因为接收点收到的电波包括直射波和反射波，当两者在天线上的相位合适时，会使电场强度增大，信号增强；反之，当两者互相抵消时，则信号减弱。因此，电场强度与天线高度有密切关系，其中有一个天线的最佳高度。

#### 2. 天线最佳高度

$$H_0=\frac{\lambda D}{4H_x}\times 10^3$$

式中： $H$ ——天线最佳高度(m)；

$\lambda$ ——接收频道的中心频率波长(m)，见表 21—40；

$D$ ——发射与接收天线之间的直线距离(km)；

$H_x$ ——发射台与接收天线处的海拔高度之差(m)。

例如，某电视台发送四频道信号，中心波长约 3.75m。电视台海拔高度为 1800m，电视机所在地海拔为 400m，两者直线距

离为 15km, 则天线最佳架设高度为

$$H_0 = \frac{\lambda D}{4H_x} \times 10^3 = \frac{3.75 \times 15}{4 \times (1800 - 400)} \times 10^3 = 10(\text{m})$$

表 21—40 电视频道与波长表

频道	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
波长 (m)	5.66	4.92	4.35	3.73	3.39	1.75	1.67	1.60	1.53	1.47	1.42	1.37

#### 四、用少数电阻得到多种电阻值的方法

用几只电阻串联, 便可组合成很多个不同的阻值。阻值可由  $2^{n+1}$  决定, 其中  $n$  为正整数, 即  $n=1, 2, 3, \dots$ ; 共计有  $(2^0 + 2^1 + 2^2 + 2^3 + \dots + 2^{n-1})$  种不同阻值。

例如, 用 10 只电阻, 它们的阻值可以分别为: 1k、2k、4k、8k、16k、32k、64k、128k、256k 和 512k。我们称每个电阻为权电阻。共计有  $1+2+4+8+16+32+64+128+256+512=1023$  个电阻值, 它们是: 1k、2k、3k、4k、5k、6k、7k...1023k。

如果再增加一个电阻(阻值为  $2^{11-1}k=2^{10}k=1024k$ ), 则这 11 个电阻可组成  $1023+1024=2047$  个阻值。

要是计及电阻的并联组合, 则可得到更多的电阻值。

#### 五、能输出多种电压的变压器

用尽可能少的变压器次级绕组数, 得到尽可能多的输出电压, 可以采用类似于用少数电阻得到多种电阻值的方法。所不同的是变压器绕组有同名端和不同名端之分。

如果变压器次级绕组为  $n$  个, 而底数取 3, 则可通过连接绕组不同端子得到变压器的各种输出电压, 它们为 1、2、3、4...( $3^n$ )

$+3^1+3^2+\dots+3^{n-1})N$ , 共计  $(3^0+3^1+3^2+\dots+3^{n-1})$  种电压。变压器次级绕组的电压值应分别为  $3^0, 3^1, 3^2, 3^3, \dots, 3^{n-1}V$ 。其中  $n$  为正整数, 即  $n=1, 2, 3, \dots$ 。

**例 21-19** 要想得到  $1V, 2V, 3V, \dots, 40V$  共 40 种不同电压, 试问变压器应如何绕制和连接?

**解** 由  $(3^0+3^1+3^2+\dots+3^{n-1})=40$ , 得  $n=4$ , 即需 4 个次级绕组, 因此变压器次级绕组的电压值应分别为  $1V, 3V, 9V$  和  $27V$ 。

画出变压器绕组图如图 21-15 所示, 端头连接方法如表 21-41 所示。

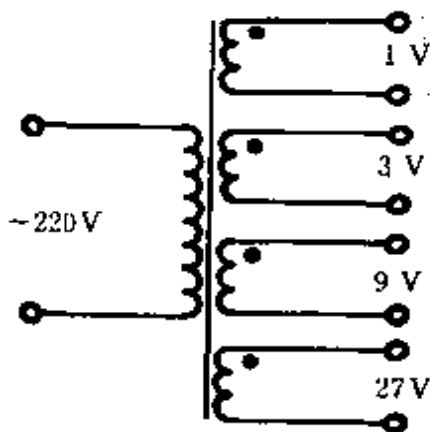


图 21-15 变压器绕组图

若要求输出更多种电压, 则次级绕组可绕成  $1V, 3V, 9V, 27V, 81V, 243V$  等电压, 则可得到  $1\sim 364V$ , 共 364 种电压。

## 六、列表法接转换开关

多联转换开关在使用中为获得被测量和控制量有顺序地切换, 需要正确连接转换开关的各触点。下面介绍的方法不但便于设计, 而且能减少接线错误。为了方便起见, 都以电压为被测量对象。

表 21—41 次级绕组端头连接方法

输出电压 (V)	1V 绕组	3V 绕组	9V 绕组	27V 绕组	输出电压 (V)	1V 绕组	3V 绕组	9V 绕组	27V 绕组
1	+	0	0	0	21	0	+	-	+
2	-	+	0	0	22	+	+	-	+
3	0	+	0	0	23	-	-	0	+
4	+	+	0	0	24	0	-	0	+
5	-	-	+	0	25	+	-	0	+
6	0	-	+	0	26	-	0	0	+
7	+	-	+	0	27	0	0	0	+
8	-	0	+	0	28	+	0	0	+
9	0	0	+	0	29	-	+	0	+
10	+	0	+	0	30	0	+	0	+
11	-	+	+	0	31	+	+	0	+
12	0	+	+	0	32	-	-	+	+
13	+	+	+	0	33	0	-	+	+
14	-	+	-	+	34	+	-	+	+
15	0	-	-	+	35	-	0	+	+
16	+	-	-	+	36	0	0	+	+
17	-	0	-	+	37	+	0	+	+
18	0	0	-	+	38	-	+	+	+
19	+	0	-	+	39	0	+	+	+
20	-	+	-	+	40	+	+	+	+

注：“+”表示同相串联，“-”反相串联，“0”不使用的绕组。

例 21—20 转换开关如图 21—16 所示，试画出测量交流电压  $U_{AB}$ 、 $U_{CB}$ 、 $U_{CA}$  的连线图。

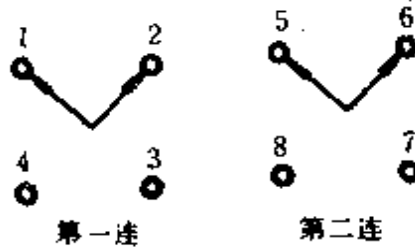


图 21—16 2×4 转换开关

**解** 第一步：列表(见表 21—42)，通路记 1、断路记 0。第二步：在表上画出被测量的各引线，其中 X、Y 为接电压表的两个端子。第三步：按表 21—42 要求画出连线图(见图 21—17)，其测量顺序为： $U_{AB}$ — $U_{CB}$ — $U_{CA}$ 。

表 21—42

通 断 触点号	A X C				Y B				电压
	1	2	3	4	5	6	7	8	
开关转动顺序									
1	1	1	0	0	1	1	0	0	$\rightarrow U_{AB}$
2	0	1	1	0	0	1	1	0	$\rightarrow U_{CB}$
3	0	0	1	1	0	0	1	1	$\rightarrow U_{CA}$

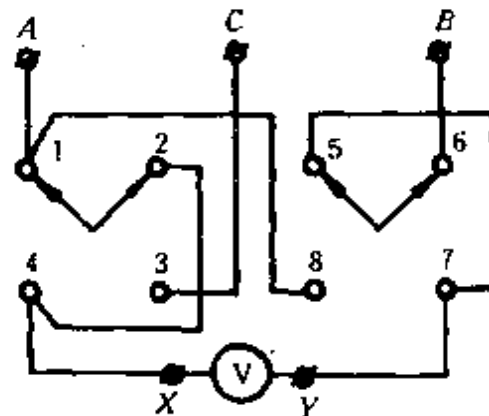


图 21—17 按表 21—42 的连线图

如按表21—42画法,则连线图如图21—18所示,其测量顺序为: $U_{AB}-U_{AC}-U_{BC}$ 。

如果将出线头  $A, B, C$  改为  $A, C, B$  或  $B, A, C$  或  $B, C, A$  或  $C, A, B$  或  $C, B, A$ ,则可得到各种不同的测量顺序。

表21—43

通断	触点号	X A				B Y C				电压
		1	2	3	4	5	6	7	8	
1		1	1	0	0	1	1	0	0	$\rightarrow U_{AB}$
2		0	1	1	0	0	1	1	0	$\rightarrow U_{AC}$
3		0	0	1	1	0	0	1	1	$\rightarrow U_{BC}$

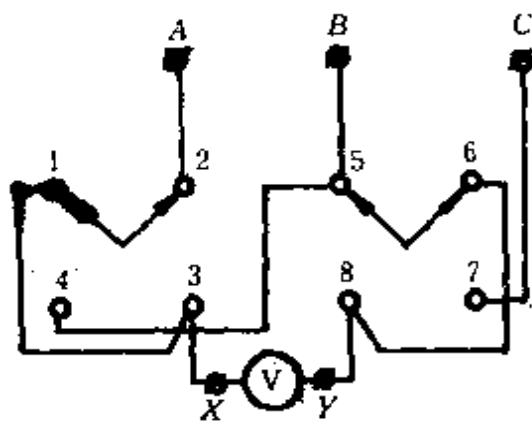


图21—18 按表21—43的连线图

**例21—21** 转换开关如图21—19,被测量为四相交流电压,试画出测量  $U_{AB}, U_{CB}, U_{CD}, U_{AD}$  的连线图。

**解** 按例21—20方法,先列表21—44,然后再画出相应的连线图如图21--20所示。

**例21—22** 转换开关如图21—21,被测量为直流电压,且电



位  $\varphi_A > \varphi_B > \varphi_C > \varphi_D$ , 试画出测量  $U_{AB}$ 、 $U_{BC}$ 、 $U_{CD}$  的连线图。

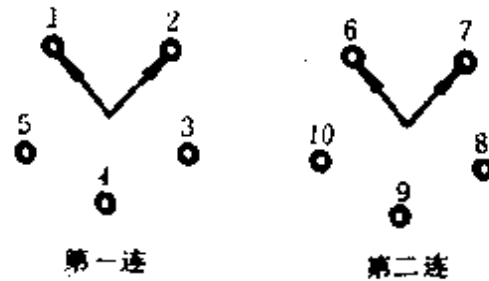


图21-19 2×6转换开关

表21-44

A	X	C			Y	B	D			电压
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
1	1	0	0	0	1	1	0	0	0	→ $U_{AB}$
0	1	1	0	0	0	1	1	0	0	→ $U_{CB}$
0	0	1	1	0	0	0	1	1	0	→ $U_{CD}$
0	0	0	1	1	0	0	0	1	1	→ $U_{AD}$

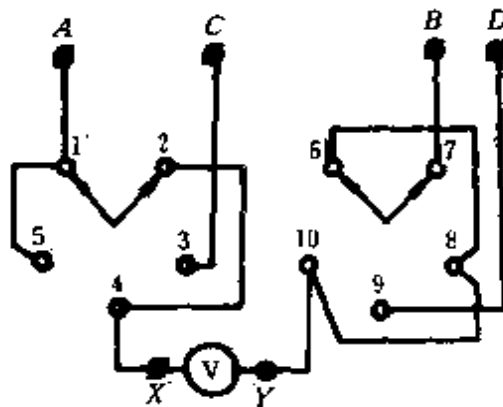


图21-20 按表21-44的连线图

解 方法同前。先列表21-45, 然后得连线图如图21-22所



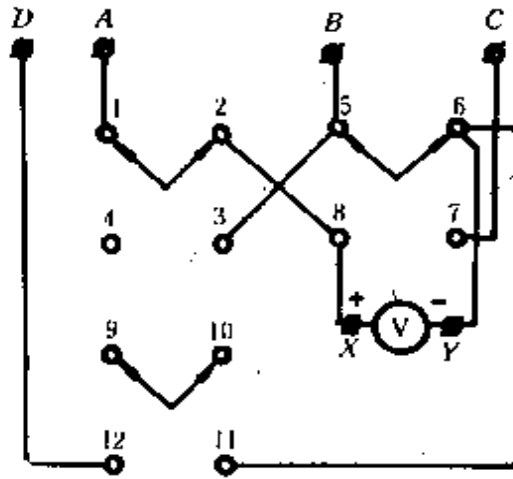


图21—22 按表21—45的连线图

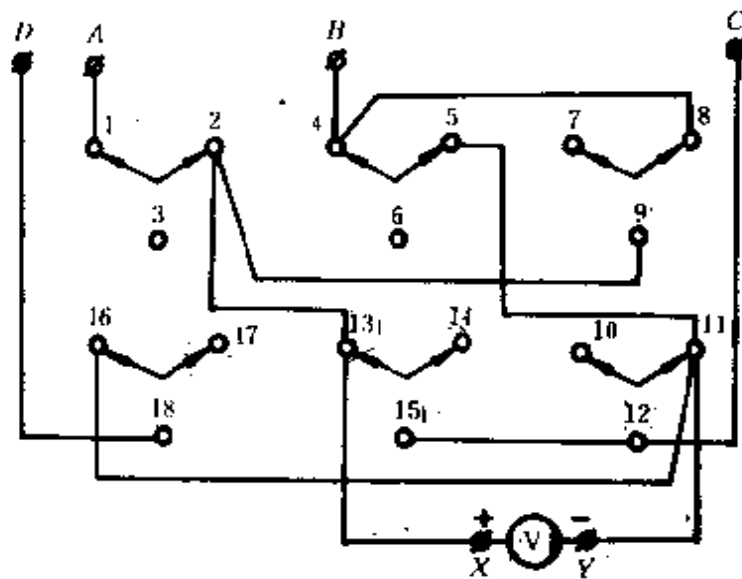


图21—23 6×3转换开关及按表21—46的连线图

### 七、空调器容量的计算

空调器容量选择过大,会造成电能和资金的浪费;选择过小,又达不到预定空气调节的目的。空调器正确的选择,应根据房间大小、场地情况选择相匹配的空调容量。

空调器正确使用,应把室内温度控制在下述范围(特殊空调设备除外):

制冷运行:20~30°C

制热运行:16~23°C

当房间容积在1500m<sup>3</sup>以下、净高不大于6m,隔热条件较好的房间,空调器的容量可按下式估算:

$$Q=k(qV+nX+\mu Q_s)$$

式中:Q——所需空调容量(KJ/h);

k——空调容量的裕量系数,短期使用  $k=1$ ,常年连续使用,  $k=1.05\sim 1.10$ ;

q——被空调房间每立方米空间的需冷量,  $q=105\sim 143\text{kJ/h}$ ,如果房间内有照明等其它发热设备,则应一并考虑进去;

V——房间空间总容积(m<sup>3</sup>);

n——房内总人数(个);

X——人体排热量,单人静坐时,  $X=432\text{kJ/h}$ ;做运动后,  $X=1591\text{kJ/h}$ ;

$\mu$ ——房内设备同时使用率和利用率之积,  $\mu=0\sim 0.6$ ;

$Q_s$ ——房内设备总发热量,  $1\text{kW}=3600\text{kJ/h}$ 。

**例21—23** 某舞厅营业面积为180m<sup>2</sup>,净高4m,房间保温条件良好,每场约有60人参加,场内设备容量为2.2kW,每天营业8h,常年连续运行。要求室温在23~28°C。

**解** 取  $\mu=0.5$ ,  $k=1.05$ ,  $q=126\text{kJ/h}$ (取中间值),考虑到每场参加跳舞的人数为40人,则由公式估算出所需空调容量为

$$\begin{aligned} Q &= k[qV + (n_1X_1 + n_2X_2) + \mu Q_s] \\ &= 1.05 \times [126 \times 180 \times 4 + (20 \times 432 + 40 \times 1591) + 0.5 \\ &\quad \times (2.2 \times 3600)] = 175308(\text{kJ/h}) \end{aligned}$$

$$=175.3(\text{MJ/h})$$

由此可选取能效系数为2.58,单台制冷量为60.7MJ/h的分体直吹柜式空调机3台,总供冷量为182.1MJ/h。

### 八、负荷曲线的绘制

表示电力负荷随时间变化情况的图形称做负荷曲线。负荷曲线分有功负荷曲线和无功负荷曲线两种。它们又可分为日负荷曲线、年负荷曲线等。日负荷曲线表示一天24h内负荷变化的情况,而年负荷曲线表示一年中的负荷变化情况。

#### 1. 有功日负荷和年负荷曲线的绘制

(1)有功日负荷曲线的绘制:可根据变电所的有功功率表,用测量方法绘制。

在一定的时间间隔内(如每隔0.5h)将仪表的读数记录下来,以1h内所记录的平均值绘制在图上,图的横座标表示对应的时间,纵座标表示有功负荷的千瓦数。为了计算简单,通常画成等效阶梯形曲线,如图21—24所示。负荷曲线包围的面积代表一天24h内所消费有功电能的千瓦时数

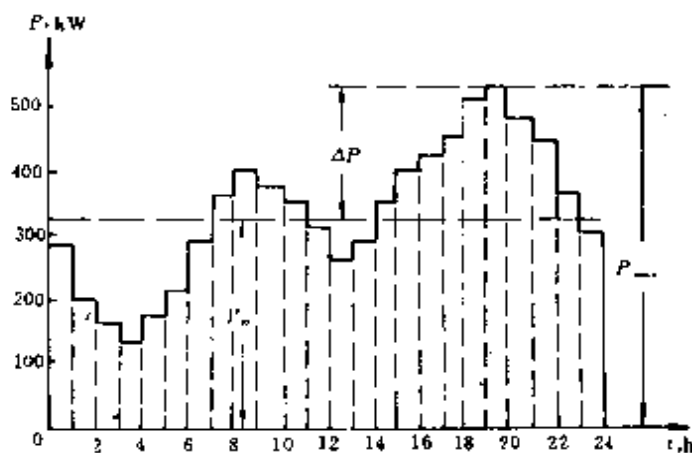


图21—24 日有功负荷曲线

有功负荷率

$$\alpha = P_{pj} / P_{\max}, \quad P_{pj} = \alpha P_{\max}$$

式中： $P_{pj}$ ——平均有功负荷(kW)；

$P_{max}$ ——最大有功负荷(kW)，指最大负荷并不是某一时刻的尖峰值，而是0.5h平均负荷的最大值。

有功负荷率 $\alpha$ 为反映用户有功负荷变化规律的一个参数。其值高，说明负荷变动小；其值低，说明负荷变动大。一般工厂企业的有功负荷率年平均值为 $\alpha_n=0.7\sim 0.75$ 。

(2)有功年负荷曲线的绘制：有两种年负荷曲线：表示一年中每天最大负荷变化情况的，称为日最大负荷全年时间变动曲线，或称运行年负荷曲线。可根据典型日负荷曲线间接制成。另一种称为电力负荷全年时间持续曲线，或称全年时间负荷曲线。它是不分日月界限，而以实际使用时间为横座标，以有功负荷的大小为纵座标依次排列而制成的。它不是测得的读数逐点逐日依次描绘，而是近似地根据一年中具有代表性的夏季和冬季日负荷曲线，按冬季为213天，夏季为152天，全年的时间为8760h来绘制。年有功负荷曲线的绘制如图21—25所示。

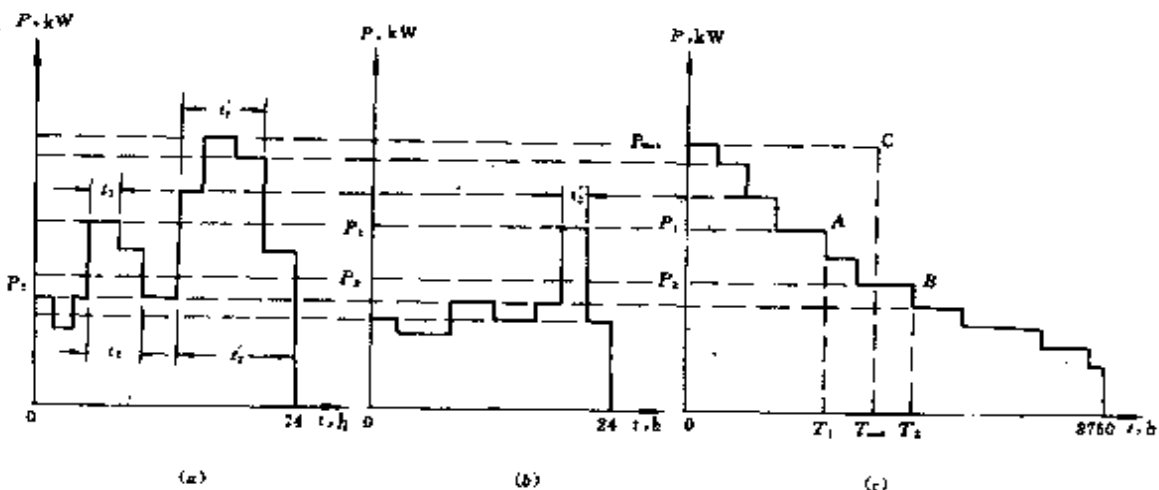


图21—25 年有功负荷曲线的绘制

(a)冬季代表日负荷曲线 (b)夏季代表日负荷曲线 (c)全年时间负荷曲线

具体绘制方法如下：从典型冬季和夏季日有功负荷曲线的功率最大值开始，依有功功率递减的次序进行。如功率  $P_1$  所占全年时间是根据冬季日有功负荷曲线为  $t_1+t'_1$ ，夏季为  $t''_2$ ，故得  $T_1=(t_1+t'_1) \times 213+t''_2 \times 152$ 。将  $T_1$  值按一定比例标于横座标  $T_1$  点， $T_1$  与  $P_1$  交于直角座标上  $A$  点，同样  $P_2$  占全年时间为  $T_2=(t_2+t'_2) \times 213+t''_2 \times 152$ ，可得座标上  $B$  点，依此绘出年有功负荷曲线。

全年时间有功负荷曲线所包围的面积等于一年内所消耗的有功电量  $A_p$  (kWh)。

如在横座标轴上取时间  $T_{\max \cdot p}$ ，作矩形  $P_{\max}—C—T_{\max \cdot p}—0—P_{\max}$ ，使面积  $P_{\max}T_{\max \cdot p}$  等于  $A_p$ ，则

$$P_{\max} = A_p / T_{\max \cdot p}$$

式中： $P_{\max}$ ——年最大有功负荷(kW)；

$T_{\max \cdot p}$ ——最大有功负荷年利用小时数，各类工厂计算最大年利用小时数的参考值，见表2—38。

## 2. 无功日负荷曲线和年负荷曲线的绘制

具体方法同有功负荷曲线的绘制，只不过将纵座标改为无功功率  $Q$  (kVar) 而已，相应的参数为

无功负荷率

$$\beta = Q_{pj} / Q_{\max}, Q_{pj} = \beta Q_{\max}$$

式中： $Q_{pj}$ ——平均无功负荷(kVar)；

$Q_{\max}$ ——最大无功负荷(kVar)。

当没有无功功率表时，也可用测得的有功功率和功率因数，用以下公式换算出无功功率：

$$Q = \frac{P \sqrt{1 - \cos^2 \varphi}}{\cos \varphi}$$

式中： $Q$ ——1h内平均无功功率(kVar)；

$P$ ——1h内平均有功功率(kW)；

$\cos\varphi$ ——1h内平均功率因数。

一般工厂企业的无功负荷率年平均值为  $\beta_n = 0.76 \sim 0.82$ 。

年最大无功负荷为

$$Q_{\max} = A_Q / T_{\max \cdot Q}$$

式中： $Q_{\max}$ ——年最大无功负荷(kVar)；

$A_Q$ ——年消耗的无功电量(kVarh)；

$T_{\max \cdot Q}$ ——最大无功负荷年利用小时数，参考值见表2-38。

由年无功负荷曲线可以看出无功负荷的最大值  $Q_{\max}$  和最小值  $Q_{\min}$ ，则变电所装置的固定补偿电容容量  $Q_g$  可按下式计算：

$$Q_g = Q_{\min} - \sum Q_f - \sum Q_c$$

式中： $\sum Q_f$ ——车间分组补偿电容容量之和(kVar)；

$\sum Q_c$ ——随机补偿电容容量之和(kVar)。

自动补偿电容容量  $Q_{zd}$  为

$$Q_{zd} = Q_{\max} - Q_{\min}$$

### 九、工业用户电费的计算

#### 1. 普通工业电价

凡受电变压器容量不足320kVA或低压受电用户，按单一制电价计算，即

$$Y = y_1 S + K Y_2$$

#### 2. 大工业用价

凡受电变压器容量在320kVA及以上的用户，按两部制电价计算，即

$$Y = y_1 S + Y'_2 + K(y_1 S + Y'_2)$$



式中: $Y$ ——用户电费(元);

$y_1$ ——基本电费单价,如浙江省为4元/kVA·月;

$S$ ——受电变压器容量(kVA);

$Y_2$ ——电度电费,如浙江省为0.083元/kWh;

$Y'_2$ ——电度电费,如浙江省为0.058元/kWh;

$K$ ——功率因数调整系数。

(3)关于一次性供配电贴费:这是近年来电力部门对新建或增容的用户所收的另一种费用,即不仅要按变压器总装设容量收计基本电费,而且还要一次性地收取供配电贴费,对10kV及以上用户也接受电变压器容量每kVA计收。贴费标准为130元/kVA。

# 附录 I

## 380/220V 三相架空线路每米阻抗值 (mΩ/m)

导线标称截面 mm <sup>2</sup>	电 阻		导线排列式及中心距离(mm)		正、负序电抗 $X_{11}, X_{22}, X_{01}$ ( $D_j = 824$ )	零序电抗 $X_{0x}, X_{0l}$ ( $D_0 = 824$ )
	$R_1, R_2, R_{0x}, R, R_{0l}$		导线排列式及中心距离(mm)			
	$t = 70^\circ\text{C}$ 时 裸导线	$t = 65^\circ\text{C}$ 时 绝缘导线	铝	铜		
10	2.23	3.66	0.19	铜	0.38	0.40
16	2.35	2.29	1.37	铝	0.37	0.38
25	1.50	1.48	0.88	铜	0.35	0.37
35	1.07	1.06	0.63	铝	0.34	0.36
50	0.75	0.75	0.44	铜	0.33	0.35
70	0.54	1.53	0.32	铝	0.32	0.34
95	0.40	0.39	0.23	铜	0.31	0.32
120	0.32	0.31	0.19	铝	0.30	0.32
150	0.25	0.25	0.15	铜	0.29	0.31
185	0.20	0.20	0.12	铝	0.28	0.30

注:零序电抗是指相线或零线的零序电抗。

# 附录 2

## 380/220V 三相线路绝缘子布线每米阻抗值 (mΩ/m)

导线标称截面 (mm <sup>2</sup> )	电 阻 $R_1, R_2, R_{0z}, R, R_{0f}$		当相间中心距离 $D$ 为下列诸值 (mm) 时, 相线正、负序电抗值 $X_1, X_2, X$			当零线与邻近相线中心间距离 $D_n$ 为下列诸值 (mm) 时, 相线或零线的零序电抗值 $X_{0a}, X_{0f}$								
	$t=70^\circ\text{C}$ 时 裸导线	$t=65^\circ\text{C}$ 时 绝缘导线	电 抗 值			$D_n = D$								
			70	100	150	$D=70$	$D=100$	$D=150$	1500	2500	3500	6000		
1	铝	铜	铝	铜	0.333	0.355	0.380	0.356	0.378	0.403	0.510	0.543	0.564	0.597
1.5			24.387	14.475	0.321	0.368	0.368	0.344	0.366	0.391	0.498	0.530	0.552	0.585
2.5			14.632	8.685	0.305	0.353	0.353	0.331	0.350	0.376	0.483	0.515	0.536	0.570
4			9.145	5.428	0.290	0.338	0.338	0.313	0.335	0.361	0.468	0.500	0.521	0.555
6			6.097	3.619	0.277	0.325	0.325	0.300	0.323	0.348	0.455	0.487	0.508	0.542
10		2.230	3.658	2.193	0.258	0.306	0.306	0.281	0.303	0.329	0.436	0.468	0.489	0.523
16	2.348	1.394	2.286	1.371	0.242	0.290	0.290	0.265	0.288	0.313	0.420	0.452	0.473	0.507

(续表)

导线标称截面 (mm <sup>2</sup> )	电 阻		当相间中心距离 $D$ 为下列 数值(mm)时,相线正、负序 电 抗 值 $X_1, X_2, X$			当零线与邻近相线中心间距离 $D_n$ 为下列诸值 (mm)时,相线或零线的零序电抗值 $X_{0a}, X_{0f}$									
	$R_1, R_2, R_{0a}, R, R_{0f}$					$D_n = D$									
	$t=70^\circ\text{C}$ 时 裸绞线	$t=65^\circ\text{C}$ 时 绝缘导线	70	100	150	$D=70, D=100$	$D=150$	1500	2500	3500	6000				
25	铝	铜	0.892	1.478	0.877	0.229	0.277	0.277	0.252	0.274	0.299	0.406	0.438	0.460	0.493
	铝	铜	0.637	1.056	0.627	0.218	0.266	0.266	0.241	0.264	0.289	0.396	0.428	0.449	0.483
35	铝	铜	0.446	0.746	0.443	0.206	0.251	0.251	0.229	0.252	0.277	0.384	0.416	0.437	0.471
	铝	铜	0.319	0.533	0.316	0.196	0.242	0.242	0.219	0.242	0.267	0.374	0.406	0.427	0.461
70	铝	铜	0.235	0.393	0.233	0.183	0.231	0.231	0.206	0.229	0.254	0.361	0.393	0.414	0.448
	铝	铜	0.188	0.311	0.186	0.176	0.223	0.223	0.199	0.222	0.247	0.354	0.386	0.407	0.441
120	铝	铜	0.150	0.249	0.149	0.169	0.216	0.216	0.192	0.214	0.240	0.347	0.379	0.400	0.434
	铝	铜	0.122	0.202	0.122	0.162	0.208	0.208	0.185	0.207	0.232	0.339	0.371	0.393	0.426

### 附录 3

500V 聚氯乙烯绝缘和橡皮绝缘四芯电力电缆每米阻抗值 (mΩ/m)

线芯标称截面 (mm <sup>2</sup> )	$t=65^{\circ}\text{C}$ 时线芯电阻 $R_1, R_2, R_{0a}, R_0, R_{0l}$				铅皮电阻 $R_{0a}$	橡皮绝缘电缆				聚氯乙烯绝缘电缆				
	铝		铜			正、负序 电抗 $X_1, X_2, X_0$	零序电抗		正、负序 电抗 $X_1, X_2, X_0$	零序电抗				
	相线 $R$	零线 $R_{0l}$	相线 $R$	零线 $R_{0l}$			相线 $X_{0a}$	零线 $X_{0a}$		相线 $X_{0a}$	零线 $X_{0a}$			
	相线 $R$	零线 $R_{0l}$	相线 $R$	零线 $R_{0l}$		相线 $X_{0a}$	零线 $X_{0a}$	相线 $X_{0a}$	零线 $X_{0a}$					
3×4+1×2.5	9.237	14.778	5.482	8.772	6.38	0.106	0.116	0.135	0.100	0.114	0.135	0.100	0.114	0.129
3×6+1×4	6.158	9.237	3.665	5.482	5.83	0.100	0.115	0.127	0.099	0.115	0.127	0.099	0.115	0.127
3×10+1×6	3.695	6.158	2.193	3.665	4.10	0.097	0.109	0.127	0.094	0.108	0.127	0.094	0.108	0.125
3×16+1×6	2.309	6.158	1.371	3.655	3.28	0.090	0.105	0.134	0.087	0.104	0.134	0.087	0.104	0.134
3×25+1×10	1.057	3.695	0.895	2.193	2.51	0.085	0.105	0.131	0.082	0.101	0.131	0.082	0.101	0.137
3×35+1×10	1.077	3.695	0.639	2.193	2.02	0.083	0.101	0.136	0.080	0.100	0.136	0.080	0.100	0.138
3×50+1×16	0.754	2.309	0.447	1.371	1.75	0.082	0.095	0.131	0.079	0.101	0.131	0.079	0.101	0.135
3×70+1×25	0.538	1.507	0.319	0.895	1.29	0.079	0.091	0.123	0.078	0.079	0.123	0.078	0.079	0.127
3×95+1×35	0.397	1.077	0.235	0.639	1.06	0.080	0.094	0.126	0.079	0.097	0.126	0.079	0.097	0.125
3×120+1×35	0.314	1.077	0.188	0.639	0.98	0.078	0.092	0.130	0.076	0.095	0.130	0.076	0.095	0.130
3×150+1×50	0.251	0.754	0.151	0.447	0.89	0.077	0.092	0.125	0.076	0.093	0.125	0.076	0.093	0.120
3×185+1×50	0.203	0.754	0.123	0.447	0.81	0.077	0.091	0.131	0.076	0.094	0.131	0.076	0.094	0.128

注: 1. 铅皮电抗忽略不计; 2. 铅包电缆的  $R_{0a}$  应用零线和铅皮两部分交流电阻的并联值。

# 附录 4

## 1000V 油浸绝缘四芯电力电缆每米阻抗值 (mΩ/m)

线芯标称截面 (mm <sup>2</sup> )	$t=80^{\circ}\text{C}$ 时线芯电阻 $R_1, R_2, R_{0r}, R, R_{0r}$						铅皮电阻 $R_{0r}$	正、负序电抗 $X_1, X_2$	线芯零序电抗	
	铝			铜					相线 $X_{0r}$	零线 $X_{0r}$
	相线 $R$	零线 $R_{0r}$		相线 $R$	零线 $R_{0r}$					
3×4+1×2.5	9.71	15.53		5.76	9.22		6.40	0.098	0.11	0.12
3×6+1×4	6.47	9.71		3.84	5.76		5.54	0.093	0.11	0.12
3×10+1×6	3.88	6.47		2.30	3.84		4.98	0.088	0.11	0.12
3×16+1×6	2.43	6.47		1.44	3.84		4.00	0.082	0.10	0.13
3×25+1×10	1.58	3.88		0.94	2.30		3.14	0.073	0.10	0.13
3×35+1×10	1.13	3.88		0.67	2.30		2.19	0.073	0.09	0.13
3×50+1×16	0.79	2.43		0.47	1.44		2.41	0.070	0.09	0.13
3×70+1×25	0.57	1.58		0.34	0.94		1.95	0.069	0.08	0.11
3×95+1×35	0.42	1.13		0.25	0.67		1.72	0.069	0.08	0.11
3×120+1×35	0.33	1.13		0.20	0.67		1.47	0.070	0.08	0.12
3×150+1×50	0.26	0.79		0.16	0.47		1.26	0.068	0.09	0.11
3×185+1×50	0.21	0.79		0.13	0.47		1.06	0.068	0.09	0.12

注:1. 铅皮电抗忽略不计;2. 铅皮电缆的  $R_{0r}$  应是零线和铅皮两部分交流电阻的并联值。

附录 5  
1000V 以下三芯电力电缆每米阻抗值 (mΩ/m)

线芯标称截面 (mm <sup>2</sup> )	聚氯乙烯绝缘						橡皮绝缘						油浸纸绝缘					
	t=65°C 时线芯电阻 R <sub>1</sub> 、R <sub>2</sub> 、R <sub>0r</sub> 、R		正、负序电抗 X <sub>1</sub> 、X <sub>2</sub>	相线零序电抗 X <sub>0r</sub>	t=65°C 时线芯电阻 R <sub>1</sub> 、R <sub>2</sub> 、R <sub>0r</sub> 、R		铅皮电阻 R <sub>0r</sub>	正、负序电抗 X <sub>1</sub> 、X <sub>2</sub>	相线零序电抗 X <sub>0r</sub>	t=80°C 时线芯电阻 R <sub>1</sub> 、R <sub>2</sub> 、R <sub>0r</sub> 、R		铅皮电阻 R <sub>0r</sub>	正、负序电抗 X <sub>1</sub> 、X <sub>2</sub>	相线零序电抗 X <sub>0r</sub>				
	铝	铜			铝	铜				铝	铜							
	铝	铜	铝	铜	铝	铜	铝	铜	铝	铜	铝	铜	铝	铜				
3×25	14.778	8.772	0.100	0.134	14.778	8.772	7.52	0.107	0.135	15.53	9.218	8.14	0.098	0.130				
3×4	9.237	5.482	0.093	0.125	9.237	5.482	6.93	0.099	0.125	9.706	5.761	7.57	0.091	0.121				
3×6	6.158	3.655	0.093	0.121	6.158	3.655	6.38	0.094	0.118	6.470	3.841	6.71	0.087	0.114				
3×10	3.695	2.193	0.087	0.112	3.695	2.193	6.28	0.092	0.116	3.882	2.304	5.97	0.081	0.105				
3×16	2.309	1.371	0.082	0.106	2.309	1.371	3.66	0.086	0.111	2.427	1.440	5.2	0.077	0.103				
3×25	1.507	0.895	0.075	0.106	1.507	0.895	2.79	0.079	0.107	1.584	0.940	4.8	0.067	0.089				
3×35	1.077	0.639	0.072	0.091	1.077	0.639	2.25	0.075	0.102	1.131	0.671	3.89	0.065	0.085				
3×50	0.754	0.447	0.072	0.090	0.754	0.447	1.93	0.075	0.102	0.792	0.470	3.42	0.063	0.082				
3×70	0.538	0.319	0.069	0.086	0.538	0.319	1.45	0.072	0.089	0.566	0.336	2.76	0.062	0.079				
3×95	0.397	0.235	0.069	0.085	0.397	0.235	1.18	0.072	0.097	0.471	0.247	2.2	0.061	0.078				
3×120	0.314	0.188	0.069	0.084	0.314	0.188	1.09	0.071	0.095	0.330	0.198	1.94	0.062	0.077				
3×150	0.251	0.151	0.070	0.084	0.251	0.151	0.99	0.071	0.095	0.264	0.158	1.66	0.062	0.077				
3×185	0.203	0.123	0.070	0.083	0.203	0.123	0.90	0.071	0.094	0.214	0.130	1.4	0.062	0.076				

注: 1. 相线的零序电抗是按电缆紧贴接地导体计算的; 2. 铅皮电抗忽略不计。

# 附录 6

## 三相三线穿钢管布线(钢管作为零线)的每米阻抗值(mΩ/m)

导线标称截面 (mm <sup>2</sup> )	钢管公称直径 (mm)	t=65°时导线电阻		钢管电阻 $R_{0e}$	正、负序电抗 $X_1, X_2, X$	零序电抗		计算钢管阻抗 时采用的电流 (A)
		$R_1, R_2, R_{0e}, R, R_{0e}$				相线 $X_{0e}$	零线(钢管) $X_{0e}$	
		铝	铜					
1.5	15	24.39	14.48	3.35	0.14	0.17	1.79	30~60
2.5	15	14.63	8.09	3.35	0.13	0.15	1.79	30~60
4	20	9.15	5.43	2.45	0.12	0.15	1.26	60~120
6	20	6.10	3.62	2.18	0.11	0.14	1.24	80~160
10	25	3.66	2.19	1.52	0.11	0.14	1.13	120~240
16	32	2.29	1.37	1.25	0.10	0.14	1.00	150~300
25	32	1.48	0.88	1.00	0.10	0.12	1.00	180~360
35	40	1.06	0.63	0.84	0.10	0.13	0.85	240~480
50	40	0.75	0.44	0.77	0.09	0.11	0.78	330~660
70	50	0.53	0.32	0.75	0.09	0.12	0.78	420~840
95	70	0.39	0.23	0.72	0.09	0.13	0.59	500~1000
120	70	0.31	0.19	0.72	0.08	0.12	0.59	600~1200
150	70	0.25	0.15	0.72	0.08	0.11	0.59	660~1320

注:1. 在计算钢管的零序电抗中忽略外感抗;2. 本表电抗数据适用于 BLV、BLX、BX 型单芯绝缘导线;3. 当采用三相四线穿钢管布线时,零线(绝缘导线)的零序电抗  $X_{0e}$  可近似地认为等于同截面相线的零序电抗  $X_{0e}$ 。



附录 7

三相母线每米阻抗值 (mΩ/m)

母线规格 $a \times b$ (mm)	$t=70^{\circ}\text{C}$ 时电阻 $R_1, R_2, R_{0r}, R_{0r}$		当相间中心距离为下列诸值 (mm) 时, 相线正、负序电抗值 $X_1, X_2, X_0, X$					当零线与邻近相线中心距离 $D_0$ 为下列诸值 (mm) 时, 相线或零线的零序电抗值 $X_{1s}, X_{0s}$				
	铝	铜	160	200	250	350	200			1500	3500	6000
							=200	=250	=350			
25×3	0.469	0.292	0.218	0.232	0.240	0.267	0.255	0.261	0.270	0.344	0.392	0.431
25×4	0.355	0.221	0.215	0.229	0.237	0.265	0.252	0.258	0.268	0.341	0.395	0.428
30×3	0.394	0.246	0.207	0.221	0.230	0.256	0.244	0.250	0.259	0.333	0.386	0.420
30×4	0.299	0.185	0.205	0.219	0.227	0.255	0.242	0.248	0.258	0.331	0.385	0.418
40×4	0.225	0.140	0.189	0.203	0.212	0.238	0.226	0.232	0.241	0.315	0.368	0.402
40×5	0.180	0.113	0.188	0.202	0.210	0.237	0.225	0.231	0.240	0.314	0.367	0.401
50×5	0.144	0.091	0.175	0.189	0.199	0.224	0.212	0.218	0.227	0.301	0.354	0.388
50×6	0.121	0.077	0.174	0.188	0.197	0.223	0.211	0.217	0.226	0.300	0.353	0.387
60×6	0.102	0.067	0.164	0.187	0.188	0.213	0.201	0.206	0.216	0.290	0.343	0.377
60×8	0.077	0.050	0.162	0.176	0.185	0.211	0.199	0.205	0.214	0.288	0.341	0.375

(续表)

母线规格 $a \times b$ (mm)	$t=70^{\circ}\text{C}$ 时电阻 $R_1, R_2, R_{0x}, R_{0y}$		当相间中心距离为下列诸值(mm)时, 相线正、负序电抗值 $X_1, X_2, X$					当零线与邻近相线中心距离 $D_0$ 为下列诸值(mm)时, 相 线或零线的零序电抗值 $X_{0x}, X_{0y}$				
	铝	铜	160	200	250	350	200			1500	3500	6000
							$=200$	$=250$	$=350$			
80×6	0.077	0.050	0.147	0.161	0.172	0.196	0.184	0.190	0.199	0.273	0.326	0.360
80×8	0.060	0.039	0.146	0.160	0.170	0.195	0.183	0.188	0.198	0.272	0.325	0.359
80×10	0.049	0.033	0.144	0.158	0.168	0.193	0.181	0.187	0.196	0.270	0.323	0.357
100×6	0.063	0.042	0.134	0.148	0.160	0.183	0.171	0.177	0.186	0.260	0.313	0.347
100×8	0.048	0.032	0.133	0.147	0.158	0.182	0.170	0.176	0.185	0.259	0.312	0.346
100×10	0.041	0.027	0.132	0.146	0.156	0.181	0.169	0.174	0.184	0.258	0.311	0.345
120×8	0.042	0.028	0.122	0.136	0.149	0.171	0.159	0.165	0.174	0.248	0.301	0.335
120×10	0.035	0.023	0.121	0.135	0.147	0.170	0.158	0.164	0.173	0.247	0.300	0.334

注:1. 零线的零序电抗是按零线的材料与相线相同计算的;2. 本表所列数据对于母线平放或竖放均相同。

www.jcpeixun.com

## 附录8

裸绞线安全载流量(A)(环境温度25°C)

铜 绞 线			铝 绞 线			钢芯铝绞线	
导线型号	室外	室内	导线型号	室外	室内	导线型号	室外
TJ-4	50	25	LJ-10	75	50	LGJ-35	170
TJ-6	70	35	LJ-16	105	80	LGJ-50	220
TJ-10	95	60	LJ-25	135	110	LGJ-70	275
TJ-16	130	100	LJ-35	170	135	LGJ-95	335
TJ-25	180	140	LJ-50	215	170	LGJ-120	380
TJ-35	220	175	LJ-70	265	215	LGJ-150	445
TJ-50	270	220	LJ-95	325	260	LGJ-180	515
TJ-60	315	250	LJ-120	375	310	LGJ-240	610
TJ-70	340	280	LJ-150	440	370	LGJ-300	700
TJ-95	415	340	LJ-185	500	425	LGJ-400	800
TJ-120	485	405	LJ-240	610		LGJ-300	690
TJ-150	570	480	LJ-300	680		LGJ-400	825
TJ-185	645	550	LJ-400	830		LGJ-500	945
TJ-240	770	650	LJ-500	980		LGJ-600	1050
TJ-300	890		LJ-625	1140		LGJ-300	705
TJ-400	1035					LGJ-400	850

## 附录9

### BVR型和BLVR型聚氯乙烯铜芯软线及铝芯线的参考载流量

标称截面 (mm <sup>2</sup> )	参考载流量(A)			
	BVR		BLVR	
	单 芯	双 芯	单 芯	双 芯
0.8	17	13	13	10
1.0	20	16	15	12
1.5	25	21	19	16
2.4	34	26	26	22
4.0	45	28	35	29
6.0	56	47	43	36
8.0	70	59	54	45
10.0	85	72	66	56
16.0	113	96	87	73
25	146	123	112	95
35	180	151	139	117
50	225	188	173	145

注：本标准所列表流量数据，是在环境25℃，导体温度70℃条件下，空气架空敷设的载流量。在设计选用时，对于1.0mm<sup>2</sup>以下的小截面，应同时考虑电路压降和机械强度。

不同环境温度时的载流量修正系数

环境温度(°C)	5	10	15	20	25	30	35	40	45
修正系数	1.2	1.15	1.11	1.05	1	0.94	0.88	0.81	0.74

## 附录10

### BVV 型和 BLVV 型聚氯乙烯绝缘、聚氯乙烯护套铜芯及铝芯导线参考载流量

标称截面 (mm <sup>2</sup> )	参考载流量(A)					
	BVV			BLVV		
	单芯	双芯	三芯	单芯	双芯	三芯
1.0	20	16	13	15	12	10
1.5	25	21	16	19	16	12
2.5	34	26	22	26	22	17
4.0	45	38	29	35	29	23
5.0	51	43	33	39	33	26
6.0	56	47	36	43	36	28
8.0	70	59	46	54	45	35
10.0	85	72	55	66	56	43

## 附录11

### RVZ 型聚氯乙烯绝缘、聚氯乙烯护套连接 软线的参考载流量

标称截面 (mm <sup>2</sup> )	参考载流量(A)		
	二芯	三芯	四芯
1.00	16	13	13
1.50	21	16	16
2.00	24	19	19
2.50	26	22	22
3.00	28	26	26
4.00	38	29	29
5.00	43	33	33
6.00	47	36	36

## 附录12

塑料绝缘铜、铝电线安全载流量(A)

标称截面 (mm <sup>2</sup> )	明线敷设		穿管敷设						护套线			
			二根		三根		四根		二芯		三及四芯	
	铜	铝	铜	铝	铜	铝	铜	铝	铜	铝	铜	铝
0.2	3								3		2	
0.3	5								4.5		3	
0.4	7								6		4	
0.5	8								7.5		5	
0.6	10								8.5		6	
0.7	12								10		8	
0.8	15								11.5		10	
1	18		15		14		13		14		11	
1.5	22	17	18	13	16	12	15	11	18	14	12	10
2	26	20	20	15	17	13	16	12	20	16	14	12
2.5	30	23	26	20	25	19	23	17	22	19	19	15
3	32	24	29	22	27	20	25	19	25	21	22	17
4	40	30	38	29	33	25	30	23	33	25	25	20
5	45	34	42	31	37	28	34	25	37	28	28	22
6	50	39	44	34	41	31	37	28	41	31	31	24
8	63	48	56	43	49	39	43	34	51	39	40	30
10	75	55	68	51	56	42	49	37	63	48	48	37
16	100	75	80	61	72	55	64	49				
20	110	85	90	70	80	65	74	55				
25	130	100	100	80	90	75	85	65				
35	160	125	125	96	110	84	105	75				
50	200	155	163	125	142	109	120	89				
70	255	200	203	156	182	141	161	125				
95	310	240	243	187	227	175	197	152				

注：1. 线芯最高工作温度为70℃； 2. 电线周围环境温度为35℃。当实际空气温度高于35℃时，导线安全载流量应按校正系数表乘以校正系数。



校正系数表

周围空气温度(°C)		35	40	45	50	55
校正系数	塑料绝缘线	1.00	0.93	0.85	0.76	0.66
	橡皮绝缘线	1.00	0.91	0.82	0.71	0.58

## 附录13

橡皮绝缘铜、铝电线安全载流量(A)

标称截面 (mm <sup>2</sup> )	明线敷设		穿 管 敷 设						护 套 线			
			二 根		三 根		四 根		二 芯		三 及 四 芯	
	铜	铝	铜	铝	铜	铝	铜	铝	铜	铝	铜	铝
0.2									3		2	
0.3									4		3	
0.4									5.5		3.5	
0.5									7		4.5	
0.6									8		5.5	
0.7									9		7.5	
0.8									10.5		9	
1									12		10	
1.5									15	12	11	8
2									17	15	12	10
2.5	28	21	24	18	23	17	21	16	19	16	16	13
3	30	22	27	20	25	18	23	17	21	18	19	14
4	37	28	35	26	30	23	27	21	28	21	21	17
5	41	31	39	28	34	26	30	23	33	24	24	19
6	46	36	40	31	38	29	34	26	35	26	26	21

(续表)

标称截面 (mm <sup>2</sup> )	明线敷设		穿 管 敷 设						护 套 线			
			二根		三根		四根		二芯		三及四芯	
	铜	铝	铜	铝	铜	铝	铜	铝	铜	铝	铜	铝
8	58	44	50	40	45	36	40	31	44	33	34	26
10	69	51	63	47	50	39	45	34	54	41	41	32
16	92	69	74	56	66	50	59	45				
20	100	78	83	65	74	60	68	52				
25	120	92	92	74	83	69	78	60				
35	148	115	115	88	100	78	97	70				
50	185	143	150	115	130	100	110	82				
70	230	185	186	144	168	130	149	115				
95	290	225	220	170	210	160	180	140				
120	355	270	260	200	220	173	210	165				
150	400	310	290	230	260	207	240	188				
185	475	370										
240	580	445										
300	670	520										
400	820	630										
500	950	740										

注:

1. 线芯最高工作温度为65℃; 2. 导线安全载流量的温度校正系数如下表。

周围空气温度(°C)	35	40	45	50	55
校正系数	1.0	0.91	0.82	0.71	0.58

## 附录14

### 直接敷设在地下的低压绝缘电缆 (铜、铝)安全载流量(A)

标称截面 (mm <sup>2</sup> )	双 芯 电 缆		三 芯 电 缆		四 芯 电 缆	
	铜	铝	铜	铝	铜	铝
1.5	13	9	13	9		
2.5	22	16	22	16	22	16
4	35	26	35	26	35	26
6	52	39	52	39	52	39
10	88	66	83	62	74	56
16	123	92	105	79	101	75
25	162	122	140	105	132	99
35	198	148	167	125	154	115
50	237	178	206	155	189	141
70	286	214	250	188	233	174
95	334	250	299	224	272	204
120	382	287	343	257	308	231
150	440	330	382	287	347	260
185			431	323	396	297
240					448	336

注:

1. 表中安全载流量,线芯最高工作温度为80°C,地温为30°C.在实际地温不是30°C的地方,电缆的安全载流量应乘以下表中的校正系数。

地温(°C)	10	15	20	25	30	35	40
校正系数	1.18	1.14	1.11	1.05	1.00	0.95	0.89

2.  $n$  条电缆平行敷设(电缆外皮间距为200mm)时,电缆的安全载流量应乘以下表中的并列系数。

电 缆 系 数	1	2	3	4	5	6	7	8
并 列 系 数	1.00	0.92	0.87	0.84	0.82	0.81	0.80	0.79

## 附录15

### 1千伏 VV、VLV 型无铠装聚氯乙烯 聚乙烯绝缘电缆安全载流量(A)

导线截面 (mm <sup>2</sup> )	单 芯		二 芯		三 芯		四 芯	
	铜芯	铝芯	铜芯	铝芯	铜芯	铝芯	铜芯	铝芯
1	18		15		12			
1.5	23		19		16			
2.5	32	24	26	20	22	16		
4	41	31	35	26	29	22	29	22
6	54	41	44	34	38	29	38	29
10	72	55	60	46	52	40	51	40
16	97	74	79	61	69	53	68	53
25	122	102	107	83	93	72	92	71
35	162	124	124	95	113	87	115	89
50	204	157	155	120	140	108	144	111
70	253	195	196	151	175	135	178	136
95	272	214	238	182	214	165	218	168
120	356	276	273	211	247	191	252	195
150	410	316	315	242	293	225	297	228
185	465	358			332	257	341	263
240	552	425			396	306		
300	636	490						
400	757	589						
500	886	680						
620	1025	787						
800	1338	934						

注：导线最高允许温度65℃，空气中敷设，环境温度25℃。

## 附录16

1千伏 VV 29、VLV 29、VV 30、VLV 30、  
VV 50、VLV 50、VV 59、VLV 59型铠装  
聚乙烯电缆安全载流量(A)

导线截面 (mm <sup>2</sup> )	单 芯		二 芯		三 芯		四 芯	
	铜芯	铝芯	铜芯	铝芯	铜芯	铝芯	铜芯	铝芯
4			36	27	31	23	30	23
6			45	35	39	30	39	30
10	76	58	60	46	52	40	52	40
16	100	77	81	62	71	54	70	54
25	135	104	106	81	96	73	94	73
35	164	126	128	99	114	88	119	92
50	205	158	160	128	144	111	149	115
70	253	195	197	152	179	138	184	141
95	311	239	240	185	217	167	226	174
120	356	276	278	215	252	194	260	201
150	410	316	319	246	292	225	301	231
185	466	359			333	257	345	266
240	551	424			392	305		
300	632	486						
400	764	587						
500	882	677						
625	1032	789						
800	1208	931						

注:1. 导线最高允许温度65°C,空气中敷设,环境温度25°C;2. 单芯铠装电缆不用于交流系数,表列为直流电流值。

## 附录17

### 金属圆梗(铜、铝)载流量

圆梗直径 (mm)	最大允许电流(A)		圆梗直径 (mm)	最大允许电流(A)	
	铜 梗	铝 梗		铜 梗	铝 梗
6	135	105	16	535	420
7	170	130	18	635	490
8	205	160	19	685	530
10	280	215	20	735	570
12	365	280	21	790	610
14	445	345	22	840	650
15	495	380	25	1005	780

注:表中最大允许电流,最高温度为70°C,周围空气温度为35°C。如果实际空气温度不是35°C,金属圆梗的载流量应乘以下表中的校正系数。

周围空气温度(°C)	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55
校正系数	1.36	1.31	1.25	1.20	1.13	1.07	1.00	0.93	0.85	0.76	0.66



# 附录18

## 架空导线弛度表

LJ-16 弛度表(最大风速  $v=25\text{m/s}$ )

弛度 度 (m) 温度 (°C) 档距(m)	-40	-30	-20	-10	0	10	20	30	40
40	0.10	0.12	0.18	0.24	0.35	0.46	0.59	0.69	0.76
50	0.12	0.17	0.23	0.32	0.42	0.58	0.71	0.84	0.93
60	0.18	0.24	0.33	0.44	0.57	0.74	0.9	1.04	1.18
70	0.28	0.37	0.49	0.63	0.80	0.98	1.16	1.25	1.35
80	0.47	0.60	0.76	0.94	1.14	1.32	1.50	1.64	1.81
90	0.80	0.97	1.17	1.38	1.57	1.77	1.92	2.09	2.24
100	1.24	1.44	1.68	1.88	2.06	2.42	2.42	2.60	2.74

LJ-25 弛度表(最大风速  $v=25\text{m/s}$ )

弛度 度 (m) 温度 (°C) 档距(m)	-40	-30	-20	-10	0	10	20	30	40
40	0.12	0.14	0.17	0.23	0.35	0.48	0.57	0.66	0.78
50	0.14	0.18	0.24	0.31	0.44	0.58	0.71	0.81	0.92
60	0.18	0.24	0.31	0.41	0.58	0.72	0.86	1.00	1.12
70	0.24	0.32	0.42	0.54	0.7	0.88	1.04	1.20	1.35
80	0.34	0.44	0.56	0.7	0.88	1.08	1.28	1.44	1.62
90	0.48	0.60	0.76	0.92	1.16	1.35	1.57	1.75	1.95
100	0.69	0.84	1.04	1.24	1.5	1.71	1.92	2.12	2.33
110	1.00	1.20	1.44	1.67	1.93	2.14	2.36	2.56	2.76
120	1.42	1.66	1.92	2.16	2.42	2.62	2.83	3.20	3.24

LJ-35 弛度表(最大风速  $v=25\text{m/s}$ )

弛度 度 (m) 温度 (°C) 档距(m)	-40	-30	-20	-10	0	10	20	30	40
60	0.19	0.25	0.34	0.44	0.60	0.78	0.90	1.04	1.17
70	0.24	0.31	0.42	0.54	0.70	0.88	1.04	1.18	1.34
80	0.31	0.40	0.51	0.65	0.84	1.04	1.21	1.38	1.54
90	0.40	0.51	0.64	0.80	1.01	1.22	1.42	1.59	1.78
100	0.54	0.68	0.82	1.00	1.24	1.48	1.69	1.88	2.19
110	0.72	0.90	1.09	1.31	1.57	1.82	2.02	2.24	2.46
120	1.01	1.23	1.44	1.70	1.96	2.22	2.42	2.64	2.84
130	1.42	1.64	1.84	2.14	2.40	2.66	2.86	3.08	3.28
140	1.90	2.12	2.29	2.62	2.86	3.13	3.32		

LJ-50 弛度表(最大风速  $v=25\text{m/s}$ )

弛度 度 (m) 温度 (°C) 档距(m)	-40	-30	-20	-10	0	10	20	30	40
60	0.20	0.26	0.34	0.48	0.60	0.76	0.92	1.04	1.16
70	0.26	0.34	0.42	0.56	0.71	0.88	1.05	1.19	1.33
80	0.32	0.41	0.52	0.68	0.84	1.03	1.22	1.26	1.52
90	0.40	0.51	0.62	0.80	0.98	1.19	1.40	1.56	1.74
100	0.49	0.63	0.76	0.96	1.16	1.38	1.60	1.79	1.98
110	0.61	0.76	0.92	1.12	1.32	1.58	1.84	2.02	2.24
120	0.76	0.92	1.12	1.36	1.60	1.84	2.11	2.32	2.56
130	0.99	1.18	1.41	1.68	1.91	2.20	2.45	2.68	2.93
140	1.30	1.50	1.77	2.06	2.32	2.61	2.83	3.09	3.38

LGJ-16 弛度表(最大风速  $v=25\text{m/s}$ )

弛度 温度 (m) (°C)	-40	-30	-20	-10	0	10	20	30	40
档距(m)									
60	0.18	0.19	0.23	0.30	0.38	0.48	0.62	0.75	0.87
80	0.25	0.30	0.37	0.45	0.55	0.70	0.88	1.00	1.12
100	0.45	0.52	0.62	0.75	0.90	1.10	1.30	1.45	1.60
120	0.82	0.95	1.12	1.27	1.50	1.75	1.98	2.15	2.32
140	1.42	1.65	1.88	2.10	2.35	2.60	2.80	3.01	3.20
160	2.32	2.59	2.80	3.08	3.32	3.58	3.76	3.98	4.20
180	3.35	3.65	3.80	4.10	4.36				
200									

LGJ-25 弛度表(最大风速  $v=25\text{m/s}$ )

弛度 温度 (m) (°C)	-40	-30	-20	-10	0	10	20	30	40
档距(m)									
60	0.16	0.20	0.25	0.32	0.39	0.49	0.60	0.73	0.88
80	0.25	0.33	0.40	0.50	0.60	0.73	0.87	1.05	1.22
100	0.30	0.50	0.62	0.73	0.77	1.02	1.23	1.45	1.62
120	0.64	0.76	0.90	1.06	1.26	1.45	1.66	1.90	2.10
140	1.01	1.15	1.30	1.52	1.76	2.00	2.24	2.49	2.70
160	1.52	1.70	1.88	2.18	2.45	2.71	2.95	3.20	3.45
180	2.25	2.48	2.73	3.06	3.28	3.62	3.85	4.10	
200	3.10	3.48	3.80	4.15					

LGJ-35 弛度表(最大风速  $v=25\text{m/s}$ )

弛度 度 (m) 档距(m)	温度 (°C)	-40	-30	-20	-10	0	10	20	30	40
60		0.16	0.18	0.22	0.26	0.35	0.46	0.58	0.72	0.88
80		0.20	0.32	0.38	0.44	0.58	0.76	0.89	1.03	1.20
100		0.40	0.47	0.56	0.67	0.84	1.01	1.22	1.38	1.56
120		0.57	0.67	0.79	0.94	1.14	1.33	1.58	1.74	1.95
140		0.81	0.92	1.06	1.26	1.47	1.70	1.97	2.16	2.38
160		1.12	1.26	1.41	1.66	1.90	2.16	2.42	2.66	2.92
180		1.54	1.71	1.90	2.22	2.50	2.80	3.09	3.40	3.67
200		2.10	2.38	2.70	3.16	3.50	3.90	4.30	4.70	5.10

LGJ-50 弛度表(最大风速  $v=25\text{m/s}$ )

弛度 度 (m) 档距(m)	温度 (°C)	-40	-30	-20	-10	0	10	20	30	40
60		0.17	0.20	0.23	0.28	0.37	0.49	0.62	0.74	0.90
80		0.28	0.34	0.40	0.49	0.61	0.75	0.91	1.08	1.25
100		0.45	0.52	0.61	0.73	0.90	1.06	1.24	1.43	1.63
120		0.64	0.74	0.86	1.01	1.21	1.40	1.61	1.82	2.04
140		0.86	0.99	1.15	1.34	1.55	1.76	2.02	2.24	2.49
160		1.14	1.29	1.48	1.69	1.94	2.19	2.48	2.70	2.97
180		1.46	1.66	1.88	2.14	2.41	2.69	2.97	3.25	
200		1.90	2.16	2.40	2.72	3.00	3.29			

LGJ-25 弛度表(最大风速  $v=30\text{m/s}$ )

弛度 度(m) 档距(m)	温度 (°C)	-40	-30	-20	-10	0	10	20	30	40
60		0.15	0.20	0.25	0.30	0.35	0.45	0.55	0.70	0.85
80		0.25	0.30	0.40	0.50	0.60	0.75	0.90	1.05	1.20
100		0.50	0.55	0.70	0.85	1.0	1.2	1.35	1.6	1.75
120		1.0	1.2	1.3	1.5	1.75	1.95	2.2	2.35	2.6
140		1.8	2.0	2.25	2.45	2.7	2.9	3.1	3.35	3.55
160		2.9	3.15	3.35	3.6	3.8	4.0	4.25	4.45	4.65
180		4.1	4.35	4.6	4.85	5.1	5.3	5.5	5.75	5.9
200		5.3	5.7	6.0	6.25	6.45	6.7	6.85	7.1	7.25

LGJ-35 弛度表(最大风速  $v=30\text{m/s}$ )

弛度 度(m) 档距(m)	温度 (°C)	-40	-30	-20	-10	0	10	20	30	40
60		0.12	0.17	0.25	0.30	0.40	0.50	0.63	0.45	0.90
80		0.20	0.30	0.40	0.45	0.60	0.70	0.85	1.05	1.20
100		0.35	0.50	0.60	0.70	0.80	1.05	1.25	1.45	1.65
120		0.60	0.75	0.90	1.10	1.25	1.50	1.75	2.0	2.25
140		1.10	1.25	1.50	1.70	1.95	2.25	2.50	2.7	3.0
160		1.75	2.0	2.25	2.5	2.8	3.1	3.4	3.6	3.9
180		2.75	3.0	3.25	3.55	3.85	4.1	4.35	4.65	4.85
200		3.8	4.1	4.35	4.65	4.9	5.15	5.5	5.75	6.0

LGJ-50 弛度表(最大风速  $v=30\text{m/s}$ )

弛度 度 (m) 温度 (°C) 档距(m)	-40	-30	-20	-10	0	10	20	30	40
60	0.15	0.20	0.30	0.35	0.45	0.55	0.65	0.80	0.90
80	0.25	0.35	0.45	0.55	0.65	0.75	0.90	1.1	1.25
100	0.40	0.50	0.55	0.75	0.80	1.05	1.2	1.4	1.6
120	0.60	0.70	0.85	1.0	1.15	1.35	1.6	1.85	2.05
140	0.85	1.0	1.1	1.35	1.6	1.8	2.05	2.3	2.55
160	1.25	1.45	1.6	1.85	2.1	2.35	2.7	2.85	3.2
180	1.8	2.0	2.25	2.65	2.85	3.1	3.45	3.75	4.0
200	2.55	2.9	3.15	3.5	3.8	4.1	4.4	4.65	4.95

LGJ-70 弛度表(最大风速  $v=30\text{m/s}$ )

弛度 度 (m) 温度 (°C) 档距(m)	-40	-30	-20	-10	0	10	20	30	40
60	0.14	0.20	0.24	0.30	0.36	0.50	0.66	0.78	0.96
80	0.28	0.34	0.42	0.5	0.6	0.8	0.96	1.02	1.32
100	0.42	0.52	0.6	0.72	0.86	1.1	1.3	1.5	1.72
120	0.60	0.74	0.86	1.0	1.18	1.42	1.64	1.9	2.14
140	0.84	0.98	1.14	1.3	1.56	1.78	2.04	2.3	2.58
160	1.1	1.26	1.46	1.68	1.94	2.18	2.44	2.74	3.02
180	1.46	1.68	1.9	2.14	2.44	2.7	2.98	3.28	3.6
200	2.04	2.3	2.58	2.9	3.23	3.54	3.84	4.16	4.44

LJ-16 弛度表(最大风速  $v=30\text{m/s}$ )

弛度 度 (m) 温度 (°C) 档距(m)	-40	-30	-20	-10	0	10	20	30	40
40	0.10	0.12	0.16	0.22	0.32	0.44	0.58	0.68	0.76
50	0.14	0.20	0.30	0.42	0.56	0.68	0.80	0.94	1.04
60	0.30	0.42	0.56	0.72	0.88	0.94	1.16	1.28	1.40
70	0.72	0.86	1.10	1.30	1.46	1.60	1.64	1.86	1.98
80	1.28	1.46	1.60	1.76	1.92	2.06	2.18	2.28	2.40

LJ-25 弛度表(最大风速  $v=30\text{m/s}$ )

弛度 度 (m) 温度 (°C) 档距(m)	-40	-30	-20	-10	0	10	20	30	40
40	0.10	0.12	0.16	0.22	0.34	0.46	0.56	0.68	0.76
50	0.12	0.16	0.20	0.28	0.42	0.56	0.70	0.82	0.92
60	0.18	0.26	0.32	0.44	0.58	0.76	0.92	1.06	1.18
70	0.34	0.48	0.58	0.74	0.92	1.10	1.28	1.40	1.56
80	0.62	0.80	1.00	1.18	1.36	1.54	1.70	1.84	2.00
90	1.08	1.30	1.50	1.70	1.88	2.04	2.18	2.34	2.48
100	1.68	1.86	2.06	2.24	2.44	2.60	2.74	2.88	3.04
110	2.30	2.50	2.70	2.88	3.04	3.20	3.36	3.50	3.70
120	3.00	3.18	3.36	3.54	3.70	3.84	4.00	4.20	4.40

LJ-35 弛度表(最大风速  $v=30\text{m/s}$ )

弛度 度 (m) 温度 (°C) 档距(m)	-40	-30	-20	-10	0	10	20	30	40
40	0.10	0.12	0.16	0.22	0.32	0.46	0.58	0.68	0.74
50	0.12	0.16	0.22	0.30	0.42	0.58	0.72	0.82	0.92
60	0.18	0.24	0.32	0.42	0.58	0.76	0.90	1.04	1.18
70	0.28	0.38	0.50	0.66	0.82	1.00	1.18	1.32	1.46
80	0.46	0.58	0.76	0.96	1.14	1.30	1.48	1.64	1.80
90	0.72	0.88	1.08	1.30	1.50	1.68	1.88	2.04	2.18
100	1.10	1.30	1.54	1.78	1.96	2.14	2.34	2.50	2.66
110	1.64	1.88	2.10	2.30	2.50	2.70	2.90	3.06	3.20
120	2.24	2.46	2.68	2.90	3.08	3.26	3.44	3.62	3.78

LJ-50 弛度表(最大风速  $v=30\text{m/s}$ )

弛度 度 (m) 温度 (°C) 档距(m)	-40	-30	-20	-10	0	10	20	30	40
60	0.20	0.26	0.32	0.46	0.58	0.76	0.92	1.04	1.18
70	0.26	0.32	0.40	0.54	0.70	0.88	1.06	1.20	1.36
80	0.36	0.44	0.54	0.70	0.90	1.10	1.28	1.44	1.60
90	0.52	0.66	0.80	1.00	1.24	1.42	1.62	1.80	1.96
100	0.76	0.94	1.16	1.38	1.60	1.80	2.00	2.20	2.36
110	1.08	1.30	1.56	1.78	2.00	2.24	2.44	2.64	2.80
120	1.48	1.74	2.00	2.24	2.48	2.68	2.90	3.10	3.28
130	1.98	2.26	2.52	2.76	3.00	3.20	3.42	3.60	3.80
140	2.56	2.82	3.08	3.32	3.56	3.76	3.94	4.16	4.34



LJ-70 弛度表(最大风速  $v=30\text{m/s}$ )

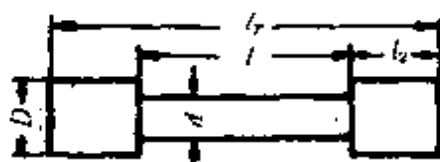
弛度 度 (m) 温度 (°C) 档距(m)	-40	-30	-20	-10	0	10	20	30	40
60	0.20	0.26	0.34	0.46	0.60	0.76	0.92	1.06	1.18
70	0.26	0.34	0.44	0.56	0.74	0.92	1.08	1.24	1.38
80	0.34	0.44	0.54	0.74	0.94	1.08	1.26	1.42	1.58
90	0.44	0.54	0.68	0.88	1.06	1.26	1.44	1.64	1.82
100	0.58	0.70	0.88	1.08	1.30	1.50	1.74	1.92	2.12
110	0.80	0.98	1.18	1.42	1.66	1.90	2.12	2.32	2.54
120	1.10	1.34	1.58	1.80	2.10	2.32	2.54	2.76	2.98
130	1.46	1.74	2.00	2.28	2.54	2.76	3.00	3.22	3.44
140	1.92	2.22	2.50	2.76	3.02	3.24	3.48	3.70	3.94

LGJ-16 弛度表(最大风速  $v=30\text{m/s}$ )

弛度 度 (m) 温度 (°C) 档距(m)	-40	-30	-20	-10	0	10	20	30	40
60	0.10	0.15	0.20	0.25	0.35	0.45	0.60	0.70	0.85
80	0.20	0.30	0.40	0.50	0.65	0.75	0.90	1.05	1.20
100	0.55	0.70	0.75	0.95	1.15	1.34	1.50	1.70	1.90
120	1.15	1.35	1.55	1.75	1.95	2.15	2.35	2.55	2.75
140	2.10	2.30	2.55	2.75	3.00	3.20	3.40	3.55	3.80
160	3.30	3.50	3.75	4.00	4.25	4.50	4.60	4.75	4.95
180	4.75	5.00	5.20	5.35	5.60	5.75	5.90	6.10	5.30
200	6.20	6.35	6.50	6.75	7.00	7.20	7.35	7.60	7.85

## 附录19

两端加粗碳化硅棒电热元件尺寸



尺寸 (mm) 工作部分		粗 端		碳化硅棒 的全长 $l_T$ (mm)	喷有金 属部分 的长度 (mm)	接 触 卡 箍	
直径 $d$	长度 $l$	直径 $D$	长度 $l_2$			宽 度 (mm)	接触舌 片长度 (mm)
6	60	12	75	210	25	16	20
6	100	12	75	250	25	16	20
6	100	12	130	360	25	16	20
8	100	14	80	270	25	16	20
8	100	14	130	360	25	16	20
8	150	14	60	270	25	16	20
8	150	14	85	320	25	16	20
8	150	14	150	450	25	16	20
8	180	14	60	300	25	16	20
8	180	14	80	340	25	16	20
8	180	14	85	350	25	16	20
8	180	14	150	480	25	16	20
8	180	14	110	400	25	16	20

(续表)

尺寸 (mm) 工作部分		粗 端		碳化硅棒 的全长 $l_T$ (mm)	喷有金 属部分 的长度 (mm)	接 触 卡 箍	
直径 $d$	长度 $l$	直径 $D$	长度 $l_2$			宽 度 (mm)	接触舌 片长度 (mm)
8	180	14	200	580	25	16	20
8	250	14	100	450	25	16	20
8	250	14	150	550	25	16	20
12	200	18	150	500	40	20	20
12	100	18	200	500	40	20	20
12	250	18	115	460	40	20	20
12	150	18	200	550	40	20	20
12	250	18	200	650	40	20	20
14	200	22	250	700	40	20	20
14	250	22	250	750	40	20	20
14	250	22	350	950	40	20	20
14	300	22	150	600	40	20	20
14	300	22	250	800	40	20	20
14	300	22	350	1000	40	20	20
14	400	22	250	900	40	20	20
14	400	22	350	1100	40	20	20
18	250	28	250	750	40	20	20
18	250	28	350	950	40	20	20
18	300	28	250	800	40	20	20
18	300	28	350	1000	40	20	20
18	400	28	250	900	40	20	20

(续表)

尺寸 (mm) 工作部分		粗 端		碳化硅棒 的全长 $l_T$ (mm)	喷有金 属部分 的长度 (mm)	接 触 卡 箍	
直径 $d$	长度 $l$	直径 $D$	长度 $l_2$			宽 度 (mm)	接触舌 片长度 (mm)
18	400	28	350	1000	40	20	20
18	500	28	250	1000	40	20	20
18	500	28	350	1200	40	20	20
18	600	28	150	900	40	20	20
18	600	28	250	1100	40	20	20
18	600	28	350	1300	40	20	20
18	800	28	250	1300	40	20	20
18	800	28	350	1500	40	20	20
25	800	39	400	1600			
30	1000	45	500	2000			

## 附录 20

硅碳元件在不同元件温度和炉温下的表面负荷值(W/cm<sup>2</sup>)

元件温度 (°C)	炉 温 (°C)												
	1000	1050	1100	1150	1200	1250	1300	1350	1400	1450	1500	1550	
1100	4.63	2.45											
1150	7.37	5.19	2.74										
1200	10.41	8.23	5.78	3.04									
1250	13.77	11.60	9.15	6.41	3.37								
1300	17.47	15.29	12.84	10.1	7.06	3.70							
1350	21.6	19.38	16.93	14.19	11.15	7.78	4.09						
1400	26.0	23.9	21.4	18.67	15.63	12.26	8.57	4.48					
1450	30.9	28.8	26.3	23.6	20.5	17.17	13.47	9.39	4.91				
1500	36.3	34.1	31.7	28.9	25.9	22.5	18.82	14.73	10.26	5.35			
1550	42.1	39.9	37.5	34.7	31.7	28.3	24.6	20.5	16.05	11.15	5.80		
1600	48.4	46.2	43.8	41.0	38.0	34.6	30.9	26.8	22.4	17.46	12.11	6.32	

# 附录 21

## 常用耐火材料的主要性能

材 料	体积密度 $\gamma$ g/cm <sup>3</sup>	耐火度 (不低于°C)	常温耐压强度 (MPa)	最高使用温度 (°C)	导热系数 $\lambda$ (kJ/m·h·°C)	比 热 C (kJ/kg·°C)
QN-1.3b	1.3	1710	4.41	1300	$1.47+1.26 \times 10^{-2}t_p$	$0.84+0.26 \times 10^{-3}t_p$
QN-1.3b	1.3	1670	3.43	1300	$1.47+1.26 \times 10^{-2}t_p$	$0.84+0.26 \times 10^{-3}t_p$
QN-1.0	1.0	1670	2.94	1250	$1.05+0.92 \times 10^{-2}t_p$	$0.84+0.26 \times 10^{-3}t_p$
QN-0.8	0.8	1670	1.96	1250	$0.75+1.55 \times 10^{-2}t_p$	$0.84+0.26 \times 10^{-3}t_p$
QN-0.4	0.4	1670	0.59	1150	$0.33+0.59 \times 10^{-2}t_p$	$0.84+0.26 \times 10^{-3}t_p$

轻 质 粘 土 砖

(续表)

材 料	体积密度 $\gamma$ (g/cm <sup>3</sup> )	耐火度 (不低于°C)	常温耐压强度 (MPa)	最高使用温度 (°C)	导热系数 $\lambda$ (kJ/m·h·°C)	比 热 C (kJ/kg·°C)
普通粘土砖	1.8~2.2	1610~1730	12.26~14.71	1400	$2.51+2.30 \times 10^{-3}t_p$	$0.84+0.26 \times 10^{-3}t_p$
普通高铝砖	2.3~2.75	1750~1790	39.23	1500	$7.54+6.70 \times 10^{-3}t_p$	$0.84+0.234 \times 10^{-3}t_p$
泡沫高铝砖	<0.8	>1770	0.59~2.94	1150~1300	—	$0.84+0.234 \times 10^{-3}t_p$
刚玉制品	2.6~3.4	>1900	>49.03	1800	$7.54+6.70 \times 10^{-3}t_p$	$0.80+0.419 \times 10^{-3}t_p$
泡沫氧化铝砖	<0.8	>1900	0.59~2.94	1350	—	$0.80+0.419 \times 10^{-3}t_p$
石墨制品	1.6	>3000	19.61~29.42	2000	—	—
碳化硅制品	2.4	2000~2100	—	1500	1000°C时, 38.52 1200°C时, 33.49	$0.96+0.147 \times 10^{-3}t_p$

注:  $t_p$ —平均温度°C。

## 主要参考文献

- 〔1〕 电机工程手册、机械工程手册、电机工程手册编辑委员会,机械工业出版社,1982年6月。
- 〔2〕 电力工程设计手册,西北电力设计院、东北电力设计院编,上海人民出版社,1973年2月。
- 〔3〕 电工手册《电工手册》编写组,上海科学技术出版社,1986年5月。
- 〔4〕 工厂配电设计手册,航空工业部第四规划设计研究院等编,水利电力出版社,1983年11月。
- 〔5〕 实用低压电器,吴肇基,水利电力出版社,1985年10月。
- 〔6〕 农村电工手册,《农村电工手册》编写组,水利电力出版社,1974年11月。
- 〔7〕 可控硅技术,武钢修建部电修车间、武汉钢铁学院,武钢钢铁研究所科技情报小组编,中国工业出版社,1971年5月。
- 〔8〕 可控硅整流装置,北京电机修理厂、清华大学自动化系编,科学出版社,1971年6月。
- 〔9〕 整流器ねよびサイリヌタ回路,吉田重藏编 共立出版株式会社,1974年6月。
- 〔10〕 电磁铁 蔡国廉编著,上海科学技术出版社,1970年



1月。

- [11] 电力内外线工程,铁道部第三设计院标准处编,机械工业出版社,1982年6月。
- [12] 变压器经济运行,胡景生著,天津科学技术出版社,1984年10月。
- [13] 上海市工厂企业电能平衡讲义,上海市计划用电办公室,1986年2月。
- [14] 交流电动机节能挖潜修理,赵家礼编著,机械工业出版社,1986年2月。
- [15] 农村小型水电站,华东水利学院《农村小型水电站》编写组,上海人民出版社,1973年10月。
- [16] 余热发电,许萃群编,上海科学技术出版社,1981年12月。
- [17] 低压电器设计手册,周茂祥主编,机械工业出版社,1992年10月。
- [18] 相序对线路电流的影响,洪度正,《电世界》,1986年8月。
- [19] 电动机寿命的预测,梁炜,《电世界》,1986年12月。