

# 目 录

## 前言

<b>第一章 直流电路计算</b> .....	1
<b>第一节 欧姆定律、电阻和电导</b> .....	1
一、欧姆定律 .....	1
二、导体电阻的计算 .....	7
三、电导、电导率 .....	7
<b>第二节 电池组电路计算</b> .....	13
一、电池组的串联 .....	13
二、电池组的并联 .....	14
三、电池组的混联 .....	14
<b>第三节 焦耳-楞次定律、电功和电功率计算</b> .....	21
一、电功 .....	21
二、电功率 .....	21
三、电能 .....	21
四、焦耳-楞次定律 .....	21
<b>第四节 简单直流电路计算</b> .....	23
一、电阻串联电路 .....	23
二、电阻并联电路 .....	25
三、电阻混联电路 .....	28
<b>第五节 复杂直流电路计算</b> .....	39
一、基尔霍夫定律应用 .....	39
二、回路电流法 .....	45
三、星形和三角形联结电路等值换算 .....	52
四、戴维南定理 .....	59
五、叠加原理 .....	68
<b>第六节 电容器计算</b> .....	71

一、电容器的并联	75
二、电容器的串联	75
三、电容器的混联	76
第七节 磁路定律、电磁感应及楞次定律	82
一、磁路定律	82
二、电磁感应及楞次定律	89
第八节 直流输电线路计算	92
一、基本公式	93
二、计算实例	93
第二章 交流电路计算	101
第一节 交流电基本概念	101
一、交流电的周期、频率和角频率	101
二、交流电的瞬时值、最大值、有效值和平均值	102
三、相位、初相位和相位差	103
第二节 简单正弦交流电路计算	107
一、纯电阻电路	107
二、纯电感电路	109
三、纯电容电路	111
四、电阻、电感串联电路	114
五、电阻、电容串联电路	124
六、电阻、电感、电容串联电路	128
七、电阻、电感并联电路	132
八、电阻、电容并联电路	134
九、电阻、电感、电容并联电路	136
十、电阻、电感串联与电容并联电路	139
十一、电阻、电感、电容的混联电路	145
第三节 三相交流电路计算	154
一、常用术语	154
二、负载的星形联结	154
三、负载的三角形联结	159
第四节 交流电路谐振计算	166
一、串联谐振	166

二、并联谐振 .....	172
三、串并联谐振 .....	181
<b>第五节 交流输电线路计算 .....</b>	<b>183</b>
一、单相输电线 .....	183
二、三相输电线 .....	184
三、线路电压损失计算 .....	192
<b>第三章 三相异步电动机 .....</b>	<b>203</b>
<b>第一节 三相异步电动机基本概念 .....</b>	<b>203</b>
一、三相异步电动机铭牌意义、同步转速、转差率 .....	203
二、三相异步电动机转子电磁场转速和转子频率 .....	206
三、定子绕组及绕组系数计算 .....	208
四、三相异步电动机损耗、功率及效率计算 .....	214
五、交流绕组电动势及电流计算 .....	226
六、转矩及机械特性 .....	238
<b>第二节 三相异步电动机的启动、调速、制动计算 .....</b>	<b>247</b>
一、三相异步电动机启动方法及计算 .....	247
二、绕线转子异步电动机启动电阻计算 .....	261
三、异步电动机调速方法及计算 .....	264
四、单速绕组改多速绕组的计算 .....	276
五、三相异步电动机制动方法及计算 .....	295
<b>第三节 三相异步电动机经济运行及节电计算 .....</b>	<b>308</b>
一、空载电流的估算 .....	308
二、电动机负载率的计算 .....	312
三、电动机在任意负载率下的效率计算 .....	314
四、电动机在任意负载率下的功率因数计算 .....	314
五、电动机在任意负载率下的损耗计算 .....	316
六、额定电压下连续工作的电动机经济负载率的计算 .....	319
七、更换电动机的节电计算 .....	321
八、电动机调节电压的节电计算 .....	327
九、电源质量对电动机性能影响的计算 .....	330
十、更换合理电动机的节电计算 .....	340
十一、磁性槽泥节电计算 .....	345

第四节 三相异步电动机应用计算 .....	350
一、三相异步电动机改电压计算 .....	350
二、改接绕组联结方式适应电源电压变化的计算 .....	360
三、圆导线代用计算 .....	365
四、电动机现场烘干计算 .....	371
五、电动机改极计算 .....	376
六、改频、改压、改极重绕计算 .....	384
七、甩线图法的计算 .....	389
八、改制三相正弦绕组的计算 .....	392
九、三相异步电动机改成三相异步发电机的计算 .....	404
十、三相异步电动机空壳铁心配定子绕组的简易计算 .....	408
第四章 直流电机常用参数计算 .....	422
第一节 直流电机的基本概念 .....	422
一、直流电机结构、工作原理和铭牌数据 .....	422
二、直流电机励磁方式 .....	423
三、直流电动机和直流发电机的平衡方程式 .....	424
四、直流电机可逆原理 .....	428
五、直流电动机工作特性和机械特性 .....	429
第二节 直流电机计算实例 .....	429
一、他励直流发电机 .....	429
二、他励直流电动机 .....	431
第三节 直流电动机调速及计算 .....	448
一、并励直流电动机调速计算 .....	448
二、串励直流电动机调速计算 .....	458
三、复励直流电动机调速计算 .....	465
第四节 直流电动机起动及计算 .....	466
一、概述 .....	466
二、起动电阻的计算 .....	466
第五节 直流电动机的机械特性及计算 .....	473
一、基本概念 .....	473
二、机械特性计算 .....	474
第六节 直流电动机制动方式及计算 .....	479

一、直流电动机制动概念 .....	179
二、计算实例 .....	182
<b>第七节 直流电动机改压重绕计算 .....</b>	<b>181</b>
一、改电压目的和原则 .....	181
二、励磁绕组改压计算 .....	183
三、电枢绕组及换向极绕组改压重绕计算 .....	187
<b>第八节 直流发电机计算 .....</b>	<b>197</b>
一、直流发电机接线及电流、电压关系式 .....	197
二、直流电枢绕组及励磁绕组 .....	198
三、发电机的基本方程式 .....	501
四、计算实例 .....	503
<b>第五章 变压器的计算.....</b>	<b>514</b>
<b>第一节 基本概念 .....</b>	<b>514</b>
一、变压器工作原理及结构特点 .....	514
二、变压器铭牌数据 .....	515
三、感应电动势计算 .....	521
<b>第二节 变压器运行 .....</b>	<b>524</b>
一、变压器空载运行 .....	524
二、变压器负载运行 .....	527
三、变压器运行特性计算 .....	532
四、变压器能量流程图 .....	540
<b>第三节 变压器联结组别及并联运行计算 .....</b>	<b>541</b>
一、绕组的标记及极性 .....	541
二、三相变压器绕组的联结 .....	544
三、三相变压器绕组的联结组别 .....	547
四、变压器并联意义及并联条件 .....	553
五、并联变压器要求额定电压相等 .....	554
六、并联变压器要求短路电压接近相等 .....	564
七、并联运行变压器的容量比 .....	581
八、确定并联变压器的最佳台数 .....	589
<b>第四节 变压器计算.....</b>	<b>610</b>
一、小型壳式变压器计算 .....	610

---

二、小型心式变压器计算 .....	622
三、三相小型变压器计算 .....	632
<b>第五节 变压器试验及计算 .....</b>	<b>637</b>
一、变压器线圈直流电阻的测试 .....	637
二、三相变压器的变压比测试 .....	642
三、工频耐压试验 .....	649
四、变压器空载试验 .....	654
五、感应高压试验 .....	670
六、变压器短路试验 .....	673
<b>第六章 其他电气设备计算 .....</b>	<b>682</b>
<b>第一节 单相异步电动机重绕计算 .....</b>	<b>682</b>
一、改电压计算 .....	682
二、简易重绕计算 .....	685
<b>第二节 电阻炉计算 .....</b>	<b>696</b>
一、电阻炉额定值计算 .....	696
二、电阻炉用线材直径和带材尺寸计算 .....	697
三、简易计算法 .....	708
四、碳化硅电阻炉计算 .....	713
<b>第三节 常用低压电器的选择计算 .....</b>	<b>719</b>
一、交流接触器的选择计算 .....	719
二、热继电器选择计算 .....	722
三、断路器选择 .....	723
四、熔断器选择计算 .....	724
五、低压开关及刀形转换开关的选择 .....	727
六、磁力起动器选择 .....	728
<b>第四节 自耦变压器计算 .....</b>	<b>732</b>
一、概述 .....	732
二、铭牌数据及计算 .....	733
<b>第五节 弧焊变压器计算 .....</b>	<b>739</b>
一、概述 .....	739
二、增大漏磁的弧焊变压器结构形式 .....	740
三、弧焊机绕组联结法 .....	741

---

四、变压器空载和短路运行分析 .....	742
五、弧焊机参数的调整 .....	744
六、弧焊变压器计算 .....	746
<b>第六节 起重电磁铁线圈导线代用计算 .....</b>	<b>748</b>
一、提高起重电磁铁起重量的代用计算 .....	748
二、保持电磁铁吸力不变功率可降低的计算 .....	750
三、保持功率和安匝不变的代用计算 .....	752
<b>第七章 电工仪表及测量计算 .....</b>	<b>753</b>
<b>第一节 电表量程的扩大 .....</b>	<b>753</b>
一、分流器 .....	753
二、附加电阻 .....	757
三、电压表盘上“每伏多少欧”表示的意义 .....	758
<b>第二节 多种测量范围电表 .....</b>	<b>759</b>
一、多量限的直流电流表和分流电阻的计算 .....	759
二、多量限的直流电压表和附加电阻的计算 .....	761
三、多量限的交流电压表和附加电阻的计算 .....	763
<b>第三节 功率测量的计算 .....</b>	<b>767</b>
一、直流电功率的测量 .....	767
二、交流电功率的测量 .....	769
<b>第四节 功率因数校正的计算 .....</b>	<b>780</b>
一、基本公式 .....	780
二、计算实例 .....	780
<b>第五节 有功电度数计算 .....</b>	<b>784</b>
一、不经互感器的电度表 .....	785
二、经互感器接入时电度数计算 .....	785
<b>第六节 电阻的测量计算 .....</b>	<b>786</b>
一、用电压表和电流表测量电阻 .....	787
二、用比较法测量电阻 .....	788
三、用欧姆表测量电阻 .....	791
四、用电压表测量绝缘电阻 .....	792
五、用电桥测量电阻 .....	795
<b>第七节 交流电参数的测量 .....</b>	<b>797</b>

一、用三表法测量交流阻抗 .....	787
二、用电流表和电压表测量电感 .....	798
三、电感电桥法 .....	800
四、用电流表和电压表测量电容 .....	802
五、用电容电桥法测量电解电容 .....	803
<b>第八节 温度补偿的计算 .....</b>	<b>804</b>
一、串联温度补偿线路 .....	804
二、串并联温度补偿 .....	807
<b>第九节 电气测量仪表的误差及准确度 .....</b>	<b>810</b>
一、误差的几种表达形式 .....	810
二、仪表准确度 .....	811
<b>第八章 电子电路计算 .....</b>	<b>818</b>
<b>第一节 整流电路计算 .....</b>	<b>818</b>
一、单相整流电路 .....	818
二、三相整流电路 .....	826
三、整流元件的串联和并联 .....	828
<b>第二节 晶闸管交流器计算 .....</b>	<b>830</b>
一、晶闸管的选择 .....	830
二、单相半波晶闸管整流电路 .....	831
三、单相全波晶闸管整流电路 .....	834
四、单相桥式晶闸管整流电路 .....	835
<b>第三节 放大器电路计算 .....</b>	<b>838</b>
一、交流放大电路 .....	838
二、直流放大电路 .....	858
三、反馈放大电路 .....	867
四、功率放大电路 .....	874
<b>第四节 晶体管开关电路计算 .....</b>	<b>881</b>
一、单管延时开关 .....	881
二、双稳态电路 .....	883
三、单稳态电路 .....	886
四、射极耦合双稳态电路 .....	889
五、无稳态电路 .....	890



第五节 门电路计算 .....	892
一、二极管与门电路 .....	892
二、二极管或门电路 .....	895
三、非门电路 .....	897
四、与非门电路 .....	900
第六节 直流稳压电源计算 .....	903
一、硅稳压管稳压电路 .....	904
二、串联型晶体管稳压电源 .....	906
第九章 各种机械设备动力计算 .....	910
第一节 电动机容量的选择方法 .....	910
一、连续工作制电动机容量的选择 .....	910
二、短期工作制电动机容量的选择 .....	912
三、周期性断续工作制电动机容量的选择 .....	913
第二节 金属切削机床用电动机功率计算 .....	914
一、金属切削机床的主轴、进给和辅助电动机功率计算 .....	914
二、几种主要金属切削机床用的电动机功率计算 .....	916
三、用统计法计算电动机功率 .....	922
第三节 起重机电动机功率计算 .....	924
一、起重机各机构所需电动机功率计算 .....	924
二、起重机用吊车电动机功率计算 .....	926
第四节 输送机电动机功率计算 .....	927
一、普通带式输送机 .....	927
二、钢丝绳牵引带式输送机 .....	929
三、带式输送机 .....	930
四、悬挂输送机 .....	931
五、螺旋输送机 .....	932
六、气力输送装置 .....	932
七、卷扬机 .....	933
八、埋刮板输送机 .....	933
九、架空索道 .....	934
十、叉车 .....	936
第五节 电梯及自动扶梯电动机功率计算 .....	938

一、电梯用电动机功率计算 .....	938
二、自动扶梯用电动机功率计算 .....	938
<b>第六节 风机及空气压缩机电动机功率计算 .....</b>	<b>940</b>
一、风机用电动机的功率计算 .....	940
二、空气压缩机用电动机功率计算 .....	940
<b>第七节 制冷设备电动机功率计算 .....</b>	<b>945</b>
一、活塞式制冷压缩机 .....	945
二、离心式制冷机 .....	946
三、螺杆式制冷机 .....	947
<b>第八节 离心机电动机功率计算 .....</b>	<b>948</b>
一、功率消耗的计算 .....	948
二、轴功率计算 .....	950
三、电动机功率计算 .....	952
<b>第九节 泵用电动机功率计算 .....</b>	<b>953</b>
一、离心泵用电动机功率计算 .....	953
二、往复泵用电动机功率计算 .....	953
三、齿轮泵用电动机功率计算 .....	954
四、螺杆泵用电动机功率计算 .....	954
五、液环泵用电动机功率计算 .....	955
六、水轮泵用电动机功率计算 .....	955
七、射流深井泵用电动机功率计算 .....	955
八、射流式泥浆泵用电动机功率计算 .....	956
九、真空泵用电动机功率计算 .....	956
<b>第十节 农业机械电动机功率计算 .....</b>	<b>957</b>
一、旋耕机电动机功率计算 .....	957
二、收获机械电动机功率计算 .....	958
三、喷灌设备电动机功率计算 .....	960
四、畜牧机械电动机功率计算 .....	960
五、钻机电动机功率计算 .....	962
六、拖拉机电动机功率计算 .....	963
<b>第十一节 矿山机械电动机功率计算 .....</b>	<b>965</b>
一、凿岩机电动机功率计算 .....	965

---

二、井下装载机电动机功率计算 .....	965
三、潜孔钻机电动机功率计算 .....	967
四、牙轮钻机电动机功率计算 .....	967
五、矿用挖掘机电动机功率计算 .....	968
六、采煤设备电动机功率计算 .....	969
七、矿井提升机电动机功率计算 .....	970
八、破碎机电动机功率计算 .....	970
九、磨碎机电动机功率计算 .....	973
十、振动筛电动机功率计算 .....	973
十一、重力选矿电动机功率计算 .....	974

# 第一章 直流电路计算

## 第一节 欧姆定律、电阻和电导

### 一、欧姆定律

它是说明电阻、电压和电流之间关系的客观规律，是分析和计算电路的重要基本定律。

#### 1. 一段无源支路的欧姆定律

当导体的温度不变时，通过电阻中的电流与加在电阻两端的电压成正比，而与电阻成反比。当电流与电压的参考方向一致时，如图 1-1 所示，欧姆定律表示的电压、电流、电阻之间关系为

$$I = \frac{U}{R}$$

或

$$U = IR$$

$$R = \frac{U}{I}$$

式中  $I$ ——支路电流(A)；  
 $U$ ——支路两端电压(V)；  
 $R$ ——电阻( $\Omega$ )。

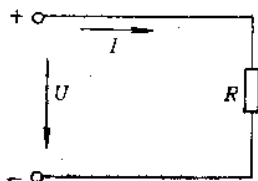


图 1-1 一段无源支路

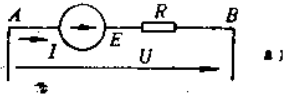
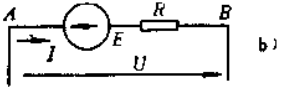
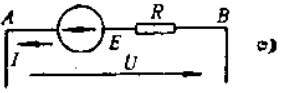
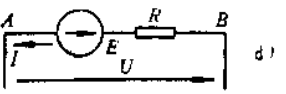
#### 2. 一段含源支路的欧姆定律

当导体的温度不变时，通过一段含源支路的电流不仅与支路的端电压有关，还与支路的电动势有关。同时取决于电动势  $E$ 、电压  $U$  与电流  $I$  参考方向的选择，见表 1-1。

#### 3. 全电路的欧姆定律

通过闭合回路的电流与回路的电动势成正比，而与回路的全部电阻成反比。当回路电动势  $E$  与回路电压  $U$  的方向一致时，如图 1-2 所示。

表1-1 一段含源支路的欧姆定律

电 路	欧姆定律 表达形式	说 明
	$I = \frac{E+U}{R}$	$E$ 、 $U$ 的方向与 $I$ 的方向一致
	$I = \frac{-E+U}{R}$	$E$ 与 $I$ 的方向相反 $U$ 与 $I$ 的方向一致
	$I = \frac{E-U}{R}$	$E$ 与 $I$ 的方向一致, $U$ 与 $I$ 的方向相反
	$I = \frac{-E-U}{R}$	$E$ 、 $U$ 的方向与 $I$ 的方向相反

$$I = \frac{E}{\Sigma R}$$

式中  $E$ ——回路的电动势(V);

$\Sigma R$ ——回路中的总电阻( $\Omega$ );

$$\Sigma R = R_0 + R_1 + R$$

$R_0$ ——电源内阻( $\Omega$ );

$R_1$ ——回路中连线的电阻( $\Omega$ );

$R$ ——负载电阻( $\Omega$ )。

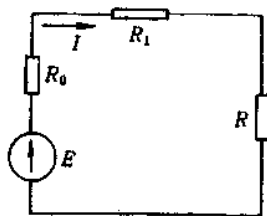


图1-2 闭合全电路

(1) 已知电压、电阻求电流

例1-1 某白炽灯的额定电压是220V, 灯丝电阻为484 $\Omega$ , 求流过灯丝的电流。

由欧姆定律可知, 电流为

$$I = \frac{U}{R} = \frac{220}{484} \approx 0.455\text{A}$$

**例1-2** 已知电炉的炉丝电阻为 $5\Omega$ ，如接在 $220\text{V}$ 电路上，求电流是多少；如改接到 $380\text{V}$ 电路上，电流又是多少。

当电压为 $220\text{V}$ 时，起动电流为

$$I = \frac{U}{R} = \frac{220}{5} = 44\text{A}$$

如改接到 $380\text{V}$ 电路上，电流为

$$I = \frac{U}{R} = \frac{380}{5} = 76\text{A}$$

**例1-3** 某直流电动机电枢内阻 $R_e = 0.5\Omega$ ，电动机额定电压 $U_e = 220\text{V}$ ，如果电动机直接起动，求起动电流 $I_e$ 是多少。

由欧姆定律可知起动电流为

$$I_e = \frac{U_e}{R_e} = \frac{220}{0.5} = 440\text{A}$$

**例1-4** 已知送话器的电阻 $R_1 = 50\Omega$ ，由电压为 $3\text{V}$ 的电源供电，当有人讲话时它的电阻 $R_2 = 40\Omega$ ，求送话器在无人讲话时和有人讲话时的电流是多少。

无人讲话时，电流为

$$I_1 = \frac{E}{R_1} = \frac{3}{50} = 0.06\text{A} = 60\text{mA}$$

有人讲话时，电流为

$$I_2 = \frac{E}{R_2} = \frac{3}{40} = 0.075\text{A} = 75\text{mA}$$

**例1-5** 在图1-3晶体管电路中，已知 $E_c$ 为 $12\text{V}$ ， $R_b$ 为 $120\text{k}\Omega$ ，求基极偏流 $I_b$ 为多少。

因为基极 $b$ 和发射极 $e$ 间电阻比偏流电阻 $R_b$ 小得多，可忽略不计，由欧姆定律得

$$I_b = \frac{E_c}{R_b} = \frac{12}{120 \times 10^3} = 1.0 \times 10^{-4}\text{A} = 100\mu\text{A}$$

**例1-6** 在图1-4中，已知 $E$ 为 $110\text{V}$ ，发电机内阻 $r_0$ 为 $0.4$

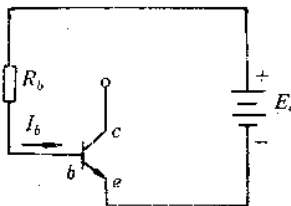


图1-3 晶体管电路

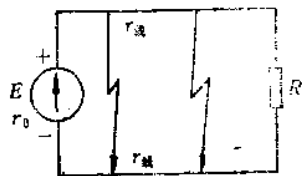


图1-4 有故障电路

$\Omega$ , 导线电阻  $r_{\text{线}}$  为  $0.3\Omega$ , 负载电阻  $R$  为  $10\Omega$ , 求:

- 1) 电路在正常工作时的电流  $I$ ;
- 2) 当负载两端发生短路时, 电源中通过的电流  $I'$ ;
- 3) 当电源两端发生短路时, 电源中通过的电流  $I''$ 。

1) 正常工作时的电流为

$$I = \frac{E}{r_0 + 2r_{\text{线}} + R}$$

$$= \frac{110}{0.4 + 2 \times 0.3 + 10} = 10\text{A}$$

2) 当负载两端发生短路时, 因短路导体的电阻接近于零, 所以通过电源的电流为

$$I' = \frac{E}{r_0 + 2r_{\text{线}}} = \frac{110}{0.4 + 2 \times 0.3} = 110\text{A}$$

3) 当电源两端发生短路时, 通过电源的电流为

$$I'' = \frac{E}{r_0} = \frac{110}{0.4} = 275\text{A}$$

(2) 已知电流、电阻求电压

**例1-7** 一台直流发电机励磁线圈的电阻为  $12.2\Omega$ , 需要通过  $900\text{mA}$  的电流建立磁场, 求线圈两端的励磁电压。

由欧姆定律, 励磁电压为

$$U = IR = 900 \times 10^{-3} \times 12.2 = 11\text{V}$$

**例1-8** 发电机的端电压为  $115\text{V}$ , 经过电阻为  $0.1\Omega$  的导线输

给电动机，如果这台电动机的电流为50A，求电动机输入端的电压是多少。

由欧姆定律可知，电阻上压降为

$$U = IR = 50 \times 0.1 = 5 \text{ V}$$

电动机输入端电压为

$$U_M = 115 - 5 = 110 \text{ V}$$

例1-9 为了要决定直流电源的电压，可将三个各为10、20与30Ω的电阻串联后，并接到该电源的两端。如果电路内的电流为2A，问电源的电压是多少。

根据欧姆定律，电源的电压为

$$U = I(R_1 + R_2 + R_3) = 2 \times (10 + 20 + 30) = 120 \text{ V}$$

例1-10 如果人体电阻最小为800Ω，已知通过人体的电流超过0.05A就会发生危险，试求安全工作电压是多少。

由欧姆定律可知，安全工作电压为

$$U = IR = 0.05 \times 800 = 40 \text{ V}$$

因此安全电压应 $< 40 \text{ V}$ 。

例1-11 电工仪表的内阻为1.2kΩ，使表针满偏转电流为100μA，求此电表两端电压是多少。

由欧姆定律可知，电表两端电压为

$$U = I_x R_x = 100 \times 10^{-6} \times 1.2 \times 10^3 = 0.12 \text{ V}$$

例1-12 晶体管放大电路中的负载电阻 $R_c$ 为500Ω，集电极静态电流 $I_c$ 为2mA，求电阻 $R_c$ 上的电压。

由欧姆定律可知， $R_c$ 上的电压为

$$U_c = I_c R_c = 2 \times 10^{-3} \times 500 = 1.0 \text{ V}$$

(3) 已知电流、电压求电阻

例1-13 手电筒的电池电压为3V，通过电珠的电流为150mA，求电珠的电阻。

由欧姆定律可知，电阻为

$$R = \frac{U}{I} = \frac{3}{0.15} = 20 \Omega$$



例1-14 图1-5测量二极管正向电阻电路,电源电压为25V,通过二极管的额定电流为100mA,求电路需加入多大的限流电阻。

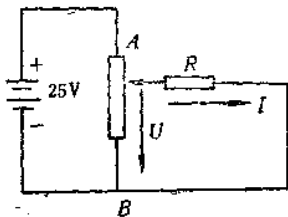


图1-5 二极管正向电阻测量电路

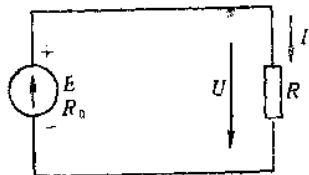


图1-6 有源电路

$$R = \frac{U}{I} = \frac{25}{100 \times 10^{-3}} = 250 \Omega$$

例1-15 电烙铁的使用电压为220V,通过电阻丝的电流为0.45A,求电阻丝的电阻。

$$R = \frac{U}{I} = \frac{220}{0.45} \approx 489 \Omega$$

例1-16 如图1-6所示,已知电源电动势 $E = 115\text{V}$ ,负载两端的电压 $U = 100\text{V}$ ,电源内阻 $R_0 = 1 \Omega$ ,求电流 $I$ 、负载电阻 $R$ 和电源内部电压降 $U_0$ 。

由欧姆定律可知,电流为

$$I = \frac{E - U}{R_0} = \frac{115 - 100}{1} = 15\text{A}$$

负载电阻为

$$R = \frac{U}{I} = \frac{100}{15} \approx 6.67 \Omega$$

电源内部电压降为

$$U_0 = E - U = 115 - 100 = 15\text{V}$$

## 二、导体电阻的计算

导体电阻的大小与导体的长度成正比，与横截面积成反比，并与材料性质有关，其计算公式为

$$R = \rho \frac{l}{S}$$

式中  $R$ ——导体的电阻( $\Omega$ )；  
 $l$ ——导体的长度(m)；  
 $S$ ——导体的横截面积( $\text{mm}^2$ )；  
 $\rho$ ——导体的电阻率( $\Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$ )。

不同的导体有不同的电阻率，而电阻率又随温度的变化而改变，所以导体的电阻也随温度的变化而改变，即

$$R_2 = R_1 [1 + \alpha(t_2 - t_1)]$$

式中  $R_2$ ——温度为 $t_2$ 时导体的电阻( $\Omega$ )；  
 $R_1$ ——温度为 $t_1$ 时导体的电阻( $\Omega$ )；  
 $\alpha$ ——导体电阻的温度系数( $1/^\circ\text{C}$ )。

## 三、电导、电导率

电导是电阻的倒数，表示导体导电的性能，用 $G$ 表示，单位是 $\text{S}$ 。

$$G = \frac{1}{R}$$

电导率是电阻率的倒数，表示物质导电的性能，用 $\gamma$ 表示，单位是 $\text{m}/\Omega \cdot \text{mm}^2$ ，其公式为

$$\gamma = \frac{1}{\rho}$$

**例1-17** 导线截面积为 $4\text{mm}^2$ ，长度为 $500\text{m}$ 的铝线，问导线有多大电阻。

查常用金属导体的电阻率表， $\rho = 0.0285\Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$ ，则铝线电阻为

$$R = \rho \frac{l}{S} = 0.0285 \times \frac{500}{4} \approx 3.56\Omega$$

例1-18 做一个小电炉，需要炉丝电阻为 $50\Omega$ ，现选用直径 $d$ 为 $0.4\text{mm}$ 的镍铬丝，问需要多长炉丝。

查表 $\rho = 1.08\Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$ ，

由镍铬丝直径，可算出它的截面积为

$$S = \frac{\pi d^2}{4} = \frac{3.14 \times (0.4)^2}{4} \approx 0.126\text{mm}^2$$

炉丝长度为

$$l = \frac{RS}{\rho} = \frac{50 \times 0.126}{1.08} \approx 5.83\text{m}$$

例1-19 有一个电炉，它的炉丝长为 $60\text{m}$ ，炉丝用镍铬丝，如果炉丝的电阻为 $6\Omega$ ，问这根炉丝的截面积是多大。

查表 $\rho = 1.08\Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$ ，则炉丝截面积为

$$S = \rho \frac{l}{R} = 1.08 \times \frac{60}{6} = 10.8\text{mm}^2$$

例1-20 塑料铜线的规格为7股，直径 $d = 0.52\text{mm}$ ，长度为 $100\text{m}$ ，问它的电阻是多少。

查表 $\rho = 0.0184\Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$ ，则铜线的截面积为

$$S = n \frac{\pi d^2}{4} = 7 \times \frac{3.14 \times (0.52)^2}{4} \approx 1.49\text{mm}^2$$

标称截面积 $S'$ 为 $1.5\text{mm}^2$ ，则铜线电阻为

$$R = \rho \frac{l}{S'} = 0.0184 \times \frac{100}{1.5} \approx 1.23\Omega$$

例1-21 如果长为 $200\text{m}$ ，直径为 $5\text{mm}$ 的导线电阻是 $0.2\Omega$ ，若用同一金属制成截面积为 $6\text{mm}^2$ ，长为 $100\text{m}$ 的导线，问电阻等于多少。

首先由已知条件求出该金属的电阻率。

直径 $d$ 为 $5\text{mm}$ 的导线，截面积为

$$S = \frac{\pi d^2}{4} = \frac{3.14 \times 5^2}{4} \approx 19.6\text{mm}^2$$

电阻率为

$$\rho = \frac{R_1 S}{l} = \frac{0.2 \times 19.6}{200} = 0.0196 \Omega \cdot \text{mm}^2 / \text{m}$$

然后可求出该金属制成的新导线电阻，即

$$R_2 = \rho \frac{l'}{S'} = 0.0196 \times \frac{100}{6} \approx 0.327 \Omega$$

例1-22 如果用电阻率  $\rho = 10^{-5} \Omega \cdot \text{cm}$ 、截面积为  $2.5 \text{mm}^2$  的导线绕制  $200 \Omega$  的电阻器，问需要导线多少米。

先将电阻率  $\rho$  的单位化为  $\Omega \cdot \text{m}$ ，即

$$\rho = 10^{-5} \Omega \cdot \text{m} = 10^{-5} \times 10^{-2} \Omega \cdot \text{m} = 10^{-7} \Omega \cdot \text{m}$$

这时截面的单位应化为

$$S = 2.5 \text{mm}^2 = 2.5 \times 10^{-6} \text{m}^2$$

导线长度为

$$l = \frac{RS}{\rho} = \frac{200 \times 2.5 \times 10^{-6}}{10^{-7}} = 5000 \text{m}$$

例1-23 采用截面积为  $0.06 \text{mm}^2$  的锰铜丝密绕在长为  $40 \text{mm}$ （每端留余量  $5 \text{mm}$ ）、宽为  $10 \text{mm}$ 、厚为  $2 \text{mm}$  的胶布板上，制成一个线绕电阻，试计算出它的电阻值。

先根据锰铜丝的截面积求出它的直径，即

$$d = \sqrt{\frac{4S}{\pi}} = \sqrt{\frac{4 \times 0.06}{3.14}} \approx 0.276 \text{mm}$$

在胶布板上能绕制的长度为  $40 - 2 \times 5 = 30 \text{mm}$ ，如果设可绕的匝数为  $N$

$$N = \frac{30}{0.276} \approx 109$$

整个锰铜丝的长度为

$$l = 109 \times (20 + 4) \approx 2620 \text{mm} = 2.62 \text{m}$$

查表  $\rho = 0.42 \Omega \cdot \text{mm}^2 / \text{m}$ ，则线绕电阻为

$$R = \rho \frac{l}{S} = 0.42 \times \frac{2.62}{0.06} \approx 18.3 \Omega$$

例1-24 已知漆包铜线的直径  $d = 0.15\text{mm}$ ，线圈的匝数  $N = 2000$  匝，每匝的平均长度  $l_0 = 40\text{mm}$ ，求铜线的电阻。

绕制线圈所用导线的总长度为

$$l = Nl_0 = 2000 \times 40 = 80000\text{mm} = 80\text{m}$$

导线截面积为

$$S = \frac{\pi d^2}{4} = \frac{3.14 \times (0.15)^2}{4} \approx 0.0177\text{mm}^2$$

查表  $\rho = 0.0184\Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$ ，则线圈电阻为

$$R = \rho \frac{l}{S} = 0.0184 \times \frac{80}{0.0177} \approx 83.2\Omega$$

例1-25 设直径为  $3\text{mm}$ ，长度为  $2000\text{m}$  的硬铜线电阻为  $8\Omega$ ，求直径为  $6\text{mm}$ 、长度为  $4000\text{m}$  的硬铜线的电阻。

由圆的面积公式  $S = \frac{\pi d^2}{4}$  知

当同一导线直径  $d$  为原导线 2 倍时，则该导线的面积  $S$  为原导线面积的 4 倍，则有

$$R = \rho \frac{l}{S} = \rho \frac{2l_0}{4S_0} = \rho \frac{l_0}{S_0} \cdot \frac{2}{4} = 8 \times \frac{2}{4} = 4\Omega$$

例1-26 当长度相等的铝线和铜线，如果电阻相等时，求铝线的截面积应为铜线的几倍。

设铝线和铜线的电阻率、截面积各为  $\rho_{\text{Al}}$ 、 $S_{\text{Al}}$ 、 $\rho_{\text{Cu}}$ 、 $S_{\text{Cu}}$ ，则

$$R = \rho_{\text{Al}} \frac{l}{S_{\text{Al}}} = \rho_{\text{Cu}} \frac{l}{S_{\text{Cu}}}$$

$$\frac{\rho_{\text{Al}}}{S_{\text{Al}}} = \frac{\rho_{\text{Cu}}}{S_{\text{Cu}}}$$

$$S_{\text{Al}} = \frac{\rho_{\text{Al}}}{\rho_{\text{Cu}}} S_{\text{Cu}} = \frac{0.0285}{0.0184} S_{\text{Cu}} \approx 1.59 S_{\text{Cu}}$$

铝线截面积约为铜线的 1.59 倍

**例1-27** 如果将电线拉长到4倍长度而保持截面均匀, 认为电线总体积不变, 问此时的电阻和直径是原来的几倍。

由体积公式  $V = Sl$  可知:

若长度  $l$  为原来长度4倍, 截面积  $S$  则为原来的1/4, 则

$$R' = \rho \frac{l'}{S'} = \rho \frac{4l}{\frac{1}{4}S} = 16 \times \rho \frac{l}{S} = 16R$$

因此电阻为原来的16倍

由圆的面积公式  $S = \frac{\pi d^2}{4}$  可知:

$$d = \sqrt{\frac{4}{\pi} S} = \sqrt{\frac{4}{\pi}} \sqrt{S} = K \sqrt{S}$$

$$d' = K \sqrt{\frac{S}{4}} = K \sqrt{S} \frac{1}{\sqrt{4}} = \frac{1}{2} d$$

所以直径为原来的一半。

**例1-28** 把一定长度导线的直径减半, 其电阻应为原来的几倍。

$$\begin{aligned} R' &= \rho \frac{l'}{S'} = \rho \frac{l'}{\frac{\pi d'^2}{4}} = \rho \frac{l}{\frac{\pi}{4} \left(\frac{d}{2}\right)^2} \\ &= 4\rho \frac{l}{\pi d^2} = 4R \end{aligned}$$

其电阻为原来的4倍。

**例1-29** 电阻丝的半径减半, 长度增长一倍时, 其电阻应为原来的几倍。

$$R' = \rho \frac{l'}{S'} = \rho \frac{l'}{\pi r'^2} = \rho \frac{2l}{\pi \left(\frac{r}{2}\right)^2} = 8 \rho \frac{l}{S} = 8R$$

其电阻应为原来的8倍。

例1-30 某电解车间的一条直流线路，长为400m，原来用截面积为 $16\text{mm}^2$ 的橡皮绝缘铜线，在检修发现导线绝缘老化，打算换新线，并以铝代铜，在技术上要求导线电阻不应增加，试求铝线的截面积。

首先求出原来铜导线的电阻，查表 $\rho_{\text{Cu}} = 0.0175\Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$ ，则有

$$R = \rho_{\text{Cu}} \frac{l}{S} = 0.0175 \times \frac{400 \times 2}{16} = 0.875\Omega$$

查表得铝的电阻率 $\rho_{\text{Al}} = 0.0285\Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$ ，则有

$$S_{\text{Al}} = \rho_{\text{Al}} \frac{l}{R} = 0.0285 \times \frac{400 \times 2}{0.875} \approx 26.1\text{mm}^2$$

根据线径标准，可选用 $55\text{mm}^2$ 的铝线。

例1-31 已知铜导线的长度为200m，截面积为 $0.15\text{mm}^2$ ，求导线在温度为 $40^\circ\text{C}$ 时的电阻。

先求出在常温（ $t_1 = 20^\circ\text{C}$ ）条件下的电阻，即

$$R_1 = \rho \frac{l}{S} = 0.0175 \times \frac{200}{0.15} \approx 23.3\Omega$$

查常用金属导线的电阻温度系数表， $\alpha = 0.00395^\circ\text{C}^{-1}$ ，在温度为 $40^\circ\text{C}$ 时的电阻，即

$$\begin{aligned} R_2 &= R_1 [1 + \alpha(t_2 - t_1)] \\ &= 23.3 \times [1 + 0.00395 \times (40 - 20)] = 41.7\Omega \end{aligned}$$

例1-32 当环境温度 $t_1 = 20^\circ\text{C}$ 时，电动机绕组的电阻 $R_1 = 0.2\Omega$ ，在电动机温度升高为 $t_2$ 后，绕组的电阻变为 $R_2 = 0.22\Omega$ ，求电动机的工作温度，设电动机绕组电阻温度系数 $\alpha = 0.00395^\circ\text{C}^{-1}$ 。

由 $R_2 = R_1 [1 + \alpha(t_2 - t_1)]$ 可导出：

$$t_2 = \frac{R_2}{\alpha R_1} - T_1 = \frac{0.22 - 0.2}{0.00395 \times 0.2} + 20 \approx 45.3^\circ\text{C}$$

例1-33 有一根铁丝，在 $0^\circ\text{C}$ 时的电阻为 $200\Omega$ ，求加热到 $100^\circ\text{C}$ 时的电阻。

查表  $\alpha = 0.0062\text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$ ，铁丝加热到  $100\text{ }^{\circ}\text{C}$  时的电阻为

$$\begin{aligned}R_2 &= R_1 + \alpha R_1(t_2 - t_1) \\ &= 200 + 0.0062 \times 200 \times (100 - 0) = 324\Omega\end{aligned}$$

例1-34 某铜线圈的电阻在  $20\text{ }^{\circ}\text{C}$  时为  $28\Omega$ ，通电后温度升高，再测量线圈的电阻为  $30\Omega$ ，求线圈的温升是多少。

查表  $\alpha = 0.00395\text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$ ，由  $R_2 = R_1[1 + \alpha(t_2 - t_1)]$  导出温升，即

$$t_2 - t_1 = \frac{R_2 - R_1}{R_1 \alpha} = \frac{30 - 28}{28 \times 0.00395} \approx 18.1\text{ }^{\circ}\text{C}$$

例1-35 如果交流接触器线圈在  $20\text{ }^{\circ}\text{C}$  时的导线电阻为  $50\Omega$ ，温度升到  $60\text{ }^{\circ}\text{C}$  时，电阻增加到  $51\Omega$  时，计算此导线的温度系数。

由  $R_2 = R_1[1 + \alpha(t_2 - t_1)]$  导出，温度系数为

$$\alpha = \frac{R_2 - R_1}{R_1(t_2 - t_1)} = \frac{51 - 50}{50 \times (60 - 20)} \approx 0.0005\text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$$

例1-36 用镍铬合金丝做成的电热器，在  $20\text{ }^{\circ}\text{C}$  时的电阻为  $25\Omega$ ，当电阻升高到  $30\Omega$ ，求电热器的工作温度是多少

查表  $\alpha = 0.0004\text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$ ，则有

$$t_2 - t_1 = \frac{R_2 - R_1}{R_1 \alpha} = \frac{30 - 25}{25 \times 0.0004} = 500\text{ }^{\circ}\text{C}$$

工作温度为

$$t_2 = 20 + 500 = 520\text{ }^{\circ}\text{C}$$

## 第二节 电池组电路计算

### 一、电池组的串联

将一电池的正端与另一电池的负端互相连接起来，称为电池的串联，如图1-7所示。

电池组外侧正负两端的电压等于每个电池的电压之和，即

$$E = E_1 + E_2 + E_3$$

电池组的内电阻等于各个电池内阻之和，即

$$r = r_1 + r_2 + r_3$$



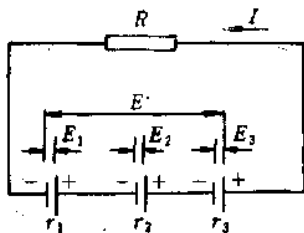


图1-7 电池组串联

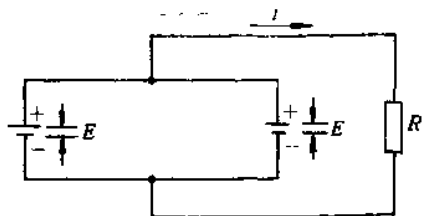


图1-8 电池组并联

若外加电阻为  $R$ ，则电池组供给的电流为

$$I = \frac{E_1 + E_2 + E_3}{R + r_1 + r_2 + r_3} = \frac{E}{R + r}$$

若有  $n$  个相同的电池相串联，则电流为

$$I = \frac{nE}{R + nr}$$

## 二、电池组的并联

将第一个电池的正端与第二个电池的正端连接起来；第一个电池的负端与第二个电池的负端连接起来，称为电池组的并联，如图1-8所示。

如果有  $n$  个电池并联，而每个电池的内阻均相等，则电池组的内电阻是  $r/n$ ，电流为

$$I = \frac{E}{R + \frac{r}{n}}$$

电池组的总电动势与每个单独电池的电动势相同，而电池组供给的总电流是每个电池所供给电流之和，即

$$E = E_1 = E_2 = E_3$$

$$I = I_1 + I_2 + I_3$$

## 三、电池组的混联

如图1-9所示，将几个电动势相同的串联电池组（每组由四

个电池串联) 互相并联起来, 其电动势为单个电池的三倍, 而可供给的总电流为每一串联电池组电流的三倍。

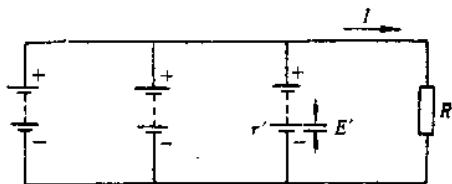


图1-9 电池组混联

若每个串联电池组里共有  $n$  个相同的电池, 则电动势为

$$E = nE'$$

每个串联电池组的内阻为

$$r_1 = nr'$$

若有  $m$  个串联电池组互相并联, 则混联后的总内阻为

$$r = \frac{r_1}{m} = \frac{nr'}{m}$$

通过外电阻的电流为

$$I = \frac{nE'}{\frac{nr'}{m} + R}$$

由此可见, 当电池组合时, 若能使组合后电池组的总内阻  $nr'/m$  恰好等于外电阻  $R$ , 则在外电阻内可得到最大电流。

例1-37 一电池组是由五个电池串联而成, 每个电池的电动势为1.5V, 内电阻为0.4Ω, 如果电池组的外端与一个1.5Ω的电阻连接起来, 求电路的电流是多少。

$$I = \frac{nE}{R + nr} = \frac{5 \times 1.5}{1.5 + 5 \times 0.4} = 3 \text{ A}$$

例1-38 电池组由五个电池并联而成, 每个电池的电动势为1.5V, 内电阻为0.6Ω, 将电池组与一个1Ω的外电阻并联, 求外电阻内的电流是多少。

$$I = \frac{E}{R + \frac{r}{n}} = \frac{1.5}{1 + \frac{0.6}{5}} \approx 0.682 \text{ A}$$

例1-39 电池组由六个具有电动势为1.5V和内电阻为4Ω的电池互相并联而成,当电池组供给电流到1Ω的外电阻,求通过外电阻的电流。

电池组的电阻为

$$\frac{r}{n} = \frac{4}{6} \approx 0.667\Omega$$

外电阻的电流为

$$I = \frac{E}{R + \frac{r}{n}} = \frac{1.5}{1 + 0.667} \approx 0.9A$$

例1-40 由四个电池构成的电池组,每个电池的电动势为1.5V,内电阻为2Ω,将电池组与外电阻为3Ω连接,求电池串联和并联时外电阻内的电流各为多少。

串联时

$$I = \frac{nE}{R + nr} = \frac{4 \times 1.5}{3 + 4 \times 2} \approx 0.545A$$

并联时

$$I = \frac{E}{R + \frac{r}{n}} = \frac{1.5}{3 + \frac{2}{4}} \approx 0.429A$$

例1-41 有三个电动势为1.5V,内电阻分别为0.5、1及1.5Ω的电池并联而成电池组,当跨接在电池组两端的外电阻为3Ω时,求外电阻内的电流和电池组的端电压。

设电池组的等值内电阻为r,各个电池的内电阻分别为r<sub>1</sub>、r<sub>2</sub>、r<sub>3</sub>,则有

$$\frac{1}{r} = \frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2} + \frac{1}{r_3} = \frac{1}{0.5} + \frac{1}{1} + \frac{1}{1.5} \approx 3.67\Omega$$

$$r = \frac{1}{3.67} \approx 0.272\Omega$$

外电阻的电流为

$$I = \frac{E}{R + r} = \frac{1.5}{3 + 0.272} \approx 0.458 \text{ A}$$

电池组的端电压为

$$U = IR = 0.458 \times 3 \approx 1.37 \text{ V}$$

**例1-42** 怎样去排列由100个电池构成的电池组，如果每个电池的电动势为1.5V，内电阻为1.5Ω，使通过6Ω外接电阻的电流最大。

满足最大电流的条件

$$\frac{n}{m} r' = R$$

$$\frac{n}{m} \times 1.5 = 6$$

又  $mn = 100$

$$m = \frac{100}{n}$$

则

$$\frac{n^2 \times 1.5}{100} = 6$$

$$n = \sqrt{\frac{6 \times 100}{1.5}} = 20$$

$$m = \frac{100}{n} = \frac{100}{20} = 5$$

故排列的方法是把五行电池组互相并联，而每行由20个电池串联而构成。最大电流为

$$I = \frac{nE}{\frac{n}{m} r' + R} = \frac{20 \times 1.5}{\frac{20}{5} \times 1.5 + 6} = 2.5 \text{ A}$$

**例1-43** 有一照明设备，需要供电电流为3A，电压为15V，如果电池组的每个电池的电动势为1.5V，内电阻为1Ω，问这些电池应该如何排列。

外电阻为

$$R = \frac{U}{I} = \frac{15}{3} = 5 \Omega$$

所以排列成的电池组的内电阻应等于外电阻，电池组的电动势为

$$nE' = U + IR = 15 + 3 \times 5 = 30V$$

式中  $U$ ——电灯两端的电压 (V)；

$I$ ——电灯内流过的电流(A)。

$$n = \frac{30}{E'} = \frac{30}{1.5} = 20$$

$$r = \frac{nr'}{m} = \frac{20 \times 1}{m} = 5 \Omega$$

$$m = \frac{20 \times 1}{5} = 4$$

所以需要由四组将20个电池串联的电池组并联起来，而电池数为  $m \times n = 4 \times 20 = 80$ 个。

**例1-44** 蓄电池组的电源电压为9V，用电阻  $R_1 = 2.8\Omega$ 接在它的两端，测出电流为3A，求它的内电阻为多少，如果负载电阻改为  $R_2 = 6\Omega$ ，而其他条件不变，问电流是多少。

内电阻为

$$r = \frac{E}{I_1} - R_1 = \frac{9}{3} - 2.8 = 0.2\Omega$$

电流为

$$I_2 = \frac{E}{R_2 + r} = \frac{9}{6 + 0.2} \approx 1.45A$$

**例1-45** 蓄电池的电动势为9V，当输出电流为10A时，蓄电池的端电压为8.5V，求电源产生的功率、内部损耗功率和输出给负载的功率，并求出在1min内电源产生的电能。

内电阻为

$$r = \frac{E - U}{I} = \frac{9 - 8.5}{10} = 0.05\Omega$$

总功率为

$$P_{\text{总}} = EI = 9 \times 10 = 90 \text{ W}$$

电压降为

$$U_{\text{降}} = Ir = 10 \times 0.05 = 0.5 \text{ V}$$

功率损耗为

$$P_{\text{损}} = U_{\text{降}}I = 0.5 \times 10 = 5 \text{ W}$$

负载功率为

$$P_{\text{负}} = P_{\text{总}} - P_{\text{损}} = 90 - 5 = 85 \text{ W}$$

电能量为

$$W = EIt = 9 \times 10 \times 60 = 5400 \text{ J}$$

**例1-46** 为了测定蓄电池的内阻，通常选一个阻值等于额定负载的电阻  $R$ ，接成图1-10所示电路。合上开关  $S$ ，电压表指示为  $60 \text{ V}$ ；再打开开关  $S$ ，电压表读数为  $62 \text{ V}$ ，如果  $R = 12 \Omega$ ，求蓄电池的内阻。

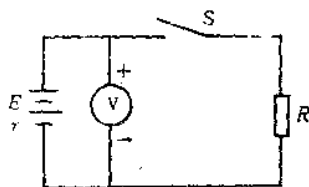


图1-10 测定蓄电池内阻

合上  $S$  后的电流为

$$I = \frac{U}{R} = \frac{60}{12} = 5 \text{ A}$$

电源电压等于开路电压

$$E = U_{\text{开}} = 62 \text{ V}$$

$$E = IR + Ir = U + Ir$$

蓄电池内阻为

$$r = \frac{E - U}{I} = \frac{62 - 60}{5} = 0.4 \Omega$$

**例1-47** 有干电池三个如图1-11所示，每个电池的电动势是  $1.5 \text{ V}$ ，内电阻为  $0.3 \Omega$ ，如果把它们并联后接一个  $0.3 \Omega$  的负载电

阻，应怎样接法，电路各部分电流是多少，电源端电压是多少，负载及电源内部消耗电功率各多少，电路效率怎样。

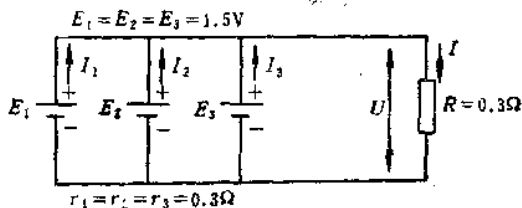


图1-11 干电池并联

电池组内阻为

$$r = \frac{1}{3} r_1 = \frac{1}{3} \times 0.3 = 0.1\Omega$$

负载电流为

$$I = \frac{E}{R + r} = \frac{1.5}{0.3 + 0.1} = 3.75\text{A}$$

电池中的电流为

$$I_1 = I_2 = I_3 = \frac{1}{3} I = \frac{1}{3} \times 3.75 = 1.25\text{A}$$

电源端电压为

$$U = IR = 3.75 \times 0.3 \approx 1.13\text{V}$$

负载功率为

$$P = I^2 R = 3.75^2 \times 0.3 \approx 4.22\text{W}$$

电源内部消耗的功率为

$$P_{\text{耗}} = 3I_1^2 r_1 = 3 \times 1.25^2 \times 0.3 \approx 1.41\text{W}$$

电源总功率为

$$P_{\text{总}} \approx 3E_1 I_1 = 3 \times 1.5 \times 1.25 \approx 5.63\text{W}$$

电路效率为

$$\eta = \frac{P}{P_{\text{总}}} \times 100\% = \frac{4.22}{5.63} \times 100\% = 75\%$$

### 第三节 焦耳-楞次定律、电功和电功率计算

#### 一、电功

电流通过灯丝会发光，通过电炉会发热，通过电动机会带动机器转动。在任何有电流通过的闭合电路里都要发生能量的转换。把电能转换成其他形式的能，叫做电流做功，简称电功。电流在一段电路上所作的功与这段电路两端的电压、通过的电流以及通电时间成正比，即

$$W = UIt$$

式中  $W$ ——电功(J)；

$I$ ——通过的电流(A)；

$U$ ——电路两端电压(V)；

$t$ ——通电时间(s)。

#### 二、电功率

功率表示能量传送的快慢程度，是单位时间电流作的功，其公式为

$$P = \frac{W}{t}$$

或

$$P = IU$$

$$P = I^2 R$$

$$P = \frac{U^2}{R}$$

式中  $P$ ——电流的功率(W)。

#### 三、电能

功率为1kW的用电器在1h中所消耗的电能。电能以千瓦小时为单位，1kW·h(称1度电)电功率乘以用电时间、

$$\text{kW} \cdot \text{h} = Pt$$

式中  $P$ ——电功率(kW)。

$t$ ——用电时间(h)。

#### 四、焦耳-楞次定律



电流通过导体时所产生的热量与电流强度的平方、导体的电阻和通电的时间成正比。

$$Q = I^2 R t$$

式中  $Q$ ——热量(J);

例1-48 10A的电流通过5Ω的电阻,经过10<sup>s</sup>后,求电流在这段时间内所做的功和功率是多少。

$$W = I^2 R t = 10^2 \times 5 \times 10 = 5000 \text{ J}$$

$$P = I^2 R = 10^2 \times 5 = 500 \text{ W}$$

例1-49 有一白炽灯泡,两端电压是220V,灯丝的电阻是484Ω,问灯泡的额定功率是多少。

$$P = \frac{U^2}{R} = \frac{220^2}{484} = 100 \text{ W}$$

例1-50 若电熨斗需用电流4A,而发热元件的电阻是19Ω,问功率是多少。

$$P = I^2 R = 4^2 \times 19 = 304 \text{ W}$$

例1-51 一台直流发电机,工作电压是110V,输出电流是6A,求它的输出功率。

$$P = UI = 110 \times 6 = 660 \text{ W}$$

例1-52 某电视机的功率为60W,平均每天使用3h,若1kW·h电费为人民币0.2元,问一年(以365天计算)要付多少钱的电费。

一年内消耗的电量为

$$W = Pt = 60/1000 \times 3 \times 365 = 65.700 \text{ kW} \cdot \text{h}$$

一年的电费为

$$65.7 \times 0.2 = 13.14 \text{ 元}$$

例1-53 如果电炉的电阻为10Ω,接到220V的电源上,经过2h,求电流所放出的热量是多少。

$$\begin{aligned} Q &= \frac{U^2}{R} t = \frac{220^2}{10} \times 2 \times 3600 \\ &= 34848000 \text{ J} = 34848 \text{ kJ} \end{aligned}$$

### 第四节 简单直流电路计算

#### 一、电阻串联电路

把几个电阻一个接着一个地首尾连接起来，中间没有分岔，这种连接方式称为串联，如图1-12所示。串联电路的特点为：

(1) 流过各个电阻的电流相同，即

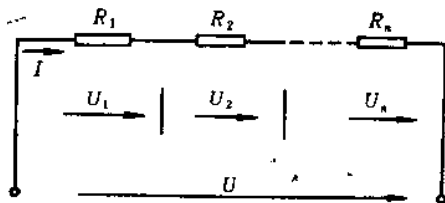


图1-12 电阻串联电路

$$I = I_1 = I_2 = \dots = I_n$$

(2) 总电压等于各个电阻上的电压之和，即

$$U = U_1 + U_2 + \dots + U_n$$

(3) 总电阻等于各个电阻之和，即

$$R = R_1 + R_2 + \dots + R_n$$

(4) 各电阻的分压与其电阻值成正比，即分压公式为

$$U_1 = U \frac{R_1}{R_1 + R_2 + \dots + R_n} = U \frac{R_1}{R}$$

$$U_2 = U \frac{R_2}{R_1 + R_2 + \dots + R_n} = U \frac{R_2}{R}$$

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

(5) 各电阻消耗的功率与其电阻值成正比，即

$$P_1 = I^2 R_1 = P \frac{R_1}{R_1 + R_2 + \dots + R_n}$$

$$P_n = I^2 R_n = P \frac{R_n}{R_1 + R_2 + \dots + R_n}$$

$$P_n = I^2 R_n = P \frac{R_n}{R_1 + R_2 + \dots + R_n}$$

(6) 总电阻消耗的功率等于各电阻消耗功率之和, 即

$$P = P_1 + P_2 + \dots + P_n$$

例1-54 已知图1-13所示电路中  $R_1 = 5\Omega$ ,  $R_2 = 10\Omega$ ,  $R_3 = 15\Omega$ ,  $E = 30V$ , 求总电阻、电路中的电流及各电阻上的电压。

总电阻为

$$R = R_1 + R_2 + R_3 = 5 + 10 + 15 = 30\Omega$$

电路中的电流为

$$I = \frac{E}{R_1 + R_2 + R_3} = \frac{E}{R} = \frac{30}{30} = 1A$$

各电阻上的电压为

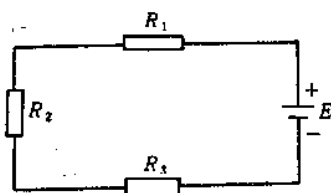


图1-13 求总电阻、电流及各电阻上的电压

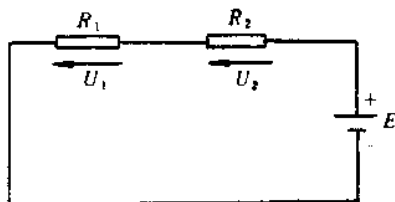


图1-14 求总电阻及各电阻上电压降

$$U_1 = IR_1 = 1 \times 5 = 5V$$

$$U_2 = IR_2 = 1 \times 10 = 10V$$

$$U_3 = IR_3 = 1 \times 15 = 15V$$

例1-55 已知图1-14中  $E = 9V$ ,  $R_1 = 10k\Omega$ ,  $R_2 = 20k\Omega$ , 求总电阻及各电阻上电压。

$$\begin{aligned} R &= R_1 + R_2 = 10 + 20 \\ &= 30k\Omega \end{aligned}$$

$$U_1 = E \frac{R_1}{R} = 9 \times \frac{10}{30} = 3V$$

$$U_2 = E \frac{R_2}{R} = 9 \times \frac{20}{30} = 6\text{V}$$

**例1-56** 60W和25W的两个灯泡串联后接在220V的电源上，问哪个灯泡较亮，电路中的电流是多少，每个灯泡实际消耗的功率是多少。

60W灯泡的电阻为

$$R_{60} = \frac{U^2}{P_{60}} = \frac{220^2}{60} \approx 807\Omega$$

25W灯泡的电阻为

$$R_{25} = \frac{U^2}{P_{25}} = \frac{220^2}{25} \approx 1940\Omega$$

两个灯泡串联后电路中电流为

$$I = \frac{U}{R} = \frac{U}{R_{60} + R_{25}} = \frac{220}{807 + 1940} \approx 0.08\text{A}$$

每个灯泡消耗的功率为

$$P_{60} = I^2 R_{60} = 0.08^2 \times 807 \approx 5.16\text{W}$$

$$P_{25} = I^2 R_{25} = 0.08^2 \times 1940 \approx 12.4\text{W}$$

由上可见，串联后25W灯泡的实际消耗功率较60W的大得多，所示25W灯泡较亮。

### 二、电阻并联电路

把几个电阻的一端连在一起，而把另一端连在一起，这种连接方式称为并联，如图1-15所示。并联电路的特点为：

(1) 各并联支路两端的电压相等，即

$$U = U_1 = U_2 = \dots = U_n$$

(2) 总电流等于各支路电流之和，即

$$I = I_1 + I_2 + \dots + I_n$$

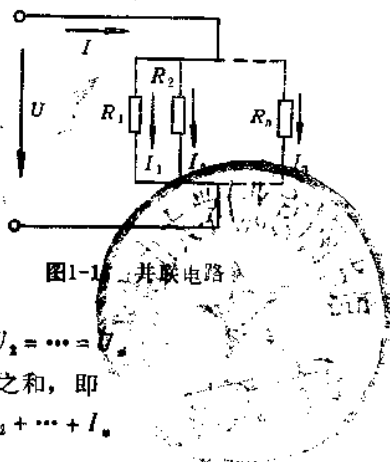


图1-15 并联电路

(3) 总电阻的倒数等于各电阻的倒数之和, 即

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

若  $n$  个相同的电阻并联, 它的总电阻等于任一支路电阻的数值除以并联数, 即

$$R = \frac{R_{支}}{n}$$

如果两个电阻并联, 则有

$$R = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}$$

当  $R_1 = R_2$  时,  $R = \frac{R_1^2}{2R_1} = \frac{R_2^2}{2R_2} = \frac{R_1}{2}$  或  $\frac{R_2}{2}$

(4) 各支路的电流与各支路电阻的阻值成反比, 即

$$I_1 = I \frac{R}{R_1} = I \frac{\frac{1}{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \dots + \frac{1}{R_n}}}{R_1}$$

$$I_2 = I \frac{R}{R_2} = I \frac{\frac{1}{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \dots + \frac{1}{R_n}}}{R_2}$$

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

若有两个电阻并联, 则有

$$I_1 = I \frac{R_2}{R_1 + R_2}$$

$$I_2 = I \frac{R_1}{R_1 + R_2}$$

(5) 各支路电阻上消耗的功率与各支路电阻的阻值成反比,

即

$$P_1 = P \frac{R}{R_1} = P \frac{\frac{1}{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \dots + \frac{1}{R_n}}}{R_1}$$

$$P_2 = P \frac{R}{R_2} = P \frac{\frac{1}{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \dots + \frac{1}{R_n}}}{R_2}$$

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

(6) 总电阻消耗的功率等于各电阻所消耗的功率之和, 即

$$\begin{aligned} P &= P_1 + P_2 + \dots + P_n \\ &= I_1 U + I_2 U + \dots + I_n U \end{aligned}$$

例1-57 图1-16中, 已知 $R_1 = 40\text{k}\Omega$ ,  $R_2 = 60\text{k}\Omega$ ,  $E = 12\text{V}$ , 求电流 $I$ 、 $I_1$ 和 $I_2$ 。

总电阻为

$$\begin{aligned} R &= \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} = \frac{40 \times 60}{40 + 60} \\ &= 24\text{k}\Omega \end{aligned}$$

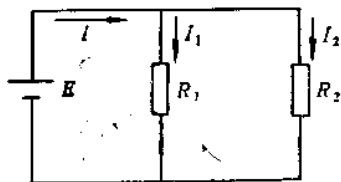


图1-16 求并联电路电流

$$I = \frac{E}{R} = \frac{12}{24 \times 10^3} = 0.5 \times 10^{-3} \text{A} = 0.5 \text{mA}$$

$$I_1 = \frac{E}{R_1} = \frac{12}{40 \times 10^3} = 0.3 \times 10^{-3} \text{A} = 0.3 \text{mA}$$

$$I_2 = I - I_1 = 0.5 - 0.3 = 0.2 \text{mA}$$

例1-58 图1-17中, 电流表A读数为 $10\text{A}$ , 电流表 $A_1$ 读数为 $5\text{A}$ ,  $R_1 = 2\Omega$ ,  $R_2 = 3\Omega$ , 求总的等效电阻及支路电阻 $R_3$ 为多少。

总的等效电阻为

$$U = I_1 R_1 = 5 \times 2 = 10 \text{ V}$$

$$R = \frac{U}{I} = \frac{10}{10} = 1 \Omega$$

支路电阻  $R_3$  为

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3}$$

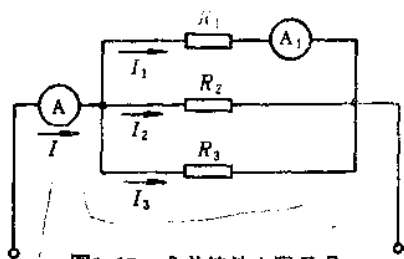


图1-17 求总等效电阻及  $R_3$

$$\frac{1}{R_3} = \frac{1}{R} - \frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} = \frac{1}{1} - \frac{1}{2} - \frac{1}{3} = \frac{1}{6}$$

$$R_3 = 6 \Omega$$

例1-59 在220V电源上并联接入两只灯泡，功率分别40W和60W，问这两只灯泡从电源取得的总电流是多少。

两只灯泡并联后的总功率为

$$P = P_1 + P_2 = 40 + 60 = 100 \text{ W}$$

总电流为

$$I = \frac{P}{U} = \frac{100}{220} \approx 0.455 \text{ A}$$

### 三、电阻混联电路

既有电阻的串联，又有电阻的并联电路称为混联电路。计算方法步骤为：

- (1) 首先把电路整理、化简；
- (2) 把几个电阻串联或并联的电阻分别用等效电阻来代替，最后可化简为最简单的无分支电路；
- (3) 根据简化后的电路来作进一步的计算。

例1-60 已知  $R_1 = R_2 = R_3 = 10 \Omega$ ，如图1-18所示，求 A、B 两点间的等效电阻。

设  $R_2$  和  $R_3$  并联电阻为  $R_{23}$ ，则有

$$R_{23} = \frac{R_2 R_3}{R_2 + R_3} = \frac{10 \times 10}{10 + 10} = 5 \Omega$$

$$R_{AB} = R_1 + R_{23} = 10 + 5 = 15 \Omega$$

例1-61 已知电路中的各电阻值，如图1-18所示，求开关S打开及闭合时AB间的等效电阻。

当S打开时， $R_2$ 与 $R_4$ 串联， $R_3$ 与 $R_5$ 串联，两者再与 $R_1$ 并联，等效电阻为

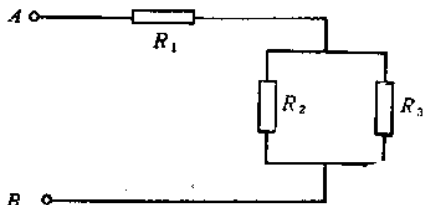


图1-18 混联电路

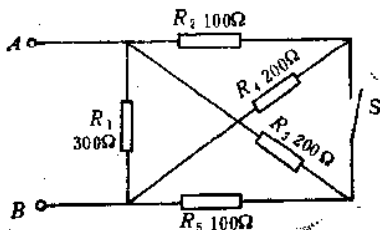


图1-19 求等效电阻

$$\begin{aligned}
 R_{AB} &= \frac{1}{\frac{1}{R_2 + R_4} + \frac{1}{R_3 + R_5} + \frac{1}{R_1}} \\
 &= \frac{1}{\frac{1}{100 + 200} + \frac{1}{200 + 100} + \frac{1}{300}} \\
 &= 100\Omega
 \end{aligned}$$

当S闭合时， $R_2$ 与 $R_3$ 并联， $R_4$ 与 $R_5$ 并联，两者串联后再与 $R_1$ 并联，等效电阻为

$$R_{AB} = \frac{R_1 \left( \frac{R_2 R_3}{R_2 + R_3} + \frac{R_4 R_5}{R_4 + R_5} \right)}{R_1 + \frac{R_2 R_3}{R_2 + R_3} + \frac{R_4 R_5}{R_4 + R_5}}$$



$$\begin{aligned}
 &= \frac{300 \times \left( \frac{100 \times 200}{100 + 200} + \frac{200 \times 100}{200 + 100} \right)}{300 + \frac{100 \times 200}{100 + 200} + \frac{200 \times 100}{200 + 100}} \\
 &\approx 92.4 \Omega
 \end{aligned}$$

例 52 求图1-20a所示电路A、B两点间的等效电阻  $R_{AB}$ ，已知  $R_1 = R_2 = R_3 = R_4 = R_5 = R_6 = R_7 = R_8 = 10 \Omega$ 。

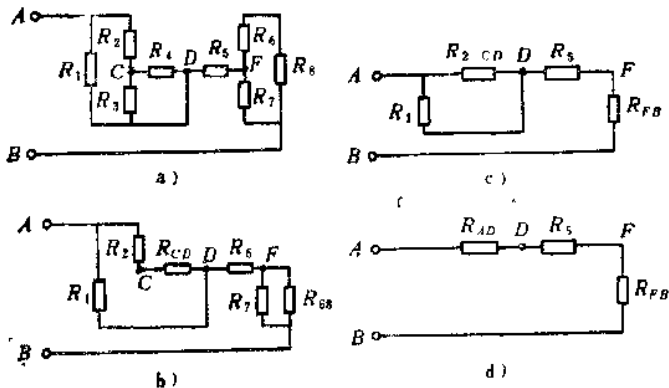


图1-20 求A、B两点间等效电阻

$R_3$ 与 $R_4$ 串联电阻为

$$R_{33} = R_3 + R_4 = 10 + 10 = 20 \Omega$$

$R_3$ 与 $R_4$ 接在C、D两点间是并联，则有

$$R_{CD} = \frac{R_3 R_4}{R_3 + R_4} = \frac{10 \times 10}{10 + 10} = 5 \Omega$$

此时电路简化如图1-20b所示，

$R_2$ 与 $R_{CD}$ 串联，其电阻为

$$R_{2、CD} = R_2 + R_{CD} = 10 + 5 = 15 \Omega$$

接在F、B间的 $R_7$ 与 $R_{33}$ 并联

$$R_{FB} = \frac{R_7 R_{33}}{R_7 + R_{33}} = \frac{10 \times 20}{10 + 20} \approx 6.67 \Omega$$

此时电路简化如图1-20c所示，接在A、D间的 $R_1$ 与 $R_{2、CD}$ 并联，其电阻为

$$R_{AD} = \frac{R_1 R_{2,CD}}{R_1 + R_{2,CD}} = \frac{10 \times 15}{10 + 15} = 6\Omega$$

此时电路简化如图1-20d所示，三个电阻是串联，A、B间的等效电阻为

$$R_{AB} = R_{AD} + R_3 + R_{FB} = 6 + 10 + 6.67 \approx 22.7\Omega$$

**例1-36** 求图1-21的等效电阻 $R_{AB}$ 。

用符号“//”表示并联， $R_5$ 与 $R_6$ 并联，其电阻为

$$R_5 // R_6 = \frac{1}{\frac{1}{R_5} + \frac{1}{R_6}}$$

$R_7$ 与 $R_5 // R_6$ 串联，再与 $R_4$ 并联，即

$$R_4 // [R_7 + (R_5 // R_6)] = \frac{1}{\frac{1}{R_4} + \frac{1}{R_7 + \frac{1}{\frac{1}{R_5} + \frac{1}{R_6}}}}$$

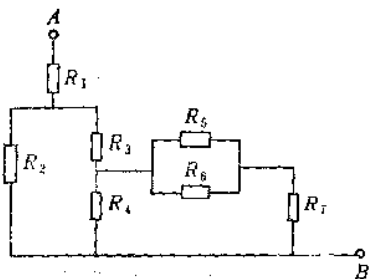


图1-21 求等效电阻 $R_{AB}$

$R_5$ 与 $R_4 // [R_7 + (R_5 // R_6)]$ 串联，再与 $R_2$ 并联，而后与 $R_1$ 串联，A、B间的等效电阻为

$$R_{AB} = R_1 + \frac{1}{\frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3 + \frac{1}{\frac{1}{R_4} + \frac{1}{R_7 + \frac{1}{\frac{1}{R_5} + \frac{1}{R_6}}}}}}$$

**例1-64** 如图1-22所示的由12个相同电阻所组成的电路，若已知每个电阻的阻值都是 $R$ ，求A、B间的等效电阻 $R_{AB}$ 。

设电流从A进入，据对称性 $AC_2$ 和 $AC_1$ 对称等价，即

$$I_{AC2} = I_{AC1} = \frac{1}{2}I$$

$C_1D_1$ 、 $C_1O$ 、 $C_2O$ 、 $C_2D_2$  等价, 则有

$$\begin{aligned} I_{C_1D_1} &= I_{C_1O} = I_{C_2O} \\ &= I_{C_2D_2} = \frac{1}{2} I_{AC_1} \\ &= \frac{1}{2} I_{AC_2} = \frac{1}{4} I \end{aligned}$$

同理则有

$$\begin{aligned} I_{D_1B_1} &= I_{OE_1} = I_{OE_2} \\ &= I_{D_2E_2} = \frac{1}{4} I \end{aligned}$$

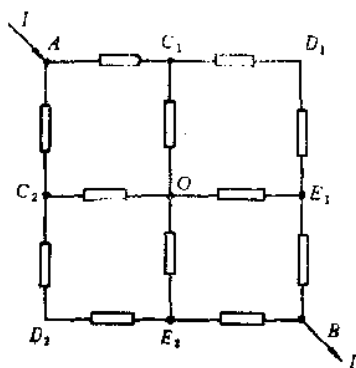


图1-22 求A、B间的等效电阻

$$I_{E_1B} = I_{E_2B} = \frac{1}{2} I$$

任选以上四类等价电阻中的一个组成一条通路, 如  $A \rightarrow C_1 \rightarrow D_1 \rightarrow E_1 \rightarrow B$ , 则有

$$\begin{aligned} U_{AB} &= U_{AC_1} + U_{C_1D_1} + U_{D_1E_1} + U_{E_1B} \\ &= I_{AC_1}R + I_{C_1D_1}R + I_{D_1E_1}R + I_{E_1B}R \\ &= \frac{1}{2} IR + \frac{1}{4} IR + \frac{1}{4} IR + \frac{1}{2} IR \\ &= \frac{3}{2} IR \end{aligned}$$

$$R_{AB} = \frac{U_{AB}}{I_{AB}} = \frac{\frac{3}{2} IR}{I} = \frac{3}{2} R$$

例1-65 图1-23中, 在  $2k\Omega$  电位器的两端各串  $200\Omega$  电阻, 求当改变电位器滑动触点时, 输出电压  $U_2$  的变化范围。

当电位器滑到最下端时, 则有

$$U_2' = U \frac{R_3}{R_1 + R_2 + R_3} = 15 \times \frac{200}{200 + 2000 + 200} = 1.25V$$

当电位器滑到最上端时

$$U_2 = U \frac{R_2 + R_3}{R_1 + R_2 + R_3} = 15 \times \frac{2000 + 200}{200 + 2000 + 200} = 13.5 \text{ V}$$

故  $U_2$  的变化范围从 1.25 ~ 13.5 V

例1-66 图1-24中, 已知  $U = 50 \text{ V}$ ,  $R_1 = 200 \Omega$ ,  $R_3 = 20 \Omega$ ,  $R_2$  为  $0 \sim 100 \Omega$ , 求当电位器滑动端到最上面和最下面时, 电流  $I$  是多少。

当电位器  $R_2$  滑动到最上端时, 则有

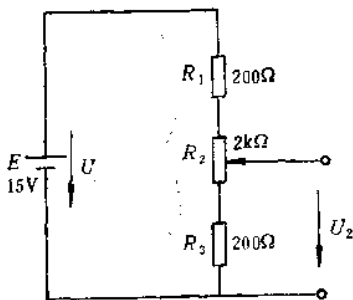


图1-23 求电压变化范围

$$I = \frac{U}{R} = \frac{50}{200 // 120} \approx 0.667 \text{ A}$$

当电位器  $R_2$  滑到最下端时, 则有

$$I = \frac{U}{R} = \frac{50}{200 // 20} \approx 2.75 \text{ A}$$

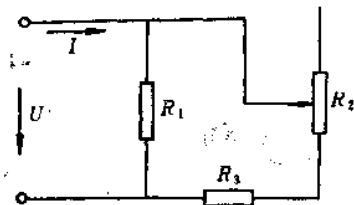


图1-24 求电流  $I$  的变化

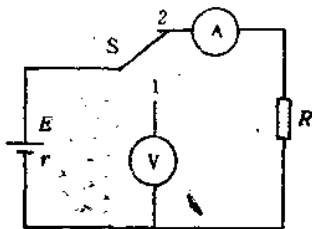


图1-25 求电源内阻

例1-67 图1-25中, 当开关  $S$  扳向 1 时, 电压表读数为  $12.5 \text{ V}$ ; 当开关扳向 2 时, 电流表读数为  $4 \text{ A}$ , 已知负载电阻  $R$  为  $3 \Omega$ , 求电源内电阻是多少。

$$r = \frac{E - IR}{I} = \frac{12.5 - 4 \times 3}{4} = 0.125 \Omega$$

**例1-68** 有两盏电灯，其电阻值分别为 $484\Omega$ 和 $807\Omega$ ，接在 $220\text{V}$ 的线路中，当这两盏灯串联和并联时，在 $5\text{min}$ 内，每灯内电流所产生的热量是多少。

串联时的电流为

$$I = \frac{U}{R_{\text{串}}} = \frac{220}{484 + 807} = 0.17 \text{ A}$$

$$Q_{484} = I^2 R t = 0.17^2 \times 484 \times 5 \times 60 = 4196.28 \text{ J} = 4.19628 \text{ kJ}$$

$$Q_{807} = I^2 R t = 0.17^2 \times 807 \times 5 \times 60 = 6996.69 \text{ J} = 6.99669 \text{ kJ}$$

并联时

$$I_{484} = \frac{U}{R_{484}} = \frac{220}{484} \approx 0.455 \text{ A}$$

$$I_{807} = \frac{U}{R_{807}} = \frac{220}{807} \approx 0.273 \text{ A}$$

$$Q_{484} = 0.455^2 \times 484 \times 5 \times 60 \approx 30.06 \text{ MJ}$$

$$Q_{807} = 0.273^2 \times 807 \times 5 \times 60 \approx 18.043 \text{ MJ}$$

**例1-69** 图1-26中，已知 $E = 15\text{V}$ ， $R_1 = 10\Omega$ ， $R_2 = 20\Omega$ ， $R_3 = 30\Omega$ ， $R_4 = 40\Omega$ ，求各支路电流。

假设各支路电流分别为 $I_1$ 、 $I_2$ 及 $I_3$ ，参考方向如图1-26所示。

等效化简

$$R_{24} = R_2 + R_4 = 20 + 40 = 60\Omega$$

$$R_{3,24} = \frac{R_3 R_{24}}{R_3 + R_{24}} = \frac{30 \times 60}{30 + 60}$$

$$= 20\Omega$$

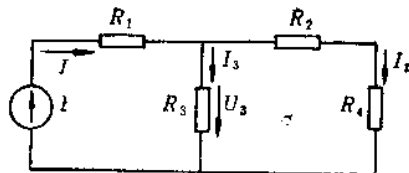


图1-26 求各支路电流

$$R_{1,324} = R_1 + R_{324} = 10 + 20 = 30\Omega$$

总电流为

$$I_1 = \frac{E}{R_{1,324}} = \frac{15}{30} = 0.5 \text{ A}$$

求各支路电流, 先求  $U_3$

$$U_3 = I_1 R_{324} = 0.5 \times 20 = 10\text{V}$$

$$I_3 = \frac{U_3}{R_3} = \frac{10}{30} \approx 0.333\text{A}$$

$$I_2 = \frac{U_3}{R_{24}} = \frac{10}{60} \approx 0.167\text{A}$$

例1-70 图1-27中, 已知  $R_1 = R_2 = 8\Omega$ ,  $R_3 = R_4 = 6\Omega$ ,  $R_5 = R_6 = 4\Omega$ ,  $R_7 = R_8 = 24\Omega$ ,  $R_9 = 16\Omega$ , 电源电压  $U = 220\text{V}$ , 求通过电阻  $R_9$  中的电流及  $R_9$  两端的电压。

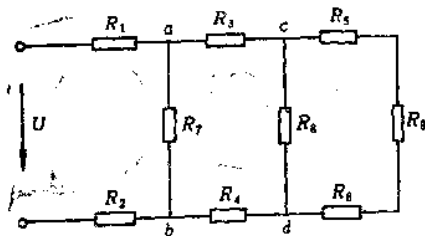


图1-27 求通过  $R_9$  的电流及两端的电压

$$R_{cd} = (R_5 + R_6 + R_9) // R_8 = (4 + 16 + 4) // 24 = 12\Omega$$

$$R_{ab} = (R_3 + R_{cd} + R_4) // R_7 = (6 + 12 + 6) // 24 = 12\Omega$$

$$U_{ab} = U \frac{R_{ab}}{R_1 + R_2 + R_{ab}} = 220 \times \frac{12}{8 + 8 + 12} \approx 94.3\text{V}$$

$$U_{cd} = U_{ab} \frac{R_{cd}}{R_3 + R_4 + R_{cd}} = 94.3 \times \frac{12}{6 + 6 + 12} \approx 47.2\text{V}$$

$$U_{R_9} = U_{cd} \frac{R_9}{R_5 + R_6 + R_9} = 47.2 \times \frac{16}{4 + 4 + 16} \approx 31.5\text{V}$$

$$I_{R_9} = \frac{U_{R_9}}{R_9} = \frac{31.5}{16} \approx 1.97\text{A}$$

例1-71 如图1-28所示, 已知  $I_1 = 1\text{A}$ , 电池内阻  $r$  为  $1\Omega$ , 求电池的电动势  $E$ 。

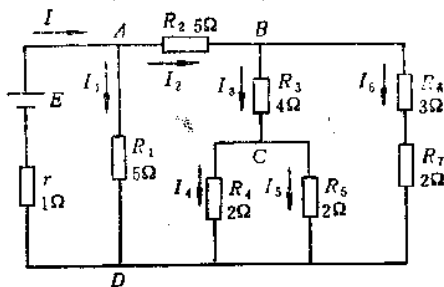


图1-28 求电池的电动势

$$U_{CD} = I_4 R_4$$

$$= 1 \times 2 = 2\text{V}$$

$$I_5 = \frac{U_{CD}}{R_5} = \frac{2}{2} = 1\text{A}$$

$$I_3 = I_4 + I_5 = 1 + 1 = 2\text{A}$$

$$U_{BC} = I_3 R_3 = 2 \times 4 = 8\text{V}$$

$$U_{BD} = U_{BC} + U_{CD} = 8 + 2 = 10\text{V}$$

$$R_{67} = R_6 + R_7 = 3 + 2 = 5\Omega$$

$$I_6 = \frac{U_{BD}}{R_{67}} = \frac{10}{5} = 2\text{A}$$

$$I_2 = I_3 + I_6 = 2 + 2 = 4\text{A}$$

$$U_{AB} = I_2 R_2 = 4 \times 5 = 20\text{V}$$

$$U_{AD} = U_{AB} + U_{BD} = 20 + 10 = 30\text{V}$$

$$I_1 = \frac{U_{AD}}{R_1} = \frac{30}{5} = 6\text{A}$$

$$I = I_1 + I_2 = 6 + 4 = 10\text{A}$$

$$U = I r = 10 \times 1 = 10\text{V}$$

$$E = U + U_{AD} = 10 + 30 = 40\text{V}$$

例1-72 图1-29电路中, 已知  $E = 48\text{V}$ ,  $R_1 = 60\Omega$ ,  $R_2 = 40\Omega$ ,  $R_3 = 80\Omega$ ,  $R_{12} = 40\Omega$ , 求电源端电流  $I_1$  和负载端电流  $I_2$ 。

用单位电流法计算, 假设负载端电流  $I'_2 = 1\text{A}$ ,  $R_{12}$  与  $R_1$  串

联，则

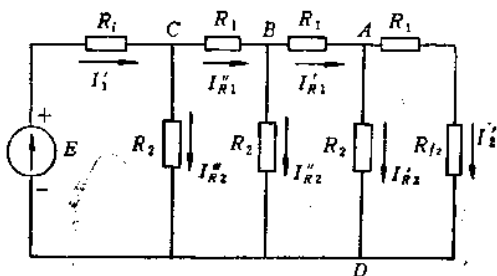


图1-29 求电源端电流 $I_1$ 和负载端电流 $I_2$

$$R_{f21} = R_{f2} + R_1 = 40 + 40 = 80\Omega$$

$R_{f21}$ 与 $R_2$ 两者数量相等，故由A点分出的两支路电流 $I'_1 = I''_1 = 1\text{A}$ ，而流进A点的电流 $I_{R1} = I'_{R2} + I''_1 = 2\text{A}$ 。

A、D两点间的等效电阻为

$$R_{AD} = \frac{R_2 R_{f21}}{R_2 + R_{f21}} = \frac{80 \times 80}{80 + 80} = 40\Omega$$

因为 $R_{AD}$ 与 $R_1$ 串联后为 $80\Omega$ ，恰好与图中连接于B、D两点间的 $R_2$ 数值相等，所以由B点分出的两电流 $I'_{R1} = I''_{R2} = 2\text{A}$ ，而流进B点的电流 $I''_{R1} = I'_{R1} + I''_{R2} = 4\text{A}$ 。

B、D两点间的等效电阻为

$$R_{BD} = \frac{R_2 (R_1 + R_{AD})}{R_2 + R_1 + R_{AD}} = \frac{80 \times (40 + 40)}{80 + 40 + 40} = 40\Omega$$

因为 $R_{BD}$ 与 $R_1$ 串联后为 $80\Omega$ ，正好与连接于C、D两点间的 $R_2$ 数值相等，所以由C点分出的两电流 $I''_{R1} = I''_{R2} = 4\text{A}$ ，而流进C点的电流就是电源端的电流 $I'_1 = I''_{R1} + I''_{R2} = 4 + 4 = 8\text{A}$ 。

C、D两点间的等效电阻为

$$R_{CD} = \frac{R_2 (R_1 + R_{BD})}{R_2 + R_1 + R_{BD}} = \frac{80 \times (40 + 40)}{80 + 40 + 40} = 40\Omega$$

根据全电路欧姆定律，可计算出 $E'$ 为

$$E' = I'_1 (R_i + R_{CD}) = 8 \times (60 + 40) = 800\text{V}$$



$E'$  的数值是在假定负载端电流  $I'_4 = 1\text{A}$  的条件下计算出来的, 很显然它比实际电源  $E$  大  $K$  倍, 因此, 必须将以上的数值缩小  $K$  倍, 比例系数  $K$  应为

$$K = \frac{E}{E'} = \frac{48}{800} = 0.06$$

电源端电流  $I_1$  实际值为

$$I_1 = KI'_1 = 0.06 \times 8 = 0.48\text{A}$$

负载端电流  $I_2$

实际值为

$$I_2 = KI'_2 = 0.06 \times 1 = 0.06\text{A}$$

例1-73 如图1-30所示, 电动势单位为  $V$ , 电阻单位为  $\Omega$ , 求各支路电流。

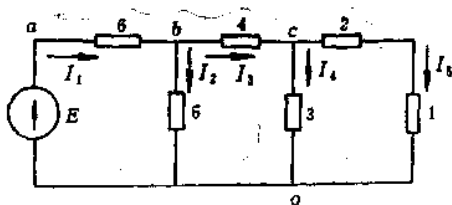


图 1-30 求各支路电流

用单位电流法计算, 设  $I'_4 = 1\text{A}$

$$U'_{c,d} = (2 + 1) \times 1 = 3\text{V}$$

$$I'_4 = U'_{c,d} / 3 = 3 / 3 = 1\text{A}$$

$$I'_3 = I'_4 + I'_4 = 1 + 1 = 2\text{A}$$

$$U'_{b,c} = 4 \times I'_3 = 4 \times 2 = 8\text{V}$$

$$U'_{b,d} = U'_{b,c} + U'_{c,d} = 8 + 3 = 11\text{V}$$

$$I'_2 = U'_{b,d} / 5 = 11 / 5 = 11/5\text{A}$$

$$I'_1 = I'_2 + I'_3 = 11/5 + 2 = 21/5\text{A}$$

$$U'_{a,b} = I'_1 \times 6 = 21/5 \times 6 = 126/5\text{V}$$

$$U'_{a,d} = U'_{a,b} + U'_{b,d} = 126/5 + 11 = 181/5\text{V}$$

已知  $E = 20\text{V}$ , 比例系数为

$$K = \frac{E}{U'_{a,d}} = \frac{20}{\frac{181}{5}} \approx 0.552$$

各支路电流为

$$I_1 = K I_1' = 0.552 \times \frac{21}{5} = 2.32 \text{ A}$$

$$I_2 = K I_2' = 0.552 \times \frac{11}{5} = 1.21 \text{ A}$$

$$I_3 = K I_3' = 0.552 \times 2 = 1.1 \text{ A}$$

$$I_4 = K I_4' = 0.552 \times 1 = 0.552 \text{ A}$$

$$I_5 = K I_5' = 0.552 \times 1 = 0.552 \text{ A}$$

### 第五节 复杂直流电路计算

一个电路，如果无法用串、并联关系简化成最简单的无分支电路，这种电路称为复杂电路，如图1-31所示。

#### 一、基尔霍夫定律应用

1. 电路中几个常用名词

支路：电路中每一分支叫支路。图1-31中， $AH$ 、 $BF$ 、 $CD$ 都是支路。

节点：三条或三条以上支路连接点叫做节点。如图1-31中， $B$ 、 $F$ 点都是节点。

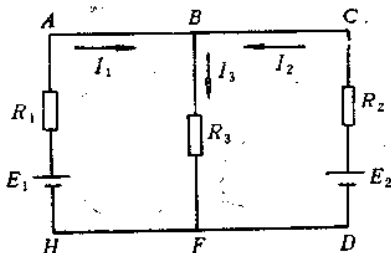


图1-31 复杂电路

回路：由支路构成的闭合路径叫做回路。如图1-31中， $ABFHA$ 、 $BCDFB$ 、 $ABCFDHA$ 都是回路。

#### 2. 基尔霍夫第一定律（又称节点电流定律）

所有流进节点的电流之和等于流出节点的电流之和。

$$\sum I_{\text{入}} = \sum I_{\text{出}}$$

如果规定流入节点的电流为正，流出节点的电流为负，那末在任一节点上的电流的代数和恒等于零。

$$\sum I = 0$$

电流的方向，可预先假设，如果求得的电流是正值，表示电流的实际方向与标定方向相同，如求得的电流是负值，表示电流

的实际方向与标定方向相反。在图1-31中,根据基尔霍夫第一定律可列出:

$$I_1 + I_2 = I_3$$

基尔霍夫第一定律也可推广应用于任意假定的封闭面,如图1-32、1-33中 $S$ 就是一个假定的封闭面,流进 $S$ 面的电流应等于流出 $S$ 面的电流,即

$$I_1 + I_2 = I_3$$

$$i_s = i_b + i_e$$

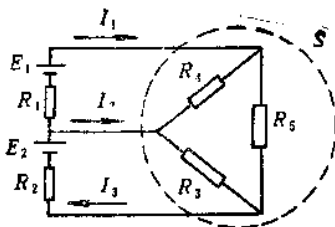


图1-32 假定电路封闭面

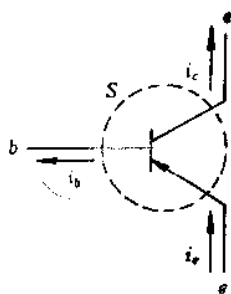


图1-33 假定晶体管元件封闭面

### 3. 基尔霍夫第二定律 (又称回路电压定律)

电路中任一回路内各段电压的代数和为零。

$$\sum U = 0$$

如果各支路由电阻和电动势所构成,那末回路中电动势的代数和等于各电阻上电压降的代数和,即

$$\sum E = \sum IR$$

首先假定回路绕行方向和各支路电流的参考方向,如图1-31所示。如果电流方向与回路绕行方向相同,电流在电阻上产生的电压降取正号,相反时取负号。电动势与回路绕行方向相同取正号,相反时取负号。沿  $E_1ABFHE_1$  闭合回路可列出,

$$E_1 = I_1R_1 + I_2R_3$$

沿  $E_2CBFDE_2$  闭合回路可列出:

$$E_2 = I_2 R_2 + I_3 R_3$$

#### 4. 支路电流法

先假设各支路的电流方向和回路方向，再根据基尔霍夫定律列出方程式进一步计算的方法叫支路电流法。其步骤如下：

(1) 先标出各支路的电流方向和回路方向；

(2) 用基尔霍夫第一定律列出节点方程式，电路中若有  $n$  个节点，则只能列出  $(n-1)$  个独立方程式，不足的方程式，可由基尔霍夫第二定律列出；

(3) 用基尔霍夫第二定律列出回路电压方程式，要求列一个回路方程式都要包含一条新支路；

(4) 代入已知数，解联立方程式，并确定各支路电流的实际方向。

**例1-74** 在图1-34中，已知  $E_1 = 2V$ ， $E_2 = 1.5V$ ， $R_1 = 50\Omega$ ， $R_2 = 75\Omega$ ， $R_3 = 100\Omega$ ，求各支路电流。

在闭合回路  $E_1 A B E_1$  中，则有

$$E_1 = I_1 R_1 + I_3 R_3 \quad (1-1)$$

在闭合回路  $E_2 A B E_2$  中，则有

$$E_2 = I_2 R_2 + I_3 R_3 \quad (1-2)$$

对节点  $A$  则有

$$I_3 = I_1 + I_2 \quad (1-3)$$

将式(1-3)代入式(1-1)与(1-2)得

$$E_1 = I_1 (R_1 + R_3) + I_2 R_3$$

$$E_2 = I_2 (R_2 + R_3) + I_1 R_3$$

各项经过代换及整理后得到：

$$\begin{aligned} I_1 &= \frac{E_1 (R_2 + R_3) - E_2 R_3}{R_1 R_2 + R_2 R_3 + R_3 R_1} \\ &= \frac{2 \times (70 + 100) - 1.5 \times 100}{50 \times 75 + 75 \times 100 + 100 \times 50} \\ &= 0.0123A \end{aligned}$$

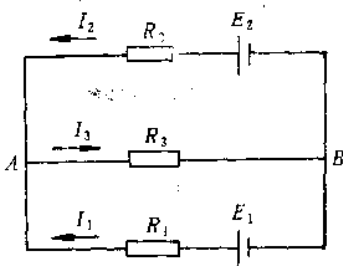


图1-34 求各支路电流

$$I_2 = \frac{E_2(R_1 + R_3) - E_1 R_3}{R_1 R_2 + R_2 R_3 + R_3 R_1} = \frac{1.5 \times (50 + 100) - 2 \times 100}{50 \times 75 + 75 \times 100 + 100 \times 50} = 0.00154 \text{ A}$$

$$I_3 = \frac{E_2 R_1 + E R_2}{R_1 R_2 + R_2 R_3 + R_3 R_1} = \frac{1.5 \times 50 + 2 \times 75}{50 \times 75 + 75 \times 100 + 100 \times 50} = 0.0138 \text{ A}$$

或  $I_3 = I_1 + I_2 = 0.0123 + 0.00154 = 0.0138 \text{ A}$

例1-75 在图1-35中,  $E_1 = 20\text{V}$ ,  $r_1 = 3\Omega$ ,  $E_2 = 10\text{V}$ ,  $r_2 = 1\Omega$ ,  $E_3 = 15\text{V}$ ,  $r_3 = 2\Omega$ ,  $R_1 = 2\Omega$ ,  $R_2 = 4\Omega$ , 求电流  $I_1$ ,  $I_2$  及  $I_3$ 。

对节点C则有

$$I_3 = I_1 + I_2 \quad (1-4)$$

在闭合回路  $ABCD$  中,

则有

$$\begin{aligned} E_1 - E_2 \\ = I_1(r_1 + R_1) - I_2 r_2 \end{aligned} \quad (1-5)$$

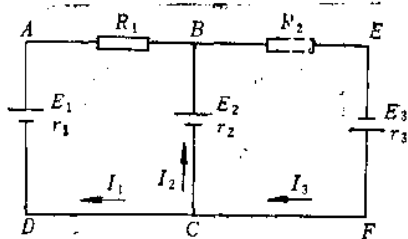


图1-35 求电流  $I_1$ ,  $I_2$  及  $I_3$

在闭合回路  $ABEFCD$  中, 则有

$$E_1 + E_3 = I_1(r_1 + R_1) + I_3(R_2 + r_3) \quad (1-6)$$

将数值代入式(1-5)和(1-6)中, 则有

$$20 - 10 = 5I_1 + I_2 \quad (1-7)$$

$$20 + 15 = 5I_1 + 6I_3 \quad (1-8)$$

由式(1-4)将  $I_2$  的值解出后代入式(1-7), 则有

$$10 = 5I_1 - (I_3 - I_1) = 6I_1 - I_3$$

$$I_3 = 6I_1 - 10$$

由式(1-8)可得

$$35 = 5I_1 + 6(6I_1 - 10) = 41I_1 - 60$$

$$I_1 = \frac{95}{41} = 2.32 \text{ A}$$

由式(1-7)可得

$$I_2 = 5 \times 2.32 = 11.6 \text{ A}$$

由式(1-4)可得

$$I_3 = I_1 + I_2 = 2.32 + 11.6 = 13.9 \text{ A}$$

**例1-76** 在图1-36内的两电池组中，一个电池组的电动势 $E_1$ 为12V，内阻 $r_1$ 为 $2\Omega$ ；另一个 $E_2$ 为10V及 $r_2$ 为 $1\Omega$ ，两电池组并联后，再与 $2\Omega$ 的外电阻相接，求各支路电流。

对节点B则有

$$I_3 = I_1 + I_2$$

在闭合回路 $E_1CDE_1$ 中则有

$$12 = 2I_1 + 2(I_1 + I_2) = 4I_1 + 2I_2 \quad (1-9)$$

在闭合回路 $E_2CDE_2$ 中

$$10 = I_2 + 2(I_1 + I_2) = 2I_1 + 3I_2$$

$$I_2 = \frac{10 - 2I_1}{3}$$

将 $I_2$ 的值代入式(1-9)，

并整理各项后得：

$$16 = 8I_1$$

$$I_1 = \frac{16}{8} = 2 \text{ A}$$

$$I_2 = \frac{10 - 4}{3} = 2 \text{ A}$$

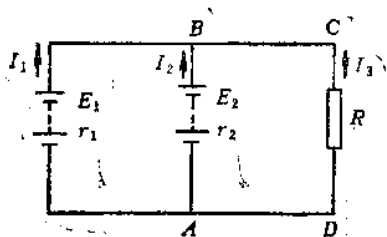


图1-36 求各支路电流

$$I_3 = I_1 + I_2 = 2 + 2 = 4 \text{ A}$$

**例1-77** 在图1-37所示的电路中，电流 $I_0 = 10 \text{ mA}$ ， $I_1 = 6 \text{ mA}$ ，电阻 $R_1 = 3 \text{ k}\Omega$ 、 $R_2 = 1 \text{ k}\Omega$ 、 $R_3 = 2 \text{ k}\Omega$ ，求电流表 $A_1$ 和 $A_2$ 的读数。

对节点A则有

$$I_0 - I_1 - I_2 = 0$$

$$I_2 = I_0 - I_1$$

$$= 10 - 6 = 4 \text{ mA}$$

对回路 $ABCA$ 则有

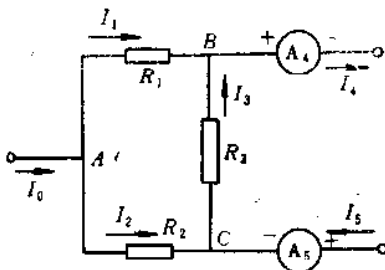


图1-37 求电流表读数

$$I_1 R_1 - I_3 R_3 - I_2 R_2 = 0$$

$$6 \times 10^{-3} \times 3 \times 10^3 - 2 \times 10^3 I_3 - 1 \times 10^3 \times 4 \times 10^{-3} = 0$$

$$I_3 = 7 \times 10^{-3} \text{ A} = 7 \text{ mA}$$

对节点B则有

$$I_1 + I_3 - I_4 = 0$$

$$I_4 = I_1 + I_3 = 6 + 7 = 13 \text{ mA}$$

对节点C则有

$$I_2 - I_3 + I_5 = 0$$

$$I_5 = I_3 - I_2 = 7 - 4 = 3 \text{ mA}$$

例1-78 图1-38中,  $E_1 = 48\text{V}$ ,  $E_2 = 32\text{V}$ ,  $R_1 = 4\Omega$ ,  $R_2 = 6\Omega$ ,  $R_3 = 16\Omega$ , 求各支路电流。

假设各电流方向, 如图所示, 则有

$$I_3 = \frac{E_1}{R_2} = \frac{48}{6} = 8 \text{ A}$$

$$I_4 = \frac{E_2}{R_3} = \frac{32}{16} = 2 \text{ A}$$

$$I_6 = \frac{E_1 - E_2}{R_1} = \frac{48 - 32}{4} = 4 \text{ A}$$

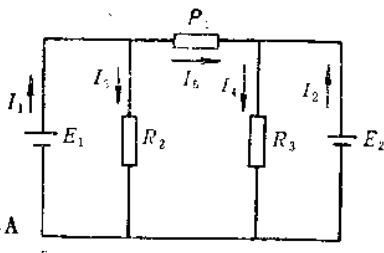


图1-38 求各支路电流

$$I_1 = I_3 + I_6 = 8 + 4 = 12 \text{ A}$$

$$I_2 = I_4 - I_6 = 2 - 4 = -2 \text{ A}$$

$I_2$ 的实际方向与假设电流方向相反。

## 二、回路电流法

先假设各回路的电流方向，再根据基尔霍夫第二定律列出各回路的电压方程式来进行计算，这种方法，叫做回路电流法。其步骤如下：

(1) 先假设各回路的电流方向；

(2) 用基尔霍夫第二定律列出回路电压方程式，有几个网孔，就得列几个方程式，在列回路电压方程式时，应使在任意一个回路内，所有电动势的代数和等于本回路电流在各电阻上的电压降以及相邻回路的电流在公共电阻上的电压降的代数和；

(3) 代入已知数，解联立方程，求回路电流；

(4) 根据回路电流的大小和方向，求出各支路电流的大小和方向，其原则是：单独支路的电流就等于本回路的电流，公共支路的电流等于相邻回路电流的代数和。

例1-79 如图1-39所示的电路中， $E_1 = 40\text{V}$ ， $E_2 = 5\text{V}$ ， $E_3 = 25\text{V}$ ， $R_1 = 5\Omega$ ， $R_2 = 10\Omega$ ， $R_3 = 10\Omega$ ，求各支路电流。

将两个网孔电流  $I_{\text{I}}$ 、 $I_{\text{II}}$  的方向标于图上，沿回路电流  $I_{\text{I}}$ 、 $I_{\text{II}}$  的方向列出电压方程式：

$$\begin{aligned} \text{回路 I 为} \\ E_1 + E_2 \\ = I_{\text{I}}(R_1 + R_2) \\ - I_{\text{II}}R_2 \end{aligned}$$

回路 II 为

$$-E_2 + E_3 = I_{\text{II}}(R_2 + R_3) - I_{\text{I}}R_2$$

将数据代入整理后得

$$\begin{aligned} 40 + 5 &= I_{\text{I}}(5 + 10) - 10I_{\text{II}} \\ -5 + 25 &= I_{\text{II}}(10 + 10) - 10I_{\text{I}} \\ I_{\text{I}} &= 5.5\text{A} \end{aligned}$$

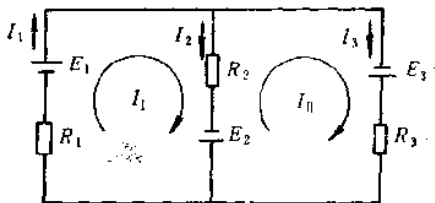


图1-39 求各支路电流



$$I_{\text{II}} = 3.75 \text{ A}$$

根据回路电流  $I_{\text{I}}$ 、 $I_{\text{II}}$ ，求各支路电流，即

$$I_1 = I_{\text{I}} = 5.5 \text{ A}$$

$$I_2 = I_{\text{I}} - I_{\text{II}} = 5.5 - 3.75 = 1.75 \text{ A}$$

$$I_3 = I_{\text{II}} = 3.75 \text{ A}$$

例1-80 图1-40中， $E = 7.2 \text{ V}$ ， $R_1 = 2 \Omega$ ， $R_2 = 6 \Omega$ ， $R_3 = 3 \Omega$ ， $R_4 = 4 \Omega$ ，求流经支路  $CD$  的电流。

回路电流分别为  $I_{\text{I}}$ 、 $I_{\text{II}}$ 、 $I_{\text{III}}$ ，其方向如图所示，回路方程为回路 I

$$-E = I_{\text{I}}(R_1 + R_2) - I_{\text{II}}R_2$$

$$-7.2 = 8I_{\text{I}} - 6I_{\text{II}}$$

回路 II

$$0 = -I_{\text{I}}R_2 + I_{\text{II}}(R_2 + R_4) - I_{\text{III}}R_4$$

$$0 = -6I_{\text{I}} + 10I_{\text{II}} - 4I_{\text{III}}$$

回路 III

$$E = -I_{\text{III}}R_4 + I_{\text{II}}(R_3 + R_4)$$

$$7.2 = -4I_{\text{III}} + 7I_{\text{II}}$$

所求电流  $I_{CD}$  就是回路电流  $I_{\text{III}}$ ，应用行列式解联立方程，即

$$\Delta = \begin{vmatrix} 8 & -6 & 0 \\ -6 & 10 & -4 \\ 0 & -4 & 7 \end{vmatrix} = 180$$

$$\Delta_{\text{III}} = \begin{vmatrix} 8 & -7.2 & 0 \\ -6 & 0 & -4 \\ 0 & 7.2 & 7 \end{vmatrix} = -72$$

$$I_{CD} = I_{\text{III}} = \frac{\Delta_{\text{III}}}{\Delta} = \frac{-72}{180} = -0.4 \text{ A}$$

负号表示电流的实际方向由  $D$  流向  $C$ 。

例1-81 如图1-41所示，已知  $R_1 = R_2 = R_3 = R_4 = R_5 = 2 \Omega$ ， $E_1 = E_2 = E_3 = E_4 = 10 \text{ V}$ ，求支路电流。

设支路电流和回路电流方向，如图所示，列各回路电压方程式

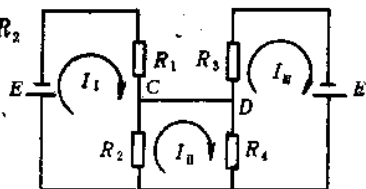


图1-40 求支路  $CD$  的电流

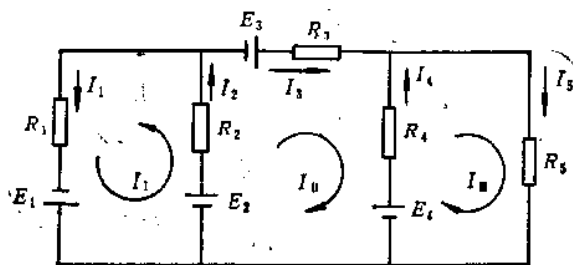


图1-41 求各支路电流

$$I_{\text{I}}(R_1 + R_2) + I_{\text{II}}R_2 = E_2 + E_1$$

$$I_{\text{I}}R_2 + I_{\text{II}}(R_2 + R_3 + R_4) - I_{\text{III}}R_4 = E_2 + E_3 - E_4$$

$$-I_{\text{II}}R_4 + I_{\text{III}}(R_4 + R_5) = E_4$$

将数值代入方程求解

$$4I_{\text{I}} + 2I_{\text{II}} = 20$$

$$2I_{\text{I}} + 6I_{\text{II}} - 2I_{\text{III}} = 10$$

$$-2I_{\text{II}} + 4I_{\text{III}} = 10$$

$$I_{\text{I}} = 4.38\text{A}$$

$$I_{\text{II}} = 1.25\text{A}$$

$$I_{\text{III}} = 3.13\text{A}$$

各支路电流为

$$I_1 = I_{\text{I}} = 4.38\text{A}$$

$$I_2 = I_{\text{I}} + I_{\text{II}} = 4.38 + 1.25 = 5.63\text{A}$$

$$I_3 = I_{\text{II}} = 1.25\text{A}$$

$$I_4 = I_{\text{III}} - I_{\text{II}} = 3.13 - 1.25 = 1.88\text{A}$$

$$I_5 = I_{\text{III}} = 3.13\text{A}$$

例1-82 在图1-42中,  $E_1 = 250\text{V}$ ,  $r_1 = 1\Omega$ ,  $E_2 = 239\text{V}$ ,  $r_2 = 0.5\Omega$ ,  $R = 30\Omega$ , 求各支路电流、负载端电压  $U_{FG}$  及负载的功率。

设各支路电流和回路电流方向, 如图所示。

方法一: 用支路电流法解

对节点C则有

$$I_1 + I_2 - I_3 = 0$$

对回路ACDBA则有

$$I_1 r_1 - I_2 r_2 = E_1 - E_2$$

对回路CFGDC则有

$$I_2 r_2 + I_3 R = E_2$$

将数值代入得

$$I_1 - 0.5 I_3 = 11$$

$$0.5 I_1 + 30 I_3 = 239$$

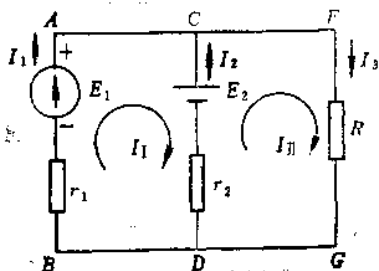


图1-42 求各支路电流负载端电压及功率

用行列式解联立方程

$$\Delta = \begin{vmatrix} 1 & 1 & -1 \\ 1 & -0.5 & 0 \\ 9 & 0.5 & 30 \end{vmatrix} = -45.5$$

$$\Delta_1 = \begin{vmatrix} 0 & 1 & -1 \\ 11 & -0.5 & 0 \\ 239 & 0.5 & 30 \end{vmatrix} = -455$$

$$\Delta_2 = \begin{vmatrix} 1 & 0 & -1 \\ 0 & 11 & 0 \\ 0 & 239 & 30 \end{vmatrix} = 91$$

$$\Delta_3 = \begin{vmatrix} 1 & 1 & 0 \\ 1 & -0.5 & 11 \\ 0 & 0.5 & 239 \end{vmatrix} = -364$$

$$I_1 = \frac{\Delta_1}{\Delta} = \frac{-455}{-45.5} = 10 \text{ A}$$

$$I_2 = \frac{\Delta_2}{\Delta} = \frac{91}{-45.5} = -2 \text{ A}$$

$$I_3 = \frac{\Delta_3}{\Delta} = \frac{-364}{-45.5} = 8 \text{ A}$$

$$U_{FG} = I_3 R = 8 \times 30 = 240 \text{ V}$$

$$P = U_{oc} I_N = 240 \times 5 = 1920 \text{ W}$$

方法二：用回路电流法解

对回路ACDBA则有

$I_1$ 回路的总电阻为

$$R_{11} = r_1 + r_2 = 1 + 0.5 = 1.5 \Omega$$

$I_1$ 及 $I_N$ 回路的共用电阻，因 $I_1$ 与 $I_N$ 两回路的方向相反而取负号，即

$$R_{12} = -r_2 = -0.5 \Omega$$

$$E_1 = E_1 - E_2 = 250 - 239 = 11 \text{ V}$$

$$1.5 I_1 - 0.5 I_N = 11$$

对回路CFGDC则有

$I_N$ 回路的总电阻为

$$R_{22} = r_2 + R = 0.5 + 30 = 30.5 \Omega$$

$I_N$ 及 $I_1$ 两路的共用电阻，与 $R_{11}$ 一样，即

$$R_{21} = R_{12} = -r_2 = -0.5 \Omega$$

$$E_2 = E_2 = 239 \text{ V}$$

$$-0.5 I_1 + 30.5 I_N = 239$$

用行列式解联立方程

$$\Delta = \begin{vmatrix} 1.5 & 0.5 \\ -0.5 & 30.5 \end{vmatrix} = 45.9 - 0.25 = 45.5$$

$$\Delta_1 = \begin{vmatrix} 11 & -0.5 \\ 239 & 30.5 \end{vmatrix} = 335 - 120 = 455$$

$$\Delta_N = \begin{vmatrix} 15 & 11 \\ -0.5 & 239 \end{vmatrix} = 359 + 5.5 = 364$$

$$I_1 = \frac{\Delta_1}{\Delta} = \frac{455}{45.5} = 10 \text{ A}$$

$$I_N = \frac{\Delta_N}{\Delta} = \frac{364}{45.5} = 8 \text{ A}$$

$$I_1 = I_N = 10 \text{ A}$$

$$I_2 = I_{II} - I_I = 8 - 10 = -2\text{A}$$

$$I_3 = I_{II} = 8\text{A}$$

$U_{RC}$ 、 $P$ 的计算方法均与上相同。

例1 83 图1-43中,  $E_1 = 24\text{V}$ ,  $r_1 = 0.1\Omega$ ,  $E_2 = 30\text{V}$ ,  $r_2 = 0.15\Omega$ ,  $R_1 = 2\Omega$ ,  $R_2 = 2\Omega$ ,  $R_3 = 4\Omega$ , 求各电池组输出的功率。

先将电阻  $R_1$ 、 $R_2$ 、 $R_3$  接成虚线所示的  $\pi$  形电路变换成  $R_A$ 、 $R_B$ 、 $R_C$  接成的实线所示的 T 形回路, 则有

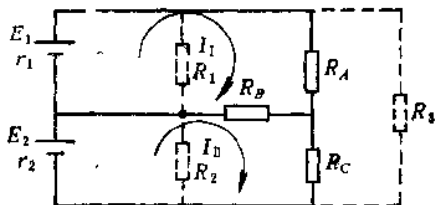


图1-43 求各电池组输出功率

$$R_A = \frac{R_1 R_3}{R_1 + R_2 + R_3} = \frac{2 \times 4}{2 + 2 + 4} = 1\Omega$$

$$R_B = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2 + R_3} = \frac{2 \times 2}{2 + 2 + 4} = 0.5\Omega$$

$$R_C = \frac{R_2 R_3}{R_1 + R_2 + R_3} = \frac{2 \times 4}{2 + 2 + 4} = 1\Omega$$

设回路电流为  $I_I$ 、 $I_{II}$ , 方向如图所示。

对回路 I 则有

$$(r_1 + R_A + R_B)I_I - R_B I_{II} = E_1$$

对回路 II 则有

$$-R_B I_I + (R_B + R_C + r_2)I_{II} = E_2$$

代入数值并化简后得

$$1.62I_I - 0.5I_{II} = 24$$

$$-0.5I_I + 1.65I_{II} = 30$$

用行列式解方程组

$$\Delta = \begin{vmatrix} .62 & -0.5 \\ -0.5 & 1.62 \end{vmatrix} = 2.42$$

$$\Delta_I = \begin{vmatrix} 24 & -0.5 \\ 30 & 1.65 \end{vmatrix} = 5.46$$

$$\Delta_{II} = \begin{vmatrix} 1.62 & 24 \\ -0.5 & 30 \end{vmatrix} = 60.6$$

$$I_I = -\frac{\Delta_I}{\Delta} = \frac{54.6}{2.42} = 22.6 \text{ A}$$

$$I_{II} = -\frac{\Delta_{II}}{\Delta} = \frac{60.6}{2.42} = 25 \text{ A}$$

$$P_1 = E_1 I_I - I_I^2 r_1 = 24 \times 22.6 - 22.6^2 \times 0.12 = 481 \text{ W}$$

$$P_2 = E_2 I_{II} - I_{II}^2 r_2 = 30 \times 25 - 25^2 \times 0.15 = 656 \text{ W}$$

例1-84 在图1-44a中,  $E_1 = E_2 = 15\text{V}$ ,  $E_3 = 5\text{V}$ , 其内阻均为  $2\Omega$ , 电阻  $R_{12} = R_{23} = R_{31} = 6\Omega$ , 求流经各电池组的电流。

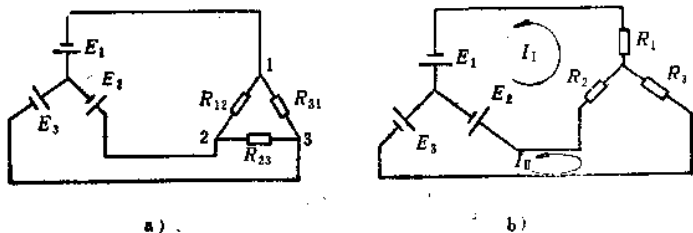


图1-44 求流经各电池的电流

将图a中构成三角形的电阻  $R_{12}$ 、 $R_{23}$ 、 $R_{31}$  转换成星形, 如图b所示, 星形连接的  $R_1$ 、 $R_2$ 、 $R_3$  为

$$R_1 = R_2 = R_3 = \frac{R_{12}}{3} = \frac{R_{23}}{3} = \frac{R_{31}}{3} = \frac{6}{3} = 2\Omega$$

设回路电流  $I_I$ 、 $I_{II}$  的方向, 如图b所示。列出电压方程式为

$$E_1 + E_2 = I_I(r_1 + r_2 + R_1 + R_2) - I_{II}(r_2 + R_2)$$

$$-E_2 - E_3 = I_{II}(r_2 + r_3 + R_2 + R_3) - I_I(r_1 + R_2)$$

代入数值、解联立方程得

$$15 + 15 = I_I(2 + 2 + 2 + 2) - I_{II}(2 + 2)$$

$$-15 - 5 = I_{II}(2 + 2 + 2 + 2) - I_I(2 + 2)$$

$$8I_I - 4I_{II} = 30$$

$$4I_I - 8I_{II} = 20$$

$$I_I = 3.33A$$

$$I_{II} = -0.83A$$

$$I_1 = I_3 = 3.33A$$

$$I_2 = I_1 - I_{II} = 3.33 - (-0.83) = 4.16A$$

$$I_4 = I_{II} = -0.83A$$

### 三、星形和三角形联结电路等值换算

#### 1. 星形和三角形电路

如图1-45所示，图a为星形电路；图b为三角形电路。

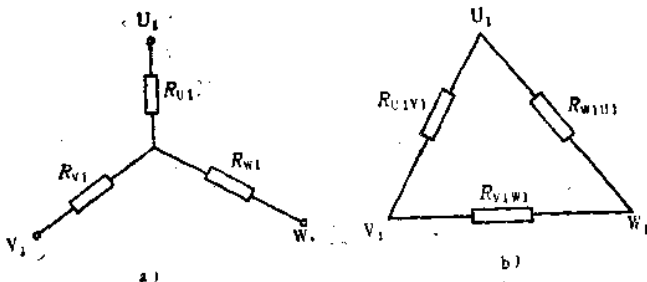


图1-45 星形联结转换为三角形联结

#### 2. 星形变换成三角形

星形联结的电阻 $R_{U1}$ 、 $R_{V1}$ 、 $R_{W1}$ 可以用一个等效的三角形联结的电阻 $R_{U1V1}$ 、 $R_{V1W1}$ 、 $R_{W1U1}$ 来代替。

$$R_{U1V1} = R_{U1} + R_{V1} + \frac{R_{U1}R_{V1}}{R_{W1}}$$

$$R_{V1W1} = R_{V1} + R_{W1} + \frac{R_{V1}R_{W1}}{R_{U1}}$$

$$R_{W1U1} = R_{W1} + R_{U1} + \frac{R_{U1}R_{V1}}{R_{V1}}$$

如  $R_{U1} = R_{V1} = R_{W1} = R_Y$

则  $R_{U1V1} = R_{V1W1} = R_{W1U1} = 3R_Y$

### 3. 三角形变换成星形

三角形电路中的电阻  $R_{U1V1}$ 、 $R_{V1W1}$ 、 $R_{W1U1}$  也可用其等效星形联结的电阻  $R_{U1}$ 、 $R_{V1}$ 、 $R_{W1}$  来代替, 即

$$R_{U1} = \frac{R_{W1U1}R_{U1V1}}{R_{U1V1} + R_{V1W1} + R_{W1U1}}$$

$$R_{V1} = \frac{R_{U1V1}R_{V1W1}}{R_{U1V1} + R_{V1W1} + R_{W1U1}}$$

$$R_{W1} = \frac{R_{V1W1}R_{W1U1}}{R_{U1V1} + R_{V1W1} + R_{W1U1}}$$

如  $R_{U1V1} = R_{V1W1} = R_{W1U1} = R_{\Delta}$

则  $R_{U1} = R_{V1} = R_{W1} = \frac{R_{\Delta}}{3}$

**例1-85** 在图1-46a所示的电路中,  $R_1 = 36\Omega$ ,  $R_2 = 18\Omega$ ,  $R_3 = 54\Omega$ ,  $R_4 = 4\Omega$ ,  $R_5 = 12\Omega$ ,  $R_6 = 24\Omega$ , 求电路输入端  $U_1$ 、 $V_1$  间等效电阻。

显然各电阻之间的联结不是简单的串并联, 应进行Y- $\Delta$ 变换, 将  $R_4$ 、 $R_5$ 、 $R_6$  组成的星形变换成三角形, 如图1-46b所示, 则有

$$R_{u1v1} = R_4 + R_6 + \frac{R_4 R_6}{R_5} = 4 + 12 + \frac{4 \times 12}{24} = 18\Omega$$

$$R_{v1w1} = R_5 + R_6 + \frac{R_5 R_6}{R_4} = 12 + 24 + \frac{12 \times 24}{4} = 108\Omega$$

$$R_{w1u1} = R_6 + R_4 + \frac{R_6 R_4}{R_5} = 24 + 4 + \frac{24 \times 4}{12} = 36\Omega$$

$R_1$  与  $R_{u1v1}$  并联, 等效电阻为



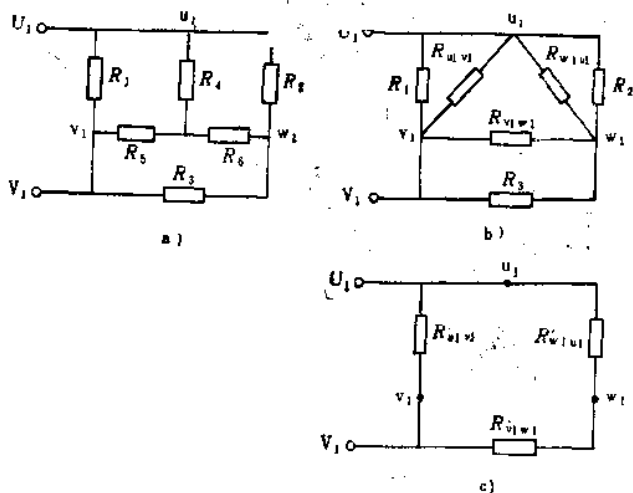


图1-46 求电路输入端等效电阻

$$R'_{u1v1} = \frac{R_1 R_{u1v1}}{R_1 + R_{u1v1}} = \frac{36 \times 18}{36 + 18} = 12 \Omega$$

$R_3$ 与 $R_{v1w1}$ 并联, 等效电阻为

$$R'_{v1w1} = \frac{R_3 R_{v1w1}}{R_3 + R_{v1w1}} = \frac{54 \times 108}{53 + 108} = 36 \Omega$$

$R_2$ 与 $R_{w1u1}$ 并联, 等效电阻为

$$R'_{w1u1} = \frac{R_2 R_{w1u1}}{R_2 + R_{w1u1}} = \frac{36 \times 36}{36 + 36} = 18 \Omega$$

简化后电路如图1-46c所示, 等效电阻为

$$R_{u1v1} = \frac{R'_{u1v1} (R'_{v1w1} + R'_{w1u1})}{R'_{u1v1} + R'_{v1w1} + R'_{w1u1}} = \frac{12 \times (36 + 18)}{12 + 36 + 18} = 9.82 \Omega$$

**例1-86** 在图1-47中,  $R_1 = 4 \Omega$ ,  $R_2 = 10 \Omega$ ,  $R_3 = 28 \Omega$ ,  $R_4 = 12 \Omega$ ,  $R_5 = 14 \Omega$ , 求 $U_1$ 、 $V_1$ 间等效电阻。

先把 $R_1$ 、 $R_2$ 、 $R_3$ 接成三角形的形式, 如图1-47b所示, 再将三

角形变换成星形如图1-47c所示, 则有

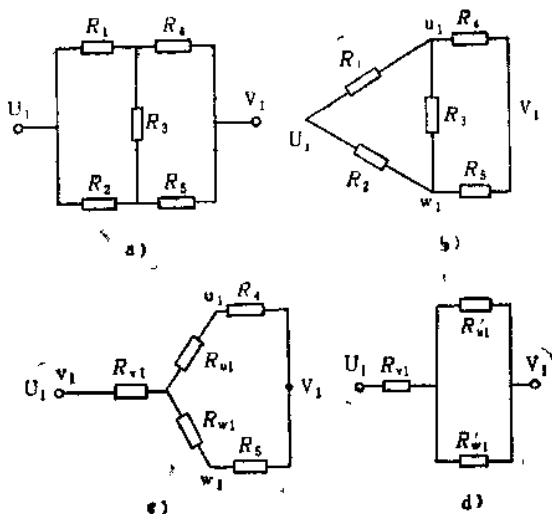


图1-47 求  $U_1$ 、 $V_1$  间等效电阻

$$R_{u1} = \frac{R_{w1u1}R_{u1v1}}{R_{u1v1} + R_{v1w1} + R_{w1u1}} = \frac{28 \times 4}{4 + 10 + 28} = 2.67 \Omega$$

$$R_{v1} = \frac{R_{u1v1}R_{v1w1}}{R_{u1v1} + R_{v1w1} + R_{w1u1}} = \frac{4 \times 10}{4 + 10 + 28} \\ = 0.952 \Omega$$

$$R_{w1} = \frac{R_{v1w1}R_{w1u1}}{R_{u1v1} + R_{v1w1} + R_{w1u1}} = \frac{10 \times 28}{4 + 10 + 28} \\ = 6.67 \Omega$$

图1-47c中, 将  $R_{u1}$  与  $R_4$  串联为  $R'_{u1}$ ,  $R_{w1}$  与  $R_5$  串联为  $R'_{w1}$ , 最后简化成如图1-47d所示,  $U_1$ 、 $V_1$  间等效电阻为

$$R_{u1v1} = R_{v1} + \frac{R'_{u1}R'_{w1}}{R'_{u1} + R'_{w1}} \\ = 0.952 + \frac{(2.67 + 12)(0.952 + 14)}{2.67 + 12 + 0.952 + 14} = 8.4 \Omega$$

例1-37 在图1-48中,  $R_1 = 2\Omega$ ,  $R_2 = 4\Omega$ ,  $R_3 = 6\Omega$ ,  $R_4 = 8\Omega$ ,  $R_5 = 10\Omega$ , 求  $U_1$ 、 $V_1$  间等效电阻。

将三角形接法  $R_1$ 、 $R_2$ 、 $R_3$  用等效星形接法的  $R_{u1}$ 、 $R_{v1}$ 、 $R_{w1}$  来代替, 如图1-48b所示。

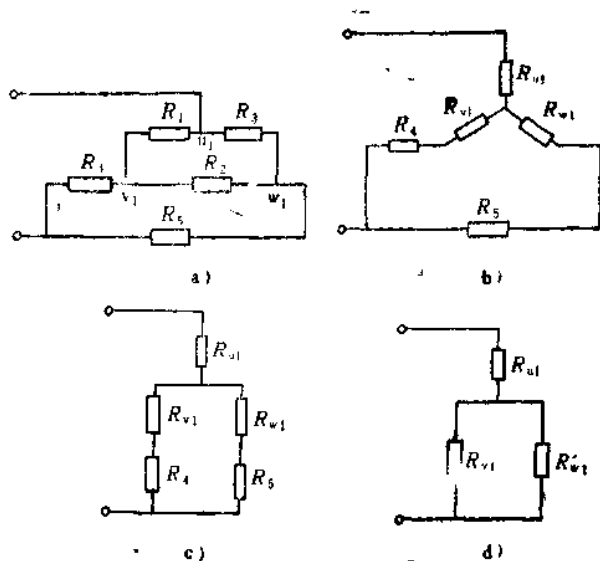


图1-48 求  $U_1$ 、 $V_1$  间等效电阻

$$R_{u1} = \frac{R_{w1u1}R_{u1v1}}{R_{u1v1} + R_{v1w1} + R_{w1u1}} = \frac{6 \times 2}{2 + 4 + 6} = 1\Omega$$

$$R_{v1} = \frac{R_{u1v1}R_{v1w1}}{R_{u1v1} + R_{v1w1} + R_{w1u1}} = \frac{2 \times 4}{2 + 4 + 6} = 0.667\Omega$$

$$R_{w1} = \frac{R_{v1w1}R_{w1u1}}{R_{u1v1} + R_{v1w1} + R_{w1u1}} = \frac{4 \times 6}{2 + 4 + 6} = 2\Omega$$

图1-48c中  $R_{u1}$  与  $R_4$  串联为  $R'_{v1}$ 、 $R_{w1}$  与  $R_5$  串联为  $R'_{w1}$ , 再简化成图1-48d的形式,  $U_1$ 、 $V_1$  间的等效电阻为

$$R'_{v1} = R_{v1} + R_4 = 0.667 + 8 = 8.667\Omega$$

$$R'_{w1} = R_{w1} + R_5 = 2 + 10 = 12\Omega$$

$$R_{u1v1} = R_{u1} + \frac{R'_{v1} R'_{w1}}{R'_{v1} + R'_{w1}} = 1 + \frac{8.67 \times 12}{8.67 + 12} = 6.03 \Omega$$

**例1-88** 在图1-49 a中,  $R_1 = 60\Omega$ ,  $R_2 = 30\Omega$ ,  $R_3 = 90\Omega$ ,  $R_4 = 120\Omega$ , 求当负载电阻  $R_{Lz} = 60\Omega$  及负载电阻开路及短路时,  $U_1$ 、 $V_1$  端的输入电阻。

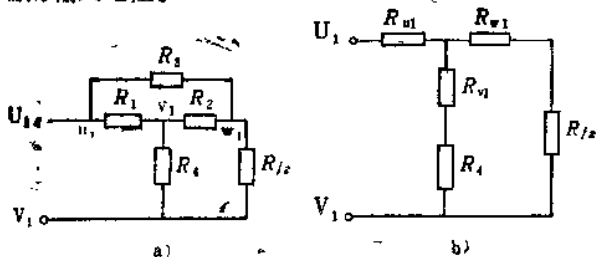


图1-49 求  $U_1$ 、 $V_1$  端的输入电阻

先将电路作  $\Delta$ - $Y$  变换, 如图1-49b所示。

$$R_{u1} = \frac{R_3 R_1}{R_1 + R_2 + R_3} = \frac{90 \times 60}{60 + 30 + 90} = 30\Omega$$

$$R_{v1} = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2 + R_3} = \frac{60 \times 30}{60 + 30 + 90} = 10\Omega$$

$$R_{w1} = \frac{R_2 R_3}{R_1 + R_2 + R_3} = \frac{30 \times 90}{60 + 30 + 90} = 15\Omega$$

当负载电阻  $R_{Lz} = 60\Omega$  时,  $U_1$ 、 $V_1$  端的输入电阻为

$$\begin{aligned} R_{u1v1} &= R_{u1} + \frac{(R_{v1} + R_4)(R_{w1} + R_{Lz})}{R_{v1} + R_4 + R_{w1} + R_{Lz}} \\ &\approx 30 + \frac{(10 + 120)(15 + 60)}{10 + 120 + 15 + 60} = 77.6 \Omega \end{aligned}$$

当负载电阻  $R_{Lz} = \infty$  (开路) 时

$$R'_{u1v1} = R_{u1} + R_{v1} + R_4 = 30 + 10 + 120 = 150\Omega$$

当负载电阻  $R_{Lz} = 0$  (短路) 时

$$R''_{u1v1} = R_{u1} + \frac{(R_0 + R_4)R_{w1}}{R_{v1} + R_4 + R_{w1}}$$

$$= 30 + \frac{(10 + 120) \times 15}{10 + 120 + 15} = 33.4 \Omega$$

例1-89 在图1-50a中,  $R_1 = R_6 = R_8 = 80 \Omega$ ,  $R_2 = R_4 = R_3 = 60 \Omega$ , 求电路中  $U_1$ 、 $V_1$  两点间的等效电阻。

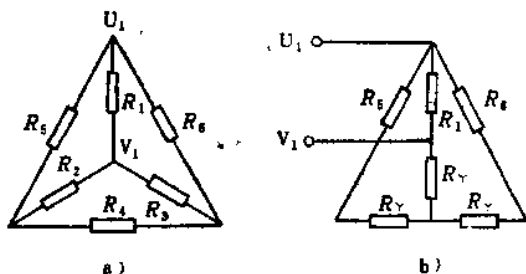


图1-50 求电路中  $U_1$ 、 $V_1$  间等效电阻

对此复杂电路, 先进行  $Y-\Delta$  变换, 但必须保持  $U_1$ 、 $V_1$  两点间的电阻不参预变换, 由于  $R_2$ 、 $R_3$ 、 $R_4$  三者相等, 若将它们变换为星形计算最简便, 其等效电阻为

$$R_Y = \frac{R_{\Delta}}{3} = \frac{60}{3} = 20 \Omega$$

由图1-50a变换为图1-50b,  $U_1$ 、 $V_1$  间等效电阻为

先将  $R_5$  与  $R_3$ ,  $R_Y$  与  $R_6$  分别串联, 然后再将两部分并联, 其结果再与  $R_Y$  串联, 最后再与  $R_7$  并联, 求得的即为  $U_1$ 、 $V_1$  间等效电阻。

$$\begin{aligned} R_{U_1, V_1} &= \frac{R_1 \left[ R_Y + \frac{(R_Y + R_6)(R_Y + R_8)}{R_Y + R_6 + R_Y + R_8} \right]}{R_1 + R_Y + \frac{(R_Y + R_6)(R_Y + R_8)}{R_Y + R_6 + R_Y + R_8}} \\ &= \frac{80 \times \left[ 20 + \frac{(20 + 80)(20 + 80)}{20 + 80 + 20 + 80} \right]}{80 + 20 + \frac{(20 + 80)(20 + 80)}{20 + 80 + 20 + 80}} \\ &= 37.3 \Omega \end{aligned}$$

#### 四、戴维南定理

一个复杂的有源二端网络，对外电路来说可简化成一个由电动势 $E_0$ 和内阻 $R_0$ 串联的简单等值电路。 $E_0$ 等于原来网络的开路电压 $U_0$ ， $R_0$ 等于原来网络中所有电动势为零时的等值电阻。

图1-51a是一个有源二端网络，当网络外部电流为 $I$ ，电压为

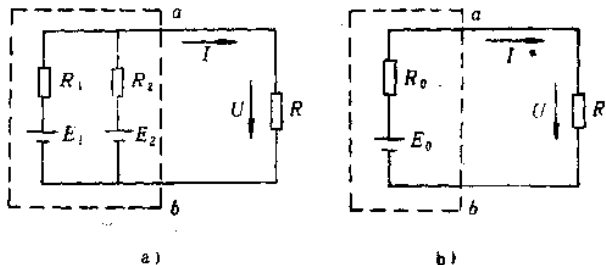


图1-51 戴维南定理简化图

$U$ 时，可以用图b的等值电路来代替它。

由戴维南定理可知找 $E_0$ 、 $R_0$ 的一般原则是：

(1)  $R_0$ 等于 $R_1$ 、 $R_2$ 并联后的总电阻，也就是说设有源网络中所有电动势均为零，把它变为无源两端网络的等值电阻，即从 $ab$ 端看过去的总电阻，如图1-52a所示。

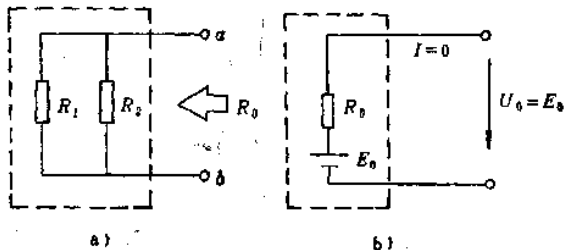


图1-52 戴维南定理等效电路

(2)  $E_0$ 等于等值网络的开路电压，也就是原来网络的开路电压，如图1-52b所示。

例1-90 在图1-53a中, 已知 $E_1 = 20\text{V}$ ,  $E_2 = 12\text{V}$ ,  $R_1 = 2\text{k}\Omega$ ,  $R_2 = 6\text{k}\Omega$ ,  $R_3 = 10\text{k}\Omega$ , 试用戴维南定理求 $R_3$ 中流过的电流。

根据戴维南定理, 可视为 $R_3$ 开路, 如图1-53b所示。

$$I_1' = \frac{E_1 - E_2}{R_1 + R_2} = \frac{20 - 12}{2 + 6} = 1\text{mA}$$

开路电压即是 $R_3$ 两端电压

$$U_0 = E_2 + I' R_2 = 12 + 1 \times 10^{-3} \times 6 \times 10^3 = 18\text{V}$$

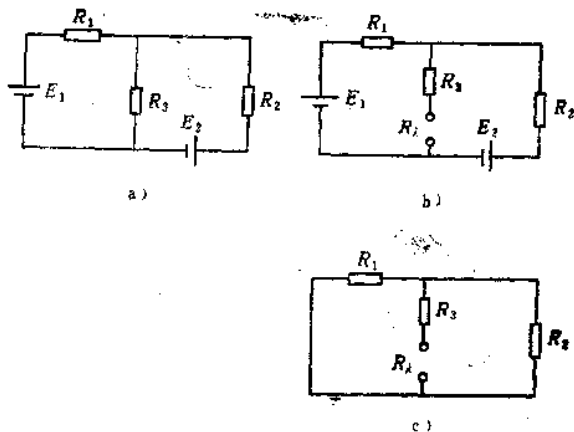


图1-53 试用戴维南定理求流过 $R_3$ 中的电流

在图1-53c所示电路中

$$R_0 = R_3 + \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} = 10 + \frac{2 \times 6}{2 + 6} = 11.5\text{k}\Omega$$

流过 $R_3$ 的电流为

$$I_3 = \frac{U_0}{R_0} = \frac{18}{11.5} = 1.57\text{mA}$$

例1-91 在图1-54中, 已知 $E_1 = 15\text{V}$ ,  $E_2 = 30\text{V}$ ,  $R_1 = 6\Omega$ ,  $R_2 = 3\Omega$ ,  $R_3 = 12\Omega$ ,  $R_4 = 9\Omega$ , 通过电阻 $R_1$ 中的电流是 $1.5\text{A}$ , 求电阻 $R_4$ 的大小。

根据戴维南定理, 将 $R_4$ 开路如图所示, 则有

$$I = \frac{E_1}{R_1 + R_3} = \frac{15}{6 + 9} = 1\text{A}$$

$$I_2 = \frac{E_2}{R_3 + R_2} = \frac{30}{12 + 3} = 2\text{A}$$

$$U_1 = I_1 R_3 = 1 \times 9 = 9\text{V}$$

$$U_2 = I_2 R_3 = 2 \times 12 = 24\text{V}$$

$$U_{AB} = U_2 - U_1 = 24 - 9 = 15\text{V}$$

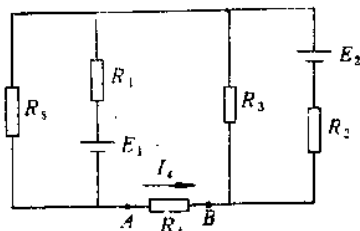


图1-54 求电阻 $R_4$ 的大小

$$R_4 = \frac{U_{AB}}{I_4} = \frac{15}{1.5} = 10\Omega$$

例1-92 应用戴维南定理求如图1-55a所示的电路中电阻 $R_1$ 上通过的电流和它两端的电压。已知 $E_1 = 50\text{V}$ ,  $E_2 = 35\text{V}$ ,  $R_1 = 8\Omega$ ,  $R_2 = 5\Omega$ ,  $R_3 = 10\Omega$ ,  $R_4 = R_5 = R_6 = 6\Omega$ 。

断开 $R_1$ 所在的支路, 求 $a$ 、 $b$ 两点间的等效电动势, 即 $a$ 、 $b$ 两点的开路电压, 如图1-55b所示。

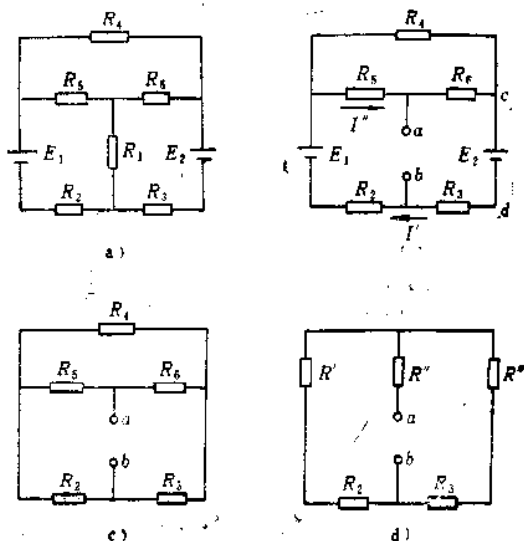


图1-55 求通过 $R_1$ 上的电流及两端电压



首先求出流过电阻  $R_2$ 、 $R_3$  的电流  $I'$  和流过电阻  $R_4$ 、 $R_5$ 、 $R_6$  的电流  $I''$ 。

$$I' = \frac{E_1 - E_2}{R_2 + R_3 + \frac{R_1(R_4 + R_5 + R_6)}{R_4 + R_5 + R_6}}$$

$$= \frac{50 - 35}{5 + 10 + \frac{6(6 + 6)}{6 + 6 + 6}} = 0.789\text{A}$$

$$I'' = I' \frac{R_4}{R_4 + R_5 + R_6} = 0.789 \times \frac{6}{6 + 6 + 6} = 0.263\text{A}$$

$a$ 、 $b$  两点间的开路电压为

$$U_{ab} = U_{ac} + U_{cd} + U_{db}$$

$$= I'' R_6 + E_2 + I' R_3 = 0.263 \times 6 + 35$$

$$+ 0.789 \times 10$$

$$= 44.5\text{V}$$

将电动势  $E_1$ 、 $E_2$  短路，如图1-55c所示，求等效电动势的内阻  $R_0$ ，但不能直接按混联电路进行分析，首先将  $R_4$ 、 $R_5$ 、 $R_6$  构成的三角形电路变换成等效星形电路，如图1-55d所示。

$$R_1 = R_2 = R_3 = \frac{R_4}{3} = \frac{R_5}{3} = \frac{R_6}{3} = \frac{6}{3} = 2\Omega$$

$$R_0 = R + \frac{(R + R_2)(R + R_3)}{R + R_2 + R + R_3} = 2 + \frac{(2 + 5)(2 + 10)}{2 + 5 + 2 + 10}$$

$$= 6.42\Omega$$

通过  $R_1$  的电流和它端的电压分别为

$$I = \frac{U_{ab}}{R_0 + R_1} = \frac{44.5}{6.42 + 8} = 3.09\text{A}$$

$$U = IR_1 = 3.09 \times 8 = 24.7\text{V}$$

例1-93 在图1-56a中，电池组的电源电压  $E_1 = 34\text{V}$ ，内阻  $r_1 = 2\Omega$ ，发电机的电源电压  $E_2 = 30\text{V}$ ，内阻  $r_2 = 1\Omega$ ，从电池组到负载的导线电阻  $R_1 = 1\Omega$ ，试问要使负载端电压为  $28\text{V}$ ，负载电阻

$R$  应调到什么数值。

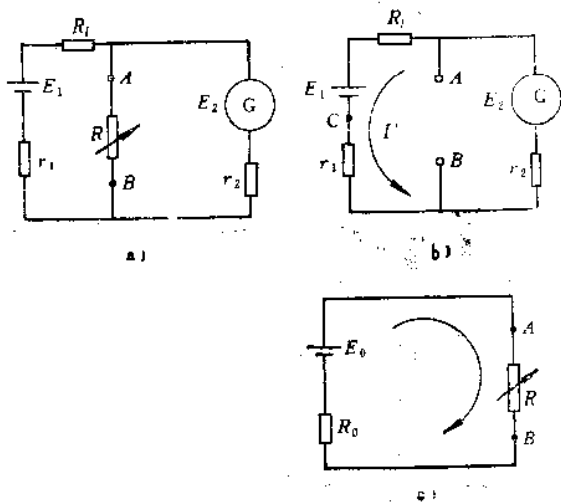


图1-56 求负载电阻  $R$  的数值

用戴维南定理分析, 将  $R$  断开, 如图1-56b所示, 求  $A$ 、 $B$  两点间开路电压, 即

$$I' = \frac{E_2 - E_1}{R_L + r_1 + r_2} = \frac{34 - 30}{1 + 2 + 1} = 1\text{A}$$

沿回路  $ACB$  的电压为

$$U_0 = I' R_L + E_1 + I' r_1 = 1 \times 1 + 30 + 1 \times 2 = 33\text{V}$$

当全部电源不作用时, 等效电阻为

$$R_0 = \frac{(R_L + r_1)r_2}{R_L + r_1 + r_2} = \frac{(1 + 2) \times 1}{1 + 2 + 1} = 0.75 \Omega$$

等效电路如图1-56c所示, 则有

$$U_{AB} = U_0 - I R_0$$

$$I = \frac{U_0 - U_{AB}}{R_0} = \frac{33 - 28}{0.75} = 6.67\text{A}$$

$$R = \frac{U_{AB}}{I} = \frac{28}{6.67} = 4.2\Omega$$

例1-94 在图1-57a中,  $E_1 = 30V$ ,  $E_2 = 20V$ ,  $E_3 = 15V$ ,  $R_1 = 15\Omega$ ,  $R_2 = R_3 = R_4 = 10\Omega$ ,  $R_5 = 15\Omega$ , 用戴维南定理求 A、B 两点间电压。

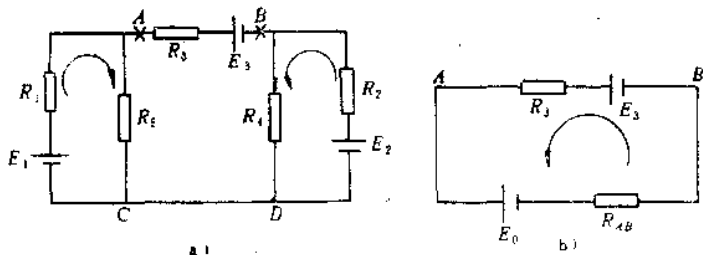


图1-57 求 A、B 两点间电压

将图1-57a中的支路AB断开, 用符号×表示, 则有

$$I_1 = \frac{E_1}{R_1 + R_5} = \frac{30}{15 + 15} = 1A$$

$$I_2 = \frac{E_2}{R_2 + R_4} = \frac{20}{10 + 10} = 1A$$

沿支路ABDC, 求得开路电压为

$$U'_{AB} = I_1 R_5 - I_2 R_4 = 1 \times 15 - 1 \times 10 = 5V$$

等效电阻为  $R_1$  与  $R_5$  并联,  $R_2$  与  $R_4$  并联, 然后两者并联

$$R_{AB} = \frac{R_1 R_5}{R_1 + R_5} + \frac{R_2 R_4}{R_2 + R_4} = \frac{15 \times 15}{15 + 15} + \frac{10 \times 10}{10 + 10} = 12.5\Omega$$

等效电路如图1-57b所示,  $E_0 = U'_{AB}$ , 闭合电路中的电流和 A、B 两点间的电压为

$$I = \frac{E_3 - E_0}{R_3 + R_{AB}} = \frac{15 - 5}{10 + 12.5} = 0.444A$$

$$U_{AB} = E_3 - IR_3 = 15 - 0.444 \times 10 = 10.6 \text{V}$$

例1-95 在图1-58中，  
 $E = 20\text{V}$ ， $I_s = 3\text{A}$ ， $R_1 = 2\Omega$ ，  
 $R_2 = 3\Omega$ ， $R_3 = 15\Omega$ ， $R_4 = 15\Omega$ ，  
 $R_5 = 5\Omega$ ， $R_6 = 3\Omega$ ，求电  
 流表的电流。

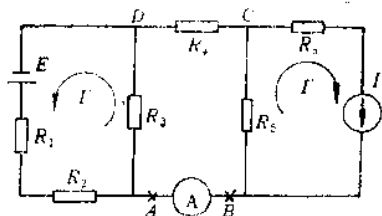


图1-58 求电流表的电流

用戴维南定理理解，将电流  
 表断开，如图中用×表示，则有

$$I' = I_s = 3\text{A}$$

$$I'' = \frac{E}{R_1 + R_2 + R_3} = \frac{20}{2 + 3 + 15} = 1\text{A}$$

沿支路ADCA，求开路电压，则有

$$U_{AB} = I''R_3 - I'R_5 = 1 \times 15 - 3 \times 5 = 0$$

由于等效电源电压为零，将电流表接入电路，所以读数为  
 零。

例1-96 在图1-59a中， $E_1 = 10\text{V}$ ， $E_2 = 2.5\text{V}$ ， $R_1 = R_2 = 10$

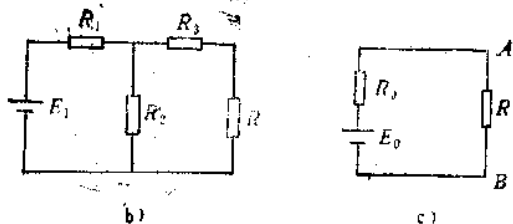
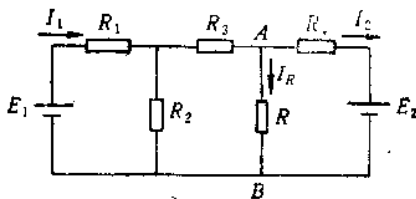


图1-59 求电阻R的大小

$\Omega$ ,  $R_3 = 5\Omega$ ,  $R_4 = 20\Omega$ , 当电流  $I_2 = 0$  时, 试求电阻  $R$  的大小。

当  $I_2 = 0$  时,  $U_{AB} = E_2 = 2.5V$ , 且可视  $R$  断开, 用戴维南定理简化成图1-59b、1-59c的形式, 则有

$$E_0 = \frac{R_2}{R_1 + R_2} E_1 = \frac{10}{10 + 10} \times 10 = 5V$$

$$R_0 = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} + R_3 = \frac{10 \times 10}{10 + 10} + 5 = 10\Omega$$

$$U_{AB} = \frac{R}{R_0 + R} E_0 = \frac{5R}{10 + R} = 2.5V$$

$$R = 10\Omega$$

例1-97 如图1-60a所示, 已知  $R_1 = 10\Omega$ ,  $R_2 = 20\Omega$ ,  $R_3 =$

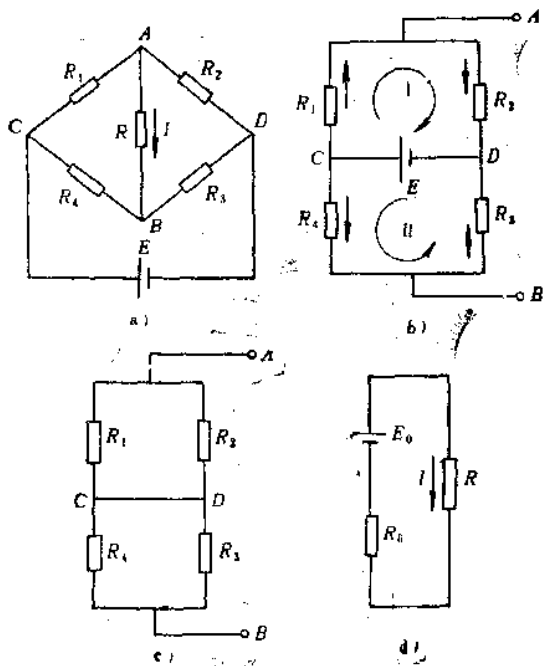


图1-60 求流过电阻  $R$  的电流

$30\Omega$ ,  $R_1 = 40\Omega$ ,  $E = 30\text{V}$ , 求流过电阻  $R (= 5\Omega)$  的电流。

只求电阻  $R$  支路的电流, 用戴维南定理较简便, 即

$$U_{AB} = U_{AD} + U_{DB} = \frac{ER_2}{R_1 + R_2} + \frac{ER_3}{R_3 + R_4}$$

$$= \frac{30 \times 20}{10 + 20} + \frac{30 \times 30}{30 + 40} = 7.1\text{V}$$

$$R_{AB} = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} + \frac{R_3 R_4}{R_3 + R_4} = \frac{10 \times 20}{10 + 20} + \frac{30 \times 40}{30 + 40}$$

$$= 23.8\Omega$$

根据图1-60d求电阻  $R$  中的电流, 即

$$I = \frac{E_s}{R_0 + R} = \frac{7.1}{23.8 + 5} = 0.247\text{A}$$

例1-98 如图1-61a所示,  $E = 30\text{V}$ ,  $R_1 = 100\Omega$ ,  $R_2 = 150\Omega$ ,  $R_3 = 300\Omega$ ,  $R_4 = 500\Omega$ ,  $R_5 = 200\Omega$ , 电源内阻等于零, 求流经电阻  $R_4$  的电流。

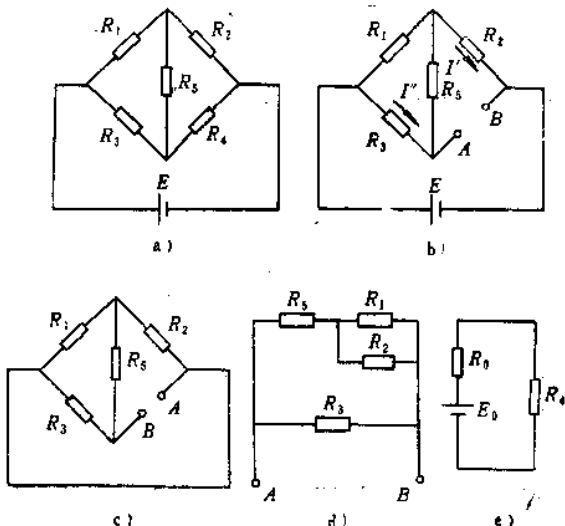


图1-61 求流经电阻  $R_4$  的电流

当只需要计算复杂电路中某一支路的电流时，应用戴维南定理较方便。

断开电阻  $R_4$ ，如图1-61b所示，求等效电源的电动势，为此首先求  $I'$  及  $I''$ ，即

$$I' = \frac{E}{R_2 + \frac{R_1(R_3 + R_5)}{R_1 + R_3 + R_5}} = \frac{30}{150 + \frac{100(300 + 200)}{100 + 300 + 200}}$$

$$= 0.129 \text{ A}$$

$$I'' = I' \frac{R_3}{R_1 + R_3 + R_5} = 0.129 \frac{300}{100 + 300 + 200}$$

$$= 0.0343 \text{ A}$$

$$U_{AB} = U_{R_4} + U_{R_5} = I'' R_5 + I' R_2 = 0.0343 \times 200$$

$$+ 0.129 \times 150 = 21.9 \text{ V}$$

求电动势  $E$  短接时的等效电阻，如图1-61c、1-61d所示，则有

$$R_{12} = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} = \frac{100 \times 150}{100 + 150} = 60 \Omega$$

$$R_{AB} = \frac{(R_{12} + R_5) R_3}{R_{12} + R_5 + R_3} = \frac{(60 + 200) \times 300}{60 + 200 + 300} = 139 \Omega$$

根据图1-61c所示的等效电路求流经  $R_4$  中的电流，则有

$$E_0 = U_{AB} = 21.9 \text{ V}$$

$$R_0 = R_{AB} = 139 \Omega$$

$$I = \frac{E_0}{R_0 + R_4} = \frac{21.9}{139 + 500} = 0.0343 \text{ A} = 34.3 \text{ mA}$$

### 五、叠加原理

在线性电路中，任一支路电流都是电路中各个电动势单独作用时在该支路产生的电流的代数和，这一性质称为叠加原理。也就是说，在有二个以上电动势同时供给负载的情况下，计算每一支路中的电流，可以分别算出每个电动势在各支路中所产生的电流，然后把计算结果叠加起来，就可以得到原电路中各支路的电

流，如图1-62所示。

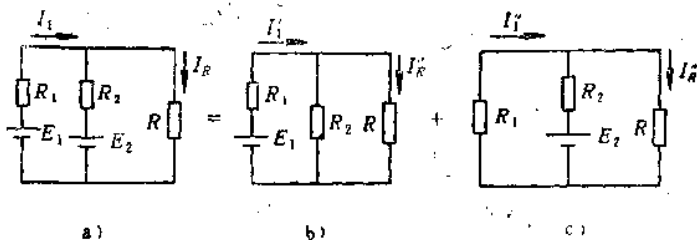


图1-62 叠加原理简化电路图

应用叠加原理进行计算时，应注意以下几点：

(1) 只能用来计算线性电路的电流和电压，而不能计算功率；

(2) 假设电路中只有一个电动势单独作用时，要将其余电源的电动势短路（即假定其余的电动势为零），但它们的内阻仍保留；

(3) 电路的联接以及电路中所有电阻都不能更动，所谓电动势不起作用，就是把该电压源予以短路；电流源不起作用，就是把它断开；

(4) 叠加时要注意电流和电压的方向，求代数和时要注意各个电流和电压的正负。如果电流分量的正方向与原支路电流所标出的正方向相同时，取正；不相同取负。

例1-99 在图1-63a中， $E_1 = 40\text{V}$ ， $E_2 = 20\text{V}$ ， $R_1 = 4\Omega$ ， $R_2 = 4\Omega$ ， $R_3 = 10\Omega$ ， $r_2 = 2\Omega$ ，用叠加原理求电流  $I_2$ 。

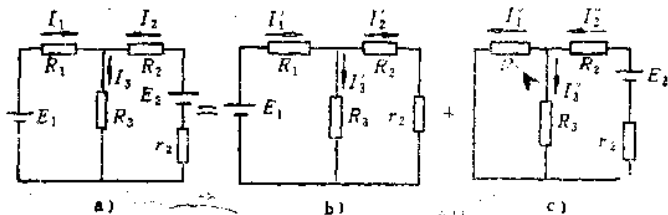


图1-63 用叠加原理求电流



根据叠加原理, 可把图1-63a 的电路可分解成图1-63b、-63c 两个电路叠加的形式。

在  $E_1$  单独作用时, 如图1-63b所示, 求支路电流, 即

$$I_1' = \frac{E_1}{R_1 + \frac{R_3(R_2 + r_2)}{R_3 + R_2 + r_2}} = \frac{40}{4 + \frac{10 \times (4 + 2)}{10 + 4 + 2}} = 5.16 \text{ A}$$

$$I_2' = \frac{R_3}{R_3 + R_2 + r_2} I_1' = \frac{10}{10 + 4 + 2} \times 5.16 = 3.23 \text{ A}$$

在  $E_2$  单独作用时, 如图 c 所示, 求支路电流, 即

$$I_1'' = \frac{E_2}{R_2 + r_2 + \frac{R_1 R_3}{R_1 + R_3}} = \frac{20}{4 + 2 + \frac{4 \times 10}{4 + 10}} = 2.26 \text{ A}$$

将各电动势单独作用时产生的原支路电流的分量叠加起来, 即可求出原电路中的支路电流。由于  $I_2$  的  $I_2'$  的分量正方向与  $I_2$  的正方向相反, 所以  $I_2'$  取负值;  $I_2$  的另一个分量  $I_2''$  的正方向与  $I_2$  的正方向相同, 所以取正值, 把  $I_2'$  和  $I_2''$  叠加起来, 即

$$I_2 = I_2'' - I_2' = 2.63 - 3.23 = -1.07 \text{ A}$$

$I_2$  的实际方向与假设方向相反。

**例1-100** 在图1-64a所示电路中, 已知  $E = 20\text{V}$ ,  $I_s = 20\text{A}$ ,  $R_1 = 5\Omega$ ,  $R_2 = 3\Omega$ ,  $R_{fx} = 7\Omega$ , 用叠加原理计算负载电阻  $R_{fx}$  消耗的功率。

电源  $E$  单独作用, 如图1-64b所示 (电流源开路), 则有

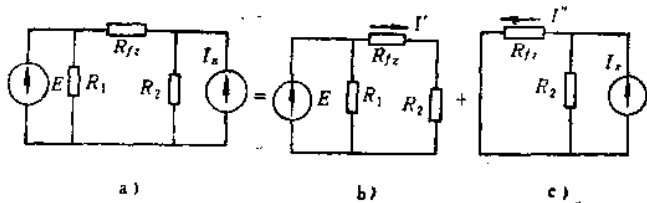


图1-64 用叠加原理求功率

$$I' = \frac{E}{R_1 + R_2} = \frac{20}{5 + 3} = 2.5 \text{ A}$$

电流源  $I$  单独作用, 如图 1-64c (电压源短路) 所示, 则有

$$I'' = I \cdot \frac{R_2}{R_2 + R_{fz}} = 20 \times \frac{3}{3 + 7} = 6 \text{ A}$$

将两个电流分量叠加起来, 即

$$I = I'' - I' = 6 - 2.5 = 3.5 \text{ A}$$

负载电阻消耗的功率为

$$P = I^2 R_{fz} = 3.5^2 \times 7 = 85.8 \text{ W}$$

**例 1-101** 在图 1-65a 所示电路中, 已知  $E_1 = 150 \text{ V}$ ,  $r_1 = 0.8 \Omega$ ,  $E_2 = 120 \text{ V}$ ,  $r_2 = 0.5 \Omega$ , 负载电阻  $R_{fz} = 25 \Omega$ , 求各支路电流  $I_1$ 、 $I_2$  和  $I$ 。

$E_1$  单独作用时, 如图 1-65b 所示, 求各支路电流, 即

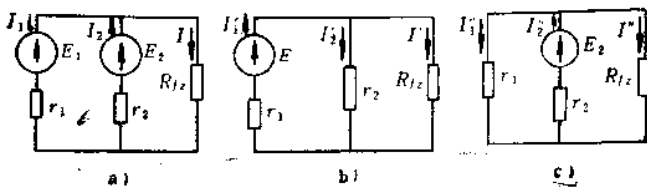


图 1-65 用叠加原理求各支路电流

$$I_1' = \frac{E_1}{r_1 + \frac{r_2 R_{fz}}{r_2 + R_{fz}}} = \frac{150}{0.8 + \frac{0.5 \times 25}{0.5 + 25}} = 116 \text{ A}$$

根据并联电阻的电流分配关系则有

$$I_2' = \frac{R_{fz}}{r_2 + R_{fz}} I_1' = \frac{25}{0.5 + 25} \times 116 = 114 \text{ A}$$

$$I_1'' = \frac{r_2}{r_2 + R_{fz}} I_2'' = \frac{0.5}{0.5 + 25} \times 116 = 2.27 \text{ A}$$

$E_2$  单独作用时, 如图 1-65c 所示, 求各支路电流, 则有

$$I_2'' = \frac{E_2}{\frac{r_1 R_{fz}}{r_1 + R_{fz}} + r_2} = \frac{120}{\frac{0.8 \times 25}{0.8 + 25} + 0.5} = 93.8 \text{ A}$$

$$I_1' = \frac{R_{fz}}{r_1 + R_{fz}} I_2'' = \frac{25}{0.8 + 25} \times 93.8 = 90.9 \text{ A}$$

$$I'' = \frac{r_1}{r_1 + R_{fz}} I_2'' = \frac{0.8}{0.8 + 25} \times 93.8 = 2.91 \text{ A}$$

将各电动势单独作用时产生的原支路电流叠加起来，即可求出原电路中各支路的电流。由于  $I_1$  的  $I_1'$  的分量正方向与  $I_1$  的正方向相同， $I_1'$  取正值； $I_1$  的另一个分量  $I_1''$  的正方向与  $I_1$  的正方向相反， $I_1''$  取负值。把  $I_1'$  和  $I_1''$  叠加起来。

$$I_1 = I_1' - I_1'' = 116 - 90.9 = 25.1 \text{ A}$$

同理则有

$$I_2 = I_2' - I_2'' = 93.8 - 114 = -20.2 \text{ A}$$

$$I = I' + I'' = 2.27 + 2.91 = 5.18 \text{ A}$$

例1-102 在图1-66a中，已知  $E_1 = 15\text{V}$ ， $E_2 = 13\text{V}$ ， $E_3 =$

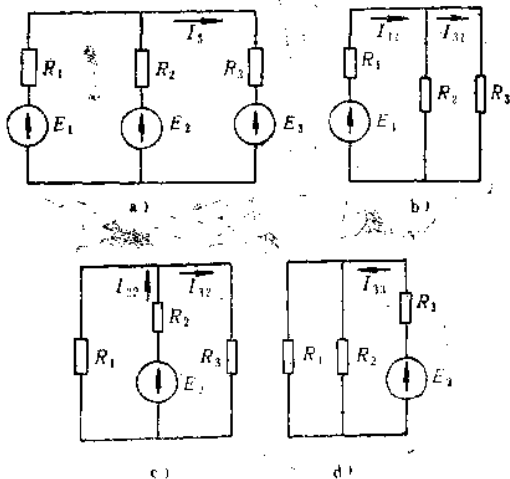


图1-66 用叠加法求  $R_4$  支路电流

14V,  $R_1 = 3\Omega$ ,  $R_2 = 2\Omega$ ,  $R_3 = 15\Omega$ , 用叠加法求  $R_3$  支路的电流。

$E_1$  单独作用时, 如图1-66b所示, 则有

$$I_{11} = \frac{E_1}{R_1 + \frac{R_2 R_3}{R_2 + R_3}}$$

$$I_{31} = I_{11} \frac{R_2}{R_2 + R_3} = \frac{E_1 R_2}{R_1 R_2 + R_2 R_3 + R_3 R_1}$$

$$= \frac{15 \times 2}{3 \times 2 + 2 \times 15 + 15 \times 3} = 0.371\text{A}$$

$E_2$  单独作用时, 如图1-66c所示, 则有

$$I_{32} = \frac{E_2 R_1}{R_1 R_2 + R_2 R_3 + R_3 R_1} = \frac{13 \times 3}{3 \times 2 + 2 \times 15 + 15 \times 3}$$

$$= 0.481\text{A}$$

$E_3$  单独作用时, 如图1-66d所示, 则有

$$I_{33} = \frac{-E_3}{R_3 + \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}} = \frac{-14}{15 + \frac{3 \times 2}{3 + 2}} = -0.864\text{A}$$

$E_1$ 、 $E_2$ 、 $E_3$  同时作用时, 则有

$$I_3 = I_{31} + I_{32} + I_{33} = 0.371 + 0.481 - 0.864 = -0.012\text{A}$$

$I_3$  的实际方向与假定方向相反。

例1-103 如图1-67a所示,  $E_1 = 15\text{V}$ ,  $E_2 = 8\text{V}$ ,  $E_3 = 5\text{V}$ ,  $R_1 = R_2 = R_3 = 5\Omega$ ,  $R_4 = 7\Omega$ , 用叠加原理求电流  $I_3$ 。

$E_1$  单独作用时, 如图b所示, 这时  $R_4$  被短路, 可以把它拿去, 此时则有

$$I_3' = \frac{E_1}{R_1 + \frac{R_2 R_3}{R_2 + R_3}} = \frac{15}{5 + \frac{5 \times 5}{5 + 5}} = 2\text{A}$$

$E_2$  单独作用时, 如图1-67c所示, 这时  $R_4$  对电流  $I_3$  也不起作用, 则有

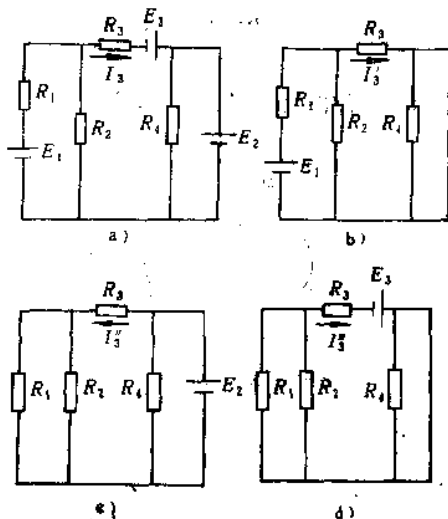


图1-67 用叠加原理求电流 $I_3$

$$I_3'' = \frac{E_2}{R_3 + \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}} = \frac{8}{5 + \frac{5 \times 5}{5 + 5}} = 1.07 \text{ A}$$

$E_3$ 单独作用时,如图1-67d所示,这时 $R_4$ 对电流 $I_3''$ 同样不起作用,则有

$$I_3''' = \frac{E_3}{R_3 + \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}} = \frac{5}{5 + \frac{5 \times 5}{5 + 5}} = 0.667 \text{ A}$$

$E_1$ 、 $E_2$ 、 $E_3$ 同时作用时,则有

$$I_3 = I_3' - I_3'' + I_3''' = 2 - 1.07 + 0.667 = 1.6 \text{ A}$$

## 第六节 电容器计算

电容器是一种储存电荷的容器,而电容量是衡量电容器在一定电压下储存电荷能力大小的物理量。电容器的两极间在单位电压作用下所储存的电荷量叫做该电容器的电容,即

$$C = \frac{Q}{U}$$

式中  $Q$ ——一个极板上所储存电量(C);

$U$ ——两极板间电压(V);

$C$ ——电容量(F)。

电容器中储藏的电场能量用 $W$ 表示, 单位是J, 即

$$W = \frac{1}{2} CU^2$$

### 一、电容器的并联

两个或两个以上的电容器, 接在相同的两点之间的连接方式叫电容器的并联, 如图1-68所示。其特点是:

(1) 每个电容器两端的电压相同, 并等于外加电压, 即

$$U = U_1 = U_2 = \dots U_n$$

(2) 各并联电容器的等效电容器所带电量等于各个并联电容器所带电量之和, 即

$$Q = Q_1 + Q_2 + \dots + Q_n$$

(3) 总电容量等于各支路电容量之和。

$$C = C_1 + C_2 + \dots + C_n$$

(4) 总电流等于各支路电流之和, 即

$$I = I_1 + I_2 + \dots + I_n$$

### 二、电容器的串联

两个或两个以上的电容器依次相连、中间无分支的连接方式

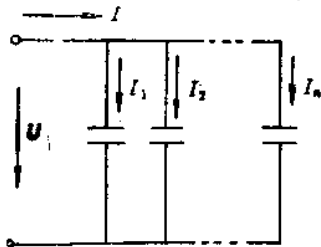


图1-68 电容器并联

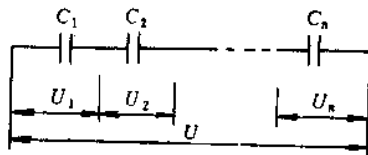


图1-69 电容器串联

叫电容器的串联，如图1-69所示。其特点是：

(1) 每个电容器上所带电量都相等，并等于电容器串联后的等效电容器上所带电量，即

$$Q = Q_1 = Q_2 = \dots Q_n$$

(2) 通过各电容器的电流都相等，并等于总电流，即

$$I = I_1 = I_2 = \dots I_n$$

(3) 总电压等于各电容器两端电压之和，即

$$U = U_1 + U_2 + \dots + U_n$$

(4) 总电容量的倒数等于各电容量倒数之和，即

$$\frac{1}{C} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \dots + \frac{1}{C_n}$$

若串联的  $n$  个电容器的容量相同，则有

$$C_{\text{串}} = \frac{C}{n}$$

对于两个电容器串联时则有

$$C = \frac{C_1 C_2}{C_1 + C_2}$$

### 三、电容器的混联

既有并联又有串联电容器的连接方式叫电容器的混联，如图1-70所示。在计算时，依具体情况可分别应用串联和并联的知识来求解。如图1-70所示，实际上是  $C_2$  和  $C_3$  并联后再与  $C_1$  串联，等效电容为

$$C = \frac{C_1(C_2 + C_3)}{C_1 + C_2 + C_3}$$

**例1-104** 三个电容器的电容量分别为 5、10、30  $\mu\text{F}$ ，问将它们串联和并联在一起时的等效电容各为多少。

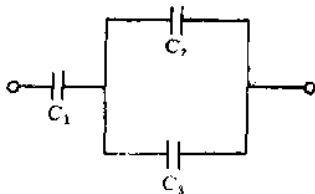


图1 70 电容器混联

串联时等效电容为

$$\frac{1}{C} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3} = \frac{1}{5} + \frac{1}{10} + \frac{1}{20} = \frac{7}{20}$$

$$C = \frac{20}{7} \approx 2.86\mu\text{F}$$

并联时等效电容为

$$C = C_1 + C_2 + C_3 = 5 + 10 + 20 = 35\mu\text{F}$$

例1-105 现有两只电解电容器，其中一个的电容量为 $4\mu\text{F}$ ，耐压为 $160\text{V}$ ，另一个的电容量为 $20\mu\text{F}$ ，耐压为 $250\text{V}$ ，若将这两个电容器串联后，接在 $300\text{V}$ 的直流电源上使用，求每个电容器上所承受的电压是多少，这样使用是否安全。

串联后等效电容为

$$C = \frac{C_1 C_2}{C_1 + C_2} = \frac{4 \times 20}{4 + 20} \approx 3.33\mu\text{F}$$

电量为

$$Q = Q_1 = Q_2 = CU = 3.33 \times 10^{-6} \times 300 = 9.99 \times 10^{-4}\text{C}$$

各电容器上承受的电压为

$$U_1 = \frac{Q_1}{C_1} = \frac{9.99 \times 10^{-4}}{4 \times 10^{-6}} = 250\text{V}$$

$$U_2 = \frac{Q_2}{C_2} = \frac{9.99 \times 10^{-4}}{20 \times 10^{-6}} = 50\text{V}$$

用分压公式计算则有

$$U_1 = \frac{C_2 U}{C_1 + C_2} = \frac{20 \times 300}{4 + 20} = 250\text{V}$$

$$U_2 = \frac{C_1 U}{C_1 + C_2} = \frac{4 \times 300}{4 + 20} = 50\text{V}$$

由于 $4\mu\text{F}$ 电容器的耐压是 $160\text{V}$ ，而实际加在它两端的电压是 $250\text{V}$ ，远大于它的耐压值，所以很快就会被击穿。一旦这只电容器被击穿后， $300\text{V}$ 电压将全部加到 $20\mu\text{F}$ 电容器上，这个电



压也大于它的耐压值，因此也会很快被击穿。所以，这样使用是很不安全的。

**例1-106** 如图1-70所示，已知  $U = 250\text{V}$ ， $C_1 = 10\mu\text{F}$ ， $C_2 = C_3 = 20\mu\text{F}$ ，求混联电容器的等效电容及电容器上的电量和电压。

$$C = \frac{C_1(C_2 + C_3)}{C_1 + C_2 + C_3} = \frac{10 \times (20 + 20)}{10 + 20 + 20} = 40\mu\text{F}$$

$$Q = CU = 4 \times 10^{-5} \times 250 = 1 \times 10^{-3}\text{C}$$

$$U_1 = \frac{Q}{C_1} = \frac{1 \times 10^{-3}}{10 \times 10^{-6}} = 100\text{V}$$

$$U_2 = \frac{Q}{C_2} = U_3 = 250 - 100 = 150\text{V}$$

**例1-107** 如果把  $4\mu\text{F}$ 、耐压  $300\text{V}$  和  $10\mu\text{F}$ 、耐压  $250\text{V}$  的两个电容串联起来，可以在多大电压下工作；若把它们并联起来，又可在多大的电压下工作。

串联时

$$Q = C_1 U_1 = C_2 U_2 = CU = \frac{C_1 C_2}{C_1 + C_2} U$$

$$U_1 = \frac{Q_1}{C_1} = \frac{Q}{C_1} = \frac{C_2}{C_1 + C_2} U$$

$$U = \frac{C_1 + C_2}{C_1} U_1 = \frac{4 + 10}{10} \times 300 = 420\text{V}$$

验证：

当  $C_1$  承受  $300\text{V}$  电压时， $C_2$  所承受的电压为

$$U_2 = U - U_1 = 420 - 300 = 120\text{V}$$

可见， $C_1$ 、 $C_2$  两端实际承受的电压均未超过额定值，所以串联使用时的最大耐压是  $420\text{V}$ ， $C_1$  和  $C_2$  串联能使用在等于或低于  $420\text{V}$  的电路中。

并联时

电容器并联使用时，所能承受的最高工作电压，以电容器额

定电压低的为准。

$$U_{C1} > U_{C2}$$

$$U \leq U_{C2} = 250\text{V}$$

并联以后的电容器能使用在等于或低于250V的电路中。

例1-108 如图1-70所示，把三个电容器接成混联电路，已知 $C_1 = C_2 = C_3 = 10\mu\text{F}$ ，耐压都是300V，求等效电容及最大安全工作电压为多少。

$$C = \frac{C_1(C_2 + C_3)}{C_1 + C_2 + C_3} = \frac{10 \times (10 + 10)}{10 + 10 + 10} = \frac{20}{3} \mu\text{F}$$

$$U = \frac{Q}{C} = \frac{U_1 C_1}{C} = \frac{300 \times 10}{\frac{20}{3}} = 450\text{V}$$

$$U_1 = \frac{450 \times C}{C_1} = \frac{450 \times \frac{20}{3}}{10} = 300\text{V}$$

$$U_2 = U_3 = \frac{C_1 U}{C_1 + C_2} // C_3 = \frac{10 \times 450}{10 + 10 + 10} = 150\text{V}$$

三只电容器两端实际承受的最大电压，都未超过各电容的耐压，所以电路的最大安全工作电压为450V。

例1-109 如图1-71所示，已知 $C_1 = C_4 = 2\mu\text{F}$ ， $C_3 = C_2 = 1\mu\text{F}$ ，求当开关S合上和断开时的等效电容 $C_{AB}$ 。

开关S合上时为

$$C_{AB} = \frac{(C_1 + C_3)(C_2 + C_4)}{C_1 + C_2 + C_3 + C_4}$$

$$= \frac{(2 + 1)(1 + 2)}{2 + 1 + 1 + 2}$$

$$= 1.5\mu\text{F}$$

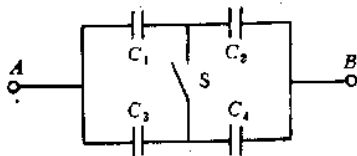


图1-71 求等效电容

开关S断开时为

$$C_{AB} = \frac{C_1 C_2}{C_1 + C_2} + \frac{C_3 C_4}{C_3 + C_4} = \frac{2 \times 1}{2 + 1} + \frac{1 \times 2}{1 + 2} = 1.33\mu\text{F}$$

例1-110 某电子线路中需用一只耐压为1000V,电容为10μF的电容器,现有四只10μF的电容器,但耐压都只有500V,问采用什么连接方式才能满足要求。

根据耐压要求,只要二只4μF,500V的电容器串联起来就可以了,根据二只电容器串联的等效电容为

$$C = \frac{C_1 C_2}{C_1 + C_2} = \frac{10 \times 10}{10 + 10} = 5 \mu F$$

因此等效电容不能满足要求,若再并上一组电容,则总的等效电容为

$$C = \frac{C_1 C_2}{C_1 + C_2} + \frac{C_3 C_4}{C_3 + C_4} = 5 + 5 = 10 \mu F$$

所以满足要求的连接方式如图1-72所示。

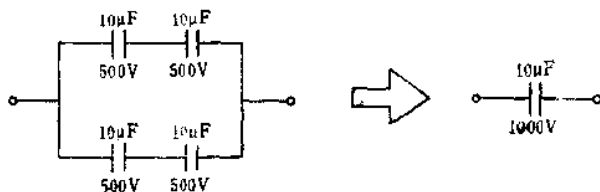


图1-72 能满足要求的连接方式

例1-111 四只相同的电容器,用图1-73的线路连接,并接上一个电池组,先将 $S_2$ 断开, $S_1$ 合上,然后将 $S_1$ 断开, $S_2$ 合上。若电池组的电动势 $E = 12V$ ,问每个电容器上的电压是多少。

当 $S_2$ 断开, $S_1$ 合上时则有

$$C_1 = C_2 = C_3$$

$$U_1 = U_2 = U_3 = \frac{E}{3} = \frac{12}{3} = 4V$$

$$Q = C_2 U_2 = 4C_2$$

当 $S_1$ 断开, $S_2$ 合上时, $C_2$ 向 $C_4$ 放电,电荷 $Q$ 重新分配直到两个电容器的两端电压相等时为止,

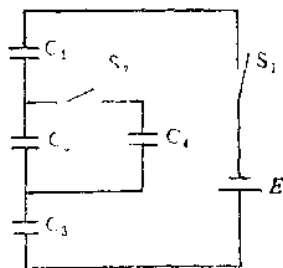


图1-73 求电容器电压

此时则有

$$C_{24} = C_2 + C_4 = 2C_3$$

$$U' = \frac{Q}{C_{24}} = \frac{4C_2}{2C_2} = 2V$$

$$U_{C1} = U_{C3} = 4V$$

$$U_{C2} = U_{C4} = 2V$$

例1-112 在给电容为 $200\mu\text{F}$ 的电容器充电时，电容上的电压从零增加到 $100\text{V}$ ，问电源供给电容器多少电能？若此电容器接着开始放电，电容器上的电压从 $100\text{V}$ 降至 $50\text{V}$ ，问此时电容器中还储存多少电场能量？电容器释放了多少电场能量。

电源供给电容的电能为

$$W_1 = \frac{1}{2}CU_1^2 = \frac{1}{2} \times 200 \times 10^{-6} \times 100^2 = 1\text{J}$$

当电容器放电后，电容器中还储存电能为

$$W_2 = \frac{1}{2}CU_2^2 = \frac{1}{2} \times 200 \times 10^{-6} \times 50^2 = 0.25\text{J}$$

电容器在放电时所释放的电能为

$$W_3 = W_1 - W_2 = 1 - 0.25 = 0.75\text{J}$$

例1-113 把六个 $C = 30\mu\text{F}$ 的电容器，按图1-74连接时，求 $U_1$ 、 $V_1$ 间的等效电容。

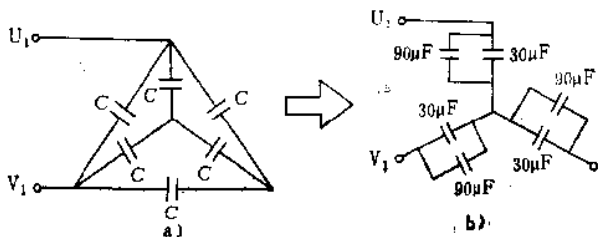


图1-74 求 $U_1$ 、 $V_1$ 间的等效电容  
将 $\Delta$ 形联结换算成 $Y$ 形联结，其电容量为

$$C_Y = 3C_{\Delta} = 3 \times 30 = 90\mu\text{F}$$

如图 1-74b 所示, 将  $90$ 、 $30\mu\text{F}$  并联, 其电容量为

$$C' = 90 + 30 = 120\mu\text{F}$$

$$C_{U_1V_1} = \frac{C' C'}{C' + C'} = \frac{120 \times 120}{120 + 120} = 60\mu\text{F}$$

例 1-114 在题 1-113 中, 若将  $\text{Y}$  形联结换算成  $\Delta$  形联结, 求  $U_1$ 、 $V_1$  间的等效电容。

将  $\text{Y}$  形联结换算成  $\Delta$  形联结, 其电容量为

$$C_{\Delta} = \frac{1}{3} C_Y = \frac{1}{30} \times 30 = 10\mu\text{F}$$

如图 1-75 所示, 将  $30$ 、 $10\mu\text{F}$  并联, 则有

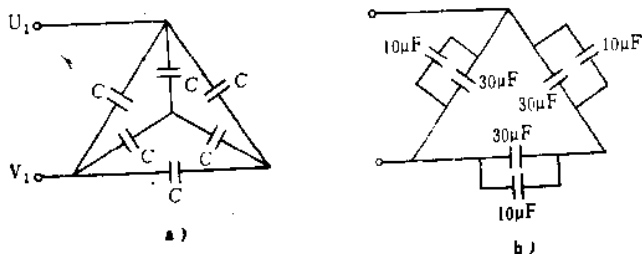


图 1-75 求  $U_1$ 、 $V_1$  间的等效电容

$$C'' = 30 + 10 = 40\mu\text{F}$$

$$C_{U_1V_1} = C'' + \frac{C'' C''}{C'' + C''} = 40 + \frac{40 \times 40}{40 + 40} = 60\mu\text{F}$$

## 第七节 磁路定律、电磁感应及楞次定律

### 一、磁路定律

#### 1. 几个常用的基本物理量

(1) 磁感应强度 描述磁场各点的强弱和方向的物理量,

即

$$B = \frac{F}{Il}$$

式中  $B$ ——磁感应强度(T);

$F$ ——磁动势(A);

$i$ ——电流(A);

$l$ ——长度(m)。

(2)磁通 在均匀磁场中,为磁感应强度和垂直于 $B$ 的截面积的乘积,即

$$\Phi = BS$$

式中  $\Phi$ ——磁通量(Wb);

$S$ ——横截面积(m<sup>2</sup>)。

(3)磁场强度 是与媒介质性质无关的辅助量,即

$$H = \frac{IN}{l}$$

式中  $H$ ——磁场强度(A/m);

$N$ ——通电线圈的匝数。

(4)磁导率 表示媒介质性质(导磁性能)的物理量,即

$$\mu = \frac{B}{H}$$

式中  $\mu$ ——磁导率(H/m)。

## 2.磁路欧姆定律

磁路中的磁通与磁动势成正比,与磁阻成反比,如图1-76所示,其式为

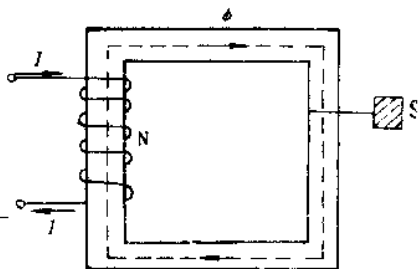
$$\Phi = BS = \mu HS$$

$$= \frac{IN}{l} = \frac{IN}{\mu S R_m}$$

式中  $IN$ ——磁动势(A);

$R_m$ ——磁阻,  $R_m = \frac{l}{\mu S}$

(H<sup>-1</sup>)



## 3.磁路基尔霍夫第一定律

图1-76 闭合磁路

穿过闭合面磁通的代数和必为零,也就是进入闭合面的磁通

等于离开闭合面的磁通，如图1-77所示，其式为

$$\Sigma \Phi = 0 \quad (1-88)$$

或

$$\Phi_3 = \Phi_1 + \Phi_2 \quad (1-89)$$

#### 4. 磁路基尔霍夫第二定律

在闭合回路中，磁动势的代数和等于该回路中磁压降的代数和，即

$$\Sigma F = \Sigma IN = \Sigma \Phi R_m = \Sigma Hl$$

磁动势和磁压降的正负，均取决于线圈中电流产生磁通的方向， $I$ 和 $\Phi$ 的方向按右手螺旋定则确定，如 $\Phi$ 的方向与所选定的回路绕行方向相同， $IN$ 、 $Hl$ 取正；反之取负。

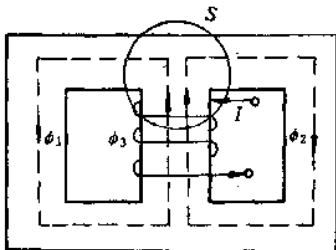


图1-77 穿过闭合面的磁通

生磁通的方向， $I$ 和 $\Phi$ 的方向按右手螺旋定则确定，如 $\Phi$ 的方向与所选定的回路绕行方向相同， $IN$ 、 $Hl$ 取正；反之取负。

#### 5. 磁路定律应用

计算恒定磁通无分支磁路的步骤：

- (1) 按照材料和截面的不同进行分段；
- (2) 根据磁路尺寸计算各段的截面积和平均长度；
- (3) 由已知的磁通计算各段的磁感应强度；
- (4) 由磁感应强度计算磁场强度；
- (5) 根据每一段磁场强度和中心线长度，求出每一段磁压；
- (6) 按磁路基尔霍夫第二定律求出所需的磁动势。

**例1-115** 某线圈的铁心由硅钢片制成，其截面积为 $10\text{cm}^2$ ，磁路的平均长度为 $30\text{cm}$ ，设硅钢片的 $\mu_r = 3000$ ，线圈的匝数为 $400$ ，电流为 $0.4\text{A}$ ，求通过铁心的磁通。

由磁路欧姆定律可知

$$\Phi = \frac{IN}{\frac{l}{\mu S}} = \frac{0.4 \times 400}{\frac{0.3}{300 \times 4\pi \times 10^{-7} \times 10 \times 10^{-4}}} = 201 \times 10^{-5} \text{Wb}$$

**例1-116** 在截面为 $5\text{cm}^2$ 的钢环上，均匀地绕以匝数为 $150$ 的线圈，若环内的磁通为 $5 \times 10^{-4} \text{Wb}$ ，环的平均长度为 $60\text{cm}$ ，求

线圈的电流和钢环的磁阻，设 $\mu_r = 2000$ 。

钢环的磁阻为

$$\mu = \mu_r \mu_0 = 2000 \times 4\pi \times 10^{-7} = 25 \times 10^{-4} \text{H/m}$$

$$R_m = \frac{l}{\mu S} = \frac{60 \times 10^{-2}}{25 \times 10^{-4} \times 5 \times 10^{-4}} = 4.8 \times 10^5 \text{H}^{-1}$$

绕组内的电流为

$$I = \frac{\Phi R_m}{N} = \frac{5 \times 10^{-4} \times 4.8 \times 10^5}{150} = 1.6 \text{A}$$

**例1-117** 由电工钢制成的环形磁路，各部尺寸如图1-78所示，单位为cm，线圈匝数为4000，磁通为 $5.8 \times 10^{-4} \text{Wb}$ ，求线圈中的电流。

环形磁路的直径为

$$d = 10 - 8 = 2 \text{cm}$$

$$S = \frac{1}{4} \pi d^2 = \frac{1}{4} \times 3.14 \times 2^2 = 3.14 \text{cm}^2$$

磁感应强度为

$$B = \frac{\Phi}{S} = \frac{5.8 \times 10^{-4}}{3.14} = 1.85 \text{T}$$

查磁化曲线得：

$$H = 35 \text{A/cm}$$

磁路的平均长度为

$$l = 2\pi r_{cp} = 2 \times 3.14 \times \frac{10 - 8}{2} = 44 \text{cm}$$

线圈中的电流为

$$I = \frac{Hl}{N} = \frac{35 \times 44}{4000} = 0.385 \text{A}$$

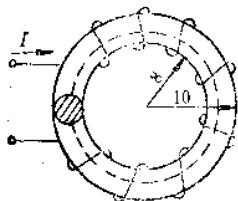


图1-78 环形磁路

**例1-118** 求在长为100cm，直径为5cm的空心螺旋线圈中产生磁通为 $4 \times 10^{-5} \text{Wb}$ 所需磁动势。

$$IN = \frac{\Phi l}{\mu_0 S} = \frac{1 \times 4 \times 10^{-5}}{4\pi \times 10^{-7} \times \frac{\pi \times 5^2 \times 10^{-4}}{4}} = 16.2 \times 10^3 \text{A}$$



例1-119 有一环形螺旋线圈，其外径为35cm，内径为30cm，匝数为1000，电流为5A，求在媒质为空气和铁时的磁动势和磁通各为多少（设铁的 $\mu=1000$ ）。

磁路平均长度为

$$l = \frac{D+d}{2} \pi = \frac{35+30}{2} \times 3.14 = 102\text{cm}$$

当介质为空气时的磁通为

$$\begin{aligned} \Phi &= \frac{\mu_0 S I N}{l} = \frac{4\pi \times 10^{-7} \times 2.5^2 \pi \times 10^{-4} \times 5 \times 1000}{102 \times 10^{-2}} \\ &= 12.1 \times 10^{-6} \text{Wb} \end{aligned}$$

$$I N = 5 \times 1000 = 5000 \text{A}$$

当介质为铁时的磁通为

$$\begin{aligned} \Phi &= \frac{\mu_r \mu_0 S I N}{l} = \frac{1000 \times 2.5^2 \times \pi \times 10^{-4} \times 5 \times 1000}{102 \times 10^{-2}} \\ &= 9620 \text{Wb} \end{aligned}$$

$$I N = 1000 \times 5 = 5000 \text{A}$$

例1-120 用电工钢制成的磁路如图1-79所示， $N=8000$ ， $\Phi=1.24 \times 10^{-3} \text{Wb}$ ，图中尺寸单位为cm，求线圈中电流 $I$ 。

$$\begin{aligned} B &= \frac{\Phi}{S} = \frac{1.24 \times 10^{-3}}{3 \times 3 \times 10^{-4}} \\ &\approx 1.38 \text{T} \end{aligned}$$

查磁化曲线得：

$$H = 5 \text{A/cm}$$

$$l = (12 + 1.5 + 1.5) \times 2 + 17 + 16.9 = 63.9 \text{cm}$$

$$Hl = 5 \times 63.9 = 320 \text{A}$$

$$H_0 l_0 = \frac{B}{\mu_0} = \frac{1.38}{4\pi \times 10^{-7}} = 1.1 \times 10^6 \text{A/cm}$$

$$H_0 l_0 = 1.1 \times 10^6 \times 0.1 \times 10^{-2} = 1100 \text{A/cm}$$

$$I N = Hl + H_0 l_0 = 320 + 1100 = 1420 \text{A}$$

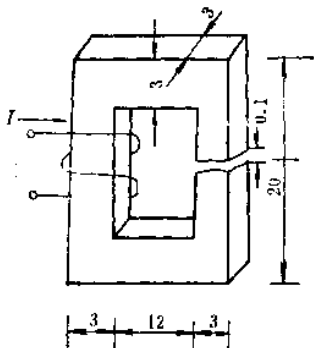


图1-79 求线圈中电流

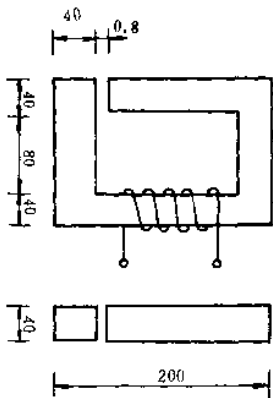


图1-80 开口铁心磁路

$$I = \frac{IN}{N} = \frac{1420}{8000} = 0.178 \text{ A}$$

例1-121 如图1-80所示，磁路由硅钢片做成，已知磁通为  $2 \times 10^{-3} \text{ Wb}$ ，线圈为1200匝，求所需磁化电流。如线圈电阻为  $150 \Omega$ ，求外加电压，图中尺寸单位为  $\text{mm}$ 。

$$B = \frac{\Phi}{S} = \frac{2 \times 10^{-3}}{1600 \times 10^{-6}} = 1.25 \text{ T}$$

查磁化曲线得：

$$H_1 = 10 \text{ A/cm}$$

$$H_1 l_1 = 10 \times (160 + 120) \times 2 \times 10^{-1} = 560 \text{ A}$$

$$H_0 = \frac{B_0}{\mu_0} = \frac{1.25}{4\pi \times 10^{-7}} = 99.5 \times 10^4 \text{ A/m}$$

$$H_0 l_0 = 99.5 \times 10^4 \times 0.8 \times 10^{-3} = 796 \text{ A}$$

$$IN = \sum Hl = H_1 l_1 + H_0 l_0 = 560 + 796 = 1360 \text{ A}$$

$$I = \frac{\sum Hl}{N} = \frac{1360}{1200} = 1.13 \text{ A}$$

外加电压为

$$U = IR = 1.13 \times 150 = 170\text{V}$$

例1-122 图1-81的磁路由电工钢制成，尺寸单位为cm，在铁心a中产生磁感应强度为1.2T，求线圈产生的磁动势。

$$\begin{aligned}\Phi_a &= B_a S_a = 1.2 \times 5^2 \times 10^{-4} \\ &= 30 \times 10^{-4} \text{Wb}\end{aligned}$$

查磁化曲线得：

$$H_a = 2.5 \text{A/cm}$$

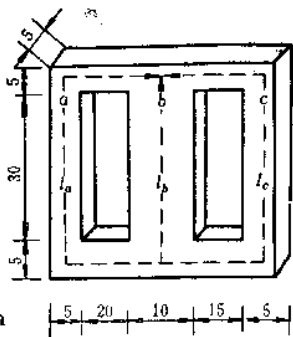
$$l_a = 35 + 2 \times 27.5 = 90 \text{cm}$$

$$H_a l_a = 2.5 \times 90 = 225 \text{A}$$

$$l_c = 35 + 2 \times 22.5 = 80 \text{cm}$$

$$H_c l_c = H_a l_a$$

$$H_c = \frac{H_a l_a}{l_c} = \frac{225}{80} = 2.81 \text{A/cm}$$



查磁化曲线得：

图1-81 求线圈产生的磁动势

$$B_c = 1.22 \text{T}$$

$$\Phi_c = B_c S_c = 1.22 \times 5^2 = 30.5 \times 10^{-4} \text{Wb}$$

$$\Phi_b = \Phi_a + \Phi_c = 30 \times 10^{-4} + 30.5 \times 10^{-4} = 60.5 \times 10^{-4} \text{Wb}$$

$$B_b = \frac{\Phi_b}{S_b} = \frac{60.5 \times 10^{-4}}{10 \times 5} = 1.21 \text{T}$$

查磁化曲线得：

$$H_b = 2.6 \text{A/cm}$$

$$H_b l_b = 2.6 \times 35 = 91 \text{A}$$

$$IN = H_a l_a + H_b l_b = 225 + 91 = 316 \text{A}$$

例1-123 图1-82的对称分支磁路由硅钢片做成，尺寸单位为mm，气隙长度 $l_{01} = l_{02} = l_{03} = 1 \text{mm}$ ，若要在铁心中间柱内产生磁通 $10^{-3} \text{Wb}$ ，求所需总磁通；若线圈为1500匝，求所需电流。

若中间柱上的磁通为 $10^{-3} \text{Wb}$ ，则所需总磁通 $\Phi = 1 \times 10^{-3} \text{Wb}$ 。磁路平均长度为

$$l = (71 - 15) \times 2 + (42 - 14) \times 2 = 168 \text{mm}$$

$$l_0 = 2 \times 1 = 2 \text{mm}$$

中间磁柱上磁感应强度为

$$B = \frac{\Phi}{S} = \frac{1 \times 10^{-3}}{(28 \times 32) \times 10^{-6}} = 1.12 \text{ T}$$

查磁化曲线得:

$$H = 7.5 \text{ A/cm}$$

$$H_0 = 0.8 B_0$$

$$= 0.8 \times 11200$$

$$= 8960 \text{ A/cm}$$

$$IN = \sum Hl = Hl + H_0 l_0$$

$$= 7.5 \times 16.8 + 8960$$

$$\times 0.2 = 1920 \text{ A}$$

$$I = \frac{IN}{N} = \frac{1920}{1500} = 1.28 \text{ A}$$

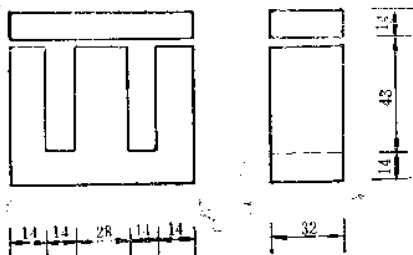


图1-82 求所需总磁通及电流

## 二、电磁感应及楞次定律

电流能够产生磁场，而变化的磁场能够产生电动势和电流，也就是动磁生电。我们把变化磁场在导体中引起电动势的现象称为电磁感应。

### 1. 直导体中的感应电动势

#### (1) 感应电动势的大小

$$e = Bvl \sin \alpha$$

式中  $e$ ——感应电动势(V);

$B$ ——磁感应强度(T);

$l$ ——导体的有效长度  
(m);

$v$ ——导体的运动速度  
(m/s);

$\alpha$ ——导体与磁力线的夹角( $^\circ$ )。

如果  $B$ 、 $l$ 、 $v$ 三者互相垂直，感应电动势最大，即

$$e_m = Bvl$$

(2) 感应电动势的方向 用右手定则来判断，如图1-83所

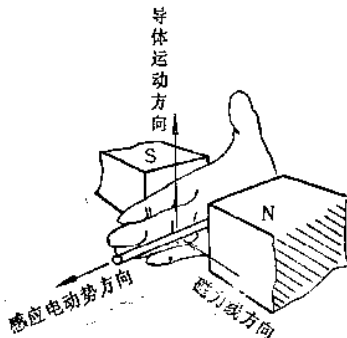


图1-83 判断感应电动势方向

示。将右手平伸，拇指和其余四指在手掌平面内垂直，使磁力线穿过手心，拇指指向导体运动的方向，则四指所指的方向就是感应电动势的方向。

## 2. 线圈中的感应电动势

(1) 感应电动势的大小——电磁感应定律 回路中的感应电动势等于回路内磁通变化率的负值，即

$$e = -N \frac{d\Phi}{dt}$$

式中  $e$ ——感应电动势 (V)；

$\Phi$ ——磁通 (Wb)；

$t$ ——通电时间 (s)；

$N$ ——线圈的匝数。

(2) 感应电动势的方向——楞次定律 感应电流所产生的磁通，总是企图反抗原磁通的变化。也就是说：当原磁通增加时，感应电流所产生的磁通的方向和原磁通的方向相反；当原磁通减少时，感应电流所产生的磁通方向和原磁通的方向相同。应用时其步骤如下：

1) 明确原磁通  $\Phi_{原}$  的方向及变化情况，即磁通是增加还是减少。

2) 根据楞次定律确定感应电流所产生的磁通  $\Phi_{感}$  的方向。

3) 利用右手螺旋定则判定感应电动势的方向。

**例1-124** 在图1-84中，导线长0.5m，垂直于纸面放置，并且按图示方向运动，速度  $v$  为100cm/s，磁感应强度为0.6T，试确定感应电动势的大小及方向。

感应电动势的大小为

$$e = Bvl = 0.6 \times 1 \times 0.5 = 0.3 \text{ V}$$

感应电动势的方向如图所示，即由纸里向着读者。

**例1-125** 在图1-85中，长0.8m的导体在磁场内运动，设均匀磁场的磁感应强度为1.2T，导体的运动方向与磁场方向的夹角

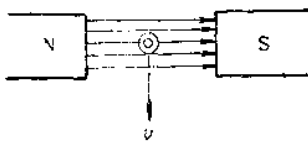


图1-84 确定感应电动势大小及方向

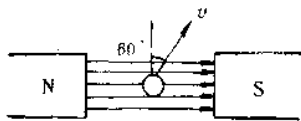


图1-85 求导体运动速度

是 $60^\circ$ ，求在导体内产生 $3\text{V}$ 电动势所需的运动速度。

由 $e = Bvl \sin \alpha$ 可知：

$$v = \frac{e}{B l \sin \alpha} = \frac{3}{1.2 \times 0.8 \sin 60^\circ} = 3.61 \text{ m/s}$$

例1-126 在图1-86中，导体 $MN$ 的有效长度为 $0.2\text{m}$ ，在磁感应强度为 $1.2\text{T}$ 的均匀磁场中以 $20\text{m/s}$ 的速度垂直于磁场运动，导体外接电阻为 $0.5\Omega$ ，导体自身的电阻为 $0.06\Omega$ ，求感应电动势、电流、导体所受电磁力的大小和方向，并计算所取用的机械功率，负载上的功率和导线 $MN$ 内部消耗的功率。

$$e = Bvl = 1.2 \times 20 \times 0.2 = 4.8\text{V}$$

$$I = \frac{e}{R_s} = \frac{4.8}{0.5 + 0.06} = 8.57\text{A}$$

$$F = BIl = 1.2 \times 8.57 \times 0.2 = 2.06\text{N}$$

电磁力的方向与 $v$ 的方向相反，则

有

$$P_{\text{机}} = Fv = 2.06 \times 20 = 41.2\text{W}$$

$$P_R = I^2 R = 8.57^2 \times 0.5 = 36.7\text{W}$$

$$P_{\text{导}} = I^2 r = 8.57^2 \times 0.06 = 4.41\text{W}$$

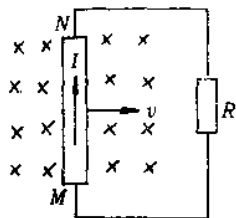


图1-86 求导体在磁场内运动时各物理量

例1-127 如图1-87所示，矩形线圈平面垂直磁力线，其面积为 $5\text{cm}^2$ ，共有100匝。若将线圈在 $0.025\text{s}$ 内从磁感应强度为 $1.5\text{T}$ 的均匀磁场中移出，问线圈两端的感应电动势为多大？

设每匝矩形线圈在磁场中的磁通为  $\Phi_1$ ，则有

$$\Phi_1 = BS = 1.5 \times 5 \times 10^{-4} = 7.5 \times 10^{-4} \text{ Wb}$$

线圈运动到磁场外时的磁通为

$$\Phi_2 = 0$$

线圈中的感应电动势为

$$e = -N \frac{d\Phi}{dt} = -N \frac{\Phi_2 - \Phi_1}{\Delta t} = -100$$

$$\times \frac{0 - 7.5 \times 10^{-4}}{0.025} = 3 \text{ V}$$

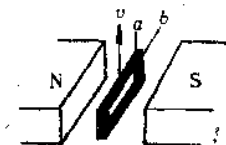


图1-87 求线圈感应电动势大小

例1-128 已知一个单匝闭合回路中的磁通在0.02s内从零均匀地增加到  $5 \times 10^{-4} \text{ Wb}$ ，求感应电动势的大小。若磁通原来为  $0.3 \times 10^{-4} \text{ Wb}$ ，经过0.6ms后均匀减少到  $0.25 \times 10^{-4} \text{ Wb}$ ，再求感应电动势的大小。

$$(1) \quad e = -N \frac{d\Phi}{dt} = -\frac{5 \times 10^{-4}}{0.02} = -2.5 \times 10^{-2} \text{ V}$$

$$(2) \quad e = -N \frac{d\Phi}{dt} = -\frac{(0.25 - 0.3) \times 10^{-4}}{0.6 \times 10^{-3}} = 8.33 \times 10^{-2} \text{ V}$$

### 第八节 直流输电线路计算

当电力用户离供电地方较远时，如图1-88双线直流输电线，

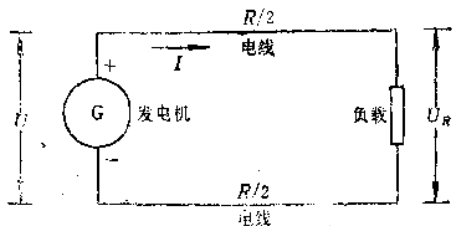


图1-88 双线直流输电线

则用电端的电压  $U_R$  较供电端的电压为低，其差值就是导线的电压降  $IR$ ，等于导线内的电流乘以导线的电阻，有以下关系。

### 一、基本公式

$$U_R = U - IR$$

电源供给的功率为

$$P = UI$$

负载消耗的功率为

$$P_R = U_R I$$

若将  $I$  乘上面公式得：

$$P_R = P - I^2 R = UI - I^2 R$$

解此方程，得：

$$I = \frac{U \pm \sqrt{U^2 - 4RP_R}}{2R}$$

式中  $I$ ——通过导线的电流(A)；

$U$ ——电源端电压(V)；

$R$ ——两根导线的电阻( $\Omega$ )；

$P_R$ ——负载消耗的功率(W)；

$U_R$ ——负载端电压(V)。

电能输送的效率为

$$\eta = \frac{P_R}{P} \times 100\% = \frac{U_R}{U} \times 100\%$$

### 二、计算实例

例1-129 某发电机发出115V的电压，经由总电阻为0.1 $\Omega$ 为输电线供电给一工厂20kW功率，如图1-89所示。求(1)线路

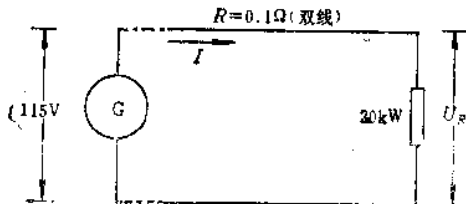


图1-89 发电机与用户连接电网



电流；(2)工厂处导线端的电压；(3)输送效率。

(1)计算公式

$$P_R = UI - I^2 R$$

$$I^2 R - UI + P_R = 0$$

代入参数经整理后得：

$$I^2 - 1150I + 200000 = 0$$

$$I = \frac{1150 \pm \sqrt{1150^2 - 4 \times 200000}}{2} = 214 \text{ (或 } 937) \text{ A}$$

虽然这两个电流的数值都满足公式，但是只有较小的数值 214A 可适用。因为若采用较大的数值，而输送效率显然太低。

(2)工厂处导线端的电压

$$U_R = U - IR = 115 - 214 \times 0.1 = 93.6 \text{ V}$$

(3)输送效率

$$\eta = \frac{U_R}{U} \times 100\% = \frac{93.6}{115} \times 100\% = 81.4\%$$

例1-130 在长200m的输电线上供给输电线末端200V电压、20kW的功率，如果铜线的直径是12mm，如图1-90所示。求(1)输电线的电流；(2)输电线的电阻；(3)发电机端的电压；(4)输电线上的功率损耗；(5)输送效率。

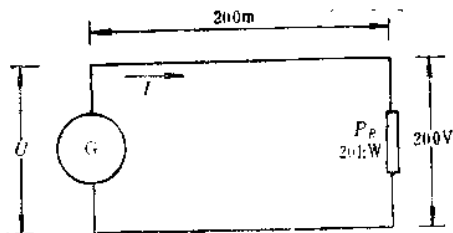


图1-90 求输电线有关参数及发电机端电压

$$(1) \quad I = \frac{P_R}{U_R} = \frac{20000}{200} = 100 \text{ A}$$

$$(2) R = \rho \frac{l}{S} = 0.0175 \times \frac{2 \times 200}{\frac{1}{4} \times 3.14 \times 12^2} = 0.194 \Omega$$

$$(3) U = U_R + IR = 200 + 100 \times 0.194 = 219 \text{ V}$$

$$(4) I^2 R = 100^2 \times 0.194 = 1940 \text{ W}$$

$$(5) \eta = \frac{U_R}{U} \times 100\% = \frac{200}{219} \times 100\% = 91.3\%$$

**例1-131** 由一直流电源供给 5 kW 的功率到 300m 外的住宅区去。如果负载两端的电压不得小于 220V，而导线上允许的电压降是 5% 时，问铜线的最小截面积是多少。

线路电流为

$$I = \frac{P_R}{U_k} = \frac{5000}{220} = 22.7 \text{ A}$$

电源端电压为

$$U = U_R \times 1.05 = 220 \times 1.05 = 231 \text{ V}$$

输电线的电压降为

$$\Delta U = U - U_R = 231 - 220 = 11 \text{ V}$$

铜线的截面积为

$$S = \frac{2\rho l I}{\Delta U} = \frac{0.0175 \times 2 \times 300 \times 22.7}{11} = 21.7 \text{ mm}^2$$

**例1-132** 电源电压为 220V，线路电阻是 0.5Ω，在末端接有 200W、220V 的电灯 30 个，如在线路末端再接入 220V、5kW 的电炉一只，问电灯上的电压降低百分之几。

$$R_{\text{灯}} = \frac{U^2}{P} = \frac{220^2}{200} = 242 \Omega$$

$$R_{\text{灯总}} = \frac{R_{\text{灯}}}{30} = \frac{242}{30} = 8.07 \Omega$$

$$R_{\text{炉}} = \frac{U^2}{P} = \frac{220^2}{5000} = 9.68 \Omega$$

未接电炉前的电流为

$$I = \frac{220}{0.5 + 8.07} = 25.7 \text{ A}$$

$$U_{\text{灯}} = IR_{\text{灯总}} = 25.7 \times 8.07 = 207 \text{ V}$$

或

$$U_{\text{灯}} = 220 - 25.7 \times 0.5 = 207 \text{ V}$$

接上电炉后的电流为

$$I' = \frac{220}{0.5 + \frac{8.07 \times 9.68}{8.07 + 9.68}} = 44.5 \text{ A}$$

$$U' = I' \frac{R_{\text{灯总}} \times R_{\text{炉}}}{R_{\text{灯总}} + R_{\text{炉}}} = 44.5 \times \frac{8.07 \times 9.68}{8.07 + 9.68} = 198 \text{ V}$$

或

$$U' = 220 - 44.5 \times 0.5 = 198 \text{ V}$$

电压降的百分率为

$$\frac{207 - 198}{207} \times 100\% = 4.35\%$$

例 1-133 如图

1-91所示, 115V 的直流电动机需用电流 300A, 电动机装在距离电源 200m 处, 已知输电钢线的直径是 11.2mm, 问电源的电压应为多少。

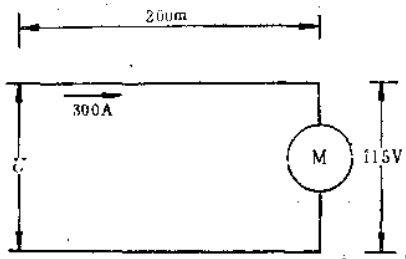


图 1-91 求电源电压大小

$$R = \frac{\rho l}{S} = \frac{0.0175 \times 400}{\frac{1}{4} \times 3.14 \times 11.2^2} = 0.0711 \Omega$$

$$U = U_R + IR = 115 + 300 \times 0.0711 = 136 \text{ V}$$

例 1-134 有一台 10kW、230V 的直流电动机, 满载时的效率是 85%, 电动机距离供电干线 100m, 若电动机在刚启动时的电流是满载电流的 1.8 倍, 要求电动机启动时输电线上电压降不得超过 25V, 问铜线的最小截面积应需多大。

电动机的满载电流为

$$I = \frac{P_K}{U_R \eta} = \frac{10000}{230 \times 0.85} = 51.2 \text{ A}$$

电动机的起动电流为

$$I_Q = 1.8I = 1.8 \times 51.2 = 92.2 \text{ A}$$

电动机起动时的线路电阻为

$$R = \frac{25}{92.2} = 0.271 \Omega$$

铜线的最小截面积为

$$S = \frac{\rho l}{R} = \frac{0.0175 \times 2 \times 100}{0.271} = 12.9 \text{ mm}^2$$

例1-135 一台20kW, 230V的直流电动机由距离电动机30m远处的配电板供电, 如果电动机的满载效率是85%, 满载时输电线上的电压降不得超过用户电压的5%, 求输电铜线的截面积和配电板供给的功率。

$$I = \frac{P_R}{U_R \eta} = \frac{20000}{230 \times 0.85} = 102 \text{ A}$$

允许电压降为

$$\Delta U = 0.05 \times 230 = 11.5 \text{ V}$$

输电线截面积为

$$S = \frac{I \rho l}{\Delta U} = \frac{102 \times 0.0175 \times 60}{11.5} = 9.31 \text{ mm}^2$$

配电板供给功率为

$$\begin{aligned} P &= I(U_R + \Delta V) = 102 \times (230 + 11.5) = 22400 \text{ W} \\ &= 22.4 \text{ kW} \end{aligned}$$

例1-136 一条有轨电车路线全长5km, 所需电流由电压各为500V与450V的两配电站供应, 如图1-92所示。如果架空线与地面轨道每km的电阻是0.3Ω, 假使有一电车在距离500V的配电站2km处需用电流为150A, 问电车的空中滑轮与轨道间的电压U是多少? 每配电站供给的电流是多少。

两配电站所供给的电流总和应等于电车所取用的电流, 即

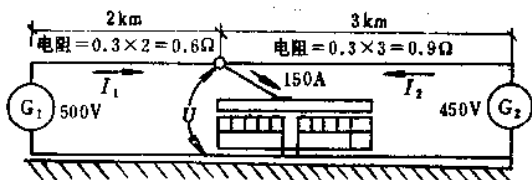


图1-92 求电车的空中滑轮与轨道间的电压及配电站供给的电流

$$I_1 + I_2 = 150\text{A} \quad (1-10)$$

架空线两边的电压降为

$$0.6I_1 = 500 - U \quad (1-11)$$

$$0.9I_2 = 450 - U \quad (1-12)$$

由式(1-11)减去式(1-12)得,

$$50 = 0.6I_1 - 0.9I_2$$

由式(1-10)得:

$$I_1 = 150 - I_2$$

$$50 = 0.6(150 - I_2) - 0.9I_2 = 90 - 1.5I_2$$

$$I_2 = \frac{90 - 50}{1.5} = 26.7\text{A}$$

$$I_1 = 150 - 26.7 = 123\text{A}$$

电车的空中滑轮与地面轨道间的电压为

$$U = 450 - 0.9 \times 26.7 = 426\text{V}$$

**例1-137** 直流输电线供给两台电动机电流,电动机  $M_1$  需要 50A, 电动机  $M_2$  需要 60A, 若输电线的电阻每 1000m 为 0.57Ω, 电源电压为 240V, 如图 1-93 所示。求电动机  $M_1$  和  $M_2$  的端电压及电源供给的总功率。

输电线电阻为

$$R_{40} = \frac{0.57 \times 40 \times 2}{1000} = 0.0456\Omega$$

$$R_{20} = \frac{0.57 \times 20 \times 2}{1000} = 0.0228\Omega$$

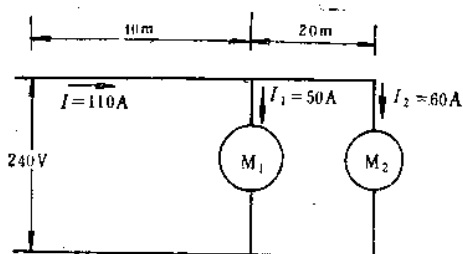


图1-93 求电动机  $M_1$ 、 $M_2$  的端电压及电源总功率

电动机  $M_1$  的端电压为

$$U_{M_1} = U - IR_{L_0} = 240 - 110 \times 0.0456 = 235 \text{ V}$$

电动机  $M_2$  的端电压为

$$U_{M_2} = U_{M_1} - I_2 R_{2_0} = 235 - 60 \times 0.0228 = 234 \text{ V}$$

电源供给的总功率为

$$P = UI = 240 \times 110 = 26400 \text{ W} = 26.4 \text{ kW}$$

例1-138 由230 V 的电源供给  $C$ 、 $D$  两处电能，如图1-94 所示。电动机  $M_1$  需用60A，电动机  $M_2$  需用40A，输电线上最大的电压降不得超过电源电压的10%，求

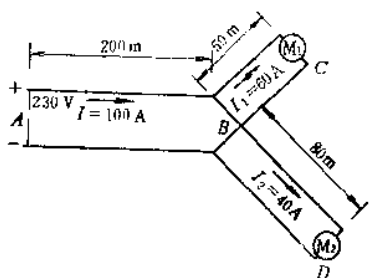


图1-94 求各段输线的截面积及功率损耗  
各段输电线的截面积及功率损耗。

$AC$  和  $AD$  两段的允许电压降各为

$$230 \times 0.1 = 23 \text{ V}$$

为计算简单起见，任意假定  $BC$  和  $BD$  两段的电压降都是10V，因此  $AB$  段的电压降为

$$23 - 10 = 13 \text{ V}$$

输电线  $AB$  段的截面积为

$$S = \frac{0.0175 \times 2 \times 200 \times 100}{13} = 53.8 \text{ mm}^2$$

输电线  $BC$  段的截面积为

$$S = \frac{0.0175 \times 2 \times 50 \times 60}{10} = 10.5 \text{ mm}^2$$

输电线  $BD$  段的截面积为

$$S = \frac{0.0175 \times 2 \times 80 \times 40}{10} = 11.2 \text{ mm}^2$$

各段功率损耗为

$$P_{AB} = 100 \times 13 = 1300 \text{ W}$$

$$P_{BC} = 60 \times 10 = 600 \text{ W}$$

$$P_{BD} = 40 \times 10 = 400 \text{ W}$$

## 第二章 交流电路计算

### 第一节 交流电基本概念

#### 一、交流电的周期、频率和角频率

##### 1. 周期

交流电变化一次所需的时间叫周期，用  $T$  表示，单位是  $s$ 。  
周期越短，表示交流电变化越快。

##### 2. 频率

交流电在  $1s$  内变化的次数叫频率，用  $f$  表示，单位是  $Hz$ 。  
频率越高，表示交流电变化越快。

##### 3. 周期和频率的关系

周期与频率互为倒数，即

$$f = \frac{1}{T}$$

或

$$T = \frac{1}{f}$$

##### 4. 角频率

交流电在  $1s$  内变化的电角度叫角频率，用  $\omega$  表示，单位是  $rad/s$ 。

##### 5. 角频率和频率的关系

$$\omega = 2\pi f$$

例2-1 我国电力网频率为  $50Hz$ ，求角频率和周期各为多少。

角频率为

$$\omega = 2\pi f = 2 \times 3.14 \times 50 = 314 rad/s$$

周期为



$$T = \frac{1}{f} = \frac{1}{50} = 0.02\text{s}$$

例2-2 求周期为 $1\mu\text{s}$ 时的频率和角频率。

频率为

$$\begin{aligned} f &= \frac{1}{T} = \frac{1}{10^{-6}} = 1000000\text{Hz} = 1000\text{kHz} \\ &= 10^6\text{kHz} = 1\text{MHz} \end{aligned}$$

角频率为

$$\omega = 2\pi f = 2 \times 3.14 \times 1000 \times 10^3 = 6.28 \times 10^6 \text{rad/s}$$

## 二、交流电的瞬时值、最大值、有效值和平均值

### 1. 瞬时值

在任意一个时刻的交流电的数值叫瞬时值，电动势、电压和电流分别用  $e$ 、 $u$  和  $i$  表示。

### 2. 最大值

最大的瞬时值叫最大值，分别用  $E_m$ 、 $U_m$  和  $I_m$  表示。

### 3. 有效值

让交流电和直流电分别通过阻值完全相同的电阻，如果在相同的时间内，两种电流产生的热量相等，就把此直流电的数值叫做交流电的有效值，有效值分别用  $E$ 、 $U$  和  $I$  表示。通常讲的和用交流电表测量出来的电压和电流的数值，一般都是指它们各自的有效值。

正弦交流电的有效值与最大值的关系为

$$E = \frac{E_m}{\sqrt{2}} \approx 0.707 E_m$$

$$U = \frac{U_m}{\sqrt{2}} = 0.707 U_m$$

$$I = \frac{I_m}{\sqrt{2}} = 0.707 I_m$$

### 4. 平均值

正弦交流电在一个周期的平均值恒等于零，通常讲的平均值

是指交流电在半个周期的平均值。

正弦交流电的平均值与最大值的关系为

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

$$U_p = \frac{2}{\pi} U_m \approx 0.637 U_m$$

$$E_p = \frac{2}{\pi} E_m \approx 0.637 E_m$$

正弦交流电的平均值与有效值的关系

$$I_p = 0.9 I$$

$$U_p = 0.9 U$$

$$E_p = 0.9 E$$

### 三、相位、初相位和相位差

正弦交流电可以用正弦曲线来描述，也可以用三角函数来表示，即

$$e = E_m \sin(\omega t + \varphi)$$

$$u = U_m \sin(\omega t + \varphi)$$

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

#### 1. 相位

正弦交流电瞬时值的表达式中的电角度  $\omega t + \varphi$  称为正弦交流电的相位。

#### 2. 初相位

当  $t = 0$  时的相位  $\varphi$  称为初相位。

#### 3. 相位差

两个同频率正弦量的相位之差称为相位差，用  $\psi$  表示。当  $e_1 = E_m \sin(\omega t + \varphi_1)$ ， $e_2 = E_m \sin(\omega t + \varphi_2)$  时，则有

$$\psi = (\omega t + \varphi_1) - (\omega t + \varphi_2) = \varphi_1 - \varphi_2$$

当  $\varphi_1 - \varphi_2 > 0$  时， $e_1$  相位超前于  $e_2$ ，或  $e_2$  相位滞后于  $e_1$ 。

当  $\varphi_1 - \varphi_2 = 0$  时， $e_1$  与  $e_2$  同相位。

当  $\varphi_1 - \varphi_2 = 180^\circ$  时， $e_1$  与  $e_2$  反相位。

#### 4. 正弦交流电的三要素

正弦交流电的最大值、角频率（或频率、周期）和初相角称为正弦交流电的三要素。这三者都是反映正弦交流电变化特征的物理量，知道了三要素，正弦交流电的变化情况也就完全确定了。

**例2-3** 已知一正弦电压  $u = 311\sin 314t$  V，求它的最大值、有效值、频率、角频率和周期。

$$U_m = 311\text{V}$$

$$U = \frac{U_m}{\sqrt{2}} = \frac{311}{\sqrt{2}} = 220\text{V}$$

$$\omega = 314\text{rad/s}$$

$$f = \frac{\omega}{2\pi} = \frac{314}{2 \times 3.14} = 50\text{Hz}$$

$$T = \frac{1}{f} = \frac{1}{50} = 0.02\text{s}$$

**例2-4** 已知一正弦电流  $i = 10\sin(\omega t + 60^\circ)$  A，当  $f = 50$  Hz， $t = 0.20$  s 时，求电流的瞬时值为多少。

当  $f = 50\text{Hz}$  时

$$\omega = 2\pi f = 2 \times 3.14 \times 50 = 314\text{rad/s}$$

当  $t = 0.2$  s 时

$$\omega t = 314 \times 0.2 = 62.8\text{rad}$$

将弧度换算成角度则有

$$62.8 \times \frac{180^\circ}{\pi} = 3600^\circ = 10 \times 360^\circ$$

电流瞬时值为

$$\begin{aligned} i &= 10\sin(10 \times 360^\circ + 60^\circ) = 10\sin 60^\circ \\ &= 10 \times 0.866 = 8.66\text{A} \end{aligned}$$

**例2-5** 已知  $i = 10\sin\left(\omega t + \frac{\pi}{6}\right)$  A， $u = 50\sin\left(\omega t + \right.$

$-\frac{\pi}{4}$ )V, 求  $i$ 、 $u$  的初相角和  $i$  与  $u$  的相位差, 并指出哪个超前, 哪个滞后。

$i$  的初相角为  $\pi/6$

$u$  的初相角为  $\pi/4$

$i$  与  $u$  的相位差为  $\psi = \pi/4 - \pi/6 = \pi/12$

$u$  超前于  $i$ ,  $i$  滞后于  $u$ 。

例2-6 已知一正弦电压, 当  $t=0$  时的瞬时值, 即  $u(0)=10$  V, 若初相角为  $30^\circ$ , 求有效值。

$$u = U_m \sin(\omega t + 30^\circ)$$

当  $t=0$  时

$$u(0) = U_m \sin 30^\circ = 10\text{V}$$

$$U_m = \frac{10}{\sin 30^\circ} = 20\text{V}$$

$$U = \frac{U_m}{\sqrt{2}} = \frac{20}{\sqrt{2}} = 14.1\text{V}$$

例2-7 用电流表测得线路上的电流为10A, 问线路上电流的最大值和平均值各为多少?

$$I_m = \sqrt{2} I = \sqrt{2} \times 10 = 14.1\text{A}$$

$$I_p = 0.9 I_m = 12.7\text{A}$$

例2-8 如果电压的最大值为536V, 用电压表测量, 问表上的读数是多少。

$$U = 0.707 U_m = 0.707 \times 536 = 380\text{V}$$

例2-9 已知电压  $u = U_m \sin\left(\omega t + \frac{\pi}{6}\right)$  V, 当  $t=0$  时  $u=250$  V, 当  $t=1/300$  s 时  $u=500$  V, 求电压最大值, 角频率及频率。

当  $t=0$  时

$$250 = U_m \sin\left(0 + \frac{\pi}{6}\right)$$

$$U_m = \frac{250}{\frac{\sin \frac{\pi}{6}}{0.5}} = \frac{250}{0.5} = 500 \text{ V}$$

当  $t = 1/300 \text{ s}$  时

$$500 = 500 \sin\left(\omega \frac{1}{300} + \frac{\pi}{6}\right)$$

$$\sin\left(\frac{\omega}{300} + \frac{\pi}{6}\right) = 1 = \sin \frac{\pi}{2}$$

$$\frac{\omega}{300} + \frac{\pi}{6} = \frac{\pi}{2}$$

$$\omega = \frac{\pi}{3} \times 300 = 100\pi = 314 \text{ rad/s}$$

$$f = \frac{\omega}{2\pi} = \frac{314}{2 \times 3.14} = 50 \text{ Hz}$$

例2-10 已知  $u = 50 \sin\left(314t - \frac{\pi}{3}\right) \text{ V}$ ,  $i = 25 \sin\left(314t + \frac{\pi}{2}\right) \text{ A}$ , 求电压和电流的最大值和有效值、频率和周期、电压

与电流的相位差。

$$U_m = 50 \text{ V}$$

$$U = \frac{U_m}{\sqrt{2}} = \frac{50}{\sqrt{2}} = 35.5 \text{ V}$$

$$I_m = 25 \text{ A}$$

$$I = \frac{I_m}{\sqrt{2}} = \frac{25}{\sqrt{2}} = 17.7 \text{ A}$$

$$f = \frac{314}{2\pi} = 50 \text{ Hz}$$

$$T = \frac{1}{f} = \frac{1}{50} = 0.02 \text{ s}$$

$$\varphi = \varphi_u - \varphi_i = -60^\circ - 90^\circ = -150^\circ$$

电压滞后电流  $150^\circ$ 。

## 第二节 简单正弦交流电路计算

### 一、纯电阻电路

由白炽灯、电烙铁和电阻炉等负载组成的交流电路，都可以近似看成是纯电阻电路，如图2-1a所示。

#### 1. 电流与电压的关系

$$I_R = \frac{U_R}{R}$$

$$U_R = I_R R$$

$$R = \frac{U_R}{I_R}$$

电流与电压频率相同、相位相同，相量关系如图2-1b所示。

#### 2. 电阻所消耗的功率

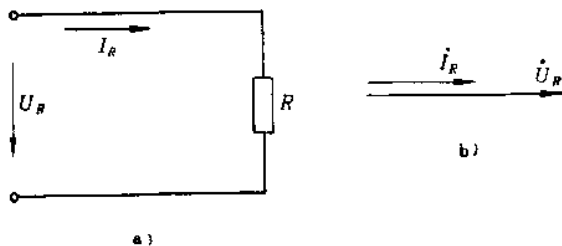


图2-1 纯电阻电路及相量图

$$P = U_R I_R = I_R^2 R = \frac{U_R^2}{R}$$

式中  $P$ ——有功功率 (W)；

$U_R$ ——加在电阻两端的交流电压有效值 (V)；

$I_R$ ——流过电阻的交流电流有效值 (A)；

$R$ ——用电器的电阻值 ( $\Omega$ )。

**例2-11** 已知加在电阻两端的电压有效值为 220V，电阻值为 50 $\Omega$ ，求流过电阻的电流和电阻消耗的功率。

流过电阻的电流为

$$I = \frac{U}{R} = \frac{220}{50} = 4.4 \text{ A}$$

电阻消耗的功率为

$$P = UI = 220 \times 4.4 = 968 \text{ W}$$

**例2-12** 在负载电阻  $R = 50 \Omega$  的两端，外加电源电压  $u = 200 \sin \omega t \text{ V}$ ，求电流的瞬时值和有效值及功率，并画出电流与电压的相量图。

瞬时电流为

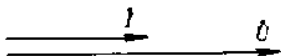
$$i = \frac{u}{R} = \frac{200 \sin \omega t}{50} = 4 \sin \omega t \text{ A}$$

电压有效值为

$$U = \frac{U_m}{\sqrt{2}} = \frac{200}{1.41} = 142 \text{ V}$$

电流有效值为

$$I = \frac{I_m}{\sqrt{2}} = \frac{4}{1.41} = 2.84 \text{ A}$$



平均功率为

图2-2 电流与电压相量图

$$P = UI = 142 \times 2.84 = 403 \text{ W}$$

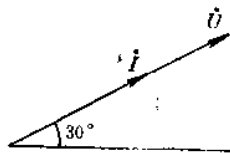
电流与电压的矢量图，如图2-2所示。

**例2-13** 已知一电阻上的电压为  $u = 536 \sin \left( \omega t + \frac{\pi}{6} \right) \text{ V}$ ，

流过的电流为  $i = 10 \sin \left( \omega t + \frac{\pi}{6} \right) \text{ A}$ ，求电阻上消耗的功率，并画出相量图。

$$U = \frac{U_m}{\sqrt{2}} = \frac{536}{1.41} = 380 \text{ V}$$

$$I = \frac{I_m}{\sqrt{2}} = \frac{10}{1.41} = 7.09 \text{ A}$$



电阻上消耗的功率为

图2-3 电压与电流相量图

$$P = UI = 380 \times 7.09 = 2690 \text{ W}$$

电压与电流相量图，如图2-3所示。

例2-14 把220V、100W的白炽灯泡接在220V的交流电源上，问通过白炽灯的电流和白炽灯的电阻是多少，若把它接在110V的交流电源上，问它消耗的功率是多少。

$$I = \frac{P}{U} = \frac{100}{220} = 0.455 \text{ A}$$

$$R = \frac{U}{I} = \frac{220}{0.455} = 484 \Omega$$

接在110V电源上的功率为

$$P = \frac{U^2}{R} = \frac{110^2}{484} = 25 \text{ W}$$

## 二、纯电感电路

由直流电阻很小的电感线圈组成的交流电路，都可近似看成是纯电感电路，如图2-4a所示。

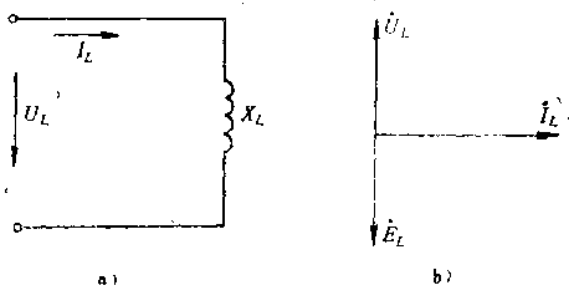


图2-4 纯电感电路及相量图

### 1. 电流与电压的关系

$$I_L = \frac{U_L}{X_L}$$

$$U_L = I_L X_L$$

$$X_L = \frac{U_L}{I_L}$$



### 2. 感抗

$$X_L = \omega L = 2\pi f L$$

式中  $X_L$ ——感抗( $\Omega$ );

$L$ ——电感量(H)。

电流与电压频率相同,电压超前电流 $90^\circ$ ,而感应电动势总是滞后电流 $90^\circ$ ,如图2-4b所示。

### 3. 无功功率

$$Q_L = U_L I_L = I^2 X_L = \frac{U_L^2}{X_L}$$

式中  $Q_L$ ——无功功率(var)。

**例2-15** 一个5mH的电感线圈,接在工频电源上,问感抗是多少,若电源频率是500kHz,感抗又是多少。

当  $f = 50\text{Hz}$  时

$$X_L = 2\pi f L = 2 \times 3.14 \times 50 \times 5 \times 10^{-3} = 1.57\Omega$$

当  $f = 500\text{kHz}$  时

$$\begin{aligned} X_L &= 2\pi f L = 2 \times 3.14 \times 500 \times 10^3 \times 5 \times 10^{-3} \\ &= 15700\Omega \end{aligned}$$

**例2-16** 将20mH的电感线圈,接到频率为50Hz的电压为220V的电路,求电路中的电流和无功功率。

电路中电流为

$$\begin{aligned} I &= \frac{U}{X_L} = \frac{U}{2\pi f L} = 2 \times 3.14 \times \frac{220}{50 \times 20 \times 10^{-3}} \\ &= 35\text{A} \end{aligned}$$

无功功率为

$$Q = UI = 220 \times 35 = 7700\text{var} = 7.7\text{kvar}$$

**例2-17** 某电感线圈,其电阻可忽略不计,当接在频率为50Hz,电压为380V的交流电源上,若流过线圈的电流为5A,求线圈的电感。

线圈的感抗为

$$X_L = \frac{U}{I} = \frac{380}{5} = 76 \Omega$$

线圈的电感为

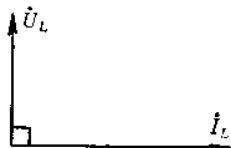
$$L = \frac{X_L}{2\pi f} = \frac{76}{2 \times 3.14 \times 50} = 0.242 \text{H}$$

**例2-18** 有一个20mH的电感线圈，接在电源电压  $u = 200\sqrt{2} \sin 10^3 t \text{V}$  上，求电流的有效值和瞬时表达式，并画出相量图。

$$\begin{aligned} X_L &= \omega L = 10^3 \times 20 \times 10^{-3} \\ &= 20 \Omega \end{aligned}$$

电流的有效值为

$$I = \frac{U}{X_L} = \frac{200}{20} = 10 \text{A}$$



电流的瞬时表达式为

图2-5 电流与电压相量图

$$i = 10\sqrt{2} \sin(10^3 t - 90^\circ) \text{A}$$

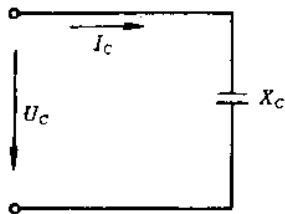
电流与电压的相量图，如图2-5所示。

### 三、纯电容电路

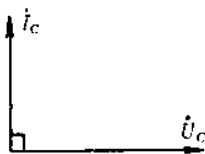
只含有电容的交流电路，称为纯电容电路，如图2-6a所示。

#### 1. 电流与电压的关系

$$I_C = \frac{U_C}{X_C}$$



a)



b)

图2-6 纯电容电路与相量图

$$U_c = I_c X_c$$

$$X_c = \frac{U_c}{I_c}$$

### 2. 容抗

$$X_c = \frac{1}{\omega C} = \frac{1}{2\pi f C}$$

式中  $X_c$ ——容抗( $\Omega$ );

$C$ ——电容量(F)。

电流与电压频率相同, 电流超前电压 $90^\circ$ , 如图2-6b所示。

### 3. 无功功率

$$Q_c = U_c I_c = I_c^2 X_c = \frac{U_c^2}{X_c}$$

式中  $Q_c$ ——无功功率 (var)。

例2-19 把电容量为 $200\mu\text{F}$ 的电容器接在频率为 $50\text{Hz}$ 、电压为 $220\text{V}$ 的交流电路中, 求容抗和电流的有效值, 并画出电流与电压的相量图。

容抗为

$$X_c = \frac{1}{2\pi f C} = \frac{1}{2 \times 3.14 \times 50 \times 200 \times 10^{-6}}$$

$$= 15.9\Omega$$

电流的有效值为

$$I = \frac{U}{X_c} = \frac{220}{15.9} = 13.8\text{A}$$

电流与电压的相量图如图2-7所示。

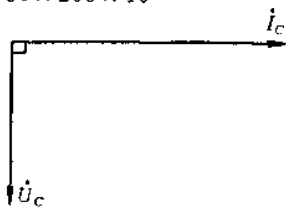


图2-7 电流与电压相量图

例2-20 已知电容器的电容量为 $0.04\mu\text{F}$ , 接到电容器两端的电压为 $50\text{V}$ , 其初相角为 $30^\circ$ , 角频率为 $10^6\text{rad/s}$ , 求流过电容器的电流、无功功率、写出电流瞬时表达式, 并画出相量图。

容抗为

$$X_c = \frac{1}{\omega C} = \frac{1}{10^6 \times 0.04 \times 10^{-6}} = 25\Omega$$

通过电容的电流为

$$I = \frac{U}{X_C} = \frac{50}{25} = 2 \text{ A}$$

电流的初相角为

$$\varphi = 30^\circ + 90^\circ = 120^\circ$$

电流的瞬时表达式为

$$i = 2\sqrt{2} \sin(\omega t + 120^\circ) \text{ A}$$

无功功率为

$$Q_C = UI = 50 \times 2 = 100 \text{ var}$$

相量图如图2-8所示。

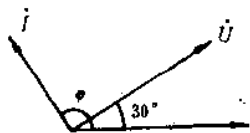


图2-8 相量图

**例2-21** 在一只 $20\mu\text{F}$ 的电容器两端加上正弦电压 $u = 220$

$\times \sqrt{2} \sin\left(314t - \frac{\pi}{6}\right) \text{ V}$ ，求通过电容器中的电流有效值及

电流的瞬时值表达式。若所加电压的有效值与相角不变，而频率为 $100\text{Hz}$ ，则结果又是怎样。

电容器的容抗为

$$X_C = \frac{1}{2\pi f C} = \frac{1}{2\pi \times 50 \times 20 \times 10^{-6}} = 159\Omega$$

电流的有效值为

$$I = \frac{U}{X_C} = \frac{220}{159} = 1.38 \text{ A}$$

电流的初相角为

$$\varphi = 90^\circ - 30^\circ = 60^\circ$$

电流的瞬时值表达式为

$$i = 1.38\sqrt{2} \sin(314t + 60^\circ) \text{ A}$$

当 $f = 100\text{Hz}$ 时则有

$$\begin{aligned} X'_C &= \frac{1}{2\pi f C} = \frac{1}{2\pi \times 100 \times 20 \times 10^{-6}} \\ &= 79.5\Omega \end{aligned}$$

$$I' = \frac{U}{X'_C} = \frac{220}{79.5} = 2.77 \text{ A}$$

$$i' = 2.77\sqrt{2} \sin(628t + 60^\circ) \text{ A}$$

计算结果表明：在纯电容电路中，若频率增加一倍，而电流有效值也要增加一倍。

#### 四、电阻、电感串联电路

电阻、电感串联电路如图2-9a所示。

##### 1. 电流与电压的相量关系

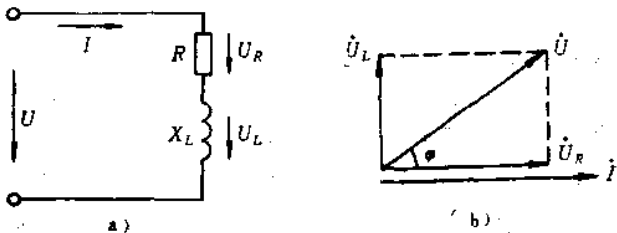


图2-9 电阻、电感串联电路及相量图

相量关系如图2-9b所示。总电压超前电流 $\varphi$ 角，由 $\dot{U}_R$ 、 $\dot{U}_L$ 和 $\dot{U}$ 组成的相量三角形称为电压三角形，如图2-10a所示。

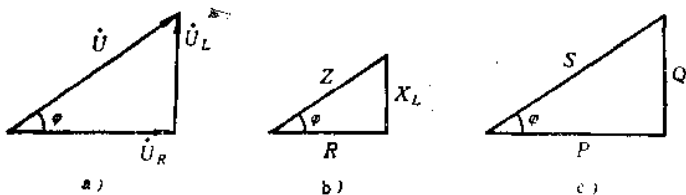


图2-10 电压、阻抗、功率三角形

##### 2. 电流与电压的数量关系

$$U = \sqrt{U_R^2 + U_L^2} = \sqrt{(IR)^2 + (IX_L)^2}$$

$$= I \sqrt{R^2 + X_L^2} = IZ$$

$$I = \frac{U}{\sqrt{R^2 + X_L^2}} = \frac{U}{Z}$$

$$Z = \frac{U}{I}$$

##### 3. 阻抗

$$Z = \sqrt{R^2 + X_L^2}$$

式中  $Z$ ——阻抗 ( $\Omega$ )。

由  $Z$ 、 $R$  和  $X_L$  三者组成了阻抗三角形, 如图2-10b 所示。

4. 有功功率

$$P = U_R I = UI \cos \varphi$$

5. 无功功率

$$Q = U_L I = UI \sin \varphi$$

6. 视在功率

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2} = IU$$

式中  $S$ ——视在功率 (VA)。

由  $P$ 、 $Q$  和  $S$  三者组成了功率三角形, 如图2-10c 所示。

7. 功率因数

$$\cos \varphi = \frac{P}{S}$$

$$\varphi = \arccos \frac{P}{S} = \arccos \frac{U_R}{U} = \arccos \frac{R}{Z}$$

**例2-22** 将电感为0.05H 及电阻为20 $\Omega$ 的线圈接在频率为50 Hz 及电压为220V 的电源上, 求线圈的感抗及阻抗、线圈中的电流、功率因数、有功功率、无功功率、视在功率。

线圈的感抗为

$$X_L = 2\pi fL = 2 \times 3.14 \times 50 \times 0.05 = 15.7\Omega$$

线圈的阻抗为

$$Z = \sqrt{R^2 + X_L^2} = \sqrt{20^2 + 15.7^2} = 25.4\Omega$$

线圈中的电流为

$$I = \frac{U}{Z} = \frac{220}{25.4} = 8.66\text{A}$$

功率因数为

$$\cos \varphi = \frac{R}{Z} = \frac{20}{25.4} = 0.787$$

有功功率为

$$P = UI \cos \varphi = 220 \times 8.66 \times 0.787 = 1500 \text{ W}$$

无功功率为

$$\sin \varphi = \frac{X_L}{Z} = \frac{15.7}{25.4} = 0.618$$

$$Q = UI \sin \varphi = 220 \times 8.66 \times 0.618 = 1180 \text{ var}$$

视在功率为

$$S = UI = 220 \times 8.66 = 1910 \text{ VA}$$

例2-23 有一线圈接在电压  $u = 220\sqrt{2} \sin\left(314t + \frac{\pi}{2}\right) \text{ V}$ ,

的电源上, 已知线圈的电感为  $0.2 \text{ H}$ , 电阻为  $30 \Omega$ , 求线圈的感抗、阻抗、电流、电阻电压降、电感电压降, 画出电流与各电压的相量图。

$$X_L = \omega L = 314 \times 0.2 = 62.8 \Omega$$

$$Z = \sqrt{R^2 + X_L^2} = \sqrt{30^2 + 62.8^2} = 69.6 \Omega$$

$$I = \frac{U}{Z} = \frac{220}{69.6} = 3.16 \text{ A}$$

电阻电压降为

$$U_R = IR = 3.16 \times 30 = 94.8 \text{ V}$$

电感电压降为

$$U_L = IX_L = 3.16 \times 62.8 = 198 \text{ V}$$

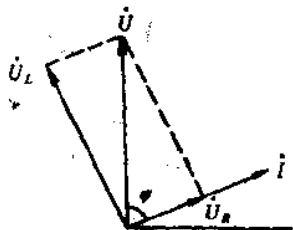


图2-11 相量图

$$\cos \varphi = \frac{R}{Z} = \frac{30}{69.6} = 0.431$$

$$\varphi = \arccos 0.431 = 64.5^\circ$$

相量图如图2-11所示。

例2-24 有一弧光灯点燃时需要  $60 \text{ V}$  电压和  $2 \text{ A}$  电流, 用扼流圈 (近似看成纯电感) 降压接到  $220 \text{ V}$ 、 $50 \text{ Hz}$  电源上, 求电路的视在功率、有功功率、无功功率和功率因数。

$$S = IU = 2 \times 220 = 440 \text{ VA}$$

$$P = U_{\text{灯}} I = 60 \times 2 = 120 \text{ W}$$

$$\cos\varphi = \frac{P}{S} = \frac{120}{440} = 0.27$$

$$\varphi = \arccos 0.27 = 74.5^\circ$$

$$Q = S \sin\varphi = 440 \sin 74.5^\circ = 424 \text{var}$$

例2-25 有10W的荧光灯一盏，使用时和镇流器串联在电压为220V、频率为50Hz的交流电源上，若灯管工作时为纯电阻性，其两端电压等于110V，求镇流器的感抗及电感、电路的电流及功率因数。

$$U_L = \sqrt{U^2 - U_R^2} = \sqrt{220^2 - 110^2} = 191 \text{V}$$

$$I = \frac{P}{U_R} = \frac{40}{110} = 0.364 \text{A}$$

$$X_L = \frac{U_L}{I} = \frac{191}{0.364} = 525 \Omega$$

$$L = \frac{X_L}{2\pi f} = \frac{525}{2 \times 3.14 \times 50} = 1.67 \text{H}$$

$$\cos\varphi = \frac{U_R}{U} = \frac{110}{220} = 0.5$$

例2-26 RR-40型荧光灯与220V的交流电源接通点燃后，测得电路的电流为0.41A，镇流器的两端电压为180V，消耗的功率为12.6W，灯管的端电压为110V，消耗的功率为40W。求：(1)灯管的电阻；(2)镇流器的电阻、感抗、功率因数和功率因数角；(3)整个电路的电阻、感抗、阻抗、功率因数、功率因数角；(4)画出整个荧光灯电路的相量图，并验证电源电压等于灯管端电压与镇流器端电压的相量和。

$$(1) R_s = \frac{P}{I^2} = \frac{40}{0.41^2} = 238 \Omega$$

$$(2) R_v = \frac{12.6}{0.41^2} = 75 \Omega$$

$$Z_v = \frac{U_v}{I} = \frac{180}{0.41} = 439 \Omega$$



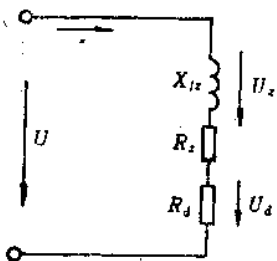


图2-12 荧光灯电路

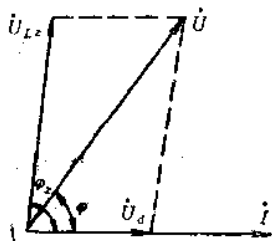


图2-13 相量图

$$X_{Lz} = \sqrt{Z_z^2 - R_z^2} = \sqrt{439^2 - 75^2} = 433\Omega$$

$$\cos\varphi_z = \frac{R_z}{Z_z} = \frac{75}{439} = 0.171$$

$$\varphi_z = \arccos 0.171 = 80.1^\circ$$

$$(3) \quad R = R_d + R_z = 238 + 75 = 313\Omega$$

$$X = X_{Lz} = 433\Omega$$

$$Z = \sqrt{R^2 + X^2} = \sqrt{313^2 + 433^2} = 534\Omega$$

$$\cos\varphi = \frac{R}{Z} = \frac{313}{534} = 0.586$$

$$\varphi = \arccos 0.586 = 54.1^\circ$$

$$(4) \quad U = \sqrt{(U_d + U_z \cos\varphi_z)^2 + (U_z \sin\varphi_z)^2}$$

$$= \sqrt{(110 + 180 \cos 80.1^\circ)^2 + (180 \sin 80.1^\circ)^2}$$

$$= 220\text{V}$$

相量图如图2-13所示。

**例2-27** 把一线圈接在电压  $u = 220\sqrt{2} \sin\left(314t + \frac{\pi}{2}\right) \text{V}$

的电源上，如果线圈的电阻为  $30\Omega$ ，电感为  $0.2\text{H}$ 。求线圈的感抗、阻抗、电流、电阻电压降、电感电压降，画出包括  $\dot{U}$ 、 $\dot{U}_R$ 、 $\dot{U}_L$ 、 $\dot{I}$  的相量图。

$$X_L = \omega L = 314 \times 0.2 = 62.8\Omega$$

$$Z = \sqrt{R^2 + X_L^2} = \sqrt{30^2 + 62.8^2}$$

$$= 69.6 \Omega$$

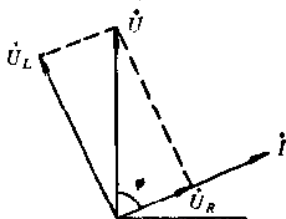
$$I = \frac{U}{Z} = \frac{220}{69.6} = 3.16 \text{ A}$$

$$U_R = IR = 3.16 \times 30 = 94.8 \text{ V}$$

$$U_L = IX_L = 3.16 \times 62.8 = 19.8 \text{ V}$$

$$\cos \varphi = \frac{R}{Z} = \frac{30}{69.6} = 0.431$$

$$\varphi = \arccos 0.431 = 64.5^\circ$$



相量图如图2-14所示。

图2-14 相量图

**例2-28** 已知荧光灯管的电阻  $R_d = 310 \Omega$ ，镇流器的内阻  $R_z = 85 \Omega$ ，电感  $L = 1.2 \text{ H}$ ，电源电压  $U = 220 \text{ V}$ ，求线路电流的有效值，镇流器两端电压及灯管两端电压的有效值，并作出相量图。

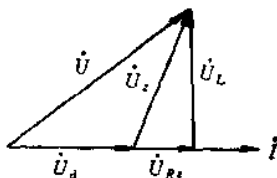
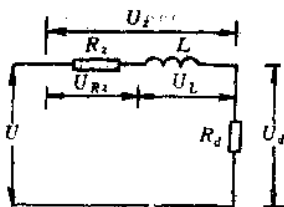
$$X_L = 2\pi fL = 2 \times 3.14 \times 50 \times 1.2 = 377 \Omega$$

$$Z = \sqrt{(R_d + R_z)^2 + X_L^2} = \sqrt{(310 + 85)^2 + 377^2}$$

$$= 546 \Omega$$

$$I = \frac{U}{Z} = \frac{220}{546} = 0.403 \text{ A}$$

$$U_{R_z} = IR_z = 0.403 \times 85 = 34.3 \text{ V}$$



(a)

(b)

图2-15 日光灯电路及相量图

$$U_L = IX_L = 0.403 \times 377 = 152\text{V}$$

$$U_z = \sqrt{U_R^2 + U_L^2} = \sqrt{34.3^2 + 152^2} = 156\text{V}$$

$$U_d = IR_d = 0.403 \times 310 = 125\text{V}$$

相量图如图2-15b所示。

**例2-29** 为了求出一个线圈的参数，在线圈两端接入频率为50Hz的交流电源，并测量出线圈两端的电压为100V，通过线圈的电流为4A，它的有功功率为320W，问线圈的电阻和电感各为多少？

$$U_R = \frac{P}{I} = \frac{320}{4} = 80\text{V}$$

$$R = \frac{U_R}{I} = \frac{80}{4} = 20\Omega$$

$$U_L = \sqrt{U^2 - U_R^2} = \sqrt{100^2 - 80^2}$$

$$= 60\text{V}$$

$$X_L = \frac{U_L}{I} = \frac{60}{4} = 15\Omega$$

$$L = \frac{X_L}{2\pi f} = \frac{15}{2 \times 3.14 \times 50}$$

$$= 0.0477\text{H}$$

**例2-30** 有一电感线圈接到150V直流电源上时，用交直流两用的电流表测得电流 $I_1 = 3\text{A}$ ；换接到220V、50Hz的交流电源上时，测得电流 $I_2 = 2.2\text{A}$ ，试分别求出该线圈的电阻和电感的数值。

接直流电源，求直流电阻，即

$$R = \frac{U}{I_1} = \frac{150}{3} = 50\Omega$$

接交流电源，求电感，即

$$Z = \frac{U}{I_2} = \frac{220}{2.2} = 100\Omega$$

$$\begin{aligned}
 X_L &= \sqrt{Z^2 - R^2} = \sqrt{100^2 - 50^2} \\
 &\approx 86.6\Omega \\
 L &= \frac{X_L}{2\pi f} = \frac{86.6}{2 \times 3.14 \times 50} \\
 &= 0.276\text{H}
 \end{aligned}$$

**例2-31** 在未知的阻抗上串联接入一个 $22\Omega$ 的无感电阻，通电时，测得电压 $U_1 = 44\text{V}$ ， $U_2 = 52\text{V}$ ， $U_3 = 30\text{V}$ ，求出未知阻抗的电抗和电阻，如图2-16所示。

先求得电路电流为

$$I = \frac{U_1}{22} = \frac{44}{22} = 2\text{A}$$

再列出两个电流方程式，即

$$I = \frac{U_2}{\sqrt{R^2 + X^2}} = \frac{52}{\sqrt{R^2 + X^2}} = 2$$

$$\begin{aligned}
 I &= \frac{U_3}{\sqrt{(22 + R)^2 + X^2}} = \frac{30}{\sqrt{(22 + R)^2 + X^2}} \\
 &= 2
 \end{aligned}$$

由上两式得：

$$R^2 + X^2 = 26^2$$

$$(22 + R)^2 + X^2 = 40^2$$

联立解上两式后得：

$$44R = 1016 - 676 = 440$$

所以  $R = 10\Omega$

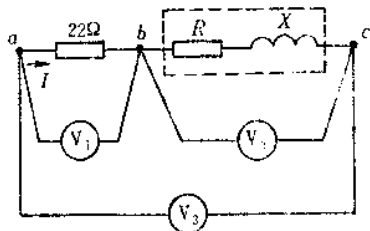


图2-16 未知阻抗的电路图

$$X = \sqrt{26^2 - R^2} = \sqrt{676 - 100} = 24\Omega$$

**例2-32** 有一只白炽灯泡，其额定功率为 $100\text{W}$ ，额定电压 $110\text{V}$ 。为了把它接到 $220\text{V}$ 、 $50\text{Hz}$ 的交流电源上使用，可与它串联一个电感线圈，现在要使电灯两端还得到额定电压，问必须串联多大电感？这时电路的有功功率，功率因数各为多少？又如把这个电路接在直流 $220\text{V}$ 电源上，问能否使用，为什么？

电灯的额定电流为

$$I = \frac{P}{U} = \frac{100}{110} = 0.909\text{A}$$

电灯的电阻为

$$R = \frac{P}{I^2} = \frac{100}{0.909^2} = 121\Omega$$

接到220V 交流电源上时则有

$$Z = \frac{U}{I} = \frac{220}{0.909} = 242\Omega$$

$$X_L = \sqrt{Z^2 - R^2} = \sqrt{242^2 - 121^2} = 210\Omega$$

$$L = \frac{X_L}{2\pi f} = \frac{210}{2 \times 3.14 \times 50}$$

$$= 0.669\text{H}$$

$$S = UI = 220 \times 0.909 = 200\text{VA}$$

$$\cos\varphi = \frac{P}{S} = \frac{100}{200} = 0.5$$

如把这只电灯直接接到220V 的直流电源上, 此时的电流为白炽灯额定值的两倍, 所耗功率为额定值的四倍, 白炽灯很快就会烧坏。

**例2-33** 当两个线圈分别连接到220V、50Hz 的电源时, 流过的电流各为5A, 消耗的功率分别为500W 和 600W。当这两个线圈串联并接到220V、50Hz 的电源时, 试求流过的电流和功率因数。

电路图分别如2-17a、b 所示。

线圈1

因为  $I^2 R_1 = 500\text{W}$

所以  $R_1 = \frac{500}{5^2} = 20\Omega$

$$Z_1 = \sqrt{R_1^2 + X_{L1}^2} = \frac{U}{I} = \frac{220}{5} = 44\Omega$$

$$X_{L1} = \sqrt{Z_1^2 - R_1^2} = \sqrt{44^2 - 20^2} = 39.2\Omega$$

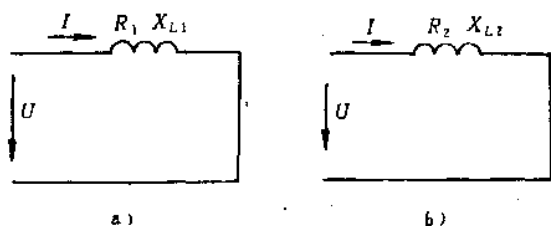


图2-17 两个线圈的电路图

线圈 2

$$R_2 = \frac{600}{5^2} = 24\Omega$$

$$X_{L2} = \sqrt{Z_2^2 - R_2^2} = \sqrt{44^2 - 24^2} = 76.1\Omega$$

两个线圈串联时则有

$$X_L = X_{L1} + X_{L2} = 39.2 + 36.9 = 76.1\Omega$$

$$R = R_1 + R_2 = 20 + 24 = 44\Omega$$

$$I = \frac{U}{\sqrt{R^2 + X_L^2}} = \frac{220}{\sqrt{44^2 + 76.1^2}} = 2.5\text{A}$$

$$\cos\varphi = \frac{R}{\sqrt{R^2 + X_L^2}} = \frac{44}{\sqrt{44^2 + 76.1^2}} = 0.501$$

例2-34 有一台4.5kW的异步电动机用串联电抗器的方法来限制起动电流，如图2-18所示。已知电源电压220V、50Hz，要求起动电流限制为30A，又知电动机起动时的电阻 $R_1 = 1.6\Omega$ 、感抗 $X_1 = 3.5\Omega$ ，问电抗器的感抗和电感为多少。

电路的电阻为

$$R = R_1 = 1.6\Omega$$

电路的总感抗为

$$X = X_1 + X_2 = 3.5 + X_2\Omega$$

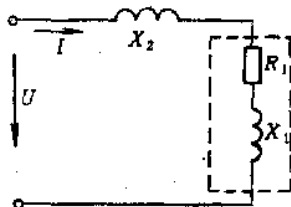


图2-18 电动机与电抗器串联电路

总阻抗为

$$Z = \sqrt{R^2 + X^2} = \sqrt{1.6^2 + (3.5 + X_2)^2}$$

$$= \frac{U}{I} = \frac{220}{30} = 7.33\Omega$$

解方程得:

$$X_2 = 7.14\Omega$$

电感量为

$$L_2 = \frac{X_2}{2\pi f} = \frac{7.14}{2 \times 3.14 \times 50} = 0.0227\text{H}$$

$$= 22.7\text{mH}$$

### 五、电阻、电容串联电路

电阻、电容串联电路如图2-19a所示。

#### 1. 电流与电压的相量关系

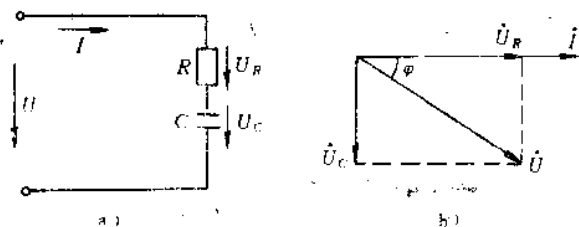


图2-19 电阻、电容串联电路及相量图

如图2-19b所示, 电流超前总电压 $\varphi$ 角, 由 $\dot{U}_R$ 、 $\dot{U}_C$ 和 $\dot{U}$ 组成的相量三角形称为电压三角形, 如图2-20a所示。

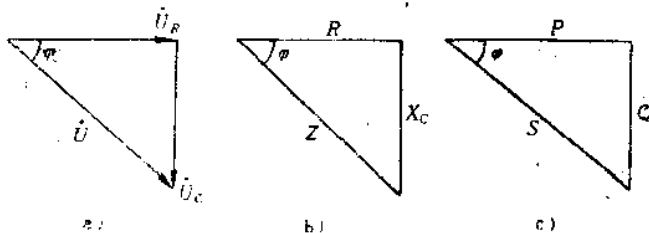


图2-20 电压、阻抗、功率三角形

## 2. 电流与电压的数量关系

$$\begin{aligned} U &= \sqrt{U_R^2 + U_C^2} = \sqrt{(IR)^2 + (IX_C)^2} \\ &= I\sqrt{R^2 + X_C^2} \\ &= IZ \end{aligned}$$

$$I = \frac{U}{Z} = \frac{U}{\sqrt{R^2 + X_C^2}}$$

$$Z = \frac{U}{I}$$

## 3. 阻抗

$$Z = \sqrt{R^2 + X_C^2}$$

由  $Z$ 、 $R$ 、 $X_C$  三者组成了阻抗三角形，如图2-20b所示。

## 4. 功率

由  $P$ 、 $Q$ 、 $S$  三者组成了功率三角形，如图2-20c所示。

$$P = U_R I = UI \cos \varphi$$

$$Q = U_C I = UI \sin \varphi$$

$$S = UI = \sqrt{P^2 + Q^2}$$

## 5. 功率因数

$$\cos \varphi = \frac{P}{S} = \frac{U_R}{U} = \frac{R}{Z}$$

$$\varphi = \arccos \frac{P}{S} = \arccos \frac{U_R}{U}$$

$$= \arccos \frac{R}{Z}$$

**例2-35** 由电容为  $35\mu\text{F}$  和电阻为  $50\Omega$  组成的串联电路接在频率为  $50\text{Hz}$  及电压  $U = 220\text{V}$  的电源上。试求：电路中的容抗  $X_C$ 、阻抗  $Z$ 、电流  $I$ 、电阻电压降  $U_R$ 、电容电压降  $U_C$ 、电流与电压的相位差  $\varphi$ 、有功功率  $P$ 、无功功率  $Q$ 、视在功率  $S$ 。

容抗为

$$X_C = \frac{1}{2\pi fC} = \frac{1}{2 \times 3.14 \times 50 \times 35 \times 10^{-6}}$$



$$= 91\Omega$$

阻抗为

$$Z = \sqrt{R^2 + X_C^2} = \sqrt{50^2 + 91^2} = 104\Omega$$

电路中的电流为

$$I = \frac{U}{Z} = \frac{220}{104} = 2.12\text{A}$$

电阻电压降为

$$U_R = IR = 2.12 \times 50 = 106\text{V}$$

电容电压降为

$$U_C = IX_C = 2.12 \times 91 = 193\text{V}$$

电流与电压的相位差为

$$\cos\varphi = \frac{R}{Z} = \frac{50}{104} = 0.481$$

$$\varphi = \arccos 0.481 = 61.2^\circ$$

有功功率为

$$P = IU_R = 2.12 \times 106 = 225\text{W}$$

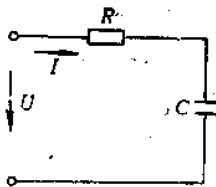
无功功率为

$$Q = IU_C = 2.12 \times 193 = 409\text{var}$$

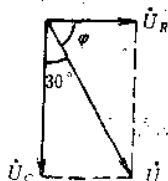
视在功率为

$$S = IU = 2.12 \times 220 = 466\text{VA}$$

**例2-36** 有一电阻和电容串联电路，如图2-21<sup>a</sup>所示，电源电压为 $U$ ，电阻和电容上的电压分别为 $U_R$ 、 $U_C$ 。已知电路的阻抗为 $2500\Omega$ ，电源频率为 $500\text{Hz}$ ，并设 $U$ 与 $U_C$ 间的相位差为 $30^\circ$ ，求电阻和电容。



a)



b)

图2-21 电阻、电容串联电路及相量图

由于  $U_c$  与  $U$  的夹角为  $30^\circ$ ，所以电流与电压的相位差为

$$\varphi = 90^\circ - 30^\circ = 60^\circ$$

因为

$$\operatorname{tg}\varphi = \frac{X_c}{R} = \frac{1}{R\omega C}$$

所示

$$X_c = R \operatorname{tg}\varphi$$

相量图如图2-21b所示。

$$Z = \sqrt{R^2 + X_c^2} = 2500\Omega$$

$$R(\sqrt{1 + \operatorname{tg}^2\varphi}) = 2500\Omega$$

$$R = \frac{2500}{\sqrt{1 + 1.73^2}} = 1250\Omega$$

$$C = \frac{1}{2\pi f R \operatorname{tg}\varphi} = \frac{1}{2 \times 3.14 \times 500 \times 1250 \times 1.73} \\ = 0.147 \times 10^{-6} \text{F} = 0.147\mu\text{F}$$

**例2-37** 现有一个电压  $U_1 = 220\text{V}$ ，功率为  $1000\text{W}$  的电炉，因为条件限制，不得不在电源电压  $U_2 = 380\text{V}$ ，频率为  $50\text{Hz}$  的电源上使用，拟串联一个电容器降压，试求此电容器的电容值和最小耐压值。

$$I = \frac{P}{U_1} = \frac{1000}{220} = 4.55\text{A}$$

最小耐压值为

$$U_c = \sqrt{U_2^2 - U_1^2} = \sqrt{380^2 - 220^2} = 310\text{V}$$

$$X_c = \frac{U_c}{I} = \frac{310}{4.55} = 68.1\Omega$$

$$C = \frac{1}{2\pi f X_c} = \frac{1}{2 \times 3.14 \times 50 \times 68.1} \\ = 46.8 \times 10^{-6} \text{F} = 46.8\mu\text{F}$$

**例2-38** 已知  $R = 25\Omega$ ， $C = 120\mu\text{F}$ ，串接电压  $u = 220\sqrt{2} \times \sin 314t\text{V}$ ，求电路中电流的瞬时值  $i$ 。

$$X_C = \frac{1}{\omega C} = \frac{1}{314 \times 120 \times 10^{-6}} = 26.5 \Omega$$

$$Z = \sqrt{R^2 + X_C^2} = \sqrt{25^2 + 26.5^2} \\ \approx 36.4 \Omega$$

$$I = \frac{U}{Z} = \frac{220}{36.4} = 6.04 \text{ A}$$

$$\varphi = \arccos \frac{R}{Z} = \arccos \frac{25}{36.4} = 46.6^\circ$$

$$i = 6.04 \sqrt{2} \sin(314t + 46.6^\circ) \text{ A}$$

**例2-39** 负载电阻  $R = 350 \Omega$ ，现要求其电压超前电源电压  $30^\circ$ ，若频率  $f = 50 \text{ Hz}$ ，应串入多大电容，当电源电压为  $220 \text{ V}$  时，电阻电压降  $U_R$  为多少，如果电容  $C$  不变，而电阻  $R$  为  $220 \Omega$ ，结果如何。

$$\varphi = \arctg \frac{X_C}{R}$$

$$X_C = R \operatorname{tg} \varphi = 350 \operatorname{tg} 30^\circ = 202 \Omega$$

应串入电容为

$$C = \frac{1}{2\pi f X_C} = \frac{1}{2 \times 3.14 \times 50 \times 202} \\ = 15.8 \times 10^{-6} \text{ F} = 15.8 \mu\text{F}$$

电阻电压降为

$$U_R = U \cos \varphi = 220 \cos 30^\circ = 190 \text{ V}$$

当电容  $C$  不变，电阻  $R$  为

$$\varphi' = \arctg \frac{X_C}{R} = \arctg \frac{202}{220} = 45.3^\circ$$

$$U_R = U \cos \varphi' = 220 \cos 45.3^\circ = 155 \text{ V}$$

## 六、电阻、电感、电容串联电路

线路图和相量关系分别如图2-22a、b所示。

电压、阻抗、功率三角形分别如图2-23a、b、c所示。

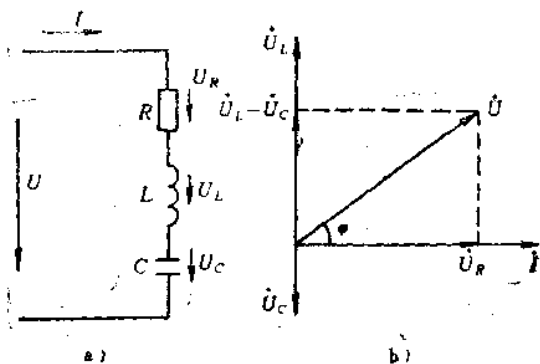


图2-22 电阻、电感、电容串联电路及相量图

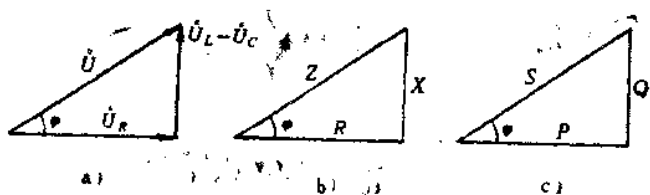


图2-23 电压、阻抗、功率三角形

1. 电流、电压和阻抗符合欧姆定律

$$U = \sqrt{U_R^2 + (U_L - U_C)^2} = I \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2} = IZ$$

$$Z = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2} = \sqrt{R^2 + X^2}$$

式中  $X$ ——电抗，在数值上等于  $X_L - X_C$  ( $\Omega$ )

2. 功率

$$P = U_R I = UI \cos \varphi$$

$$Q = Q_L - Q_C = (U_L - U_C) I \sin \varphi$$

$$S = UI = \sqrt{P^2 + Q^2}$$

3. 功率因数

$$\cos \varphi = \frac{P}{S}$$

$$\varphi = \arccos \frac{P}{S}$$

$R-L-C$  串联电路中一般有三种情况:

(1) 当  $X_L > X_C$  时,  $\varphi > 0$ , 总电压  $\dot{U}$  超前电流  $I$ , 电路呈感性, 如图2-22b 所示。

(2) 当  $X_L < X_C$  时,  $\varphi < 0$ , 总电压  $\dot{U}$  滞后电流  $I$ , 电路呈容性, 如图2-24b 所示。

(3) 当  $X_L = X_C$  时,  $\varphi = 0$ , 总电压  $\dot{U}$  与电流  $I$  同相位, 电路中的电抗为零, 电路呈电阻性, 如图2-24a 所示。

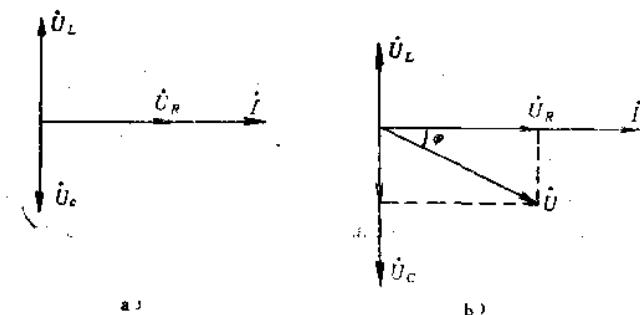


图2-24 电阻和电感性负载相量图

例2-40 由电阻  $R = 40\Omega$ , 电感  $L = 400\text{mH}$ 、电容  $C = 50\mu\text{F}$  组成的串联电路, 接在电源  $\dot{U} = 220\text{V}$ , 频率  $f = 50\text{Hz}$  的电源上, 求感抗  $X_L$ 、容抗  $X_C$ 、阻抗  $Z$ 、电流  $I$ 、电阻电压降  $U_R$ 、电感电压降  $U_L$ 、电容电压降  $U_C$ 、功率因数  $\cos\varphi$ 、功率因数角  $\varphi$ 、有功功率  $P$ 、无功功率  $Q$ 、视在功率  $S$ , 绘出相量图

$$X_L = 2\pi fL = 2 \times 3.14 \times 50 \times 400 \times 10^{-3} = 126\Omega$$

$$X_C = \frac{1}{2\pi fC} = \frac{1}{2 \times 3.14 \times 50 \times 50 \times 10^{-6}}$$

$$= 63.7\Omega$$

$$Z = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2} = \sqrt{40^2 + (126 - 63.7)^2}$$

$$= 74\Omega$$

$$I = \frac{U}{Z} = \frac{220}{74} = 2.97 \text{ A}$$

$$U_R = IR = 2.97 \times 40 = 119 \text{ V}$$

$$U_L = IX_L = 2.97 \times 126 = 374 \text{ V}$$

$$U_C = IX_C = 2.97 \times 63.7 = 189 \text{ V}$$

$$\cos\varphi = \frac{R}{Z} = \frac{40}{74} = 0.541$$

$$\varphi = \arccos 0.541 = 57.2^\circ$$

$$P = IU_R = 2.97 \times 119 = 353 \text{ W}$$

$$Q = IU \sin\varphi = 2.97 \times 220 \times \sin 57.2^\circ = 549 \text{ var}$$

$$S = IU = 2.97 \times 220 = 653 \text{ VA}$$

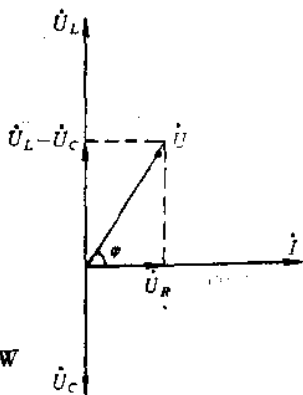


图2-25 相量图

相量图如图2-25所示。

**例2-41** 在  $R-L-C$  串联电路中,  $R = 25\Omega$ ,  $L = 70 \text{ mH}$ ,  $C = 35\mu\text{F}$ , 电源电压  $u = 311\sin(314t + 30^\circ) \text{ V}$ , 求电路的总电流的有效值和它的瞬时值的表达式, 各个元件上的电压有效值和它的瞬时值表达式, 作相量图和阻抗三角形。

$$X_L = 2\pi fL = \omega L = 314 \times 70 \times 10^{-3} = 22\Omega$$

$$X_C = \frac{1}{\omega C} = \frac{1}{314 \times 35 \times 10^{-6}} = 91\Omega$$

$$Z = \sqrt{R^2 + (22 - 91)^2} = \sqrt{25^2 + (22 - 91)^2} = 73.4\Omega$$

$$I = \frac{\frac{1}{\sqrt{2}}U_m}{Z} = \frac{\frac{1}{\sqrt{2}} \times 311}{73.4} = 3 \text{ A}$$

$$\cos\varphi = \frac{R}{Z} = \frac{25}{73.4} = 0.341$$

$$\varphi = \arccos 0.341 = 70.1^\circ$$

$$i = 3\sqrt{2} \sin(314t + 100^\circ) \text{ A}$$

$$U_R = IR = 3 \times 25 = 75\text{V}$$

$$u_R = 75\sqrt{2} \sin(314t + 100^\circ)\text{V}$$

$$U_L = IX_L = 3 \times 22 = 66\text{V}$$

$$u_L = 66\sqrt{2} \sin(314t + 196^\circ)\text{V}$$

$$U_C = IX_C = 3 \times 91 = 273\text{V}$$

$$u_C = 273\sqrt{2} \sin(314t + 10^\circ)\text{V}$$

相量图和阻抗三角形如图2-26a、b所示。

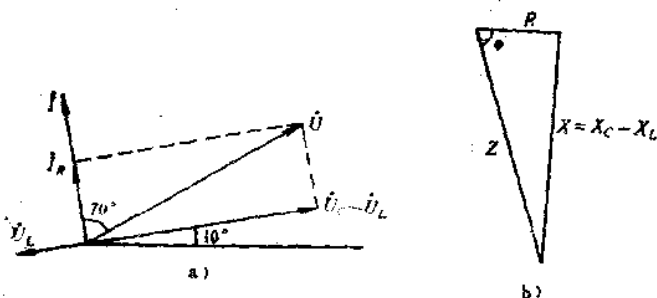


图2-26 相量图和阻抗三角形

### 七、电阻、电感并联电路

电路和相量图分别如图2-27a、b所示。

电流和电压之间的关系为

$$I_R = \frac{U}{R}$$

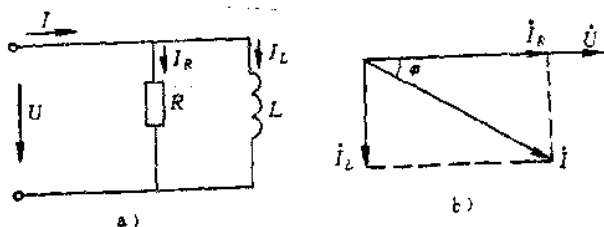


图2-27 电阻、电感并联电路及相量图

$$I_L = \frac{U}{X_L}$$

由  $I$ 、 $I_R$ 、 $I_L$  三者组成电流三角形，如图 2-28 所示，其中

$$I = \sqrt{I_R^2 + I_L^2}$$

$$\cos\varphi = \frac{I_R}{I} = \frac{I_R}{\sqrt{I_R^2 + I_L^2}}$$

$$P = I^2 R = UI \cos\varphi$$

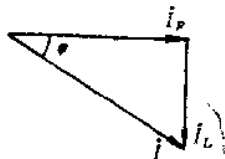


图 2-28 电流三角形

根据欧姆定律，阻抗为

$$Z = \frac{U}{I} = \frac{U}{\sqrt{I_R^2 + I_L^2}} = \frac{U}{\sqrt{\left(\frac{U}{R}\right)^2 + \left(\frac{U}{X_L}\right)^2}}$$

$$= \frac{1}{\sqrt{\frac{1}{R^2} + \frac{1}{X_L^2}}}$$

$$= \frac{RX_L}{\sqrt{R^2 + X_L^2}}$$

例 2-42 在  $R$ 、 $L$  并联电路中， $R = 200\Omega$ ， $X_L = 350\Omega$ ， $U = 220\text{V}$ ，求  $I_R$ 、 $I_L$ 、 $I$ 、 $P$ ，并画出相量图。

$$I_R = \frac{U}{R} = \frac{220}{200} = 1.1\text{A}$$

$$I_L = \frac{U}{X_L} = \frac{220}{350} = 0.629\text{A}$$

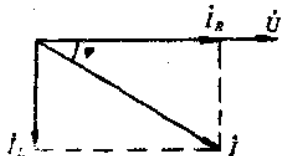


图 2-29 相量图

$$I = \sqrt{I_R^2 + I_L^2} = \sqrt{1.1^2 + 0.629^2}$$

$$= 1.27\text{A}$$

$$P = UI_R = 220 \times 1.1 = 242\text{W}$$

相量图如图 2-29 所示。

例 2-43 已知并联电路的一支路的电阻是  $30\Omega$ ，另一支路的电感性电抗是  $20\Omega$  的，若外加电压是  $220\text{V}$ ，求纯电阻内的电流，电感性电抗内的电流，线路电流，阻抗和功率因数。



$$I_R = \frac{U}{R} = \frac{220}{30} = 7.34\text{A}$$

$$I_L = \frac{U}{X_L} = \frac{220}{20} = 11\text{A}$$

$$Z = \frac{RX_L}{\sqrt{R^2 + X_L^2}} = \frac{30 \times 20}{\sqrt{30^2 + 20^2}}$$

$$= 16.6\Omega$$

$$I = \frac{U}{Z} = \frac{220}{16.6} = 13.2\text{A}$$

或

$$I = \sqrt{I_R^2 + I_L^2} = \sqrt{7.34^2 + 11^2}$$

$$= 13.2\text{A}$$

$$\cos\varphi = \frac{I_R}{I} = \frac{7.34}{13.2} = 0.556$$

### 八、电阻、电容并联电路

电路图和相量图分别如图2-30a、b所示。

电流和电压之间的关系为

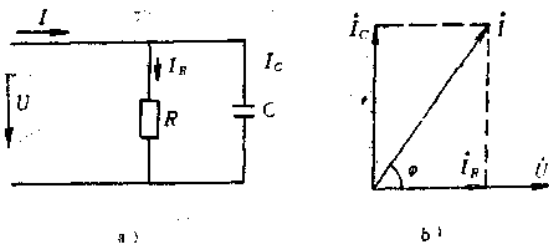


图2-30 电阻、电容并联电路及相量图

$$I_R = \frac{U}{R}$$

$$I_C = \frac{U}{X_C}$$

由  $I$ 、 $I_R$ 、 $I_C$  三者组成电流三角形, 如图 2-31 所示, 其中

$$I = \sqrt{I_R^2 + I_C^2}$$

$$\cos\varphi = \frac{I_R}{I} = \frac{I_R}{\sqrt{I_R^2 + I_C^2}}$$

$$P = I^2 R = UI \cos\varphi$$

根据欧姆定律, 阻抗为

$$Z = \frac{U}{I} = \frac{U}{\sqrt{I_R^2 + I_C^2}}$$

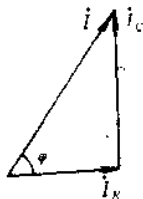


图2-31 电流三角形

$$\begin{aligned} &= \frac{U}{\sqrt{\left(\frac{U}{R}\right)^2 + \left(\frac{U}{X_C}\right)^2}} = \frac{1}{\sqrt{\frac{1}{R^2} + \frac{1}{X_C^2}}} \\ &= \frac{RX_C}{\sqrt{R^2 + X_C^2}} \end{aligned}$$

例2-44 在  $R$ 、 $C$  并联电路中,  $R = 25\Omega$ ,  $X_C = 15\Omega$ ,  $U = 220\text{V}$ , 求  $I_R$ 、 $I_C$ 、 $I$ 、 $P$ , 并画出相量图。

$$I_R = \frac{U}{R} = \frac{220}{25} = 8.8\text{A}$$

$$I_C = \frac{U}{X_C} = \frac{220}{15} = 14.7\text{A}$$

$$I = \sqrt{I_R^2 + I_C^2} = \sqrt{8.8^2 + 14.7^2} = 17.1\text{A}$$

$$P = UI_R = 220 \times 8.8 = 1936\text{W}$$

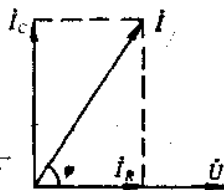


图2-32 相量图

相量图如图2-32所示。

例2-45 电阻  $R = 120\Omega$ , 容抗  $X_C = 100\Omega$ , 并联后接在  $220\text{V}$  的电源上, 求各支路的电流、总电流、阻抗和功率因数。

$$I_R = \frac{U}{R} = \frac{220}{120} = 1.83\text{A}$$

$$I_C = \frac{U}{X_C} = \frac{220}{100} = 2.2\text{A}$$

$$Z = \frac{RX_c}{\sqrt{R^2 + X_c^2}} = \frac{120 \times 100}{\sqrt{120^2 + 100^2}}$$

$$= 77\Omega$$

$$I = \frac{U}{Z} = \frac{220}{77} = 2.86\text{A}$$

或

$$I = \sqrt{I_R^2 + I_C^2} = \sqrt{1.83^2 + 2.2^2}$$

$$= 2.86\text{A}$$

$$\cos\varphi = \frac{I_R}{I} = \frac{1.83}{2.86} = 0.64$$

### 九、电阻、电感、电容并联电路

电路图和相量图分别如图2-33a、b所示。

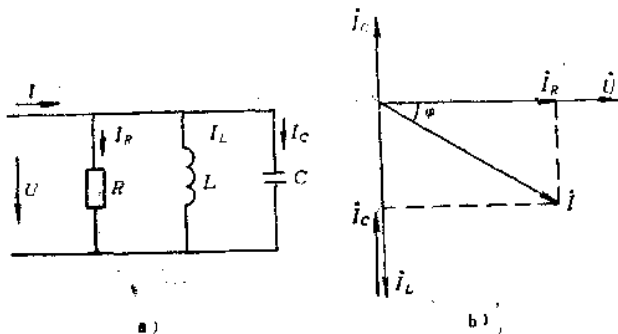


图2-33 电阻、电感、电容串联电路及相量图

电流三角形如图2-34所示，其中

示，其中

$$I = \sqrt{I_R^2 + (I_L - I_C)^2}$$

$$\cos\varphi = \frac{I_R}{I}$$

$$P = UI \cos\varphi = I^2 R$$

$$= UI \cos\varphi$$

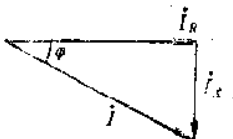


图 2-34 电流三角形

根据欧姆定律, 阻抗为

$$\begin{aligned} Z &= \frac{U}{I} = \frac{U}{\sqrt{I_R^2 + (I_L - I_C)^2}} \\ &= \frac{U}{\sqrt{\left(\frac{U}{R}\right)^2 + \left(\frac{U}{X_L} - \frac{U}{X_C}\right)^2}} \\ &= \frac{1}{\sqrt{\left(\frac{1}{R}\right)^2 + \left(\frac{1}{X_L} - \frac{1}{X_C}\right)^2}} \\ &= \frac{RX_L X_C}{\sqrt{X_L^2 X_C^2 + R^2 (X_L - X_C)^2}} \end{aligned}$$

$R$ 、 $L$ 、 $C$  并联电路一般有三种情况:

(1) 当  $X_L > X_C$  时,  $I$  超前  $U$ , 电路呈容性, 矢量图如图 2-33b 所示。

(2) 当  $X_L < X_C$  时,  $I$  滞后  $U$ , 电路呈感性, 如图 2-35b 所示。

(3) 当  $X_L = X_C$  时,  $I$  与  $U$  同相, 电路呈电阻性, 如图 2-35a 所示。

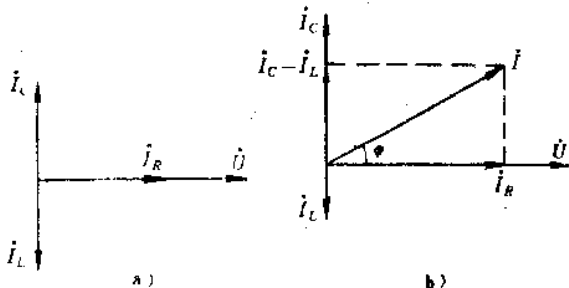


图 2-35 电阻与电感性负载的相量图

**例 2-46** 在  $R$ 、 $L$ 、 $C$  并联电路中, 已知  $R = 20\Omega$ ,  $X_L = 16\Omega$ ,  $X_C = 30\Omega$ ,  $U = 220V$ , 求各电流、总功率  $P$  和总功率因数,

绘出相量图。

$$I_R = \frac{U}{R} = \frac{220}{20} = 11\text{A}$$

$$I_L = \frac{U}{X_L} = \frac{220}{16} = 13.8\text{A}$$

$$I_C = \frac{U}{X_C} = \frac{220}{30} = 7.33\text{A}$$

$$\begin{aligned} I &= \sqrt{I_R^2 + (I_L - I_C)^2} \\ &= \sqrt{11^2 + (13.8 - 7.33)^2} \\ &= 12.7\text{A} \end{aligned}$$

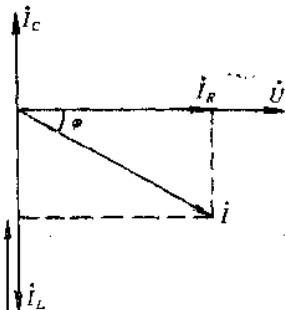
$$P = UI_R = 220 \times 11 = 2420\text{W}$$

$$S = UI = 220 \times 12.7 = 2800\text{VA}$$

$$\cos\varphi = \frac{P}{S} = \frac{2420}{2800} = 0.864$$

或

$$\cos\varphi = \frac{I_R}{I} = \frac{11}{12.7} = 0.864$$



相量图如图2-36所示。

图2-36 相量图

例2-47 在  $R$ 、 $L$ 、 $C$  并联电路中，已知  $P = 400\text{W}$ ， $U = 220\text{V}$ ， $I = 4\text{A}$ ， $C = 40\mu\text{F}$ ， $f = 50\text{Hz}$ ，求  $R$ 、 $L$  值。

$$R = \frac{U^2}{P} = \frac{220^2}{400} = 121\Omega$$

$$I_R = \frac{U}{R} = \frac{220}{121} = 1.82\text{A}$$

$$X_C = \frac{1}{2\pi fC} = \frac{1}{2 \times 3.14 \times 50 \times 40 \times 10^{-6}}$$

$$= 79.6\Omega$$

$$I_C = \frac{U}{X_C} = \frac{220}{79.6} = 2.76\text{A}$$

$$I = \sqrt{I_R^2 + (I_L - I_C)^2} = \sqrt{I_R^2 + I_{LC}^2}$$

$$I_{LC} = \sqrt{I^2 - I_R^2} = \sqrt{4^2 - 1.82^2} \\ = 3.56\text{A}$$

$$I_L = I_{LC} + I_C = 3.56 + 2.76 = 6.32\text{A}$$

$$X_L = \frac{U}{I_L} = \frac{220}{6.32} = 34.8\Omega$$

$$L = \frac{X_L}{2\pi f} = \frac{34.8}{2 \times 3.14 \times 50} = 0.111\text{H} \\ = 111\text{mH}$$

#### 十、电阻、电感串联与电容并联电路

电路图和相量图分别如图2-37a、b所示。

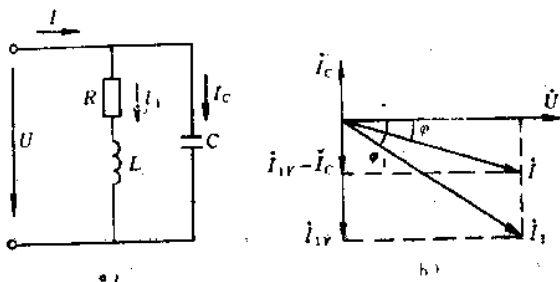


图2-37 电阻、电感串联与电容并联电路及相量图

电流与电压的关系为

$$I_1 = \frac{U}{\sqrt{R^2 + X_L^2}}$$

$$I_C = \frac{U}{X_C}$$

$$I = I_1 + I_C$$

$$\varphi_1 = \arccos \frac{R}{\sqrt{R^2 + X_L^2}}$$

$$I = \sqrt{(|I_{1Y}| - |I_C|)^2 + I_{1X}^2}$$

$$\varphi = \arctg \frac{|I_{1Y}| - |I_C|}{I_{1X}}$$

式中  $I_{1Y}$ ——线圈电流  $I_1$  在纵轴分量的绝对值；  
 $I_{1X}$ ——线圈电流  $I_1$  在横轴分量的绝对值；  
 $I_C$ ——流经电容的电流。

$$P = UI \cos \varphi = UI_1 \cos \varphi_1$$

$$Q = UI \sin \varphi$$

$$S = UI = \sqrt{P^2 + Q^2}$$

若已知有功功率  $P$ 、电源电压  $U$ 、频率  $f$  及并联电容前功率因数  $\cos \varphi_1$  和  $\cos \varphi$ ，经数学运算可求得并联电容的大小，即

$$C = \frac{P}{2\pi f U^2} (\operatorname{tg} \varphi_1 - \operatorname{tg} \varphi)$$

并联补偿电路可以提高功率因数，提高电源利用率。

电路有三种情况：

当  $|I_{1Y}| > |I_C|$  时  $I$  滞后  $U$ ，电路呈感性；

当  $|I_{1Y}| < |I_C|$  时  $I$  超前  $U$ ，电路呈容性；

当  $|I_{1Y}| = |I_C|$  时  $I$ 、 $U$  同相，电路是纯电阻性负载。

**例2-48** 电阻  $R = 20\Omega$  与感抗  $X_L = 15.7\Omega$  的线圈串联后，再与容抗  $X_C = 15.9\Omega$  的电容并联，求接在220V 的电源时的总电流，并计算各支路的功率因数和总的功率因数，绘出相量图。

在感抗支路中则有

$$Z_1 = \sqrt{R^2 + X_L^2} = \sqrt{20^2 + 15.7^2} = 25.4\Omega$$

$$I_1 = \frac{U}{Z_1} = \frac{220}{25.4} = 8.67\text{A}$$

$$\cos \varphi_1 = \frac{R}{Z_1} = \frac{20}{25.4} = 0.787$$

$$\varphi_1 = \arccos 0.787 = 38^\circ$$

在容抗支路中则有

$$I_2 = \frac{U}{X_C} = \frac{220}{15.9} = 13.8 \text{ A}$$

$$\cos \varphi_2 = \cos 90^\circ = 0$$

在合成电路中则有

$$\begin{aligned} I &= \sqrt{(I_1 \cos \varphi_1)^2 + (I_1 \sin \varphi_1 - I_2)^2} \\ &= \sqrt{(8.67 \cos 38^\circ)^2 + (8.67 \sin 38^\circ - 13.8)^2} \\ &= 10.9 \text{ A} \end{aligned}$$

$$\cos \varphi = \frac{I_1 \cos \varphi_1}{I} = \frac{8.67 \cos 38^\circ}{10.9} = 0.628$$

$$\varphi = \arccos 0.628 = 51^\circ$$

相量图如图2-38所示。

**例2-49** 当把一台  $P = 1.1 \text{ kW}$  的电动机，接在  $U = 220 \text{ V}$ 、 $f = 50 \text{ Hz}$  的电路中，所用的电流  $I = 10 \text{ A}$ ，求电动机的功率因数，若在电动机两端并联一只  $C = 80 \mu\text{F}$  的电容器，再求整个电路的功率因数。

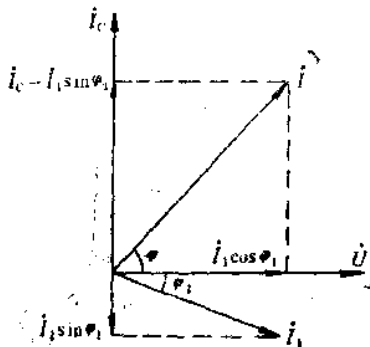


图2-38 相量图

电动机的功率因数为

$$\cos \varphi_1 = \frac{P}{S} = \frac{P}{IU} = \frac{1.1 \times 10^3}{10 \times 220} = 0.5$$

$$\varphi_1 = 60^\circ$$

$$\sin \varphi_1 = \sin 60^\circ = 0.866$$

电动机的无功电流为

$$I_{1V} = I_1 \sin \varphi_1 = 10 \times 0.866 = 8.66 \text{ A}$$

并联  $C = 80 \mu\text{F}$  电容后则有



$$X_C = \frac{1}{2\pi fC} = \frac{1}{2 \times 3.14 \times 50 \times 80 \times 10^{-6}} = 39.8 \Omega$$

$$I_C = \frac{U}{X_C} = \frac{220}{39.8} = 5.52 \text{ A}$$

$$\operatorname{tg} \varphi_2 = \frac{I_{1Y} - I_C}{I \cos \varphi_1} = \frac{8.66 - 5.52}{10 \times 0.5} = 0.628$$

$$\varphi_2 = 32.1^\circ$$

整个电路的功率因数为

$$\cos \varphi_2 = \cos 32.1^\circ = 0.847$$

例2-50 在电压为220V, 频率为50Hz的交流电路中, 接一台  $\cos \varphi = 0.7$ , 功率  $P = 5.5 \text{ kW}$  的电动机, 试计算把  $\cos \varphi$  提高到0.9时所需并联的电容。

当  $\cos \varphi_1 = 0.7$  时, 电动机取用的电流为

$$I_1 = \frac{P}{U \cos \varphi_1} = \frac{5.5 \times 10^3}{220 \times 0.7} = 35.7 \text{ A}$$

$$\varphi_1 = \arccos 0.7 = 45.6^\circ$$

$$\sin 45.6^\circ = 0.714$$

电动机的无功电流为

$$I_{1Y} = I_1 \sin \varphi_1 = 35.7 \times 0.714 = 25.5 \text{ A}$$

并联电容器后功率因数  $\cos \varphi_2 = 0.9$ , 则有

$$\varphi_2 = \arccos 0.9 = 26^\circ$$

$$\sin \varphi_2 = \sin 26^\circ = 0.436$$

此时电源供出的电流为

$$I_2 = \frac{P}{U \cos \varphi_2} = \frac{5.5 \times 10^3}{220 \times 0.9} = 27.8 \text{ A}$$

电流的无功分量为

$$I_{2Y} = I_2 \sin \varphi_2 = 27.8 \times 0.436 = 12.1 \text{ A}$$

流过电容器的电流为

$$I_C = I_{1Y} - I_{2Y} = 25.5 - 12.1 = 13.4 \text{ A}$$

电容器的容抗为

$$X_c = \frac{U}{I_c} = \frac{220}{13.4} = 16.4 \Omega$$

电容量为

$$C = \frac{1}{2\pi f X_c} = \frac{1}{2 \times 3.14 \times 50 \times 16.4} = 194 \times 10^{-6} \text{F}$$

$$= 194 \mu\text{F}$$

上面结果也可用公式法直接求得：

$$C = \frac{P}{\omega U^2} (\operatorname{tg} \varphi_1 - \operatorname{tg} \varphi)$$

$$= \frac{P}{2\pi f U^2} (\operatorname{tg} \varphi_1 - \operatorname{tg} \varphi)$$

$$= \frac{5.5 \times 10^3}{2 \times 3.14 \times 50 \times 220^2} (\operatorname{tg} 45.6^\circ - \operatorname{tg} 26^\circ)$$

$$= 193 \mu\text{F}$$

**例2-51** 有一只日光灯，其规格为220V, 40W,  $I = 0.66\text{A}$ ，为了提高电路的功率因数，把一只  $C = 4.75\mu\text{F}$  的电容器同它并联，分别求并联前后的功率因数。

并联电容前的功率因数为

$$\cos \varphi_1 = \frac{P}{S} = \frac{P}{UI_1} = \frac{40}{220 \times 0.66} = 0.28$$

$$\varphi_1 = \arccos 0.28 = 73.7^\circ$$

$$\sin \varphi_1 = \sin 73.7^\circ = 0.961$$

此时日光灯的无功电流为

$$I_{1Y} = I_1 \sin \varphi = 0.66 \times 0.961 = 0.63\text{A}$$

并联电容后的功率因数为

$$X_c = \frac{1}{2\pi f C} = \frac{1}{2 \times 3.14 \times 50 \times 4.75 \times 10^{-6}} = 670 \Omega$$

$$I_c = \frac{U}{X_c} = \frac{220}{670} = 0.33 \text{A}$$

$$\begin{aligned} \operatorname{tg} \varphi &= \frac{I_{1V} - I_C}{I_1 \cos \varphi_1} = \frac{0.63 - 0.33}{0.66 \times 0.28} = 1.62 \\ \varphi &= \arctg 1.62 = 58.3^\circ \\ \cos \varphi &= \cos 58.3^\circ = 0.525 \end{aligned}$$

上面结果也可用公式法求得:

$$\begin{aligned} C &= \frac{P}{\omega U^2} (\operatorname{tg} \varphi_1 - \operatorname{tg} \varphi) \\ \operatorname{tg} \varphi &= \operatorname{tg} \varphi_1 - \frac{C \omega U^2}{P} = \operatorname{tg} 73.7^\circ - \frac{C 2\pi f U^2}{P} \\ &= 3.43 - \frac{4.75 \times 10^{-6} \times 2 \times 3.14 \times 50 \times 220^2}{40} \\ &= 1.62 \\ \varphi &= \arctg 1.62 = 58.3^\circ \\ \cos \varphi &= \cos 58.3^\circ = 0.525 \end{aligned}$$

**例2-52** 已知某发电机的额定电压为220V, 视在功率为440kVA。若用该发电机向额定工作电压为220V, 有功功率为22kW, 功率因数为0.5的电动机供电, 能供多少负载使用, 若再把功率因数提高到1时, 又能供多少负载使用(设线路无损耗)。

因发电机的额定电流为

$$I_N = \frac{S}{U} = \frac{440 \times 10^3}{220} = 2000 \text{ A}$$

当  $\cos \varphi = 0.5$  时, 每个电动机的电流为

$$I = \frac{P}{U \cos \varphi} = \frac{22 \times 10^3}{220 \times 0.5} = 200 \text{ A}$$

发电机能供给的负载数为

$$\frac{I_N}{I} = \frac{2000}{200} = 10$$

当  $\cos \varphi = 1$  时, 每个电动机的电流为

$$I' = \frac{P}{U} = \frac{22 \times 10^3}{220} = 100 \text{ A}$$

发电机能供给的负载数为

$$\frac{I_N}{I'} = \frac{2000}{100} = 20$$

由此可见，把功率因数由0.5提高到1时，发电机供给的负载数由10个增加到20个，提高供电设备的利用率。

### 十一、电阻、电感、电容的混联电路

混联电路就是既有串联又有并联的电路，由于前面已介绍了各种串联和并联电路的计算，混联电路的计算，实际上就是串联和并联这两种计算方法的综合应用，下面举几个实例说明一般的计算方法。

例2-53 在图2-39所示的电路中，已知  $L = 20\text{H}$ 、 $R = 2000\Omega$ 、 $C = 30\mu\text{F}$ 、 $U = 220\text{V}$ 、 $f = 50\text{Hz}$ ，求通过电容器  $C$  的电流有效值  $I_C$  和电阻  $R$  两端的电压的有效值  $U_{ab}$ 。

$$\begin{aligned} X_C &= \frac{1}{2\pi fC} \\ &= \frac{1}{2 \times 3.14 \times 50 \times 30 \times 10^{-6}} \\ &\approx 106 \Omega \end{aligned}$$

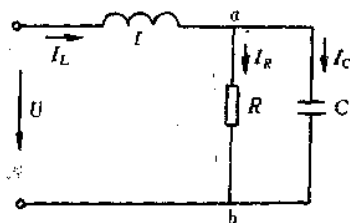


图2-39 电阻、电容并联  
与电感串联电路

因为  $R = 2000\Omega$ ，可见  $X_C < R$ ，在  $R$ 、 $C$  并联电路中， $R$  可以忽略，简化成  $L$ 、 $C$  串联电路，即

$$\begin{aligned} X_L &= 2\pi fL = 2 \times 3.14 \times 50 \times 20 = 6280\Omega \\ U_{ab} &= \frac{X_C}{X_L - X_C} U = \frac{106}{6280 - 106} \times 220 = 3.78 \text{ V} \end{aligned}$$

$$I_C = \frac{U_{ab}}{X_C} = \frac{3.78}{106} = 35.7 \text{ mA}$$

例2-54 两个负载连接到电压  $U = 220\text{V}$  的公共电网上，其中一个负载需要滞后的电流，而另一个负载需要超前的电流，求每一个负载中的电流及总电流、有功功率、无功功率、视在功率。假如负载电阻及阻抗是： $R_1 = 16\Omega$ 、 $X_{L1} = 12\Omega$ ， $R_2 = 6\Omega$ ， $X_{C2} = 8\Omega$ ，电路如图2-40所示。

第一个负载为

$$Z_1 = \sqrt{R_1^2 + X_{L1}^2} = \sqrt{16^2 + 12^2} = 20 \Omega$$

$$I_1 = \frac{U}{Z_1} = \frac{220}{20} = 11 \text{ A}$$

$$\cos \varphi_1 = \frac{R_1}{Z_1} = \frac{16}{20} = 0.8$$

$$\begin{aligned} P_1 &= UI_1 \cos \varphi_1 \\ &= 220 \times 11 \times 0.8 \\ &= 1940 \text{ W} \end{aligned}$$

$$\sin \varphi_1 = \frac{X_{L1}}{Z_1} = \frac{12}{20} = 0.6$$

$$Q_1 = UI_1 \sin \varphi_1 = 220 \times 11 \times 0.6 = 450 \text{ var}$$

$$S_1 = UI_1 = 220 \times 11 = 2420 \text{ VA}$$

第二个负载为

$$Z_2 = \sqrt{R_2^2 + X_{C2}^2} = \sqrt{6^2 + 8^2} = 10 \Omega$$

$$I_2 = \frac{U}{Z_2} = \frac{220}{10} = 22 \text{ A}$$

$$\cos \varphi_2 = \frac{R_2}{Z_2} = \frac{6}{10} = 0.6$$

$$P_2 = UI_2 \cos \varphi_2 = 220 \times 22 \times 0.6 = 2900 \text{ W}$$

$$\sin \varphi_2 = \frac{X_{C2}}{Z_2} = \frac{8}{10} = 0.8$$

$$Q_2 = UI_2 \sin \varphi_2 = 220 \times 22 \times 0.8 = 3870 \text{ var}$$

$$S_2 = UI_2 = 220 \times 22 = 4840 \text{ VA}$$

对电路的不分支部分则有

$$I = \sqrt{I_1^2 + I_2^2} = \sqrt{11^2 + 22^2} = 24.6 \text{ A}$$

$$\cos \varphi = \frac{I_2}{I} = \frac{22}{24.6} = 0.894$$

$$P = UI \cos \varphi = 220 \times 24.6 \times 0.894 = 4580 \text{ W}$$

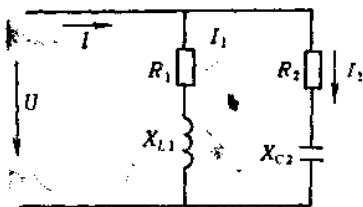


图2-40 二个负载连接电路

$$\sin\varphi = \frac{I_1}{I} = \frac{11}{24.6} = 0.447$$

$$C = UI\sin\varphi = 220 \times 24.6 \times 0.447 = 2420 \text{ var}$$

$$S = UI = 220 \times 24.6 = 5120 \text{ VA}$$

不难确信:

$$Q = Q_C - Q_L = 3870 - 1450 = 2420 \text{ var}$$

$$S \neq S_1 + S_2$$

**例2-55** 在图2-41中,  $U = 100\text{V}$ ,  $R_1 = 20\Omega$ ,  $R_2 = 6\Omega$ ,  $X_L = 8\Omega$ ,  $R_3 = 15\Omega$ ,  $X_C = 8\Omega$ , 求各部分通过的电流、线路电流的滞后角、线路电流、功率损耗、总阻抗。

各部分电流为

$$I_1 = \frac{U}{R_1} = \frac{100}{20} = 5 \text{ A}$$

$$I_2 = \frac{U}{\sqrt{R_2^2 + X_L^2}} = \frac{100}{\sqrt{6^2 + 8^2}} = 10 \text{ A}$$

$$I_3 = \frac{U}{\sqrt{R_3^2 + X_C^2}} = \frac{100}{\sqrt{15^2 + 8^2}} = 5.9 \text{ A}$$

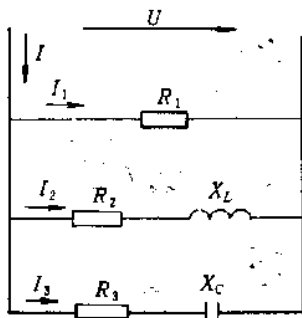


图2-41 三个负载连接电路

$$\cos\varphi_2 = \frac{R_2}{Z_2} = \frac{R_2}{\sqrt{R_2^2 + X_L^2}} = \frac{6}{\sqrt{6^2 + 8^2}} = 0.6$$

$$\varphi_2 = \arccos 0.6 = 53.1^\circ$$

$$\cos\varphi_3 = \frac{R_3}{Z_3} = \frac{R_3}{\sqrt{R_3^2 + X_C^2}} = \frac{15}{\sqrt{15^2 + 8^2}} = 0.882$$

$$\varphi_3 = \arccos 0.882 = 28^\circ$$

线路电流在水平方向的分量为

$$\begin{aligned} I' &= I_1 + I_2 \cos\varphi_2 + I_3 \cos\varphi_3 \\ &= 5 + 10 \times 0.6 + 5.9 \times 0.882 = 16.2 \text{ A} \end{aligned}$$

线路电流的滞后角为

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{I_2 \sin \varphi_2 - I_3 \sin \varphi_3}{I'} = \frac{10 \sin 53.1^\circ - 5.9 \sin 28^\circ}{16.2} = 0.317$$

$$\varphi = \arctg 0.317 = 17.6^\circ$$

线路电流由电流三角形得:

$$I = \frac{I'}{\cos \varphi} = \frac{16.2}{\cos 17.6^\circ} = 17.1 \text{ A}$$

功率损耗为

$$P = UI \cos \varphi = 100 \times 17.1 \times \cos 17.6^\circ = 1630 \text{ W}$$

或 
$$P = I_1^2 R_1 + I_2^2 R_2 + I_3^2 R_3 = 5^2 \times 20 + 10^2 \times 6 + 5.9^2 \times 15 = 1620 \text{ W}$$

总阻抗为

$$Z = \frac{U}{I} = \frac{100}{17.1} = 5.85 \Omega$$

相量图如2-42a、b所示。

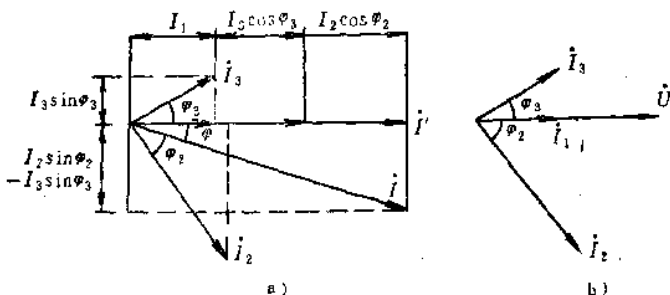


图2-42 相量图

例2-56 由电压有效值为200V, 频率为50Hz的正弦电压作为并联电路电源, 试确定供给电路的总电流, 并画出完整的矢量图。已知并联电路是由三条支路组成, 它们分别是:

- (1) 感抗为9.42Ω, 电阻为3Ω的线圈;
- (2) 容抗为7.96Ω的电容与电阻为100Ω的电阻串联;
- (3) 感抗为6.28Ω、电阻为7Ω的线圈与容抗为10.6Ω的电

容串联，如图2-43所示。

各支路的电流为

$$I_1 = \frac{U}{\sqrt{R_1^2 + X_{L1}^2}} = \frac{200}{\sqrt{3^2 + 9.42^2}} = 20.2 \text{ A}$$

$$I_2 = \frac{U}{\sqrt{R_1^2 + X_{C1}^2}} = \frac{200}{\sqrt{100^2 + 7.96^2}} = 1.99 \text{ A}$$

$$I_3 = \frac{U}{\sqrt{R_1^2 + (X_{L2} - X_{C2})^2}} = \frac{200}{\sqrt{7^2 + (6.28 - 10.6)^2}} = 24.3 \text{ A}$$

电流  $I_1$  滞后电压  $U$  的角度为

$$\text{tg}\varphi_1 = \frac{X_{L1}}{R} = \frac{9.42}{3} = 3.14$$

$$\varphi_1 = \arctg 3.14 = 72.3^\circ$$

电流  $I_2$  超前电压  $U$  的角度为

$$\text{tg}\varphi_2 = \frac{X_{C1}}{R_2} = \frac{7.96}{100} = 0.0796$$

$$\varphi_2 = \arctg 0.0796 = 4.6^\circ$$

电流  $I_3$  超前电压  $U$  的角度为

$$\text{tg}\varphi_3 = \frac{X_{C2} - X_{L2}}{R} = \frac{10.6 - 6.28}{7} = 0.617$$

$$\varphi_3 = \arctg 0.617 = 31.7^\circ$$

根据上面数据可画出完整的相量图，如图2-44所示。总相位角  $\varphi$ 、总电流  $I$  可用图解法求得，总电流  $I$  滞后电压  $U$ ，即

$$\varphi = 12.4^\circ$$

$$I = 29.5 \text{ A}$$

**例2-57** 两串联线圈 A 和 B 的电阻与感抗，如图2-45所示， $R_A = 5 \Omega$ ， $X_{LA} = 3.36 \Omega$ ， $R_B = 20 \Omega$ ， $X_{LB} = 157 \Omega$ ，通过两线圈的电流是  $100 \text{ A}$ ，求线圈 A 及线圈 B 的阻抗、两线圈的合成阻抗、两线圈的电压降、电流与线圈两端的电压间的相位角、电流与总电压间的相位差、两线圈消耗的功率。

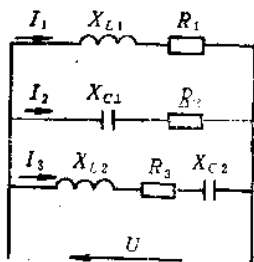


图2-43 三个负载连接电路



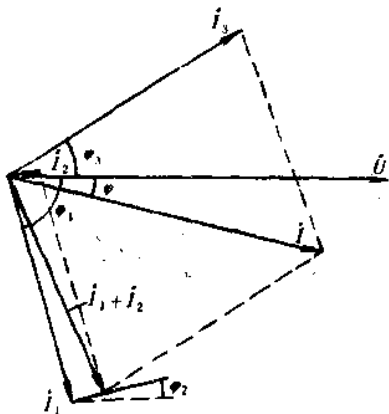


图2-44 相量图

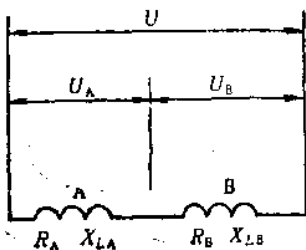


图2-45 两个线圈串联电路

$$\begin{aligned} Z_A &= \sqrt{R_A^2 + X_{L,A}^2} \\ &= \sqrt{5^2 + 3.36^2} \\ &= 6 \Omega \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} Z_B &= \sqrt{R_B^2 + X_{L,B}^2} \\ &= \sqrt{20^2 + 157^2} = 158 \Omega \end{aligned}$$

两线圈的合成阻抗，如图2-46a所示，其值为

$$Z_{AB} = \sqrt{(5+20)^2 + (3.36+157)^2} = 162 \Omega$$

两线圈的电压降，如图2-46b所示，其值为

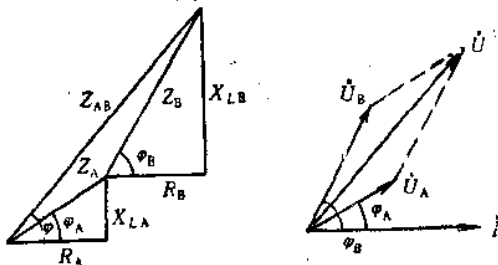


图2-46 两线圈的合成阻抗及电压降

$$U_A = I Z_A = 100 \times 6 = 600 \text{ V}$$

$$U_B = I Z_B = 100 \times 158 = 15800 \text{ V}$$

$$U = I Z_{AB} = 100 \times 162 = 16200 \text{ V}$$

电流与线圈两端的电压间的相位角为

$$\cos\varphi_A = \frac{R_A}{Z_A} = \frac{5}{6} = 0.833 \quad \varphi_A = 33.6^\circ$$

$$\cos\varphi_B = \frac{R_B}{Z_B} = \frac{20}{158} = 0.126 \quad \varphi_B = 82.7^\circ$$

电流与总电压间相位差为

$$\cos\varphi = \frac{R_{AB}}{Z_{AB}} = \frac{5+20}{162} = 0.154 \quad \varphi = 81.1^\circ$$

两线圈消耗的功率为

$$P_A = I^2 R_A = 100^2 \times 5 = 50000 \text{ W} = 50 \text{ kW}$$

$$P_B = I^2 R_B = 100^2 \times 20 = 200000 \text{ W} = 200 \text{ kW}$$

$$P_{AB} = I^2 R_{AB} = 100^2 \times (5+20) = 250000 \text{ W} = 250 \text{ kW}$$

例2-58 在单相三线制

电路中,如图2-47所示,若接有消耗功率为350W、功率因数为0.7的感性负载A和消耗功率为600W、功率因数为0.9的容性负载B,当中性线断线时,求此时加在各负载上的电压和消耗的功率。

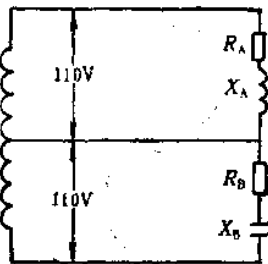


图2-47 单相三线电路

首先考虑正常时

$$I_A = \frac{P_A}{U_A \cos\varphi_A} = \frac{350}{110 \times 0.7} = 4.55 \text{ A}$$

$$Z_A = \frac{U_A}{I_A} = \frac{110}{4.55} = 24.2 \Omega$$

$$R_A = Z_A \cos\varphi_A = 24.2 \times 0.7 = 16.9 \Omega$$

$$X_A = Z_A \sin\varphi_A = 24.2 \sqrt{1-0.7^2} = 17.3$$

$$I_B = \frac{P_B}{U_B \cos\varphi_B} = \frac{600}{110 \times 0.9} = 6.06$$

$$Z_B = \frac{U_B}{I_B} = \frac{110}{6.06} = 18.2 \Omega$$

$$R_B = Z_B \cos \varphi_B = 18.2 \times 0.9 = 16.4 \Omega$$

$$X_B = Z_B \sin \varphi_B = 18.2 \sqrt{1 - 0.9^2} = 9.93 \Omega$$

当中性线断线时

$$R = R_A + R_B = 16.9 + 16.4 = 33.3 \Omega$$

$$X = X_A - X_B = 17.3 - 7.93 = 9.37 \Omega$$

$$Z = \sqrt{R^2 + X^2} = \sqrt{33.3^2 + 9.37^2} = 34.6 \Omega$$

$$I = \frac{U}{Z} = \frac{U_A + U_B}{Z} = \frac{110 + 110}{34.6} = 6.36 \text{ A}$$

$$U'_A = I Z_A = 6.36 \times 24.2 = 154 \text{ V}$$

$$U'_B = I Z_B = 6.36 \times 18.2 = 116 \text{ V}$$

$$P'_A = U'_A I \cos \varphi_A = I Z_A I \frac{R_A}{Z_A} = I^2 R_A = 6.36^2 \times 16.9 = 684 \text{ W}$$

$$P'_B = U'_B I \cos \varphi_B = I Z_B I \frac{R_B}{Z_B} = I^2 R_B = 6.36^2 \times 16.4 = 663 \text{ W}$$

$$\cos \varphi = \frac{R}{Z} = \frac{33.3}{34.6} = 0.962$$

例2-59 在图2-48中, 电压  $U = 150 \text{ V}$ , 串联连接着: 两个线圈、一个变阻器和电容器, 线圈的数据为  $R_1 = 3 \Omega$ 、 $X_{L1} = 5 \Omega$ 、 $R_2 = 6 \Omega$ 、 $X_{L2} = 2 \Omega$ , 变阻器电阻  $R_3 = 4 \Omega$ , 电容器容抗  $X_{C4} = 4 \Omega$ , 求回路中的电流, 变阻器和电容器上的电压, 整个电路及各段上所消耗的功率, 电路总的功率因数。

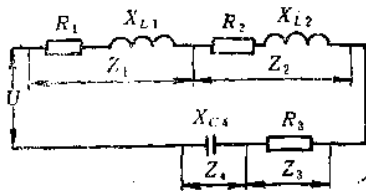


图2-48 两个线圈与电阻、电容串联电路

回路中的电流为

$$I = \frac{U}{Z} = \frac{150}{13.3} = 11.3 \text{ A}$$

$$\begin{aligned} Z &= \sqrt{(R_1 + R_2 + R_3)^2 + (X_{L1} + X_{L2} - X_{C4})^2} \\ &= \sqrt{(3 + 6 + 2)^2 + (5 + 2 - 4)^2} \\ &= 13.3 \Omega \end{aligned}$$

线圈、变阻器和电容器上的电压为

$$U_1 = I Z_1 = I \sqrt{R_1^2 + X_{L1}^2} = 11.3 \sqrt{3^2 + 5^2} = 65.9 \text{ V}$$

$$U_2 = I Z_2 = I \sqrt{R_2^2 + X_{L2}^2} = 11.3 \sqrt{6^2 + 2^2} = 71.5 \text{ V}$$

$$U_3 = I Z_3 = I R_3 = 11.3 \times 4 = 45.2 \text{ V}$$

$$U_4 = I Z_4 = I X_{C4} = 11.3 \times 4 = 45.2 \text{ V}$$

整个电路及各段上所消耗的功率为

$$P_1 = I^2 R_1 = 11.3^2 \times 3 = 383 \text{ W}$$

$$P_2 = I^2 R_2 = 11.3^2 \times 6 = 766 \text{ W}$$

$$P_3 = I^2 R_3 = 11.3^2 \times 4 = 511 \text{ W}$$

$$P = I^2 R = P_1 + P_2 + P_3 = 383 + 766 + 511 = 1660 \text{ W}$$

$$Q_1 = I^2 X_{L1} = 11.3^2 \times 5 = 638 \text{ var}$$

$$Q_2 = I^2 X_{L2} = 11.3^2 \times 2 = 255 \text{ var}$$

$$Q_4 = I^2 X_{C4} = 11.3^2 \times 4 = 510 \text{ var}$$

$$Q = I^2 X = Q_1 + Q_2 - Q_4 = 638 + 255 - 510 = 383 \text{ var}$$

电路总的功率因数为

$$\cos \varphi = \frac{R}{Z} = \frac{3 + 6 + 4}{13.3} = 0.977$$

$$\sin \varphi = \frac{X}{Z} = \frac{5 + 2 - 4}{13.3} = 0.226$$

检验:

$$R = UI \cos \varphi = 150 \times 11.3 \times 0.977 = 1660 \text{ W}$$

$$Q = UI \sin \varphi = 150 \times 11.3 \times 0.226 = 383 \text{ var}$$

### 第三节 三相交流电路计算

三相电路是目前电力系统主要的供电方式，它是由三组相位不同的电源和三组负载共同组成的电路系统，应用极为广泛。

三相正弦交流电路是具有特殊形式的正弦交流电路，所以正弦交流电路的概念与计算方法完全适用于三相电路。

如果每相负载电阻相等，电抗也相等而且性质相同，即  $R_{u1} = R_{v1} = R_{w1}$ ， $X_{u1} = X_{v1} = X_{w1}$ ，于是  $Z_{u1} = Z_{v1} = Z_{w1}$ ，这种负载称为三相对称负载，否则称为三相不对称负载。

#### 一、常用术语

##### 1. 端线

连接电源和负载各相端点的导线。

##### 2. 中点

三相电源中三个绕组末端或前端的连接点称为三相电源中点。三相负载星形联结点称为负载的中点。

##### 3. 中线

连接电源中点和负载中点的导线。

##### 4. 线电压

端线之间的电压。

##### 5. 相电压

每相绕组或每相负载上的电压。

##### 6. 线电流

流过端线的电流。

##### 7. 相电流

流过每相绕组或各相负载的电流。

#### 二、负载的星形联结

把三相负载分别接在三相电源的每一根端线和中线之间的联结，叫做三相负载的星形联结，如图2-49所示。

##### 1. 三相不对称负载的星形联结

各相负载的电流为

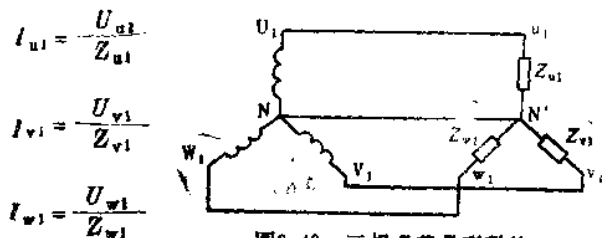


图2-49 三相负载星形联结

中线电流的有效值等于三个相电流有效值的矢量和，即

$$\dot{I}_N = \dot{I}_{u1} + \dot{I}_{v1} + \dot{I}_{w1}$$

三相负载作星形联结并有中线时，其特点是各相负载所承受的电压为对称的电源相电压，线电流等于相电流。

### 2. 三相对称负载的星形联结

线电压与相电压的相量图，如图2-50所示，电流相量图如图2-51所示。

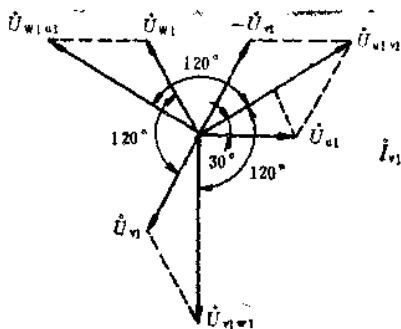


图2-50 线电压与相电压相量图

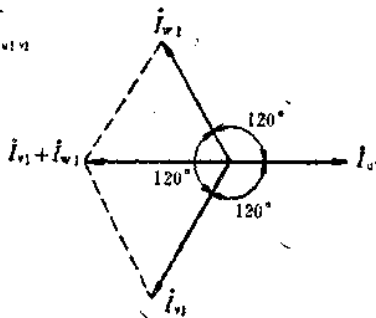


图2-51 电流相量图

$$U_{\text{线}} = \sqrt{3} U_{\text{相}}$$

$$I_{\text{线}} = I_{\text{相}}$$

负载作星形联结时，线电压等于相电压的 $\sqrt{3}$ 倍，线电流等于相电流。

三相负载的功率为

$$P = \sqrt{3} U_{\text{线}} I_{\text{线}} \cos \varphi$$

$$Q = \sqrt{3} U_{\text{线}} I_{\text{线}} \sin \varphi$$

$$S = \sqrt{3} U_{\text{线}} I_{\text{线}} = \sqrt{P^2 + Q^2}$$

例2-60 在图2-52中的三相四线制供电线路中, 已知  $U_{\text{线}} = 380\text{V}$ ,  $R = 11\Omega$ , 求负载两端的相电压、相电流和线电流。

负载两端的相电压为

$$U_{\text{相}} = \frac{U_{\text{线}}}{\sqrt{3}} = \frac{380}{\sqrt{3}} = 220\text{V}$$

相电流和线电流为

$$I_{\text{线}} = I_{\text{相}} = \frac{U_{\text{相}}}{R} = \frac{220}{11} = 20\text{A}$$

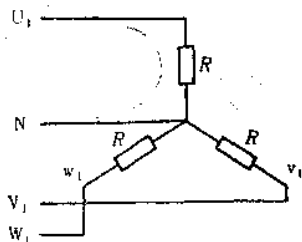


图2-52 三相四线制供电线路

例2-61 有一台星形联结的发电机, 相电压的最大值为  $310\text{V}$ , 求它的相电压和线电压的有效值各为多少。

$$U_{\text{相}} = \frac{U_m}{\sqrt{2}} = \frac{310}{\sqrt{2}} = 220\text{V}$$

$$U_{\text{线}} = \sqrt{3} U_{\text{相}} = \sqrt{3} \times 220 = 380\text{V}$$

例2-62 在星形负载的三相对称电路中, 负载阻抗  $R = 8\Omega$ ,  $X_L = 6\Omega$ 、线电压  $U_{\text{线}} = 380\text{V}$ , 求负载的相电流  $I_{\text{相}}$ 。

$$U_{\text{相}} = \frac{U_{\text{线}}}{\sqrt{3}} = \frac{380}{\sqrt{3}} = 220\text{V}$$

$$Z = \sqrt{R^2 + X_L^2} = \sqrt{8^2 + 6^2} = 10\Omega$$

$$I_{\text{相}} = \frac{U_{\text{相}}}{Z} = \frac{220}{10} = 22\text{A}$$

例2-63 在三相四线制供电线路中, 如果线电压为  $380\text{V}$ , 负载电阻为  $44\Omega$ , 求: (1) 负载两端的相电压、相电流和线电流; (2) 当中线断开时, 负载两端的相电压、相电流和线电流; (3) 当中线断开而  $V_1$  相短路时, 负载两端的相电压和相电流各为多少。

$$(1) \quad U_{\text{相}} = \frac{U_{\text{线}}}{\sqrt{3}} = \frac{380}{\sqrt{3}} = 220 \text{ V}$$

$$I_{\text{线}} = I_{\text{相}} = \frac{U_{\text{相}}}{R} = \frac{220}{44} = 5 \text{ A}$$

(2) 当中线断开时, 由于此电路是星形联结, 且负载对称, 所以负载两端的相电压、相电流和线电流同(1)。

(3) 当中线断开而  $V_1$  相短路时则有

$$U_{\text{相}} = 380 \text{ V}$$

$$I_{\text{相}} = \frac{U_{\text{相}}}{R} = \frac{380}{44} = 8.64 \text{ A}$$

例2-64 在三相三线制供电线路中, 线电压为380V星形联结的三只电灯, 若每只电灯的电阻为400Ω, 计算: (1)电灯两端的电压和电流; (2)如果  $u_1$  相熔断器发生了断路, 其他各电灯两端的电压和电流; (3)如果  $u_1$  相发生了短路时(熔断器并没有烧断)各电灯两端的电压和电流。

(1) 电灯两端的电压和电流为

$$U_{\text{相}} = \frac{U_{\text{线}}}{\sqrt{3}} = \frac{380}{\sqrt{3}} = 220 \text{ V}$$

$$I_{\text{相}} = \frac{U_{\text{相}}}{R} = \frac{220}{400} = 0.55 \text{ A}$$

(2) 当  $u_1$  相发生了断路时则有

$$U_{v_1} = U_{w_1} = \frac{U_{\text{线}}}{2} = \frac{380}{2} = 190 \text{ V}$$

$$I_{v_1} = I_{w_1} = \frac{U_{\text{线}}}{2R} = \frac{380}{2 \times 400} = 0.475 \text{ A}$$

(3) 当  $u_1$  相发生短路时(熔断器未烧断)则有

$$U_{v_1} = U_{w_1} = U_{\text{线}} = 380 \text{ V}$$

$$I_{v_1} = I_{w_1} = \frac{380}{400} = 0.95 \text{ A}$$



例2-65 三个电阻  $R_{u1} = 20\Omega$ ,  $R_{v1} = 10\Omega$ ,  $R_{w1} = 15\Omega$ , 以星形联结接到相电压  $U_{\text{相}} = 220\text{V}$  的三相四线制的电网上, 试求: (1) 线电压  $U_{\text{线}}$ ; (2) 线电流  $I_{u1}$ 、 $I_{v1}$ 、 $I_{w1}$ ; (3) 三相系统的有功功率  $P$ ; (4) 中线电流  $I_N$ 。

(1) 线电压为

$$U_{\text{线}} = \sqrt{3} U_{\text{相}} = \sqrt{3} \times 220 = 380\text{V}$$

(2) 线电流为

$$I_{u1} = \frac{U_{\text{相}}}{R_{u1}} = \frac{220}{20} = 11\text{A}$$

$$I_{v1} = \frac{U_{\text{相}}}{R_{v1}} = \frac{220}{10} = 22\text{A}$$

$$I_{w1} = \frac{U_{\text{相}}}{R_{w1}} = \frac{220}{15} = 14.7\text{A}$$

(3) 三相的有功功率为

$$P_{u1} = U_{\text{相}} I_{u1} = 220 \times 11 = 2420\text{W}$$

$$P_{v1} = U_{\text{相}} I_{v1} = 220 \times 22 = 4840\text{W}$$

$$P_{w1} = U_{\text{相}} I_{w1} = 220 \times 14.7 = 3230\text{W}$$

$$P = P_{u1} + P_{v1} + P_{w1} = 2420 + 4840 + 3230 \\ = 10500\text{W} = 10.5\text{kW}$$

(4) 中线电流利用相量图确定, 如图2-53所示, 即

$$I_N = 10.5\text{A}$$

例2-66 有一台三相异步电动机, 每相的等效电阻  $R = 30\Omega$ , 等效感抗  $X_L = 20\Omega$ , 绕组联结成星形, 接到线电压  $U_{\text{线}} = 380\text{V}$  的三相电源上, 求电动机所消耗的功率。

由于负载是星形联结则有

$$U_{\text{相}} = \frac{U_{\text{线}}}{\sqrt{3}} = \frac{380}{\sqrt{3}} = 220\text{V}$$

每相负载阻抗为

$$Z = \sqrt{R^2 + X_L^2} = \sqrt{30^2 + 20^2} = 36.1\Omega$$

相电流为

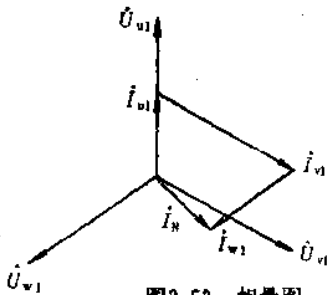


图2-53 相量图

$$I_{\text{相}} = \frac{U_{\text{相}}}{Z} = \frac{220}{36.1} = 6.09 \text{ A}$$

功率因数为

$$\cos\varphi = \frac{R}{Z} = \frac{30}{36.1} = 0.831$$

电动机消耗的功率为

$$\begin{aligned} P &= 3U_{\text{相}}I_{\text{相}}\cos\varphi = 3 \times 220 \times 6.09 \times 0.831 \\ &= 3340 \text{ W} = 3.34 \text{ kW} \end{aligned}$$

或

$$\begin{aligned} P &= \sqrt{3} U_{\text{线}} I_{\text{线}} \cos\varphi = \sqrt{3} \times 380 \times 6.09 \times 0.831 \\ &= 3330 \text{ W} = 3.33 \text{ kW} \end{aligned}$$

**例2-67** 有一台星形联结的三相异步电动机，从配电盘上电压表读出线电压为380V，线电流为9A，从铭牌上知道功率为4.5kW，求电动机每相绕组的参数。

三相电动机的功率因数为

$$\cos\varphi = \frac{P}{\sqrt{3} U_{\text{线}} I_{\text{线}}} = \frac{4.5 \times 10^3}{\sqrt{3} \times 380 \times 9} = 0.76$$

每相电压为

$$U_{\text{相}} = \frac{U_{\text{线}}}{\sqrt{3}} = \frac{380}{\sqrt{3}} = 220 \text{ V}$$

每相电流为

$$I_{\text{相}} = I_{\text{线}} = 9 \text{ A}$$

每相负载阻抗为

$$Z_{\text{相}} = \frac{U_{\text{相}}}{I_{\text{相}}} = \frac{220}{9} = 24.4 \Omega$$

根据阻抗三角形关系，求出电动机每相绕组的电阻及感抗，  
 即

$$\begin{aligned} R &= Z \cos\varphi = 24.4 \times 0.76 = 18.5 \Omega \\ X_L &= \sqrt{Z^2 - R^2} = \sqrt{24.4^2 - 18.5^2} = 15.9 \Omega \end{aligned}$$

### 三、负载的三角形联结

把三相负载分别接在三相电源的每两根端线之间，叫做三相

负载的三角形联结,如图2-54所示。

1.三相不对称负载的三角形联结

各相负载的电流为

$$I_{u1v1} = \frac{U_{u1v1}}{Z_{u1}}$$

$$I_{v1w1} = \frac{U_{v1w1}}{Z_{v1}}$$

$$I_{w1} = \frac{U_{w1u1}}{Z_{w1}}$$

线电流等于同它相连的两相负载中相电流的矢量差,即

$$\dot{I}_{U1} = \dot{I}_{u1v1} - \dot{I}_{w1u1}$$

$$\dot{I}_{V1} = \dot{I}_{v1w1} - \dot{I}_{u1v1}$$

$$\dot{I}_{W1} = \dot{I}_{w1u1} - \dot{I}_{v1w1}$$

2.三相对称负载的三角形联结

电流相量图如图2-55所示

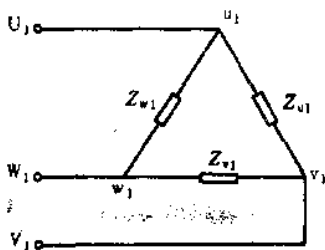


图2-54 三相负载三角形联结

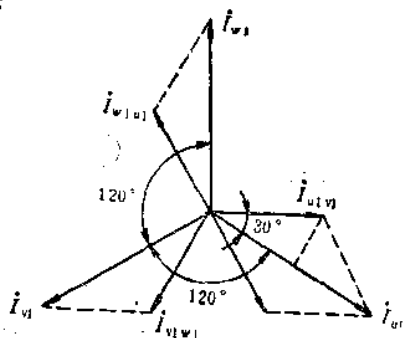


图2-55 电流相量图

$$I_{\text{线}} = \sqrt{3} I_{\text{相}}$$

$$U_{\text{线}} = U_{\text{相}}$$

负载作三角形联结时,线电流等于相电流的 $\sqrt{3}$ 倍,线电压等于相电压。

三相负载的功率为

$$P = \sqrt{3} U_{\text{线}} I_{\text{线}} \cos \varphi$$

$$Q = \sqrt{3} U_{\text{线}} I_{\text{线}} \sin \varphi$$

$$S = \sqrt{3} U_{\text{线}} I_{\text{线}} = \sqrt{P^2 + Q^2}$$

**例2-68** 线电压为380V，在三相供电线路上连接的负载是三角形联结的三只电灯，每只电灯的电阻是242Ω，试计算：（1）电灯中通过的电流；（2）供电线路中通过的电流；（3）如果U相熔断器发生了断路，各相电灯两端的电压和电流。

（1）电灯中通过的电流为

$$I_{\text{相}} = \frac{U_{\text{线}}}{R_{\text{z}}} = \frac{380}{242} = 1.57 \text{ A}$$

（2）供电线路中通过的电流为

$$I_{\text{线}} = \sqrt{3} I_{\text{相}} = \sqrt{3} \times 1.57 = 2.72 \text{ A}$$

（3）当U相熔断器断路时则有

$$U_{v1w1} = U_{\text{线}} = 380 \text{ V}$$

$$I_{v1w1} = \frac{U_{\text{线}}}{R} = \frac{380}{242} = 1.57 \text{ A}$$

$$U_{v1w1} = U_{u1w1} = \frac{U_{\text{线}}}{2} = \frac{380}{2} = 190 \text{ V}$$

$$I_{v1w1} = I_{u1w1} = \frac{U_{\text{线}}}{2R} = \frac{380}{2 \times 242} = 0.785 \text{ A}$$

其结果是  $u_1$  相、 $w_1$  相上的两只电灯因电压过低而不太亮，而  $v_1$  相上的那只电灯因电压太高很快烧坏。

**例2-69** 一台三相异步电动机作三角形联结，每相的电阻为15Ω，感抗为8Ω，接在线电压为380V，频率为50Hz的三相电源上，当一相断开时，流过每相负载的电流是多少。

当电动机的  $u_1$  相线圈断开时

$$I_{u1} = 0$$

$$I_{v1} = I_{w1} = \frac{U_{\text{线}}}{\sqrt{R^2 + X_L^2}} = \frac{380}{\sqrt{15^2 + 8^2}} = 22.4 \text{ A}$$

当电源线路U相断开时

$$I_{v1} = \frac{U_{v1w1}}{Z_{v1}} = \frac{380}{\sqrt{15^2 + 8^2}} = 22.4 \text{ A}$$

$$I_{u1} = I_{w1} = \frac{U_{v1w1}}{Z_{u1} + Z_{w1}} = \frac{380}{2\sqrt{15^2 + 8^2}} = 11.2 \text{ A}$$

例2-70 一台三相异步电动机接成三角形，功率为 3 kW，线电压为 380V，功率因数为 0.9，求线电流和相电流。

$$S = \frac{P}{\cos\varphi} = \frac{3 \times 10^3}{0.9} = 3700 \text{ VA}$$

$$I_{\text{线}} = \frac{S}{\sqrt{3} U_{\text{线}}} = \frac{3700}{\sqrt{3} \times 380} = 5.62 \text{ A}$$

$$I_{\text{相}} = \frac{I_{\text{线}}}{\sqrt{3}} = \frac{5.62}{\sqrt{3}} = 3.24 \text{ A}$$

例2-71 三相对称的电感性负载的三角形联结电路，如图2-56a所示。若  $R = 3 \Omega$ ， $X_L = 4 \Omega$ ， $U = 380\text{V}$ ，试分析电路在正常情况下和一相断线时的电流、功率和功率因数的变化。

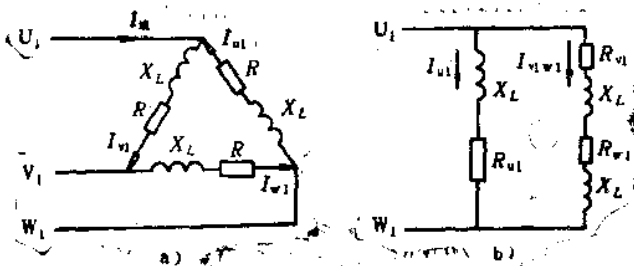


图2-56 三相对称电感性负载的三角形联结

(1) 正常情况下

$$Z = \sqrt{R^2 + X_L^2} = \sqrt{3^2 + 4^2} = 5 \Omega$$

$$I = \frac{U}{Z} = \frac{380}{5} = 76 \text{ A}$$

$$I_{\text{线}} = \sqrt{3} I = \sqrt{3} \times 76 = 132 \text{ A}$$

$$P_{u1} = I^2 R = 76^2 \times 3 = 17300 \text{ W}$$

$$P = 3P_{u1} = 3 \times 17300 = 51900 \text{ W}$$

$$\cos \varphi = \frac{R}{Z} = \frac{3}{5} = 0.6$$

或  $P = \sqrt{3} UI \cos \varphi = \sqrt{3} \times 380 \times 132 \times 0.6 \approx 51900 \text{ W}$

(2) 一相断线时, 如图2-56b所示, 假如V相断线, 则有

$$Z_{u1} = \sqrt{R^2 + X_L^2} = \sqrt{3^2 + 4^2} = 5 \Omega$$

$$I_{u1} = \frac{U}{Z_{u1}} = \frac{380}{5} = 76 \text{ A}$$

$$P_{u1} = I_{u1}^2 R = 76^2 \times 3 = 17300 \text{ W}$$

$$Z_{v1w1} = \sqrt{(R+R)^2 + (X_L + X_L)^2} = \sqrt{(3+3)^2 + (4+4)^2} = 10 \Omega$$

$$I_{v1w1} = \frac{U}{Z_{v1w1}} = \frac{380}{10} = 38 \text{ A}$$

$$P_{v1w1} = I_{v1w1}^2 R_{v1w1} = 38^2 \times (3+3) = 8660 \text{ W}$$

$$P = P_{u1} + P_{v1w1} = 17300 + 8660 = 26000 \text{ W}$$

$$\cos \varphi_U = \frac{R}{Z_{u1}} = \frac{3}{5} = 0.6$$

$$\cos \varphi_{v1w1} = \frac{R+R}{Z_{v1w1}} = \frac{3+3}{10} = 0.6$$

$$\varphi_{u1} = \varphi_{v1w1}$$

$$I = I_{u1} + I_{v1w1} = 76 + 38 = 114 \text{ A}$$

$$P = UI \cos \varphi = 380 \times 114 \times 0.6 = 26000 \text{ W}$$

例2-72 将6个相等的电阻  $R = 10 \Omega$ , 接成如图2-57所示, 当三相电源电压为380V时, 求整个电路消耗的功率。

先把星形联结的电阻换算成三角形联结。

$$R_{\Delta} = 3R = 3 \times 10 = 30 \Omega$$

$$P = 3 \frac{U^2}{R_{\Delta}} + 3 \frac{U^2}{R} = 3 \times \frac{380^2}{30} + 3 \times \frac{380^2}{10}$$

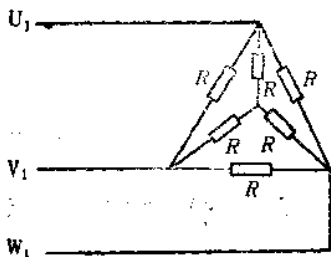


图2-37 6个相等电阻联结  
= 57.8 kW

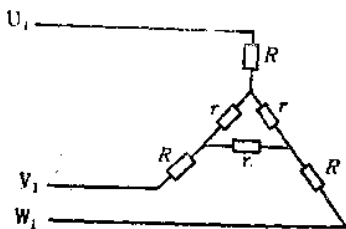


图2-58 6个电阻联结

**例2-73** 把三个相等的电阻  $R = 20\Omega$  和另外三个相等的电阻  $r = 30\Omega$ , 接成如图2-58所示的形式。当三相电源电压为380V时, 问流经电阻  $r$  的电流是多少。

先把三角形联结的电阻  $r$  换算成星形联结, 则有

$$r_Y = \frac{1}{3} r = \frac{30}{3} = 10\Omega$$

一相的等效电阻为

$$R' = R + r_Y = 20 + 10 = 30\Omega$$

$$I_{\text{线}} = \frac{380/\sqrt{3}}{30} = 7.32\text{ A}$$

$$I_r = \frac{I_{\text{线}}}{\sqrt{3}} = \frac{7.32}{\sqrt{3}} = 4.23\text{ A}$$

**例2-74** 有一台三相加热器的每相电阻为  $11\Omega$ , 若电源电压为380V, 求: (1) 加热器接成星形时的线电压、相电压、相电流、线电流; (2) 加热器接成三角形时的线电压、相电压、相电流、线电流; (3) 加热器接成星形与三角形时, 两者消耗功率的关系。

(1) Y联结时

$$U_{\text{线}} = 380\text{ V}$$

$$U_{\text{相}} = \frac{U_{\text{线}}}{\sqrt{3}} = \frac{380}{\sqrt{3}} = 220 \text{ V}$$

$$I_{\text{相}} = I_{\text{线}} = \frac{U_{\text{相}}}{R} = \frac{220}{11} = 20 \text{ A}$$

(2)  $\Delta$ 联结时

$$U_{\text{线}} = U_{\text{相}} = 380 \text{ V}$$

$$I_{\text{相}} = \frac{U_{\text{相}}}{R} = \frac{380}{11} = 34.5 \text{ A}$$

$$I_{\text{线}} = \sqrt{3} I_{\text{相}} = \sqrt{3} \times 34.5 = 59.7 \text{ A}$$

(3)  $\Upsilon$ 与 $\Delta$ 联结时两者消耗功率的关系

$$P_{\Upsilon} = \sqrt{3} U_{\text{线}} I_{\text{线}} \cos\varphi = \sqrt{3} \times 380 \times 20 \times 1 = 13.1 \text{ kW}$$

$$P_{\Delta} = \sqrt{3} U_{\text{线}} I_{\text{线}} \cos\varphi = \sqrt{3} \times 380 \times 59.7 \times 1 = 39.2 \text{ kW}$$

$$\frac{P_{\Delta}}{P_{\Upsilon}} = \frac{39.2}{13.1} = 3$$

**例2-75** 有一个三相对称电感性负载接在线电压为380V的三相电源上,其中 $R_{\text{相}} = 3 \Omega$ , $X_{\text{相}} = 4 \Omega$ ,试分别计算负载作星形联结和三角形联结时的相电流、线电流及有功功率,并作以比较。

(1) 负载作 $\Upsilon$ 形联结时

$$Z_{\Upsilon\text{相}} = \sqrt{R_{\text{相}}^2 + X_{\text{相}}^2} = \sqrt{3^2 + 4^2} = 5 \Omega$$

$$U_{\Upsilon\text{相}} = \frac{U_{\text{线}}}{\sqrt{3}} = \frac{380}{\sqrt{3}} = 220 \text{ V}$$

$$I_{\Upsilon\text{相}} = I_{\Upsilon\text{线}} = \frac{U_{\Upsilon\text{相}}}{Z_{\Upsilon\text{相}}} = \frac{220}{5} = 44 \text{ A}$$

$$\cos\varphi = \frac{R_{\text{相}}}{Z_{\text{相}}} = \frac{3}{5} = 0.6$$

$$P_{\Upsilon} = \sqrt{3} U_{\text{线}} I_{\text{线}} \cos\varphi = \sqrt{3} \times 380 \times 44 \times 0.6 = 17.4 \text{ kW}$$



(2) 负载作△形联结时

$$U_{\Delta\text{相}} = U_{\Delta\text{线}} = 380\text{V}$$

$$I_{\Delta\text{相}} = \frac{U_{\Delta\text{线}}}{Z_{\text{相}}} = \frac{380}{5} = 76\text{A}$$

$$I_{\Delta\text{线}} = \sqrt{3} I_{\Delta\text{相}} = \sqrt{3} \times 76 = 131\text{A}$$

$$P_{\Delta} = \sqrt{3} U_{\text{线}} I_{\text{线}} \cos\varphi = \sqrt{3} \times 380 \times 131 \times 0.6 = 51.7\text{kW}$$

(3) 两种联结的比较

$$\frac{I_{\Delta\text{相}}}{I_{Y\text{相}}} = \frac{76}{44} = \sqrt{3}$$

$$\frac{I_{\Delta\text{线}}}{I_{Y\text{线}}} = \frac{131}{44} = 3$$

$$\frac{P_{\Delta}}{P_{Y}} = \frac{51.7}{17.4} = 3$$

所以负载作△形联结时的相电流为作Y形联结时相电流的 $\sqrt{3}$ 倍；负载作△形联结时的线电流为作Y形联结时线电流的3倍；负载作△形联结时的功率为作Y形联结时的功率的3倍。

#### 第四节 交流电路谐振计算

##### 一、串联谐振

在R—L—C串联电路中，电路两端电压和电流同相位的现象，称为串联谐振，也称为电压谐振。

##### 1. 谐振条件

$$X_L = X_C$$

即 
$$2\pi fL = \frac{1}{2\pi fC} \quad \text{或} \quad \omega L = \frac{1}{\omega C}$$

##### 2. 谐振频率

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad \text{或} \quad \omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}$$

## 3. 谐振电路特点

(1) 阻抗最小, 且呈电阻性, 即

$$Z_0 = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2} = R$$

(2) 电路中的电流最大并与电压同相, 即

$$I_0 = \frac{U}{R}$$

(3) 电感与电容两端的电压相等、相位相反, 其数值是电源电压的  $Q$  倍, 即

$$U_L = U_C = I_0 X_L = \frac{X_L}{R} U = \frac{X_C}{R} U = QU$$

$$Q = \frac{X_L}{R} = \frac{X_C}{R} = \frac{2\pi f_0 L}{R} = \frac{1}{2\pi f_0 C}$$

式中  $Q$ ——品质因数。

(4) 通带宽度

$$2\Delta f = \frac{f_0}{Q}$$

例2-76 有一电阻、电感和电容串联谐振电路, 如图2-59所示。若  $R = 20\Omega$ ,  $L = 0.13\text{mH}$ ,  $C = 558\text{pF}$ , 外加电压  $U = 10\text{mV}$ , 试求电路在谐振时的电流、品质因数及电感和电容上的电压。

谐振电流为

$$I_0 = \frac{U}{R} = \frac{10 \times 10^{-3}}{20} = 0.5 \times 10^{-3} \text{A} = 0.5 \text{mA}$$

品质因数为

$$Q = \frac{2\pi f_0 L}{R} = \sqrt{\frac{L}{C}} = \sqrt{\frac{0.13 \times 10^{-3}}{558 \times 10^{-12}}} = 24$$

电感和电容两端的电压为

$$U_L = U_C = QU = 24 \times 10 = 240 \text{mV}$$

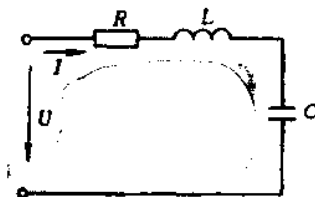


图2-59 电阻、电感、电容串联谐振电路

例2-77 在  $R-L-C$  串联谐振电路中, 已知谐振频率  $f_0 = 600\text{kHz}$ , 通常宽度  $2\Delta f = 8\text{kHz}$ ,  $C = 2500\text{pF}$ , 试求电路电阻和品质因数。

品质因数为

$$Q = \frac{f_0}{2\Delta f} = \frac{600}{8} = 75$$

电路电阻为

$$R = \frac{1}{2\pi f C Q} = \frac{1}{2 \times 3.14 \times 600 \times 10^3 \times 2500 \times 10^{-12} \times 75} = 1.34\Omega$$

例2-78 由  $R = 2\Omega$ 、 $L = 4\text{mH}$  的线圈与电容  $C$  组成串联谐振电路, 接在电压  $U = 20\text{V}$ 、 $f = 400\text{Hz}$  的电源上, 问  $C$  为何值时电路发生谐振? 并求谐振时电流  $I_0$ 、电容两端电压  $U_C$ 、线圈两端电压  $U_{RL}$ 、品质因数  $Q$ 。

电路发生谐振时的电容值为

$$C = \frac{1}{(2\pi f)^2 L} = \frac{1}{(2 \times 3.14 \times 400)^2 \times 4 \times 10^{-3}} = 3.96 \times 10^{-9}\text{F} = 39.6\mu\text{F}$$

品质因数为

$$Q = \frac{\sqrt{\frac{L}{C}}}{R} = \frac{\sqrt{\frac{4 \times 10^{-3}}{39.6 \times 10^{-9}}}}{2} = 5.03$$

谐振时电流为

$$I_0 = \frac{U}{R} = \frac{20}{2} = 10\text{A}$$

电容两端电压为

$$U_C = QU = 5.03 \times 20 = 101\text{V}$$

线圈两端电压为

$$U_{RL} = \sqrt{U_R^2 + U_L^2} = \sqrt{(I_0 R)^2 + U_C^2} = \sqrt{(10 \times 2)^2 + 101^2} = 103\text{V}$$

例2-79 有一收音机输入电路的电感  $L = 200\mu\text{H}$ , 当电容调

到130pF时发生串联谐振。试求：(1)该电路的谐振频率；(2)在L不变时，要想收听频率为560kHz的电台广播，C应为多大。

(1)谐振频率为

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} = \frac{1}{2 \times 3.14 \sqrt{200 \times 10^{-6} \times 130 \times 10^{-12}}} \\ = 995 \text{ kHz}$$

(2)电容C为

$$C = \frac{1}{(2\pi f)^2 L} = \frac{1}{(2 \times 3.14 \times 560 \times 10^3)^2 \times 200 \times 10^{-6}} \\ = 404 \text{ pF}$$

**例2-80** 在串联谐振电路中，已知 $R = 5 \Omega$ ， $L = 50 \mu\text{H}$ ， $C = 50 \text{ pF}$ ，求电路谐振频率 $f_0$ 、品质因数 $Q$ 、通常宽度 $2\Delta f$ 。

谐振频率为

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} = \frac{1}{2\pi\sqrt{50 \times 10^{-6} \times 50 \times 10^{-12}}} \\ = 3.18 \times 10^6 \text{ Hz} = 3.18 \text{ MHz}$$

品质因数为

$$Q = \frac{\sqrt{\frac{L}{C}}}{R} = \sqrt{\frac{50 \times 10^{-6}}{50 \times 10^{-12}}} = 200$$

通带宽度为

$$2\Delta f = \frac{f_0}{Q} = \frac{3.18 \times 10^6}{200} = 1.59 \times 10^4 \text{ Hz}$$

**例2-81** 图2-60为电视机对邻近频道的吸收电路，已知 $C_1 = C_2 = 6.5 \text{ pF}$ ，吸收信号频率 $f_0 = 36 \text{ MHz}$ ，求线圈电感L。

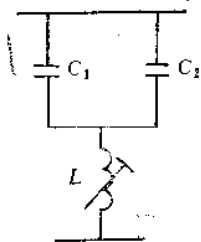


图2-60 电视机的吸收电路

$$L = \frac{1}{4\pi^2 f_0^2 (C_1 + C_2)} \\ = \frac{1}{4 \times 3.14^2 \times (36 \times 10^6)^2 (6.5 + 6.5) \times 10^{-12}} \\ = 1.5 \times 10^{-8} \text{ H} = 1.5 \mu\text{H}$$

例2-82 在串联谐振电路中，电源电压  $U = 2\text{V}$ ，频率  $f = 2\text{MHz}$ ，电路的谐振电流  $I_0 = 100\text{mA}$ （调节电容  $C$  使回路谐振），电容器两端的电压  $U_{C0} = 150\text{V}$ ，求电路元件参数  $R$ 、 $L$ 、 $C$ 。

$$R = \frac{U}{I_0} = \frac{2}{100 \times 10^{-3}} = 20\ \Omega$$

$$X_L = X_C = \frac{U_{C0}}{I_0} = \frac{150}{100 \times 10^{-3}} = 1500\ \Omega$$

$$L = \frac{X_L}{2\pi f_0} = \frac{1500}{2 \times 3.14 \times 2 \times 10^6} = 0.119 \times 10^{-3}\text{H} \\ = 0.119\text{mH}$$

$$C = \frac{1}{2\pi f_0 X_C} = \frac{1}{2 \times 3.14 \times 2 \times 10^6 \times 1500} \\ = 53 \times 10^{-12}\text{F} = 53\text{pF}$$

例2-83 由电感线圈和电容器串联组成的电路，跨接在  $200\text{V}$ ，频率可调的电源两端。当频率为  $50\text{Hz}$  或者  $100\text{Hz}$  时，电路中电流表的读数均为  $4\text{A}$ ，在谐振频率时，电流为  $5\text{A}$ 。试求：（1）线圈的电阻；（2）线圈的电感；（3）电容器的电容。

当频率  $f_1 = 50\text{Hz}$  和  $f_2 = 100\text{Hz}$  时，电流为

$$I = 4\ \text{A}$$

谐振时，电流为

$$I_0 = 5\ \text{A}$$

电阻为

$$R = \frac{U}{I_0} = \frac{200}{5} = 40\ \Omega$$

阻抗为

$$Z = \frac{U}{I} = \frac{200}{4} = 50\ \Omega$$

当频率  $f_1 = 50\text{Hz}$  时

$$\omega L < \frac{1}{\omega C}$$

$$Z_1 = \sqrt{R^2 + \left(\frac{1}{\omega C} - \omega L\right)^2}$$

$$50 = \sqrt{40^2 + \left(\frac{1}{100\pi C} - 100\pi L\right)^2}$$

当频率  $f_2 = 100\text{Hz}$  时

$$\omega L > \frac{1}{\omega C}$$

$$Z_2 = \sqrt{R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2}$$

$$50 = \sqrt{40^2 + \left(200\pi L - \frac{1}{200\pi C}\right)^2}$$

将  $f = 50\text{Hz}$ 、 $f = 100\text{Hz}$  时方程平方可得:

$$50^2 = 40^2 + \left(\frac{1}{100\pi C} - 100\pi L\right)^2$$

$$50^2 = 40^2 + \left(200\pi L - \frac{1}{200\pi C}\right)^2$$

解上述两联立方程可得:

$$L = 0.0955\text{H}$$

$$C = 53\mu\text{F}$$

**例2-84** 将一电感  $L = 16\text{mH}$ 、电阻  $R = 200\Omega$  的线圈与电容  
量  $C = 40\text{pF}$  的电容器串联, 接在  $100\text{V}$  的电源上。(1) 当  $f_0 =$   
 $200\text{kHz}$  时发生谐振, 求电流与电容器上的电压; (2) 当频率增  
加  $10\%$  时, 求电流与电容器上的电压。

(1) 当  $f_0 = 200\text{kHz}$  电路发生谐振时

$$\begin{aligned} X_{L_0} &= 2\pi f_0 L = 2 \times 3.14 \times 200 \times 10^3 \times 16 \times 10^{-3} \\ &= 20000\Omega \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} X_{C_0} &= \frac{1}{2\pi f_0 C} = \frac{1}{2 \times 3.14 \times 200 \times 10^3 \times 40 \times 10^{-12}} \\ &= 19900\Omega \end{aligned}$$

$$I_0 = \frac{U}{R} = \frac{100}{200} = 0.5 \text{ A}$$

$$U_{C0} = I_0 X_{C0} = 0.5 \times 19900 = 9950 \text{ V}$$

(2) 当频率增加10%时

$$X_L = 2\pi fL = 20000 \times 1.1 = 22000 \Omega$$

$$X_C = \frac{1}{2\pi fC} = \frac{19900}{1.1} = 18100 \Omega$$

$$Z = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2} = \sqrt{200^2 + (22000 - 18100)^2} \\ = 3910 \Omega \gg R$$

$$I = \frac{U}{Z} = \frac{100}{3910} = 0.0256 \text{ A} \ll I_0$$

$$U_C = IX_C = 0.0256 \times 18100 = 563 \text{ V} \ll U_{C0}$$

由此可见偏离谐振频率10%时,  $I$  和  $U_C$  就大大减小。

## 二、并联谐振

在电感与电容并联的电路中, 总电流与电压同相位的现象, 称为并联谐振, 也称为电流谐振。

### 1. 谐振条件

$$X_L = X_C$$

$$\text{即} \quad 2\pi fL = \frac{1}{2\pi fC} \quad \text{或} \quad \omega L = \frac{1}{\omega C}$$

### 2. 谐振频率

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad \text{或} \quad \omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}$$

### 3. 谐振电路特点

(1) 电路的阻抗最大, 且为电阻性, 其大小等于感抗或容抗的  $Q$  倍, 即

$$Z_0 = QX_L = QX_C = \frac{L}{RC}$$

而

$$Q = \frac{X_L}{R} = \frac{X_C}{R}$$

(2) 电路中的总电流最小, 即

$$I_0 = \frac{U}{Z_0} = \frac{U}{QX_L} = \frac{U}{QX_C} = \frac{RC}{L}U$$

(3) 电感支路和电容支路的电流方向近似相反, 大小近似相等, 且为总电流的  $Q$  倍, 即

$$I_L = I_C = \frac{U}{X_L} = \frac{QX_L I_0}{X_L} = QI_0$$

(4) 通带宽度

$$2\Delta f = \frac{f_0}{Q}$$

(5) 电感线圈与电容器的并联谐振电路可用三个理想元件并联的电路等效代替, 如图2-61所示, 等效条件为

$$R_p = \frac{(\omega L)^2}{R}$$

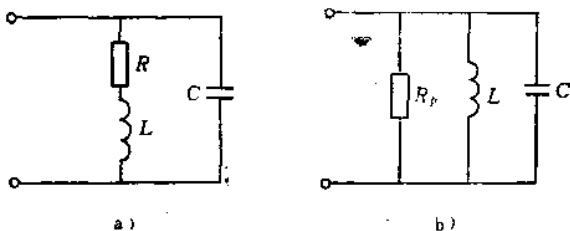


图2-61 电感线圈与电容并联谐振电路及等效电路

当电路的损耗愈小, 即  $Q$  值愈高时, 在图a中  $R$  愈小, 而在图b中则  $R_p$  愈大, 对图b来说, 品质因数为

$$Q = \frac{R_p}{\omega_0 L}$$

**例2-85** 在图2-61a所示的并联谐振电路中, 谐振阻抗  $Z = 15\text{k}\Omega$ , 电感  $L = 0.03\text{mH}$ , 电容  $C = 300\text{pF}$ , 求电路的电阻  $R$  和品质因数  $Q$ 。



电路电阻为

$$R = \frac{L}{ZC} = \frac{0.03 \times 10^{-3}}{15 \times 10^3 \times 300 \times 10^{-12}} = 6.67 \Omega$$

电路的品质因数为

$$Q = \frac{\omega_0 L}{R} = \frac{\sqrt{\frac{L}{C}}}{R} = \frac{\sqrt{\frac{0.03 \times 10^{-3}}{300 \times 10^{-12}}}}{6.67} = 47.4$$

例2-86 在并联谐振电路中, 已知谐振角频率  $\omega_0 = 10 \times 10^3$  rad/s, 品质因数  $Q = 200$ , 谐振时阻抗  $Z = 1\text{k}\Omega$ , 求  $R$ 、 $L$ 、 $C$ 。

由  $Q = \frac{\omega_0 L}{R}$  可得:

$$\frac{L}{R} = \frac{Q}{\omega_0} = \frac{200}{10 \times 10^3}$$

由  $Z = \frac{L}{RC}$  可得:

$$\frac{L}{R} = ZC = 1000C$$

将  $L/R$  之值代入此式得:

$$C = \frac{1}{1000} \frac{L}{R} = \frac{200}{1000 \times 10 \times 10^3} = 0.02 \mu\text{F}$$

$$L = \frac{1}{\omega_0^2 C} = \frac{1}{(10 \times 10^3)^2 \times 0.02 \times 10^{-6}} = 5 \text{mH}$$

$$R = \frac{L}{CZ} = \frac{5 \times 10^{-3}}{0.02 \times 10^{-6} \times 1000} = 0.25 \Omega$$

例2-87 在某选频放大器的交流等效电路中, 电容  $C = 500$  pF, 输出阻抗  $Z_{\text{出}} = 30\text{k}\Omega$ , 电路的谐振角频率  $\omega_0 = 3.5 \times 10^5$  rad/s。求使谐振电路与放大器匹配时, 线圈的参数和电路的品质因数。

$$\omega_0 L = \frac{1}{\omega_0 C} = \frac{1}{3.5 \times 10^5 \times 500 \times 10^{-12}} = 571 \Omega$$

线圈的电感为

$$L = \frac{571}{\omega_0} = \frac{571}{3.5 \times 10^6} = 0.163 \text{mH}$$

根据题意，放大器输出阻抗等于谐振阻抗，即

$$Z_{\text{出}} = Z_0 = \frac{L}{RC}$$

线圈的电阻为

$$R = \frac{L}{CZ_0} = \frac{0.163 \times 10^{-3}}{500 \times 10^{-12} \times 30 \times 10^3} = 10.9 \Omega$$

电路的品质因数为

$$Q = \frac{\omega_0 L}{R} = \frac{571}{10.9} = 52.4$$

**例2-88** 在并联谐振电路中，谐振频率  $f_0 = 1000 \text{Hz}$ ，电路的品质因数  $Q = 120$ ，谐振阻抗  $Z_0 = 30 \text{k}\Omega$ ，求电路各元件的参数。

品质因数为

$$Q = \frac{R_p}{\omega_0 L} = \frac{Z_0}{\omega_0 L}$$

电路的电感为

$$\begin{aligned} L &= \frac{Z_0}{\omega_0 Q} = \frac{Z_0}{2\pi f_0 Q} = \frac{30 \times 10^3}{2 \times 3.14 \times 1000 \times 120} \\ &= 0.0398 \text{H} = 39.8 \text{mH} \end{aligned}$$

电路的电容为

$$\begin{aligned} C &= \frac{1}{\omega_0^2 L} = \frac{1}{4\pi^2 f_0^2 L} \\ &= \frac{1}{4 \times 3.14^2 \times 1000^2 \times 39.8 \times 10^{-3}} = 0.637 \mu\text{F} \end{aligned}$$

线圈的电阻为

$$\begin{aligned} R &= \frac{\omega_0 L}{Q} = \frac{2\pi f_0 L}{Q} \\ &= \frac{2 \times 3.14 \times 1000 \times 39.8 \times 10^{-3}}{120} = 2.5 \Omega \end{aligned}$$

例2-89 可变频率的电源接在并联电路上,如图2-62所示,如果  $R = 55\Omega$ ,  $L = 5\text{mH}$ ,  $C = 50\mu\text{F}$ ,  $U = 220\text{V}$ , 求谐振频率  $f_0$ , 谐振时  $I$ 、 $I_C$ 、 $I_L$  及电路总阻抗。

谐振频率为

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$$

$$= \frac{1}{2 \times 3.14 \sqrt{5 \times 10^{-3} \times 50 \times 10^{-6}}} = 318\text{Hz}$$

谐振时各电流为

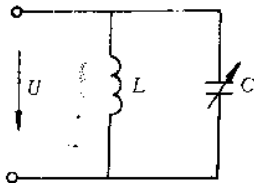
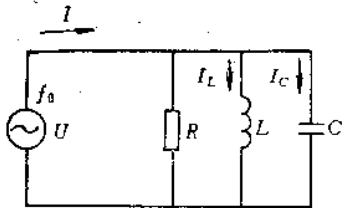


图2-62 并联电路接在可变频率的电源 图2-63 电感与电容并联谐振电路

$$I = \frac{U}{R} = \frac{220}{55} = 4\text{A}$$

$$I_C = \frac{U}{X_C} = 2\pi f_0 C U = 2 \times 3.14 \times 318 \times 50 \times 10^{-6} \times 220 = 22\text{A}$$

$$I_L = \frac{U}{X_L} = \frac{U}{2\pi f_0 L} = \frac{220}{2 \times 3.14 \times 318 \times 5 \times 10^{-3}} = 22\text{A}$$

谐振时电路总阻抗为

$$Z_0 = R = 55\Omega$$

例2-90 如图2-63所示,高频发射机发出电压  $U = 800\text{V}$ ,  $f = 25\text{kHz}$ , 将电感  $L = 20\text{mH}$  的线圈(电阻忽略不计)及  $200 \sim 4500\text{pF}$  的可变电容器并联在发射机两端,求回路发生电流谐振时电容器的电容量。

由  $f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$  可求电容量,即

$$C = \frac{1}{4\pi^2 f^2 L} = \frac{1}{4\pi^2 \times (25 \times 10^3)^2 \times 20 \times 10^{-3}}$$

$$= 2030 \times 10^{-12} \text{F} = 2030 \text{pF}$$

例2-91 若  $L = 25 \text{mH}$ 、 $Q = 100$ 的线圈和  $C = 4000 \text{pF}$ 的电容组成并联谐振电路，试求图 2-64a、b两种等效电路中的电阻  $R_p$ 和  $R$ ，以及谐振时电路的输入阻抗为多大。

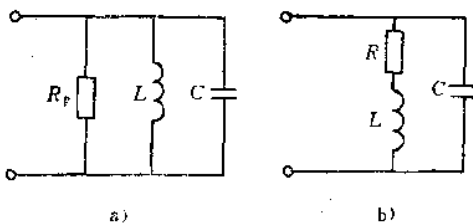


图2-64 并联谐振电路

图 2-64a 中的电阻为

$$R_p = Q\omega_0 L = Q \sqrt{\frac{L}{C}} = 100 \sqrt{\frac{25 \times 10^{-3}}{4000 \times 10^{-12}}}$$

$$= 25 \times 10^4 \Omega$$

图2-64b中的电阻为

$$R = \frac{(\omega_0 L)^2}{R_p} = \frac{L}{CR_p} = \frac{25 \times 10^{-3}}{4000 \times 10^{-12} \times 250 \times 10^3} = 25 \Omega$$

谐振时图2-64a的输入阻抗为

$$Z_i = R_p = 250 \times 10^3 \Omega = 250 \text{k}\Omega$$

图2-64b谐振时的输入阻抗为

$$Z_i = \frac{L}{CR} = \frac{25 \times 10^{-3}}{4000 \times 10^{-12} \times 25}$$

$$= 250 \text{k}\Omega$$

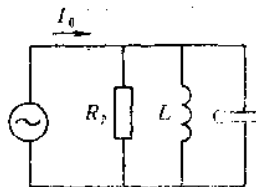


图2-65 并联谐振电路

由此可见，两种电路是等效的。

例2-92 并联谐振电路中的  $L = 50 \mu\text{H}$ ， $C = 50 \text{pF}$ ， $Q = 50$ ， $I_0 = 1 \text{mA}$ ，求并联谐振电路两端的电压  $U_0$ 。

并联谐振电路可用等效图2-65表示, 等效电阻  $R_p$  为

$$R_p = Q\omega_0 L = Q\sqrt{\frac{L}{C}} = 50\sqrt{\frac{50 \times 10^{-6}}{50 \times 10^{-12}}} \\ = 50 \times 10^3 \Omega$$

谐振电路两端的电压为

$$U_0 = I_0 R_p = 1 \times 10^{-3} \times 50 \times 10^3 = 50 \text{ V}$$

**例2-93** 在图 2-65 所示并联谐振电路中, 已知  $L = 40 \text{ mH}$ ,  $C = 40 \text{ pF}$ ,  $R_p = 300 \text{ k}\Omega$ , 求并联谐振频率  $f_0$ , 电路品质因数  $Q$ , 通带宽度  $2\Delta f$ 。

并联谐振频率为

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} = \frac{1}{2 \times 3.14\sqrt{40 \times 10^{-3} \times 40 \times 10^{-12}}} \\ = 126 \text{ kHz}$$

电路的品质因数为

$$Q = \frac{R_p}{\omega_0 L} = \frac{R_p}{\sqrt{\frac{L}{C}}} = \frac{300 \times 10^3}{\sqrt{\frac{40 \times 10^{-3}}{40 \times 10^{-12}}}} = 9.49$$

通带宽度为

$$2\Delta f = \frac{f_0}{Q} = \frac{126 \times 10^3}{9.49} = 13.3 \text{ kHz}$$

**例2-94** 已知  $L = 40 \text{ mH}$ 、 $C = 400 \text{ pF}$ 、 $R_p = 500 \text{ k}\Omega$ , 三者并联在内阻为  $R_i$  的电源上, 要求接电源以后电路的品质因数  $Q$  值不低于20, 求电源内阻的最小值。

根据题意作出电路图如图 2-66a 所示, 将电压源等效变换为

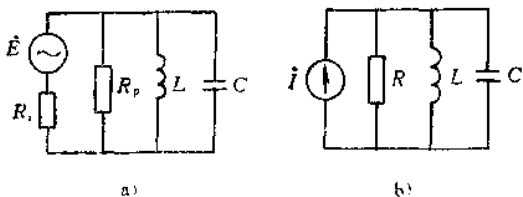


图2-66 电压源等效变为电流源

电流源，如图2-66b所示。

图2-66b电路的品质因数为

$$Q = \frac{R}{\omega_0 L}$$

当  $Q \geq 20$  时，而回路电阻为

$$R \geq Q \omega_0 L = 20 \sqrt{\frac{L}{C}} = 20 \sqrt{\frac{40 \times 10^{-5}}{400 \times 10^{-12}}} = 200 \text{ k}\Omega$$

从并联等效电阻  $R = \frac{R_p R_i}{R_p + R_i}$  中解出电源内阻，即

$$R_i = \frac{R R_p}{R_p - R} = \frac{200 \times 10^3 \times 500 \times 10^3}{500 \times 10^3 - 200 \times 10^3} = 333 \text{ k}\Omega$$

当要求  $R \geq 200 \text{ k}\Omega$  时，即要求  $R_i \geq 333 \text{ k}\Omega$ 。

**例2-95** 在图2-67a所示电路中， $R = 3.5 \Omega$ ， $L = 35 \mu\text{H}$ ， $C = 500 \text{ pF}$ ， $R_i = 35 \text{ k}\Omega$ ，求电路品质因数和通带宽度。

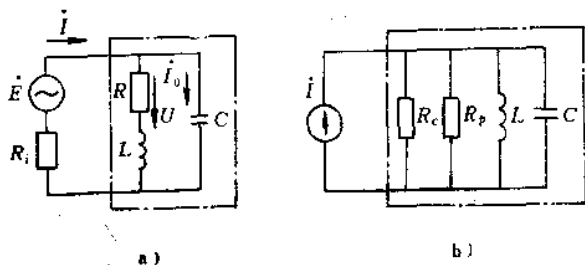


图2-67 并联谐振电路

图2-67a点划线方框内所示并联谐振电路的阻抗为

$$R_p = \frac{L}{RC} = \frac{35 \times 10^{-6}}{3.5 \times 500 \times 10^{-12}} = 20 \text{ k}\Omega$$

与电源内阻并联后的总的等效电阻如图2-67b点划线方框内所示，即

$$R' = \frac{R_i R_p}{R_i + R_p} = \frac{20 \times 10^3 \times 35 \times 10^3}{20 \times 10^3 + 35 \times 10^3} = 12.7 \text{ k}\Omega$$

电路的品质因数为

$$Q = \frac{R'}{\omega_0 L} = \frac{R'}{\sqrt{\frac{L}{C}}} = \sqrt{\frac{12.7 \times 10^3}{35 \times 10^{-6} \times 500 \times 10^{-12}}} = 47.9$$

并联电路的谐振频率为

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} = \frac{1}{2 \times 3.14 \sqrt{35 \times 10^{-6} \times 500 \times 10^{-12}}} = 1200 \text{ kHz}$$

电路的通带宽度为

$$2\Delta f = \frac{f_0}{Q} = \frac{1200 \times 10^3}{47.9} = 25.1 \text{ kHz}$$

**例2-96** 电路与上题相同, 电源电压  $E = 15\text{V}$ , 求谐振时的电源输出电流  $I$ , 电容支路电流  $I_C$  和电路端电压  $U$ 。

并联谐振电路的阻抗为

$$Z_0 = \frac{L}{RC} = \frac{35 \times 10^{-6}}{3.5 \times 500 \times 10^{-12}} = 25 \text{ k}\Omega$$

电源输出电流为

$$I = \frac{E}{R_i + Z_0} = \frac{15}{35 \times 10^3 + 25 \times 10^3} = 2.5 \times 10^{-4} \text{ A} = 0.25 \text{ mA}$$

并联谐振电路两端的电压为

$$U = IZ_0 = 0.25 \times 10^{-3} \times 25 \times 10^3 = 6.25 \text{ V}$$

电容支路电流为

$$I_C = \frac{U}{X_C} = U\omega_0 C = 6.25 \times 2 \times 3.14 \times 1200 \times 10^3 \times 500 \times 10^{-12} = 0.0236 \text{ A} = 23.6 \text{ mA}$$

**例2-97** 由电阻  $R = 15\Omega$ 、电感  $L = 0.45\text{mH}$  的线圈与电容  $C = 200\text{pF}$  分别接成串联和并联谐振电路, 求谐振频率和谐振时的阻抗。

(1) 串联谐振电路的谐振频率为

$$f_{0\text{串}} = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} = \frac{1}{2 \times 3.14 \sqrt{0.45 \times 10^{-3} \times 200 \times 10^{-12}}}$$

$$= 531 \text{ kHz}$$

谐振时的阻抗为

$$Z_{0\text{串}} = R = 15 \Omega$$

(2) 并联谐振电路的谐振频率为

$$f_{0\text{并}} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{1}{LC} - \frac{R^2}{L^2}} = \frac{1}{2 \times 3.14} \\ \times \sqrt{\frac{1}{0.45 \times 10^{-3} \times 200 \times 10^{-12}} - \frac{15^2}{(0.45 \times 10^{-3})^2}} \\ = 530 \text{ kHz}$$

谐振时的阻抗为

$$Z_{0\text{并}} = \frac{L}{RC} = \frac{0.45 \times 10^{-3}}{15 \times 200 \times 10^{-12}} = 150 \text{ k}\Omega$$

因为电阻  $R \ll \sqrt{\frac{L}{C}} = 1.5 \text{ k}\Omega$ , 所以  $f_{0\text{串}}$  与  $f_{0\text{并}}$  相差很小。

### 三、串并联谐振

串并联谐振如图2-68所示。

1. 图2-68a的频率

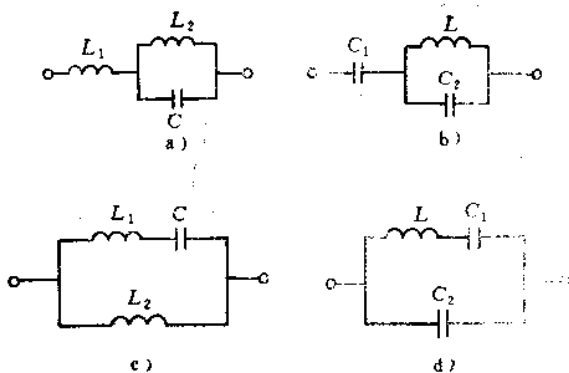


图2-68 串并联谐振电路

串联谐振频率为



$$f_{\text{串}} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{L_1 + L_2}{L_1 L_2 C}}$$

并联谐振频率为

$$f_{\text{并}} = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_2 C}}$$

2. 图2-68b 的频率

串联谐振频率为

$$f_{\text{串}} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{1}{L(C_1 + C_2)}}$$

并联谐振频率为

$$f_{\text{并}} = \frac{1}{2\pi\sqrt{L C_2}}$$

3. 图2-68c 的频率

串联谐振频率为

$$f_{\text{串}} = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_1 C}}$$

并联谐振频率为

$$f_{\text{并}} = \frac{1}{2\pi\sqrt{(L_1 + L_2)C}}$$

4. 图2-68d 的频率

串联谐振频率为

$$f_{\text{串}} = \frac{1}{2\pi\sqrt{L C_1}}$$

并联谐振频率为

$$f_{\text{并}} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{C_1 + C_2}{L C_1 C_2}}$$

**例2-98** 在图2-69中, 已知  $L = 15\text{H}$ ,  $C = 0.07\text{pF}$ ,  $R = 100\Omega$ ,  $C_0 = 3\text{pF}$ , 求电路的品质因数  $Q$  值及该石英晶体的串联谐振频率和并联谐振频率。

石英晶体串联谐振频率为

$$f_{\text{串}} = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} = \frac{1}{2 \times 3.14 \sqrt{15 \times 0.07 \times 10^{-12}}}$$

$$= 156 \text{ kHz}$$

电路的品质因数为

$$Q = \frac{\omega_0 L}{R} = \frac{2 \times 3.14 \times 156 \times 10^3}{100}$$

$$= 9.8 \times 10^5$$

并联谐振频率为

$$f_{\text{并}} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{C + C_0}{LCC_0}}$$

$$= \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{(0.07 + 3) \times 10^{-12}}{15 \times 0.07 \times 10^{-12} \times 3 \times 10^{-12}}}$$

$$= 161 \text{ kHz}$$

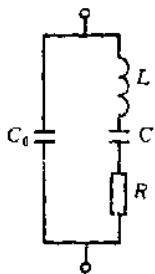


图2-69 谐振电路

## 第五节 交流输电线路计算

### 一、单相输电线

#### 1. 单相输电线所输出的功率

$$P = UI \cos \varphi$$

#### 2. 单相线路里变成热的功率

$$P = 2I^2 R$$

式中  $R$ ——每线的电阻。

#### 3. 单相输电线的相量图

如图2-70所示，线路始端电压为

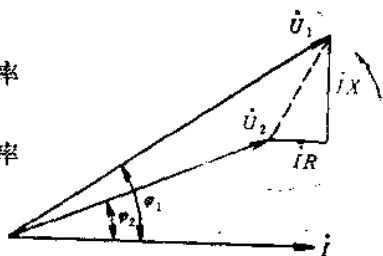


图2-70 单相输电线相量图

$$U_1 = \sqrt{(U_2 \cos \varphi_2 + IR)^2 + (U_2 \sin \varphi_2 \pm IX)^2}$$

式中  $U_1$ ——线路的始端电压；

$U_2$ ——线路的终端电压；

$I$ ——线路电流；

$R$ ——线路电阻（双线）；

$X$ ——线路电抗（双线）；

$\cos \varphi_2$ ——终端负载的功率因数。

若在负载方面，线路电流与线路电压同相，或是较线路电压滞后， $IX$  前的符号用正；若在负载方面，线路电流较线路电压

超前, 则用负号。

4. 线路始端的功率因数

$$\cos \varphi_1 = \frac{U_2 \cos \varphi_2 + I R}{U_1}$$

5. 输送效率

$$\eta = \frac{U_2 I \cos \varphi_2}{U_2 I \cos \varphi_2 + I^2 R}$$

6. 线路电压的调整率

$$\frac{U_1 - U_2}{U_2} \times 100\%$$

二、三相输电线

1. 三相输电线所输送的功率

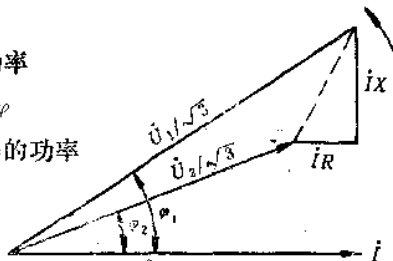
$$P = \sqrt{3} U I \cos \varphi$$

2. 三相输电线路里变成热的功率

$$P = 3 I^2 R$$

式中  $R$ ——每线的电阻。

3. 三相输电线的相量图



如图2-71所示, 线路始端电压为 图2-71 三相输电线相量图

$$U_1 = \sqrt{3} \sqrt{\left(\frac{U_2}{\sqrt{3}} \cos \varphi_2\right)^2 + \left(\frac{U_2}{\sqrt{3}} \sin \varphi_2 \pm I X\right)^2}$$

式中  $I$ ——线路电流;

$R$ ——线路电阻 (一线);

$X$ ——线路电抗 (一线);

$\cos \varphi_2$ ——负载端的功率因数;

$U_1$ ——线路始端的线电压;

$U_2$ ——线路终端的线电压。

若线路电流较线路电压滞后,  $IX$  前的符号用正; 若线路电流较线路电压超前, 则用负号。

4. 线路始端的功率因数

$$\cos \varphi_1 = \frac{\frac{U_2}{\sqrt{3}} \cos \varphi_2 + IR}{\frac{U_1}{\sqrt{3}}}$$

### 5. 三相输电线的效率

$$\eta = \frac{\sqrt{3} U_2 I \cos \varphi_2}{\sqrt{3} U_2 I \cos \varphi_2 + 3 I^2 R}$$

例2-99 一单相输电线供给 5kW 负载, 要求负载上的端电压为 220V, 功率因数为 0.8 (电流超前), 若线路的电阻为 2Ω, 线路电抗为 4Ω, 求输电线始端电压为多少。

线路电流为

$$I = \frac{P}{U_2 \cos \varphi_2} = \frac{5 \times 10^3}{220 \times 0.8} = 28.4 \text{ A}$$

输电线始端电压为

$$\begin{aligned} U_1 &= \sqrt{(U_2 \cos \varphi_2 + IR)^2 + (U_2 \sin \varphi_2 - IX)^2} \\ &= \sqrt{(220 \times 0.8 + 28.4 \times 2)^2 + (220 \times 0.6 - 28.4 \times 4)^2} \\ &= 234 \text{ V} \end{aligned}$$

例2-100 现有 10kW、220V, 功率因数为 0.8 (电流滞后), 效率为 90% 的单相异步电动机, 接到单相输电线路上去, 若线路总电阻为 0.3Ω, 线路电抗为 0.3Ω, 问输电线路始端电压为多少。

线路电流为

$$I = \frac{P}{U_2 \cos \varphi_2 \eta} = \frac{10 \times 10^3}{220 \times 0.8 \times 0.9} = 63.1 \text{ A}$$

输电线始端电压为

$$\begin{aligned} U_1 &= \sqrt{(U_2 \cos \varphi_2 + IR)^2 + (U_2 \sin \varphi_2 + IX)^2} \\ &= \sqrt{(220 \times 0.8 + 63.1 \times 0.3)^2 + (220 \times 0.6 + 63.1 \times 0.3)^2} \\ &= 247 \text{ V} \end{aligned}$$

例2-101 三相交流发电机供给一台功率因数为 0.8 (电流超前) 的 50kW 三相异步电动机, 输电线的电阻为 0.2Ω, 输电线的电抗为 0.3Ω, 若电动机端的线路电压是 380V, 问发电机端的线路电压是多少。

线路电流为

$$I = \frac{P}{\sqrt{3} U_2 \cos \varphi_2} = \frac{50 \times 10^3}{\sqrt{3} \times 380 \times 0.8} = 95.1 \text{ A}$$

发电机端的线路电压为

$$\begin{aligned} U_1 &= \sqrt{3} \sqrt{\left(\frac{U_2}{\sqrt{3}} \cos \varphi_2 + IR\right)^2 + \left(\frac{U_2}{\sqrt{3}} \sin \varphi_2 - IX\right)^2} \\ &= \sqrt{3} \sqrt{\left(\frac{380}{\sqrt{3}} \times 0.8 + 95.1 \times 0.2\right)^2 +} \\ &\quad \sqrt{\left(\frac{380}{\sqrt{3}} \times 0.6 - 95.1 \times 0.3\right)^2} = 382 \text{ V} \end{aligned}$$

例2-102 将一台三相异步电动机，其功率为7.5kW，电压为380V、功率因数为0.8（电流滞后），接到发电机上，若每根输电线的电阻是0.15Ω，电抗是0.05Ω，求发电机端的线路电压是多少。

线路电流为

$$I = \frac{P}{\sqrt{3} U_2 \cos \varphi_2} = \frac{7.5 \times 10^3}{\sqrt{3} \times 380 \times 0.8} = 14.3 \text{ A}$$

发电机端线路电压为

$$\begin{aligned} U_1 &= \sqrt{3} \sqrt{\left(\frac{U_2}{\sqrt{3}} \cos \varphi_2 + IR\right)^2 + \left(\frac{U_2}{\sqrt{3}} \sin \varphi_2 + IX\right)^2} \\ &= \sqrt{3} \sqrt{\left(\frac{380}{\sqrt{3}} \times 0.8 + 14.3 \times 0.15\right)^2 +} \\ &\quad \sqrt{\left(\frac{380}{\sqrt{3}} \times 0.6 + 14.3 \times 0.05\right)^2} = 384 \text{ V} \end{aligned}$$

例2-103 在三相输电线里输送40kW的功率，输电线的位置成三角形，相距是0.6m，若功率因数是0.8（电流滞后），在输电线终端的线路电压是380V，计算：（1）在35mm<sup>2</sup>的铝绞线上有10%的能量损失时，输送功率所能达到的距离；（2）线路里的电压降。已知35mm<sup>2</sup>铝绞线的电阻0.92Ω/km，三角形分布，相距为0.6m的35mm<sup>2</sup>的铝绞线的电抗是0.335Ω/km。

线路电流为

$$I = \sqrt{\frac{P}{3 U_2 \cos \varphi_2}} = \sqrt{\frac{40 \times 10^3}{3 \times 380 \times 0.8}} = 76.1 \text{ A}$$

每线的功率损失为

$$\Delta P = \frac{P \times 10\%}{3} = \frac{40 \times 10^3 \times 0.1}{3} = 1330 \text{ W}$$

线路总电阻为

$$R = \frac{\Delta P}{I^2} = \frac{1330}{76.1^2} = 0.23 \Omega$$

线路的长度为

$$L = \frac{R}{0.92} = 0.25 \text{ km}$$

线路的总电抗为

$$X = 0.335L = 0.335 \times 0.25 = 0.0838 \Omega$$

输电线的始端线路电压为

$$\begin{aligned} U_1 &= \sqrt{3} \sqrt{\left( \frac{U_2}{\sqrt{3}} \cos \varphi_2 + IR \right)^2 + \left( \frac{U_2}{\sqrt{3}} \sin \varphi_2 + IX \right)^2} \\ &= \sqrt{3} \sqrt{\left( \frac{380}{\sqrt{3}} \times 0.8 + 76.1 \times 0.23 \right)^2 +} \\ &\quad \frac{\left( \frac{380}{\sqrt{3}} \times 0.6 + 76.1 \times 0.0838 \right)^2}{\phantom{=}} = 412 \text{ V} \end{aligned}$$

线路里的电压降为

$$\Delta U = U_1 - U_2 = 412 - 380 = 32 \text{ V}$$

**例2-104** 把500只100 W、220 V的白炽灯，由单相输电线路供电。若输电线的电阻是0.1 Ω，电感性电抗是0.06 Ω，问输电线路始端电压为多大。

电灯总电流为

$$I = \frac{500 \times 100}{220} = 227 \text{ A}$$

因电灯泡是无感性负载，所以  $\cos \varphi_2 = 1$ ， $\sin \varphi_2 = 0$

输电线始端电压为

$$\begin{aligned} U_1 &= \sqrt{(U_2 + IR)^2 + (IX)^2} \\ &= \sqrt{(220 + 227 \times 0.1)^2 + (227 \times 0.06)^2} \\ &= 243 \text{ V} \end{aligned}$$

例2-105 在高压输电线路中，线电压  $U_{\text{线}} = 10 \times 10^3 \text{ V}$ ，输送功率  $P = 1 \times 10^3 \text{ kW}$ ，若输电线路的每线电阻  $R = 1 \Omega$ ，试计算负载功率因数  $\cos \varphi_1 = 0.9$  时，线路上的电压降及输电线上一年的电能损耗；若负载功率因数从 0.9 降为 0.6，线路上的电压降及输电线一年的电能损耗又为多少。

(1) 当功率因数为 0.9 时输电线上的电流为

$$I_1 = \frac{P_1}{\sqrt{3} U_{\text{线}} \cos \varphi_1} = \frac{1000 \times 10^3}{\sqrt{3} \times 10 \times 10^3 \times 0.9} = 64 \text{ A}$$

线路上的电压降为

$$U_1 = I_1 R = 64 \times 1 = 64 \text{ V}$$

输电线上一年（按 365 天计）电能损耗为

$$\begin{aligned} P_1 &= 3 I_1^2 R t \\ &= 3 \times 64^2 \times 1 \times 365 \times 24 \\ &= 1.69 \times 10^5 \text{ kW} \cdot \text{h} \end{aligned}$$

(2) 当功率因数由 0.9 降低到 0.6 时输电线上的电流为

$$I_2 = \frac{P_1}{\sqrt{3} U_{\text{线}} \cos \varphi_2} = \frac{1000 \times 10^3}{\sqrt{3} \times 10 \times 10^3 \times 0.6} = 96 \text{ A}$$

线路上的电压降为

$$U_2 = I_2 R = 96 \times 1 = 96 \text{ V}$$

输电线上一年的电能损耗为

$$P_2 = 3 I_2^2 R t = 3 \times 96^2 \times 1 \times 365 \times 24 = 2.42 \times 10^5 \text{ kW} \cdot \text{h}$$

所以由于功率因数降低而增加的电压降为

$$\Delta U = U_2 - U_1 = 96 - 64 = 32 \text{ V}$$

所以由于功率因数降低而增加的电能损耗为

$$\begin{aligned} \Delta P &= P_1 - P_2 = 2.42 \times 10^5 - 1.69 \times 10^5 \\ &= 0.73 \times 10^5 = 7.3 \times 10^4 \text{ kW} \cdot \text{h} \end{aligned}$$

由此可见，在保证输送同样的有功功率时，负载功率因数越低，就势必要在输电线上流过更大的电流，因而造成输电线路上的电压降及电能损耗的增加，这是功率因数低的原因之一。为解决低功率因数影响供电质量问题，常用电容器补偿的办法来提高功率因数。

例2-106 已知某电站以220kV的高压输给负载50万kW的电力，若输电线路的总电阻为9Ω，试计算负载的功率因数由0.6提高到0.9时，输电线上一年中要少损失多少电能？若每kW·h电能按人民币0.20元计算，一年中又能节省多少钱。

当功率因数为0.6时，线路电流为

$$I_1 = \frac{P}{\sqrt{3} U \cos \varphi_1} = \frac{50 \times 10^7}{\sqrt{3} \times 220 \times 10^3 \times 0.6} \\ = 2.19 \times 10^3 \text{ A}$$

当功率因数为0.9时，线路电流为

$$I = \frac{P}{\sqrt{3} U \cos \varphi_2} = \frac{50 \times 10^7}{\sqrt{3} \times 220 \times 10^3 \times 0.9} \\ = 1.14 \times 10^3 \text{ A}$$

一年中线路上少损失的电能

$$\Delta P = (I_1^2 - I_2^2) R t \\ = [(2.19 \times 10^3)^2 - (1.14 \times 10^3)^2] \times 9 \times 365 \times 24 \\ = 6.39 \times 10^9 \text{ kW} \cdot \text{h}$$

一年中节省电费为

$$0.20 \times 6.39 \times 10^9 = 1.28 \times 10^9 \text{ 元}$$

例2-107 试证明在相同输电条件（输电电压、功率、功率因数、损耗及输电距离）下，输送三相电能比单相电能时可省铜1/4。

证明 设线间电压为 $U$ ，输送功率为 $P$ ，功率因数为 $\cos \varphi$ ，单相损耗为 $\Delta P_1$ ，三相损耗为 $\Delta P_3$ ，输电距离为 $L(\text{m})$ ，单相输电线每根的截面积为 $S_1(\text{mm}^2)$ 、电阻为 $R_1$ ，三相输电线每根的截面为 $S_3(\text{mm}^2)$ 、电阻为 $R_3$ ，铜的电导率为 $\gamma$ 。



单相输电线的电流为

$$I = \frac{P}{U \cos \varphi}$$

两根线的损耗为

$$\begin{aligned} \Delta P_1 &= 2I^2 R_1 = 2 \left( \frac{P}{U \cos \varphi} \right)^2 \frac{L}{\gamma S_1} \\ &= 2 \frac{P^2}{U^2 \cos^2 \varphi} \frac{L}{\gamma S_1} \\ S_1 &= \frac{2P^2 L}{\Delta P_1 \gamma U^2 \cos^2 \varphi} \end{aligned}$$

单相输电线所用导线的总体积为

$$V_1 = S_1 2L = \frac{4P^2 L^2}{\Delta P_1 \gamma U^2 \cos^2 \varphi}$$

三相输电线的电流为

$$I_s = \frac{P}{\sqrt{3} U \cos \varphi}$$

三根线的损耗为

$$\begin{aligned} \Delta P_s &= 3I_s^2 R_s = 3 \left( \frac{P}{\sqrt{3} U \cos \varphi} \right)^2 \frac{L}{\gamma S_s} \\ S_s &= \frac{P^2 L}{\Delta P_s \gamma U^2 \cos^2 \varphi} \end{aligned}$$

三相输电线所用导线的总体积为

$$V_s = S_s 3L = \frac{3P^2 L^2}{\Delta P_s \gamma U^2 \cos^2 \varphi}$$

三相与单相输电线体积之比

$$\frac{V_s}{V_1} = \frac{3}{4}$$

$$V_s = \frac{3}{4} V_1$$

输送三相电能比单相电能可省铜为

$$V_1 - V_s = V_1 - \frac{3}{4} V_1 = \frac{1}{4} V_1$$

对于大电力远距离输电，能节约25%的铜料，是很有经济价值的。

例2-103 某发电厂传输功率  $P = 15000\text{kW}$  至距离  $L = 40\text{km}$  的用户，若用户端的电压  $U = 35\text{kV}$ ，功率因数  $\cos\varphi = 0.87$ ，如果传输的功率损失不许超过  $700\text{kW}$ ，试分别计算用单相输电线和三相输电线（负载对称）所需用的铜各为多少。已知铜的电阻率  $\rho = 0.0172\Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$ ，密度  $d = 8.9\text{g}/\text{cm}^3$ 。

(1) 单相输电线用铜量 功率损失  $\Delta P = 700\text{kW}$  时，负载的功率为

$$P_2 = P - \Delta P = 15000 - 700 = 14300\text{kW}$$

线路中电流为

$$I = \frac{P_2}{U \cos\varphi} = \frac{14300 \times 10^3}{35 \times 10^3 \times 0.87} = 470\text{A}$$

由于  $\Delta P = I^2 R_L$ ，线路电阻为

$$R_L = \frac{\Delta P}{I^2} = \frac{700 \times 10^3}{470^2} = 3.17\Omega$$

根据导线电阻计算公式  $R_L = \rho \frac{L}{S}$ ，其中  $L = 2L = 2 \times 40 = 80\text{km}$ ，导线截面积为

$$\begin{aligned} S &= \rho \frac{L}{R_L} = 0.0172 \times \frac{80 \times 10^3}{3.17} = 434\text{mm}^2 \\ &= 4.34\text{cm}^2 \end{aligned}$$

单相输电线铜线体积为

$$V = LS = 80 \times 10^3 \times 4.34 = 34.7 \times 10^6\text{cm}^3$$

单相输电线路用铜量为

$$G = Vd = 34.7 \times 10^6 \times 8.9 = 309 \times 10^6\text{g} = 309\text{t}$$

(2) 三相输电线路用铜量 功率损失  $\Delta P$  仍为  $700\text{kW}$ ，负载功率  $P_2 = 14300\text{kW}$ ，由三相负载有功功率计算公式可得线路电流为

$$I = \frac{P_2}{\sqrt{3} U \cos \varphi} = \frac{14300 \times 10^3}{\sqrt{3} \times 35 \times 10^3 \times 0.87} = 271 \text{ A}$$

由于  $\Delta P = I^2 R_L$ , 线路电阻为

$$R_L = \frac{\Delta P}{I^2} = \frac{700 \times 10^3}{271^2} = 9.53 \Omega$$

同样, 根据导线电阻计算公式  $R_L = \rho \frac{L}{S}$ , 其中  $L = 3L =$

$3 \times 40 = 120 \text{ km}$ , 导线截面积为

$$S = \rho \frac{L}{R_L} = 0.0172 \times \frac{120 \times 10^3}{9.53} \\ = 217 \text{ mm}^2 = 2.17 \text{ cm}^2$$

三相输电线路铜线体积为

$$V = LS = 120 \times 10^3 \times 2.17 = 26 \times 10^6 \text{ cm}^3$$

三相输电线路用铜量为

$$G = Vd = 26 \times 10^6 \times 8.9 = 231 \times 10^6 \text{ g} = 231 \text{ t}$$

由此可见, 输送同样的功率至同一用户, 三相输电线路比单相输电线路能节约25%的铜, 这就是电力系统广泛采用三相输电方式的重要原因之一。

### 三、线路电压损失计算

#### 1. 三相线路

(1) 单个负载的三相线路 如图2-72所示。

在三相四线制中, 如果负载平衡和各相导线截面相等, 各相

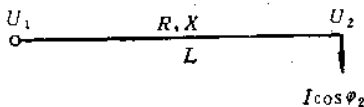


图2-72 单个负载的三相电路

电压损失均相等, 所以只计算一相的电压损失即可。

设负载集中在线路的末端, 负载的功率因数为  $\cos \varphi_2$ , 线路的总电阻为  $R$ , 总感抗为  $X$ , 则有

$$\Delta U = I(R \cos \varphi_2 + X \sin \varphi_2)$$

$$= IL(r_0 \cos \varphi_2 + x_0 \sin \varphi_2)$$

电压损失的百分数为

$$\Delta U = \frac{IL(r_0 \cos \varphi_2 + x_0 \sin \varphi_2)}{U} \times 100\%$$

式中  $\Delta U$ ——线路电压损失；

$I$ ——线路负载电流(A)；

$U$ ——线路额定相电压(V)；

$\varphi_2$ ——负载功率因数角；

$r_0$ 、 $x_0$ ——导线(一根)单位长度电阻和感抗值( $\Omega/\text{km}$ )。

(2) 两个或多个负载的三相线路 如图2-73所示。

当有两个负载时则有

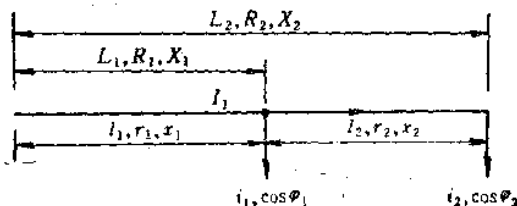


图2-73 两个负载的三相电路

$$\Delta U = \frac{I_1(r_1 \cos \varphi_1 + x_1 \sin \varphi_1) + I_2(r_2 \cos \varphi_2 + x_2 \sin \varphi_2)}{U} \times 100\%$$

或

$$\Delta U = \frac{i_1(R_1 \cos \varphi_1 + X_1 \sin \varphi_1) + i_2(R_2 \cos \varphi_2 + X_2 \sin \varphi_2)}{U} \times 100\%$$

当有多个负载时则有

$$\Delta U = \frac{1}{U} \sum I(r \cos \varphi + x \sin \varphi) \times 100\%$$

或

$$\Delta U = \frac{1}{U} \sum i(R \cos \varphi + X \sin \varphi) \times 100\%$$

式中  $\Delta U$ ——线路电压损失；

$U$ ——线路额定相电压(V)；

$I$ ——各段线路上的电流(A)；

$i$ ——各个负载电流(A);

$\varphi$ ——与负载电流或线路电流对应的功率因数角;

$r$ 、 $x$ ——各段线路一根导线的电阻和感抗( $\Omega$ );

$R$ 、 $X$ ——从负载引出点至线路始端的线路(一根导线)电阻和感抗( $\Omega$ )。

如果各段线路导线截面、材料和敷设形式相同时,各相负载有相同的功率因数  $\cos\varphi$ , 则有

$$\Delta U = \frac{1}{U} (r_0 \cos\varphi + x_0 \sin\varphi) \sum I l \times 100\%$$

$$\Delta U = \frac{1}{U} (r_0 \cos\varphi + x_0 \sin\varphi) \sum i L \times 100\%$$

式中  $l$ ——各段线路的长度(m);

$L$ ——从负载引出点至线路始端的线路长度(m)。

## 2. 单相线路

### (1) 单个负载线路

$$\Delta U = \frac{2Il(r_0 \cos\varphi + x_0 \sin\varphi)}{U} \times 100\%$$

### (2) 多个负载单相线路

$$\Delta U = \frac{2}{U} \sum I (r \cos\varphi + x \sin\varphi) \times 100\%$$

或

$$\Delta U = \frac{2}{U} \sum i (R \cos\varphi + X \sin\varphi) \times 100\%$$

(3) 当各段线路具有相同的  $r_0$ 、 $x_0$ , 并且负载的功率因数相同时, 则有

$$\Delta U = \frac{2}{U} (r_0 \cos\varphi + x_0 \sin\varphi) \sum I l$$

$$\Delta U = \frac{2}{U} (r_0 \cos\varphi + x_0 \sin\varphi) \sum i L$$

## 3. 电压损失数值表

在有关电气设计手册中列有电压损失数值表, 利用这种数值表能使工程设计计算简化。

$$\Delta U = -\frac{2}{U} (r_0 \cos \varphi + x_0 \sin \varphi) \sum I l \times 100\% = \Delta u \sum I l$$

$$\text{或} \quad \Delta U = -\frac{1}{U} (r_0 \cos \varphi + x_0 \sin \varphi) \sum I l \times 100\% = \Delta u \sum I l$$

式中  $\Delta u$ —— $\sum I l = 1 \text{ A} \cdot \text{km}$  时的电压损失

#### 4. 不计线路感抗时线路电压损失计算

(1) 单相线路 当线路导线截面、材料相同，各负载具有相同的功率因数时则有

$$\Delta U = \frac{2 \times 10^5}{U^2 S \gamma} \sum p L = \frac{1}{c S} \sum M$$

式中  $\gamma = \frac{1}{\rho}$ ——导线的电导率 ( $\text{m}/\Omega \cdot \text{mm}^2$ )， $\gamma$  可取平均值，

铜  $\gamma_{\text{Cu}} = 57.4$ ，铝  $\gamma_{\text{Al}} = 34.6$ ；

$L$ ——从负载到计算始端的线路长度 ( $\text{m}$ )；

$M = pL$ ——负荷力矩 ( $\text{kW} \cdot \text{m}$ )；

$S$ ——导线截面 ( $\text{mm}^2$ )；

$U$ ——相电压 ( $\text{V}$ )；

$c = \frac{\gamma U^2}{2 \times 10^5}$ ——系数，从表2-1求出。

#### (2) 带中性线的两相线路

$$\Delta U = \frac{1.5 \times 10^5}{2 U^2 \gamma S} p L = \frac{1}{c S} M$$

当为多个负载时则有

$$\Delta U = \frac{1}{c S} \sum M$$

式中  $\sum M = \sum pL$ ——其中  $p$  为接于线路中的两相上的各个负载， $L$  为从负载接出点至始端的线路长度。

#### (3) 负载平衡的三相线路

$$\Delta U = \frac{10^5}{3 U^2 \gamma S} p L = \frac{1}{c S} M$$

当有多个负载，且各段线路导线截面、材料相同、负载功率

因数相同时, 则有

表2-1 电压损失计算公式中系数c的数值

线路额定电压 (V)	线路系数	c的计算公式	c的数值	
			铜	铝
380/220	具有中性线的三相系统	$\frac{3\gamma U^2}{10^6}$	83	50
380/220	具有中性线的两相系统	$\frac{\gamma U^2}{0.75 \times 10^6}$	37	22
220	交流单相或直流两线系统	$\frac{\gamma U^2}{2 \times 10^6}$	14	8.3
110	交流单相或直流两线系统	$\frac{\gamma U^2}{2 \times 10^6}$	3.4	2.1
36			0.37	0.21
24			0.165	0.1
12			0.041	0.025
380/220	三相四线负载不平衡系统	$\frac{\gamma U^2}{10^6}$	28	16.6
36	三相系统	$\frac{\gamma U^2}{10^6}$	0.74	0.44

$$\Delta U = \frac{100}{3U^2\gamma S} \sum pL = \frac{1}{cS} \sum M$$

(4) 按导体材料最小消耗量求导线截面 当按照允许电压损失选择整个网络导线截面时, 其导线材料的消耗量最小。

在电阻性负载的线路中, 按导体材料最小消耗量求导线截面的简化公式为

$$S = \frac{\sum M + \sum \alpha m}{c \Delta U}$$

式中  $S$ ——所求线段导线截面 ( $\text{mm}^2$ );

$\sum M$ ——从所求线段的始端起, 沿电能传输方向所有连接线段的负荷力矩的总和, 这些连接线段的导线根数与所求线段的导线根数相同;

$\sum \alpha m$ ——由所求线段供电, 为有不同导线根数的所有支路

的负荷力矩的总和，在未总和以前，每个负荷力矩乘以负荷力矩系数 $\alpha$ ，其值列在表2-2中；

$\Delta U$ ——由所求线段始端起至线路终端所允许的电压损失值，以百分数表示。

表2-2 负荷力矩系数

线 路	支 序	系数 $\alpha$ 值
有中性线的三相线路	单相支线	1.83
有中性线的三相线路	有中性线的两相支线	1.37
有中性线的两相线路	单相支线	1.33
三相线路	两相支线	1.15

根据上式先计算线路始端线段导线截面，根据计算结果选用稍大的标准截面，选定了第一段导线截面后，再计算第一段线路的实际电压损耗 $\Delta U_1$ ，此后，进行第二段线路截面的计算，但允许的电压损失值为 $\Delta U - \Delta U_1$ ，第三段以后各段线路的计算与此相同。

(5) 负载不平衡时三相四线制线路电压损失计算

$$\Delta U_{pU1} = \frac{\sum M_{U1}}{cS_{U1}}$$

$$\Delta U_{pV1} = \frac{\sum M_{V1}}{cS_{V1}}$$

$$\Delta U_{pW1} = \frac{\sum M_{W1}}{cS_{W1}}$$

$$\Delta U_{NU1} = \frac{\sum M_{U1}}{cS_N}$$

$$\Delta U_{NV1} = \frac{\sum M_{V1}}{cS_N}$$

$$\Delta U_{NW1} = \frac{\sum M_{W1}}{cS_N}$$



式中  $\Delta U_{pU1}$ 、 $\Delta U_{pV1}$ 、 $\Delta U_{pW1}$ ——各相电流在各该相导线上引起的电压损失；

$\Delta U_{NU1}$ 、 $\Delta U_{NV1}$ 、 $\Delta U_{NW1}$ ——各相电流在中性线上引起的电压损失；

$\Sigma M_{U1}$ 、 $\Sigma M_{V1}$ 、 $\Sigma M_{W1}$ —— $U_1$ 、 $V_1$ 、 $W_1$ 各相的负荷力矩的总和， $\Sigma M = \Sigma pL$ ；

$S_{U1}$ 、 $S_{V1}$ 、 $S_{W1}$ 、 $S_N$ —— $U_1$ 、 $V_1$ 、 $W_1$ 各相线截面和中性线  $N$  截面；

$c = \gamma U^2 / 10^5$ ——系数，从表2-1中查出。

**例2-109** 在单个负载的三相线路中，其功率为30kW，线路电压为220V，电流为60A，功率因数为0.8，供电线路用长为30m截面积为25mm<sup>2</sup>的铝芯橡皮线，已知  $r_0 = 1.39\Omega/\text{km}$ ， $x_0 = 0.257\Omega/\text{km}$ ，求线路电压损失。

电压损失的百分数为

$$\begin{aligned} \Delta U &= \frac{Il(r_0 \cos \varphi_2 + x_0 \sin \varphi_2)}{U} \times 100 \\ &= \frac{60 \times 30(1.39 \times 0.8 + 0.257 \times 0.6)}{220} = 0.6\% \end{aligned}$$

**例2-110** 在图2-74所示的线路中， $p_1$ 、 $p_2$ 、 $p_3$ 各为750W的白炽灯，线路额定电压为220V，采用铝导线，截面为6mm<sup>2</sup>，线路长度第一段为20m，其余两段均为10m，求线路末端电压损失，不计线路感抗。

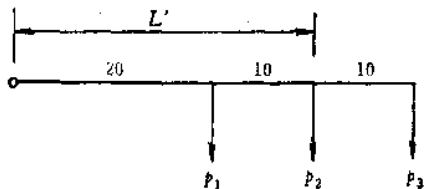


图2-74 三个负载的负荷力矩

从表2-1求出  $c = 8.3$ ，负荷力矩为

$$M = \sum pL = 0.75 \times 20 + 0.75 \times 30 + 0.75 \times 40 = 67.5 \text{ kW} \cdot \text{m}$$

负荷力矩也可用集中负荷  $p$  乘以负荷中心到线路始端的长度  $L'$  求得

$$M = pL' = 2.25 \times 30 = 67.5 \text{ kW} \cdot \text{m}$$

到线路末端的电压损失为

$$\Delta U = \frac{M}{cS} = \frac{67.5}{8.3 \times 6} = 1.36\%$$

例2-111 试计算如图2-75所示的照明网络的电压损失，图中  $AB$  线段（三相）长25m，导线截面为  $10\text{mm}^2$ ，分支线均为单相，导线截面为  $6\text{mm}^2$ ，分支线所接的各个照明负荷为  $1000\text{W}$ （白炽灯），由各个负荷分成的线段长度如图所示，网络电压为  $380\text{V}/220\text{V}$ ，所有线路为铝芯导线，不计线路感抗。

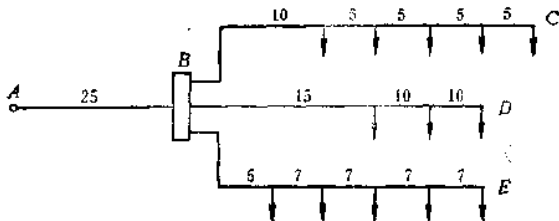


图2-75 照明网络的电压损失

先计算  $AB$  段的电压损失为

$$\Delta U_{AB} = \frac{\sum M}{cS} = \frac{13 \times 1 \times 25}{50 \times 10} = 0.65\%$$

$BC$  段的电压损失为

$$\begin{aligned} \Delta U_{BC} &= \frac{\sum M}{cS} \\ &= \frac{1}{8.3 \times 6} (1 \times 10 + 1 \times 15 + 1 \times 20 + 1 \times 25 + 1 \times 30) \\ &= 3.16\% \end{aligned}$$

分布负荷（指沿线路的各点负荷及其相互距离均相等）的负荷力矩可用负荷中心的等效负荷力矩来计算，以简化手续，所以

$BC$ 段的电压损失可用下式计算, 即

$$\Delta U_{BC} = \frac{1}{8.3 \times 6} \times 5 \times 1 \times (10 + 10) = 2.01\%$$

同样,  $BD$ 、 $BE$  线段的电压损失为

$$\Delta U_{BD} = \frac{1}{8.3 \times 6} \times 3 \times 1 \times (15 + 10) = 1.51\%$$

$$\Delta U_{BE} = \frac{1}{8.3 \times 6} \times 5 \times 1 \times (5 + 14) = 2.86\%$$

至线路末端的电压损失等于供电干线  $AB$  上的电压损失与分支线上的电压损失的总和, 例如  $AE$  支线 (电压损失最大) 末端的总电压损失为

$$\Delta U_{AE} = \Delta U_{AB} + \Delta U_{BE} = 0.65\% + 2.86\% = 3.51\%$$

例2-12 图2-76所示的供电系统图, 各线段的导线数量用短线表示, 负荷力矩、截面积及电压损失值的注脚表示线路的各线段, 系数  $c$  和  $\alpha$  的注脚分别表示线路的导线数量, 允许的电压损失为  $\Delta U$ , 求各线段的导线截面积。

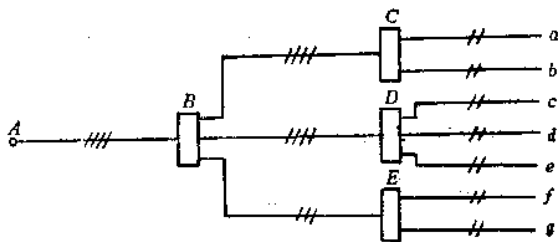


图2-76 供电系统图

线段  $AB$  的截面积为

$$S_{AB} = \frac{M_{AB} + M_{BC} + M_{BD} + \alpha_{43}(m_{BE} + m_{Ca}) + \alpha_{42}(m_{Cb} + m_{DC} + m_{DA} + \dots + m_{RE})}{c_A \Delta U}$$

线段  $AB$  上的电压损失为

$$\Delta U_{AB} = \frac{M_{AB}}{c_4 S_{AB}}$$

线段 BC 的截面积为

$$S_{BC} = \frac{M_{BC} + \alpha_{43} m_{Ca} + \alpha_{42} m_{Bb}}{c_4 (\Delta U - \Delta U_{AB})}$$

线段 BD、BE 的截面积为

$$S_{BD} = \frac{M_{BD} + \alpha_{42} (m_{DC} + m_{Dd} + m_{Df})}{c_4 (\Delta U - \Delta U_{AB})}$$

$$S_{BE} = \frac{M_{BE} + \alpha_{32} (m_{Ee} + m_{Eg})}{c_4 (\Delta U - \Delta U_{AB})}$$

线段 BC、BD、BE 上的电压损失为

$$\Delta U_{BC} = \frac{M_{BC}}{c_4 S_{BC}}$$

$$\Delta U_{BD} = \frac{M_{BD}}{c_4 S_{BD}}$$

$$\Delta U_{BE} = \frac{M_{BE}}{c_3 S_{BE}}$$

最末线段的截面积各为

$$S_{Ca} = \frac{M_{Ca}}{c_3 (\Delta U - \Delta U_{AB} - \Delta U_{BC})}$$

$$S_{Cb} = \frac{M_{Cb}}{c_2 (\Delta U - \Delta U_{AB} - \Delta U_{BC})}$$

$$S_{DC} = \frac{M_{DC}}{c_2 (\Delta U - \Delta U_{AB} - \Delta U_{BD})}$$

⋮

例2-113 图2-77所示的网络,各相导线截面积为 $10\text{mm}^2$ ,中性线截面积为 $6\text{mm}^2$ ,各相负荷,线路长度如图所示,网络电压为 $380\text{V}/220\text{V}$ ,电线为BX型,求各相至线路末端的电压损失。各相之负荷力矩为

$$\Sigma M_{U1} = 2 \times 80 + 1 \times 120 + 3 \times 160 = 760 \text{ k} \cdot \text{W} \cdot \text{m}$$

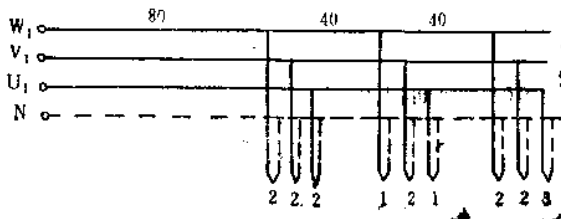


图2-77 网络电压损失

$$\Sigma M_{V1} = 2 \times 80 + 2 \times 120 + 2 \times 160 = 720 \text{ kW} \cdot \text{m}$$

$$\Sigma M_{W1} = 2 \times 80 + 1 \times 120 + 2 \times 160 = 600 \text{ kW} \cdot \text{m}$$

各相导线上的电压损失为

$$\Delta U_{\rho U1} = \frac{\Sigma M_{U1}}{cS_{U1}} = \frac{760}{28 \times 10} = 2.71\%$$

$$\Delta U_{\rho V1} = \frac{\Sigma M_{V1}}{cS_{V1}} = \frac{720}{28 \times 10} = 2.57\%$$

$$\Delta U_{\rho W1} = \frac{\Sigma M_{W1}}{cS_{W1}} = \frac{600}{28 \times 10} = 2.14\%$$

各相电流在中性线上引起的电压损失为

$$\Delta U_{NU1} = \frac{\Sigma M_{U1}}{cS_N} = \frac{760}{28 \times 6} = 4.52\%$$

$$\Delta U_{NV1} = \frac{\Sigma M_V}{cS_N} = \frac{720}{28 \times 6} = 4.29\%$$

$$\Delta U_{NW1} = \frac{\Sigma M_{W1}}{cS_N} = \frac{600}{28 \times 6} = 3.57\%$$

各相的电压损失为

$$\begin{aligned} \Delta U_{U1} &= \Delta U_{\rho U1} + \Delta U_{NU1} - 0.5(\Delta U_{NV1} + \Delta U_{NW1}) \\ &= 2.71 + 4.25 - 0.5 \times (4.29 + 3.57) = 3.03\% \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \Delta U_{V1} &= \Delta U_{\rho V1} + \Delta U_{NU1} - 0.5(\Delta U_{NU1} + \Delta U_{NW1}) \\ &= 2.57 + 4.29 - 0.5 \times (4.25 + 3.57) = 2.95\% \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \Delta U_{W1} &= \Delta U_{\rho W1} + \Delta U_{NW1} - 0.5(\Delta U_{NU1} + \Delta U_{NV1}) \\ &= 2.41 + 3.57 - 0.5 \times (4.52 + 4.29) = 1.58\% \end{aligned}$$

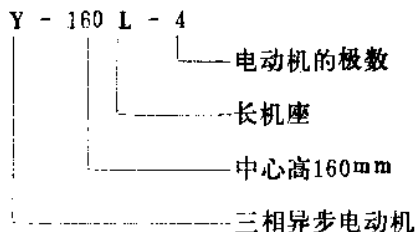
## 第三章 三相异步电动机<sup>⊖</sup>

### 第一节 三相异步电动机基本概念

#### 一、三相异步电动机铭牌意义、同步转速、转差率

##### 1. 三相异步电动机铭牌意义

(1) 型号 表示电动机的类型、结构特点、规格、性能等等，如：



(2) 额定功率  $P_N$  表示电动机在额定负载下运行时轴上输出的机械功率，单位用 kW 表示。而电动机的输入功率  $P_1$  是电功率，即

$$P_1 = \frac{P_N}{\eta_N}$$

或

$$P_1 = \sqrt{3} U_N I_N \cos \varphi_N$$

式中  $\eta_N$ ——电动机额定效率；

$I_N$ ——电动机额定电流(A)。

(3) 额定频率  $f_1$  指电动机电源的额定频率，我国  $f_1 = 50\text{Hz}$ ，美国是  $60\text{Hz}$ ，日本有  $50\text{Hz}$  和  $60\text{Hz}$ 。

(4) 额定电压  $U_N$  指施加在三相定子绕组上的线电压，我国有  $220, 380, 3000, 6000, 10000\text{V}$  几种，单位用 V 表示。

⊖ 在本章中，异步电动机专指感应电动机。

(5) 额定电流  $I_N$  指电动机在输出额定功率时的定子绕组线电流, 单位用 A 表示。

(6) 额定转速  $n_N$  指电动机在额定频率、额定电压下, 输出额定功率时的每分钟转速, 单位用 r/min 表示。

(7) 对于绕线转子异步电动机还标明转子额定电压  $U_{N2}$ 、转子额定电流  $I_{N2}$ , 均指线值。另外, 还有额定功率因数  $\cos\varphi_N$ 、额定效率  $\eta_N$ 、绕组接法、绝缘等级、温升、工作制、防护等级、噪声等级、出厂年月日等等。

## 2. 同步转速及转差率

三相交流电通入三相异步电动机定子三相对称绕组时, 就会形成三相合成磁动势, 同时产生三相旋转磁场, 此旋转磁场同时切割定子绕组和转子绕组, 分别在两个绕组中产生感应电动势。

当交流电流变化一周期, 三相合成磁动势在空间旋转  $360^\circ$  电角度, 当三相异步电动机有  $p$  对磁极时, 则三相旋转磁场的转速为  $n_1$ , 可按下式计算:

$$n_1 = \frac{60f}{p} \quad (r/min)$$

式中  $f$ ——电源频率 我国工频为 50Hz;

$p$ ——电动机的极对数。

三相旋转磁场的方向决定于三相绕组  $U_1$ 、 $V_1$ 、 $W_1$  中电流的相序, 当任意改变三相绕组中某相序时, 比如  $U_1$ 、 $V_1$ 、 $W_1$  改为  $V_1$ 、 $U_1$ 、 $W_1$ , 则  $n_1$  的旋转方向相反。另外, 三相合成磁动势的幅值恒定不变, 为每相脉动磁动势振幅的 1.5 倍。

三相旋转磁场的同步转速为  $n_1$ , 转子实际转速为  $n$ , 两者之间有一个转速差, 叫转差, 即  $\Delta n = n_1 - n$ , 这个转差再与同步转速  $n_1$  相除, 得出的值叫转差率  $s$ , 即

$$s = \frac{\Delta n}{n_1} = \frac{n_1 - n}{n_1}$$

有时用百分数表示, 即

$$s = \frac{n_1 - n}{n_1} \times 100\%$$

当电动机转速为额定转速  $n_N$  时，相应的转差率为额定转差率  $s_N$ ，即

$$s_N = \frac{n_1 - n_N}{n_1} \times 100\%$$

异步电动机必需有转差存在，如果转子转速也是同步转速  $n_1$ ，则  $s = 0$ ，这时互相合成旋转磁场不再切割转子导体，转子绕组中不能产生感应电动势，也无有感应电流，所以不存在转矩，电动机转速必需减慢下来，当  $n < n_1$  后，电动机才有转矩产生，电动机又转动起来。

当  $1 > s > 0$  时，为电动机运行状态；

当  $s < 0$  时，为发电机运行状态；

当  $s > 1$  时，为制动状态。

**例3-1** 一台国外三相异步电动机，额定频率  $60\text{Hz}$ ，电机极数  $2p = 8$ ，额定转速  $n_N = 875\text{r/min}$ ，求这台电动机的额定转差率  $s_N$  是多少。

同步转速为

$$n_1 = \frac{60f_1}{p} = \frac{60 \times 60}{4} = 900\text{r/min}$$

额定转差率为

$$s_N = \frac{n_1 - n_N}{n_1} \times 100\% = \frac{900 - 875}{900} \times 100\% = 2.78\%$$

**例3-2** 有一台绕线转子三相异步电动机，已知  $n_N = 1450\text{r/min}$ ， $f_1 = 50\text{Hz}$ ， $n_1 = 1500\text{r/min}$ ，求此台电动机的极对数  $p$  和转差率  $s$ 。

$$p = \frac{60f_1}{n_1} = \frac{60 \times 50}{1500} = 2$$

$$s = \frac{n_1 - n}{n_1} \times 100\% = \frac{1500 - 1450}{1500} \times 100\% = 3.3\%$$

**例3-3** 一台国外三相异步电动机，铭牌遗失，但知道频率是  $60\text{Hz}$ ，通入  $60\text{Hz}$  电源试验时，测出空载转速  $1756\text{r/min}$ ，问此



台电动机的极数  $2p$ 、 $n_1$  和  $s_N$  各是多少?

$$p = \frac{60f_1}{n_1} \approx \frac{60 \times 60}{1756} = 2.05$$

因空载试验,  $n$  与  $n_1$  相差很少, 所以用  $n$  代替  $n_1$  计算, 电动机的极数都是偶数、整数, 所以取  $p=2$ , 即四极电动机。

$$n_1 = \frac{60f_1}{p} = \frac{60 \times 60}{2} = 1800 \text{ r/min}$$

$$s_N = \frac{n_1 - n}{n_1} \times 100\% = \frac{1800 - 1756}{1800} \times 100\% = 2.44\%$$

**例3-4** JS114-4, 115kW 三相异步电动机, 已知  $2p=4$ ,  $s_N=1.48\%$ , 求这台电动机的额定转速  $n_N$ 。

由  $s_N = \frac{n_1 - n_N}{n_1}$  可求出  $n_N = n_1(1 - s_N)$ , 即

$$n_N = \frac{60f_1}{p}(1 - s_N) = \frac{60 \times 50}{2}(1 - 0.0148) = 1478 \text{ r/min}$$

**例3-5** 有一台 60Hz 三相异步电动机, 额定转速  $n_N=443 \text{ r/min}$ , 求此台电动机的极数  $2p$ ? 额定转差率  $s_N$  是多少。

用  $n_N$  近似代替同步转速  $n_1$  代入公式, 即

$$p = \frac{60f_1}{n_1} \approx \frac{60 \times 60}{443} = 8.12$$

取整数 8, 此台电动机极数  $2p=2 \times 8=16$  极

$$n_1 = \frac{60f_1}{2p} = \frac{60 \times 60}{8} = 450 \text{ r/min}$$

$$s_N = \frac{n_1 - n_N}{n_1} \times 100\% = \frac{450 - 443}{450} \times 100\% = 1.56\%$$

## 二、三相异步电动机转子电磁场转速和转子频率

由于定子绕组是静止的, 所以旋转磁场以同步转速  $n_1$  切割定子绕组时, 在定子绕组中产生感应电动势  $E_1$  的频率为电源电压频率  $f_1$ , 即 50Hz, 而转子绕组是以转速  $n$  旋转的, 与转子同方向以同步转速  $n_1$  旋转的旋转磁场切割转子绕组时, 由于相对运动,

转速是两者的转速差, 即  $\Delta n = n_1 - n = n_2$ , 因此在转子绕组中感应的电动势  $E_{2s}$  的频率为  $f_2$ , 不再是 50Hz, 即

$$\begin{aligned} f_2 &= \frac{pn_2}{60} = \frac{p}{60} (n_1 - n) = \frac{p}{60} (n_1 - n) \times \frac{n_1}{n_1} \\ &= \frac{pn_1}{60} \left( \frac{n_1 - n}{n_1} \right) = sf_1 \end{aligned}$$

当转子静止时, 即  $n = 0$  时, 则  $s = 1$ , 这时  $f_2 = f_1$ , 说明这时转子绕组中感应电动势的频率等于定子绕组感应电动势的频率, 也是 50Hz, 这时  $E_{2s} = sE_{20} = E_{20}$ , 即转子感应电动势大小等于电动机静止时的转子感应电动势  $E_{20}$ , 这时的  $E_{2s}$  最大,  $E_{2s}$  叫转子开路电动势, 铭牌上标出的转子电压就是此值。当  $n = n_1$  时,  $s = 0$ , 所以  $f_2 = 0$ ,  $E_{2s} = sE_{20} = 0$ 。

虽然旋转磁场以  $n_2$  速度切割转子绕组, 但转子旋转磁场相对于空间 (气隙) 的旋转速度应考虑转子本身的转速  $n$ , 即  $n_2 + n = (n_1 - n) + n = n_1$ , 这就说明转子和定子对空间的旋转磁场转速是相同的, 都是以  $n_1$  转速旋转, 且转速方向相同。

**例3-6** 有一台 JR115-10 三相异步电动机, 其功率为 45kW, 频率为 50Hz, 已知额定转差率  $s_N = 3.03\%$ , 求此台电动机的额定转速  $n_N$  和转子电动势频率  $f_2$  是多少。

从电动机型号知此台电动机极数为 10, 所以有

$$\begin{aligned} n_N &= \frac{60f_1}{p} (1 - s_N) = \frac{60 \times 50}{5} (1 - 0.0303) \\ &= 582 \text{ r/min} \end{aligned}$$

$$f_2 = sf_1 = 0.0303 \times 50 = 1.52 \text{ Hz}$$

可见电动机在正常运行时转子频率是很低的。

**例3-7** JZR2-42-8 三相异步电动机, 功率为 16kW, 频率为 50Hz, 已知额定转差率  $s_N = 4.5\%$ ,  $E_{20} = 209\text{V}$ , 求  $n_1$ 、 $f_2$ 、 $n_2$ 、 $E_{2s}$  各是多少。

$$n_1 = \frac{60f_1}{p} = \frac{60 \times 50}{4} = 750 \text{ r/min}$$

从铭牌电动机型号知此台电动机是8极的，所以极对数 $p = 4$ 。

$$f_2 = s_N f_1 = 0.045 \times 50 = 2.25 \text{ Hz}$$

转子磁场转速为

$$n_2 = \frac{60 f_2}{p} = \frac{60 \times 2.25}{4} = 33.75 \text{ r/min}$$

转子运行电动势为

$$E_{2r} = s_N E_{20} = 0.045 \times 207 = 9.32 \text{ V}$$

可见，转子正常运行时转子电动势是非常低的。

**例3-8** 有一台国外12极60Hz三相异步电动机，已知 $s_N = 3.5\%$ ，问 $n_1$ 、 $n_N$ 是多少，当 $n = 580 \text{ r/min}$ 时， $s$ 、 $f_2$ 为多少，当 $n = 650 \text{ r/min}$ 时， $s$ 、 $f_2$ 为多少。

$$n_1 = \frac{60 f_1}{p} = \frac{60 \times 60}{6} = 600 \text{ r/min}$$

$$n_N = n_1(1 - s_N) = 600(1 - 0.035) = 579 \text{ r/min}$$

当 $n = 580 \text{ r/min}$ 时则有

$$s = \frac{n_1 - n}{n_1} = \frac{600 - 580}{600} = 0.033$$

$$f_2 = s f_1 = 0.033 \times 60 = 1.98 \text{ Hz}$$

当 $n = 650 \text{ r/min}$ 时则有

$$s = \frac{n_1 - n}{n_1} = \frac{600 - 650}{600} = -0.083 \text{ (处于发电机状态)}$$

$$f_2 = s f_1 = -0.083 \times 60 = -4.98 \text{ Hz}$$

负号表示电流方向与电动机运行状态相反，处于发电机状态。

### 三、定子绕组及绕组系数计算

#### 1. 电角度、机械角

交流电每完成一个交变周期为 $360^\circ$ 电角度，一个极相对应的电角度为 $180^\circ$ 电角度，而电机内圆一个圆周为 $360^\circ$ 的机械角度，所以对于两极电机而言，电角度恰等于机械角度，即等于 $360^\circ$ ，但对于两对磁极（即4极电机）时，电角度变为 $2 \times 360^\circ$ ，机械角度 $360^\circ$ 不变，因此电角度 $\alpha$ 与机械角度之间有以下关系

$$\text{电角度} = p \times \text{机械角度} = 360^\circ p$$

$p$  是极对数，比如 6 极电机的电角度为  $p360^\circ = 3 \times 360^\circ = 1080^\circ$ 。

## 2. 槽距角、极距、节距、相带、每极每相槽数

槽距角是每槽之间所占的电角度，即

$$\alpha = \frac{p \times 360^\circ}{z_1}$$

极距是沿定子铁心内圆，每个磁极所占有的范围，一般用槽数表示，即

$$\tau = \frac{z_1}{2p}$$

如用长度表示时，极距为

$$\tau = \frac{\pi D_{f1}}{2p}$$

式中  $z_1$ ——定子槽数；

$D_{f1}$ ——定子铁心内圆；

$2p$ ——电机极数。

节距  $y$  是指一个线圈的两个有效边之间所跨过的槽数，当  $y = \tau$  时叫整距线圈； $y < \tau$  时叫短距线圈； $y > \tau$  时叫长距线圈。

相带 为使三相绕组对称，通常在安排绕组时是使每个极面下每相绕组所占的范围相等，这个范围称为相带。对于三相电机，通常每极面下每相绕组占有  $60^\circ$  电角度，称为  $60^\circ$  相带绕组，还有一种划分相带方法，将每一对极分三个等分，则每相占  $120^\circ$ ，称为  $120^\circ$  相带绕组，在变速电动机绕组中应用较多。

每极每相槽数  $q$  表示每个相带内所占有的槽数，即

$$q = \frac{z_1}{2pm_1}$$

式中  $m_1$ ——定子相数，一般  $m_1 = 3$ 。

当  $q$  为整数时，叫整数槽绕组，当  $q$  为分数时叫分数槽绕组，如  $q = 2\frac{1}{2} = 5/2$ 。

分数槽绕组又分为三相对称分数槽绕组和三相非对称分数槽

绕组，当  $q$  化为不可约分的假分数时，如分母是 3 或 3 的倍数，则称为非对称分数槽绕组，如  $q = 2\frac{1}{3} = 7/3$  时，是非对称分母槽绕组。

**例3-9** 一台三相异步电动机， $z_1 = 72$  槽， $y = 1 \sim 8$  槽，即  $y = 7$ ，判断此台电动机的极数是多少？

一般取  $y = 5\tau/6$ ， $\tau = 6 \times 7/5 = 8.9$ ，即

$$2p = \frac{z_1}{\tau} \approx \frac{72}{8.9} = 8.08$$

取整数，此台电动机的相数是 8。

**例3-10** Y225M-4 三相异步电动机，已知定子铁心内圆  $D_{i1} = 245 \text{ mm}$ ， $z_1 = 48$ ， $2p = 4$ ，求电动机的极距和每极每相槽数。

用槽表示时则有

$$\tau = \frac{z_1}{2p} = \frac{48}{4} = 12$$

用长度表示时则有

$$\tau = \frac{\pi D_{i1}}{2p} = \frac{\pi 245}{4} = 192.3 \text{ mm}$$

$$q_1 = \frac{z_1}{2pm_1} = \frac{48}{4 \times 3} = 4$$

**例3-11** 有一台三相异步电动机，定子槽数  $z_1 = 42$ ，转子槽数  $z_2 = 72$ ， $2p = 6$ ，求定、转子槽距角  $\alpha_1$  和  $\alpha_2$ ，每极每相槽数  $q_1$  和  $q_2$ 。

$$\alpha_1 = \frac{p360^\circ}{z_1} = \frac{3 \times 360^\circ}{42} = 25.7^\circ$$

$$\alpha_2 = \frac{p360^\circ}{z_2} = \frac{3 \times 360^\circ}{72} = 15^\circ$$

$$q_1 = \frac{z_1}{2pm_1} = \frac{42}{6 \times 3} = \frac{7}{3} = 2 \frac{1}{3}$$

$$q_2 = \frac{z_2}{2pm_1} = \frac{72}{6 \times 3} = 4$$

$q_1$  为非对称分数槽绕组。

### 3. 绕组系数

(1) 分布系数  $K_d$ 。电机绕组通常不是集中绕组，而是分布绕组，每极每相分布在  $q$  个槽内，相邻各线圈中的感应电动势不同相，依次错开一个槽距角  $\alpha$ ，因此分布绕组比集中绕组在相同匝数情况下，其感应的电动势要小，需要打上一个折扣系数，此系数叫分布系数 ( $K_{d1}$ )，对于基波的分布系数  $K_{d1}$  计算如下：

$$K_{d1} = \frac{\sin \frac{q\alpha}{2}}{q \sin \frac{\alpha}{2}}$$

对于高次谐波的分布系数  $K_{dv}$  计算如下：

$$K_{dv} = \frac{\sin \frac{v2\alpha}{2}}{q \sin \frac{v\alpha}{2}}$$

式中  $v$ ——为高次谐波次数，如  $v=3$ ，为三次谐波； $v=5$ ，为五次谐波。

**例3-12** 有一台 8 极三相异步电动机，定子槽数为 96，求基波、5 次、7 次谐波的分布系数。

先计算每极每相槽数  $q_1$  和电角度  $\alpha$ ：

$$q_1 = \frac{z_1}{2pm_1} = \frac{96}{8 \times 3} = 4$$

$$\alpha = \frac{p360}{z_1} = \frac{4 \times 360}{96} = 15^\circ$$

基波分布系数为

$$K_{d1} = \frac{\sin \frac{q\alpha}{2}}{q \sin \frac{\alpha}{2}} = \frac{\sin \frac{4 \times 15^\circ}{2}}{4 \sin \frac{15^\circ}{2}} = \frac{0.5}{0.522} = 0.958$$

五次谐波分布系数为

$$K_{d5} = \frac{\sin \frac{5 \times 4 \times 15^\circ}{2}}{4 \sin \frac{5 \times 15^\circ}{2}} = \frac{0.5}{2.44} = 0.205$$

七次谐波分布系数为

$$K_{d7} = \frac{\sin \frac{7 \times 4 \times 15^\circ}{2}}{4 \sin \frac{7 \times 15^\circ}{2}} = \frac{-0.5}{3.17} = -0.158$$

从计算结果看出，采用分布绕组虽然对基波磁动势略有削弱（<5%），但对5、7次谐波磁动势削弱非常大，因此对绕组消除高次谐波有好处。

(2) 短距系数  $K_p$ 。当  $y = \tau$  时称为整距线圈，当  $y < \tau$  时称为短距线圈，通常采用短距线圈，这对削弱高次谐波是有好处的，使磁动势波形更接近正弦形，但也像分布绕组一样将使感应电动势有些降低。把短距线圈与整距线圈所影响的电动势降低程度用短距系数表示，即基波短距系数  $K_{p1}$  为

$$K_{p1} = \sin(\beta \times 90^\circ)$$

高次谐波短距系数  $K_{pv}$  为

$$K_{pv} = \sin(v\beta \times 90^\circ)$$

式中  $\beta$ ——节距比， $\beta = y/\tau$ ；

$v$ ——高次谐波次数。

例3-13 一台  $2p = 4$  极三相异步电动机， $z_1 = 36$ ， $y = 7$ ，求基波和5次、7次谐波的短距系数。

基波短距系数为

$$K_{p1} = \sin(\beta \times 90^\circ) = \sin \frac{7}{9} \times 90^\circ = 0.940$$

式中 
$$\beta = \frac{y}{\tau} = \frac{7}{\frac{z_1}{2p}} = \frac{7}{\frac{36}{4}} = \frac{7}{9}$$

5次谐波短距系数为

$$\begin{aligned} K_{p5} &= \sin(\nu\beta \times 90^\circ) \\ &= \sin\left(5 \times \frac{7}{9} \times 90^\circ\right) = -0.174 \end{aligned}$$

7次谐波短距系数为

$$K_{p7} = \sin\left(7 \times \frac{7}{9} \times 90^\circ\right) = 0.76$$

通过绕组的分布和采用短距线圈，对合成磁动势的基波分量影响虽然略微减少，但对于各高次谐波磁动势削弱很多，因此使合成磁动势分布波形接近于正弦波，从而改善磁动势波形。

(3) 绕组系数  $K_{dp}$ 。分布系数与短距系数的乘积称为绕组系数，因为这两个系数都是对绕组合成磁动势（或感应电动势）有影响的，所以两个系数相乘对绕组同时产生影响。

基波绕组系数为

$$K_{dp1} = K_{p1} K_{d1} = \sin(\beta \times 90^\circ) \times \frac{\sin \frac{qa}{2}}{q \sin \frac{a}{2}}$$

高次谐波绕组系数为

$$K_{dp\nu} = K_{p\nu} K_{d\nu} = \sin(\nu\beta \times 90^\circ) \times \frac{\sin \frac{\nu qa}{2}}{q \sin \frac{\nu a}{2}}$$

**例3-14** 拟削弱绕组中5次和7次谐波，问线圈的节距选多大为宜？

为使5次谐波为零，应使短距系数  $K_{p5}$  为零，即

$$K_{p5} = \sin \nu \beta \times 90^\circ = \sin 5 \times \frac{y}{\tau} \times \frac{\pi}{2} = 0$$



为使此式为零，就应使  $5y\pi/2\tau = K\pi$ ，其中  $K$  为正整数，选择时应使  $y \approx \tau$ ，目的使线圈中感应电动势不可过小。现令  $K=2$ ，代入上式得：

$$5 \frac{y}{\tau} \frac{\pi}{2} = 2\pi$$

$$\therefore y = \frac{4}{5} \tau = 0.8\tau$$

为使 7 次谐波为零，应使 7 次谐波的短距系数为零。即

$$K_{p7} = \sin 7 \frac{y}{\tau} \times 90^\circ = \sin 7 \frac{y}{\tau} \frac{\pi}{2} = K\pi$$

选  $K=3$ ，则  $y/\tau = 6/7$ ，则有

$$y = \frac{6}{7} \tau = 0.857\tau$$

同时削弱 5、7 次谐波，可取平均值，即

$$y = \left( \frac{0.80 + 0.857}{2} \right) \tau = 0.828\tau$$

通常在选择短距线圈节距时，为什么选用  $y=0.83\tau$ ，就是这个原因。这时 5 次谐波的短距系数为

$$K_{p5} = \sin 5 \times 0.828 \times 90^\circ = 0.218$$

7 次谐波的短距系数为

$$K_{p7} = \sin 7 \times 0.828 \times 90^\circ = 0.315$$

#### 四、三相异步电动机损耗、功率及效率计算

##### 1. 三相异步电动机损耗

三相异步电动机是把电能经过电磁转换变成机械能，从轴上输出的电磁转换装置。在将电能变成机械能过程中要产生损耗，这些损耗以热能形式散发在周围空间。电动机从电源吸取的有功功率，称输入功率，用  $P_1$  表示，在电动机轴上输出的机械功率，称输出功率，用  $P_2$  表示，当电动机额定运行时， $P_2 = P_N$ ， $P_N$  即是电动机铭牌上的额定功率，单位用 kW 表示。

电动机从电源吸取电功率  $P_1$ ，由于定子绕组中有电流  $I_1$ （额

定运行时,  $I_1 = I_N$ ) 流过。因此产生定子铜耗  $P_{Cu1} = 3I_1^2 r_1$ , 旋转磁场在铁心中又产生铁耗 (磁滞损耗和涡流损耗), 用  $P_F$  表示。输入功率  $P_1$  减去  $P_{Cu1}$  和  $P_F$ , 剩下的电磁功率才通过气隙进入到转子中, 电磁功率用  $P_M$  表示, 即

$$P_M = P_1 - P_{Cu1} - P_F$$

进入到转子的电磁功率, 在转子绕组中感应出转子电动势和产生电流  $I_2$ , 所以转子绕组有铜耗产生, 用  $P_{Cu2}$  或  $P_{A1}$  表示。 $P_M$  减掉  $P_{Cu2}$  便是机械功率  $P_m$ , 机械功率  $P_m$  再去掉机械损耗  $p_m$  和附加损耗 (也称杂散损耗)  $p_s$ , 才是转轴上的输出功率  $P_2$ , 即

$$P_m = P_M - P_{Cu2} = (1 - s)P_M$$

$$P_{Cu2} = sP_M$$

$$P_2 = P_m - (p_m + p_s)$$

以上关系如图3-1所示。

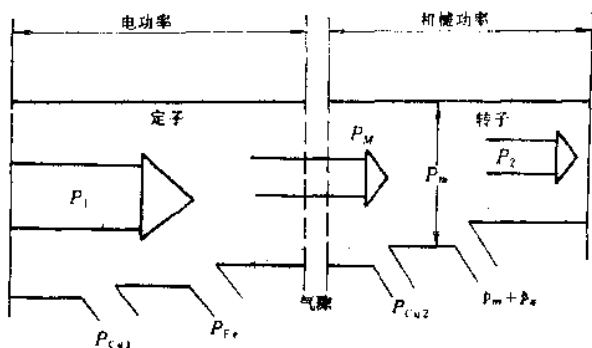
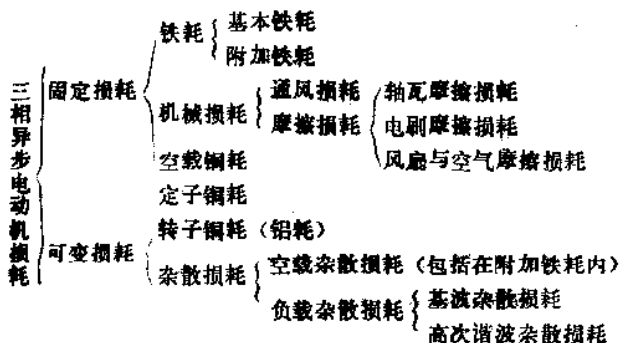


图3-1 交流电动机能量图

转子正常运行时频率非常低, 所以转子铁耗很小, 包括在定子铁耗中。

通过上面分析, 三相异步电动机内部的总损耗可归纳如下:



总的来看三相异步电动机共有 5 种损耗，

定子铜耗  $P_{Cu1}$ ；

转子铜 (或铝) 耗  $P_{Cu2}$ ；

铁耗  $P_{Fe}$ ；

机械损耗  $p_m$ ；

附加损耗 (或称杂散损耗)  $p_s$ ，即总损耗  $\Sigma P$  为

$$\Sigma P = P_{Cu1} + P_{Cu2} + P_{Fe} + p_m + p_s$$

当电动机处于空转时，无功率输出，即  $P_2$  为 0，所以效率为零，随输出功率增加，电机效率增加，当负载处于额定值附近时则有较高的效率。

由于电动机的铁耗和机械损耗以及空载铜耗，在电动机负载变化时，它们变化不大，故称为固定损耗，或称为不变损耗。而定、转子铜耗和与电流大小有关的附加损耗是随负载电流大小而变化的，故称为可变损耗。理论上，可变损耗与固定损耗相等时，电动机效率最高。

三相异步电动机的输入功率  $P_1$  可用下式计算：

$$P_1 = \sqrt{3} U_1 I_1 \cos\varphi_1 \times 10^{-3} (\text{kW})$$

式中  $U_1$ ——三相电源的线电压(V)；

$I_1$ ——电动机的线电流(A)；

$\cos\varphi_1$ ——电动机的功率因数。

$P_2$  去掉电动机的总损耗  $\Sigma P$  就是输出功率  $P_2$ ， $P_2$  可按下式

计算:

$$P_2 = \sqrt{3} U_1 I_1 \cos \varphi_1 \times \eta \times 10^{-3} \text{ (kW)}$$

即 
$$P_1 - P_2 = \Sigma P$$

由上可知, 欲使电动机总损耗  $\Sigma P$  降低, 则可使: 1) 在输出功率  $P_2$  恒定条件下, 可降低输入功率  $P_1$ ; 2) 在输入功率  $P_1$  恒定条件下, 可提高输出功率  $P_2$ , 即增容措施。

电动机内部功率损耗的大小是用效率来表征的, 即把输出功率  $P_2$  与输入电功率  $P_1$  的比值称为电动机的效率, 用  $\eta$  表示, 一般用百分数表示, 即

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} \times 100\%$$

或 
$$\eta = \frac{P_1 - \Sigma P}{P_1} \times 100\% = \left( 1 - \frac{\Sigma P}{P_1} \right) \times 100\%$$

$$= \frac{P_2}{P_2 + \Sigma P} \times 100\% = \left( 1 - \frac{\Sigma P}{P_2 + \Sigma P} \right) \times 100\%$$

一般中小型三相异步电动机的效率为 75% ~ 92%, 虽然本身效率较高, 但由于这类电动机台数多, 应用广, 能把电动机效率提高 0.5% ~ 3%, 全国节电数目也是可观的。

三相异步电动机的功率因数是表征异步电动机从电网输入的视在功率中真正消耗掉的有功功率所占比例, 即

$$\cos \varphi = \frac{P_1}{S}$$

式中  $S$  ——电动机从电源吸取的视在功率

$$S = 3U_{1\phi} I_{1\phi} \times 10^{-3} \text{ (kVA)}$$

式中  $U_{1\phi}$  ——异步电动机定子相电压(V);

$I_{1\phi}$  ——异步电动机定子相电流(A)。

功率因数大, 表明电源设备利用率高, 电动机有功电流分量占总电流的比例大, 有用功做的多, 电动机被充分利用, 通常希望电动机在运行时有较高的效率和较高的功率因数, 因此要控制负载大小, 使电动机运行在额定功率的 71% ~ 100% 范围内。

视在功率为

$$S = 3U_{1\phi} I_{1\phi} \times 10^{-3} = \sqrt{3} U_1 I_1 \times 10^{-3} \quad (\text{kVA})$$

无功功率为

$$Q = \sqrt{S^2 - P_1^2}$$

**例3-15** 有一台三相异步电动机, 已知  $U_N = 380\text{V}$ , 当电流为  $30\text{A}$  时,  $\cos\varphi$  为  $0.54$ , 求这台电动机的视在功率、有功功率  $P_1$  和无功功率  $Q$ 。

$$S = \sqrt{3} U_N I = \sqrt{3} \times 380 \times 30 \times 10^{-3} = 19.7 \text{ kVA}$$

$$P_1 = S \cos\varphi = 19.7 \times 0.54 = 10.6 \text{ kW}$$

$$Q = \sqrt{S^2 - P_1^2} = \sqrt{19.7^2 - 10.6^2} = 16.6 \text{ kvar}$$

**例3-16** Y315M3-6三相异步电动机, 已知  $U_N = 380\text{V}$ 、 $I_N = 244\text{A}$ ,  $\cos\varphi_N = 0.88$ , 额定输出功率  $P_N = 132\text{kW}$ , 求额定总损耗  $\Sigma P$ , 效率  $\eta_N$ 。如果因某种原因功率因数降为  $0.70$ , 试计算在同样的效率和  $I_N$  下, 可能输出的功率是多少。

输入功率为

$$\begin{aligned} P_1 &= \sqrt{3} U_N I_N \cos\varphi_N = \sqrt{3} \times 380 \times 244 \times 0.88 \times 10^{-3} \\ &= 141.3 \text{ kW} \end{aligned}$$

额定总损耗为

$$\Sigma P_N = P_1 - P_N = 141.3 - 132 = 9.3 \text{ kW}$$

电机效率为

$$\eta_N = \frac{P_N}{P_1} \times 100\% = \frac{132}{141.3} \times 100\% = 93.4\%$$

当  $\cos\varphi$  变为  $0.70$  时, 依题意, 则有

$$\begin{aligned} P_1' &= \sqrt{3} U_N I_N \cos\varphi = \sqrt{3} \times 380 \times 244 \\ &\quad \times 0.7 \times 10^{-3} = 112.4 \text{ kW} \end{aligned}$$

这时的输出功率为

$$P_2 = \eta_N P_1' = 0.88 \times 112.4 = 99 \text{ kW}$$

**例3-17** JRQ146-4三相异步电动机, 已知  $P_N = 430\text{kW}$ , 额定电压  $U_N = 3000\text{V}$ ,  $\cos\varphi_N = 0.88$ ,  $\eta_N = 93\%$ , 定子电阻  $r_1 = 0.292\Omega$ , 额定转差率  $s_N = 2.09\%$ , 空载电流  $I_0 = 25.5\text{A}$ ,  $P_2 =$

2.5 kW, 空载损耗  $P_0 = 12.3 \text{ kW}$ ,  $\gamma$  联结, 试求  $I_N$ 、 $P_{N1}$ 、 $P_{Cu1N}$ 、 $P_{Cu10}$ 、 $P_{Fe}$ 、 $P_m$ , 画出此台电动机的能量流程图。

额定电流为

$$I_N = \frac{P_N \times 10^3}{\sqrt{3} U_N \cos \varphi_N \eta_N}$$

$$= \frac{430 \times 10^3}{\sqrt{3} \times 3000 \times 0.88 \times 0.92} = 101 \text{ A}$$

额定负载时输入功率  $P_{N1}$  为

$$P_{N1} = \frac{P_N}{\eta_N} = \frac{430}{0.93} = 462.4 \text{ kW}$$

定子绕组中铜耗:

额定铜耗为

$$P_{Cu1N} = 3 I_N^2 r_1 = 3 \times 101^2 \times 0.292 = 8.9 \text{ kW}$$

空载铜耗为

$$P_{Cu10} = 3 I_0^2 r_1 = 3 \times 25.5^2 \times 0.292 = 0.60 \text{ kW}$$

因  $\gamma$  联结, 相电流等于线电流。

总损耗  $\Sigma P_N = P_{N1} - P_N = 462.4 - 430 = 32.4 \text{ kW}$

$$\Sigma P_N = P_{Cu1N} + P_{Cu2} + P_{Fe} + p_m + p_r \quad (3-1)$$

$$P_0 = P_{Fe} + p_m + P_{Cu10} \quad (3-2)$$

由式(3-1)可得:

$$32.4 = 8.9 + P_{Cu2} + P_{Fe} + p_m + 2.5$$

由式(3-2)可得:

$$12.3 = P_{Fe} + p_m + 0.60$$

$$P_{Fe} + p_m = 12.3 - 0.6 = 11.7 \text{ kW}$$

$$P_{Cu2} = 32.4 - 8.9 - (P_{Fe} + p_m) - 2.5 = 9.3 \text{ kW}$$

$$P_M = P_{Cu1} / s_N = \frac{9.3}{0.0209} = 445 \text{ kW}$$

由  $P_M = P_{N1} - P_{Cu1N} - P_{Fe}$  知:

$$P_{Fe} = P_{N1} - P_M - P_{Cu1N} = 462.4 - 445 - 8.9 \approx 8.5 \text{ kW}$$

机械损耗为

$P_m = P_M - P_{Cu2} - p_r - P_N = 445 - 9.3 - 2.5 - 430 = 3.2 \text{ kW}$   
 画出能量流程图, 如图3-2所示。

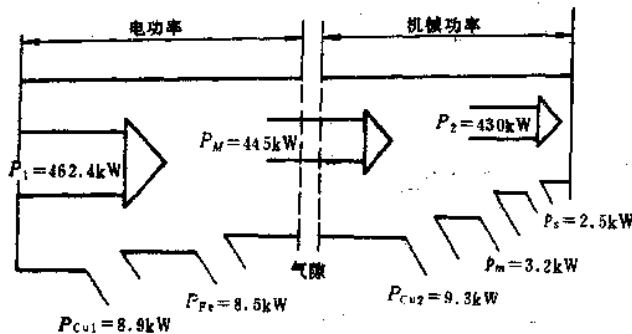


图3-2 能量流程图

例3-18 JO2-52-4 三相异步电动机, 功率为  $10 \text{ kW}$ ,  $U_N = 380 \text{ V}$ ,  $I_N = 19.74 \text{ A}$ , 已知  $P_{Cu1} = 509 \text{ W}$ ,  $P_{Cu2} = 334.6 \text{ W}$ ,  $P_{Fe} = 272.4 \text{ W}$ ,  $p_m = 100 \text{ W}$ ,  $p_r = 50 \text{ W}$ ,  $\cos\varphi = 0.867$ , 试求此台电动机的视在功率  $S$ 、输入功率  $P_1$ 、总损耗  $\Sigma P$ 、效率  $\eta$ 。

$$S = \sqrt{3} U_N I_N = \sqrt{3} \times 380 \times 19.74 \times 10^{-3} = 12.99 \text{ kW}$$

$$P_1 = S \cos\varphi = 12.992 \times 0.867 = 11.264 \text{ kW}$$

$$\begin{aligned} \Sigma P &= P_{Cu1} + P_{Cu2} + P_{Fe} + p_m + p_r \\ &= 509 + 324.6 + 272.4 + 100 + 50 = 1256 \text{ W} \end{aligned}$$

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} \times 100\% = \frac{10 \times 10^3}{11264} \times 100\% = 0.887\%$$

例3-19 Y132S1-2,  $P_N = 5.5 \text{ kW}$  三相异步电动机, 已知  $U_N = 380 \text{ V}$ ,  $\eta_N = 85.5\%$ ,  $\cos\varphi_N = 0.88$ ,  $n_N = 2900 \text{ r/min}$ , 求此台电动机视在功率  $S$ , 输入功率  $P_1$ , 无功功率  $Q$  和额定电流  $I_N$  各是多少。

$$I_N = \frac{P_N \times 10^3}{\sqrt{3} U_N \cos\varphi_N \eta_N} = \frac{5.5 \times 10^3}{\sqrt{3} \times 380 \times 0.88 \times 0.855}$$

$$\begin{aligned}
 &= 11.1 \text{ A} \\
 S &= \sqrt{3} U_N I_N = \sqrt{3} \times 380 \times 11.1 = 7.306 \text{ kVA} \\
 P_{1N} &= \sqrt{3} U_N I_N \cos \varphi_N = \sqrt{3} \times 380 \times 11.1 \times 0.88 \\
 &= 6.428 \text{ kW} \\
 Q &= \sqrt{S^2 - P_N^2} = \sqrt{7.306^2 - 6.428^2} \\
 &= 3.48 \text{ kvar}
 \end{aligned}$$

例3-20 工厂师傅估算电动机额定电流时，对三相异步电动机按每千瓦2A计算，对于单相电动机按每千瓦8A计算，这是什么原因？今有Y160M1-2电动机， $P_N = 11 \text{ kW}$ ， $U_N = 380 \text{ V}$ ；Y160L-4电动机， $P_N = 15 \text{ kW}$ ， $U_N = 380 \text{ V}$ ；单相JZ1B-2电动机， $P_N = 400 \text{ W}$ ， $U_N = 220 \text{ V}$ ；JY2A-4电动机， $P_N = 800 \text{ W}$ ， $U_N = 220 \text{ V}$ ，问它们的额定电流大约是多少。

对于三相异步电动机则有

$$\frac{I_N}{P_N} = \frac{10^3}{\sqrt{3} U_N \cos \varphi_N \eta_N} \quad (\text{A/kW})$$

对于中小型三相异步电动机平均 $\cos \varphi_N$ 和平均的 $\eta_N$ 均为0.87，这样代入上式得：

$$I_N/P_N = \frac{10^3}{\sqrt{3} \times 380 \times 0.87 \times 0.87} \approx 2 \text{ A/kW}$$

说明额定电压为380V的中小型三相异步电动机的额定电流可按每千瓦2A计算。所以三相异步电动机Y160M-2， $P_N = 11 \text{ kW}$ 的额定电流应是 $2 \times 11 = 22 \text{ A}$ （铭牌 $I_N = 22 \text{ A}$ ）；Y160L-4， $P_N = 15 \text{ kW}$ ，其额定电流应为 $2 \times 15 = 30 \text{ A}$ （铭牌为30A）。

对于单相异步电动机， $P_N = U_N I_N \cos \varphi_N \eta_N \times 10^{-3}$ ，则有

$$\frac{I_N}{P_N} = \frac{10^3}{U_N \cos \varphi_N \eta_N} \quad (\text{A/kW})$$

一般单相电动机的 $U_N = 220 \text{ V}$ ， $\cos \varphi_N$ 和 $\eta_N$ 平均为0.75，则有

$$\frac{I_N}{P_N} = \frac{10^3}{220 \times 0.75 \times 0.75} = 8.08 \approx 8 \text{ A/kW}$$



J21B-2 单相异步电动机,  $P_N = 400\text{W} = 0.4\text{kW}$ , 则额定电流为  $8 \times 0.4 = 3.2\text{A}$  (铭牌为 3A)

JY2A-4 单相异步电动机,  $P_N = 800\text{W} = 0.8\text{kW}$ , 则额定电流为  $8 \times 0.8 = 6.4\text{A}$  (铭牌为 6.7A)。

例 5-21 JS117-4 型  $180\text{kW}$  三相异步电动机, 已知  $U_N = 380\text{V}$ 、 $f_1 = 50\text{Hz}$ 、 $s_N = 1.51\%$ 、 $\cos\varphi_N = 0.89$ , 定子铜耗  $P_{Cu1} = 4760\text{W}$ , 铁耗  $P_{Fe} = 2960\text{W}$ , 机械损耗  $p_m = 1440\text{W}$ , 试计算电动机额定时的转速  $n_N$ 、电磁功率  $P_M$ 、转子铜耗  $P_{Cu2}$ 、额定效率  $\eta_N$ 、额定电流  $I_N$ 、转子频率  $f_2$  各是多少。

同步转速为

$$n_1 = \frac{60f_1}{2p} = \frac{60 \times 50}{4} = 1500\text{r/min}$$

电动机额定转速为

$$n_N = n_1(1 - s_N) = 1500(1 - 0.0151) = 1477\text{r/min}$$

电磁功率为

$$P_M = \frac{P_N + p_m}{1 - s_N} = \frac{180 + 1.44}{1 - 0.0151} = 184.2\text{kW}$$

转子铜耗为

$$P_{Cu2} = s_N P_M = 0.0151 \times 184.2 = 2.78\text{kW}$$

输入功率为

$$\begin{aligned} P_1 &= P_M + P_{Cu1} + P_{Fe} = 184.2 + 4.760 + 2.96 \\ &= 191.9\text{kW} \end{aligned}$$

额定效率为

$$\eta_N = \frac{P_N}{P_1} \times 100\% = \frac{180}{191.9} \times 100\% = 93.8\%$$

额定电流

$$\begin{aligned} I_N &= \frac{P_1}{\sqrt{3} U_N \cos\varphi_N} = \frac{191.9 \times 10^3}{\sqrt{3} \times 380 \times 0.89} \\ &= 327.6\text{A} \end{aligned}$$

转子频率为

$$f_2 = s_1 f_1 = 0.0151 \times 50 = 0.775 \text{ Hz}$$

例3-22 JS115-4型电动机，功率为110kW，额定电压为3kV，已知 $\eta_N = 90.8\%$ ，定子铜耗 $P_{Cu1} = 4\text{kW}$ 、铁耗 $P_{Fe} = 3.81\text{kW}$ ，额定转差率 $s_N = 1.48\%$ ，试求：1)电磁功率 $P_M$ ；2)机械功率 $P_m$ ；3)转子铜耗 $P_{Cu2}$ 各是多少。

输入功率为

$$P_1 = \frac{P_2}{\eta_N} = \frac{110}{0.908} = 121.1 \text{ kW}$$

电磁功率为

$$\begin{aligned} P_M &= P_1 - (P_{Cu1} + P_{Fe}) \\ &= 121.1 - (4 + 3.81) \\ &= 121.1 - 7.81 \\ &= 113.3 \text{ kW} \end{aligned}$$

机械功率

$$\begin{aligned} P_m &= (1 - s)P_M = (1 - 0.0148)113.3 \\ &= 111.6 \text{ kW} \end{aligned}$$

转子铜耗

$$\begin{aligned} P_{Cu2} &= sP_M = 0.0148 \times 113.3 \\ &= 1.68 \text{ kW} \end{aligned}$$

例3-23 JS127-6型165kW、6极笼型三相异步电动机，已知额定电压 $U_N = 3\text{kV}$ ，额定电流 $I_N = 40.2\text{A}$ ，50Hz，定子绕组为Y联结。电动机额定运行时，定子铜耗 $P_{Cu1} = 5.38\text{kW}$ ，转子铜耗 $P_{Cu2} = 4.08\text{kW}$ ，铁耗 $P_{Fe} = 5.4\text{kW}$ ，机械损耗 $p_m = 1.65\text{kW}$ ，附加损耗 $p_s = 0.825\text{kW}$ 。试求：(1)额定转速 $n_N$ ；(2)空载转矩；(3)电磁转矩各是多少。

电磁功率为

$$\begin{aligned} P_M &= P_N + P_{Cu2} + p_m + p_s \\ &= 165 + 4.08 + 1.65 + 0.825 \\ &= 171.6 \text{ kW} \end{aligned}$$

额定转差率为

$$s_N = \frac{P_{Cu2}}{P_M} = \frac{4.08}{171.6} = 0.0238$$

所以电动机额定转速 $n_N$ 为

$$\begin{aligned} n_N &= n_1(1 - s_N) \\ &= \frac{60f}{p} (1 - 0.0238) = \frac{60 \times 50}{3} \\ &\quad \times 0.976 = 976.2 \text{ r/min} \end{aligned}$$

空载转矩为

$$\begin{aligned} T_0 &= 9550 \frac{P_m + P_f}{n_N} = 9550 \times \frac{1.65 + 0.825}{976.2} \\ &= 24.2 \text{ N}\cdot\text{m} \end{aligned}$$

电磁转矩为

$$T = 9550 \frac{P_M}{n_1} = 9550 \times \frac{171.65}{1000} = 163.9 \text{ N}\cdot\text{m}$$

而

$$n_1 = \frac{60f}{p} = \frac{60 \times 50}{3} = \frac{3000}{3} = 1000 \text{ r/min}$$

**例3-24** 一台 J2-82-4、55kW 三相异步电动机已知  $\eta_N = 93\%$ ，定子铜耗  $P_{Cu1} = 1.65\text{kW}$ ，铁耗  $P_{Fe} = 0.987\text{kW}$ ，额定转差率  $s_N = 1.64\%$ ，试计算电动机的电磁功率  $P_M$ 、转子铜耗  $P_{Cu2}$  及机械功率  $P_m$  各是多少。

电磁功率为

$$\begin{aligned} P_M &= \frac{P_N}{\eta_N} - P_{Cu1} - P_{Fe} \\ &= \frac{55}{0.93} - 0.987 - 1.65 = 56.5 \text{ kW} \end{aligned}$$

转子铜耗为

$$\begin{aligned} P_{Cu2} &= s_N P_M = 0.0164 \times 56.5 \\ &= 0.927 \text{ kW} \end{aligned}$$

机械功率为

$$P_M = (1 - s_N)P_M \\ = (1 - 0.0164) \times 56.5 = 55.6 \text{ kW}$$

**例3-25** 有一台185kW 6极笼型三相异步电动机, 额定电压为380V, 额定电流为327A, 已知各种损耗和参数值如下: 定子铜耗 $P_{Cu1} = 4.46 \text{ kW}$ , 铁耗 $P_{Fe} = 3.78 \text{ kW}$ , 转子铜耗 $P_{Cu2} = 3.34 \text{ kW}$ , 机械损耗 $p_m = 1 \text{ kW}$ , 附加损耗 $p_s = 1.3 \text{ kW}$ , 定子每相电阻 $r_1 = 0.0393 \Omega$ , 转子每相电阻(折合到定子边) $r_2' = 0.024 \Omega$ , 定子电抗 $X_1 = 0.22 \Omega$ , 转子电抗(折合到定子边) $X_2' = 0.24 \Omega$ 。

当电动机起动时, 由于集肤效应影响,  $X_1 = 0.182 \Omega$ ,  $X_2'' = 0.175 \Omega$ ,  $r_2'' = 0.048 \Omega$ 。试求: (1) 额定负载时电动机额定转速 $n_N$ , 电磁功率 $P_M$ , 额定转差率 $s_N$ , 电磁转矩 $T_N$ 、输入功率 $P_1$ 和额定效率 $\eta_N$ ; (2) 最大转矩倍数 $K_\lambda$  (也就是过载能力) 和起动转矩倍数 $K_T$  是多少。

电磁功率为

$$P_M = P_N + P_{Cu1} + p_m + p_s \\ = 185 + 3.34 + 1.0 + 1.3 = 190.6 \text{ kW}$$

额定转差率为

$$s_N = \frac{P_{Cu2}}{P_M} = \frac{3.34}{190.6} = 0.0175$$

额定转速为

$$n_N = (1 - s_N) \frac{60f}{p} = (1 - 0.0175) \frac{60 \times 50}{3} \\ = 983 \text{ r/min}$$

额定转矩为

$$T_N = \frac{P_M}{\frac{2\pi f}{p}} = \frac{3 \times 190.6}{2\pi \times 50} = 1821 \text{ N}\cdot\text{m}$$

输入功率为

$$P_1 = P_M + P_{Cu1} + P_{Fe}$$

$$= 190.6 + 4.46 + 3.78$$

$$= 198.8 \text{ kW}$$

额定功率为

$$\eta_N = \frac{P_N}{P_1} \times 100\%$$

$$= \frac{185}{198.8} \times 100\%$$

$$= 93.1\%$$

最大转矩  $T_{\max}$  为

$$T_{\max} = \frac{mpU_1^2}{4\pi f[r_1 + \sqrt{r_1^2 + (X_1 + X_2')^2}]^2}$$

$$= \frac{3 \times 3 \times 380^2}{4\pi \times 50 [0.0393 + \sqrt{0.0393^2 + (0.22 + 0.24)^2}]^2}$$

$$= 4138.9 \text{ N}\cdot\text{m}$$

过载能力为

$$K_\lambda = \frac{T_{\max}}{T_N} = \frac{4138.9}{1821} = 2.48$$

起动转矩  $T_{st}$  为

$$T_{st} = \frac{mpU_1^2 r_2''}{2\pi f[(r_1 + r_2'')^2 + (X_1 + X_2'')^2]}$$

$$= \frac{3 \times 3 \times 380^2 \times 0.048}{2\pi \times 50 [(0.0393 + 0.048)^2 + (0.182 + 0.175)^2]}$$

$$= 1352.6 \text{ N}\cdot\text{m}$$

起动转矩倍数  $K_T$  为

$$K_T = \frac{T_{st}}{T_N} = \frac{1352.6}{1821} = 0.743$$

### 五、交流绕组电动势及电流计算

三相旋转磁场的同步转速  $n_1$  切割定子绕组，于是在定子绕组中感应电动势  $E_1$ ，即

$$E_1 = 4.44 f_1 N_1 K_{c\phi 1} \Phi \quad (\text{V})$$

式中  $K_{c\phi 1}$ ——定子基波绕组系数；  
 $f_1$ ——电源频率(Hz)；  
 $N_1$ ——定子每相绕组串联匝数；  
 $\Phi$ ——每极磁通量(Wb)。

而

$$N_1 = \frac{2pqN_s}{a}$$

式中  $2p$ ——电动机极数；  
 $q$ ——每极每相槽数；  
 $N_s$ ——线圈串联匝数；  
 $a$ ——并联支路数。

基波磁动势幅值为

$$F_1 \approx 1.35 \frac{N_1 K_{c\phi 1}}{p} I \quad (\text{A/极})$$

式中  $I$ ——相电流(A)。

$\nu$ 次谐波磁动势幅值为

$$F_\nu = 1.35 \frac{N_1 K_{c\nu p}}{\nu p} I \quad (\text{A/极})$$

转向由式 $(6K \pm 1)$ 来判断，取+时与基波磁动势同向，取-时则与基波磁动势相反，其转速为

$$n_\nu = \frac{n_1}{\nu}$$

$K$ 为正整数，设 $K = \pm 1$ ，则 $6K \pm 1 = 7 \sim 5$ ，取+时是7，即7次谐波磁动势与基波磁动势转向相同，取-时为5，说明5次谐波磁动势与基波磁动势转向相反。

对于具体电机， $K_{c\phi 1}$ 和 $N_1$ 是固定的，电源频率 $f_1$ 也很少变化，所以电机气隙每极主磁通量 $\Phi$ 仅取决于 $E_1$ 。另外外施电压 $U$ 与 $E_1$ 值接近，如果认为 $U \approx E_1$ ，则 $\Phi$ 仅取决于外施电源电压 $U$ 。

由于定子绕组静止，所以绕组中感应电动势 $E_1$ 的频率就是

电源频率  $f_1$ 。

**例3-26** 有一台 60Hz 三相异步电动机, 已知  $E_1 = 230\text{V}$ ,  $N_1 = 340$  匝,  $K_{sp1} = 0.96$ , 问气隙每极磁通量  $\Phi$  是多少。

由式  $E_1 = 4.44f_1 N_1 K_{sp1} \Phi$  可知。

$$\begin{aligned}\Phi &= \frac{E_1}{4.44f_1 N_1 K_{sp1}} \\ &= \frac{230}{4.44 \times 50 \times 340 \times 0.96} \\ &= 0.00317\text{Wb}\end{aligned}$$

当转子静止不动时, 旋转磁场以  $n_1$  转速切割转子绕组, 在其感应出转子感应电动势  $E_{20}$  为

$$E_{20} = 4.44f_1 K_{sp2} N_2 \Phi (\text{V})$$

式中  $K_{sp2}$ ——转子绕组系数;

$N_2$ ——转子绕组每相串联匝数。

这时转子绕组的感应电动势频率仍是  $f_1$ , 即

$$f_2 = \frac{pn_1}{60} = \frac{p}{60} \left( \frac{60f_1}{p} \right) = f_1$$

这时转子感应电流  $I_{20}$  为

$$I_{20} = \frac{E_{20}}{\sqrt{r_2^2 + X_{20}^2}}$$

式中  $X_{20}$ ——转子静止时, 转子绕组每相感的电抗,  $X_{20} = 2\pi f_1 L_2$ ;

$L_2$ ——转子绕组自感系数;

$r_2$ ——转子每相绕组电阻。

这时转子功率因数  $\cos \varphi_{20}$  为

$$\cos \varphi_{20} = \frac{r_2}{\sqrt{r_2^2 + X_{20}^2}}$$

当转子以转速  $n$  旋转时 ( $n < n_1$ ), 这时旋转磁场则以转速差  $n_1 - n$  的转速切割转子绕组, 所以这时转子绕组频率为  $f_2$ , 即

$$f_2 = \frac{p(n_1 - n)}{60}$$

$$= \frac{pn_1}{60} \left( \frac{n_1 - n}{n_1} \right)$$

$$= sf_1$$

说明转子转动时的电动势的频率  $f_2$  与转差率  $s$  成正比, 当电动机停止时,  $n=0, s=1$ , 则  $f_2=f_1$ ; 当电动机转子以  $n_1$  转速转动时,  $s = \frac{n_1 - n}{n_1} = \frac{n_1 - n_1}{n_1} = 0$ , 所以  $f_2=0$ ; 正常运转情况  $s=0.02 \sim 0.06$ , 则  $f_2 = sf_1 = (0.02 \sim 0.06)50 = 1 \sim 3\text{Hz}$ , 说明电动机在正常运行时转子频率很低, 因此能量流程图中把损耗全归纳在定子部分内。

当电动机正常运转时, 转子感应电动势  $E_2$  为

$$E_1 = 4.44f_2 N_2 K_{A2} \Phi$$

$$= s(4.44f_1 K_{A2} N_2 \Phi)$$

$$= sE_{20}$$

当  $s$  在  $0.02 \sim 0.06$  范围内时,  $E_2 = (0.02 \sim 0.06)E_{20}$ , 也是非常低的。

这时转子电抗  $X_2 = 2\pi f_2 L_2 = 2\pi s f_1 L_2 = sX_{20}$

转子电流  $I_2$  为

$$I_2 = \frac{E_{20}}{\sqrt{r_2^2 + X_2^2}} = \frac{sE_{20}}{\sqrt{r_2^2 + (sX_{20})^2}}$$

当  $s=0$  时,  $I_2=0$ ; 当  $s$  很小时,  $r_2 \gg sX_{20}$

$I_2 \approx \frac{sE_{20}}{r_2}$ , 即  $I_2$  与  $s$  近似成正比, 当  $s$  接近 1 时,  $sX_{20} \gg r_2$ ,

$I_2 = \frac{E_{20}}{X_{20}}$  是常数。

转子功率因数  $\cos \varphi_2$  为

$$\cos \varphi_2 = \frac{r_2}{\sqrt{r_2^2 + X_2^2}} = \frac{r_2}{\sqrt{r_2^2 + (sX_{20})^2}}$$



当  $s$  很小时,  $r_2 \gg sX_{20}$ , 所以  $\cos\varphi_2 \approx 1$ , 当  $s$  接近 1 时,

$\cos\varphi_2 = \frac{r_2}{sX_{20}}$ , 即  $\cos\varphi_2$  与  $s$  近似成双曲线关系。

**例3-27** 有一台三相异步电动机, 已知定子绕组每相匝数  $N_1 = 104$ , 转子绕组每相匝数  $N_2 = 96$ , 定子绕组基波绕组系数  $K_{A\phi 1} = 0.96$ , 转子绕组基波绕组系数  $K_{A\phi 2} = 0.94$ , 每极主磁通量  $\Phi = 0.0216 \text{ Wb}$ , 电源频率  $50 \text{ Hz}$ , 试求当转子静止时 ( $n = 0$ ,  $s = 1$ ) 和转子以转差率  $s = 0.031$  旋转时, 定子和转子绕组中感应电动势。

$$\begin{aligned} E_1 &= 4.44f_1 N_1 K_{A\phi 1} \Phi \\ &= 4.44 \times 50 \times 104 \times 0.96 \times 0.0216 \\ &\approx 478.8 \text{ V} \end{aligned}$$

当转子静止时, 转子感应电动势  $E_{20}$  为

$$\begin{aligned} E_{20} &= 4.44f_1 K_{A\phi 2} N_2 \Phi \\ &= 4.44 \times 50 \times 0.94 \times 96 \times 0.0216 \\ &= 432.7 \text{ V} \end{aligned}$$

当转子以转差率  $s = 0.031$  转速旋转时, 转子感应电动势  $E_2$  为

$$E_2 = sE_{20} = 0.031 \times 432.7 = 13.4 \text{ V}$$

**例3-28** 有一台  $440 \text{ V}$ 、 $60 \text{ Hz}$  三相异步电动机定子为  $\text{Y}$  联结, 已知每极磁通量  $\Phi = 0.022 \text{ Wb}$ , 定子绕组系数  $K_{A\phi 1} = 0.96$ , 绕组电压降为  $10\%$ , 求定子绕组每相线圈串联匝数  $N_1$ 。

由  $E_1 = 4.44f_1 N_1 K_{A\phi 1} \Phi$  可知:

$$\begin{aligned} N_1 &= \frac{E_1}{4.44f_1 K_{A\phi 1} \Phi} \\ &= \frac{0.9 \times 440 / \sqrt{3}}{4.44 \times 60 \times 0.96 \times 0.022} \\ &= \frac{228.6}{5.63} \\ &\approx 40.6 \text{ 匝} \end{aligned}$$

**例3-29** 有一台冶金起重三相异步电动机，功率为22kW，额定电压为380V，已知转子电阻 $R_2 = 0.065\Omega$ ，转子静止时电抗 $X_{20} = 0.045\Omega$ ，静止时感应电动势 $E_{20} = 204.5V$ ，额定转差率 $s_N = 4.4\%$ ，求：（1）转子额定电流 $I_{N2}$ ；（2）转子额定电流时的相位差角；（3）转子静止时的转子电流；（4）转子静止时的相位差角。

$$\begin{aligned} I_{N2} &= \sqrt{\frac{sE_{20}^2}{R_2^2 + sX_{20}^2}} \\ &= \frac{0.044 \times 204.5}{\sqrt{0.065^2 + (0.044 \times 0.045)^2}} \\ &\approx \frac{0.044 \times 204.5}{0.065} \\ &= 138.3A \end{aligned}$$

$$\operatorname{tg} \varphi_2 = \frac{sX_{20}}{R_2} = \frac{0.044 \times 0.045}{0.065} = 0.03$$

$$\therefore \varphi_2 = \operatorname{tg}^{-1} 0.03 = 1.72^\circ$$

$$\begin{aligned} I_2 &= \frac{E_{20}}{\sqrt{R_2^2 + X_{20}^2}} = \frac{204.5}{\sqrt{0.065^2 + 0.045^2}} \\ &= 2588.6A \end{aligned}$$

$$\operatorname{tg} \varphi_{20} = \frac{X_{20}}{R_2} = \frac{0.045}{0.065} = 0.69$$

$$\therefore \varphi_{20} = \operatorname{tg}^{-1} 0.69 = 34.7^\circ$$

**例3-30** 有一台60Hz、 $2p = 4$ 极三相异步电动机，已知转子绕组电阻 $r_2 = 0.025\Omega$ ，静止时转子电抗 $X_{20} = 0.078\Omega$ ，定、转子每相电动势之比 $E_1/E_{20} = 14$ ，当 $E_1 = 200V$ 时，求：1) 转子静止时，转子绕组每相的 $E_{20}$ 、 $I_{20}$ 、 $\cos\varphi_{20}$ ；2) 在额定负载时的转子绕组每相的 $E_2$ 、 $I_2$ 、 $\cos\varphi_2$ 各为多少。

$$E_{20} = \frac{E_1}{14} = \frac{200}{14} = 14.3V$$

$$I_{20} = \frac{E_{20}}{\sqrt{r_2^2 + X_{20}^2}}$$

$$= \frac{14.3}{\sqrt{0.025^2 + 0.078^2}}$$

$$= 0.0819\text{A}$$

$$\cos \varphi_{20} = \frac{r_2}{\sqrt{r_2^2 + X_{20}^2}}$$

$$= \frac{0.025}{\sqrt{0.025^2 + 0.078^2}}$$

$$= 0.305$$

$$n_1 = \frac{60f_1}{p} = \frac{60 \times 60}{2} = 1800\text{r/min}$$

$$s_N = \frac{n_1 - n_N}{n_1} \times 100\%$$

$$= \frac{1800 - 1750}{1800} \times 100\%$$

$$= 2.8\%$$

$$E_2 = s_N E_{20} = 0.028 \times 14.3 = 0.397\text{V}$$

$$X_2 = s_N X_{20} = 0.028 \times 0.078 = 0.0022\Omega$$

$$I_2 = \frac{E_2}{\sqrt{r_2^2 + X_2^2}}$$

$$= \frac{0.397}{\sqrt{0.025^2 + 0.0022^2}} = 13.2\text{A}$$

$$\cos \varphi_2 = \frac{r_2}{\sqrt{r_2^2 + X_2^2}}$$

$$= \frac{0.025}{\sqrt{0.025^2 + 0.0022^2}} = 0.99$$

例3-31 一台四极三相异步电动机，已知线圈串联匝数 $N$ 为10，线圈跨距（节距） $y = 5\tau/6$ ，并联支路数 $a = 1$ ，电源频率 $f_1 = 50\text{Hz}$ ， $Z_1 = 48$ 槽，三相对称电流为25A，试求三相合成的

基波、三次、五次和七次谐波的磁动势幅值及转速是多少。

每极每相槽数为

$$q = \frac{Z_1}{2pm_1} = \frac{48}{4 \times 3} = 4$$

槽距角为

$$\alpha = \frac{p360^\circ}{Z_1} = \frac{2 \times 360}{48} = 15^\circ$$

基波短距系数为

$$K_{p1} = \sin \frac{y}{\tau} 90^\circ = \sin \frac{5}{6} \times 90^\circ = 0.966$$

基波分布系数为

$$K_{d1} = \frac{\sin \frac{q\alpha}{2}}{q \sin \frac{\alpha}{2}} = \frac{\sin \frac{4 \times 15^\circ}{2}}{4 \sin \frac{15^\circ}{2}}$$

$$= \frac{0.5}{0.522} = 0.958$$

基波绕组系数为

$$K_{dp1} = K_{p1} K_{d1} = 0.966 \times 0.958$$

$$= 0.925$$

每相串联匝数为

$$N_1 = \frac{2pqN_s}{a} = \frac{4 \times 4 \times 10}{1} = 160$$

基波磁动势幅值  $F_1$  为

$$F_1 = 1.35 \frac{N_1 K_{dp1}}{p} I = 1.35 \frac{160 \times 0.958}{2} \times 25$$

$$= 2586.6 \text{ A/极}$$

基波转速  $n_1$  为

$$n_1 = \frac{60f_1}{p} = \frac{60 \times 50}{2} = 1500 \text{ r/min}$$

三相对称绕组通入三相对称电流时，在空间的三次谐波磁动

势为零，故  $F_5 = 0$ ， $n_5 = 0$ 。

五次谐波绕组短距系数  $K_{p5}$  为

$$K_{p5} = \sin \nu \frac{y}{\tau} 90^\circ = \sin 5 \times \frac{5}{6} \times 90 = 0.259$$

五次谐波绕组分布系数  $K_{d5}$  为

$$\begin{aligned} K_{d5} &= \frac{\sin \frac{\nu q \alpha}{2}}{q \sin \frac{\nu \alpha}{2}} = \frac{\sin \frac{5 \times 4 \times 15^\circ}{2}}{4 \sin \frac{5 \times 15^\circ}{2}} \\ &= \frac{0.5}{2.435} = 0.205 \end{aligned}$$

五次谐波绕组系数  $K_{d p 5}$  为

$$K_{d p 5} = K_{p 5} K_{d 5} = 0.259 \times 0.205 = 0.053$$

五次谐波磁动势  $F_5$  为

$$\begin{aligned} F_5 &= 1.35 \frac{N_1 K_{d p 5}}{\nu p} \times I = 1.35 \frac{160 \times 0.053}{5 \times 2} \times 25 \\ &= 28.6 \text{ A/极} \end{aligned}$$

$n_5$  与  $n_1$  方向相反，所以五次谐波同步转速为

$$n_5 = -n_1 / \nu = -\frac{1500}{5} = -300 \text{ r/min}$$

七次谐波绕组短距系数  $K_{p7}$

$$K_{p7} = \sin \nu \frac{y}{\tau} 90^\circ = \sin 7 \times \frac{5}{6} \times 90^\circ = 0.259$$

其分布系数  $K_{d7}$  为

$$\begin{aligned} K_{d7} &= \frac{\sin \frac{\nu q \alpha}{2}}{q \sin \frac{\nu \alpha}{2}} = \frac{\sin \frac{7 \times 4 \times 15^\circ}{2}}{4 \sin \frac{7 \times 15^\circ}{2}} \\ &= \frac{\sin 210^\circ}{4 \sin 52.5^\circ} = \frac{-0.5}{3.173} = -0.157 \end{aligned}$$

七次谐波绕组系数 $K_{dp7}$ 为

$$K_{dp7} = K_{p7}K_{d7} = 0.259 \times 0.157 \\ = 0.041$$

$$F_7 = 1.35 \frac{N_1 K_{dp7}}{pp} \times I \\ = 1.35 \frac{160 \times 0.041}{7 \times 2} \times 25 \\ = 15.8 \text{ A/极}$$

例3-32 Y132M2-6三相异步电动机功率为5.5kW，额定电压为380V，50Hz， $\Delta$ 联结，已知 $Z_1 = 36$ 槽，单层整距绕组，并联支路数为1，每槽每线圈匝数 $N_c = 42$ 匝， $\eta = 85.3\%$ ， $\cos\varphi = 0.78$ ，试求：（1）基波、五次谐波和七次谐波绕组系数；（2）输入功率 $P_1$ 和额定电流 $I_N$ ；（3）每极基波磁通量。

每极每相槽数为

$$q = \frac{Z_1}{2pm} = \frac{36}{6 \times 3} = 2$$

槽距角为

$$\alpha = \frac{p360^\circ}{Z_1} = \frac{3 \times 360^\circ}{36} = 30^\circ$$

因是单层整距绕组，所以短距系数均为1，即 $K_{p1} = K_{p5} = K_{p7} = 1$ ，所以分布系数值就是绕组系数值。

基波绕组系数为

$$K_{dp1} = K_{p1}K_{d1} = 1 \times \frac{\sin \frac{q\alpha_1}{2}}{q \sin \frac{\alpha_1}{2}} \\ = \frac{\sin \frac{2 \times 30^\circ}{2}}{2 \sin \frac{30^\circ}{2}} = 0.969$$

五次谐波绕组系数为

$$\begin{aligned}
 K_{a p 5} &= K_{p 5} K_{a 5} = 1 \times \frac{\sin \frac{p q \alpha}{2}}{q \sin \frac{p \alpha}{2}} \\
 &= \frac{\sin \frac{5 \times 2 \times 30^\circ}{2}}{2 \sin \frac{5 \times 30^\circ}{2}} = 0.259
 \end{aligned}$$

七次谐波绕组系数为

$$\begin{aligned}
 K_{a p 7} &= K_{p 7} K_{a 7} \\
 &= 1 \times \frac{\sin \frac{p q \alpha}{2}}{q \sin \frac{p \alpha}{2}} = \frac{\sin \frac{7 \times 2 \times 30^\circ}{2}}{2 \sin \frac{7 \times 30^\circ}{2}} \\
 &= -0.259
 \end{aligned}$$

输入功率为

$$P_1 = \frac{P_N}{\eta_N} = \frac{5.5}{0.853} = 6.45 \text{ kW}$$

额定电流为

$$\begin{aligned}
 I_N &= \frac{P_N}{\sqrt{3} U_N \cos \varphi_N \eta_N} \\
 &= \frac{5.5 \times 10^3}{\sqrt{3} \times 380 \times 0.78 \times 0.853} \\
 &= 12.6 \text{ A}
 \end{aligned}$$

每相绕组串联匝数为

$$N_1 = \frac{Z N_t}{2 m a} = \frac{36 \times 42}{2 \times 3 \times 1} = 252 \text{ 匝}$$

相电动势基波有效值为

$$E_1 \approx U_N = 380 \text{ V (因 } \Delta \text{ 联结)}$$

基波每极磁通量为

$$\begin{aligned}\Phi &= \frac{E_1}{4.44f_1 N_1 K_{ap1}} = \frac{380}{4.44 \times 50 \times 252 \times 0.969} \\ &= 0.00101 \text{ Wb}\end{aligned}$$

例3-33 JS125-6型130kW三相异步电动机，额定电压 $U_N = 380\text{V}$ ，接线6Y， $Z_1 = 72$ 双层短节距绕组， $f_1 = 50\text{Hz}$ ， $\cos\varphi_N = 0.86$ ， $\eta_N = 91.5\%$ ，每槽22根导线，已知励磁电流 $I_m$ 为额定电流 $I_N$ 的26.6%，求三相基波励磁磁动势。

每极每相槽数为

$$q = \frac{Z_1}{2pm} = \frac{72}{6 \times 3} = 4$$

从型号尾部的“6”知道此台电动机是6极。

极距为

$$\tau = \frac{Z_1}{2p} = \frac{72}{6} = 12$$

槽距角为

$$\alpha = \frac{p360^\circ}{Z_1} = \frac{3 \times 360^\circ}{72} = 15^\circ$$

基波绕组系数为

$$\begin{aligned}K_{ap1} &= K_{p1} K_{a1} = \sin \frac{y}{\tau} \times 90^\circ \times \frac{\sin \frac{q\alpha}{2}}{q \sin \frac{\alpha}{2}} \\ &= \sin \frac{10}{12} \times 90^\circ \times \frac{\sin \frac{4 \times 15^\circ}{2}}{4 \sin \frac{15^\circ}{2}} \\ &= 0.966 \times \frac{0.5}{0.522} = 0.925\end{aligned}$$

每相串联匝数 $N_1$ 为

$$N_1 = \frac{2pqN_s}{a} = \frac{6 \times 4 \times \frac{22}{2}}{6} = 44$$



额定电流为

$$\begin{aligned}
 I_N &= \frac{P_N \times 10^3}{\sqrt{3} U_N \cos \varphi_N \eta_N} \\
 &= \frac{130 \times 10^3}{\sqrt{3} \times 380 \times 0.89 \times 0.915} \\
 &= 243 \text{ A}
 \end{aligned}$$

励磁电流为

$$I_m = 26.6\% \times 243 = 64.6 \text{ A}$$

流过每条支路的电流  $I_{支}$  为

$$I_{支} = \frac{I_m}{a} = \frac{64.6}{6} = 10.8 \text{ A}$$

每条支路产生的基波磁动势  $F_{支}$  为

$$\begin{aligned}
 F_{支} &= 1.35 \frac{N_1 K_{p1}}{p} I_{支} = 1.35 \frac{44 \times 0.925}{3} \\
 &= 18.3 \text{ A/极}
 \end{aligned}$$

总的基波励磁磁动势幅值为

$$F_1 = a F_{支} = 6 \times 18.3 = 129.9 \text{ A/极}$$

## 六、转矩及机械特性

### 1. 电磁转矩

三相异步电动机定子绕组接入三相对称电源后，便产生旋转磁场，此旋转磁场切割转子绕组，在转子绕组内产生感应电动势  $E_2$ ，由于转子是笼型短路绕组，在绕组内便有转子电流  $I_2$  流通，此电流  $I_2$  与旋转磁场的每极磁通  $\Phi$  相互作用而产生电磁转矩  $T_M$ ，因此电磁转矩的大小与  $\Phi$  和  $I_2$  的乘积有关，另外， $T_M$  还与转子感应电动势  $E_1$  和转子电流  $I_2$  间的夹角所决定的转子功率因数  $\cos \varphi_2$  有关。因此三相异步电动机的电磁转矩的物理表达式为

$$T_M = K_M \Phi I_2 \cos \varphi_2$$

式中  $K_M$ ——与电动机结构有关的常数。

当转子绕组电阻大于感抗时， $E_2$  与  $I_2$  的相量方向相同，这时

$\Phi_2 = 0$ , 所以  $\cos \varphi_2 = 1$ , 电磁转矩最大; 当感抗很大, 可忽略转子绕组电阻时,  $E_2$  滞后于  $I_2 90^\circ$  左右, 这时  $\Phi_2 \approx 1$ , 所以  $\cos \varphi_2 \approx 0$ , 这时作用于转子导体的转矩为零。

在一般情况下, 转子电流  $I_2$  比感应电动势  $E_2$  滞后一个  $\varphi_2$  角度,  $\cos \varphi_2 < 1$ 。

另外, 由上面已知  $U_1 \approx E_1 = 4.44 f_1 N_1 K_{dp1} \Phi$ , 也就是  $\Phi =$

$$\frac{E_1}{4.44 f_1 N_1 K_{dp1}} \approx \frac{U_1}{4.44 f_1 N_1 K_{dp1}} \propto U_1$$

电源频率  $f_1$  不变, 对于具体电动机,  $N_1 K_{dp1}$  也不变, 因此电动机在正常运行时  $\Phi \propto U_1$ , 又  $\Phi = B_\delta S_{F\delta}$ , 而每极铁心截面积  $S_{F\delta}$  不变, 所以  $B_\delta \propto U_1$ 。

$$\text{再有, } I_2 = \frac{E_2}{\sqrt{r_2^2 + X_2^2}} = \frac{s E_{20}}{\sqrt{r_2^2 + (s X_{20})^2}} \quad \text{及 } \cos \varphi_2 = \frac{r_2}{\sqrt{r_2^2 + X_2^2}} = \frac{r_2}{\sqrt{r_2^2 + (s X_{20})^2}} \quad \text{将上面公式 } \Phi, I_2, \cos \varphi_2 \text{ 代入}$$

$T_M$  公式中得到:

$$\begin{aligned} T_M &= K_M \Phi I_2 \cos \varphi_2 \\ &= K_M \left( \frac{U_1}{4.44 f_1 N_1 K_{dp1}} \right) \left( \frac{s (4.44 f_1 N_2 K_{dp2} \Phi)}{\sqrt{r_2^2 + (s X_{20})^2}} \right) \\ &\quad \times \left( \frac{r_2}{\sqrt{r_2^2 + (s X_{20})^2}} \right) \\ &= K_M 4.44 f_1 N_2 K_{dp2} \frac{s r_2 U_1^2}{r_2^2 + (s X_{20})^2} \\ &= K_{M2} \frac{s r_2 U_1^2}{r_2^2 + (s X_{20})^2} \end{aligned}$$

式中  $K_{M2} = K_M 4.44 f_1 K_{dp2} N_2$  为常数。

上式说明, 电磁转矩  $T_M$  与电源电压  $U_1$  的平方成正比, 当电源电压波动时对电磁转矩影响颇大。

## 2. 机械特性

当 $U_1$ 和 $f_1$ 不变时, 转矩 $T$ 随转差率 $s$ 而变化(见上式), 把这个变化关系画在图上, 形成 $T=f(s)$ 曲线, 此曲线称为电动机的机械特性。

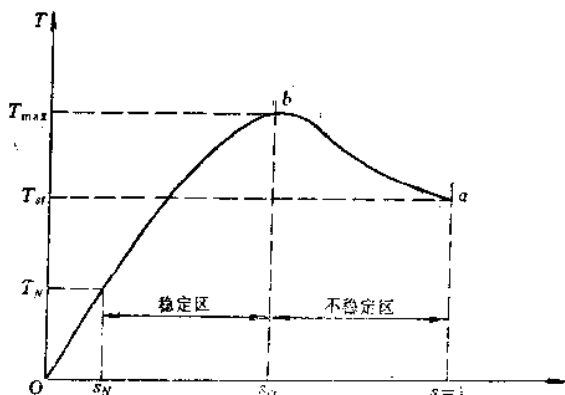


图3-3 三相异步电动机机械特性曲线

从图3-3看出, 当 $0 < s < s_m$ 区域内,  $T$ 随 $s$ 降低而降低, 或者说 $T$ 随转速 $n$ 上升而降低。当 $s > s_m$ 时,  $T$ 随 $s$ 的增大而减小。这是因为当 $s$ 减小时,  $sX_{20} \ll r_2$ , 所以

$$T = \frac{s r_2 U_1^2}{r_2^2 + (s X_{20})^2} \approx \frac{s r_2}{r_2^2 + (s X_{20})^2} \times s, \text{ 即 } T \text{ 与 } s \text{ 近似成正比关系变化。}$$

当 $s$ 增大时,  $sX_{20}$ 增大, 这时 $T$ 随 $s$ 增大的速度减慢。当 $s$ 达到 $s_m$ 处时, 转矩达最大值 $T_{max}$ , 叫最大转矩。当 $s$ 继续增大, 此时

$$sX_{20} \gg r_2, \text{ 则 } T \approx \frac{s r_2}{r_2^2 + (s X_{20})^2} \approx \frac{s r_2}{(s X_{20})^2} = \frac{r_2}{X_{20}^2 s} \approx \frac{1}{s},$$

说明这时 $T$ 近似与 $s$ 成反比关系。

### 3. 额定转矩 $T_N$

三相异步电动机在额定电压、额定频率和额定负载下运行

时, 转轴上所产生的电磁转矩称为额定转矩, 用  $T_N$  表示, 其大小为

$$T_N = 9550 \frac{P_N}{n_N} \quad (\text{N} \cdot \text{m})$$

式中  $P_N$ ——电动机额定功率(kW);  
 $n_N$ ——电动机额定转速(r/min)。

以前用 kgf·m 表示, 即  $T_N = 975 \frac{P_N}{n_N}$  (kgf·m) 它们换算关系为

$$1 \text{ kgf} \cdot \text{m} = 9.807 \text{ N} \cdot \text{m}$$

$$1 \text{ N} \cdot \text{m} = 0.102 \text{ kgf} \cdot \text{m}$$

从上式看出, 电动机额定功率  $P_N$  一定时, 电动机极数为  $\pi$  小, 所以  $T_N$  大; 反之  $T_N$  小。

电动机正常运行时, 电动机的转矩  $T$  必须与阻转矩  $T_L$  相平衡, 即  $T \geq T_L$ , 否则电动机不能正常工作。阻转矩  $T_L$  包括电动机所拖动的机械负载转矩  $T_2$  和机械损耗所产生的转矩  $T_0$ , 即  $T \geq T_L = T_2 + T_0$ 。

由于  $T_0$  很小, 可看成  $T \approx T_2$ , 或  $T_2 = T_L$ 。

#### 4. 最大转矩 $T_{max}$

从图3-3看出, 电动机从起动瞬间 ( $s = 1, n = 0$ ) 到额定运转 ( $s = s_N$ ) 的过程中, 电磁转矩  $T$  是随  $s$  的变化而变化的, 其中有一个最大值, 这个最大值的转矩叫最大转矩或临界转矩, 用  $T_{max}$

表示, 与其对应的转差率  $s_m$  叫临界转差率,  $s_m = \frac{r_2}{X_{20}}$  代入上面公式, 得到

$$T_{max} = K_M \frac{U_1^2}{2X_{20}}$$

由此式看出,

(1) 当电机参数和  $f_1$  不变时,  $T_{max}$  与  $U_1^2$  成正比, 当  $U_1$  降低时,  $T = f(s)$  曲线向下移 (图3-4), 但  $s_m$  的位置不变, 这是因

为  $s_m = \frac{r_2}{X_{20}}$  的公式中与  $U_1$  无关。

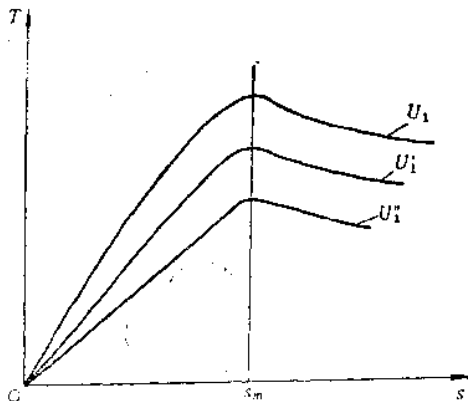


图3-4  $s_m$ 位置不变、 $T=f(s)$ 特性曲线

(2) 当电动机运行超载时, 电动机转速下降, 即  $s$  上升, 当  $s > s_m$  时, 电动机进入不稳定区域运行, 电动机很快从  $b$  点滑到  $a$  点,  $s=1$  点,  $n=0$ , 电动机停转, 这时电动机如仍接在电源上, 则电流高达额定电流的4~8倍, 电动机很快被烧毁。可见最大转矩是衡量电动机短时过载能力的一个重要技术参数。一般用  $T_{max}$

与  $T_N$  的比值来表示过载能力大小, 即过载系数  $\lambda = \frac{T_{max}}{T_N}$ , 国家规定  $\lambda$  在1.8~2.5范围内。

(3) 从  $s_m = \frac{r_2}{X_{20}}$  知,  $s_m$  与转子电路中的电阻  $r_2$  成正比, 而  $T_{max}$  与  $r_2$  无关, 所以对于绕线转子异步电动机在转子内串入附加电阻  $R_{f1}$ 、 $P_{f2}$ 、 $\dots$ ,  $T_{max}$  所对应的  $s_m$  与  $r_2$  成正比, 即  $s_m \propto r_2$ , 但  $T_{max}$  大小不变, 如图3-5所示。

### 5. 起动转矩 $T_{st}$

电源电压施加电动机上刚起动瞬间 ( $n=0$ ,  $s=1$ ) 时的电磁转

矩称为起动转矩，用  $T_{st}$  表示，如果施加的额定电压，额定频率，这时的起动转矩称为额定起动转矩。

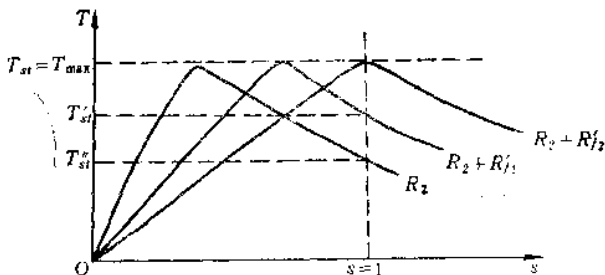


图3-5 起动转矩与转子串电阻关系曲线  
 $R_2 + R_{f2} > R_2 + R_{f1} > R_2, T_{st} > T_{st}' > T_{st}''$

从图 3-5 看出，随着转子电阻增加， $T_{st}$  逐渐增加， $T_{st} = T_{max} > T_{st}' > T_{st}''$ 。当转子电阻增大到一定值时，可使电动机的起动转矩  $T_{st}$  等于  $T_{max}$ ，即在  $s=1$  处， $T_{st} = T_{max}$ ，这对于起动重载有好处，绕线转子异步电动机在起动时转子串入附加电阻的目的就是使  $T_{st}$  增加， $I_{st}$  降低，同时由于转子电阻增加又使功率因数  $\cos \varphi_2$  增大。

一般起动转矩  $T_{st}$  与额定转矩  $T_N$  之比值用  $K_T$  来表示（这也是一个重要技术指标），即

$$K_T = \frac{T_{st}}{T_N} \quad K_T \text{ 在 } 1.2 \sim 2 \text{ 之间}$$

从上述可以看出：

(1) 起动转矩、最大转矩、电磁转矩与电源电压平方成正比；

(2) 起动转矩与电动机漏抗有关，漏电抗增大， $T_{st}$  降低，也就是当绕组匝数增加或气隙间隙变小时，漏电抗增加，使  $T_{st}$  降低；反之，匝数减少，气隙增大，则漏电抗降低， $T_{st}$  增加。

(3)  $T_{st}$  随转子电阻  $r_2$  增加而增大。

### 6. 转矩实用计算公式

上面计算转矩的公式中, 由于所用到的电动机参数不易得到, 所以在工程中常用转矩实用公式计算, 即

$$\frac{T}{T_{\max}} = \frac{2}{\frac{s}{s_m} + \frac{s_m}{s}}$$

当  $T = T_N$ ,  $s = s_N$  时代入上式可得到:

$$\frac{T_N}{T_{\max}} = \frac{2}{\frac{s_N}{s_m} + \frac{s_m}{s_N}}$$

因  $\frac{T_N}{T_{\max}} = \frac{1}{\lambda_m}$  所以上式改写为

$$s_m = s_N (\lambda_m + \sqrt{\lambda_m^2 - 1})$$

式中  $n_N$  —— 电动机额定转速 (r/min);

$\lambda_m$  —— 过载能力;

$s_N$  —— 额定转差率,  $s_N = \frac{n_1 - n_N}{n_1} \times 100\%$ ,  $n_1 = \frac{60f}{p}$ ;

$P_N$  —— 额定功率 (kW)。

以上  $n_N$ 、 $\lambda_m$ 、 $P_N$  均可从电动机产品样本中得到。从上式计算出  $s_m$ , 从而计算出  $T_N$  和  $T_{\max}$ 。

当  $s_N = 1$  时, 代入上式得到:

$$\frac{T_{st}}{T_{\max}} = \frac{2}{\frac{s}{s_m} + \frac{s_m}{s}} = \frac{2}{\frac{1}{s_m} + s_m}$$

所以

$$T_{st} = T_{\max} \frac{2}{\frac{1}{s_m} + s_m}$$

**例3-34** 有一台 Y315M-4 型、 $P_N = 180 \text{ kW}$  三相异步电动机,  $2p = 4$ ,  $U_N = 380 \text{ V}$ ,  $f_N = 50 \text{ Hz}$ ,  $n_N = 1480 \text{ r/min}$ , 过载能力  $\lambda_m = 1.81$ , 试求: (1)  $s_N$ 、 $T_N$ 、 $T_{\max}$ 、 $s_m$ ; (2) 当  $s = 0.02$  时,  $T$  是

多大。

已知  $2p = 4$ , 所以  $n_1 = \frac{60f_N}{p} = \frac{60 \times 50}{2} = 1500 \text{r/min}$ , 额

定转差率为

$$s_N = \frac{n_1 - n_N}{n_1} \times 100\% = \frac{1500 - 1480}{1500} \times 100\% \\ = 1.33\%$$

额定转矩为

$$T_N = 9550 \frac{P_N}{n_N} = 9550 \times \frac{160}{1480} = 1032.4 \text{N}\cdot\text{m}$$

最大转矩为

$$T_{\max} = \lambda_m T_N = 1.8 \times 1032.4 = 1858.4 \text{N}\cdot\text{m}$$

最大转差率

$$s_m = s_N (\lambda_m + \sqrt{\lambda_m^2 - 1}) \\ = 0.0133 (1.8 + \sqrt{1.8^2 - 1}) \\ = 0.0438$$

当  $s = 0.02$  时,  $T$  为

$$T = \frac{2T_{\max}}{\frac{s}{s_m} + \frac{s_m}{s}} + \frac{2 \times 1858.4}{0.459 + 2.19} = 1404.2 \text{N}\cdot\text{m}$$

**例3-35** 有一台 Y315M3-6 型 132kW 三相异步电动机,  $U_N = 380\text{V}$ ,  $n_N = 980\text{r/min}$ ,  $\cos \varphi_N = 0.88$ ,  $\eta_N = 93.5\%$ ,  $f_N = 50\text{Hz}$ , 试求: (1) 额定电流  $I_N$ ; (2) 额定转矩  $T_N$ ; (3) 额定转差率  $s_N$  是多少。

$$I_N = \frac{P_N}{\sqrt{3} U_N \cos \varphi_N \eta_N} \\ = \frac{132 \times 10^3}{\sqrt{3} \times 380 \times 0.88 \times 0.935} \\ = 243.8 \text{A}$$

$$T_N = 9550 \frac{P_N}{n_N} = 9550 \times \frac{132}{980} = 1286.3 \text{N}\cdot\text{m}$$



从型号知此台电动机为6极， $p=3$ ，所以有

$$n_1 = \frac{60f_N}{p} = \frac{60 \times 50}{3} = 1000 \text{ r/min}$$

$$s_N = \frac{n_1 - n_N}{n_1} \times 100\% = \frac{1000 - 980}{1000} \times 100\% = 2\%$$

**例3-36** 有一台 JZR2-72-10 型绕线转子异步电动机，已知  $P_N = 100\text{kW}$ ， $f_1 = 50\text{Hz}$ ， $U_N = 380\text{V}$ ， $I_N = 230\text{A}$ ， $s_N = 3.3\%$ ，

过载能力  $\lambda_m = \frac{T_{\max}}{T_N} = 3.44$ ，定子绕组为Y联结。试求：同步转速  $n_1$ 、额定转速  $n_N$ 、额定转矩  $T_N$ 、最大转矩  $T_{\max}$ ，对应最大转矩的转差率  $s_m$ 、起动转矩  $T_{st}$  和  $s_N$  为 3.3% 时电磁转矩  $T$  各是多少。

从电动机型号知此台电动机极数  $2p = 10$ ，所以  $p = 5$ ，因此有

$$n_1 = \frac{60f_1}{p} = \frac{60 \times 50}{5} = 600 \text{ r/min}$$

额定转速为

$$n_N = n_1(1 - s_N) = 600(1 - 0.033) = 580 \text{ r/min}$$

额定转矩为

$$T_N = 9550 \frac{P_N}{n_N} = 9550 \times \frac{100}{580} = 1647 \text{ N}\cdot\text{m}$$

最大转矩为

$$T_{\max} = \lambda_m T_N = 3.44 \times 1647 = 5664 \text{ N}\cdot\text{m}$$

临界转差率为

$$\begin{aligned} s_m &= s_N (\lambda_m + \sqrt{\lambda_m^2 - 1}) \\ &= 0.033(3.44 + \sqrt{3.44^2 - 1}) \\ &= 0.222 \end{aligned}$$

电动机起动时， $s = 1$ ，则起动转矩  $T_{st}$  为

$$T_{st} = \frac{2T_{max}}{\frac{1}{s_m} + \frac{s_m}{1}} = \frac{2 \times 5664}{\frac{1}{0.222} + \frac{0.222}{1}} = 2397 \text{ N} \cdot \text{m}$$

当  $s_N = 0.033$  时, 电动机电磁转矩  $T$  为

$$T = \frac{2T_{max}}{\frac{s}{s_m} + \frac{s_m}{s}} = \frac{2 \times 5664}{\frac{0.033}{0.222} + \frac{0.222}{0.033}} = 1647 \text{ N} \cdot \text{m}$$

## 第二节 三相异步电动机的起动、调速、制动计算

### 一、三相异步电动机起动方法及计算

#### 1. 概述

三相异步电动机起动时, 为了使电动机在合理的时间进入正常工作, 所以对于电动机的起动转矩要求足够大, 这样可节省起动时间, 降低起动损耗, 同时又可提高生产率。但不要认为起动转矩越大越好, 因为根据负载种类不同, 在停止状态下突然快速起动电动机时, 负载设备会遭受损伤, 所以负载设备对起动转矩大小有一定限制。一般电动机起动转矩倍数以  $K_T$  表示, 即  $K_T = \frac{T_{st}}{T_N}$ , 不同电动机要求有不同的  $K_T$  值, 查电机样本可获得  $K_T$  值。

另外, 起动电动机时, 希望起动电流  $I_{st}$  要合理, 不可太大, 一般直接起动电动机时, 起动电流为额定电流的 4 ~ 8 倍, 这样大的电流对于电网冲击太大, 对电动机本身寿命也有影响,

国家标准规定起动电流倍数  $K_i = \frac{I_{st}}{I_N}$  在一定范围内。上述  $K_T$  和  $K_i$  是三相异步电动机起动性能的主要指标。均可在电机样本中标出。

小容量电动机 (10kW 以下) 可以直接施加额定电压起动, 起动时虽然起动电流较大, 但一般电源容量是可以承受的, 另外起动转矩也较大, 所以采用直接起动是适合的。电动机容量再大

时,就要考虑电源容量了,  $K_I$  一般可按下式计算:

$$K_I \leq \frac{3}{4} \left[ 3 + \frac{\text{电源总容量}}{\text{起动电动机的容量}} \right]$$

如果  $K_I$  不满足上式要求, 要采取降压起动措施。

小容量电动机起动电流大, 同时起动转矩也较大, 这是因为起动转矩  $T_{st} = C_T \Phi I_1 \cos \varphi_2$  中  $I_1$  较大, 虽然磁通降低, 但由于小电机电阻较大, 所以  $\cos \varphi_2$  比大中型电动机要大的缘故。

**例3-37** 有一台J2-91-4型75kW三相异步电动机, 已知  $K_I = 6.5$ , 电源变压器容量为560kVA, 问可否直接在额定电压下起动此台电动机。

按上面公式计算:

$$\begin{aligned} \frac{3}{4} \left[ 3 + \frac{\text{电源总容量}}{\text{起动电动机的容量}} \right] &= \frac{3}{4} \left( 3 + \frac{560}{75} \right) \\ &= 7.85 \end{aligned}$$

由于  $K_I = 6.5 < 7.85$ , 故允许直接起动。

**例3-38** 有一台JO2-91-2 55kW三相异步电动机, 已知  $K_I = 5.4$ ,  $K_T = 1.2$ ,  $s_N = 1.22\%$ , 过载能力  $\lambda_m = 2.2$ , 额定电压380V, 额定电流98.9A, 问此台电动机直接投入380V三相电源起动时, 起动电流和起动转矩是多大。

$$I_{st} = K_I I_N = 5.4 \times 98.9 = 534.1 \text{ A}$$

额定转矩为

$$\begin{aligned} T_N &= 9550 \frac{P_N}{n_N} = 9550 \times \frac{55}{(1 - s_N) \frac{60f}{p}} \\ &= 9550 \times \frac{55}{(1 - 1.22\%) \frac{60 \times 50}{1}} \\ &= 9550 \times \frac{55}{2963} = 177.3 \text{ N}\cdot\text{m} \end{aligned}$$

## 2. 降压起动

对于轻载起动的大中型电动机，可考虑采取减电压起动法。

(1) 定子串电阻器或电抗器的减压起动 定子串电阻器的起动方法适合于中等容量的低压笼型电动机的起动。起动前定子三相绕组串接电阻，使施加在定子绕组上的电压低于电源电压，起动后再将电阻短掉，电动机便在额定电压下正常运行，从而解决直接在额定电压下起动电流大的问题。

电阻器的电阻值可按下面公式估算：

$$R_{st} = \frac{220}{I_{st}} \sqrt{\left(\frac{I_{st}}{I'_{st}}\right)^2 - 1} \quad (\Omega)$$

式中  $I_{st}$ ——未串电阻前起动电流(A)；

$I'_{st}$ ——串入电阻后允许的电流，一般规定为额定电流的 2 ~ 3 倍。

高压电动机起动时是串入电抗器，因电阻器消耗电功率太大，如频繁起动时电阻温升较高，对生产机械会有影响，起动前电机串入电抗器，起动电流在电抗器形成电压降，所以施加在定子绕组上的电压就低于额定电压，使起动电流降低，待电机起动后，转速接近额定值时，切除电抗器，电动机便在额定电压下正常运行。

以上两种起动方法，起动线电压降低  $\Delta u$  倍 ( $\Delta u = \frac{U'_p}{U_p}$ ，

$U'_p$  为降低后相电压； $U_p$  为原电机相电压)，起动转矩降低  $\Delta u^2$  倍，因电动机转矩与电压平方成正比。

(2) 星-三角起动 正常运行绕组为  $\Delta$  联结的三相异步电动机在起动时可改接为  $Y$  联结，降低起动电流，起动后再改回  $\Delta$  联结，电动机在额定电压下正常运行。

由于将  $\Delta$  联结改为  $Y$  联结，所以要求电动机必需是  $\Delta$  接线 (JO2 电动机 4 kW 以上均为  $\Delta$  联结)，同时三相绕组的头尾均在接线板上，即有 6 条引出线， $\Delta$ - $Y$  转换可用  $Y$ - $\Delta$  起动器来完成。

由于 $\Delta$ 联结改 $Y$ 联结,相电压降 $\sqrt{3}$ 倍,即 $\Delta u = 220/380 = 1/\sqrt{3}$ ,起动线电流降 $1/3$ ,起动转矩降 $\Delta u^2 = (1/\sqrt{3})^2 = 1/3$ 。也就是起动时 $\Delta$ 联结改为 $Y$ 联结时,起动电流和起动转矩均降为 $\Delta$ 联结时的 $1/3$ ,因此也适用于轻载起动,由于起动方法简单,可优先选用。

(3)自耦变压器降压起动 自耦变压器起动器又叫补偿起动器,使用时将自耦变压器高压边接入电源,低压边接入电动机绕组回路。常用的自耦变压器抽头比(即二次侧与一次侧的匝数比)有60%、80%、65%等,即 $K = 0.6$ 、 $0.65$ 、 $0.8$ 。这时电动机起动电流降为 $K^2$ 倍,起动转矩也降 $K^2$ 倍( $K = \Delta u$ )。

此起动方法适合于大、中型低压电动机,变压器不同的抽头比可按负载不同而选用,所以起动电流和起动转矩可以调节。此方法由于设备较大,所以成本较高。

(4)延边三角形起动 定子每相绕组有三个抽头,即首端、中间抽头和尾端,绕组每相电压随中间抽头位置不同而不同,图3-6a是电机起动时定子绕组接成延边三角形,图3-6b是电动机起动后改为 $\Delta$ 联结。

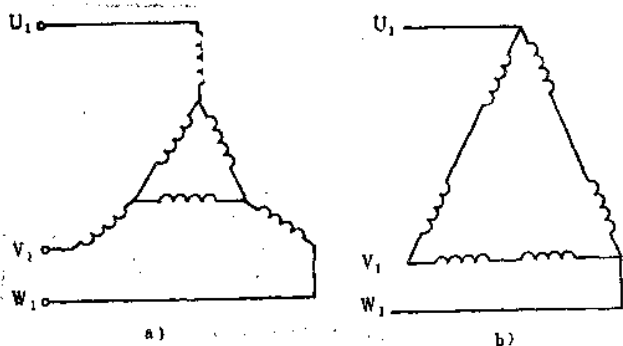


图3-6 电动机绕组的联结方式

设每相绕组的星形部分匝数与每相绕组三角形部分的匝数之

比为  $k$  时, 则起动电流  $I'_{st}$  与完全是三角联结时的起动电流的关系为

$$I'_{st} = I_{st} \frac{k+1}{3k+1}$$

设  $k=1$ , 即中间抽头在每相绕组中间, 星形联结部分匝数与三角形联结部分匝数相等时, 按上式得到:  $I'_{st} = I_{st} \frac{k+1}{3k+1} =$

$$I_{st} \frac{1+1}{3+1} = \frac{1}{2} I_{st}, \text{ 说明这种联结起动电流降低一半。}$$

设  $k = \frac{1}{2}$ , 即中间抽头在每相绕组的  $\frac{2}{3}$  处, 星形部分匝数占  $\frac{1}{3}$ , 三角形部分匝数占  $\frac{2}{3}$ , 则起动电流为

$$I'_{st} = I_{st} \times \frac{\frac{1}{2} + 1}{3 \times \frac{1}{2} + 1} = 0.6 I_{st}$$

$$\text{当 } k=2 \text{ 时, 则 } I'_{st} = I_{st} \frac{2+1}{3 \times 2 + 1} = 0.43 I_{st}$$

$k=2$  表示星形部分匝数占  $\frac{2}{3}$ , 而三角形部匝数占  $\frac{1}{3}$ , 由于星形部分匝数占比例多, 所以起动电流小于  $k=1/2$  时起动电流。

同理对于起动转矩也有此关系:

当  $k=1$  时, 起动转矩  $T'_{st}$  为

$$T'_{st} = T_{st} \frac{k+1}{3k+1} = 0.5 T_{st}$$

当  $k = \frac{1}{2}$  时, 则有

$$T'_{st} = 0.6 T_{st}$$

当  $k=2$  时则有

$$T'_{st} = 0.43 T_{st}$$

要求电动机在出厂时就接延边三角形方式接线, 并且提供九

个引出线。这种降压起方式简单用于中小型电动机。

**例3-39** 有一台J2-82-4三相异步电动机，已知额定电压  $U_N = 380\text{V}$ ，额定电流  $I_N = 100\text{A}$ ，额定效率  $\eta_N = 93.08\%$ ，额定功率因数  $\cos\varphi_N = 0.896$ ，额定转差率  $s_N = 1.64\%$ 。起动电流倍数  $K_I = 6.06$ ，起动转矩倍数  $K_T = 1.79$ ，过载系数  $\lambda_m = 2.09$ ，电源频率为  $50\text{Hz}$ ，试求：

(1) 此台电动机的额定功率  $P_N$ 、额定转速  $n_N$ 、额定转矩；

(2) 当电源电压降到  $350\text{V}$  时，这时起动转矩降为多少（直接起动时）？当电源电压降到多少伏时此台电动机就不能满载起动了；

(3) 如果采用  $Y-\Delta$  起动器降压起动时，起动电流和起动转矩各是多少；

(4) 如果采用自耦变压起动器起动时，起动转矩和起动电流是多少？如果半载起动此台电动机时，起动转矩和起动电流又是多少（不考虑电源电压波动的影响）。

额定功率为

$$\begin{aligned} P_N &= \sqrt{3} U_N I_N \cos\varphi_N \cdot \eta_N \\ &= \sqrt{3} \times 380 \times 100 \times 0.896 \times 0.9308 = 55\text{kW} \end{aligned}$$

额定转速为

$$\begin{aligned} n_N &= (1 - s_N) \frac{60f}{p} = (1 - 1.64\%) \frac{60 \times 50}{2} \\ &= 0.984 \times 1500 = 1475\text{r/min} \end{aligned}$$

额定转矩为

$$T_N = 9550 \frac{P_N}{n_N} = 9550 \times \frac{55}{1475} = 356.1\text{N}\cdot\text{m}$$

已知  $K_T = \frac{T_{st}}{T_N} = 1.79$ ，则有

$$T_{st} = 1.79 \times T_N = 637.4\text{N}\cdot\text{m}$$

当电源电压降至  $350\text{V}$  时，则  $\Delta u = \frac{350}{380} = 0.92$ ，由于转矩与

电压平方成正比知，在350V时的电动机起动转矩为

$$\begin{aligned} T'_{st} &= \Delta u^2 T_{st} = 0.92^2 \times 637.4 \\ &= 539.5 \text{ N}\cdot\text{m} \end{aligned}$$

设电源电压降为  $\Delta u = \frac{u}{U_N}$  时，则  $U_{st} = \Delta u U_N$  以下时，电

动机不能起动，则有：

$$T_N \leq \Delta u^2 (K_T T_N) = \Delta u^2 (1.79 T_N)$$

$$\therefore \Delta u \geq \sqrt{\frac{1}{1.79}} = 0.75$$

$$u = \Delta u U_N = 0.75 \times 380 = 284 \text{ V}$$

当电源电压降到284V及以下时此台电动机便不能满载起动了。

采用Y-Δ起动器起动时起动电流  $I'_{st}$  为

$$\begin{aligned} I'_{st} &= \frac{1}{3} \cdot I_{st} = \frac{1}{3} K_I I_N = \frac{1}{3} \times 6.06 \times 100 \\ &= 202 \text{ A} \end{aligned}$$

起动转矩  $T'_{st}$  为

$$\begin{aligned} T'_{st} &= \frac{1}{3} T_{st} = \frac{1}{3} K_T T_N = \frac{1}{3} \times 1.79 \times 356.1 \\ &= 212.5 \text{ N}\cdot\text{m} \end{aligned}$$

当采用自耦变压起动器起动电动机时，要求在半载起动（即在  $M_{st}/2$  点），抽头位置设在， $\Delta u$  上则有

$$\begin{aligned} 0.5 T_N &= \Delta u^2 T_{st} = \Delta u^2 (K_T T_N) = \Delta u^2 1.79 T_N \\ \therefore \Delta u &= \sqrt{\frac{0.5 T_N}{1.79 T_N}} = \sqrt{\frac{0.5}{1.79}} = 0.53 \end{aligned}$$

可选择 QJ3型自耦变压起动器的60%抽头上，这时电动机的起动电流  $I'_{st}$  为

$$\begin{aligned} I'_{st} &= \Delta u^2 I_{st} = 0.53^2 K_I I_N = 0.53^2 \times 6.06 \times 100 \\ &= 170.2 \text{ A} \end{aligned}$$



例3-40 一台 Y280M-8三相异步电动机,额定功率为45kW,额定转速  $n_N = 740\text{r/min}$ ,  $K_T = 1.8$ 试求:(1)额定电压  $U_N = 380\text{V}$  时起动转矩  $T_{st}$  是多少;(2)外施电压为额定电压60%时,起动转矩  $T'_{st}$  又是多少,为额定转矩的多少倍。

额定转矩为

$$T_N = 9550 \frac{P_N}{n_N} = 9550 \times \frac{45}{740} = 581 \text{ N}\cdot\text{m}$$

在  $U_N$  下起动转矩为

$$T_{st} = K_T T_N = 1.8 \times 581 = 1045 \text{ N}\cdot\text{m}$$

当电压降到60%  $U_N$  时,电动机的起动转矩为:

$$T'_{st} = (0.6)^2 T_{st} = 0.36 \times 1045 = 376.2 \text{ N}\cdot\text{m}$$

当额定转矩的倍数为

$$\frac{T'_{st}}{T_N} = \frac{376.2}{581} \times 100\% = 64.7\%$$

例3-41 一台三相笼型异步电动机。 $\Delta$ 联结,起动时改为Y联结,试证明电动机和起动转矩降低3倍。

已知电机转矩  $T$  与电源电压平方成正比,即  $T \propto U^2$ 。设Y联结时电动机起动转矩为  $T_{stY}$ ,与星形联结电源电压  $U_Y$  的平方也成正比,即

$$T_{stY} \propto U_Y^2 \text{ 又 } U_Y = \frac{U_\Delta}{\sqrt{3}}$$

$$\therefore T_{stY} \propto U_Y^2 = \left(\frac{U_\Delta}{\sqrt{3}}\right)^2 = \frac{1}{3} U_\Delta^2$$

$$\text{又 } T_{st\Delta} \propto U_\Delta^2$$

于是有

$$T_{stY} = \frac{1}{3} T_{st\Delta}$$

例3-42 一台Y280S-6型三相异步电动机,45kW,  $\Delta$ 联结,已知  $K_I = 6.5$ ,  $K_T = 1.8$ ,此台电动机采用Y- $\Delta$ 起动机起动时,试求起动电流  $I'_{st}$  和起动转矩  $T'_{st}$  为额定值的多少倍。

$$I'_{st} = \frac{1}{3} I_{st} = \frac{1}{3} (K_I I_N) = \frac{1}{3} \times 6.5 I_N = 2.17 I_N$$

$I'_{st}$  为额定电流  $I_N$  的 2.17 倍。

$$T'_{st} = \frac{1}{3} T_{st} = \frac{1}{3} (K_T T_N) = \frac{1}{3} \times 1.8 T_N \\ = 0.6 T_N$$

$T'_{st}$  为额定转矩  $T_N$  的 0.6 倍。

**例 3-43** 某三相异步电动机，已知  $K_T = \frac{T'_{st}}{T_N} = 1.3$ ，负载

转矩  $T_L = 0.5 T_N$ ，当电动机在  $70\% U_N$  下起动时，问电动机能否起动，为什么。

已知  $T'_{st} = 1.3 T_N$ ，这是在额定电压下情况。又知起动转矩与电压平方成正比，所以在  $70\% U_N$  下起动电动机时，其起动转矩  $T'_{st}$  为

$$T'_{st} = (70\%)^2 T'_{st} = 0.49 \times 1.3 T_N = 0.637 T_N$$

$T_L$  为  $T_N$  的 50%，即  $T_L = 0.5 T_N$

∴  $T'_{st} > T_L$ ，电动机可以起动。

**例 3-44** 一台 JS117-4 型 180 kW 三相异步电动机， $U_N = 380V$ ， $\Delta$  联结，已知  $K_I = \frac{I'_{st}}{I_N} = 5.68$ ， $K_T = \frac{T'_{st}}{T_N} = 1.32$ ， $I_N = 329$ ， $s_N = 1.51\%$ ，试求：

(1) 额定转速  $n_N$ 、额定转矩  $T_N$ 、起动转矩  $T'_{st}$ 、起动电流  $I'_{st}$ ；

(2) 如果负载转矩  $T_L = 1300 N \cdot m$ ，问在  $U = U_N$  和  $U = 0.8 U_N$  两种电压情况下，能否直接起动电动机；

(3) 如果采用 Y- $\Delta$  起动器能否起动此台电动机；

(4) 如果采用自耦变压起动器起动电动机，抽头位置在 65% 处，问这时电动机的起动转矩  $T'_{st}$  和起动电流  $I'_{st}$  是多少，当  $T_L$  小于多少才能起动电动机。

(1) 额定转速为

$$n_N = (1 - s_N) \frac{60f}{p} = (1 - 0.0151) \frac{60 \times 50}{2}$$

$$= 1477.4 \text{ r/min}$$

额定转矩为

$$T_N = 9550 \frac{P_N}{n_N} = 9550 \times \frac{180}{1477.4} = 1163.5 \text{ N}\cdot\text{m}$$

起动电流为

$$I_{st} = K_I I_N = 5.68 \times 329 = 1868.7 \text{ A}$$

起动转矩为

$$T_{st} = K_T T_N = 1.32 \times 1163.5 = 1954.7 \text{ N}\cdot\text{m}$$

由于  $T_{st} > T_L$ , 所以能够起动电动机。

(2) 当  $U = 0.8U_N$  时, 即  $\frac{U}{U_N} = 0.8$ , 则起动转矩为

$$T'_{st} = \left(\frac{U}{U_N}\right)^2 T_{st} = 0.8^2 \times 1954.7$$

$$= 1251 \text{ N}\cdot\text{m}$$

由于  $T'_{st} < T_L$ , 所以不能起动电动机。

(3) 当采用 Y- $\Delta$  起动器时 则有

$$T'_{st} = \frac{1}{3} T_{st} = \frac{1}{3} \times 1954.7 = 651.6 \text{ N}\cdot\text{m}$$

$T'_{st} < T_L$  不能起动电动机

$$I'_{st} = \frac{1}{3} I_{st} = \frac{1}{3} \times 1868.7 = 622.9 \text{ A}$$

(4) 采用自耦变压起动器起动电动机, 当抽头接在 65% 位置时, 则起动转矩为

$$T'_{st} = 0.65^2 T_{st} = 0.65^2 \times 1954.7 = 825.9 \text{ N}\cdot\text{m}$$

起动电流为

$$I'_{st} = 0.65^2 I_{st} = 0.65^2 \times 1868.7 = 789.5 \text{ A}$$

当  $\Delta u^2 T_{st} > T_L$  时, 电动机才能起动, 而

$$\Delta u = \sqrt{\frac{T_{st}}{T_N}} = \sqrt{\frac{1300}{1954.7}} = 0.82$$

说明自耦变压器抽头所处位置大于82%时才能起动此台电动机（不考虑电源波动的影响）。

**例3-45** 有一台 Y315S-6型三相异步电动机， $P_N = 75\text{kW}$ ， $U_N = 380\text{V}$ ， $K_T = 1.6$ ，现用降电压方法将定子绕组端电压降为65% $U_N$ ，即 $0.65 \times 380 = 247\text{V}$ 。已知电动机拖动的负载阻转矩 $T_L = 0.65T_N$ ，问这时电动机能否起动。

电动机转矩与电压平方成正比，当电压降为65% $U_N$ 时，则电动机额定转矩 $T_N$ 降为42%（65%）<sup>2</sup>。

起动转矩 $T_{st}$ ，在额定电压时 $T_{st} = 1.6T_N$ ，当电压降为65%时的起动转矩 $T'_{st} = 1.6(0.42T_N) = 67.2\%T_N$ ，而 $T_L = 65\%T_N$ ，所以 $T'_{st} > T_L$ ，可以起动此台电动机（不考虑电源电压的波动）。

**例3-46** 有一台440V、50Hz、30kW、6极的三相异步电动机，做堵转试验，已知： $U_K = 60\text{V}$ ， $I_K = 60\text{A}$ ，三相输入功率 $P_K = 3.2\text{kW}$ ，绕组的直流电阻 $R = 0.212\Omega$ 。将此台电动机在额定电压下直接起动，问此台电动机的起动转矩 $T_{st}$ 是多大。

起动转矩 $T_{st}$ 与电磁功率 $P_M$ 关系如下：

$$T_{st} = \frac{P_M}{\omega} \quad (\text{N}\cdot\text{m})$$

$$\begin{aligned} \text{式中 } \omega & \text{——同步角速度, } \omega = \frac{2\pi n}{60} = \frac{2\pi f}{p} = \frac{2\pi \times 50}{3} \\ & = -\frac{100\pi}{3} \quad (\text{rad/s})。 \end{aligned}$$

电磁功率与电压平方成正比，于是有

$$\begin{aligned} P_M & = \left(\frac{U_N}{U_K}\right)^2 \left( P_K \times 10^3 - 3 \times \frac{R}{2} \times I_K^2 \right) \\ & = \left(\frac{440}{60}\right)^2 \left( 3.2 \times 10^3 - 3 \times \frac{0.212}{2} \times 60^2 \right) \end{aligned}$$

$$= 110.5 \times 10^3 \text{ W}$$

将此式代入起动转矩  $T_{st}$  公式中得到:

$$T_{st} = \frac{110.5 \times 10^3}{100\pi} \times 3 = 1056 \text{ N}\cdot\text{m}$$

**例3-47** JS117-10型65kW三相异步电动机,已知过载能力为  $\frac{T_{max}}{T_N} = 1.6$ ,此台电动机拖动额定负载运行,由于某种原因电源电压降低为  $0.75U_N$ ,问此台电动机能否继续运行,已知  $U_N = 380\text{V}$ 。

电动机转矩与电源电压平方成正比,即  $T_{max} \propto U^2$ ,由于电网电压降至  $0.75 \times 380 = 285\text{V}$ ,则最大转矩降低倍数为

$$\frac{T'_{max}}{T_{max}} = \left( \frac{0.75U_N}{U_N} \right)^2 = 0.56$$

$$\therefore T'_{max} = 0.56T_{max} = 0.56(1.6T_N) = 0.89T_N$$

说明最大转矩降为额定转矩的89%,低于额定转矩,所以此台电动机转速要降低,一直降到停止转动为止。

**例3-45** JO2-92-10型40kW三相异步电动机,  $U_N = 380\text{V}$ ,已知起动转矩倍数  $K_T = \frac{T'_{st}}{T_N} = 1.8$ ,现采用在定子电路串入电抗器方法起动电动机,使起动时施加在定子绕组中电压为  $70\%U_N$  (即266V),当负载转矩为额定转矩的90%时,问此台电动机能否被起动。

已知  $T'_{st}/T_N = 1.8$ ,当电源电压降为  $70\%U_N$  时,则起动转矩降为

$$T'_{st} = 0.7^2 T_{st} = 0.49 T_{st} = 0.49 \times 1.8 T_N = 0.882 T_N$$

由于  $T'_{st}$  为  $T_N$  的  $88.2\% < 90\%T_N$ ,所以不能起动。

**例3-48** JS128-6型215kW三相异步电动机额定电压  $U_N = 380\text{V}$ ,额定效率  $\eta_N = 92\%$ ,额定功率因数  $\cos\varphi_N = 0.89$ , $\Delta$ 联结,在额定电压下起动时,起动电流  $I_{st}$  为额定电流  $I_N$  的6倍,现用Y- $\Delta$ 起动器起动此台电动机,问这时起动电流应多大。

额定电流为

$$I_N = \frac{P_N}{\sqrt{3} U_N \cos \varphi_N \eta_N} = \frac{215 \times 10^3}{\sqrt{3} \times 380 \times 0.92 \times 0.89} = 399 \text{ A}$$

全电压起动时起动电流  $I_{st}$  为

$$I_{st} = 6 I_N = 6 \times 399 = 2394 \text{ A}$$

采用 Y- $\Delta$  起动器起动时, 起动电流  $I'_{st}$  为

$$I'_{st} = \frac{1}{3} I_{st} = \frac{1}{3} \times 2394 = 798 \text{ A}$$

例3-49 JS127-8型130kW三相异步电动机,  $U_N = 380 \text{ V}$ , 定子绕组为8个接线, 已知  $\eta_N = 92\%$ 、 $\cos \varphi_N = 0.85$ ,  $I_{st}/I_N = 5.5$ ,  $T_{st}/T_N = 1.30$ , 试求: (1) 采用自耦变压起动器起动此台电动机, 使电动机的起动转矩  $T'_{st}$  为额定转矩  $T_N$  的85%, 问自耦变压器的二次绕组抽头应放在什么位置上 (有65%, 70%, 85%, 100%等); (2) 在额定电压下起动和在自耦变压起动器下起动电动机, 其起动电流  $I'_{st}$  各为多少。

要求降压后的起动转矩  $T'_{st}$  为额定转矩  $T_N$  的85%, 即  $T'_{st} = 0.85 T_N$ , 由于起动转矩与电压平方成正比, 所以有

$$\frac{T'_{st}}{T_N} \propto \left( \frac{U}{U_N} \right)^2 = k_r^2 < 1$$

由于采用自耦变压起动器起动, 降压变比  $k_r < 1$ , 即  $k_r =$

$$\sqrt{\frac{T'_{st}}{T_N}} = \sqrt{\frac{0.85}{1.30}} = 0.81$$

所以选用自耦变压器的抽头在85%位置即可。

此台电动机额定电流为

$$I_N = \frac{P_N}{\sqrt{3} U_N \cos \varphi_N \eta_N} = \frac{130 \times 10^3}{\sqrt{3} \times 380 \times 0.92 \times 0.85} = 252 \text{ A}$$

全电压起动电流  $I_{st}$  为

$$I_{st} = 5.5 \times 252 = 1386 \text{ A}$$

降电压后起动电流  $I'_{st}$  为

$$I'_{st} = k_T^2 I_{st} = 0.85^2 \times 1386 = 1001.4 \text{ A}$$

**例3-50** 有一台三相笼型异步电动机，在额定电压下直接起动，起动转矩和起动电流分别为额定值的150%和600%，现在采用Y-Δ 起动器起动此台电动机，问这时电动机的起动转矩和起动电流为额定时的百分之几？

定子绕组为Y联结时，每相阻抗为Δ接线时的3倍，所以这时的起动电流  $I'_{st} = \frac{1}{3} \times 600\% = 200\%$ 。

如果忽略起动电流中的励磁电流，并设在额定电压下的起动电流为  $I_{st}$ ，转子电阻  $r_2$  已折算到定子边，则在额定电压下的起动转矩  $T_{st}$  为

$$T_{st} = 3 I_{st}^2 r_2$$

当采用Y-Δ 起动器时，电动机的起动转矩  $T'_{st}$  可按式求出，即

$$T'_{st} = 3 \left( \frac{I_{st}}{3} \right)^2 (3 r_2) = I_{st}^2 r_2$$

从上面计算结果看出，起动转矩  $T_{st}$  从150%降到50%，下降了3倍。

**例3-51** 有一台三相笼型异步电动机，已知在额定电压下直接起动时的起动转矩和起动电流分别为额定值的1.8倍和4.5倍，现在采用起动补偿器起动电动机，取额定电压的2/3进行起动电动机，问这时电动机和起动转矩和起动电流各为其额定值的多少倍。

设电动机在起动时每相阻抗为  $Z$ ，电源电压为  $U_1$ ，额定电流为  $I_N$ ，则电动机在额定电压下起动时，有下面关系式：

$$I_{st} = 4.5 I_N = \frac{U_1 / \sqrt{3}}{Z}$$

采用起动补偿器，并在额定电压的 $2/3$ 下起动电动机时，如忽略起动补偿器的励磁电流，则起动电流 $I'_{st}$ ，可按下式求出：

$$I'_{st} = \frac{U_1 / \sqrt{3}}{\left(\frac{3}{2}\right)^2 Z} = \frac{4}{9} \times 4.5 I_N = 2 I_N$$

说明此时起动电流为额定电流的2倍。

另外在额定电压下起动时，供给电动机的视在功率为

$$\sqrt{3} U_1 (4.5 I_N) (\text{VA})$$

采用补偿器后，视在功率变为

$$\sqrt{3} U_1 (2 I_N) (\text{VA})$$

电磁功率也按上面相同的比例变化。由于转矩与电磁功率成正比，所以采用起动补偿器起动电动机时，起动转矩 $T'_{st}$ 为

$$T'_{st} = \frac{\sqrt{3} U_1 (2 I_N)}{\sqrt{3} U_1 (4.5 I_N)} \times 1.8 T_N = 0.8 T_N$$

式中  $T_N$ ——电动机的额定转矩。

## 二、绕线转子异步电动机起动电阻计算

工程上计算绕线型三相异步电动机的起动电阻时，是利用线性化的机械特性，如图3-7、图3-8所示，这在工程上有足够准确性。

这样简化后，电机转矩与转差率或转速之间的关系是线性关系，即 $T = cs$ （ $c$ 为比例常数）。

电动机起动瞬间，转子全部电阻加入，即 $R_1 + R_2 + R_3 + r_2$ ，其中 $R_1$ 、 $R_2$ 、 $R_3$ 是外加电阻，是每极电阻， $r_2$ 是电机转子本身电阻，其特性曲线为图3-8中 $aA$ 直线。这时转矩为 $T$ ，电动机沿此特性曲线提高转速，当转速达到 $b$ 点时，这时转矩为 $T_2$ ，切换转矩 $T_2$ 是事先归定好的，这时接触器动作，将 $R_3$ 切除，电机转矩增大到 $T_1$ ，达到特性曲线 $c$ 点，沿新特性曲线升速，即沿 $cA$ 特性曲线变化，转矩随转速上升而降低，当降到 $d$ 点，即 $T_2$ 时，再将 $R_2$ 切断，电机转矩 $T_2$ 从 $d$ 点升到 $e$ 点，达到 $T_1$ ，这时转速不变，电机从 $e$ 点开始沿特性曲线 $eA$ 变化，一直到全



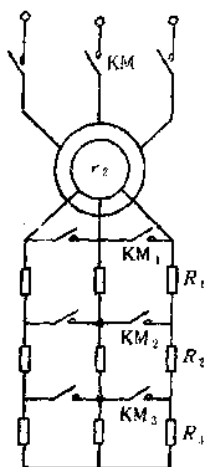


图3-7 绕线转子电动机（串接电阻）三级起动接线图

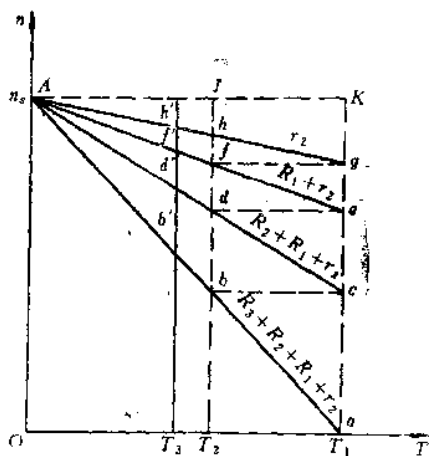


图3-8 绕线转子电动机起动特性曲线

部外加电阻切除，最后达到额定点  $h'$ ，转矩为  $T_3$ ，稳定运行。

### 1. 每相各段启动电阻的计算

设  $\frac{T_1}{T_2} = \lambda$ ，则有

$$R_1 = (\lambda - 1)r_2$$

$$R_2 = \lambda R_1$$

$$R_3 = \lambda R_2$$

$$R_m = \lambda R_{(m-1)}$$

式中  $r_2$ ——转子绕组本身电阻 ( $\Omega$ )；

$R_1, R_2, \dots, R_m$ ——每相每段电阻值 ( $\Omega$ )；

$\lambda$ ——系数；

$T_1$ ——最大转矩，不得小于  $(1.1 \sim 1.2)T_N$  ( $N \cdot m$ )；

$T_2$ ——切换转矩 ( $N \cdot m$ )；

$T_N$ ——额定转矩 (N·m)。

2. 转子绕组本身电阻  $r_2$

$$r_2 = \frac{s_N U_{N2}}{\sqrt{3} I_{N2}}$$

式中  $s_N$ ——额定转差率；

$U_{N2}$ ——转子额定电压，由铭牌查出 (V)；

$I_{N2}$ ——转子额定电流，由铭牌查出 (A)。

3. 各段电阻比值  $\lambda$

$$\lambda = \sqrt[m]{\frac{T_N}{s_N T_1}}$$

式中  $m$ ——起动电阻级数；

$T_1$ ——峰值电阻，一般  $T_1 = (1.5 \sim 2)T_N$ 。

例3-52 一台7.5kW，6极绕线转子异步电动机， $I_{N2} = 18.4\text{A}$ ， $U_N = 380\text{V}$ ， $s_N = 6.82\%$ ，转子额定电压  $U_{N2} = 277.5\text{V}$ ，

$\frac{T_1}{T_N} = 2.85$ ，Y联结，要求转子串电阻起动，二级起动时，问各段电阻是多少。

(1) 转子本身电阻  $r_2$

$$r_2 = \frac{s_N U_{N2}}{\sqrt{3} I_{N2}} = \frac{0.0682 \times 277.5}{\sqrt{3} \times 18.4} = 0.594\Omega$$

(2) 各段电阻比值  $\lambda$

$$\lambda = \sqrt[m]{\frac{T_N}{s_N T_1}} = \sqrt[2]{\frac{1}{0.0682 \times 2}} = 7.33$$

(3) 切换转矩

$$T_2 = \frac{T_1}{\lambda} = \frac{2T_N}{1.94} = 1.03T_N$$

(4) 每相各段电阻

$$R_1 = (\lambda - 1)r_2 = (1.94 - 1) \times 0.594 = 0.558\Omega$$

$$R_2 = \lambda R_1 = 1.94 \times 0.558 = 1.08\Omega$$

$$R_3 = \lambda R_2 = 1.94 \times 1.08 = 2.10\Omega$$

$$\begin{aligned} \text{总电阻 } \Sigma R &= R_1 + R_2 + R_3 + r_2 = 0.558 + 1.08 + 2.10 + 0.594 \\ &= 4.33\Omega \end{aligned}$$

**例3-53** 一台50kW、10极绕线转子三相异步电动机， $U_N = 380\text{V}$ ， $I_N = 121.1\text{A}$ ， $I_{N2} = 159\text{A}$ ， $\text{Y}$ 联结， $s_N = 3.32\%$ ， $U_{N2} = 212\text{V}$ ， $T_1/T_N = 3.31$ ，要求计算起动电阻值（5级起动）。

(1) 转子绕组每相电阻  $r_2$

$$r_2 = \frac{s_N U_{N2}}{\sqrt{3} I_{N2}} = \frac{0.0332 \times 212}{\sqrt{3} \times 159} = 0.026\Omega$$

(2) 各段电阻比值  $\lambda$  (令  $T_1 = 2T_N$ )

$$\lambda = \sqrt{\frac{T_1}{s_N T_1}} = \sqrt{\frac{1}{0.0332 \times 2}} = 1.72$$

(3) 切换转矩

$$T_2 = \frac{T_1}{\lambda} = \frac{2T_N}{1.72} = 1.16T_N$$

(4) 每相各段电阻

$$R_1 = (\lambda - 1)r_2 = (1.72 - 1) \times 0.026 = 0.0187\Omega$$

$$R_2 = \lambda R_1 = 1.72 \times 0.0187 = 0.0320\Omega$$

$$R_3 = \lambda R_2 = 1.72 \times 0.032 = 0.0554\Omega$$

$$R_4 = \lambda R_3 = 1.72 \times 0.0554 = 0.0953\Omega$$

$$R_5 = \lambda R_4 = 1.72 \times 0.0953 = 0.164\Omega$$

$$\begin{aligned} \Sigma R &= r_2 + R_1 + R_2 + R_3 + R_4 + R_5 \\ &= 0.026 + 0.0187 + 0.032 + 0.0554 \\ &\quad + 0.0953 + 0.164 = 0.391\Omega \end{aligned}$$

### 三、异步电动机调速方法及计算

三相异步电动机的转速表达式为

$$n = \frac{60f}{p} (1 - s) = n_1 (1 - s)$$

式中  $n$ ——电动机的转速(r/min)；

$f$ ——电源频率(Hz)；

$p$ ——电动机的极对数；

$s$ ——电动机的转差率， $s = \frac{n_1 - n}{n_1}$ ；

$n_1$ ——电动机的同步转速， $n_1 = \frac{60f}{p}$  (r/min)。

从上面表达式看出，欲改变电动机的转速，只要改变电源频率、电动机极数和转差率即可。由此得出三相异步电动机的各种调速方法。

从定子方面改变转速方法有：

- (1) 改变电源频率  $\left\{ \begin{array}{l} \text{交直交变频, 属于变频调速。} \\ \text{交交变频} \end{array} \right.$
- (2) 改变定子电压，属于改变转差率调速。
- (3) 改变电动机极数，属于变极调速。

从转子方面改变转速的方法有：

- (1) 绕线转子串入电阻调速，属于改变转差率的调速方法。
- (2) 串级调速  $\left\{ \begin{array}{l} \text{克雷默串级调速法} \\ \text{静止谢尔毕乌斯调速方法} \end{array} \right.$

均属于改变转差率调速方法。

综合上述属于转差率调速方法有：

- (1) 调电压调速；
- (2) 转子串电阻调速；
- (3) 串级调速  $\left\{ \begin{array}{l} \text{克雷默调速法} \\ \text{静止谢尔毕乌斯调速法} \end{array} \right.$

### 1. 调速种类和主要指标

(1) 有级调速和无级调速 有级调速也称分级调速，如变极调速属于这一种，只有几个转速，一般有二速、三速和四速电动机，靠改变绕组接线方式获得不同极数。而无级调速是连续调速，如变频调速，只要连续改变电源频率，就会得到相应的转速，从转速表达式知，如果电机极数不变，转差率视为不变，则转速与频率成正比变化，所以这种调速方法平滑性好 不间断。

(2)恒转矩调速和恒功率调速 调速方法按负载要求而定,对于恒功率负载,要选用恒功率调速方法;对于恒转矩负载,要选用恒转矩调速方法。

恒转速调速,是指当电动机的转速进行调节时,转矩保持不变,功率变化,比如变极电动机调速时,将定子绕组从2Y联结改为1Y联结时,就属于这种调速方法(见后面例题证明)。

恒功率调速,是指当电动机的转速进行调节时,功率保持不变,转矩改变,比如变极电动机调速时,将定子绕组从1Δ联结改为2Y联结时,就属于这种调速方法(见后面例题证明)。

## 2. 调速的主要性能指标

(1)调速范围  $\Delta n$  调速范围是指电动机拖动额定负载时,所达到的最大转速  $n_{max}$  与最低转速之比,即

$$\Delta n = \frac{n_{max}}{n_{min}}$$

不同的生产设备要求电动机有不同的调速范围,不同的电动机调速方法,能达到不同的调速范围。

(2)调速的稳定性 调速的稳定性是指当负载转矩变化时,电动机的转速随之变化的程度。通常采用静差率  $\delta$  的百分数来表示,即

$$\delta\% = \frac{n_1 - n}{n_1} \times 100\%$$

式中  $n_1$ ——理想的空载转速(r/min);

$n$ ——电动机实际转速(r/min)。

电动机的机械特性越硬,则转速变化越小, $\delta\%$ 也小,说明电动机的稳定性越高。对于同样硬度的特性,转速越低, $\delta\%$ 越大。普通车床  $\delta\% \leq 30\%$ ,而精密设备  $\delta\% \leq 0.1\%$

(3)调速的平滑性 电动机的调速级数越多越平滑,通常是用两极转速之比,平滑系数来表示,即

$$\xi = \frac{n_i}{n_{i-1}}$$

$\xi$  越接近 1，越平滑。

(4) 调速的经济性 调速方法有高效率调速和低效率调速两种，如定子调压和转子串电阻调速方法均属于低效率的调速方法，为了提高调速的经济性，要选用高效调速方法。另外还要考虑设备的投资问题。

### 3. 改变定子电压调速

电动机的转差率与电压平方成反比，所以改变电动机的外施电压可以改变电动机的转速，如图 3-9 所示，改变定子端电压大小，使电动机的机械特性发生变化，在一定负载转矩条件下，电动机的转差率发生变化，从而改变电动机转速。设  $U_2 < U_1$ ，则转差率  $s$  从  $s_1$  到  $s_2$ ，则使电动机的转速下降。

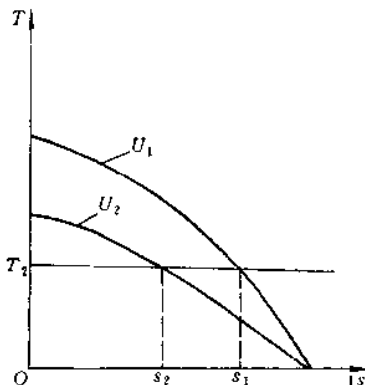


图 3-9 电动机转差率与其转速的关系

由于转速  $n$  降低，则转差率  $s$  上升，转子铜耗  $P_{Cu2} = sP_m$  增加，转子发热。所以这种调速方法不适合于在低转矩负载下的低速范围内使用，只能用于高转差率的电动机，这种调速方法由于调节简便，价格便宜，常使用在小容量电动机上。

### 4. 笼型电动机变极调速

电动机改变极数时，要求定转子绕组极数相同，对于绕线转子电动机，要求定转子同时进行改变极数，这比较困难，尤其绕组改接控制比较复杂，而笼型转子是多相短路转子，其极数随定子极数而变，所以通常变极调速方法只使用于笼型电动机上。

改变电动机的极数，可靠改变绕组接线方式来完成。

对于倍极比（如 4/8 极、2/4 极）的双速电动机，可将每相绕组中的半相绕组电流方向改变，如图 3-10 所示，图 3-10a 为 4 极电动机，图 3-10b 为 2 极电动机。

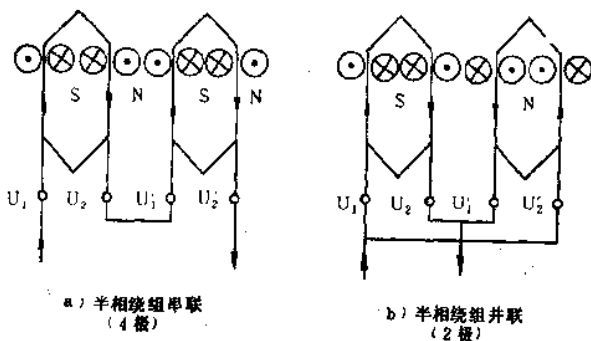


图3-10 异步电动机的变极原理

a) 串相绕组串联 (4极)      b) 半相绕组并联 (2极)

对于非倍极比 (如4/6极, 8/12极) 的多速电动机,如图3-11所示。图3-11a表示4极电动机,将绕组元件3、4中电流方向反向接时,则变成6极接法,如图3-11b所示。

为使变极后的电动机转速方向不变,在改变绕组接线时,同时要改变绕组的三相相序,或电源的三相相序。

**例3-54** 试证明 $1\text{Y}$ 联结的绕组改为 $2\text{Y}$ 联结时,是恒转矩调速方法。

如图3-12所示,设电源线电压为 $U_1$ 、相电压为 $U_\phi$ 、 $I$ 为线电流,功率因数为 $\cos\varphi_\phi$ 。

当 $1\text{Y}$ 联结时,如图3-12a所示,将绕组端头1、2、3接电源,4、5、6头空着,这时电机绕组的极数为 $2p$ 。保持线圈电流不变 (即导线电流密度基本不变),则电动机输入功率 $P_1$ 为

$$P_1 = 3U_\phi I_\phi \cos\varphi_\phi = \sqrt{3} \left( \frac{U_1}{\sqrt{3}} \right) I \cos\varphi_\phi$$

当改接为 $2\text{Y}$ 时,见图3-12b或图3-12c,这时输入功率 $P_1'$ 为

$$P_1' = 3U_\phi I_\phi \cos\varphi_\phi' = 3 \left( \frac{U_1}{\sqrt{3}} \right) (2I) \cos\varphi_\phi' = 2P_1$$

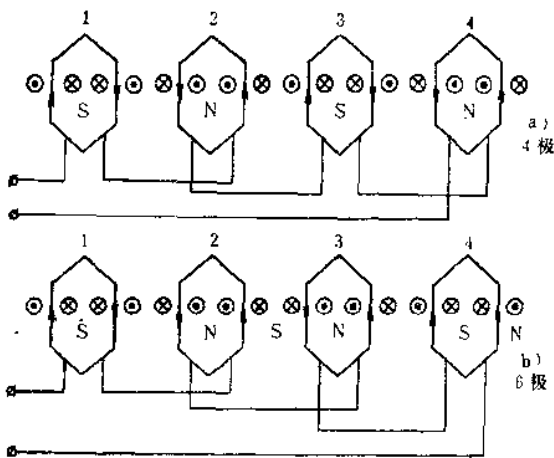


图3-11 4/6极多速异步电动机变极原理

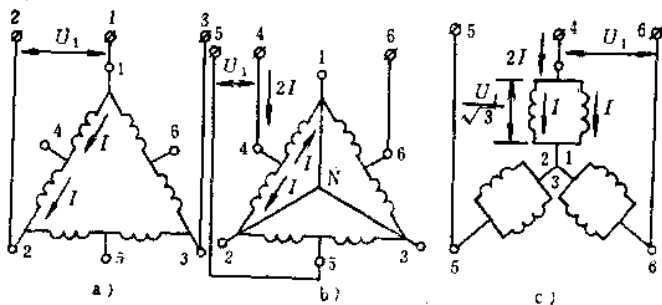


图3-12 1Y-2Y变换时三相绕组的联结

令  $\cos\varphi_s = \cos\varphi'_s$ , 2Y联结时, 电机极数为  $p$ 。

由于  $n$  与  $p$  成反比,  $n' = 2n$

1Y联结时, 电动机转矩  $T = 9550 \frac{P_1}{n}$ ; 2Y联结时, 电动



机转矩  $T' = 9550 \frac{P'_1}{n'} = 9550 \frac{2P_1}{2n}$ , 所以  $T' = T$ 。

证明1Y联结改为2Y联结是属于恒转矩调速方法。

例3-55 试证明1Δ联结改为2Y联结是属于恒功率调速方法。

外加电压  $U_1$  不变 (Δ联结时, 如图3-13a所示), 电动机输入功率  $P_1$  为

$$P_1 = 3U_\phi I_\phi \cos\varphi_\phi = 3U_1 I \cos\varphi_\phi = 3U_1 I \cos\varphi_\phi$$

2Y联结时 (如图3-13c所示) 输入功率为

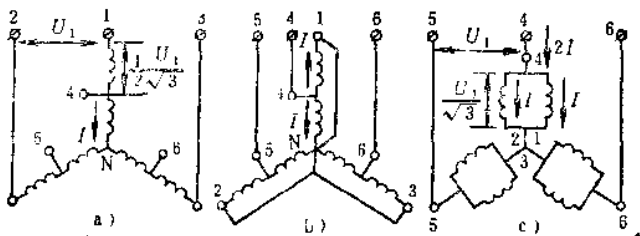


图3-13 Δ-2Y变换时的三相绕组联结

$$\begin{aligned} P'_1 &= 3I'_\phi I_\phi \cos\varphi'_\phi = 3\left(\frac{U_1}{\sqrt{3}}\right)(2I)\cos\varphi'_\phi \\ &= 3U_1 I \cos\varphi'_\phi \left(\frac{2}{\sqrt{3}}\right) = \frac{2}{\sqrt{3}} P_1 \end{aligned}$$

令  $\cos\varphi'_\phi = \cos\varphi_\phi$ , 则有

$$P'_1 = \frac{2}{\sqrt{3}} P_1 = 1.15 P_1 \approx P_1$$

输入功率差15%, 如果认为电动机效率不变, 即  $\eta' = \eta$ , 则输出功率也相差15%, 所以是恒功率调速方法。

这时, 当1Δ联结改2Y联结时, 电动机转矩  $T$  减少一半, 因为

$$T' = 9550 \frac{P_1'}{n'} \approx 9550 \frac{P_1}{2n} = 9550 \frac{P_1}{n} \left( \frac{1}{2} \right) = \frac{T}{2}$$

### 5. 变频调速

如果认为电动机的转差率变化不大,从转速表达式看出,电动机的转速与电源频率成正比,只要频率能均匀改变,则电机转速则相应均匀变化。

当频率从工频(50Hz)向下调时,为了使磁通密度不变,应使外施端电压与频率的比值为常数,变频率的同时,要相应改变电源端电压,所以这是恒磁通控制方式。已知电机转矩  $T = c_T \Phi I_2' \cos \varphi_2$ , 由于  $\Phi$ 、 $I_2'$ 、 $\cos \varphi_2$  不变,所以这种调速方式是恒转矩调速。

当频率从工频向上调时,由于保持外施电压不变,则应使磁通密度  $B$  降低,因  $U \propto B \cdot f$ , 即  $f(\uparrow) \propto \frac{U(\text{不变})}{B(\downarrow)}$ , 所以是弱磁调速。电机转矩  $T = c_T \Phi I_2' \cos \varphi_2$  中,  $\Phi$  降低,所以转矩  $T$  降低。

又电磁功率  $P_M \propto \frac{mU^2}{r_1'} s$ , 由于  $U$  不变,  $P_M$  不变,  $s$  变化很小,

所以这种调速方法属于恒功率调速。

从上面分析看出,频率可以向下调,也可以向上调,所以变频调速的范围广,转速范围大,且属于平滑调速,机械特性硬度大,稳定性好,效率高,无级调速,唯一不足是变频器价格昂贵,今后随电子工业发展和进步,价格会降下来,所以变频调速是今后调速的方向。

**例3-56** Y250M-4型、55kW 三相异步电动机,已知  $U_N = 380V$ ,  $f = 50Hz$ ,  $n_N = 1480r/min$ ,问使用在频率为25Hz的三相电源上时,电动机转速变为多少,如果使磁通密度不变(恒转矩调速),问这时端电压应是多少。

已知转速与频率成正比,所以在25Hz时运行的电机转速变为

$$n' = n_N \frac{f'}{f} = 1480 \times \frac{25}{50} = 1240 \text{ r/min}$$

当磁器保持不变时, 电动机的端电压  $U'$  为

$$U' = U \frac{f'}{f} = 380 \times \frac{25}{50} = 290 \text{ V}$$

**例3-57** 一台苏联生产的A082-6型28kW三相异步电动机, 已知  $U_N = 500 \text{ V}$ ,  $I_N = 42.5 \text{ A}$ ,  $n_N = 980 \text{ r/min}$ ,  $f = 50 \text{ Hz}$ , 拟改用在20Hz三相电源上使用, 问电动机转速变成多少, 电机转矩变成多少, 如果保持磁通密度不变 (即  $T' = T$  时), 电动机输出功率变为多少。

$$(1) \quad n' = n \frac{f'}{f} = 980 \times \frac{20}{50} = 392 \text{ r/min}$$

$$(2) \quad U' = U \frac{f'}{f} = 500 \times \frac{20}{50} = 200 \text{ V}$$

$$(3) \quad T_N = 9550 \frac{P_N}{n_N} = 9550 \times \frac{28}{980} = 272.9 \text{ N}\cdot\text{m}$$

$$(4) \text{ 由于 } T' = T, \quad T' = 9550 \times \frac{P'_N}{n'}, \text{ 则有}$$

$$P'_N = \frac{T' n'}{9550} = \frac{272.9 \times 392}{9550} = 11.2 \text{ kW}$$

$$\therefore T' = 9550 \times \frac{P'_N}{n'} = 9550 \times \frac{11.2}{392} = 272.9 \text{ N}\cdot\text{m}$$

### 6. 绕线型电动机转子串电阻调速

对于恒转矩负载, 电动机的转速随串入调速电阻的增加而降低, 由于恒转矩调速, 转子电流  $I_2$  和转子功率因数  $\cos\varphi_2$  变化不大, 当转速调下时, 转差率上升, 使转子铜耗  $P_{Cu2} = sP_m$  升高, 电机效率下降, 所以这种调速方法的调速范围小。串电阻后, 电机的机械特性变软, 所以调速的稳定性也差, 但由于调速方法简便, 对于短时间重复变化的负载, 损耗量不大, 得到广泛应用, 如在起重机上应风机、水泵上得到广泛的应用, 这是因为电

机转矩与转速平方成正比，而功率与转速立方成正比，即  $T \propto n^2$ ， $P \propto n^3$ ，转速少许变化，引起功率变化较大，节省许多电能，由于电动机内部损耗降低，可允许电机串电阻后连续运行。

在恒转矩负载条件下，电动机转速下降率与转子电阻成正比，即

$$\text{额定时} \quad \frac{n_1 - n_N}{n_1} \propto r_2$$

$$\text{串入调速电阻时} \quad \frac{n_1 - n}{n_1} \propto R_2$$

$$\therefore \frac{n_1 - n_N}{n_1 - n} = \frac{r_2}{R_2}$$

式中  $n_1$ ——电动机同步转速(r/min)；  
 $n_N$ ——电动机额定转速(r/min)；  
 $n$ ——调电阻后的电机转速(r/min)；  
 $r_2$ ——转子每相电阻( $\Omega$ )；  
 $R_2$ ——串入调速电阻后的转子每相总电阻( $\Omega$ )。

**例3-58** 一台50kW，6极绕线转子异步电动机，已知  $r_2 = 0.6\Omega$ ，1Y接线， $f = 50\text{Hz}$ ， $s_N = 10.2\%$ ，现欲使此台电动机的转速降为750r/min运行，在恒转矩场合，问附加调速电阻多大，额定转矩是多少。

电动机的同步转速  $n_1$ 为

$$n_1 = \frac{60f}{p} = \frac{60 \times 50}{3} = 1000\text{r/min}$$

额定转速  $n_N$ 为

$$n_N = n_1(1 - s_N) = 1000(1 - 10.2\%) = 898\text{r/min}$$

由  $\frac{n_1 - n_N}{n_1 - n} = \frac{r_2}{R_2}$  知

$$R_2 = r_2 \frac{n_1 - n}{n_1 - n_N} = 0.6 \times \frac{1000 - 750}{1000 - 898} = 1.47\Omega$$

所以外加调速电阻为

$$R_2 - r_2 = 1.47 - 0.6 = 0.87 \Omega / \text{相}$$

额定值时，电动机额定转矩  $T_N$  为

$$T_N = 9550 \frac{P_N}{n_N} = 9550 \times \frac{50}{898} = 532 \text{ N}\cdot\text{m}$$

负载转矩与转速平方成正比时，电动机的损耗、功率和效率之间的关系，设电动机额定转矩为  $T_N$ ，额定转速为  $n_N$ ，则额定输入功率  $P_{N1}$  为

$$P_{N1} = \frac{T_N n_1}{9550}$$

额定输出功率  $P_{N2}$  为

$$P_{N2} = \frac{T_N n_N}{9550}$$

当电动机转速从  $n_N$  降为  $n$  时，则有

$$P_1 = \frac{T n_1}{9550} \quad P_2 = \frac{T n}{9550}$$

$$\therefore \frac{P_2}{P_{N2}} = \frac{T n}{T_N n_N} = \left( \frac{T}{T_N} \right) \frac{n}{n_N}$$

由于负载转矩与  $n^2$  成正比，所以有

$$\frac{T}{T_N} = \left( \frac{n}{n_N} \right)^2$$

故有

$$\frac{P_2}{P_{N2}} = \left( \frac{n}{n_N} \right)^3$$

说明电动机输出功率与转速的立方成正比。

同理 
$$\frac{P_1}{P_{N1}} = \frac{T n_1}{T_N n_N} = \left( \frac{n}{n_N} \right)^2 \frac{n_1}{n_N}$$

电动机总损耗  $\Sigma P$  为

$$\Sigma P = P_1 - P_2 = \left( \frac{n}{n_N} \right)^3 \left( \frac{n_1}{n_N} - \frac{n}{n_N} \right) P_{N1}$$

电动机效率  $\eta$  为

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{\left(\frac{n}{n_N}\right)^3 P_{N_2}}{\left(\frac{n}{n_N}\right)^2 \frac{n_1}{n_N} P_{N_2}} = \frac{\frac{n}{n_N}}{\frac{n}{n_N}} = \frac{n}{n_1}$$

已知电机转矩  $T = c_T \Phi I'_2 \cos \varphi_2$ , 额定值  $T_N = c_T \Phi_N I'_{N_2} \cos \varphi_{N_2}$ 。  
 由于  $U$ 、 $\Phi$  不变, 功率因数也视为不变, 则有

$$\frac{T}{T_N} = \frac{I_2}{I_{N_2}} \quad \text{又} \quad \frac{T}{T_N} \propto \left(\frac{n}{n_N}\right)^2$$

$$\therefore \frac{I_2}{I_{N_2}} = \left(\frac{n}{n_N}\right)^2$$

转子每相电阻  $R_2 = \frac{\Sigma P}{3I_2^2}$ 。

令绕线电机转子外串电阻为  $R_0$ , 则有

$$R_0 = R_2 - r_2$$

式中  $r_2$ ——转子本身每相电阻 ( $\Omega$ );

$I'_2$ ——折合到定子边的转子电流 (A)。

**例3-59** 一台30kW, 4极绕线转子三相异步电动机, 拖动水泵负载, 负载转矩与转速平方成正比, 已知  $n_N = 1425 \text{r/min}$ , 问转子串入电阻使转速降为  $1140 \text{r/min}$ , 这时电动机的输入功率  $P_1$ 、输出功率  $P_2$ , 总损耗  $\Sigma P$  和效率  $\eta$  各是多少。

(1) 输入功率  $P_1$  为

$$P_1 = P_N \left(\frac{n}{n_N}\right)^2 \frac{n_1}{n_N} = 30 \times \left(\frac{1140}{1425}\right)^2 \times \frac{1500}{1425} = 20.2 \text{ kW}$$

(2) 输出功率  $P_2$  为

$$P_2 = \left(\frac{n}{n_N}\right)^3 P_N = \left(\frac{1140}{1425}\right)^3 \times 30 = 15.36 \text{ kW}$$

(3) 电动机总损耗  $\Sigma P$

$$\Sigma P = P_1 - P_2 = 20.2 - 15.36 = 4.84 \text{ kW}$$

(4) 电动机效率  $\eta$  为

$$\eta = \frac{n}{n_1} = \frac{1140}{1500} \times 100\% = 76\%$$

**例3-60** 有一台80kW、10极绕线转子三相异步电动机，已知  $U_N = 380\text{V}$ ， $s_N = 2.73\%$ ， $r_2 = 0.0204\Omega$ ， $I_{N2} = 179\text{A}$ ，为使电动机转速降为460r/min，问外加电阻多大，这时转子电流  $I_2'$  和总损耗  $\Sigma P$  各是多少。

(1) 电动机额定转速  $n_N$

$$n_N = n_1(1 - s_N) = \frac{120f}{2p}(1 - 0.0273) = 584\text{r/min}$$

(2) 转子电流  $I_2'$ ，由  $\frac{I_2'}{I_{N2}} = \left(\frac{n}{n_N}\right)^2$  可知

$$I_2' = \left(\frac{n}{n_N}\right)^2 I_{N2} = \left(\frac{460}{584}\right)^2 \times 179 = 111\text{A}$$

(3) 电动机总损耗  $\Sigma P$

$$\begin{aligned} \Sigma P &= \left(\frac{n}{n_N}\right)^2 \left(\frac{n_1}{n_N} - \frac{n}{n_N}\right) P_N \\ &= \left(\frac{460}{584}\right)^2 \left(\frac{600}{584} - \frac{460}{584}\right) \times 80 = 11.85\text{kW} \end{aligned}$$

(4) 转子总电阻  $R_2$

$$R_2 = \frac{\Sigma P}{3I_2'^2} = \frac{11.8 \times 10^3}{3 \times 111^2} = 0.321\Omega/\text{相}$$

(5) 外串入转子的调速电阻  $R_0$

$$R_0 = R_2 - r_2 = 0.321 - 0.0204 = 0.301\Omega/\text{相}$$

#### 四、单速绕组改多速绕组的计算

##### 1. 对被改制的单速电动机的要求

(1) 校核槽配合，检查槽配合是否适应改变极数后电动机启动和运行性能的要求（参见前面介绍改极的槽配合校验内容）。

(2) 选择被改制的电动机的容量应比改制后的多速电动机所需容量大1~2等级。

(3) 被改制的电动机的极数应与被改制后的多速电动机的极

数相近,并以提高转速为好。比如欲改制2/4极双速电动机,可选用4极或2极单速电动机进行改制;4/6/8极多速电动机,可选用6极单速电动机进行改制,一般可参考表3-1。

表3-1 单速绕组改为多速绕组时如何选择单速电动机的极数

要求改制的极数	定子槽数	选择单速电动机的极数
2/4	24, 36, 48, 54, 60, 72	4或2
4/8	24, 36, 48, 60, 72	8或4
4/6	36, 48, 72	6或4
6/8	36, 54, 72	8或6
2/8	24, 36, 72	4或8
2/4/8	36, 48, 72	4或8
4/6/8	36, 72	6或4

(4)对于恒功率负载,选择变极调速方案时,应选择不同极数下的绕组系数相接近且较高的方案;对于恒转矩负载,选择变极调速方案时,应选择不同极数下的绕组系数不同,少极的绕组系数应高,多极的绕组系数应低。

(5)对于恒功率负载,电动机的接线方式应选用2Y/Δ、Y/Y、Δ/Δ、2Y/2Y等;对于恒转矩负载,电动机的接线方式应选用2Y/Y、Δ/Y等;对于转矩随转速下降递减的电动机,其接线方式宜选用2Δ/Y。同时还要考虑出线头的个数,一般有6个和9个出线端。

(6)校验变极后的转子强度,是否适应高转速下运行。

## 2. 简易计算

(1)原电机的技术数据 计算时所需的原始技术数据

1)铭牌数据:  $P_N$ 、 $U_N$ 、 $f_N$ 、 $I_N$ 、 $n_N$ 绕组接法、运行方式等;

2)铁心数据:  $Z_1$ 、 $Z_2$ 、 $l_{Fe}$ 、 $D_1$ 、 $D_{i1}$ 等;

3)绕组数据: 绕组型式、每槽导体数、导线规格、线圈节距、并联支路数  $\alpha$ 、并绕根数等。

(2)简易计算

1)每槽导体数  $N'_s$



$$N'_{sc} = N_{sc} \frac{U'_{s1} K'_{sp1} \alpha'}{U_{s1} K_{sp1} \alpha}$$

式中  $N_{sc}$ ——原电机每槽导体数；

$U_{s1}$ ——定子绕组相电压 (V)；

$K_{sp1}$ ——绕组系数；

$K'_{sp1}$ ——改制后的绕组系数；

$\alpha$ ——并联支路数；带“'”者，为改制后的数值。

2) 每相串联匝数  $N'_s$

$$N'_s = \frac{N_{sc} Z_1}{6\alpha}$$

式中  $Z_1$ ——定子槽数。

3) 根据不同极数下气隙磁密比值，调整确定每槽导体数

$$\frac{B'_s}{B_s} = \frac{U'_{s1} p' N'_{s1} K'_{sp1}}{U_{s1} p N_{s1} K_{sp1}}$$

式中  $B_s$ ——气隙磁通密度，带“'”者表示多极 (T)；

$N_{s1}$ ——每相串联匝数；

$K_{sp1}$ ——绕组系数；

$p$ ——极对数。

当  $\frac{B'_s}{B_s} \approx 1$  时，可把  $N'_{sc}$  做为多速电动机的每槽导体数，

当  $\frac{B'_s}{B_s} < 1$  时，说明少极时气隙磁密过高， $N'_{sc}$  应增加； $\frac{B'_s}{B_s} >$

1 时，说明少极时气隙磁密过低， $N'_{sc}$  可适当减少。

根据气隙磁密比，原电动机能否适应其他极数的要求，要对各种极数下的性能综合考虑后进行修正，修正公式见表 3-2。

改绕后的多速电动机每槽导体数，按下式确定：

$$N'_{sc} = \frac{1 + \alpha}{2} N_{sc}$$

式中  $\alpha = B_s / B'_s$ ；

$N'_{sc}$ ——修正后的多速电动机每槽导体数。

4) 导线绝缘直径

$$d' = d \sqrt{\frac{N N_{1\epsilon}}{N' N'_{1\epsilon}}}$$

式中  $d$ ——单速电动机的线圈导线直径 (mm) ;  
 $N$ ——并绕根数。

5) 输出功率估算

$$P' = P \frac{U'_{\phi 1} a' d'^2}{U_{\phi 1} a d^2}$$

两种极数下的功率比为

$$\frac{P'}{P} \approx K \frac{U' a'}{U a}$$

三种极数下的功率比为

$$\frac{P''}{P'} \approx K \frac{U'' a''}{U' a'} \quad \frac{P'}{P} \approx K \frac{U' a'}{U a}$$

式中  $K$ ——功率降低系数, 一般取  $0.7 \sim 0.9$ 。

6) 改极后额定电流估算

$$I' = \frac{P_N 10^3}{\sqrt{3} U_N \eta_N \cos \varphi_N}$$

例3-61 Y180L-4型, 18.5kW 三相异步电动机,  $I_N = 36\text{A}$ ,  $n_N = 1470\text{r/min}$ , 定子槽数  $Z_1 = 48$ 槽,  $U_N = 380\text{V}$ ,  $f_N = 50\text{Hz}$ , 绕组接线方式为  $\Delta$  联结, 线圈跨距  $y = 1 \sim 11$ 槽, 每槽导体数 32, 导线为  $2-\phi 1.18\text{mm}$ 。要求改为  $2/4$  极双速电动机,  $U_N = 380\text{V}$ ,  $f = 50\text{Hz}$ , 求新的绕组参数。

(1) 每极每相槽数为

$$q = \frac{Z_1}{3 \cdot 2p} = \frac{48}{3 \times 4} = 4$$

(2) 极距为

$$\tau = \frac{Z_1}{2p} = \frac{48}{4} = 12$$

表3-2 单速电动机改统为多速电动机每槽导体数修正公式

原单速电动机数据					改统后多速电动机数据		
极数	相电压	绕组系数	并联支路数	每槽导体数	极数	联结方法	每槽导体数修正公式
4	$U_1$	$K_{ap}$	$a_1$	$N_{sc}$	2/4	$\frac{2Y/\Delta}{2Y/Y}$	$N'_{sc} = 1.27 \frac{U'_1 K_{ap} a'_1}{U_1 K'_{ap} a_1} N_{sc}$
						$2Y/\Delta$	$N'_{sc} = 1.35 \frac{U'_1 K_{ap} a'_1}{U_1 K'_{ap} a_1} N_{sc}$
2	$U_1$	$K_{ap}$	$a_1$	$N_{sc}$	2/4	$3Y/2\Delta$	$N'_{sc} = 0.95 \frac{U'_1 K_{ap} a'_1}{U_1 K'_{ap} a_1} N_{sc}$
						$2Y/\Delta$	$N'_{sc} = 1.35 \frac{U'_1 K_{ap} a'_1}{U_1 K'_{ap} a_1} N_{sc}$
4	$U_1$	$K_{ap}$	$a_1$	$N_{sc}$	4/3	$2Y/\Delta$	$N'_{sc} = 1.35 \frac{U'_1 K_{ap} a'_1}{U_1 K'_{ap} a_1} N_{sc}$
						$2Y/Y$	$N'_{sc} = 0.95 \frac{U'_1 K_{ap} a'_1}{U_1 K'_{ap} a_1} N_{sc}$
8	$U_1$	$K_{ap}$	$a_1$	$N_{sc}$	4/8	$\frac{2Y/\Delta}{2Y/Y}$	$N'_{sc} = 1.16 \frac{U'_1 K_{ap} a'_1}{U_1 K'_{ap} a_1} N_{sc}$
						$3Y/\Delta$	$N'_{sc} = 0.95 \frac{U'_1 K_{ap} a'_1}{U_1 K'_{ap} a_1} N_{sc}$
6	$U_1$	$K_{ap}$	$a_1$	$N_{sc}$	4/8	$2Y/Y$	$N'_{sc} = 0.9 \frac{U'_1 K_{ap} a'_1}{U_1 K'_{ap} a_1} N_{sc}$
						$2Y/\Delta$	$N'_{sc} = 1.35 \frac{U'_1 K_{ap} a'_1}{U_1 K'_{ap} a_1} N_{sc}$

(续)

原单速电动机数据					改绕后多速电动机数据		
极数	相电压	绕组系数	并联支路数	每槽导体数	极数	联结方法	每槽导体数修正公式
4	$U_1$	$K_{dp4}$	$a_1$	$N_{sc}$	4/6	$2Y/\Delta$	$N'_{sc} = 1.05 \frac{U'_1 K_{dp4} a'_1}{U_1 K'_{dp4} a_1} N_{sc}$
						$2Y/Y$	$N'_{sc} = \frac{U'_1 K_{dp4} a'_1}{U_1 K'_{dp4} a_1} N_{sc}$
6	$U_1$	$K_{dp6}$	$a_1$	$N_{sc}$	4/6	$\frac{2Y/\Delta}{2Y/Y}$	$N'_{sc} = 1.27 \frac{U'_1 K_{dp6} a'_1}{U_1 K'_{dp6} a_1} N_{sc}$
6	$U_1$	$K_{dp6}$	$a_1$	$N_{sc}$	6/8	$\frac{2Y/\Delta}{2Y/Y}$	$N'_{sc} = 1.1 \frac{U'_1 K_{dp6} a'_1}{U_1 K'_{dp6} a_1} N_{sc}$
4	$U_1$	$K'_{dp4}$	$a_1$	$N_{sc}$	2/8	$2Y/Y$	$K'_{sc} = 0.9 \frac{U'_1 K_{dp4} a'_1}{U_1 K'_{dp4} a_1} N_{sc}$
4	$U_1$	$K_{dp4}$	$a_1$	$N_{sc}$	2/4/8	$2\Delta/2\Delta/2Y$	$N'_{sc} = 1.5 \frac{U'_1 K_{dp4} a'_1}{U_1 K'_{dp4} a_1} N_{sc}$
6	$U_1$	$K_{dp6}$	$a_1$	$N_{sc}$	4/6/8	$2Y/2Y/2Y$	$N'_{sc} = \frac{U'_1 K_{dp6} a'_1}{U_1 K'_{dp6} a_1} N_{sc}$
						$2\Delta/2\Delta/Y$	$N'_{sc} = 0.93 \frac{U'_1 K_{dp6} a'_1}{U_1 K'_{dp6} a_1} N_{sc}$

注:  $U_2, U_4, U_6, U_8, a_2, a_4, a_6, a_8, K_{dp2}, K_{dp4}, K_{dp6}, K_{dp8}$  分别代表改绕后多速电动机极数为 4、6、8 时的相电压、并联支路数和绕组系数。

表3-3 常用变极方案的绕组接法

极数	槽数	节距	绕组系数	接法和引出线根数	变极原理			
2/4	24	1-7	2极 0.677 4极 0.830	2 Y/Y(6) <sup>①</sup> 2 Y/Δ(6) 2 Y/2 Y(9)	一半反接, 以 2极为基本极			
		1-8	2极 0.76 4极 0.808					
	36	1-10	2极 0.676 4极 0.831					
		1-11	2极 0.732 4极 0.818					
	48	1-13	2极 0.676 4极 0.829					
			1-14			2极 0.719 4极 0.822		
		60	1-16			2极 0.676 4极 0.828		
			1-17			2极 0.71 4极 0.824		
	4/8	24	1-4			4极 0.683 8极 0.866	2 Y/Y(6) 2 Y/Δ(6) 2 Y/2 Y(9)	一半反接, 以 4极为基本极
			1-5			4极 0.837 8极		
36		1-6	4极 0.617 8极 0.831					
		1-8	4极 0.735 8极 0.831					
48		1-7	4极 0.677 8极 0.836					
		1-8	4极 0.760 8极 0.808					

(续)

极数	槽数	节距	绕组系数	接法和引出线根数	变极原理	
4/8	60	1-9	4极 0.711 8极 0.828	2 Y/Y(6) 2 Y/Δ(8) 2 Y/2 Y(9)	一半反接, 以 4极为基本极	
		1-10	4极 0.774 8极 0.792			
4/6	36	1-7	4极 0.831 6极 0.644	2 Y/Y(6) 2 Y/Δ(8)	一半反接, 以 4极为基本极	
		1-8	4极 0.90 6极 0.622			
	36	1-7	4极 0.720 6极 0.880		不规则分布, 无基本极	
		1-8	4极 0.781 6极 0.850			
6/8	36	1-6	6极 0.622 8极 0.945		2 Y/Y(6) 2 Y/Δ(8)	一半反接, 以 8极为基本极
		1-7	6极 0.640 8极 0.830			
	36	1-5	6极 0.762 8极 0.818			不规则分布无 基本极
		1-6	6极 0.850 8极 0.816			
		1-7	6极 0.880 8极 0.720			
	54	1-7	6极 0.830 8极 0.610	一半反接, 以 6极为基本极		
		1-8	6极 0.902 8极 0.619			
	72	1-11	6极 0.616 8极 0.945	一半反接, 以 6极为基本极		

(续)

级数	槽数	节 距	绕组系数	接法和引出线根数	变极原理
6/8	72	1—12	6极 0.633 8极 0.902	2 Y/Y(8) 2 Y/Δ(6)	一半反接, 以 8极为基本极
2/8	36	1—6	2极 0.404 8极 0.720	2 Y/Y(6) 2 Y/Δ(6)	一半反接, 以 2极为基本极
		1—7	2极 0.478 8极 0.633	2 Δ/Y(8)	
2/4/2	36	1—7	2极 0.676 4极 0.830	2 Δ/2 Δ/2 Y(9)	两种节距变节 法
		1—13	8极 0.633		
	48	1—9	2极 0.676 4极 0.830		
		1—17	8极 0.630		
36	1—7	2极 0.478 4极 0.831 8极 0.630	2 Δ/2 Δ/2 Y(12)	换向变极法	
		48			1—9
4/6/8	36	1—6	4极 0.736 6极 0.622 8极 0.831	2 Y/2 Y/2 Y(9)	一半反接, 以 6极为基本极
		1—7	4极 0.831 6极 0.644 8极 0.731		
	72	1—12	4极 0.785 6极 0.631 8极 0.781	2 Δ/2 Δ/2 Y(12)	
		1—13	4极 0.823 6极 0.636 8极 0.720		

① 括号内数字为引出线根数。

(3) 选节距  $y' = 1-13$  槽, 查表3-3得到:

2 极的绕组系数  $K'_{dp2} = 0.676$ , 4 极时  $K'_{dp4} = 0.829$ 。

绕组联结形式为  $2Y/\Delta$ , 仍用双叠绕组。

(4) 原绕组系数  $K_{dp4}$

$$K_{dp4} = \frac{0.5}{q \sin \frac{30^\circ}{q}} \sin(\beta \times 90^\circ)$$

$$= \frac{0.5}{4 \sin \frac{30^\circ}{4}} \sin \frac{10}{12} \times 90^\circ = 0.93$$

式中  $\beta = \frac{y}{p} = \frac{10}{12}$ 。

(5) 4 极时  $U'_4 = 380V$ ,  $1\Delta$  联结,  $a_4 = 1$ ,  $K'_{dp4} = 0.829$ , 查表3-2知, 每槽导体数 (4 极)  $N'_{sc}$  为

$$N'_{sc} = 1.27 \times \frac{U'_4 K_{dp4} a'_4}{U_1 K_{dp4} a_1} N_{sc}$$

$$= 1.27 \times \frac{380 \times 0.93 \times 1}{380 \times 0.829 \times 1} \times 32 = 46$$

因双层绕组, 每线圈23匝。

(6) 导线线径的确定

$$d'_1 = \sqrt{\frac{N N'_{sc}}{N' N'_{sc}}} d_1 = \sqrt{\frac{2 \times 32}{2 \times 46}} \times 1.18 = 0.98 \text{mm}$$

选导线线规为  $\phi 1.0 \text{mm}$  高强漆包线。

(7) 功率计算

4 极时

$$P'_4 = \frac{U'_4 \cdot a'_4 \cdot d_1'^2}{U_1 \cdot a_1 \cdot d_1^2} P = \frac{380 \times 2 \times 1.0^2}{380 \times 2 \times 1.18^2} \times 18.5$$

$$= 13.3 \text{kW}$$

2 极时



$$P_2 = \frac{P_1}{K} = \frac{13.3}{0.85} = 16 \text{ kW}$$

其中,  $K$  选为 0.85。

例3-62 一台 Y225M-6型30kW 三相异步电动机, 已知  $a = 2$ , 每槽导线数26, 双层叠绕,  $y = 1 \sim 9$ 槽, 定子槽数  $Z_1 = 54$ ,  $\Delta$  接线, 导线为  $2-\phi 1.40\text{mm}$ ,  $1-\phi 1.30\text{mm}$  (相当  $\phi 1.35\text{mm}$  三根并绕),  $U_N = 380\text{V}$ ,  $f_N = 50\text{Hz}$ , 要求改为6/8极双速电动机,  $U_N$  和  $f_N$  不变。

(1) 每极每相槽数  $q$

$$q = \frac{Z_1}{m \times 2p} = \frac{54}{3 \times 6} = 3$$

(2) 极距为

$$\tau = \frac{Z_1}{2p} = \frac{54}{6} = 9$$

短距角为

$$\beta = \frac{y}{\tau} = \frac{8}{9}$$

(3) 绕组系数  $K_{dp1}$

$$\begin{aligned} K_{dp1} &= \frac{0.5}{q \sin \frac{30^\circ}{q}} \sin(\beta \times 90^\circ) \\ &= \frac{0.5}{3 \times \sin \frac{30^\circ}{3}} \sin\left(\frac{8}{9} \times 90^\circ\right) \\ &= 0.959 \times 0.985 = 0.944 \end{aligned}$$

采用  $2Y/\Delta$  联结, 选  $y' = 1 \sim 8$  槽, 查表3-3得到: 6极  $K'_{dp6} = 0.902$ ; 8极  $K'_{dp8} = 0.619$ , 双层叠绕组  $a' = a = 2$ 。

(4) 角槽导体数  $N'_s$

已知6极时联结方式为  $2Y$ , 所以相电压  $U'_s = 220\text{V}$ ,  $a'_s = 2$ , 原电机6极时为  $\Delta$  接线, 所以  $U_1 = 380\text{V}$ ,  $a_1 = 2$ , 从表3-2中查出  $N'_s$  计算公式为

$$N'_{jc} = 1.1 \frac{U_1 K'_{ap} \alpha_1}{U_1 \cdot K'_{ap} \alpha_1} N_{jc}$$

$$= 1.1 \times \frac{220 \times 0.94 \times 2}{380 \times 0.902 \times 2} \times 26 = 17.3 \text{ 匝}$$

取  $N'_{jc} = 18$  匝，每线圈 9 匝（双层绕组）

(5) 导线线径  $d_1$ ;

$$d'_1 = \sqrt{\frac{N N'_{jc}}{N' N'_{jc}}} d_1 = \sqrt{\frac{3 \times 26}{3 \times 18}} \times 1.35 = 1.63 \text{ mm}$$

查表 3-4 和表 3-5 确定标准线径为 1.62 mm。

(6) 功率

6 极时

$$P'_6 = \frac{U_1 \alpha d^2}{U_1 \alpha' d'^2} P = \frac{380 \times 2 \times 1.35^2}{220 \times 2 \times 1.62^2} \times 30 = 36 \text{ kW}$$

8 极时

$$P_8 = K P'_6 = 0.80 \times 30 = 24 \text{ kW}$$

例 3-63 一台 Y250M-6 型 37 kW 三相异步电动机， $U_N = 380 \text{ V}$ ， $\Delta$  接线，双层叠绕组，又知每槽导体数 28，导线为  $1-\phi 1.12 \text{ mm}$ 、 $2-\phi 1.18 \text{ mm}$ ，3 根并绕（相当于 3 根  $\phi 1.15 \text{ mm}$ ）。欲改三速 4/6/8 极电动机（电压和频率不变，定子 72 槽）。

(1) 每极每相槽数  $q$  ( $m = 3$ )

$$q = \frac{Z_1}{m 2p} = \frac{72}{3 \times 6} = 4$$

(2) 极距为

$$\tau = \frac{Z_1}{2p} = \frac{72}{6} = 12$$

节距  $y$  选 1~13 槽。

(3) 绕组系数  $K_{ap}$

$$K_{ap} = \frac{0.5}{q \sin \frac{30^\circ}{q}} \cdot \sin(\beta \times 90^\circ)$$

$$= \frac{0.5}{4 \sin \frac{30^\circ}{4}} \times \sin \left( \frac{11}{12} \times 90^\circ \right) = 0.96 \times 0.99$$

$$= 0.95$$

(4) 选  $2\Delta/2\Delta/2Y$  联结方式, 从表3-3查出:

4 极绕组系数  $K'_{dP4} = 0.823$

6 极绕组系数  $K'_{dP6} = 0.636$

8 极绕组系数  $K'_{dP8} = 0.720$

(5) 每槽导体数  $N'_{sc}$

已知原电机 6 极时  $K_{dP6} = 0.95$ ,  $U_1 = 380$ ,  $a_1 = 3$ ,  $N = 3$ ,  
现在改 4/6/8 极多速电机中的 6 极时, 联结为  $2\Delta$ , 即  $a'_1 = 2$ ,  
 $U'_1 = 380V$ 。

查表3-2有

$$N'_{sc} = 0.93 \frac{U'_1 K'_{dP6} a'_1}{U_1 K'_{dP6} a_1} N_{sc}$$

$$= 0.93 \times \frac{380 \times 0.95 \times 2}{380 \times 0.636 \times 3} \times 28 = 26 \text{ 匝}$$

双层绕组, 每线圈 13 匝。

(6) 导线线径  $d'_1$  (令  $N' = N = 3$ )

$$d'_1 = \sqrt{\frac{N N_{sc}}{N' N'_{sc}}} d_1 = \sqrt{\frac{3 \times 28}{3 \times 26}} \times 1.15 = 1.19 \text{ mm}$$

查表3-4选标准线径为  $\phi 1.18 \text{ mm}$ 。

(7) 功率  $P$

6 极时

$$P'_6 = \frac{U'_1 \cdot a'_1 \cdot d_1'^2}{U_1 a_1 d_1^2} P_6 = \frac{380 \times 2 \times 1.18^2}{380 \times 3 \times 1.0^2} \times 37 = 34 \text{ kW}$$

4 极时

$$P'_4 = (1.25 \sim 1.30) P_6 = (1.25 \sim 1.30) \times 37$$

$$= 46.3 \sim 48.1 \text{ kW}$$

表3-4 主要圆电磁线规格尺寸和最大外径

导体直径(铜铝)① (mm)	公差 (mm)	漆包线最大 最大外径②		玻璃丝包线 最大外径 (mm)		丝包线最大外径(mm)				
		薄漆层 (mm)	厚漆层 (mm)	单玻璃 丝包漆 包线	双玻璃 丝包线	双丝 包线	单丝包 袖件漆 包线	双丝包 袖件漆 包线	单丝包 聚酯漆 包线	双丝包 聚酯漆 包线
0.015	±0.002	0.025	—	—	—	—	—	—	—	—
0.020	±0.002	0.035	—	—	—	—	—	—	—	—
0.025	±0.002	0.040	—	—	—	—	—	—	—	—
0.030	±0.003	0.045	—	—	—	—	—	—	—	—
0.040	±0.003	0.055	—	—	—	—	—	—	—	—
0.050	±0.003	0.065	—	—	—	0.16	0.14	0.18	0.14	0.18
0.060	±0.003	0.080	0.09	—	—	0.17	0.15	0.19	0.16	0.20
0.070	±0.003	0.090	0.10	—	—	0.18	0.16	0.20	0.17	0.21
0.080	±0.003	0.100	0.11	—	—	0.19	0.17	0.21	0.18	0.22
0.090	±0.003	0.110	0.12	—	—	0.20	0.18	0.22	0.19	0.23
0.100	±0.005	0.125	0.13	—	—	0.21	0.19	0.23	0.20	0.24
0.110	±0.005	0.135	0.14	—	—	0.22	0.20	0.24	0.21	0.25
0.120	±0.005	0.145	0.15	—	—	0.23	0.21	0.25	0.22	0.26
0.130	±0.005	0.155	0.16	—	—	0.24	0.22	0.26	0.23	0.27
0.140	±0.005	0.165	0.17	—	—	0.25	0.23	0.27	0.24	0.28
0.150	±0.005	0.180	0.19	—	—	0.26	0.24	0.28	0.25	0.29
0.160	±0.005	0.190	0.20	—	—	0.28	0.26	0.30	0.28	0.32
0.170	±0.005	0.200	0.21	—	—	0.29	0.27	0.31	0.29	0.33
0.180	±0.005	0.210	0.22	—	—	0.30	0.28	0.32	0.30	0.34
0.190	±0.005	0.220	0.23	—	—	0.31	0.29	0.33	0.31	0.35
0.200	±0.005	0.230	0.24	—	—	0.32	0.30	0.35	0.32	0.36
0.210	±0.005	0.240	0.25	—	—	0.33	0.32	0.36	0.33	0.37
0.230	±0.005	0.265	0.28	—	—	0.36	0.35	0.39	0.36	0.41
0.250	±0.005	0.290	0.30	—	0.49	0.38	0.37	0.42	0.38	0.43
(0.270)	±0.010	0.310	0.32	—	—	—	—	—	—	—
0.280	±0.010	0.320	0.33	—	—	0.41	0.40	0.45	0.41	0.46
(0.290)	±0.010	0.330	0.34	—	—	—	—	—	—	—
0.310	±0.010	0.350	0.36	—	—	0.44	0.43	0.48	0.44	0.49
0.330	±0.010	0.37	0.39	—	—	0.47	0.46	0.51	0.48	0.53
0.350	±0.010	0.39	0.41	—	—	0.49	0.48	0.53	0.51	0.55
0.380	±0.010	0.42	0.44	—	—	0.52	0.51	0.56	0.53	0.58
0.400	±0.010	0.44	0.46	—	—	0.54	0.53	0.58	0.55	0.60

(续)

导体直径(铜铝)①		漆包线最大外径②		玻璃丝包线最大外径(mm)		丝包线最大外径(mm)				
标称 (mm)	公差 (mm)	薄漆层 (mm)	厚漆层 (mm)	单玻璃 漆包线	双玻璃 漆包线	双丝 包线	单丝包 油性漆 包线	双丝包 油性漆 包线	单丝包 聚酯漆 包线	双丝包 聚酯漆 包线
0.420	±0.010	0.46	0.48	—	—	0.56	0.55	0.60	0.57	0.62
0.450	±0.010	0.49	0.51	—	—	0.59	0.58	0.63	0.60	0.65
0.470	±0.010	0.51	0.53	—	—	0.61	0.60	0.65	0.62	0.67
0.500	±0.010	0.54	0.56	—	—	0.64	0.63	0.68	0.65	0.70
0.530	±0.010	0.58	0.60	0.73	0.79	0.67	0.67	0.72	0.69	0.74
0.560	±0.010	0.61	0.63	0.76	0.82	0.70	0.70	0.75	0.72	0.77
0.600	±0.010	0.65	0.67	0.80	0.86	0.74	0.74	0.79	0.76	0.81
0.630	±0.010	0.68	0.70	0.83	0.89	0.77	0.77	0.83	0.79	0.84
0.670	±0.010	0.72	0.75	0.88	0.93	0.82	0.82	0.87	0.85	0.90
(0.690)	±0.010	0.74	0.77	—	—	—	—	—	—	—
0.710	±0.015	0.76	0.79	0.93	0.98	0.86	0.86	0.91	0.89	0.94
0.750	±0.015	0.81	0.84	0.97	1.02	0.91	0.91	0.97	0.94	1.00
(0.770)	±0.015	0.83	0.86	—	—	—	—	—	—	—
0.800	±0.015	0.86	0.89	1.02	1.07	0.96	0.96	1.02	0.99	1.05
(0.830)	±0.015	0.89	0.92	—	—	—	—	—	—	—
0.850	±0.015	0.91	0.94	1.07	1.12	1.01	1.01	1.07	1.04	1.10
0.900	±0.015	0.96	0.99	1.12	1.17	1.06	1.06	1.12	1.09	1.15
(0.930)	±0.015	0.99	1.02	—	—	—	—	—	—	—
0.950	±0.015	1.01	1.04	1.17	1.22	1.11	1.11	1.17	1.14	1.20
1.000	±0.015	1.07	1.11	1.25	1.29	1.17	1.18	1.24	1.22	1.28
1.060	±0.020	1.14	1.17	1.31	1.35	1.23	1.25	1.31	1.28	1.34
1.120	±0.020	1.20	1.23	1.37	1.41	1.29	1.31	1.37	1.34	1.40
1.180	±0.020	1.28	1.29	1.43	1.47	1.35	1.37	1.43	1.40	1.46
1.250	±0.020	1.33	1.36	1.50	1.54	1.42	1.44	1.50	1.47	1.53
1.300	±0.020	1.38	1.41	1.55	1.59	1.47	1.49	1.55	1.52	1.58
(1.350)	±0.020	1.43	1.46	—	—	—	—	—	—	—
1.400	±0.020	1.48	1.51	1.65	1.69	1.57	1.59	1.65	1.62	1.68
(1.450)	±0.020	1.53	1.56	—	—	—	—	—	—	—
1.500	±0.020	1.58	1.61	1.75	1.81	1.67	1.69	1.75	1.72	1.78
(1.560)	±0.020	1.64	1.67	—	—	—	—	—	—	—
1.600	±0.020	1.69	1.72	1.87	1.91	1.79	1.80	1.87	1.83	1.90
1.700	±0.025	1.79	1.82	1.97	2.01	1.88	1.90	1.97	1.93	2.00

(续)

导体直径(铜铝)①		漆包线最大外径②		玻璃丝包线最大外径(mm)		丝包线最大外径(mm)				
标称 (mm)	公差 (mm)	薄漆层 (mm)	厚漆层 (mm)	单玻 璃 丝 包 漆 包 线	双玻 璃 包 漆 包 线	双 丝 包 线	单 丝 包 油 性 漆 包 线	双 丝 包 油 性 漆 包 线	单 丝 包 聚 酯 漆 包 线	双 丝 包 聚 酯 漆 包 线
1.800	±0.025	1.89	1.92	2.07	2.11	1.98	2.00	2.07	2.03	2.10
1.900	±0.025	1.99	2.02	2.17	2.21	2.08	2.10	2.17	2.13	2.20
2.000	±0.025	2.09	2.12	2.27	2.31	2.18	2.20	2.27	2.23	2.30
2.12	±0.030	2.21	2.24	2.39	2.48	2.30	2.32	2.39	2.35	2.42
2.24	±0.030	2.33	2.36	2.51	2.60	2.42	2.44	2.51	2.47	2.54
2.36	±0.030	2.45	2.48	2.63	2.72	2.54	2.56	2.63	2.59	2.66
2.50	±0.030	2.59	2.62	2.77	2.86	2.68	2.70	2.77	2.73	2.80
2.65	±0.030	—	—	—	3.01	—	—	—	—	—
2.80	±0.030	—	—	—	3.16	—	—	—	—	—
3.00	±0.030	—	—	—	3.37	—	—	—	—	—
3.15	±0.030	—	—	—	3.52	—	—	—	—	—
3.35	±0.030	—	—	—	3.72	—	—	—	—	—
3.55	±0.040	—	—	—	3.92	—	—	—	—	—
3.75	±0.040	—	—	—	4.12	—	—	—	—	—
4.00	±0.040	—	—	—	4.37	—	—	—	—	—
4.25	±0.040	—	—	—	4.63	—	—	—	—	—
4.50	±0.050	—	—	—	4.88	—	—	—	—	—
4.75	±0.050	—	—	—	5.13	—	—	—	—	—
5.00	±0.050	—	—	—	5.38	—	—	—	—	—
5.30	±0.050	—	—	—	5.68	—	—	—	—	—
5.60	±0.050	—	—	—	5.93	—	—	—	—	—
6.00	±0.060	—	—	—	6.38	—	—	—	—	—

① 所有括号内的规格，系漆包线的保留规格，不推荐使用。

② 油性漆包线的最大外径，基本上相当于薄漆层漆包线的最大外径。

表3-5 常用圆铝、铜线的规格

直 径 (mm)	截面积 (mm <sup>2</sup> )	铝			铜		
		每 1 km 的净重 (kg)	20°C时每 1 km 的 直流电阻 (Ω)	75°C时每 1 km 的 直流电阻 (Ω)	每 1 km 的净重 (kg)	20°C时每 1 km 的 直流电阻 (Ω)	75°C时每 1 km 的 直流电阻 (Ω)
0.05	0.00196	—	—	—	0.0175	8970	11060
0.06	0.00283	—	—	—	0.0252	6210	7660
0.07	0.00385	—	—	—	0.0342	4570	5640
0.08	0.00503	—	—	—	0.0447	3500	4320
0.09	0.00636	—	—	—	0.0565	2760	3410
0.10	0.00785	—	—	—	0.0698	2240	2770
0.11	0.00950	—	—	—	0.0845	1854	2290
0.12	0.01131	—	—	—	0.1005	1556	1918
0.13	0.0133	—	—	—	0.1179	1322	1630
0.14	0.0154	—	—	—	0.1366	1142	1410
0.15	0.01767	—	—	—	0.157	995	1227
0.16	0.0201	—	—	—	0.179	875	1080
0.17	0.0227	—	—	—	0.202	775	958
0.18	0.0255	—	—	—	0.226	690	852
0.19	0.0284	—	—	—	0.262	620	765
0.20	0.0314	0.085	901	1100	0.279	560	692
0.21	0.0346	0.097	820	1000	0.308	506	628
0.23	0.0415	0.112	682	835	0.369	424	524
0.25	0.0491	0.133	577	705	0.436	359	443
0.27	0.0573	0.155	494	604	0.509	307	379
0.29	0.0661	0.178	428	524	0.587	266	329
0.31	0.0755	0.204	375	458	0.671	233	285
0.33	0.0855	0.231	331	405	0.760	206	254
0.35	0.0962	0.260	294	360	0.855	183	226
0.38	0.1134	0.306	250	305	1.008	156.0	191.3
0.41	0.1320	0.357	214	262	1.170	133.0	164
0.44	0.1521	0.411	186	227	1.352	116.0	142.5
0.47	0.1735	0.469	163	199.5	1.54	101.0	125.0
0.49	0.1886	0.509	150	183.5	1.68	93.3	115.0
0.51	0.204	0.550	138.6	169.5	1.88	86.0	106.2
0.53	0.221	0.600	128	156.5	1.98	79.4	98.2

(续)

直径 (mm)	截面积 (mm <sup>2</sup> )	铝			铜		
		每 1km 的净重 (kg)	20°C时每 1km的 直流电阻 (Ω)	75°C时每 1km的 直流电阻 (Ω)	每 1km 的净重 (kg)	20°C时每 1km的 直流电阻 (Ω)	75°C时每 1km的 直流电阻 (Ω)
0.55	0.238	0.643	119	145.5	2.12	73.7	91.2
0.57	0.255	0.689	111	185.5	2.27	68.8	85.2
0.59	0.273	0.734	103.6	127.0	2.42	64.2	79.5
0.62	0.302	0.813	93.8	114.7	2.68	58.0	72.0
0.64	0.322	0.868	88.0	107.5	2.86	54.5	67.4
0.67	0.353	0.950	80.2	98.0	3.13	49.6	61.5
0.69	0.374	1.01	75.7	92.5	3.32	47.0	58.0
0.72	0.407	1.10	69.5	85.0	3.62	43.0	53.3
0.74	0.430	1.16	65.8	80.5	3.82	40.6	50.5
0.77	0.466	1.26	60.7	74.4	4.14	37.6	46.5
0.80	0.503	1.36	56.5	68.9	4.47	34.9	43.1
0.83	0.541	1.46	52.4	64.0	4.81	32.4	40.1
0.86	0.581	1.57	48.7	59.6	5.16	30.2	37.3
0.90	0.636	1.72	44.5	54.5	5.66	27.5	34.1
0.93	0.679	1.83	41.7	51.7	6.04	25.8	31.9
0.95	0.724	1.95	39.1	47.8	6.43	24.3	30.0
1.00	0.785	2.12	36.1	44.1	6.98	22.3	27.6
1.04	0.849	2.28	33.3	40.9	7.55	20.7	25.6
1.08	0.916	2.47	30.9	37.8	8.14	19.29	23.7
1.12	0.985	2.65	28.8	35.1	8.75	17.89	22.0
1.16	1.057	2.85	26.8	32.8	9.40	16.60	20.6
1.20	1.131	3.05	25.0	30.6	10.05	15.39	19.17
1.25	1.227	3.31	23.1	28.2	10.81	14.30	17.68
1.30	1.327	3.58	21.5	26.1	11.60	13.29	16.35
1.35	1.431	3.89	19.8	24.2	12.53	12.30	14.10



(续)

直 径 (mm)	截面积 (mm <sup>2</sup> )	铝			铜		
		每 1km 的净重 (kg)	20°C时每 1km的 直流电阻 (Ω)	75°C时每 1km的 直流电阻 (Ω)	每 1km 的净重 (kg)	20°C时每 1km的 直流电阻 (Ω)	75°C时每 1km的 直流电阻 (Ω)
1.40	1.539	4.15	18.4	22.5	13.69	11.40	13.90
1.45	1.651	4.45	17.15	20.9	14.70	10.60	13.13
1.50	1.767	4.77	16.0	19.6	15.70	9.33	12.28
1.56	1.911	5.15	14.8	18.1	17.00	9.18	11.35
1.62	2.06	5.56	13.73	16.8	18.32	8.53	10.5
1.68	2.22	5.98	12.75	15.6	19.7	7.90	9.78
1.74	2.38	6.40	11.95	14.54	21.1	7.37	9.12
1.81	2.57	6.95	11.0	13.45	22.9	6.84	8.45
1.88	2.78	7.49	10.2	12.45	24.7	6.31	7.80
1.95	2.99	8.06	9.46	11.60	26.5	5.88	7.26
2.02	3.20	8.65	8.85	10.80	28.5	5.50	6.78
2.10	3.46	9.34	8.18	10.00	30.8	5.11	6.27
2.26	4.01	10.83	7.05	8.63	35.7	4.39	5.41
2.44	4.68	12.64	6.05	7.40	41.6	3.76	4.63
2.63	5.43	14.65	5.22	6.37	48.3	3.24	4.00
2.83	6.29	16.98	4.50	5.50	55.9	2.80	3.45
3.05	7.31	19.75	3.88	4.74	65.0	2.41	2.97
3.28	8.45	22.8	3.35	4.10	75.1	2.08	2.57
3.53	9.78	26.4	2.89	3.54	87.0	1.80	2.22
3.80	11.34	30.6	2.49	3.05	100.8	1.55	1.915
4.10	13.20	35.6	2.14	2.62	117.3	1.332	1.642
4.50	15.90	43.0	1.78	2.18	141.4	1.108	1.362
4.80	18.10	48.9	1.56	1.91	160.9	0.973	1.198
5.20	21.20	57.4	1.33	1.627	188.8	0.827	1.020

取47kW。

8极时

$$P'_0 = 0.8P_0 = 0.8 \times 37 = 30 \text{ kW}$$

### 五、三相异步电动机制动方法及计算

三相异步电动机有两种运行状态，一种是电动运行状态，另一种是制动运行状态。电动机在运行状态时，其特征是电动机转矩方向与转速方向相同，同时为正方向时，叫正向电动运行状态，运行点处于第一象限内；转矩方向与转速方向同时为负时，叫反向电动运行状态，运行点处于第三象限内。当电动机转矩方向与转速方向相反时，则电动机处于制动运行状态，运行点处于第二或第四象限内。

通常电动机的制动方法有机械制动和电磁制动两种，下面主要介绍电磁制动方法及计算。

电动机制动时，有以下要求：

- (1) 要有足够大的制动转矩和较小的制动电流；
- (2) 要求制动可靠，停车准确，制动时具有平滑性；
- (3) 制动过程中能量消耗最少；
- (4) 制动时间最短。

通常制动方法有三种：

- (1) 反接制动，包括电源反接制动和倒拉反接制动；
- (2) 能耗制动；
- (3) 回馈制动（再生发电制动）。

#### 1. 电源反接制动和倒拉反接制动

(1) 电源反接制动 为了使正常运行的电动机快速停车或反转，只要改接三相电源相序即可，也就是将电动机引出的三相引出线任意调换两个引出线位置再接到电源上，则使电动机定子旋转磁场反转，使转子电动势和电流反向流动，从而产生与转向相反的制动转矩。这时电动机的转差率  $s > 1$ ，输出功率  $P_2 < 0$ ，负载向电动机输入机械功率，而电源继续输入电磁功率，这些功率要消耗在转子上，为限制电流，要串入附加电阻，串入电阻大

小按下式计算:

$$R_{制} = k \frac{U_{\phi}}{I_{st}} \quad (\Omega)$$

式中  $k$ ——系数, 当制动电流  $I_{制} \leq I_{st}$  时,  $k$  取 0.13; 当  $I_{制} \leq$

$$\frac{I_{制}}{2}$$
 时,  $k$  取 1.5;

$U_{\phi}$ ——相电压 (V);

$I_{st}$ ——全压起动时的起动电流 (A)。

**例3-64** 一台 22kW 三相异步电动机,  $U_N = 380V$ ,  $I_N = 54.2$  A,  $I_{st}/I_N = 4.78$ , 8 极。要求反接制动时, 最大制动电流等于起动电流, 问应串入多大电阻。

(1)  $I_{st} = 4.78 \times 54.2 = 259A$

(2) 每相应串入电阻为  $R$ , 则有

$$R = 0.13 \times \frac{U_{\phi}}{I_{st}} = 0.13 \times \frac{220}{259} = 0.11 \Omega$$

**例3-65** 有一台 16kW 三相异步电动机,  $U_N = 380V$ ,  $I_N = 39.3A$ , 8 极,  $I_{st}/I_N = 5.33$ , 要求反接制动时,  $I_{制} = \frac{I_{st}}{2}$ , 问串入电阻多大。

(1)  $I_{st} = 5.33 \times 39.3 = 209.5A$

(2)  $R = 1.5 \times \frac{220}{209.5} = 1.58 \Omega$

每相应串入制动电阻为 1.58Ω, 如果只在两相内串入制动电阻时, 则电阻  $R'$  为

$$R' = 1.5R = 1.5 \times 1.58 = 2.37 \Omega$$

采用电源反接制动方法时, 当  $n$  达到零时要断开电源, 否则要继续反向运转。

(2) 倒拉反接制动 起重机在吊物时, 如果重物较重, 电动机不但吊不起来, 重物反而使电动机转速降低, 甚至转速为零或倒转, 这就是倒拉反接制动状态。电动机拖动重物上升, 电动机

是处于电动运行状态，电磁转矩与转速方向相同，当重物较重，重物构成的转矩大于电磁转矩时，电动机将要反转，但电动机的电磁转矩方向未变，所以是制动状态。

通常反接制动方法用在小容量电动机上，和要求快速停车的场合，这种制动方法的优点是设备简单，价格低廉、调整方便，但由于制动时冲击较大，制动能量也大，准确度不高，所以不适用于大中型电动机使用。

## 2. 能耗制动

能耗制动方法是將正常运行的电动机，突然从电源上切断，并将电机定子绕组任意两相出线端接到直流电源上，则直流电源将在定子内形成固定磁场，转了靠惯性旋转并切割此固定磁场，在转子绕组中感生电动势和转子电流，此电流与固定磁场相互作用，便产生电磁转矩，这个电磁转矩与转子转动方向相反，达到制动状态，转子动能消耗在转子电阻内，这个过程就是电动机能耗制动过程。

能耗制动时，调节直流电流大小，可调节制动转矩大小，对于绕线转子电动机，还可串入不同电阻于转子回路内，来调节制动转矩。

能耗制动所需的直流电压和直流电流可按下式计算：

直流电压的计算为

$$U = IR_{15^{\circ}\text{C}}$$

直流电流的计算为

$$I = (3.5 \sim 4)I_0$$

笼型电动机为

$$U = (3.5 \sim 4)I_0R_{15^{\circ}\text{C}} \text{ 或 } U = 1.5I_NR_{15^{\circ}\text{C}}$$

绕线转子电动机为

$$U = (2 \sim 3)I_0R_{15^{\circ}\text{C}}$$

或

$$I = I_NR_{15^{\circ}\text{C}}$$

式中  $I_0$ ——电动机空载电流 (A)；

$I_N$ ——电动机额定电流 (A)；

$U$ 、 $I$ ——分别为直流电压和直流电流；

$R_{15^{\circ}\text{C}}$ ——接入直流电源的定子绕组在 $15^{\circ}\text{C}$ 时电阻 ( $\Omega$ )

绕线转子电动机能耗制动时外加制动电阻的计算，即

$$R_{\text{制}} = (0.2 \sim 0.4)r_2 = (0.2 \sim 0.4) \frac{s_N I_{N2}}{\sqrt{3} I_{N2}} \quad (\Omega)$$

式中  $U_{N2}$ ——转子额定电压 (V)；

$I_{N2}$ ——转子额定电流 (A)；

$s_N$ ——额定转差率。

**例3-66** 一台 JZ2-22-6 型 7.5kW 三相异步电动机，已知  $U_N = 380\text{V}$ ， $I_0 = 7.8\text{A}$ ， $R_{15^{\circ}\text{C}} = 0.896\Omega$ ， $I_N = 19.5\text{A}$ ，欲采用能耗制动方法进行制动，问直流电压  $U$  和直流电流  $I$  范围多大。

因是笼型电动机，所以有

$$\begin{aligned} I &= (3.5 \sim 4)I_0 = (3.5 \sim 4) \times 7.8 \\ &= 27.3 \sim 31.2\text{A} \end{aligned}$$

或

$$I = 1.5I_N = 1.5 \times 19.5 = 29.3\text{A}$$

$$\begin{aligned} U &= (3.5 \sim 4)I_0 R_{15^{\circ}\text{C}} \\ &= (3.5 \sim 4) \times 7.8 \times 0.896 = 24.5 \sim 28\text{V} \end{aligned}$$

或

$$U = IR_{15^{\circ}\text{C}} = 29.3 \times 0.896 = 26.3\text{V}$$

**例3-67** 某绕线转子异步电动机， $P_N = 30\text{kW}$ ， $U_N = 380\text{V}$ ， $I_N = 75.1\text{A}$ ， $U_{N2} = 273\text{V}$ ， $I_{N2} = 71\text{A}$ ， $s_N = 3.65\%$ ，8极，拟采用能耗制动，问转子应串入多大的制动电阻  $R_{\text{制}}$ 。

$$\begin{aligned} R_{\text{制}} &= (0.2 \sim 0.4) \frac{s_N U_{N2}}{\sqrt{3} I_{N2}} = (0.2 \sim 0.4) \\ &\times \frac{0.0365 \times 273}{\sqrt{3} \times 71} = 0.0162 \sim 0.0324 \quad \Omega \end{aligned}$$

能耗制动比反接制动停车准确、平稳，制动电流小，但需要直流电源，设备造价较高。

### 3. 回馈制动

回馈制动也叫再生发电制动。当起重机下放重物时，如果重物很重，转子转速超过电动机的同步转速时（即  $s < 0$ ），则转子

绕组感应电动势和电流的方向改变，这时电磁转矩方向也改变，并与转子转向方向相反，起到制动作用，限制重物下降的速度。可使绕线电动机在一定负载下能得到稳定下放速度，在转子中应串入适当的回馈制动电阻，可按下式计算：

$$R_{\text{回}} = \left( \frac{|s_L| T_N}{s_N T_L} - 1 \right) r_2$$

式中  $r_2$ ——转子绕组相电阻 ( $\Omega$ )；

$R_{\text{回}}$ ——回馈制动电阻 ( $\Omega$ )；

$|s_L|$ ——实际运行转速下的转差率绝对值；

$s_N$ ——额定转差率；

$T_N$ ——电动机额定转矩 ( $N \cdot m$ )；

$T_L$ ——负载转矩 ( $N \cdot m$ )。

例3-68 一台40kW绕线转子三相异步电动机，已知  $U_N = 380V$ ， $2p = 10$ 极， $I_N = 94.8A$ ， $U_{2N} = 172V$ ， $I_{2N} = 146A$ ， $s_N = 3.37\%$ ，当负载转矩  $T_L = 264N \cdot m$ 时，使电动机的转速为  $650r/min$ 在回馈制动状态下稳定运行，问转子应串入多大的回馈制动电阻。

(1) 额定转速

$$\begin{aligned} n_N &= n_1(1 - s_N) = \frac{60f}{p}(1 - 0.0337) \\ &= \frac{60 \times 50}{5}(1 - 0.0337) = 580r/min \end{aligned}$$

(2) 额定转矩  $T_N$

$$T_N = 9550 \times \frac{P_N}{n_N} = 9550 \times \frac{40}{580} = 658.6N \cdot m$$

(3) 实际转差率  $s_L$

$$s_L = \frac{n_1 - n}{n_1} = \frac{600 - 630}{600} = -0.0833$$

(4) 转子电阻  $r_2$

$$r_2 = \frac{s_N I_{N2}}{\sqrt{3} I_{2N}} = \frac{0.0337 \times 172}{\sqrt{3} \times 146} = 0.0229 \quad \Omega$$

(5) 所需回馈制动电阻  $R_{\text{回}}$

$$\begin{aligned} R_{\text{回}} &= \left( \frac{|s_L| T_N}{s_N T_L} - 1 \right) r_2 \\ &= \left( \frac{1 - 0.0833}{0.0337 \times 264} \times 58.6 - 1 \right) \times 0.0229 \\ &= 0.118 \Omega \end{aligned}$$

**例3-69** 一台桥式起重机主钩电动机, 型号为JZR2-52-8,  $P_N = 30 \text{ kW}$ ,  $U_N = 380 \text{ V}$ ,  $I_N = 75.1 \text{ A}$ ,  $U_{N2} = 273 \text{ V}$ ,  $I_{N2} = 71 \text{ A}$ ,  $s_N = 3.65\%$ ,  $\lambda_m = 3.41$ ,  $\eta_N = 85.5\%$ ,  $\cos\varphi = 0.708$ ,  $r_1 = 0.125 \Omega$ . 作用在电动机轴上的位能转矩  $T_L = 130 \text{ N}\cdot\text{m}$ , 试求: (1)  $n_N$ ; (2)  $s_m$ ; (3)  $r_2$ ; (4)  $T_N$ ; (5)  $T_L$  与  $T_M$  关系; (6) 在提升  $T_L$  时 ( $T_L = 130 \text{ N}\cdot\text{m}$ ) 的转速是多少; (7) 当转子串入电阻为  $60r_2 = R_m$ , 求电动机这时的转速和运行在什么状态下。

(1) 同步转速

$$n_1 = \frac{120f}{2p} = \frac{120 \times 50}{8} = 750 \text{ r/min}$$

(2) 额定转速  $n_N$

$$n_N = n_1(1 - s_N) = 750 \times (1 - 3.65\%) = 722.6 \text{ r/min}$$

(3) 转子电阻  $r_2$

$$r_2 = \frac{s_N U_{N2}}{\sqrt{3} I_{N2}} = \frac{3.65\% \times 273}{\sqrt{3} \times 71} = 0.021 \Omega$$

(4) 最大转矩  $T_M$  所对应的转差率  $s_m$

$$\begin{aligned} s_m &= s_N (\lambda_m + \sqrt{\lambda_m^2 - 1}) = 3.65\% \times (3.41 \\ &\quad + \sqrt{3.41^2 - 1}) \\ &= 0.243 \end{aligned}$$

(5) 额定转矩  $T_N$

$$T_N = 9550 \frac{P}{n_N} = 9550 \times \frac{30}{722.6} = 396.5 \text{ N} \cdot \text{m}$$

(6)  $T_L/T_N$  比值

$$T_L/T_N = 130/396.5 = 0.328$$

即

$$T_L = 0.328 T_N$$

(7) 已知  $\lambda_m = \frac{T_M}{T_N} = 3.41$ , 最大转矩倍数  $\lambda_m$  (a点运行时)

$$\lambda_{ma} = T_M/T_L = 3.41 T_N / 0.328 T_N = 10.4$$

$$\therefore s_{ma} = s_a (\lambda_{ma} \pm \sqrt{\lambda_{ma}^2 - 1}) = s_m$$

$$\begin{aligned} \therefore s_a &= \frac{s_M}{\lambda_{ma} \pm \sqrt{\lambda_{ma}^2 - 1}} = \frac{0.243}{10.4 \pm \sqrt{10.4^2 - 1}} \\ &= 0.0117 \end{aligned}$$

(8) 这时电动机转速  $n'$

$$n' = n_1(1 - s_a) = 750(1 - 0.0117) = 741.2 \text{ r/min}$$

(9) 当串入  $60r_2$  电阻时, 电阻  $R_s$

$$R_s = 60r_2 = \left( \frac{s_{mb}}{s_m} - 1 \right) r_2$$

$$s_{mb} = 59s_m = 59 \times 0.243 = 14.34$$

(10)  $s_{mb} = s_b (\lambda_{mb} \pm \sqrt{\lambda_{mb}^2 - 1})$  (b点运行时)

$$\text{又 } \lambda_{mb} = T/T_L = \lambda_{ma} = 10.4$$

$$\begin{aligned} \therefore s_b &= \frac{s_{mb}}{\lambda_{mb} \pm \sqrt{\lambda_{mb}^2 - 1}} = \frac{59s_m}{10.4 \pm \sqrt{10.4^2 - 1}} \\ &= \frac{14.34}{10.4 \pm 10.35} = 0.69 \end{aligned}$$

(11) 转子串入  $60r_2$  电阻后电动机转速  $n_b$

$$n_b = n_1(1 - s_b)$$

$$= 750(1 - 0.69) = 232.5 \text{ r/min}$$

重物提升处于正向电动机运行状态。



例3-70 有一台20kW、50Hz、220V、4极的三相绕线转子异步电动机，在满载运行时，电动机的转速为1450r/min，要求以额定转矩进行起动，问这时转子串入的起动电阻值应是多大，已知转子绕组是Y联结，每相绕组的电阻值 $r_2$ 为0.04Ω。

这台电动机的同步转速为

$$n_1 = \frac{60f_1}{p} = \frac{60 \times 50}{2} = 1500 \text{ r/min}$$

额定转差率为

$$s_N = \frac{n_1 - n_N}{n_1} = \frac{1500 - 1450}{1500} = 0.033$$

设电动机在起动时所串入的电阻值为 $r_s$ ，电动机起动时 $s=1$ ，按电动机比例推移原理则有

$$\frac{T_2}{s_N} = \frac{T_2 + r_s}{s} = \frac{T_2 + r_s}{1}$$

$$\therefore r_s = \frac{T_2}{s_N} - r_2$$

将数值代入此式，得

$$r_s = \frac{0.04}{0.03} - 0.04 = 1.172 \Omega$$

转子串入1.172Ω为好。

例3-71 有一台三相绕线转子异步电动机，已知 $P_N = 11 \text{ kW}$ ， $U_N = 380 \text{ V}$ ， $f_1 = 50 \text{ Hz}$ ， $\cos\varphi_N = 0.8$ ， $\eta_N = 0.85$ ， $n_N = 950 \text{ r/min}$ ，转子绕组为Y接线，每相绕组电阻为0.3Ω。试求：（1）定子额定电流 $I_N$ ；（2）电动机极数 $2p$ ；（3）额定转差率 $s_N$ ；（4）为使这台电动机转速以800r/min在额定转矩下运行，问转子绕组回路应串入多大电阻。

$$\begin{aligned} (1) I_N &= \frac{P_N}{\sqrt{3} U_N \eta_N \cos\varphi_N} = \frac{11 \times 10^3}{\sqrt{3} \times 380 \times 0.85 \times 0.8} \\ &= 24.6 \text{ A} \end{aligned}$$

(2) 设电动机的极数为  $2p$ ，由  $n_1 = \frac{120f_1}{2p}$  知， $2p = \frac{120f_1}{n_1} =$

$\frac{120 \times 50}{950} = 6.3$ ，电动机极数只有偶数，所以断定此台电动机的极数为 6 极，即  $2p = 60$ ，因此有

$$n_N = \frac{60f_1}{p} = \frac{60 \times 50}{3} = 1000 \text{ r/min}$$

(3)  $s_N = \frac{n_1 - n_N}{n_1} = \frac{1000 - 950}{1000} = 0.05$ ，

(4) 设电动机转子绕组每相串入的电阻为  $r_s$ ，按电动机比例推移原理，则有

$$\frac{0.3}{s_N} = \frac{0.3 + r_s}{s'} \quad \therefore r_s = \frac{0.3s'}{s_N} - 0.3$$

当转速  $n' = 800 \text{ r/min}$  时， $s'$  为

$$s' = \frac{n_1 - n'}{n_1} = \frac{1000 - 800}{1000} = 0.20$$

将数据代入上式得到：

$$r_s = \frac{0.3 \times 0.2}{0.05} - 0.3 = 0.9 \Omega$$

为使电动机以  $800 \text{ r/min}$  转速运行，转子回路应串入  $0.9 \Omega$  电阻。

**例3-72** 已知一台  $20 \text{ kW}$ 、4 极、 $380 \text{ V}$ 、 $50 \text{ Hz}$  的三相绕线转子异步电动机，电动机静止不转时，定子施加  $380 \text{ V}$  电压，转子绕组开路，从集电环测出环间电压为  $60 \text{ V}$ 。要求此台电动机在额定转矩情况下以  $1000 \text{ r/min}$  转速运转，问串入附加电阻值  $r_s$  应多少？已知电抗器为  $\gamma$  联结。

设转子绕组每相电阻为  $r_2 (\Omega)$ ，在额定转矩下运行时，电磁功率为  $P_M (\text{W})$ ，额定转差率为  $s_N$ ，则有

$$P_N = 20 \times 10^3 = (1 - s_N) P_M$$

电动机同步转速  $n_1 = \frac{60f_1}{p} = \frac{60 \times 50}{2} = 1500 \text{ r/min}$ ，当转速为

1000r/min时的转差率 $s'$ 为

$$s' = \frac{1500 - 1000}{1500} = \frac{1}{3}$$

如忽略定子电阻和转子漏抗, 并设转子相电阻为 $r_2$ , 转子开路电压为 $U_{20}$ , 电动机以转差率 $s'$ 在额定转矩情况下运行, 则有以下关系:

$$\frac{3U_{20}^2}{(r_2 + r_3)/s'} U_{20} = P_M = \frac{3U_{20}^2}{(r_2 + r_3)/s'} = \frac{2U_{20}^2 s'}{r_2 + r_3}$$

$$r_3 = \frac{3U_{20}^2 s'}{P_M} - r_2$$

将  $U_{20} = \frac{60}{\sqrt{3}}$  代入此式, 得出:

$$r_3 = \frac{3U_{20}^2 s'}{20 \times 10^3} - r_2 = \frac{(1 - s_N) \times 60^2}{20 \times 10^3} - r_2$$

一般 $s_N \ll 1$ ,  $r_2 \ll r_3$ , 所以有

$$r_3 = \frac{60^2}{20 \times 10^3} = 0.18 \Omega$$

转子应串入 $0.18\Omega$ 电阻, 才能使此台电动机在额定转矩情况下以1600r/min转速运转。

**例3-73** 有一台国外350kW、8极、60Hz绕线转子三相异步电动机, 从集电环间测出电阻为 $0.5\Omega$ , 将三相集电环短路, 在额定运行情况下, 测出转差率为1.8%, 现将三相集电环开路, 在转子每相绕组内串入 $1\Omega$ 的附加电阻, 已知转子绕组为Y接线, 问这时电动机的转速和输出功率各是多少。

已知此台电动机额定转差率 $s_N = 0.018$ , 现将 $1\Omega$ 的附加电阻串入转子相绕组时的转差率为 $s_2$ , 转子相电阻为 $r_2 = 0.5/2 = 0.25\Omega$ 。将附加电阻串入转子, 并使输入电流为额定值, 根据电机等效电路可知,  $r_2/s$ 值不变, 所以电磁功率 $P_M$ 也不变, 即

$$\frac{r_2}{s_N} = \frac{r_2 + 1}{s_2}$$

$$\therefore s_2 = \frac{r_2 + 1}{r_2} s_N = \frac{1.25}{0.25} \times 0.018 = 0.09$$

这时电动机的转速为

$$\begin{aligned} n &= (1 - s_2) n_1 = (1 - 0.09) \frac{60f}{p} \\ &= 0.91 \times \frac{60 \times 60}{4} = 819 \text{ r/min} \end{aligned}$$

由  $(1 - s_N)P_M = P_N = 350 \times 10^3$  及  $(1 - s_2)P_M = P_2$  可知:

$$\begin{aligned} P_2 &= \frac{1 - s_2}{1 - s_N} \times 350 \times 10^3 = \frac{0.91}{0.982} \times 350 \times 10^3 \\ &= 324 \text{ kW} \end{aligned}$$

电动机转子串入附加电阻后,电动机转速为819r/min,电动机输出功率为324kW。

**例3-74** 有一台绕线转子三相异步电动机 $2p = 10$ 极,通过绞车带动重物升降,已知绞轮半径 $R = 0.5\text{m}$ ,重物所受的力 $p_w = 1200\text{N}$ ,并知转子绕组为Y联结,转子每相电阻 $r_2 = 0.04\Omega$ 。当重物上升时,电动机转速 $n = 592\text{r/min}$ ,要求电动机下放重物时的转速为 $282\text{r/min}$ ,试求电动机转子应串入的电阻 $R_r$ 为多大。

负载转矩为

$$T_L = p_w R = 1200 \times 0.5 = 600 \text{ N} \cdot \text{m}$$

重物上升时的转差率为

$$\begin{aligned} s &= \frac{n_1 - n}{n_1} = \frac{600 - 592}{600} \\ &= 0.013 \end{aligned}$$

重物下降时的转差率为

$$s' = \frac{n_1 - (-n')}{n_1} = \frac{600 + 282}{600}$$

$$= 1.47$$

由于重物上升和下降时电磁转矩相等，所以有以下关系：

$$\frac{r_2}{s} = \frac{r_2 + R_s}{s'}$$

$$R_s = \left( \frac{s'}{s} - 1 \right) r_2 = \left( \frac{1.47}{0.013} - 1 \right) 0.04 = 4.47 \Omega$$

说明转子应串入4.47Ω的附加电阻。

**例3-75** 有一台115kW三相绕线转子异步电动机， $2p = 4$ 极，额定电流 $I_N = 213\text{A}$ ，定子绕组为Y接线，额定转速 $n_N = 1470\text{r/min}$ ，已知定子相电阻 $r_1 = 0.0265\Omega$ ，转子折合定子边的相电阻 $r_2' = 0.0256\Omega$ ，定子漏电抗 $X_1 = 0.08\Omega$ ，折合到定子边的转子漏电抗 $X_2' = 0.110\Omega$ ，要求电动机起动时起动电流为 $4I_N$ ，试求：

- (1) 转子每相电路中应串入多大附加电阻 $R_2$ ；
- (2) 电动机起动转矩多大；
- (3) 如果定子电路中串入电抗器起动，这时起动转矩 $T_{st}$ 多大。

在负载转矩不变条件下，欲使转子电路一相中串入电阻值应多大？

按题意，要求起动电流 $I_{st} = 4I_N = 4 \times 213 = 852\text{A}$ 。

$$\text{又知} \quad I_{st} = \frac{U_N / \sqrt{3}}{\sqrt{(r_1 + r_2' + R_2')^2 + (X_1 + X_2')^2}} = 852\text{A}$$

$$\begin{aligned} R_2' &= \sqrt{\left( \frac{U_N / \sqrt{3}}{I_{st}} \right)^2 + (X_1 + X_2')^2} - (r_1 + r_2') \\ &= \sqrt{\left( \frac{380}{\sqrt{3} \times 852} \right)^2 + (0.08 + 0.11)^2} \\ &\quad - (0.0265 + 0.0256) \\ &= 0.268\Omega \end{aligned}$$

应串入0.268Ω附加电阻。

起动转矩 $T_{st}$ 为

$$T'_{st} = \frac{m p U^2 (r_1 + R'_2)}{2\pi f [(r_1 + r'_2 + R'_2)^2 + (X_1 + X'_2)^2]}$$

$$= \frac{3 \times 2 \times \left(\frac{380}{3}\right)^2 (0.0265 + 0.268)}{2\pi \times 50 [(0.0265 + 0.0256 + 0.268)^2 + (0.08 + 0.11)^2]}$$

$$= 1966 \text{ N} \cdot \text{m}$$

定子回路串入电抗器时,电动机电压降为 $U'_1$ ,即

$$U'_1 = 4 I_N \sqrt{(r_1 + r'_2)^2 + (X_1 + X'_2)^2}$$

$$= 4 \times 213 \sqrt{(0.0265 + 0.0256)^2 + (0.08 + 0.11)^2}$$

$$= 167.8 \text{ V}$$

降低电压后的启动转矩 $T'_{st}$ 为

$$T'_{st} = \frac{m p U'^2 r'_2}{2\pi f [(r_1 + r'_2)^2 + (X_1 + X'_2)^2]}$$

$$= \frac{3 \times 2 \times 167.8^2 \times 0.0256}{2\pi \times 50 (0.0027 + 0.0361)}$$

$$= 355.1 \text{ N} \cdot \text{m}$$

可见串电抗器不如串电阻的启动转矩大。

额定转差率为

$$s_N = \frac{n_1 - n}{n_1} = \frac{1500 - 1470}{1500} = 0.02$$

转速降至1000r/min时的转差率 $s$ 为

$$s = \frac{n_1 - n'}{n_1} = \frac{1500 - 1000}{1500} = 0.33$$

由于负载转矩不变,所以有以下关系:

$$\frac{r'_2 + R'_2}{s} = \frac{r'_2}{s_N}$$

由此式解出转子所串入的电阻 $R'_2$ :

$$R'_2 = r'_2 \left( \frac{s}{s_N} - 1 \right) = 0.0256 \left( \frac{0.33}{0.02} - 1 \right)$$

$$= 0.401\Omega$$

$$\text{式中 } n_1 = \frac{60f}{p} = \frac{60 \times 50}{2} = 1500 \text{ r/min.}$$

### 第三节 三相异步电动机经济运行及节电计算

#### 一、空载电流的估算

##### 1. 空载电流按系数 $k_0$ 估算法

$$I_0 = k_0 I_N \quad (\text{A})$$

式中  $k_0$ ——系数，对于Y系列、JO2系列以及早年生产的电动机，可分别查表3-6、表3-7和表3-8。

表3-6 JO2系列三相异步电动机  $k_0$  值

$P_N(\text{kW})$	极数			
	2	4	6	8
0.6	—	0.556	—	—
0.8	0.442	0.534	0.650	—
1.1	0.446	0.560	0.631	—
1.5	0.370	0.458	0.561	—
2.2	0.366	2.490	0.586	0.714
3.0	0.374	0.415	0.467	0.580
4	0.335	0.417	0.437	0.477
5.5	0.318	0.380	0.398	0.453
7.5	0.311	0.298	0.374	0.518
10	0.310	0.295	0.474	0.482
13	0.255	0.336	0.427	0.448
17	0.220	0.370	0.282	0.425
22	0.186	0.285	0.289	0.457
30	0.164	0.203	0.250	0.365
40	0.188	0.201	0.310	0.339
55	0.166	0.185	0.264	0.311
75	0.163	0.180	0.283	—
100	0.171	0.173	—	—

例3-76 有一台Y180L-6型15kW三相异步电动机，已知电动机额定电流  $I_N = 31\text{A}$ ，试求其空载电流是多少。

表3-7 Y系列三相异步电动机 $k_s$ 值

$P_N$ (kW)	极数			
	2	4	6	8
0.55	—	0.638	—	—
0.75	0.442	0.619	0.696	—
1.1	0.408	0.552	0.603	—
1.5	0.441	0.487	0.543	—
2.2	0.404	0.500	0.607	0.640
3	0.406	0.515	0.528	0.578
4	0.354	0.500	0.521	0.626
5.5	0.306	0.451	0.421	0.544
7.5	0.267	0.387	0.509	0.514
11	0.294	0.372	0.504	0.518
15	0.248	0.343	0.437	0.475
18.5	0.231	0.373	0.393	0.433
22	0.284	0.353	0.383	0.418
30	0.297	0.343	0.314	0.414
37	0.267	0.272	0.269	0.363
45	0.223	0.261	0.273	0.344
55	0.278	0.279	0.215	—
75	0.267	0.282	—	—
90	0.258	0.267	—	—

表3-8 早年生产的笼型三相异步电动机 $k_s$ 值 (380V)

$P_N$ (kW)	极数					
	2	4	6	8	10	12
0.1~0.5	0.55~0.6	0.70~0.75	0.80~0.85	0.85~0.90	0.90~0.95	—
0.51~1.0	0.4~0.5	0.55~0.70	0.60~0.75	0.65~0.80	0.85~0.90	0.85~0.90
1.1~5.0	0.35~0.45	0.50~0.65	0.55~0.70	0.60~0.75	0.65~0.80	0.70~0.85
5.1~10	0.25~0.40	0.45~0.60	0.50~0.65	0.55~0.70	0.60~0.75	0.65~0.80
10.1~25	0.20~0.30	0.40~0.55	0.45~0.55	0.50~0.60	0.50~0.65	0.60~0.75
25.1~50	0.18~0.20	0.35~0.50	0.40~0.50	0.45~0.60	0.45~0.60	0.55~0.70
50.1~100	—	0.25~0.40	0.30~0.45	0.35~0.50	0.45~0.55	0.45~0.60

注：旧的电动机选用 $k_s$ 的上限，计算出来的 $I_0$ 为最大允许值。



表 3-9 三相异步电动机

额定功率 $P_N$ (kW)	JO2 系列											
	2极			4极			6极			8极		
	$\eta_N$ (%)	$I_0$ (A)	$P_0$ (kW)	$\eta_N$ (%)	$I_0$ (A)	$P_0$ (kW)	$\eta_N$ (%)	$I_0$ (A)	$P_0$ (kW)	$\eta_N$ (%)	$I_0$ (A)	$P_0$ (kW)
0.55 0.6	—	—	—	74	0.9	0.09	—	—	—	—	—	—
0.75 0.8	77.5	0.8	0.08	76.5	1.1	0.09	75	1.5	0.131	—	—	—
1.1	79.5	1.0	0.11	79	1.5	0.11	77	1.5	0.140	—	—	—
1.5	81	1.2	0.125	80.5	1.6	0.12	78.5	2.2	0.165	—	—	—
2.2	82.5	1.7	0.14	82	2.4	0.18	80.5	3.2	0.21	80.5	4.2	0.24
3	84	2.3	0.20	83.5	2.7	0.195	82.5	3.9	0.18	82.5	4.4	0.22
4	85.5	2.7	0.215	85	3.5	0.225	84	4	0.21	84	4.6	0.225
5.5	86.5	3.5	0.25	86	4.3	0.248	85	4.9	0.27	85	5.8	0.28
7.5	87.5	4.6	0.316	87	4.5	0.303	86	6.1	0.276	86	8.8	0.525
10	87.5	6.1	0.505	87.5	5.9	0.315	87	10.1	0.775	87	10.5	0.65
11 13	88	6.5	0.525	88	8.6	0.55	87.5	11.6	0.825	87.5	12.5	0.63
15 17.5	88.5	7.1	0.86	89	12.2	0.7	88.5	9.8	0.535	88	15.2	0.606
18.5 22	88.5	7.8	1.5	89.5	12.1	0.765	89	12.8	0.62	88.5	21	1.1
30 37	89.5	9.2	1.7	90	11.7	0.79	89.5	14.8	1.1	89	22.5	1.04
40 45	90	14	2.29	91	15.1	1.282	90.5	24	1.38	90	27.2	1.05
55	90	16.8	3.33	91.5	19	1.75	91.5	27.5	1.4	91	34.1	1.185
75 90	91	22.2	3.37	92	24.8	2.1	92	39.5	1.85	—	—	—
100	91.5	31	3.95	92	31.9	2.25	—	—	—	—	—	—

机的  $\eta_N$ 、 $I_0$ 、 $P_0$

Y(IP44系列)											
2 极			4 极			6 极			8 极		
$\eta_N$ (%)	$I_0$ (A)	$P_0$ (kW)	$\eta_N$ (%)	$I_0$ (A)	$P_0$ (kW)	$\eta_N$ (%)	$I_0$ (A)	$P_0$ (kW)	$\eta_N$ (%)	$I_0$ (A)	$P_0$ (kW)
—	—	—	73	1.02	0.094	—	—	—	—	—	—
75	0.82	0.095	74.5	1.3	0.117	72.5	1.6	0.135	—	—	—
77	1.06	0.105	78	1.49	0.11	73.5	1.93	0.157	—	—	—
78	1.5	0.15	79	1.8	0.117	77.5	2.17	0.195	—	—	—
82	1.9	0.158	81	2.5	0.18	80.5	3.4	0.2	81	3.71	0.22
82	2.6	0.265	82.5	3.5	0.27	83	3.8	0.194	82	4.45	0.22
85.5	2.9	0.225	84.5	4.4	0.245	84	4.9	0.228	84	6.2	0.25
85.5	3.4	0.265	85.5	4.7	0.25	85.3	5.3	0.223	85	7.5	0.3
86.2	4	0.3	87	5.90	0.265	86	8.65	0.376	86	9.1	0.42
87.2	6.4	0.66	88	8.4	0.456	87	12.4	0.52	86.5	13	0.63
88.2	7.3	0.78	88.5	10.4	0.57	89.5	13.8	0.69	88	16.2	0.6
89	8.2	0.76	91	13.4	0.65	89.8	14.9	0.68	89.5	17.9	0.74
89	12	1.28	91.5	15	0.692	90.2	17.1	0.74	90	19.9	0.72
90	16.9	1.65	92.2	19.5	0.9	90.2	18.7	1.05	90.5	26	1.16
90.5	18.6	1.66	91.8	19	1.14	90.8	19.4	1.2	91	28.6	1.43
91.5	18.7	1.78	92.3	22	1.25	92	23.3	1.35	91.7	32.1	1.42
91.5	28.5	2.53	92.6	28.6	1.56	92	27.5	1.34	—	—	—
91.5	37.4	3.38	92.7	39.4	2.41	—	—	—	—	—	—
92	43.1	3.6	93.5	43.8	2.65	—	—	—	—	—	—

查表3-7得到 $k_0 = 0.437$ ，所以空载电流 $I_0 = k_0 I_N = 0.437 \times 31 = 13.6\text{A}$

**例3-77** 一台早年生产的无铭牌的三相异步电动机，只知道电机额定容量是 $55\text{kW}$ ， $380\text{V}$ ，4极，试求此台电动机的空载电流是多少。

估算额定电流 $I_N$ 为

$$I_N \approx 2P_N = 2 \times 55 = 110\text{A}$$

在表3-8查出 $k_0 = 0.3$ ，则空载电流为

$$I_0 = k_0 I_N = 0.3 \times 110 = 33\text{A}$$

**例3-78** 一台JO2-82-6型 $40\text{kW}$ 、6极三相异步电动机，已知 $I_N = 73.8\text{A}$ ，试求空载电流是多少。

查表3-6，得到 $k_0 = 0.31$  则有

$$I_0 = k_0 I_N = 0.31 \times 73.8 = 23\text{A}$$

## 2. 直接查表法

对于JO2系列和Y系列电动机，还可直接查表3-9。

## 二、电动机负载率的计算

负载率 $\beta$ 是指电动机实际输出的有功功率 $P_2$ 与其额定功率 $P_N$ 的比值，通常用百分数表示，即 $\beta = \frac{P_2}{P_N} \times 100\%$ ，希望电动机运行在 $\beta = 75\% \sim 100\%$ 范围内，以求较高的运行效率和功率因数。

(1) 当电动机实际线电流大于 $0.7I_N$ 时，可按实测出的定子线电流 $I_1$ 用下式计算出 $\beta$ 值，即

$$\beta = \sqrt{\frac{I_1^2 - I_0^2}{I_N^2 - I_0^2}}$$

式中  $I_N$ ——额定线电流 (A)；

$I_1$ ——实测出定子线电流 (A)；

$I_0$ ——空载线电流 (A)。

有了 $\beta$ 值，可按下式计算出电动机实际输出功率 $P_2$ ，即

$$P_2 = \beta P_N = \sqrt{\frac{I_1^2 - I_0^2}{I_N^2 - I_0^2}} P_N \quad (\text{kW})$$

式中  $I_1$  可用电流表法测出。

**例3-79** 一台 JO2L-62-6 三相异步电动机,  $P_N = 13 \text{ kW}$ ,  $I_N = 26.5 \text{ A}$ , 实测定子线电流  $I_1$  为  $20 \text{ A}$ , 试求这台电动机的负载率  $\beta$  和实际输出功率是多少。

查表3-6得  $k_0 = 0.427$ , 则空载电流为

$$I_0 = k_0 I_N = 0.427 \times 26.5 = 11.3 \text{ A}$$

负载率为

$$\beta = \sqrt{\frac{I_1^2 - I_0^2}{I_N^2 - I_0^2}} = \sqrt{\frac{20^2 - 11.3^2}{26.5^2 - 11.3^2}} = 0.68$$

电动机实际输出功率  $P_2$  为

$$P_2 = \beta P_N = 68\% \times 13 = 8.84 \text{ kW}$$

(2) 用实测输入功率计算负载率 这时负载率计算公式为

$$\beta = \frac{-1 + \sqrt{1 + \frac{4}{P_N^2} \left[ \left( \frac{1}{\eta_N} - 1 \right) P_N - P_0 \right] (P_1 - P_0)}}{\frac{2}{P_N} \left[ \left( \frac{1}{\eta_N} - 1 \right) P_N - P_0 \right]}$$

式中  $P_1$ ——实测电动机的输入功率(kW);

$P_0$ ——空载损耗(kW)。

**例3-80** 一台Y系列三相异步电动机,  $100 \text{ kW}$ , 2极, 已知额定效率  $\eta_N = 92\%$ ,  $I_0 = 43.1 \text{ A}$ , 空载损耗  $P_0 = 3.6 \text{ kW}$ , 输入功率  $P_1 = 63 \text{ kW}$ , 试求这台电动机的负载率  $\beta$  是多少。

根据负载率计算公式则有

$$\begin{aligned} \beta &= \frac{-1 + \sqrt{1 + \frac{4}{P_N^2} \left[ \left( \frac{1}{\eta_N} - 1 \right) P_N - P_0 \right] (P_1 - P_0)}}{\frac{2}{P_N} \left[ \left( \frac{1}{\eta_N} - 1 \right) P_N - P_0 \right]} \\ &= \frac{-1 + \sqrt{1 + \frac{4}{100^2} \left[ \left( \frac{1}{0.92} - 1 \right) 100 - 3.6 \right] (63 - 3.6)}}{\frac{2}{100} \left[ \left( \frac{1}{0.92} - 1 \right) 100 - 3.6 \right]} \end{aligned}$$

$$= 0.577$$

这台电动机负载率为57.7%。

### 三、电动机在任意负载率下的效率计算

电动机在任意负载率下的效率计算公式为

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{P_2}{P_2 + \sum P}$$

$$= \frac{\beta P_N}{\beta P_N + \left[ \left( \frac{1}{\eta_N} - 1 \right) P_N - P_0 \right] \beta^2 + P_0}$$

式中  $\eta$ ——电动机在负载率 $\beta$ 下的效率；

$P_2$ ——电动机实际输出功率 (kW)；

$P_1$ ——电动机实际输入功率 (kW)；

$P_0$ ——空载损耗 (kW)；

$P_N$ ——电动机额定功率 (kW)；

$\beta$ ——负载率，按上面公式可算出。

**例3-81** 一台JO2-93-2型100kW、2极电动机，已知 $I_N = 181\text{A}$ ， $U_N = 380\text{V}$ ，实测运行线电流 $I_1 = 120\text{A}$ ，求此时电动机的效率 $\eta$ 是多大（查出 $I_0 = 31\text{A}$ ， $P_0 = 3.95\text{kW}$ ， $\eta_N = 91.5\%$ ）。

$$\beta = \sqrt{\frac{I_1^2 - I_0^2}{I_N^2 - I_0^2}} = \sqrt{\frac{120^2 - 31^2}{181^2 - 31^2}} = 0.66$$

$$\eta = \frac{\beta P_N}{\beta P_N + \left[ \left( \frac{1}{\eta_N} - 1 \right) P_N - P_0 \right] \beta^2 + P_0}$$

$$= \frac{0.65 \times 100}{0.65 \times 100 + \left[ \left( \frac{1}{0.915} - 1 \right) 100 - 3.95 \right] \times 0.65^2 + 3.95}$$

$$= 0.613$$

### 四、电动机在任意负载率下的功率因数计算

电动机在任意负载率下的功率因数为

$$\cos\varphi = \frac{\beta P_N \times 10^3}{\eta \sqrt{3} U_N I_1}$$

式中  $I_1$ ——实测出定子线电流 (A) ;

$P_N$ ——电动机额定功率 (kW) ;

$U_N$ ——电动机额定电压 (V) ;

$\beta$ ——电动机的负载率;

$\eta$ ——在 $\beta$ 下的电动机效率。

当电动机处于额定电压下运行时, 则  $I_1 = I_N$ ,  $\beta = 1$ ,  $\eta = \eta_N$   
上式变为

$$\cos\varphi_N = \frac{P_N \times 10^3}{\eta_N \sqrt{3} U_N I_N}$$

例3-82 JO2-72-2型30kW三相异步电动机, 已知  $U_N = 380$  V,  $I_N = 54.3$  A,  $\eta_N = 90.34\%$ ,  $P_0 = 1.7$  kW,  $I_c = 9.2$  A, 实际输出功率  $P_2 = 20$  kW, 试求这台电动机的负载率  $\beta$ 、定子线电流  $I_1$ 、效率  $\eta$ 、功率因数  $\cos\varphi$  和额定功率因数  $\cos\varphi_N$  各是多少。

$$(1) \beta = \frac{P_2}{P_N} \times 100\% = 67\%$$

(2) 定子线电流  $I_1$

$$\begin{aligned} I_1 &= \sqrt{\beta^2 (I_N^2 - I_c^2) + I_c^2} \\ &= \sqrt{0.67^2 (54.3^2 - 9.2^2) + 9.2^2} \\ &= 37 \text{ A} \end{aligned}$$

$$(3) \eta = \frac{\beta P_N}{\beta P_N + \left[ \left( \frac{1}{\eta_N} - 1 \right) P_N - P_0 \right] \beta^2 + P_0}$$

$$\begin{aligned} &= \frac{0.67 \times 30}{0.67 \times 30 + \left[ \left( \frac{1}{0.9034} - 1 \right) \times 30 - 1.7 \right] \times 0.67^2 + 1.7} \\ &= 0.893 \end{aligned}$$

(4)  $\cos\varphi$  为

$$\begin{aligned}\cos\varphi &= \frac{\beta P_N 10^3}{\eta_N \sqrt{3} U_N I_1} = \frac{0.67 \times 30 \times 10^3}{0.893 \times \sqrt{3} \times 380 \times 37} \\ &= 0.92\end{aligned}$$

(5) 当满载运行时,  $\beta = 1$ , 这时  $\cos\varphi_N$  为

$$\begin{aligned}\cos\varphi_N &= \frac{P_N 10^3}{\eta_N \sqrt{3} U_N I_N} = \frac{30 \times 10^3}{0.9034 \times \sqrt{3} \times 380 \times 54.3} \\ &= 0.930\end{aligned}$$

### 五、电动机在任意负载率下的损耗计算

#### 1. 电动机有功损耗计算

1. 电动机损耗等于空载固定损耗和负载可变损耗之和  
固定损耗为

$$P_0 = P_{Fe} + P_m + P_{0Cu}$$

可变损耗为

$$P_r = P_{Cu1} + P_{Cu2} + P_f$$

式中  $P_{Fe}$  —— 铁损耗;

$P_m$  —— 机械损耗;

$P_{0Cu}$  —— 空载铜损耗, 一般可忽略;

$P_{Cu1}$ 、 $P_{Cu2}$  —— 分别表示定、转子铜耗;

$P_f$  —— 附加损耗。

电动机在任意负载下的有功损耗  $\Sigma P$  为

$$\begin{aligned}\Sigma P &= P_0 + P_r = P_0 + \beta^2 \left[ \left( \frac{1}{\eta_N} - 1 \right) P_N - P_0 \right] \\ &= P_0 (1 - \beta^2) + \beta^2 P_N \left( \frac{1}{\eta_N} - 1 \right)\end{aligned}$$

电动机输入功率  $P_1$  与输出功率  $P_2$  间关系为

$$P_1 = P_2 + \Sigma P$$

或

$$P_1 - \Sigma P = P_2$$

当电动机处于额定电压下运行时,  $\beta = 100\%$ , 上面公式可写成:

$$\begin{aligned}\Sigma P_N &= P_0 + P_{N2} = P_0 + \left( \frac{1}{\eta_N} - 1 \right) P_N - P_0 \\ &= P_N \left( \frac{1}{\eta_N} - 1 \right)\end{aligned}$$

$$P_{N1} = P_{N2} + \Sigma P_N = P_N + \Sigma P_N$$

或

$$P_{N1} - \Sigma P_N = P_N$$

### 2. 电动机无功损耗计算

三相异步电动机运行时，不但从电网吸收有功功率，同时还吸收无功功率，吸收的无功功率也会引起有功损耗。

电动机无功损耗等于空载无功损耗和负载时无功损耗之和，

即

$$\Sigma Q = Q_0 + \beta^2 \left( \frac{P_N}{\eta_N} \operatorname{tg} \varphi_N - Q_0 \right)$$

式中  $\Sigma Q$ ——电动机的无功损耗 (kvar)；

$Q_0$ ——空载无功损耗， $Q_0 = \sqrt{3} U_N I_0 \times 10^{-3}$  (kvar)；

$U_N$ ——电动机额定电压 (V)；

$I_0$ ——电动机空载电流 (A)；

$\varphi_N = \cos^{-1} P_N$ ——功率因数角；

$\cos \varphi_N$ ——电动机额定功率因数。

当电动机处于额定运行时， $P_2 = P_N$  (即  $\beta = 100\%$ ) 则有

$$\Sigma Q_N = Q_0 + (100\%)^2 \left( \frac{P_N}{\eta_N} \operatorname{tg} \varphi_N - Q_0 \right) = \frac{P_N}{\eta_N} \operatorname{tg} \varphi_N$$

### 3. 电动机综合功率损耗计算

电动机在运行过程中，有功损耗和因无功损耗使电网增加的有功损耗之和，叫电动机综合功率损耗，即

$$\Sigma P_z = \Sigma P + K_0 \Sigma Q$$

电动机额定运行时，则有

$$\Sigma P_{zN} = \Sigma P_N + K_0 \Sigma Q_N$$

式中  $\Sigma P_z$ ——综合功率损耗 (kW)；



$K_Q$ ——无功功率经济当量，对于  $\cos\varphi$  调节已集中补偿到0.9以上的厂区，取  $K_Q = 0.01$ ；对于发电厂自用电量地区，取  $K_Q = 0.05$ ；未做补偿的地区取  $K_Q = 0.1$ 。

**例3-83** 一台JO2-61-8型7.5kW电动机，已知  $U_N = 380V$ ， $P_0 = 0.283kW$ ， $\eta_N = 86.4\%$ ， $\cos\varphi_N = 0.808$ ， $I_0 = 5.8A$ ，已知无功经济当量  $K_Q$  为0.02，试求：（1）电动机有功总损耗  $\Sigma P$  ( $\beta = 60\%$ )；（2）额定运行时有功总损耗  $\Sigma P_N$ ；（3）额定输入功率  $P_{N1}$  和负载率  $\beta = 60\%$  时的输入功率  $P_1$ ；（4）无功总损耗  $\Sigma Q$  和额定运行时无功总损耗  $\Sigma Q_N$ ；（5）电动机综合功率损耗  $\Sigma P_2$  和额定运行综合功率损耗  $\Sigma P_{N2}$  各是多少。

（1）负载率  $\beta = 60\%$  时电动机的有功总损耗

$$\begin{aligned}\Sigma P &= P_0 + \beta^2 \left[ \left( \frac{1}{\eta_N} - 1 \right) P_N - P_0 \right] \\ &= 0.283 + 0.6^2 \left[ \left( \frac{1}{0.864} - 1 \right) \times 7.5 - 0.283 \right] \\ &= 0.606 \text{ kW}\end{aligned}$$

（2）额定时有功总损耗  $\Sigma P_N$

$$\Sigma P_N = \left( \frac{1}{\eta_N} - 1 \right) P_N = \left( \frac{1}{0.864} - 1 \right) \times 7.5 = 1.18 \text{ kW}$$

（3）额定输入功率  $P_{N1}$

$$P_{N1} = P_N + \Sigma P_N = 7.5 + 1.18 = 8.68 \text{ kW}$$

负载率为60%时，电动机输入功率  $P_1$  为

$$P_1 = P_2 + \Sigma P = \beta P_N + \Sigma P = 0.6 \times 7.5 + 0.606 = 5.1 \text{ kW}$$

$$P_2 = 0.6 \times 7.5 = 4.5 \text{ kW}$$

（4）无功总损耗  $\Sigma Q$

$$\begin{aligned}\Sigma Q &= Q_0 + \beta^2 \left( \frac{P_N}{\eta_N} \text{tg}\varphi_N - Q_0 \right) \\ &= 3 U_N I_0 \times 10^{-3} + 0.6^2 \left( \frac{7.5}{0.864} \times \text{tg}36.1^\circ \right)\end{aligned}$$

$$-\sqrt{3} U_N I_0 \times 10^{-3}$$

$$= 4.73 \text{ kvar}$$

$$\therefore \varphi_N = \cos^{-1} 0.808 = 36.1^\circ$$

$$\therefore \operatorname{tg} \varphi_N = \operatorname{tg} 36.1^\circ = 0.73$$

额定时无功总损耗  $\Sigma Q_N$  为

$$\Sigma Q_N = \frac{P_N}{\eta_N} \operatorname{tg} \varphi_N = \frac{7.5}{0.864} \times 0.73 = 6.34 \text{ kvar}$$

(5) 综合功率损耗  $\Sigma P_z$

$$\Sigma P_z = \Sigma P + K_Q \Sigma Q = 0.606 + 0.02 \times 4.73 = 0.70 \text{ kW}$$

额定时的  $\Sigma P_{N2}$  为

$$\begin{aligned} \Sigma P_{N2} &= \Sigma P_N + K_Q \Sigma Q_N \\ &= 1.18 + 0.02 \times 6.34 = 1.31 \text{ kW} \end{aligned}$$

## 六、额定电压下连续工作的电动机经济负载率的计算

### 1. 有功经济负载率的计算

有功经济负载率是指电动机运行效率最高时的负载率，从电机理论上讲，当固定损耗等于可变损耗时电动机效率最高，即

$$P_0 = \beta^2 J_F \left[ \left( \frac{1}{\eta_N} - 1 \right) P_N - P_0 \right]$$

于是得出电动机有功经济负载率  $\beta_{JF}$

$$\beta_{JF} = \sqrt{\frac{P_0}{\left( \frac{1}{\eta_N} - 1 \right) P_N - P_0}}$$

例3-84 一台JO2-92-4三相异步电动机，已知  $P_N = 75 \text{ kW}$ ， $U_N = 380 \text{ V}$ ， $I_N = 134.2 \text{ A}$ ， $P_0 = 2.34 \text{ kW}$ ， $\eta_N = 93\%$ ， $\cos \varphi_N = 0.91$ ，试求有功经济负载率。

$$\begin{aligned}\beta_{Jp} &= \sqrt{\frac{P_0}{\left(\frac{1}{\eta_N} - 1\right)P_N - P_0}} \\ &= \sqrt{\frac{2.34}{\left(\frac{1}{0.93} - 1\right) \times 75 - 2.34}} = 0.84\end{aligned}$$

此台电动机负载率为84%时，电机效率最高。

### 2. 综合经济负载率计算

电动机综合运行效率最高时的负载率，称为综合经济负载率

$\beta_{Jz}$ ，其值为

$$\beta_{Jz} = \sqrt{\frac{P_0 + K_Q \sqrt{3} U_N I_0 \times 10^{-3}}{\left(\frac{1}{\eta_N} - 1\right)P_N - P_0 + \left(\frac{P_N}{\eta_N} \operatorname{tg} \varphi_N - \sqrt{3} U_N I_0 \times 10^{-3}\right)K_0}}$$

3. 电压偏离额定值，且连续运行的电动机的综合经济负载率的计算

$$\begin{aligned}\beta_{Jz*} &= K_u \beta_{Jz} \\ &= K_u \sqrt{\frac{P_0 + K_Q \sqrt{3} U_N I_0 \times 10^{-3}}{\left(\frac{1}{\eta_N} - 1\right)P_N - P_0 + \left(\frac{P_N}{\eta_N} \operatorname{tg} \varphi_N - \sqrt{3} U_N I_0 \times 10^{-3}\right)K_0}}\end{aligned}$$

式中  $K_u$ ——电压系数， $K_u = \frac{U_1}{U_N}$ ；

$U_1$ ——偏离额定变化的电压值（V）。

**例3-85** 一台Y系列三相异步电动机，4极， $P_N = 90\text{kW}$ ， $U_N = 380\text{V}$ ， $\eta_N = 92.7\%$ ， $\cos \varphi_N = 0.81$ ， $I_0 = 39.4\text{A}$ ， $K_Q = 0.05$ 。试求  $\beta_{Jz}$  和  $U = 370\text{V}$  时  $\beta_{Jz*}$  各是多少。

(1)  $\beta_{Jz}$

$$\beta_{Jz} = \sqrt{\frac{P_0 + K_Q \sqrt{3} U_N I_0 \times 10^{-3}}{\left(\frac{1}{\eta_N} - 1\right)P_N - P_0 + \left(\frac{P_N}{\eta_N} \operatorname{tg} \varphi_N - \sqrt{3} U_N I_0 \times 10^{-3}\right)K_0}}$$

$$= \frac{\sqrt{2.41 + 0.05 \times \sqrt{3} \times 380 \times 39.4 \times 10^{-3}}}{\sqrt{\left(\frac{1}{0.927} - 1\right) \times 90 - 2.41 + \left(\frac{90}{0.927} - \frac{1}{0.927}\right) \times \text{tg}\varphi'_N - \sqrt{3} \times 380 \times 39.4 \times 10^{-3}}} \times 0.05$$

从已知  $\cos\varphi_N = 0.81$ , 求出  $\text{tg}\varphi'_N = 0.72$ , 代入上式得:

$$\beta_{JZ} = \sqrt{\frac{3.707}{6.88}} = 0.734$$

(2) 当  $U = 370 \text{ V}$  时,  $K_u = \frac{U}{U_N} = \frac{370}{380} = 0.974$ , 则有

$$\beta_{JZu} = K_u^2 \beta_{JZ} = 0.974^2 \times 0.734 = 0.696$$

### 七、更换电动机的节电计算

1. 长期处于低负载率下运行的电动机, 由于运行效率和功率因数较低, 浪费许多电能, 所以有必要考虑更换同型号容量较小的电动机, 使更换的电动机的负载率接近综合经济负载率。

设原电机的额定功率为  $P_N$ 、效率为  $\eta$ 、空载损耗为  $P_0$ 、功率因数  $\cos\varphi$ 、负载率为  $\beta$ 、更换后的电机相应参数分别为  $P'_N$ 、 $\eta'$ 、 $P'_0$ 、 $\cos\varphi'$ 、 $\beta'$ , 则更换电动机后节电按下面计算

已知原电机  $\beta = P_2/P_N$ , 更换小容量电动机时, 令负载大小不变 ( $P_2 = \text{常数}$ ), 由于  $P'_N < P_N$ , 所以  $\beta' = P_2/P'_N > \beta = P_2/P_N$ 。可见提高了负载率, 使电动机运行效率和功率因数均会提

高, 由上两式可得到  $\beta' = \frac{P_N}{P'_N}$  与  $\beta$  的关系。

设原电动机总有功损耗为  $\Sigma P$ , 则有

$$\Sigma P = P_0(1 - \beta^2) + \beta^2 P_N \left( \frac{1}{\eta_N} - 1 \right)$$

新更换的电动机有功总损耗为  $\Sigma P'$ , 则有

$$\begin{aligned}\Sigma P' &= P'_0(1 - \beta'^2) + \beta'^2 P'_N \left( \frac{1}{\eta'_N} - 1 \right) \\ &= P'_0 \left[ 1 - \left( \frac{P'_N}{P'_0} \right) \beta'^2 \right] + \left( \frac{P'_N}{P'_0} \beta'^2 \right) P'_N \\ &\quad \times \left( \frac{1}{\eta'_N} - 1 \right)\end{aligned}$$

由于更换的新电机总损耗小，所以两台电动机的总损耗之差即为节电的电功率，即  $\Sigma P - \Sigma P' =$  节电的电功率，如果再乘以年连续运行小时数，则可算出年节电量  $\Delta E$ ，即

$$\Delta E = (\Sigma P - \Sigma P') h \quad (\text{kW} \cdot \text{h})$$

设电费为  $a$ ，则一年节电费  $\xi$  为

$$\xi = \Delta E a = (\Sigma P - \Sigma P') h a \quad \text{元/年}$$

例3-86 一台 JS117-6 三相异步电动机， $P_N = 115 \text{ kW}$ ， $U = 380 \text{ V}$ ， $I_N = 212 \text{ A}$ ， $\eta_N = 92\%$ ， $P_0 = 3.4 \text{ kW}$ ， $\beta = 35\%$ ，拟更换一台 JS115-6， $P'_N = 75 \text{ kW}$ ， $U'_N = 380 \text{ V}$ ， $I'_N = 140 \text{ A}$ ， $\eta'_N = 91\%$ ， $P'_0 = 2.12 \text{ kW}$ ，年连续运行 4000h，问更换后节电情况如何。

原电动机总损耗  $\Sigma P$  为

$$\begin{aligned}\Sigma P &= P_0(1 - \beta^2) + \beta^2 P_N \left( \frac{1}{\eta_N} - 1 \right) \\ &= 3.4(1 - 35\%^2) + 35\%^2 \times 115 \left( \frac{1}{0.92} - 1 \right) \\ &= 4.2 \text{ kW}\end{aligned}$$

更换电机后总损耗  $\Sigma P'$  为

$$\begin{aligned}\Sigma P' &= P'_0(1 - \beta'^2) + \beta'^2 P'_N \left( \frac{1}{\eta'_N} - 1 \right) \\ &= 2.12 \left[ 1 - \left( \frac{115}{75} \right)^2 (0.35)^2 \right] + \left( \frac{115}{75} \right)^2 \\ &\quad \times (0.35)^2 \left( \frac{1}{0.91} - 1 \right) \times 75 \\ &= 1.51 + 2.14 = 3.65 \text{ kW}\end{aligned}$$

年节电量 $\Delta E$ 为

$$\begin{aligned}\Delta E &= (\Sigma P - \Sigma P')h = (4.2 - 3.65) \times 4000 \\ &= k\text{W}\cdot\text{h}/\text{年}\end{aligned}$$

设电费 $a = 0.4$ 元/ $k\text{W}\cdot\text{h}$ 则年节电费 $\xi$

$$\xi = a \cdot \Delta E = 0.4 \times 2200 = 880 \text{元/年}$$

例3-87 仍用上例115kW电动机为例, 现在打算更换一台电动机, 使更换后的负载率 $\beta' = 90\%$ , 问应选多大容量的电动机, 更换后节电情况如何。

为使 $\beta' = 90\%$ , 则更换电动机的容量 $P'_N$ 为

$$P'_N = \frac{\beta}{\beta'} P_N = \frac{0.35}{0.90} \times 115 = 44.7 \text{kW}$$

选45kW三相异步电动机, 查型号为Y 280S-6, 其参数为 $P_N = 45 \text{kW}$ ,  $\cos\varphi'_N = 0.92$ ,  $P'_0 = 1.38 \text{kW}$ , 则总损耗 $\Sigma P'$ 为

$$\begin{aligned}\Sigma P' &= P'_0(1 - \beta'^2) + \beta'^2 P'_N \left( \frac{1}{\eta'_N} - 1 \right) \\ &= 1.38(1 - 0.902^2) + 0.902^2 \times 45 \left( \frac{1}{0.92} - 1 \right) \\ &= 3.44 \text{kW}\end{aligned}$$

$$\text{实际 } \beta' = \frac{P'_0}{P'_N} = \frac{40.3}{44.7} \times 100\% = 90.2\%$$

年节电量 $\Delta E$ 为

$$\Delta E = (4.21 - 3.44) \times 4000 = 3040 \text{kW}\cdot\text{h}$$

年节省电费 $\xi$ 为

$$\xi = \Delta E a = 3040 \times 0.4 = 1216 \text{元/年}$$

虽然此电动机节电强度大于JS115-6型75kW电动机, 但由于电动机型式不同以及安装复杂等问题, 还是用JS115-6为宜。

2. 判断更换电动机后是否节电的条件

- (1) 如果 $\eta' > \eta$ 、 $P'_0 < P_0$ , 更换后节电;
- (2) 如果 $\eta' < \eta$ 、 $P'_0 > P_0$ , 更换后浪费电;

(3) 如果  $\eta' < \eta$ 、 $P'_0 < P_0$ ，只要符合下面公式条件，才能更换，即

$$P_0 - P'_0 > \beta^2 \left\{ \left[ \left( \frac{1}{\eta'_N} - 1 \right) P'_N - P'_0 \right] \left( \frac{P_N}{P'_N} \right)^2 - \left[ \left( \frac{1}{\eta} - 1 \right) P_N - P_0 \right] \right\}$$

**例3-88** 一台 JS117-4 型 150kW 三相异步电动机，3kV， $\beta = 60\%$ ，拟更换 JS115-4，110kW，3kV 三相异步电动机，已知  $\eta' = 91.5\% < \eta = 92.5\%$ ， $P'_0 = 3.27 < P_0 = 4.4$  kW，问更换后是否有利。

符合  $\eta' < \eta$ ， $P'_0 < P_0$ ，所以按上式不等式判定，如果满足不等式，则说明更换有利。

$$(1) P_0 - P'_0 = 4.4 - 3.27 = 1.13 \text{ kW}$$

$$\begin{aligned} (2) & \beta^2 \left\{ \left[ \left( \frac{1}{\eta'_N} - 1 \right) P'_N - P'_0 \right] \left( \frac{P_N}{P'_N} \right)^2 - \left[ \left( \frac{1}{\eta} - 1 \right) \right. \right. \\ & \left. \left. \times P_N - P_0 \right] \right\} \\ & = 0.6^2 \left\{ \left[ \left( \frac{1}{0.915} - 1 \right) \times 110 - 3.27 \right] \left( \frac{115}{110} \right)^2 - \right. \\ & \left. - \left[ \left( \frac{1}{0.925} - 1 \right) \times 115 - 4.4 \right] \right\} \\ & = 0.6^2 \times (2.66) = 0.956 \end{aligned}$$

由于 (1) > (2)，说明可以更换。

### 3. 按临界负载判定更换电动机是否对节电有利

临界负载是指不同容量的电动机，当其损耗相同时所对应的输出功率。

当更换的电动机的输出功率  $P_2$  比临界负载小，则说明更换电动机是节电的。

临界负载  $P_{2p}$  为

$$P_{2p} = \sqrt{\frac{P_0 - P'_0}{\left[ \left( \frac{1}{\eta'_N} - 1 \right) P'_N - P'_0 \right] \frac{1}{P_N'^2} - \left[ \left( \frac{1}{\eta_N} - 1 \right) \times \right.}} \times P_N - P_0 \left. \right] \frac{1}{P_N^2}} \quad (\text{kW})$$

当  $P'_0 < P_{2p}$  时，更换电机于节电有利。

例3-89 一台JS117-6型115kW、220/380V、260/208A电动机，已知  $P_N = 115\text{kW}$ ， $P_0 = 4.36\text{kW}$ ， $\eta = 89.5\%$ ， $\beta = 65\%$ ，即  $P_2 = \beta P_N = 65\% \times 115 = 74.8\text{kW}$ ，现选用JS115-6型75kW、220/380V、240/144A电动机，已知  $P'_0 = 2.28\text{kW}$ ， $\eta' = 90\%$ ， $P'_N = 75\text{kW}$ ，判定更换此台电动机对节电是否有利。

临界负载  $P_{2p}$  为

$$\begin{aligned} P_{2p} &= \sqrt{\frac{P_0 - P'_0}{\left[ \left( \frac{1}{\eta'_N} - 1 \right) P'_N - P'_0 \right] \frac{1}{P_N'^2} - \left[ \left( \frac{1}{\eta_N} - 1 \right) P_N - P_0 \right] \frac{1}{P_N^2}}} \\ &= \sqrt{\frac{4.36 - 2.28}{\left[ \left( \frac{1}{0.9} - 1 \right) \times 75 - 2.28 \right] \times \frac{1}{75^2} - \left[ \left( \frac{1}{0.895} - 1 \right) \right.}} \\ &\quad \left. \times 115 - 4.36 \right] \times \frac{1}{115^2}} \\ &= \sqrt{\frac{2.08}{\frac{6.05}{75^2} - \frac{9.13}{115^2}}} = 44.1\text{kW} \end{aligned}$$

由于  $P_2 = 75\text{kW} > P_{2p} = 44.1\text{kW}$ ，所以更换后对节电无利。

#### 4. 更换电动机的节电计算

(1) 采用新电动机代替原电动机所节省的有功功率  $\Delta P$  为

$$\Delta P = P_0 - P'_0 + \beta'^2 \left\{ \left( \frac{1}{\eta} - 1 \right) P_N - P_0 - \left[ \left( \frac{1}{\eta'} - 1 \right) \right. \right.$$



$$\times P_N' - P_0' \left[ \left( \frac{P_N}{P_N'} \right)^2 \right]$$

(2) 采用新电动机所节省的无功功率  $\Delta Q$  为

$$\begin{aligned} \Delta Q &= \sqrt{3} U_N (I_0 - I_0') 10^{-3} + \beta'^2 \left[ \frac{P_N}{\eta_N} \tan \varphi \right. \\ &\quad \left. - \sqrt{3} U_N I_0' 10^{-3} - \left( \frac{P_N'}{\eta_N'} \tan \varphi' - \sqrt{3} U_N I_0' 10^{-3} \right) \right. \\ &\quad \left. \times \left( \frac{P_N}{P_N'} \right)^2 \right] \end{aligned}$$

**例3-90** 有一台JS116-4型  $P_N = 155\text{kW}$  的三相异步电动机, 已知此台电机的  $P_0 = 3.85\text{kW}$ ,  $I_0 = 65\text{A}$ ,  $\eta = 74\%$ ,  $\cos \varphi = 0.8$ ,  $\beta = 60\%$ , 欲更换一台JS114-4,  $P_N' = 115\text{kW}$  三相异步电动机, 已知  $P_0' = 2.96\text{kW}$ ,  $\eta' = 86\%$ ,  $I_0' = 47\text{A}$ ,  $\beta' = 90\%$ ,  $\cos \varphi' = 0.88$ , 问更换新电动机后是否节电, 能节多少电。

(1) 判断更换后是否节电

$$\eta' = 0.86 > \eta = 0.74$$

$$P_0' = 2.96 < P_0 = 3.85\text{kW}$$

符合这两条, 所以更换电动机后节电。

(2) 节电计算

节省的有功功率  $\Delta P$  为

$$\begin{aligned} \Delta P &= P_0 - P_0' + \beta'^2 \left\{ \left( \frac{1}{\eta} - 1 \right) P_N - P_0 \right. \\ &\quad \left. - \left[ \left( \frac{1}{\eta'} - 1 \right) P_N' - P_0' \right] \left( \frac{P_N}{P_N'} \right)^2 \right\} \\ &= 3.85 - 2.96 + 0.9^2 \left\{ \left( \frac{1}{0.74} - 1 \right) \times 155 - 3.85 \right. \\ &\quad \left. - \left[ \left( \frac{1}{0.86} - 1 \right) \times 115 - 2.96 \right] \times \left( \frac{115}{155} \right)^2 \right\} \\ &= 18.7\text{kW} \end{aligned}$$

节省的无功功率 $\Delta Q$ 为

$$\begin{aligned} \Delta Q &= \sqrt{3} U_N (I_0 - I_0') 10^{-3} + \beta'^2 \left[ \frac{P_N}{\eta_N} \operatorname{tg} \varphi \right. \\ &\quad \left. - \sqrt{3} U_N I_0' 10^{-3} - \left( \frac{P_N'}{\eta'} \operatorname{tg} \varphi' - \sqrt{3} U_N I_0' 10^{-3} \right) \times \right. \\ &\quad \left. \times \left( \frac{P_N}{P_N'} \right)^2 \right] \\ &= \sqrt{3} \times 380 (65 - 47) \times 10^{-3} + 0.9^2 \left[ \frac{155}{0.74} \times 0.74 - \sqrt{3} \right. \\ &\quad \left. \times 380 \times 65 \times 10^{-3} - \left( \frac{115}{0.86} \times 0.54 - \sqrt{3} \times 380 \right. \right. \\ &\quad \left. \left. \times 47.1 \times 10^{-3} \right) \left( \frac{155}{115} \right)^2 \right] \\ &= 44.2 \text{ kvar} \end{aligned}$$

因  $\cos \varphi = 0.8$      $\varphi = 36.9^\circ$      $\therefore \operatorname{tg} \varphi = 0.75$

$\cos \varphi' = 0.88$      $\varphi' = 28.4^\circ$      $\therefore \operatorname{tg} \varphi' = 0.54$

### 八、电动机调节电压的节电计算

当电动机处于轻载运行时，如将电源电压适当降低或将电动机绕组合理改接，使相绕组匝数增加以及 $\Delta$ 联结改为 $Y$ 联结等均可节约电能。负载率小于30%可不经计算将 $\Delta$ 联结改为 $Y$ 联结运行。降压后的电动机效率和功率因数均有所提高。

#### 1. 最佳电压系数计算

(1) 按最小损耗法，得出下列计算最佳电压系数公式，即

$$K_{um} = \sqrt[4]{\frac{\beta^2}{K} \left[ 1 - \frac{P_0}{\left( \frac{1}{\eta_N} - 1 \right) P_N} \right]}$$

式中  $K$ ——系数，2极时  $K=0.15$ ；4极时  $K=0.25$ ；  
6极以上  $K=0.30$ 。

例3-91 一台JS116-6三相异步电动机，已知  $P_N=95 \text{ kW}$ ，

6极,  $P_0 = 2.43\text{kW}$ ,  $U_N = 380\text{V}$ ,  $\eta_N = 91\%$ ,  $\cos\varphi_N = 0.9$ ,  $I_N = 174\text{A}$ ,  $I_0 = 45\text{A}$ , 负载率  $\beta = 28\%$ ,  $\Delta$ 接线, 试求最佳电压系数  $K_{um}$  是多少。

$$\begin{aligned} K_{um} &= \sqrt[4]{\frac{\beta^2}{K} \left[ 1 - \frac{P_0}{\left(\frac{1}{\eta_N} - 1\right) P_N} \right]} \\ &= \sqrt[4]{\frac{0.28^2}{0.3} \left[ 1 - \frac{2.43}{\left(\frac{1}{0.91} - 1\right) \times 95} \right]} \\ &= 0.44 \end{aligned}$$

降低的电压值为  $U' = K_{um} U_N = 0.44 \times 380 = 167\text{V}$

将  $\Delta$  联结改为  $Y$  联结, 适合的电源电压为  $\frac{380}{\sqrt{3}} = 220\text{V}$  和

167接近, 所以改接绕组即可。

**例3-92** 一台 JO2-81-6 三相异步电动机,  $30\text{kW}$ ,  $380\text{V}$ ,  $P_0 = 0.935\text{kW}$ ,  $I_N = 56.2\text{A}$ ,  $\eta_N = 91\%$ , 6极,  $\beta = 25\%$ , 试求最佳电压系数  $K_{um}$  是多少。

$$\begin{aligned} K_{um} &= \sqrt[4]{\frac{\beta^2}{K} \left[ 1 - \frac{P_0}{\left(\frac{1}{\eta_N} - 1\right) P_N} \right]} \\ &= \sqrt[4]{\frac{0.25^2}{0.3} \left[ 1 - \frac{0.935}{\left(\frac{1}{0.91} - 1\right) \times 30} \right]} = 0.61 \end{aligned}$$

最佳电压值  $U_m = K_{um} U_N = 0.61 \times 380 = 232\text{V}$ , 可见  $\Delta$  联结  $Y$  联结运行, 电动机要求的电压 ( $220\text{V}$ ) 极接近  $U_m$ 。

(2) 按调压前后相电流相等原则, 得出计算最佳电压系数公式, 即

$$K_{um} = \beta \sqrt{\frac{I_N^2 - I_0^2}{I_0^2}}$$

**例3-93** 一台 Y180M-4型  $18.5\text{kW}$  三相异步电动机, 已知  $I_N$

$= 36\text{A}$ ,  $I_0 = 13.4\text{A}$ ,  $U_N = 380\text{V}$ ,  $\Delta$ 接线,  $\beta = 27\%$ , 试求最佳电压  $U_m$  是多少。

$$K_{um} = \beta \sqrt{\frac{I_N^2 - I_0^2}{I_0^2}} = 0.27 \sqrt{\frac{36^2 - 13.4^2}{13.4^2}}$$

$$= 0.67$$

$$U_m = K_{um} U_N = 0.67 \times 380 = 255\text{V}$$

## 2. 调电压的节电计算

经调电压后, 电动机减少的有功损耗  $\Delta P$  为

$$\Delta P = \left[ \left( \frac{1}{\eta_N} - 1 \right) P_N - P_0 \right] \beta^2 \left( 1 - \frac{1}{K_u^2} \right)$$

$$+ K \left( \frac{1}{\eta_N} - 1 \right) P_N (1 - K_u^2) \quad (\text{kW})$$

经调压后, 电动机减少的无功损耗  $\Delta Q$

$$\Delta Q = \left[ \left( \frac{P_N}{\eta_N} \tan \varphi_N - \sqrt{3} U_N I_0 10^{-3} \right) \beta^2 \right.$$

$$\left. + \sqrt{3} \times U_N I_0 10^{-3} \right] (1 - K_u^2) \quad (\text{kvar})$$

**例3-94** 有一台JS117-10型65kW三相异步电动机,  $U_N = 380\text{V}$ ,  $I_N = 132\text{A}$ ,  $I_0 = 56.8\text{A}$ ,  $P_0 = 1.93\text{kW}$ ,  $\eta_N = 90.25\%$ ,  $\cos \varphi_N = 0.825$ , 负载率  $\beta = 40\%$ , 现使电动机端电压降为280V, 即  $K_u = \frac{280}{380} = 0.737$ , 问节省的有功损耗和无功损耗各多少。

有功损耗降低  $\Delta P$  为

$$\Delta P = \left[ \left( \frac{1}{\eta_N} - 1 \right) P_N - P_0 \right] \beta^2 \left( 1 - \frac{1}{K_u^2} \right)$$

$$+ K \left( \frac{1}{\eta_N} - 1 \right) P_N (1 - K_u^2)$$

$$= \left[ \left( \frac{1}{0.9025} - 1 \right) \times 65 - 1.93 \right] \times 0.4^2 \left( 1 - \frac{1}{0.737^2} \right)$$

$$+ 0.3 \left( \frac{1}{0.9025} - 1 \right) \times 65 (1 - 0.737^2) \\ = 0.279 \text{ kW}$$

无功损耗降低  $\Delta Q$  为

$$\Delta Q = \left[ \left( \frac{P_N}{\eta_N} \tan \varphi_N - \sqrt{3} U_N I_0 10^{-3} \right) \beta^2 \right. \\ \left. + \sqrt{3} U_N I_0 10^{-3} \right] (1 - K_s^2) \\ = \left[ \left( \frac{65}{0.9025} \times 0.69 - \sqrt{3} \times 380 \times 56.8 \times 10^{-3} \right) \right. \\ \left. \times 0.4^2 + \sqrt{3} \times 380 \times 56.8 \times 10^{-3} \right] (1 - 0.737^2) \\ = 18 \text{ kvar}$$

### 九、电源质量对电动机性能影响的计算

1. 不在额定电压下运行的电动机引起性能变化的计算（三相电压平衡）

上面曾提到轻载的电动机可以适当降低电压运行节能，但对于额定工况下运行的电动机不能偏离额定电压太远，一般允许在额定电压的  $\pm 5\%$  范围内变化，才能保证电动机的性能基本不变。但实际上有些电动机所处的电源电压大于允许的  $\pm 5\%$ ，比如有的工厂实测电源电压达到  $430\text{V}$ （额定电压  $380\text{V}$ ），造成电机损耗增加，温升增高，同时也浪费电能。

设电源频率正常，三相电压平衡，实际电源电压为  $U$ ，额定电压为  $U_N$ 。用脚标  $N$  表示额定值，则电压为  $U$  时电动机各种参数变化计算如下：

(1) 空载电流  $I_0'$

$$I_0' = I_0 \frac{0.22 + 0.16 \left( \frac{U}{U_N} \right)}{1 - 0.62 \left( \frac{U}{U_N} \right)}$$

(2) 满载电流  $I_1$

$$I_1 = \sqrt{\left(\frac{U_N}{U}\right)^2 (I_N^2 - I_0^2) + I_0^2}$$

(3) 铁损耗  $P_{Fe}$

$$P_{Fe} \approx P_{FeN} \left(\frac{U}{U_N}\right)^2$$

(4) 定子铜耗  $P_{Cu1}$

$$P_{Cu1} \approx P_{Cu1N} \left(\frac{I_1}{I_N}\right)^2$$

(5) 机械损耗,  $p_m$

$p_m$  不变, 因转差率变化极小

(6) 转子铜(铝)耗  $P_{Al2}$

$$P_{Al2} \approx P_{Al2N} \left(\frac{U}{U_N}\right)^2$$

(7) 杂散损耗  $p_s$

$$p_s \approx P_{sN} \left(\frac{U}{U_N}\right)^2$$

(8) 总损耗  $\Sigma P$

$$\Sigma P = p_m + P_{Fe} + P_{Cu1} + P_{Al2} + p_s$$

(9) 额定总损耗  $\Sigma P_N$

$$\Sigma P_N = p_m + P_{FeN} + P_{Cu1N} + P_{Al2N} + p_{sN}$$

(10) 电动机效率  $\eta$

$$\eta = \eta_N \left( \frac{P_N + \Sigma P_N}{P_N + \Sigma P} \right)$$

(11) 电动机功率因数  $\cos\varphi$

$$\cos\varphi \approx \frac{P_N + \Sigma P}{\sqrt{3} U I_1}$$

(12) 电动机温升  $\theta$

$$\theta = \theta_N \frac{0.47 P_{Fe} + P_{Cu1} + P_{Al2} + P_s}{0.47 P_{FeN} + P_{Cu1N} + P_{Al2N} + P_{sN}}$$

(13) 堵转转矩倍数  $T_{st}$

$$T_{st} = T_{stN} \left( \frac{U}{U_N} \right)^2 \quad (\text{倍})$$

(14) 堵转电流倍数  $I_{st}$

$$I_{st} = I_{stN} \left( \frac{U}{U_N} \right) \quad (\text{倍})$$

**例3-95** JS115-8型60kW三相异步电动机, 已知  $U_N = 380\text{V}$ ,  $I_N = 116\text{A}$ ,  $P_{Cu1N} = 2060\text{W}$ ,  $P_{Cu2N} = 1640\text{W}$ ,  $P_{FeN} = 1400\text{W}$ ,  $p_{mN} = 480\text{W}$ ,  $P_{sN} = 600\text{W}$ ,  $\eta_N = 90\%$ ,  $I_0 = 53\text{A}$ ,  $T_{stN} = 1.35$  倍,  $\cos\varphi_N = 0.84$ ,  $I_{stN} = 4.96$  倍, 实测电源电压  $U = 320\text{V}$ , 试求这台电动机在偏离额定电压下各种参数变为多少。

(1) 空载电流  $I_0'$

$$\begin{aligned} I_0' &= I_0 \frac{0.22 + 0.16 \left( \frac{U}{U_N} \right)}{1 - 0.62 \left( \frac{U}{U_N} \right)} = 53 \times \frac{0.22 + 0.16 \left( \frac{320}{380} \right)}{1 - 0.62 \times \left( \frac{320}{380} \right)} \\ &= 39.3\text{A} \end{aligned}$$

(2) 满载定子电流  $I_1$

$$\begin{aligned} I_1 &= \sqrt{\left( \frac{U}{U_N} \right)^2 (I_N^2 - I_0^2) + I_0'^2} \\ &= \sqrt{\left( \frac{380}{320} \right)^2 (116^2 - 53^2) + 39.3^2} \\ &= 128.7\text{A} \end{aligned}$$

(3) 铁损耗  $P_{Fe}$

$$P_{Fe} = P_{FeN} \left( \frac{U}{U_N} \right)^2 = 1400 \left( \frac{320}{380} \right)^2 = 993\text{W}$$

(4) 定子铜耗  $P_{Cu1}$

$$P_{Cu1} = P_{Cu1N} \left( \frac{I_1}{I_N} \right)^2 = 2060 \left( \frac{128.3}{116} \right)^2 = 2520\text{W}$$

(5) 机械损耗  $p_m$

$$p_m = p_{mN} = 480 \text{ W 不变}$$

(6) 转子铜耗  $P_{Cu2}$

$$P_{Cu2} = P_{Cu2N} \left( \frac{U_N}{U} \right)^2 = 1640 \left( \frac{380}{320} \right)^2 = 2313 \text{ W}$$

(7) 杂散损耗  $p_s$

$$p_s = p_{sN} \left( \frac{U_N}{U} \right)^2 = 600 \left( \frac{380}{320} \right)^2 = 846 \text{ W}$$

(8) 总损耗  $\Sigma P$

$$\begin{aligned} \Sigma P &= p_m + P_{Fe} + P_{Cu1} + P_{Cu2} + p_s \\ &= 480 + 993 + 2520 + 2313 + 846 = 7152 \text{ W} \end{aligned}$$

(9) 额定总损耗  $\Sigma P_N$

$$\begin{aligned} \Sigma P_N &= p_{mN} + P_{FeN} + P_{Cu1N} + P_{Cu2N} + p_{sN} \\ &= 480 + 1400 + 2060 + 1640 + 600 = 6180 \text{ W} \end{aligned}$$

(10) 电动机效率  $\eta$

$$\begin{aligned} \eta &= \eta_N \left( \frac{P_N + \Sigma P_N}{P_N + \Sigma P} \right) = 0.9 \times \left( \frac{60 \times 10^3 + 6180}{60 \times 10^3 + 7152} \right) \\ &= 88.7\% \end{aligned}$$

(11) 功率因数  $\cos \varphi$

$$\cos \varphi = \frac{P_N + \Sigma P}{\sqrt{3} UI_1} = \frac{(60 + 7.152) \times 10^3}{\sqrt{3} \times 320 \times 128.7} = 0.942$$

(12) 电动机温升  $\theta$

$$\begin{aligned} \theta &= \theta_N \frac{0.47 P_{Fe} + P_{Cu1} + P_{Cu2} + p_s}{0.47 P_{FeN} + P_{Cu1N} + P_{Cu2N} + p_{sN}} \\ &= 80 \times \frac{0.47 \times 0.993 + 2.52 + 2.313 + 0.846}{0.47 \times 1.4 + 2.06 + 1.64 + 0.60} \\ &= 99.2^\circ \text{C} \end{aligned}$$

(13) 堵转转矩倍数  $T_{st}$

$$T_{st} = T_{stN} \left( \frac{U}{U_N} \right)^2 = 1.35 \left( \frac{320}{380} \right)^2 = 0.96 \text{ 倍}$$



(14)堵转电流倍数  $I_{Lr}$

$$I_{Lr} = I_{LN} \left( \frac{U}{U_N} \right) = 4.96 \left( \frac{320}{380} \right) = 4.2 \text{ 倍}$$

2.不在额定频率下运行的电动机引起性能变化的计算(三相电压额定,且三相平衡)

我国电源额定频率  $f_N$  为 50Hz,也称工频,三相异步电动机允许电源频率在  $\pm 1\%$  范围内变化,当频率超过允许范围时,对电动机的性能有影响,影响大小可按下列公式计算,即

(1)空载电流  $I_0'$

$$I_0' = I_0 \frac{1}{2.5f/f_N - 1.5} \quad (\text{A})$$

(2)满载电流  $I_1$

$$I_1 = \sqrt{(f/f_N)^2 (I_N^2 - I_0^2) + I_0'^2} \quad (\text{A})$$

(3)机械损耗  $P_m$

$$P_m = P_{mN} \frac{f}{2f_N - f} \quad (\text{W})$$

(4)铁损耗  $P_{Fe}$

$$P_{Fe} = P_{FeN} \frac{f_N}{2.5f - 1.5f_N} \quad (\text{W})$$

(5)定子铜耗  $P_{Cu1}$

$$P_{Cu1} = P_{Cu1N} \left( \frac{I_1}{I_N} \right)^2 \quad (\text{W})$$

(6)转子铜耗  $P_{Cu2}$

$$P_{Cu2} = P_{Cu2N} \left( \frac{f}{f_N} \right)^2 \quad (\text{W})$$

(7)杂散损耗  $P_s$

$$P_s = P_{sN} \left( \frac{f}{f_N} \right)^2 \quad (\text{W})$$

(8)总损耗  $\Sigma P$

$$\Sigma P = p_m + P_{Fe} + P_{Cu1} + P_{Cu2} + p \quad (W)$$

(9) 额定总损耗  $\Sigma P_N$

$$\Sigma P_N = p_{mN} + P_{FeN} + P_{Cu1N} + P_{Cu2N} + p_{jN} \quad (W)$$

(10) 电动机效率  $\eta$

$$\eta = \eta_N \frac{P_N + \Sigma P_N}{P_N + \Sigma P}$$

(11) 电动机功率因数  $\cos\varphi$

$$\cos\varphi = \frac{P_N + \Sigma P}{\sqrt{3} U_N I_1}$$

例3-96 一台JO2-82-6型40kW三相异步电动机, 已知  $U_N = 380V$ ,  $I_N = 73.8A$ ,  $I_0 = 24A$ ,  $\eta_N = 91\%$ ,  $\cos\varphi_N = 0.89$ ,  $P_{Cu1N} = 1173W$ ,  $P_{Cu2N} = 792W$ ,  $P_{FeN} = 936W$ ,  $p_{jN} = 220W$ ,  $p_{mN} = 280W$ , 实测电源频率为54Hz, 试求电源频率的改变对电动机性能的影响。

(1) 空载电流  $I_0'$

$$I_0' = I_0 \frac{1}{2.5j/f_N - 1.5} = 24 \times \frac{1}{2.5 \times 54/50 - 1.5} = 20A$$

(2) 满载电流  $I_1$

$$I_1 = \sqrt{(f/f_N)^2 (I_N^2 - I_0^2) + I_0'^2} = \sqrt{(54/50)^2 (73.8^2 - 24^2) + 20^2} = 78A$$

(3) 机械损耗  $p_m$

$$p_m = p_{mN} \frac{f}{2f_N - f} = 280 \times \frac{54}{2 \times 50 - 54} = 328.7W$$

(4) 铁损耗  $P_{Fe}$

$$P_{Fe} = P_{FeN} \frac{f_N}{2.5f - 1.5f_N} = 936 \times \frac{50}{2.5 \times 54 - 1.5 \times 50} = 780W$$

(5) 定子铜耗  $P_{Cu1}$

$$P_{Cu1} = P_{Cu1N} \left( \frac{I_1}{I_N} \right)^2 = 1173 \times \left( \frac{78}{73.5} \right)^2 = 1310.3 \text{ W}$$

(6) 转子铜耗  $P_{Cu2}$

$$P_{Cu2} = P_{Cu2N} \left( \frac{f}{f_N} \right)^2 = 792 \times \left( \frac{54}{50} \right)^2 = 923.8 \text{ W}$$

(7) 杂散损耗  $p_i$

$$p_i = p_{iN} (f/f_N)^2 = 220 \left( \frac{54}{50} \right)^2 = 256.6 \text{ W}$$

(8) 总损耗  $\Sigma P$

$$\begin{aligned} \Sigma P &= p_m + P_{Fe1} + P_{Cu1} + P_{Cu2} + p_i \\ &= 328.7 + 780 + 1310.3 + 923.8 + 256.6 \\ &= 3599.4 \text{ W} \end{aligned}$$

(9) 额定总损耗  $\Sigma P_N$

$$\begin{aligned} \Sigma P_N &= p_{mN} + P_{FeN} + P_{Cu1N} + P_{Cu2N} + p_{iN} \\ &= 280 + 936 + 1173 + 792 + 220 = 3401 \text{ W} \end{aligned}$$

(10) 电动机效率  $\eta$

$$\begin{aligned} \eta &= \eta_N \frac{P_N + \Sigma P_N}{P_N + \Sigma P} = 0.91 \times \frac{40 \times 10^3 + 3401}{10 \times 40^2 + 3599.4} \\ &= 0.906 \end{aligned}$$

(11) 电动机功率因数  $\cos \varphi$

$$\cos \varphi = \frac{P_N + \Sigma P}{\sqrt{3} U_N I_1} = \frac{40 \times 10^3 + 3599.4}{\sqrt{3} \times 380 \times 78} = 0.849$$

通过上面计算结果看出, 电源频率增加时, 引起电动机定子电流  $I_1$  增加 5.69%, 机械损耗增加 17.4%, 定子铜耗增加 11.7%, 转子铜耗增加 16.6%, 杂散损耗增加 16.60%, 虽然铁损耗降低 16.7%, 但总损耗增加 5.83%, 所以引起电动机效率降低 0.44%, 功率因数下降 4.61%。

### 3. 电源三相电压不对称对电动机性能影响计算

电源三相不对称的电压, 可分解成三相对称的正序分量和负序分量进行研究。

负序分量电压 $U_{\text{负}}$ 与正序分量电压 $U_{\text{N}}$ 的比值，称为电压不平衡率，即

$$\text{电压不平衡率} = \frac{U_{\text{负}}}{U_{\text{N}}} \times 100\% \approx \frac{U_{\text{max}} - U_{\text{min}}}{U_{\text{cp}}} \times 100\%$$

式中  $U_{\text{max}}$ ——最大电压 (V)；

$U_{\text{min}}$ ——最小电压 (V)；

$U_{\text{cp}}$ ——平均电压 (V)。

较小的负序电压会引起较大的负序电流，所以不可忽视负序电压的影响，负序电流产生负旋转磁场，产生负的机械功率，这意味着电动机轴上吸收一部分机械功率，所以增加电动机内部的附加损耗，除了增加铜损耗之外，还要增加电动机的附加铁损耗、杂散损耗等，使电机总损耗增加，电机效率降低，温升增高。因此不希望电源三相电压不对称。下面介绍电源电压不对称对电动机性能影响计算方法和例子。

(1) 实测出三相电压和电流 三相电压  $U_{\text{U1V1}}$ 、 $U_{\text{V1W1}}$ 、 $U_{\text{W1U1}}$  从中找出最大电压  $U_{\text{max}}$  和最小电压  $U_{\text{min}}$ ，三相电流  $I_{\text{U1}}$ 、 $I_{\text{V1}}$ 、 $I_{\text{W1}}$ 。

(2) 三相电压和电流的平均值 三相电压平均值为

$$U_{\text{cp}} = \frac{U_{\text{U1V1}} + U_{\text{V1W1}} + U_{\text{W1U1}}}{3}$$

三相电流平均值为

$$I_{\text{cp}} = \frac{I_{\text{U1}} + I_{\text{V1}} + I_{\text{W1}}}{3}$$

(3) 电压不平衡率及负序电压值 电压不平衡率为

$$\frac{U_{\text{负}}}{U_{\text{N}}} \times 100\% \approx \frac{U_{\text{max}} - U_{\text{min}}}{U_{\text{cp}}} \times 100\%$$

负序电压值为

$$U_{\text{负}} \approx \left( \frac{U_{\text{max}} - U_{\text{min}}}{U_{\text{cp}}} \right) U_{\text{N}}$$

(4) 负序电流与额定电流比值

$$\frac{I_{\text{序}}}{I_N} = k_i \frac{U_{\text{负}}}{U_N}$$

- 式中  $I_{\text{序}}$ ——负序电流 (A) ;  
 $U_{\text{负}}$ ——负序电压 (V) ;  
 $k_i$ ——堵转电流倍数,  $k_i = I_{\text{st}}/I_N$  ;  
 $I_{\text{st}}$ ——起动电流 (或堵转电流) (A) 。

(5) 定子铜耗  $P_{\text{Cu1}}$

$$P_{\text{Cu1}} = \left( \frac{I_{U1}^2 + I_{V1}^2 + I_{W1}^2}{3I_N^2} \right) P_{\text{Cu1N}}$$

(6) 铁耗  $P_{\text{Fe}}$

$$P_{\text{Fe}} = P_{\text{FeN}} \left( \frac{U_{\text{cp}}}{U_N} \right)^2 \left( 1 + \frac{I_{\text{负}}}{I_N} \right)$$

(7) 转子铜 (铝) 耗  $P_{\text{Al}^2}$

$$P_{\text{Al}^2} = P_{\text{Al}^2} \left( \frac{U_N}{U_{\text{cp}}} \right)^2 \left( 1 + \frac{I_{\text{负}}}{I_N} \right)^2$$

(8) 杂散损耗  $p_r$

$$p_r = p_{rN} \left( \frac{U_N}{U_{\text{cp}}} \right)^2 \left( 1 + \frac{I_{\text{负}}}{I_N} \right)^2$$

(9) 机械损耗  $p_m$  不变

(10) 总损耗  $\Sigma P$

$$\Sigma P = P_{\text{Cu1}} + P_{\text{Fe}} + P_{\text{Al}^2} + p_m + p_r$$

(11) 电机效率  $\eta$

$$\eta = P_N / (P_N + \Sigma P)$$

(12) 功率因数  $\cos\varphi$

$$\cos\varphi = \frac{P_N + \Sigma P}{\sqrt{3} U_{\text{cp}} I_{\text{cp}}}$$

**例3-97** 一台JO2-92-2型75kW三相异步电动机,  $U_N = 380$  V,  $I_N = 132.5$  A,  $\eta_N = 92.3\%$ ,  $\cos\varphi_N = 0.92$ ,  $k_i = 6.5$ 倍,  $P_{\text{Cu1N}} = 1583$  W,  $P_{\text{FeN}} = 1041$  W,  $P_{\text{Al}^2\text{N}} = 907$  W,  $p_{rN} = 409$  W,  $p_{mN} = 2300$  W。实测出三相电压  $U_{U1V1} = 368$  V,  $U_{V1W1} = 376$  V,  $U_{W1U1} =$

379V, 三相电流  $I_{U1} = 135A$ ,  $I_{V1} = 138A$ ,  $I_{W1} = 142V$ , 试计算三相电压不平衡对电动机性能的影响。

(1) 三相电压平均值  $U_{cp}$

$$U_{cp} = \frac{U_{U1V1} + U_{V1W1} + U_{W1U1}}{3} = \frac{368 + 376 + 379}{3} = 374V$$

其中最大电压  $U_{max} = 379V$ , 最小电压  $U_{min} = 368V$ 。

(2) 三相电流平均值  $I_{cp}$

$$I_{cp} = \frac{I_{U1} + I_{V1} + I_{W1}}{3} = \frac{135 + 138 + 142}{3} = 138.3A$$

$$(3) \frac{U_{\text{负}}}{U_N} \times 100\% = \frac{U_{max} - U_{min}}{U_{cp}} \times 100\% = \frac{379 - 368}{374} \times 100\%$$

$$100\% = 2.94\%$$

$$(4) \frac{I_{\text{负}}}{I_N} = k_i \frac{U_{\text{负}}}{U_N} = 6.5 \times 2.94\% = 18.9\%$$

(5) 定子铜损耗  $P_{Cu1}$

$$P_{Cu1} = \left( \frac{I_{U1}^2 + I_{V1}^2 + I_{W1}^2}{3I_N^2} \right) P_{Cu1N} \\ = \frac{135^2 + 138^2 + 142^2}{3 \times 132.5^2} \times 1583 = 1726W$$

(6) 铁损耗  $P_{Fe}$

$$P_{Fe} = P_{Fe0} \left( \frac{U_{cp}}{U_N} \right)^2 \left( 1 + \frac{I_{\text{负}}}{I_N} \right) \\ = 1041 \left( \frac{374}{380} \right)^2 (1 + 18.9\%) = 1199W$$

(7) 转子铝耗  $P_{Al}$

$$P_{Al} = P_{Al2} \left( \frac{U_N}{U_{cp}} \right)^2 \left( 1 + \frac{I_{\text{负}}}{I_N} \right)^2 \\ = 907 \left( \frac{380}{374} \right)^2 (1 + 18.9\%) = 1324W$$

(8) 杂散损耗  $p_s$

$$\begin{aligned}
 p_r &= p_{rN} \left( \frac{U_N}{U_{cp}} \right)^2 \left( 1 + \frac{I_{\text{负}}}{I_N} \right)^2 \\
 &= 409 \left( \frac{380}{374} \right)^2 (1 + 18.9\%)^2 = 597 \text{ W}
 \end{aligned}$$

(9) 机械损耗  $p_m = 2300 \text{ W}$ , 不变

(10) 总损耗  $\Sigma P$

$$\begin{aligned}
 \Sigma P &= P_{\text{Cu1}} + P_{\text{Fe}} + P_{\text{Al2}} + p_r + p_m \\
 &= 1726 + 1199 + 1324 + 597 + 2300 = 7144.2 \text{ W}
 \end{aligned}$$

(11) 电动机效率  $\eta$

$$\eta = P_N / P_N + \Sigma P = 75 / 75 + 7.1442 = 0.913$$

$$\begin{aligned}
 \text{效率降低率} &= \frac{\eta_N - \eta}{\eta_N} \times 100\% = \frac{0.923 - 0.913}{0.923} \times 100\% \\
 &= 1.08\%
 \end{aligned}$$

(12) 功率因数  $\cos\varphi$

$$\cos\varphi = \frac{P_N + \Sigma P}{\sqrt{3} U_{cp} I_{cp}} = \frac{75 \times 10^3 + 7144.2}{\sqrt{3} \times 374 \times 138.3} = 0.916$$

通过上例计算结果看出, 电源频率偏差过大时, 电动机损耗要增加 ( $\Sigma P - \Sigma P_N = 7144.2 - 6240 = 904.2 \text{ W}$ , 增加14.5%), 电动机效率降低率为1.08%, 使电动机性能变坏, 因此电动机标准中规定: 电动机电压的负序分量不应超过正序分量的1%, 同时还规定任一相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%。

### 十、更换合理电动机的节电计算

#### 1. 更换高效率电动机 (YX系列)

更换高效率电动机时要考虑:

- (1) 负载率不低于30%, 否则节电效果不大;
- (2) 年连续运行时间在3000h以上, 否则也是节电效果不大;
- (3) 不频繁起、制动。

国产高效率电动机 (YX系列), 100kW的效率达95.4%, 比普通三相异步电动机高4%左右, 每小时节电4kW·h, 如果

年连续运行5000h, 则一年节电量 $\Delta E$ 为

$$\Delta E = 4 \times 5000 = 20000 \text{ kW} \cdot \text{h}$$

电费按0.45元/kW·h计, 则一年节电费 $\xi$ 为

$$\xi = 20000 \text{ kW} \cdot \text{h} \times 0.45 \text{ 元/kW} \cdot \text{h} = 9000 \text{ 元}$$

购一台电动机需20000元, 则运行20000/9000 = 2.2年可回收投资。

**例3-98** 有一台55kW高效率三相异步电动机, 效率为94%, 比普通三相异步电动机的效率91.4%高出3%, 一台电动机售价11000元, 比普通电动机贵3500元, 电费按0.45元/kW·h计, 负载率为85%, 问此台电动机运行一年节多少电费, 运行多少年可收回购电机的费用。

一年运行的节电费 $\xi$ 为

$$\begin{aligned} \xi &= 55 \left( \frac{1}{0.914} - \frac{1}{0.94} \right) \times 5000 \times 0.45 \times 85\% \\ &= 3176.7 \text{ 元} \end{aligned}$$

比普通电动机多花出的钱回收期为

$$\frac{3500}{3176.7} = 1.1 \text{ 年, 一年多的时间可收回购新电动机多花的投资。}$$

又 
$$\frac{11000}{3176.7} = 3.46 \text{ 年}$$

即运行三年多便可偿还全部投资。

## 2. 淘汰老系列电动机节电计算

老系列电动机的运行比正常电动机多耗费许多电能, 更新换代后, 新购电机的投资可以在节省检修费和节约电费上补回。

**例3-99** 一台JO2-81-6型30kW三相异步电动机, 因运行年久, 实测铁损耗为730W, (出厂时655W), 实测总损耗 $\Sigma P = 2.83 \text{ kW}$  (出厂时为2.8kW), 此电动机共300台, 等效运行时间为10年, 问多耗费多少电费。

多耗费的电费 $\xi$ 为



$$\begin{aligned}\xi &= a(\Sigma P' - \Sigma P)T\beta \times 10 \times 300 \\ &= 0.45(2.88 - 2.8) \times 5000 \times 90\% \times 10 \times 300 \\ &= 48.6 \text{万元}\end{aligned}$$

式中  $a$ ——电费,  $a = 0.45 \text{元/kW} \cdot \text{h}$ ;  
 $\Sigma P'$ ——老电机总损耗 (kW);  
 $\Sigma P$ ——新购时电机的总损耗 (kW);  
 $T$ ——年运行时间,  $T = 5000 \text{h}$ ;  
 $\beta$ ——负载率,  $\beta = 90\%$ 。

例3-100 JS114-4型115kW 三相异步电动机,  $U_N = 380 \text{V}$ ,  $I_N = 214 \text{A}$ ,  $\eta_N = 91.7\%$ , 又知定子铜损耗  $P_{\text{Cu1}} = 4.34 \text{kW}$ , 转子铝耗  $P_{\text{Al}} = 2.26 \text{kW}$ , 铁耗  $P_{\text{Fe}} = 2.04 \text{kW}$ , 附加损耗  $P_f = 0.806 \text{kW}$ , 机械损耗  $p_m = 0.92 \text{kW}$ , 试求:

- (1) 电动机额定总损耗  $\Sigma P_N$ , 可变损耗  $P_{\text{vN}}$  和固定损耗  $P_0$ ;
- (2) 计算出不同负载率下的电动机效率是多少, 并判断此台电动机在负载率  $K = 40\%$  时, 是否“大马拉小车”。

(1) 电动机总损耗为

$$\begin{aligned}\Sigma P_N &= P_{\text{Cu1}} + P_{\text{Al}} + P_{\text{Fe}} + P_f + p_m \\ &= 4.34 + 2.26 + 2.04 + 0.806 + 0.92 \\ &= 10.366 \text{kW}\end{aligned}$$

可变损耗为

$$\begin{aligned}P_{\text{vN}} &= P_{\text{Cu1}} + P_{\text{Al}} + P_f = 4.34 + 2.26 + 0.806 \\ &= 7.406 \text{kW}\end{aligned}$$

固定损耗为

$$P_0 = P_{\text{Fe}} + p_m = 2.04 + 0.92 = 2.96 \text{kW}$$

已知

$$\eta = \frac{1}{1 + \frac{A}{K} + K\beta}, \text{ 将不同的负载率 } K \text{ 值}$$

代入此式, 便可计算出相应的效率, 即

$$A = P_0/P_N = \frac{2.96}{115} = 0.0257$$

$$\beta = P_{IN}/P_N = \frac{7.406}{115} = 0.0644$$

计算结果如表3-10所示。

表3-10  $K$ 与 $\eta$ 之关系

$K(\%)$	100	80	70	60	50	40	30	20	10
$\eta(\%)$	91.7	92.2	93.2	92.5	92.3	91.3	90.4	87.6	79

从表3-10中看出,当 $K = 40\%$ 时,电机效率等于额定效率,并不低,因此这台电动机并不是“大马拉小车”。

**例3-101** 有一台JS117-10型65kW三相异步电动机,  $U_N = 380\text{V}$ ,  $I_N = 132\text{A}$ ,  $\eta_N = 90.25\%$ ,  $P_{Cu1} = 2.76\text{kW}$ ,  $P_{Al} = 1.66\text{kW}$ ,  $P_{Fe} = 1.406\text{kW}$ ,  $P_f = 0.65\text{kW}$ ,  $p_m = 0.52\text{kW}$ 。此台电动机运行在负载率 $K = 30\%$ 范围内,是否“大马拉小车”,当电动机效率降低后,每年多浪费多少电费,已知电费0.4元/kW·h,年运行7000h。

总额定损耗为

$$\begin{aligned} \Sigma P_N &= P_{Cu1} + P_{Al} + P_{Fe} + P_f + p_m \\ &= 2.76 + 1.66 + 1.406 + 0.65 + 0.52 \\ &= 6.70\text{kW} \end{aligned}$$

可变损耗为

$$\begin{aligned} P_{IN} &= P_{Cu1} + P_{Al} + P_f = 2.76 + 1.66 + 0.65 \\ &= 5.10\text{kW} \end{aligned}$$

固定损耗为

$$P_0 = P_{Fe} + p_m = 1.406 + 0.52 = 1.926\text{kW}$$

$$A = P_0/P_N = \frac{1.406 + 0.52}{65} = 0.0296$$

$$\beta = P_{rN}/P_N = \frac{2.76 + 1.66 + 0.65}{65} = 0.078$$

$$\eta = \frac{1}{1 + \frac{A}{K} + K\beta} = \frac{1}{1 + \frac{0.0296}{K} + 0.078K}$$

将  $K = 30\%$  代入此式，可得电动机效率  $\eta$ ：

$$\begin{aligned} \eta &= \frac{1}{1 + \frac{0.0296}{30\%} + 0.078 \times 30\%} \\ &= \frac{1}{1 + 0.329 + 0.0234} \\ &= 73.9\% \end{aligned}$$

可见电动机效率很低，处于“大马拉小车”状态。

每年浪费电费  $\xi$  为

$$\begin{aligned} \xi &= \left( \frac{1}{\eta} - \frac{1}{\eta_N} \right) P_N K T a \\ &= \left( \frac{1}{0.739} - \frac{1}{0.9025} \right) 35 \times 30\% \times 7000 \times 0.4 \\ &= 13377 \text{元} \end{aligned}$$

式中  $a$ ——电费， $a = 0.4$  元/kW·h，

$T$ ——年运行小时， $T = 7000$ h。

有必要更换小容量电动机。

**例3-102** 有一台 JS128-4型300kW 三相异步电动机，负载率  $K = 40\%$ ，拟换以下电动机不知换哪一台较有利，JS126-4型225kW，JS117-4型180kW，JS127-4型260kW。它们的额定效率、损耗见表3-11。

已知负载率40%，所以此台电动机实际负载为  $P_2 = KP_N = 40\% \times 300 = 120$  kW，下面分别计算，计算结果列入表3-12中。

通过计算看出，原电动机负载率为40%时电动机效率并不低；如果更换另外三台中任一电动机时，电动机效率也不低是

表3-11 JS128-4、JS126-4、JS117-4、JS127-4电动机技术参数

	JS128-4 300kW	JS127-4 260kW	JS126-4 225kW	JS117-4 180kW
$P_{Cu1}$ (W)	5850	5710	5310	4760
$P_{\Delta 1}$ (W)	4630	4100	3480	2870
$P_{Vw}$ (W)	4160	3730	3310	2960
$P_f$ (W)	3000	2000	2250	1260
$P_m$ (W)	2400	2080	1800	1440
$\eta_N$ (%)	93.7	93.5	93.3	93
$\Sigma P_N$ (W)	20040	17620	16150	13290

可以的，但要考虑安装尺寸和新投入资金等问题。

如果是新选择电动机，当然要选择 JS114-4型180kW 为好，因为价格便宜，占地面积小。

### 十一、磁性槽泥节电计算

电机采用磁性槽泥（或磁性槽楔）代替普通绝缘槽楔时能使气隙磁场分布均匀，降低励磁功率，使输入功率和空载电流下降。又由于降低电动机铁心表面损耗和脉振损耗，使铁心杂耗降低，使电动机总损耗降低，电动机效率提高，延长电动机使用寿命。

国家规定淘汰的电机，如 J2、JO2等系列老型号电动机，通过磁性槽泥的改造可以达到延缓淘汰的时间，从而节省企业大量购置新电动机的投资。

电机改造后验收标准为：

(1) 额定负载时的效率提高值 $\Delta\eta_N$ ，满足下列不等式：

半闭口槽电机  $\Delta\eta_N \geq 0.42\%$ ；

半开口槽电机  $\Delta\eta_N \geq 0.5\%$ ；

表 3-12 四种型号电动机技术参数计算结果

	JS128-4 300kW	JS127-4 260kW	JS126-4 225kW	JS117-4 180kW
可变损耗 $P_{rN}(W)$	13480	11810	11040	8890
固定损耗 $P_0(W)$	6560	5810	5110	4490
负载率 $K = \frac{P_{r1}}{P_N} \times 100\%$	40%	46%	53%	66%
$A$ 值	0.0219	0.0224	0.0227	0.0244
$\beta$ 值	0.0449	0.0454	0.049	0.0494
电动机效率公式	$\eta = \frac{1}{1 + \frac{0.0219}{K} + 0.0449K}$	$\eta = \frac{1}{1 + \frac{0.0224}{K} + 0.0454K}$	$\eta = \frac{1}{1 + \frac{0.0227}{K} + 0.049K}$	$\eta = \frac{1}{1 + \frac{0.0244}{K} + 0.0494K}$
电动机实际效率 $\eta(\%)$	按 40% 代入, 得 $\eta = 93.2\%$ ( $\eta_N = 93.7\%$ )	按 46% 代入, 得 $\eta = 93.5\%$ ( $\eta_N = 93.3\%$ )	按 53% 代入, 得 $\eta = 93.5\%$ ( $\eta_N = 93.3\%$ )	按 66% 代入, 得 $\eta = 93.5\%$ ( $\eta_N = 93\%$ )
输入功率 $P_{r1} = 120 \times 10^3 + P_0 + K \cdot P_{rN}(kW)$	$P_{r1} = P_0 + P_0 + K \cdot P_{rN}$ $= 120 \times 10^3 + 6560$ $+ (40\%) \times 13480$ $= 128.72$	$P_{r1} = 120 \times 10^3 + 5810$ $+ (46\%) \times 11810$ $= 128.3$	$P_{r1} = 120 \times 10^3 + 5110$ $+ (53\%) \times 11040$ $= 128.2$	$P_{r1} = 120 \times 10^3 + 4490$ $+ (66\%) \times 8890$ $= 128.27$

开口槽电机  $\Delta\eta_N \geq 1.0\%$ 。

(2) 空载输入功率下降率  $\Delta P_0 \geq 10\%$ 。

(3) 改造试验数据齐全。

按空载试验结果进行节电计算

(1) 空载电流下降率  $\Delta I_0$ 。

$$\Delta I_0 = \frac{I_0 - I_0'}{I_0} \times 100\%$$

式中  $I_0$ 、 $I_0'$ ——电动机改造前后三相空载线电流平均值，试验电压应折算到同一电压值。

(2) 空载输入有功功率下降率  $\Delta P_0$ 。

$$\Delta P_0 = \frac{P_0 - P_0'}{P_0} \times 100\%$$

式中  $P_0$ 、 $P_0'$ ——电动机改造前后空载输入功率，试验电压应折算到同一电压值。

(3) 额定负载时效率提高值  $\Delta\eta_N$

$$\Delta\eta_N = \frac{P_{F0} - P'_{F0}}{P_N} \times 100\%$$

式中  $P_{F0}$ 、 $P'_{F0}$ ——电动机改造前后测出的铁耗。

(4) 年节电率  $\Delta A$

$$\Delta A = \frac{P_{F0} - P'_{F0}}{P_1} \times 100\%$$

式中  $P_1$ ——电动机口平均输入功率。

(5) 电动机改造后年节电量  $A$

$$A = (P_{F0} - P'_{F0})T$$

式中  $T$ ——电动机实际年运行小时 (h)

试验参数整理计算：

(1) 三相空载线电流平均值  $I_0$ 。

$$I_0 = \frac{I_{0U} + I_{0V} + I_{0W}}{3} \quad (A)$$

式中  $c_i$ ——电流表的表倍率,  $c_i = \frac{IK_i}{m_i}$ ,

$I$ ——电流表满量程;

$K_i$ ——电流互感器变比;

$m_i$ ——表面满刻度。

(2) 空载输入功率  $P_0$

$$P_0 = (P_1 - P_2)c_p (\text{W})$$

式中  $c_p$ ——功率表的表倍率,  $c_p = UI \cos \varphi \cdot K_U \cdot K_I / m_p$ ;

$U$ 、 $I$ ——功率表的电压、电流满量程;

$m_p$ ——表面满刻度;

$\cos \varphi$ ——功率表的功率因数标定值。

(3) 三相空载线电压平均值  $U_0$

$$U_0 = \frac{U_{UV} + U_{VW} + U_{WU}}{3} c_v$$

式中  $c_v$ ——仪表倍率,  $c_v = UK_U / m_v$ ;

$U$ ——电压表满量程;

$K_U$ ——电压互感器变比;

$m_v$ ——表面满刻度。

采用 D26-A 型电流表测量, 电流表满量程  $I = 5\text{A}$ , 表面满刻度  $m_i = 100$  格, 直接接入电路,  $K_i = 1$ , 则表倍率  $c_i$  为

$$c_i = \frac{IK_i}{m_i} = \frac{5 \times 1}{100} = 0.05 \text{A/格}$$

例3-103 采用 D34-W 功率表测量, 功率表电压  $U = 600\text{V}$ , 电流  $I = 10\text{A}$ , 功率因数标定值  $\cos \varphi = 0.2$ , 表面满刻度  $m_p = 150$  格, 仪表的电流, 电压线圈直接接入电路, 所以  $K_U = K_I = 1$ , 则表倍率  $c_p$  为

$$c_p = \frac{UI \cos \varphi K_U K_I}{m_p} = \frac{600 \times 10 \times 0.2 \times 1 \times 1}{150} = 3 \text{W/格}$$

例3-104 用 D26-V 型电压表进行测量, 已知仪表电压满量

程  $U = 600\text{V}$ , 表面满刻度  $m_v = 150$  格, 直接接入电路,  $I'_0 = 1$ , 则表倍率  $c_v$  为

$$c_v = \frac{UK_U}{m_v} = \frac{600 \times 1}{150} = 4\text{V/格}$$

**例3-105** 一台40kW三相异步电动机,  $U_N = 380\text{V}$ ,  $I_N = 73.6\text{A}$ ,  $\eta_N = 91\%$ ,  $\cos\varphi_N = 0.897$ 。做空载试验时, 测出空载输入功率平均值  $P_0 = 2.8\text{kW}$ , 空载线电流平均值  $I_0$  为 23.3A, 铁损耗  $P_{Fe} = 0.987\text{kW}$ , 采用磁性槽泥改造电动机后, 测出各技术参数分别为  $P'_0 = 2.1\text{kW}$ ,  $I'_0 = 21.6\text{A}$ ,  $P'_{Fe} = 0.81\text{kW}$ , 试计算空载电流下降率  $\Delta I_0$ , 空载输入功率下降率  $\Delta P_0$ , 额定负载时效率提高值  $\Delta\eta_N$ , 电动机改造后节电率  $\Delta A$ , 电动机改造后年节电量  $A$ , 按  $\Delta\eta_N$  值和  $P_0$  大小判断这台电动机改造后是否允许暂缓淘汰。

按试验数据, 计算如下:

$$(1) \Delta I_0 = \frac{I_0 - I'_0}{I_0} \times 100\% = \frac{23.3 - 21.6}{23.3} \times 100\% = 7.29\%$$

$$(2) \Delta P_0 = \frac{P_0 - P'_0}{P_0} \times 100\% = \frac{2.8 - 2.1}{2.8} \times 100\% = 25\%$$

$$(3) \Delta\eta_N = \frac{P_{Fe} - P'_{Fe}}{P_N} \times 100\% = \frac{0.987 - 0.81}{40} \times 100\% = 0.443\%$$

$$(4) \Delta A = \frac{P_{Fe} - P'_{Fe}}{P_1} \times 100\% = \frac{0.987 - 0.81}{38} \times 100\% = 0.466\%$$

式中  $P_1$ ——电动机日平均输入功率, 取  $38\text{kW}$ 。

$$(5) A = (P_{Fe} - P'_{Fe}) T = (0.987 - 0.81) \times 7000 = 1239\text{kW}\cdot\text{h}$$

式中  $T$ ——电动机实际年运行小时, 取  $7000\text{h}$ 。



(6) 该电动机为半闭口槽, 按计算出的  $\Delta\eta_N \geq 0.42\%$  规定值, 同时  $\Delta P_0 \geq 10\%$  满足要求, 所以允许此台电动机继续使用。

**例3-106** 一台300kW三相异步电动机, 开口槽高压电机,  $U_N = 3000\text{V}$ , 经空载试验, 涂磁性槽泥试验数据如下:  $P_0 = 14.4\text{kW}$ ,  $P_0' = 9\text{kW}$ ,  $I_0 = 16.3\text{A}$ ,  $I_0' = 13.1\text{A}$ ,  $I_N = 69.6\text{A}$ ,  $\eta_N = 92.9\%$ ,  $\cos\varphi_N = 0.894$ , 试求这台电动机经改造后的  $\Delta I_0$ 、 $\Delta P_0$ 、 $\Delta\eta_N$ 、 $\Delta A$ 、 $A$ , 并判断这台电动机改造后是否允许暂缓淘汰。

$$(1) \Delta I_0 = \frac{I_0 - I_0'}{I_0} \times 100\% = \frac{16.3 - 13.1}{16.3} \times 100\% \\ = 19.63\%$$

$$(2) \Delta P_0 = \frac{P_0 - P_0'}{P_0} \times 100\% = \frac{14.4 - 9}{14.4} \times 100\% \\ = 37.5\%$$

$$(3) \Delta\eta = \frac{P_{Fe}' - P_{Fe}}{P_N} \times 100\% \approx \frac{14.4 - 9}{300} \times 100\% \\ = 1.8\%$$

$$(4) \Delta A = \frac{P_{Fe} - P_{Fe}'}{P_1} \times 100\% \approx \frac{P_0 - P_0'}{P_1} \times 100\% \\ = \frac{14.4 - 9}{289} \times 100\% = 1.87\%$$

已知电动机日平均输入功率  $P_1$  为289kW。

$$(5) A = (P_{Fe} - P_{Fe}')T \approx (P_0 - P_0')T \\ = (14.4 - 9) \times 6800 = 36720\text{kW}\cdot\text{h}$$

已知电机年平均运行小时为6800h。

$$(6) \Delta\eta_N = 1.8\% > 1.0\% \\ \Delta P_0 > 10\%$$

可以暂缓淘汰。

#### 第四节 三相异步电动机应用计算

##### 一、三相异步电动机改电压计算

当电动机铭牌额定电压与实际电源电压不相符时, 需要改变

电动机的绕组电压以适应电源电压的要求，否则电动机无法正常运行。比如国外引进的低压电动机有440V、460V的，而国内电源电压是380V，因此要改变电动机的电压之后，才能投入电源上使用。

改变电动机绕组电压有两种方法，首先应考虑不动线圈，仅改变线圈端部接线方式来变更电机绕组的电压，比如原Y联结改接为△联结以适应电源的电压可降低 $\sqrt{3}$ 倍，比如原Y联结的

440V的三相电动机，线电压是440V，而相电压为 $\frac{440}{\sqrt{3}} = 254$

V，当改接△联结时，相电压就是线电压，所以这时适合的电源电压为254V，从而保证相绕组的每匝电压不变。再如改变每相绕组的并联支路数，也可成倍地改变电压，1路改2路接线时，电压降低一半，而电流增一倍，但每根导线内电流大小不变，所以保证了导线的电流密度不变。实际运用时是同时考虑上述两种改接方法。表3-13给出计算电压的电压比值表，只要先计算出两种线电压的比值 $\Delta u$ 的百分数（ $\Delta u\%$ ），然后按原绕组联结方式查表3-13，根据 $\Delta u\%$ 即可查出应该接出儿路连接来。在改接线时，要考虑电动机的极数，因为并联路数受电动机极数的限制，表3-14给出电动机各种极数所允许的并联支路数。

对于双层绕组最大并联支路数等于电机的极数，对于单层绕组最大并联支路数等于电机极数的一半。至于分数槽绕组的最大并联支路数还要受到线圈分配规律的限制。

**例3-107** 有一台三相异步电动机， $U_N = 6kV$ ，38极，1Y联结，欲改为660V电源上使用，问如何改接线。

由于6kV改为660V电源上使用，所以绝缘等级不存在问题。首先计算线电压比值，即

$$\Delta u\% = \frac{660}{6000} \times 100\% = 11\%$$

查表3-13得到11%的或接近的有1Y→9Y联结（11.1%），1Y→5△联结（11.5%）。

表3-13 三相绕组改变联结的电压比 ( $\Delta U\%$ )

原绕组联结	改后的联结														
	1 Y 联结	2 Y 联结	3 Y 联结	4 Y 联结	5 Y 联结	6 Y 联结	7 Y 联结	8 Y 联结	9 Y 联结	10 Y 联结	11 Y 联结	12 Y 联结	13 Y 联结	14 Y 联结	15 Y 联结
1 Y 联结	100	50	33.3	25	20	16.7	14.3	12.5	11.1	10	9.1	8.3	7.7	7.1	6.67
2 Y 联结	200	100	66.7	50	40	33.3	28.6	25	22.2	20	18.2	16.7	15.4	14.3	13.3
3 Y 联结	300	150	100	75	60	50	42.9	37.5	33.3	30	27.3	25	23.1	21.4	20
4 Y 联结	400	200	133.3	100	80	66.7	57.1	50	44.4	40	36.4	33.3	30.8	28.6	26.7
5 Y 联结	500	250	166.7	125	100	83.3	71.4	62.5	55.6	50	45.5	41.7	38.5	35.7	33.3
6 Y 联结	600	300	200	150	120	100	85.7	75	66.7	60	54.5	50	46.2	42.9	40
7 Y 联结	700	350	233.3	175	140	116.7	100	87.5	77.8	70	63.6	58.3	53.8	50	46.7
8 Y 联结	800	400	267	200	160	133.3	114.3	100	88.9	80	72.7	66.7	61.5	57.1	53.3
9 Y 联结	900	450	300	225	180	150	128.6	112.5	100	90	81.8	75	69.2	64.3	60
10 Y 联结	1000	500	333	250	200	166.7	142.9	125	111.1	100	90.9	83.3	76.9	71.4	66.7
11 Y 联结	1100	550	366.9	275	220	183.3	157.1	137.5	122.2	110	100	91.7	84.6	78.6	73.3
12 Y 联结	1200	600	400	300	240	200	171.4	150	133.3	120	109	100	92.3	85.7	80
13 Y 联结	1300	650	433.3	325	260	216.7	165.7	162.5	144.4	130	118.2	108.3	100	92.8	86.7
14 Y 联结	1400	700	466.7	350	280	233.3	200	175	155.6	140	127.3	116.7	107.7	100	93.3
15 Y 联结	1500	750	500	375	300	250	214.3	187.5	166.7	150	136.4	125	115.4	107.1	100

(续)

原绕组联结	改后的联结	1△联结	2△联结	3△联结	4△联结	5△联结	6△联结	7△联结	8△联结	9△联结	10△联结	11△联结	12△联结	13△联结	14△联结	15△联结
1 Y联结	1 Y联结	57.7	28.5	19.2	14.4	11.5	9.6	8.2	7	6.4	5.8	5.2	4.8	4.4	4.12	3.85
2 Y联结	2 Y联结	115.5	57.7	38.5	28.9	23.1	19.3	16.5	14.4	12.8	11	10.5	9.6	8.9	8.3	7.7
3 Y联结	3 Y联结	173.2	86.6	57.7	43.3	34.6	29	24.7	21.7	19.2	17.3	15.7	14.4	13.3	12.4	11.5
4 Y联结	4 Y联结	231	115.5	77	57.8	46	38.5	33	29	25.7	23.1	21	19.3	17.8	16.5	15.4
5 Y联结	5 Y联结	288.9	144.3	96.3	72.2	57.8	48.2	41.3	36.1	32.1	28.9	26.3	24	22.2	20.6	19.3
6 Y联结	6 Y联结	346.4	173.2	115.5	86.6	69.3	57.7	49.5	43.3	38.5	35	31.5	28.9	26.6	24.7	23.1
7 Y联结	7 Y联结	404.2	202	134.7	101.5	80.9	67.4	57.8	50.6	44.9	40.4	36.8	33.7	31.1	28.9	26.9
8 Y联结	8 Y联结	461.9	230.9	154	115.5	98.4	77	66	57.7	51.3	46.2	42	38.5	35.5	33	30.8
9 Y联结	9 Y联结	519.6	259.8	173.2	129.9	103.9	86.6	74.2	65	57.7	52	47.2	43.3	40	37.1	34.6
10 Y联结	10 Y联结	577.4	288.7	192.5	144.4	115.5	96.2	82.5	72.2	64.2	57.7	52.5	48.1	44.4	41.2	38.5
11 Y联结	11 Y联结	635.1	317.6	211.7	158.8	127	106	70.7	79.4	70.6	63.5	57.7	52.9	48.8	45.5	42.3
12 Y联结	12 Y联结	692.8	346.4	230.9	173.2	126.6	115.5	99	86.6	79	69.3	63	57.7	53.3	49.5	46.2
13 Y联结	13 Y联结	750.6	375.3	250.2	187.7	150.1	125.1	107.1	93.8	83.4	75.1	68.2	62.6	57.7	53.6	50
14 Y联结	14 Y联结	807.8	399	268.8	201.6	161	134.4	114.8	98	89.6	81.2	72.8	67.2	61.6	57.7	53.9
15 Y联结	15 Y联结	865.7	427.5	288	216	172.5	144	129	105	96	87	78	72	66	61.8	57.8



(续)

原绕组联结	改后的联结														
	1△联结	2△联结	3△联结	4△联结	5△联结	6△联结	7△联结	8△联结	9△联结	10△联结	11△联结	12△联结	13△联结	14△联结	15△联结
1△联结	100	50	33.3	25	20	16.7	14.5	12.5	11.1	10	9.1	8.3	7.7	7.1	6.67
2△联结	200	100	66.7	50	40	33.3	28.6	25	22.2	20	18.2	16.3	15.4	14.3	13.3
3△联结	300	150	100	75	60	50	42.9	37.5	33.3	30	27.3	25	23.1	21.4	20
4△联结	400	200	133.3	100	80	66.7	57.1	50	44.4	40	36.4	33.3	30.8	28.6	26.7
5△联结	500	250	166.7	125	100	83.3	71.4	62.5	55.6	50	45.5	41.7	38.3	35.7	33.3
6△联结	600	300	200	150	120	100	85.7	75	66.7	60	54.5	50	46.2	42.9	40
7△联结	700	350	233.3	175	140	116.7	100	87.5	77.8	70	63.6	58.3	53.3	50	46.7
8△联结	800	400	267	200	160	133.3	114.3	100	88.9	80	72.7	66.7	61.5	57.1	53.3
9△联结	900	450	300	225	180	150	128.6	112.5	100	90	81.8	75	69.2	64.3	60
10△联结	1000	500	333	250	200	166.7	142.9	125	111.1	100	90.9	83.3	76.9	71.4	66.7
11△联结	1100	550	366.9	275	220	183.3	157.1	137.5	122.2	110	100	91.7	84.5	78.6	73.3
12△联结	1200	600	400	300	240	200	171.4	150	133.3	120	109	100	92.3	85.7	80
13△联结	1300	650	433.3	325	260	216.7	185.7	162.5	144.4	130	118.2	108.3	100	92.9	86.7
14△联结	1400	700	466.7	350	280	233.3	200	175	155.6	140	127.3	116.7	107.7	100	93.3
15△联结	1500	750	500	375	300	250	214.3	187.5	166.7	150	136.3	125	115.4	107.1	100

表3-14 各种极数下所允许的并联支路数 (双层绕组)

电动机极数	2	4	6	8	10	12	14	16
可能并联的支路数	1	1	1	1	1	1,2	1	1,2
		2	2	2	2	3,4	2	4,8
			3	4	5		7	
	2	4	6	8	10	6,12	14	16
电动机极数	18	20	22	24	26	28	30	
可能并联的支路数	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	
	3,6	4,5	11	4,6	13	4,7	3,5	
	9	10		8,12		14		
	18	20	22	24	26	28	15,30	

由于电动机极数是18极，查表3-14，只能接出1、2、3、6、9、18路，接不出5路，所以采用9Y联结，这时电压差绝对值百分数为

$$\left| \frac{\Delta u' - \Delta u}{\Delta u} \right| \times 100\% = \left| \frac{11.1 - 11}{11} \right| \times 100\% = 0.91\% < 5\%$$

只要小于5%是可以使用的。

**例3-108** 有一台额定电压为10000V的三相异步电动机，26极，1Y联结，现欲改为440V电网上使用，问能否改接，如何改接。

高压改低压使用，所以绝缘问题不必考虑。其线电压的比值为

$$\Delta u\% = \frac{440}{10000} \times 100\% = 4.4\%$$

查表3-13得出1Y改13Δ联结 ( $\Delta u = 4.4\%$ )，查表3-14知26极可能的并联支路数有：1、2、13、26，因此可以改接为13路。

**例3-109** 有一台3kV、22极三相异步电动机，1△联结，现欲改在460V电源上使用，问如何改接。

线电压的比值为

$$\Delta u \% = \frac{460}{3000} \times 100 \% = 15.3 \%$$

查表3-13得到1△→11Y联结(Δu' % = 15.7 %)，由于原电机极数为22极，可以接出11路并联，其电压差绝对值的百分数为

$$\left| \frac{\Delta u' - \Delta u}{\Delta u} \right| \times 100 \% = \left| \frac{15.7 - 15.3}{15.7} \right| \times 100 \% \\ = 2.5 \% < 5 \%$$

**例3-110** 有一台TK250-14/1180型250kW三相同步电动机  $U_N = 6kV$ ，14极，欲改在380V的电源上使用，问能否改接成功，都有哪些改接方案？

线电压比值为

$$\Delta u \% = \frac{380}{6000} \times 100 \% = 6.33 \%$$

查表有：

(1) 1Y→9△ Δu' % = 6.4 %；

(2) 1Y→14Y Δu' % = 7.1 %。

对于1Y联结改9△时行不通，因为14极，接不出9路并联；对于1Y联结改14Y，电压差为

$$\left| \frac{\Delta u' - \Delta u}{\Delta u} \right| \times 100 \% = \left| \frac{7.1 - 6.33}{6.33} \right| \times 100 \% \\ = 12.16 \% > 5 \%$$

正常情况下是不允许的，所以要具体研究。

现分析如下：

(1) 电动机原接线方式不知道，如果是1Y联结时，1Y改为9△联结时适应的电源电压为  $\frac{6000}{9\sqrt{3}} = 384.9V$ ，实际电源电压为



380V, 所以电动机相当于欠电压运行, 如果拖动的负载较小, 是可以改接的, 但因受电机极数限制, 不能接出 9 路并联。

(2) 如果 1Y 联结改 14Y 时, 适合的电压为  $6000/14 = 428.6$  V, 离 380V 的电源电压太远, 不太合适但对于轻载负载, 负载率较低 (比如 60%), 通过其他方面计算也有使用的可能。

(3) 如果 1Δ 联结改 14Δ 时, 分析同上。

(4) 如果原来是 2Y 联结, 现改为 14Δ 联结时, 则适合的电源电压为  $\frac{6000}{14/2 \times \sqrt{3}} = 495$  V, 可能性太小了, 尤其负载率较高时, 根本不能用。

从上面分析看出, 只有原绕组是 1Y 联结时, 改接的可能较大, 但要考虑极数限制。

如果改接不成功, 就要进行重绕线圈了, 也就是把原有的所有线圈去掉, 重新设计新线圈。对于低压改高压时, 即使能改接成功, 由于绝缘水平不能满足高压的要求, 也只好重绕。

重绕计算如下:

(1) 改后的每槽匝数

$$N' = N \frac{U'}{U}$$

式中  $N, N'$  —— 改接前、后的每槽匝数;

$U, U'$  —— 改接前、后的电动机额定电压 (V)。

(2) 改后的导线截面积

$$S' = S \frac{U}{U'} \quad (\text{mm}^2)$$

式中  $S, S'$  —— 改接前、后的导线截面积 ( $\text{mm}^2$ )。

例 3-111 一台 Y180M-4 型 18.5 kW 三相异步电动机, 已知为 Δ 联结, 线规为 1—φ1.18 (mm), 每槽线数 58, 双层叠绕, 所以每线圈 29 匝, 380V, 欲使用在 420V 电源上, 问如何重绕?

改后线圈的匝数为

$$N' = N \cdot \frac{U'}{U} = 29 \times \frac{420}{380} = 32 \text{匝}$$

改后导线截面积为

$$S' = S \cdot \frac{U}{U'} = 1.094 \times \frac{380}{420} = 0.989 \text{mm}^2$$

$$S = \frac{\pi d^2}{4} = \frac{\pi \times 1.18^2}{4} = 1.094 \text{mm}^2$$

$$d' = \sqrt{\frac{4S'}{\pi}} = \sqrt{\frac{4 \times 0.989}{\pi}} = 1.12 \text{mm}$$

对于按正常改接方法（如上述 $\Delta$ 、 $\Upsilon$ 和并联支路数改变的方法）行不通时，有时采用延边三角形改接方法也能凑效，如1 $\Upsilon$ 联结500V的老系列三相异步电动机，现欲使用在380V电源上，如果按上述联结方法求出电压比 $\Delta u\% = 76\%$ ，在表中查不到合适的电压比，只好进行重绕，需要花费许多工时和材料，如果把这台电动机绕组改接成延边三角形（注意，不是 $30^\circ$ 相带的正弦绕组）接线，就可避免重绕，在85%负载以下能够使用在380V电源上了。

计算时，也是首先算出线电压的比值 $\Delta u\%$ ，然后查表3-15，找出接近的 $\Delta u\%$ 值，便可在表内查出所需的联结方式。

**例3-112** 有一台三相异步电动机，额定电压500V，4极，1 $\Upsilon$ 联结，欲使用在380V电源上，负载率为80%，问如何改接。

线电压的比为

$$\begin{aligned} \Delta u\% &= \frac{U'}{U} \times 100\% = \frac{380}{500} \times 100\% \\ &= 76\% \end{aligned}$$

查表3-15，得出相近的有78.9%。

每相线圈有一半匝数接成 $\Upsilon$ ，另一半匝数接成 $\Delta$ ，从而构成了 $\Upsilon$ 联结和 $\Delta$ 联结，即延边三角形 $\Delta$ 的联结。两部抽头为1:1的一路 $\Delta$ 接线。

表3-15 绕组改接抽头为1:1的 $\Delta$ 联结时电压比值 $\Delta u\%$

原联结 $\Delta u\%$ 新联结	一路Y联结	二路Y联结	三路Y联结	四路Y联结	五路Y联结	六路Y联结	八路Y联结	十路Y联结
	一路 $\Delta$ 联结	0.789	1.58	2.37	3.16	3.94	4.74	6.31
二路 $\Delta$ 联结	0.395	0.789	1.18	1.58	1.97	2.37	3.16	3.95
三路 $\Delta$ 联结	0.263	0.576	0.789	1.05	1.31	1.58	2.11	2.63
四路 $\Delta$ 联结	0.197	0.395	0.582	0.789	0.981	1.18	1.58	1.97
五路 $\Delta$ 联结	0.158	0.316	0.474	0.632	0.789	0.949	1.26	1.58
六路 $\Delta$ 联结	0.132	0.263	0.394	0.526	0.656	0.789	1.05	1.31
八路 $\Delta$ 联结	0.0986	0.197	0.296	0.395	0.493	0.593	0.789	0.986
十路 $\Delta$ 联结	0.0789	0.158	0.237	0.316	0.395	0.474	0.631	0.789

原联结 $\Delta u\%$ 新联结	一路 $\Delta$ 联结	二路 $\Delta$ 联结	三路 $\Delta$ 联结	四路 $\Delta$ 联结	五路 $\Delta$ 联结	六路 $\Delta$ 联结	八路 $\Delta$ 联结	十路 $\Delta$ 联结
	一路 $\Delta$ 联结	1.366	2.732	4.09	5.46	6.82	8.19	10.91
二路 $\Delta$ 联结	0.683	1.364	2.045	2.73	3.41	4.09	5.46	6.83
三路 $\Delta$ 联结	0.451	0.91	1.364	1.82	2.27	2.73	3.64	4.55
四路 $\Delta$ 联结	0.341	0.682	1.03	1.76	1.71	2.94	2.73	3.41
五路 $\Delta$ 联结	0.273	0.546	0.22	1.09	1.364	1.14	2.13	2.73
六路 $\Delta$ 联结	0.228	0.455	0.632	0.91	1.14	1.36	1.82	2.28
八路 $\Delta$ 联结	0.171	0.342	0.512	0.683	0.853	1.03	1.36	1.71
十路 $\Delta$ 联结	0.136	0.273	0.409	0.546	0.682	0.819	1.09	1.36

## 二、改接绕组联结方式适应电源电压变化的计算

现举例说明改接绕组改变匝数适应电源电压的原理，如某电动机一相绕组匝数  $N_s$  为100匝，相电压  $U_s$  是100V。当相电压增加10%（即110V）时，为了保持电动机磁通密度  $B_s$  不变（如果变了，电动机性能也变了），应使  $U_s/N_s$  不变，所以每相绕组

匝数  $N_s$  也应增加10%，事实上改接时线圈是不动的，仅改变绕组端部接线方式，因此这时原线圈的匝数不够了。也就是现有匝数为应有匝数的90.9%，即缺少9.1匝。同理，当相电压减少10%，即90V，为保持  $B_s$  不变，现有绕组的匝数为90即可，可实际上是100匝不变，所以现有的实际匝数多了，相当于111.1%，即多11.1匝。改接绕组的目的是千方百计改变这些不适应的匝数。

### 1. Y- $\Delta$ 改接计算

设有一台额定电压为3kV的电动机，电源实际电压为3450V。在相同负载条件下，电压增高后，电机输入功率要增加，如果将原来的2Y联结绕组改接为1 $\Delta$ ，则电动机绕组所适应的电压为  $6000 / \sqrt{3} = 3460\text{V}$ ，接近3450V。所以改接后电动机可以使用3450V电源，从而保持磁通密度基本不变。为了查阅方便，可直接在表3-16上查取。首先计算出线电压比值  $\xi_v$ ，即

$$\xi_v = \frac{U'}{U} = \frac{3450}{3000} = 1.15$$

按计算出的  $\xi_v = 1.15$  和原绕组接线查表3-16，可得到6种改接绕组方案：（1）4Y改2 $\Delta$ ；（2）2Y改1 $\Delta$ ；（3）6Y改3 $\Delta$ ；（4）4 $\Delta$ 改6Y；（5）3 $\Delta$ 改4Y；（6）2 $\Delta$ 改3Y。

至于选择哪个改接方案，要看原绕组接线方式和电机的极数。

### 2. Y、 $\Delta$ 、 $\Delta$ 改接计算

#### （1）Y改 $\Delta$ 联结的计算

例3-113 有一台电动机绕组为1Y联结，线电压为380V，现欲改接为抽头1:1的延边三角形联结，问改接后的绕组所适应的电源电压是多少。

将原绕组的每相匝数分成相等两部分，一半匝数作为 $\Delta$ 形的Y联结部分，剩下的一半匝数作为 $\Delta$ 形的 $\Delta$ 联结部分。设每相绕组匝数为  $N_s$ ，则 $\Delta$ 形的Y部和 $\Delta$ 部的每相绕组匝数各等于  $N_s/2$ 。要保持电机  $B_s$  不变，则要保持每匝电压不变，对于 $\Delta$ 联结

表3-16 三相异步电动机改接绕组的电压系数 $k$

原绕组联结	改后绕组联结															
	一路Y联结	二路Y联结	三路Y联结	四路Y联结	五路Y联结	六路Y联结	八路Y联结	十路Y联结	一路△联结	二路△联结	三路△联结	四路△联结	五路△联结	六路△联结	八路△联结	十路△联结
一路Y联结	—	0.50	0.33	0.25	—	—	—	—	0.58	0.29	—	—	—	—	—	—
二路Y联结	—	—	0.67	0.50	0.40	0.33	—	—	1.16	0.68	0.39	0.29	—	—	—	—
三路Y联结	—	1.50	—	0.75	0.60	0.50	0.38	0.30	1.73	0.87	0.58	0.48	—	0.29	—	—
四路Y联结	—	—	1.33	—	0.80	0.67	0.50	0.40	—	1.16	0.77	0.58	0.46	0.39	—	—
五路Y联结	—	—	1.67	1.25	—	0.83	0.63	0.50	—	1.44	0.96	0.72	0.58	0.48	—	—
六路Y联结	—	—	—	1.50	1.20	—	0.75	0.60	—	1.73	1.15	0.87	0.69	0.58	0.43	—
八路Y联结	—	—	—	—	1.60	1.33	—	0.80	—	—	1.37	1.20	0.95	0.79	0.58	0.46
十路Y联结	—	—	—	—	—	1.67	1.25	—	—	—	1.90	1.50	1.20	—	0.72	0.58

(续)

改后绕组 联结	原绕组联结																	
	一路Y联结	二路Y联结	三路Y联结	四路Y联结	五路Y联结	六路Y联结	八路Y联结	九路Y联结	十路Y联结	一路△联结	二路△联结	三路△联结	四路△联结	五路△联结	六路△联结	八路△联结	九路△联结	十路△联结
一路△联结	1.73	0.86	0.58	0.48	0.35	0.29	—	—	—	1.50	0.33	0.25	—	—	—	—	—	—
二路△联结	—	1.73	1.15	0.87	0.69	0.56	0.43	—	—	—	0.67	0.50	0.40	0.33	—	—	—	—
三路△联结	—	—	1.73	1.15	1.04	0.87	0.65	0.52	—	0.50	—	0.75	0.60	0.50	0.38	0.30	—	—
四路△联结	—	—	—	1.73	1.38	1.15	0.86	0.69	—	—	1.33	—	0.80	0.67	0.50	0.40	—	—
五路△联结	—	—	—	—	1.73	1.44	1.18	0.86	—	—	1.67	1.25	—	0.83	0.63	0.50	—	—
六路△联结	—	—	—	—	—	1.73	1.30	1.04	—	—	—	1.50	1.20	—	0.75	0.60	—	—
八路△联结	—	—	—	—	—	—	1.73	1.33	—	—	—	—	1.60	1.33	—	0.80	—	—
十路△联结	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	1.67	1.25	—	—	—

的Y联结部分每相匝数为  $N_p/2$ ，所以相应的相电压为110V，而A形的 $\Delta$ 联结部分相应的相电压为  $220/(2 \times \sqrt{3}) = 63.5V$ ，因此A形的相电压为  $110 + 63.5 = 173.5V$ 。A的线电压即为  $\sqrt{3} \times 173.5 \approx 300V$ 。上述关系的联结，如图3-14所示。

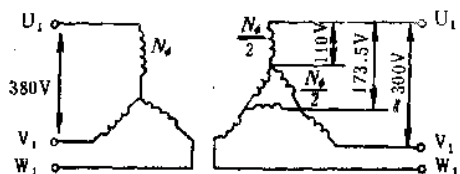


图3-14 Y联结改 $\Delta$ 联结

按照上述的道理，也可推广到多路Y联结改A形的计算，如图3-15是两路Y形联结，每相匝数为  $N_p$ ，改成一路 $\Delta$ 后，相电压变为347V，线电压为600V左右。

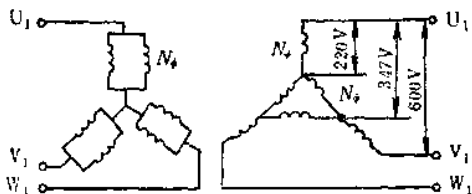


图3-15 2Y联结改 $\Delta$ 联结

### (2) $\Delta$ 改A联结计算

**例3-114** 有一台电动机绕组为 $\Delta$ 联结，电压为380V，改接A后，求绕组所适应的电源电压。

如图5-16所示，首先把 $\Delta$ 联结改成Y联结。相电压不变，仍为380V，而Y联结的线电压为658V，再把Y联结改为A联结，计算同前所述。就是将  $N_p/2$  给A形的Y联结部分，相应的相电压为190V，剩下的  $N_p/2$  给 $\Delta$ 联结部分。所以 $\Delta$ 联结部分相电压为  $190/\sqrt{3} = 109.6V$ ，因此A形的相电压为  $190 + 109.6 = 299.6V$ ，而A形的线电压为  $\sqrt{3} \times 299.6 = 519V$ 。

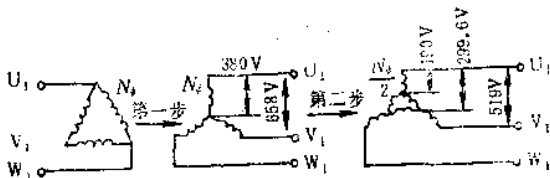


图3-16 Δ联结改Y联结

三种联结的相电压关系为

$$\Delta : Y : \Delta = 1.31 : 0.74 : 1$$

三种联结的线电压关系为

$$\Delta : Y : \Delta = 1 : \sqrt{3} : 1.36$$

例3-115 有一台 J2-82-2型75kW 三相异步电动机，额定电压380V，Δ联结，额定效率为92.7%，实际输出功率为40kW，则负载率只有53.3%，属于大马拉小车，实测效率只达到72%，因此想改接为Y形以降低电动机容量，提高电动机运行效率。

由上面推导出Δ联结与Y联结的关系是1:1.36关系，也就是说Δ联结绕组改接成Y联结时，绕组所适应的电源电压为1.36×380=518.3V，所以改接后仍使用在380V电源上时，电动机容量降低约为 $\left(\frac{380}{518.3}\right)^2 \times 75 = 40.3\text{kW}$ ，也就是这台电机容量降到40.3kW，与负载40kW大小相适应，实测改接后电机的效率提升至90%。

未改绕组前电动机由电源吸收的功率 $P_1$ 为

$$P_1 = \frac{P_2}{\eta} = \frac{40}{0.72} = 55.56\text{kW}$$

式中  $P_2$ ——电动机实际输出功率(kW)。

改Y联结后电机由电源吸收的输入功率 $P_1'$ 为

$$P_1' = \frac{P_2}{\eta'} = \frac{40}{0.9} = 44.4\text{kW}$$

### 三、圆导线代用计算



导线代用原则是保持导线电流密度和绕组每匝电压基本不变。使电动机导线代用之后性能保持不变，通常有以下几种代用方法：

### 1. 绕组形式和联结方式不变的代用法

用几根细导线代替原有的一根导线或相反的代用，这时只要保持代用前后导线总截面积相等即可。比如用一根导线代替两根导线时，则代用的单根导线截面积为

$$S = S_1 + S_2 \quad \text{或} \quad d^2 = d_1^2 + d_2^2$$

式中  $S_1, S_2$ ——被代用的导线截面积 ( $\text{mm}^2$ )，

$d_1, d_2$ ——被代用导线的直径 ( $\text{mm}$ )。

如果用相同直径的数根导线代用时，则有以下关系：

两根相同的代用导线线径  $d_1$  与原导线线径  $d$  的关系为

$$d = 1.41d_1$$

三根时为

$$d = 1.73d_1$$

四根时为

$$d = 2d_1$$

五根时为

$$d = 2.24d_1$$

并绕导线的根数不要太多，以防槽满率太大。

如果用铜导线代替铝导线时，线径关系如下：

$$d_{\text{铜}} = 0.8d_{\text{铝}}$$

式中  $d_{\text{铜}}$ ——铜导线直径 ( $\text{mm}$ )；

$d_{\text{铝}}$ ——铝导线直径 ( $\text{mm}$ )。

### 2. 改变绕组联结方式时的代用法

在保持电源电压不变条件下，为了维持绕组在改接后每匝电压和电流密度不变，当Y联结绕组改为△联结时，线圈的匝数要增加 $\sqrt{3}$ 倍，导线截面积要减少 $\sqrt{3}$ 倍（绕组形式和并绕根数不变时）；反之，当△联结改Y联结时，线圈匝数要减少 $\sqrt{3}$ 倍，而导线截面积增加 $\sqrt{3}$ 倍，即

(1) 丫联结改△联结

$$N_{\Delta} = \sqrt{3} N_Y$$

$$S_{\Delta} = \frac{1}{\sqrt{3}} S_Y \quad \text{或} \quad d_{\Delta} = 0.76 d_Y$$

式中  $N_{\Delta}, N_Y$ ——分别表示△联结和丫联结时的每个线圈匝数；  
 $S_{\Delta}, S_Y$ ——分别表示△联结和丫联结时导线截面积 ( $\text{mm}^2$ )；

$d_Y, d_{\Delta}$ ——分别表示△联结和丫联结时导线线径 ( $\text{mm}$ )。

(2) 当△联结改丫联结

$$N_Y = \frac{1}{\sqrt{3}} N_{\Delta}$$

$$S_Y = \sqrt{3} S_{\Delta} \quad \text{或} \quad d_Y = 1.32 d_{\Delta}$$

3. 改变每相绕组的并联支路数

为了扩大导线代用范围，还可以改变每相绕组的并联支路数。设原绕组并联支路数为  $a$ 、导线直径为  $d$ 、并绕根数为  $N$ ，改接后分别为  $a'$ 、 $d'$ 、 $N'$ ，则有以下换算关系：

$$aNd^2 = a'N'd'^2$$

如前所述， $a$  受电机极数限制，在改接时要考虑到。

在具体计算导线代用料时，可以同时采用上述各种方法。也就是并绕根数、并联支路数和绕线联结方式同时改变。但这时要考虑以下问题：

(1) 电机起动方法，如果是丫、△起动，正常运行时是△联结，改成丫联结就受限制；

(2) 槽口尺寸，能容纳较粗导线；

(3) 槽满率，并绕根数太多，槽满率太高时容纳不下线圈匝数等。

例3-116 某台电机的线圈导线直径  $\phi 1.5\text{mm}$ ，想采用代用导线，问代用导线如何计算。

首先考虑用两根直径相同的导线代用，原线圈导线  $\phi 1.5\text{mm}$  的截面积为  $1.767\text{mm}^2$ ，当用两根相同直径导线  $d_1$  代替时， $d_1$  大

小为

$$d_1 = \frac{d}{1.41} = \frac{1.5}{1.41} = 1.06, \text{查导线线规有} 1.08, \text{所以选用}$$

两根  $\phi 1.08\text{mm}$  导线代替原  $\phi 1.5\text{mm}$  导线, 这时导线截面积为  $2 \times 0.882 = 1.765\text{mm}^2$  与原导线截面积  $1.767$  接近。

如果库内无有  $\phi 1.08$  的导线, 那么要采用不相同直径的导线代用, 有以下几种方法:

(1)  $\phi 0.53$  和  $\phi 1.40$  并绕, 代替  $\phi 1.5$  单根导线 因  $\phi 0.53$  的截面积为  $0.221\text{mm}^2$ ,  $\phi 1.40$  的截面积为  $1.54\text{mm}^2$ , 其和为  $1.76\text{mm}^2$ , 接近原导线截面积。

(2)  $\phi 0.64$  和  $\phi 1.35$ 。

(3)  $\phi 0.74$  和  $\phi 1.30$  等。

例3-117 有一台三相电动机,  $\Delta$  联结, 线圈导线为  $0.96$ , 欲改用二根导线并绕代替, 并改  $Y$  联结, 问有哪些改接方案。

原导线  $\phi 0.96$  的截面积为  $0.724\text{mm}^2$ , 当改  $Y$  联结时, 要求其截面积为

$$S_Y = \sqrt{3} S_{\Delta} = 1.73 \times 0.724 = 1.54\text{mm}^2$$

首先选用两根直径相同的导线代用, 即

$$d_Y = 1.32 \times d_{\Delta} = 1.32 \times 0.96 = 1.25\text{mm}$$

如无有此导线, 则选用直径不相同的导线代用, 采用  $\phi 0.72$  和  $\phi 1.04$  两根代用,  $\phi 0.72$  的截面积为  $0.41\text{mm}^2$ ,  $\phi 1.04$  导线的截面积为  $0.849\text{mm}^2$ , 两根导线截面积之和为  $0.41 + 0.849 = 1.55\text{mm}^2$ , 与  $1.54\text{mm}^2$  接近。

同理, 可用下列导线代用

(1)  $\phi 0.49 + \phi 1.16$ ;

(2)  $\phi 0.57 + \phi 1.12$ ;

(3)  $\phi 0.64 + \phi 1.08$  等。

#### 4. 并联支路数和接线方式同时改变时的计算

可按表3-17进行计算, 此表给出绕组接线方式和并联支路数同时变更的导线代用。由原绕组的接线方式, 从表中查出  $\xi$  和

表3-17 绕组改联结后的线径系数 $k_d$ 和匝数系数 $k_N$ 关系

绕组改联结后	一路Y联结		二路Y联结		三路Y联结		四路Y联结		五路Y联结		六路Y联结		八路Y联结		十路Y联结	
	$k_d$	$k_N$	$k_d$	$k_N$	$k_d$	$k_N$	$k_d$	$k_N$	$k_d$	$k_N$	$k_d$	$k_N$	$k_d$	$k_N$	$k_d$	$k_N$
一路Y联结	1.0	1.41	2.0	2.24	2.45	2.83	3.16	1.32	1.86	2.38	2.92	3.23	3.78	4.16		
	1.0	0.50	0.25	0.20	0.17	0.125	0.10	0.58	0.29	0.15	0.12	0.10	0.07	0.05		
二路Y联结	0.71	1.0	1.41	1.58	1.73	2.0	2.24	0.93	1.32	1.61	2.05	2.28	2.64	2.94		
	2.0	1.0	0.50	0.40	0.33	0.25	0.20	1.16	0.58	0.39	0.23	0.19	0.15	0.11		
三路Y联结	0.58	0.82	1.15	1.29	1.41	1.63	1.83	0.76	1.08	1.32	1.70	1.86	2.15	2.44		
	3.0	1.50	0.75	0.60	0.50	0.38	0.30	1.73	0.87	0.58	0.35	0.23	0.22	0.17		
四路Y联结	0.50	0.71	1.0	1.12	1.22	1.41	1.58	0.66	0.93	1.14	1.47	1.61	1.86	2.08		
	4.0	2.0	1.0	0.80	0.67	0.50	0.40	2.32	1.16	0.7	0.46	0.39	0.29	0.23		
五路Y联结	0.45	0.63	0.89	1.0	1.09	1.26	1.41	0.59	0.83	1.02	1.32	1.44	1.67	1.86		
	5.0	2.5	1.25	1.0	0.83	0.63	0.50	2.89	1.44	0.96	0.58	0.48	0.36	0.29		
六路Y联结	0.41	0.58	0.82	0.91	1.0	1.15	1.29	0.54	0.76	0.93	1.20	1.32	1.52	1.79		
	6.0	3.0	1.50	1.20	1.0	0.75	0.60	3.46	1.73	1.15	0.69	0.56	0.43	0.35		
八路Y联结	0.35	0.50	0.71	0.79	0.87	1.0	1.12	0.47	0.66	0.81	1.04	1.14	1.32	1.47		
	8.0	4.0	2.0	1.6	0.33	1.0	0.80	4.6	2.72	1.62	1.20	0.95	0.79	0.56	0.46	
十路Y联结	0.32	0.45	0.63	0.71	0.78	0.89	1.0	0.42	0.59	0.72	0.83	0.93	1.13	1.32		
	10	5.0	2.5	2.0	1.67	1.26	1.0	5.8	2.9	1.9	1.5	1.20	1.0	0.72	0.58	

(续)

绕组 改联前 $\frac{U_1}{U_2}$ 绕组 改联后	一路Y联结		二路Y联结		三路Y联结		四路Y联结		五路Y联结		六路Y联结		八路Y联结		十路Y联结		一路△联结		二路△联结		三路△联结		四路△联结		五路△联结		六路△联结		八路△联结		十路△联结	
	0.77 1.73	0.54 3.46	0.76 1.73	0.93 1.15	1.32 0.58	1.52 0.43	1.69 0.35	1.86 0.23	2.15 0.22	2.41 0.17	1.0 1.0	1.41 0.51	1.78 0.33	2.0 0.25	2.24 0.20	2.45 0.17	2.83 0.13	3.16 0.10	1.0 1.0	1.0 1.0	1.0 1.0	1.0 1.0	1.0 1.0	1.0 1.0	1.0 1.0	1.0 1.0	1.0 1.0	1.0 1.0	1.0 1.0	1.0 1.0	1.0 1.0	
一路△联结	0.77 1.73	0.54 3.46	0.76 1.73	0.93 1.15	1.32 0.58	1.52 0.43	1.69 0.35	1.86 0.23	2.15 0.22	2.41 0.17	1.0 1.0	1.41 0.51	1.78 0.33	2.0 0.25	2.24 0.20	2.45 0.17	2.83 0.13	3.16 0.10	1.0 1.0	1.0 1.0	1.0 1.0	1.0 1.0	1.0 1.0	1.0 1.0	1.0 1.0	1.0 1.0	1.0 1.0	1.0 1.0	1.0 1.0	1.0 1.0	1.0 1.0	
二路△联结	0.77 1.73	0.54 3.46	0.76 1.73	0.93 1.15	1.32 0.58	1.52 0.43	1.69 0.35	1.86 0.23	2.15 0.22	2.41 0.17	1.0 1.0	1.41 0.51	1.78 0.33	2.0 0.25	2.24 0.20	2.45 0.17	2.83 0.13	3.16 0.10	1.0 1.0	1.0 1.0	1.0 1.0	1.0 1.0	1.0 1.0	1.0 1.0	1.0 1.0	1.0 1.0	1.0 1.0	1.0 1.0	1.0 1.0	1.0 1.0	1.0 1.0	
三路△联结	0.44 5.19	0.38 8.92	0.62 2.59	0.76 1.73	0.88 1.30	0.98 1.04	1.07 0.87	1.24 0.65	1.40 0.52	1.52 0.43	1.0 1.0	1.41 0.51	1.78 0.33	2.0 0.25	2.24 0.20	2.45 0.17	2.83 0.13	3.16 0.10	1.0 1.0	1.0 1.0	1.0 1.0	1.0 1.0	1.0 1.0	1.0 1.0	1.0 1.0	1.0 1.0	1.0 1.0	1.0 1.0	1.0 1.0	1.0 1.0	1.0 1.0	1.0 1.0
四路△联结	0.38 8.92	0.34 10.4	0.54 3.46	0.66 2.31	0.76 1.73	0.85 1.38	0.93 1.15	1.07 0.87	1.24 0.65	1.40 0.52	1.0 1.0	1.41 0.51	1.78 0.33	2.0 0.25	2.24 0.20	2.45 0.17	2.83 0.13	3.16 0.10	1.0 1.0	1.0 1.0	1.0 1.0	1.0 1.0	1.0 1.0	1.0 1.0	1.0 1.0	1.0 1.0	1.0 1.0	1.0 1.0	1.0 1.0	1.0 1.0	1.0 1.0	1.0 1.0
五路△联结	0.34 8.65	0.31 10.4	0.48 4.33	0.59 2.88	0.68 2.16	0.76 1.73	0.83 1.44	0.96 1.18	1.07 0.86	1.21 0.69	1.0 1.0	1.41 0.51	1.78 0.33	2.0 0.25	2.24 0.20	2.45 0.17	2.83 0.13	3.16 0.10	1.0 1.0	1.0 1.0	1.0 1.0	1.0 1.0	1.0 1.0	1.0 1.0	1.0 1.0	1.0 1.0	1.0 1.0	1.0 1.0	1.0 1.0	1.0 1.0	1.0 1.0	1.0 1.0
六路△联结	0.31 10.4	0.27 1.38	0.48 5.19	0.59 3.46	0.68 2.60	0.76 2.08	0.83 1.73	0.96 1.30	1.07 0.86	1.21 0.69	1.0 1.0	1.41 0.51	1.78 0.33	2.0 0.25	2.24 0.20	2.45 0.17	2.83 0.13	3.16 0.10	1.0 1.0	1.0 1.0	1.0 1.0	1.0 1.0	1.0 1.0	1.0 1.0	1.0 1.0	1.0 1.0	1.0 1.0	1.0 1.0	1.0 1.0	1.0 1.0	1.0 1.0	1.0 1.0
八路△联结	0.27 1.38	0.24 1.73	0.39 6.88	0.47 4.64	0.54 3.44	0.60 2.80	0.66 2.32	0.76 1.73	0.85 1.38	0.96 1.30	1.0 1.0	1.41 0.51	1.78 0.33	2.0 0.25	2.24 0.20	2.45 0.17	2.83 0.13	3.16 0.10	1.0 1.0	1.0 1.0	1.0 1.0	1.0 1.0	1.0 1.0	1.0 1.0	1.0 1.0	1.0 1.0	1.0 1.0	1.0 1.0	1.0 1.0	1.0 1.0	1.0 1.0	1.0 1.0
十路△联结	0.24 1.73	0.24 1.73	0.34 8.6	0.42 5.8	0.48 4.3	0.54 3.5	0.59 2.9	0.68 2.16	0.76 1.73	0.85 1.38	1.0 1.0	1.41 0.51	1.78 0.33	2.0 0.25	2.24 0.20	2.45 0.17	2.83 0.13	3.16 0.10	1.0 1.0	1.0 1.0	1.0 1.0	1.0 1.0	1.0 1.0	1.0 1.0	1.0 1.0	1.0 1.0	1.0 1.0	1.0 1.0	1.0 1.0	1.0 1.0	1.0 1.0	1.0 1.0

注:  $U_1$ —改变后导线的线电压;  
 $U_2$ —改变后导线的线电压。

$\xi_N$ ，然后按照下式计算出新的导线线径和线圈匝数，即

$$d' = \xi_d d$$

$$N' = \xi_N N$$

式中  $d, N$ ——原线圈的导线线径和匝数；

$d', N'$ ——改为代替导线后的线径和线圈匝数。

**例3-118** 有一台6极三相电动机，3△联结，并联支路数为3，线圈导线线径 $\phi 1.0$ ，每个线圈20匝，现欲改成6路Y联结时，问新的线径和线圈匝数各是多少（保持线圈形式）。

按原绕组联结方式为3△联结，改接成6路Y联结，查表3-17，得到 $\xi_d = 1.41$ ， $\xi_N = 0.50$ ，则有

$$d' = \xi_d d = 1.41 \times 1.0 = 1.40 \text{ mm}$$

$$N' = \xi_N N = 0.50 \times 20 = 10 \text{ 匝}$$

#### 四、电动机现场烘干计算

##### 1. 单相低压烘干法计算

三相绕组通过串、并连，留出两个头与单相低压电源（交流电或直流电）相连，靠绕组铜损耗发热来烘干电机。电压大小取决于电流大小，而电流的确定一般选为每相绕组最大电流的50%~60%（交流电源）或60%~80%（直流电源）。至于选上限还是下限，要看温度上升的快慢，一般通电3~4h内，定子铁心温度达到60~80℃时的电流为合适的限度。单相低压电源在现场可利用交流或直流电焊机供电，这种烘干法的工艺过程如下。

首先将笼型转子抽出，对定子绕组进行吹风清扫，然后把定子绕组按图3-17所示的方式进行连接。为了增加定子绕组匝数，可按图3-17a、b串联接成一路，最后将串联后的一个端头接在电焊机的低压绕组端的接点上，但有时三相绕组只出三个端头，这时只能按图3-17c、d串并联接成电路。

电焊机容量按  $P = 0.15 U_N \times (0.5 \sim 0.7) I_N \times 10^{-3}$  (kVA) 计算，选择其中  $U_N$  和  $I_N$  分别表示电机的额定电压和额定电流。

**例3-119** 有一台Y225M-4型45kW三相异步电动机，已知额

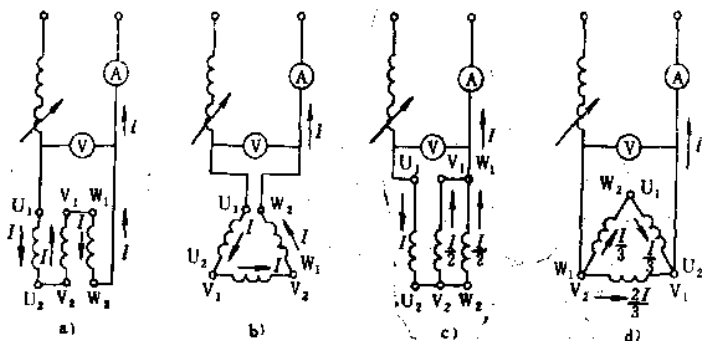


图3-17 用单相低压电源加热绕组的接线方式

a)、b)三相绕组串联 c)、d)三相绕组并联

定电压为380V，额定电流为84A，欲采用电焊机进行烘干电机，问电焊机的容量大约为多大。

电焊机容量为

$$P = 0.15 \times 380 \times 0.6 \times 84 \times 10^{-3} \\ = 2.8 \text{ kVA}$$

## 2. 铁损耗烘干法的计算

铁损耗烘干法是采用绝缘导线缠绕在电动机铁心上，导线中通以单相交流电，使铁心内产生磁滞损耗和涡流损耗，铁心发热，以致使电动机内部达到所需烘干温度进行烘干。有时也利用转轴作为励磁绕组，对转子铁心产生损耗来加热转子的目的。

(1) 交流电动机定子铁损耗烘干法计算 励磁绕组的计算：

定子铁心轭高为

$$h_c = \frac{D_1 - D_{11}}{2} - h_n \quad (\text{cm})$$

定子铁轭有效截面积为

$$S_c = 0.93lh_c \quad (\text{cm}^2)$$

定子铁轭中心直径为

$$D_{cP} = D_1 - h_c \quad (\text{cm})$$

式中  $D_1$ ——定子铁心外径(cm);  
 $D_{i1}$ ——定子铁心内径(cm);  
 $h_s$ ——定子槽深(cm);  
 $l$ ——定子铁心有效长度,  $l = L - n_s b_c$  (cm);  
 $L$ ——定子铁心总长度(cm);  
 $n_s, b_c$ ——定子铁心通风沟数和宽度(cm)。

励磁绕组匝数为

$$N = \frac{45U}{BS_c} \quad (\text{匝})$$

式中  $U$ ——励磁线圈的电源电压(V);  
 $B$ ——磁通密度, 一般取  $B = 0.6 \sim 0.7\text{T}$ 。

励磁绕组电流和导线规格:

励磁安匝为

$$AN = \pi D_{cp} \alpha N \quad (\text{安匝})$$

式中  $\alpha N$ ——定子铁心单位长度所需磁化安匝, 当铁心材质是一般硅钢板制成时, 可按表3-18选用。

表3-18 铁芯磁化安匝数表

$B$ (T)	0.5	0.6	0.7	0.8
$\alpha N$ (安匝/cm)	1.71	2.11	2.61	3.18

励磁电流为

$$I = \frac{AN}{N} \quad (\text{A})$$

导线截面积为

$$S = \frac{I}{J} \quad (\text{mm}^2)$$

式中  $J$ ——导线电流密度, 对于铜导线, 一般选为  $2\text{A/mm}^2$  左右。

励磁功率为

$$P = UI \cdot 10^{-3} \quad (\text{kVA})$$



图3-18为定子铁心采用铁损耗法烘干的接线图。

采用此法干燥时，交流电机定子温度控制在85~90℃，转子温度控制在65~70℃。直流电机磁极铁心温度控制在85~90℃，转子钢丝绑线温度控制在100℃以下。

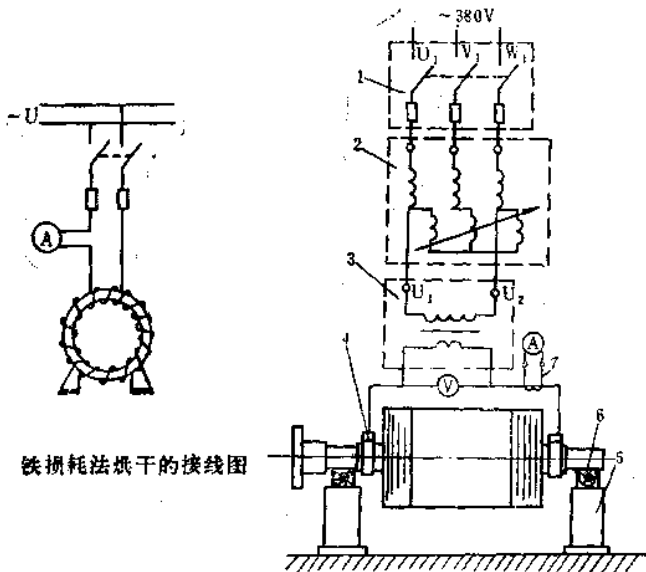


图3-18 铁损耗法烘干的接线图

图3-19 转子利用转轴励磁烘干的接线图

- 1—电源开关 2—调压器 3—单相变压器  
4—卡子 5—支座 6—枕木 7—电流表

(2) 利用转轴励磁烘干法 在烘干转子时，可以利用绝缘后的转轴作为一匝励磁绕组进行加热烘干。图3-19是转子利用转轴励磁烘干的接线图，因为利用一根转轴，所以励磁绕组匝数为1，施加在转轴上的电压按下式计算：

$$U = \frac{BS_s}{45} \quad (\text{V})$$

$$S_s = K_s(L_s - b_s n_s) \frac{D_s - D_2}{2} - h_s \quad (\text{cm}^2)$$

式中  $B$ ——磁通密度，一般取0.65T左右；

$S_a$ ——转子铁轭有效截面积 ( $\text{cm}^2$ ) ;

$D_a$ ——转子外径 (cm) ;

$D_2$ ——转子铁心内径 (cm) ;

$L_a$ ——转子铁心总长度 (cm) ;

$K_{F_0}$ ——铁心叠压系数, 取0.93;

$b_a, n_a$ ——转子铁心通风沟宽和数量;

$h_a$ ——转子铁心槽高度 (cm) 。

转轴内通过的电流为

$$I_2 = \pi \left( \frac{D_a + D_2}{2} \right) a N_a \quad (\text{A})$$

式中  $aN$ ——转子铁心单位长度所需磁化安匝, 查表3-18。

烘干所需功率为

$$P = UI_2 \times 10^{-3} \quad (\text{kVA})$$

这种烘干电源可利用电焊机给转轴供电, 一般电压控制在15~50V, 电流控制在1000A左右。电源也可以通过变压器降压使用, 在轴承下部要加绝缘, 或者把转子放在绝缘垫块上。与转轴连接的导电环紧固在非轴颈的部位, 以防烧伤轴颈。在操作时, 转子要进行保温, 控制铁心温度不超过90℃, 线圈温度不大于85℃。

例3-120 有一台180kW三相异步电动机, 已知额定电压380V, 额定电流329A, 4极, 铁心外径 $D_1=56\text{cm}$ , 铁心内径 $D_2=35\text{cm}$ , 铁心总长 $L=29\text{cm}$ , 通风沟数3个, 通风沟宽0.1cm, 槽深 $h_a=4.3\text{cm}$ , 由于电机受潮打算采用铁损法进行烘干, 试求励磁匝数、励磁电流和励磁功率各是多少。

定子铁心轭高为

$$h_a = \frac{D_1 - D_2}{2} - h_a = \frac{56 - 35}{2} - 4.3$$

$$= 6.2\text{cm}$$

定子铁心有效长度为

$$l = L - n_c b_c = 29 - 3 \times 0.1 = 26\text{cm}$$

定子铁轭有效截面积为

$$S_e = 0.93lh_e = 0.93 \times 26 \times 6.2 = 149.9 \text{ cm}^2$$

定子铁轭中心直径为

$$D_{e_p} = D_1 - h_e = 56 - 6.2 = 49.8 \text{ cm}$$

励磁绕组匝数为

$$N = \frac{45U}{BS_e} = \frac{45 \times 220}{0.7 \times 149.9} = 94.3 \text{ 匝}$$

取94匝

磁通密度  $B$  取  $0.7 \text{ T}$ ，电源电压取  $220 \text{ V}$ ，励磁安匝为

$$AN = \pi D_{e_p} aN = \pi \times 49.8 \times 2.61 = 408.3 \text{ 安匝}$$

$aN$  按表3-18选  $2.61 \text{ 安匝/cm}$ ，则有

励磁电流为

$$I = \frac{AN}{N} = \frac{408.3}{94} = 4.3 \text{ A}$$

导线截面积为

$$S = \frac{I}{J} = \frac{4.3}{2} = 2.2 \text{ mm}^2$$

式中  $J$ ——电流密度 ( $\text{A/mm}^2$ )。

励磁功率为

$$\begin{aligned} P &= UI \times 10^{-3} = 220 \times 4.3 \times 10^{-3} \\ &= 0.946 \text{ kVA} \end{aligned}$$

### 五、电动机改极计算

改变电动机极数通常有两种方法，一是改变绕组接线方式；另一种是重绕。由于重新换线工期较长，修理费用也多，所以应优先考虑改接，不成功时再考虑重绕。

为了提高电动机转速，就需要减少电动机极数，如果保持气隙磁密不变，会使定转子铁轭磁密增加，因此要控制铁轭磁密值不要超过允许值。

为了降低电动机转速，则需增加电动机极数，当保持气隙磁密不变时，铁轭磁密大大降低，铁轭面积未能充分利用。所以，在改极时，为充分利用原铁心尺寸，一般不能保持气隙磁密不

变。当增速减极时，要适当降低气隙磁密，所以齿磁密也相应降低，保证铁轭磁密处于允许范围内；当减速增极时，要适当提高气隙磁密，使铁轭磁密不致降低太多，由于气隙磁密提高，齿磁密也相应提高，所以要控制齿磁密不要超过允许值。

改极时要考虑下列问题：

(1) 校验槽配合是否满足改极后的要求，为此应使下列不等式成立：

$$\begin{aligned} Z_2 &\neq 6pi \\ Z_2 &\neq Z_1 \pm p \\ Z_2 &\neq Z_1 + 2p \\ Z_2 &\neq 0.5Z_1 \pm p \\ Z_2 &\neq 2Z_1 + 2p \\ Z_2 &\neq 6pi \pm 1 \\ Z_2 &\neq 6pi \pm (2p \pm 1) \end{aligned}$$

式中  $i$ ——自然整数，由 1 至  $n$ ；

$p$ ——电动机极对数；

$Z_1$ 、 $Z_2$ ——定转子槽数。

(2) 增加转速时，要考虑轴承发热问题。

对于滚动轴承，轴承增加的损耗为

$$\Delta P_k = 0.15 \frac{G_k}{D_0} v_r \times 10^{-3} \quad (\text{kW})$$

对于滑动轴承，轴承增加的损耗为

$$\Delta P_c = 0.52 d_c l_c v_c^{1.5} \quad (\text{kW})$$

式中  $G_k$ ——轴承上所承受的负载 (kg)；

$D_0$ ——滚球或滚柱中心的圆周直径 (cm)；

$v_r$ ——轴颈的圆周速度 (m/s)；

$d_c$ ——轴颈直径 (cm)；

$l_c$ ——轴颈长度 (cm)。

由于转速和功率增加，轴承负载增加，轴承磨损就会增大，从而降低轴承使用强度和寿命。

(3) 当极数改变时, 还要校核电动机输出端轴颈强度, 见图 3-20 示。

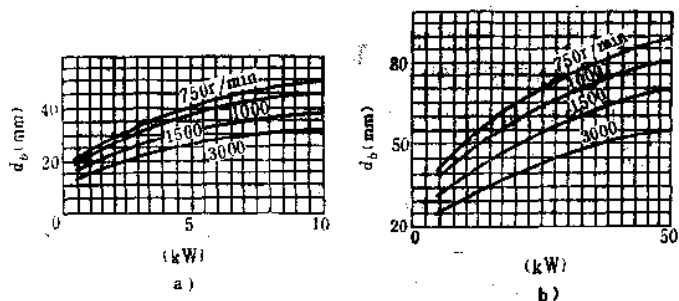


图 3-20 转轴允许负载曲线

(4) 增加转速时, 要校核转子圆周速度是否满足要求。

转子圆周速度为

$$v_2 = \frac{\pi D_2 n_2}{60 \times 1000} \quad (\text{m/s})$$

式中  $D_2$ ——转子外径 (mm) ;

$n_2$ ——转子转速 (r/min) 。

笼型电动机  $v_2$  在 40~60 m/s 范围内; 绕线转子电动机  $v_2$  在 30~40 m/s 范围内。

(5) 增加转速, 要相应地增加绕线, 转子的绑扎强度。同时要考虑轴承润滑油牌号是否合适。

(6) 增加转速时, 要校验电动机转矩是否满足生产机械的需要, 即

$$M_{N_2} = M_{N_1} \frac{P_{N_2}/n_2}{P_{N_1}/n_1}$$

式中  $M_{N_2}, M_{N_1}$ ——分别表示改极后和改极前电动机额定转矩 (kgf·m) ⊖;

$P_{N_2}, P_{N_1}$ ——分别表示电动机改极后和改极前的额定输出功率 (kW) ;

$n_2, n_1$ ——电机改极后和改极前的额定转速 (r/min) 。

⊖ 1 kgf·m = 9.80665 N·m

(7)重绕增加转速时,还要考虑线圈跨距增大后,线圈端部轴向长度加大,是否能保证与端盖之间的绝缘距离低压电机,这段距离要求 $7 \sim 10\text{mm}$ 。

(8)减少极数后,电动机功率增大,导线匝数减少,导线截面积增加。由于导线直径增粗,要考虑槽口宽度是否允许新的导线嵌入槽内。要求绝缘导线外径比槽口宽度小 $0.6 \sim 0.8\text{mm}$ 。

(9)当降低转速时,由于通风冷却条件变坏,还要考虑电动机散热问题,最好将风扇结构做相应的改变。由于极数增加,电动机输出功率减少,风扇叶数目相应减少。

(10)由于铁心尺寸适于某一极数不能改变,所以改变极数差别不要太大,否则效果不好。

(11)改极前要检查浸渍情况,有时浸无溶剂漆,线间联接无法查找,也就无法改接变极。

## 2. 简易算法

对于60年代以后国内外生产的异步电动机,如果旧绕组数据齐全,在改极时,不必再进行复杂重绕计算,只要按表3-19所给出的计算公式进行简易计算便可获得重绕数据。

例3-120 JO2-72-6型 $22\text{kW}$ 电机,  $U_N = 380\text{V}$ ,  $\Delta$ 联结,  $44\text{A}$ ,  $Z_1/Z_2 = 36/33$ ,  $a_1 = 2$ ,  $y_1 = 1 \sim 6$ 槽,线规:  $1 \times \phi 1.30$ 及  $1 \times \phi 1.25$ ,要求改4极。

槽配合校验合格,说明允许改4极运行,6极改4极时,仍 $\Delta$ 联结,所以  $U'_2 = U_2$ ,  $a'_1 = a = 2$ ,6极时绕组系数为0.933,4极绕组系数为0.946。查表得出4极的每线圈匝数为

$$N_4 = (0.75 \sim 0.88) \cdot \frac{a_1}{a_6} \cdot \frac{K_{ap6}}{K_{ap4}} N_6$$

$$= 0.8 \cdot \frac{2 \times 0.933}{3 \times 0.946} \times 42 = 22.09 \text{匝/线圈}$$

系数取0.8,  $N_4$ 取22匝。

4极的导线直径  $d_4$  或截面积  $S_{41}$  为

表3-19 三相异步电动机改极简易计算

项目 级数变更	每相串联匝数 (或每线圈匝数)	导线截面积(mm <sup>2</sup> )	电机容量(kW)
2极改4极	$N_4 = (1.4 \sim 1.5) \frac{a_2 K_{dP_2}}{a_1 K_{dP_1}} N_2$	$S_4 = (0.75 \sim 0.8) \frac{a_2}{a_1} S_2$	$P_4 = (0.55 \sim 0.6) P_2$
2极改6极	$N_6 = (1.82 \sim 2.1) \frac{a_3 K_{dP_3}}{a_1 K_{dP_1}} N_1$	$S_6 = (0.5 \sim 0.64) \frac{a_3}{a_1} S_1$	$P_6 = (0.39 \sim 0.42) P_2$
4极改2极	$N_2 = (0.7 \sim 0.75) \frac{a_2 K_{dP_2}}{a_1 K_{dP_1}} N_4$	$S_2 = (1.2 \sim 1.27) \frac{a_2}{a_1} S_4$	$P_2 = (1.3 \sim 1.4) P_4$
4极改6极	$N_6 = (1.3 \sim 1.4) \frac{a_3 K_{dP_3}}{a_1 K_{dP_1}} N_4$	$S_6 = (0.8) \frac{a_3}{a_1} S_4$	$P_6 = 0.7 P_4$
4极改8极	$N_8 = (1.63 \sim 1.82) \frac{a_4 K_{dP_4}}{a_1 K_{dP_1}} N_4$	$S_8 = (0.72) \frac{a_4}{a_1} S_4$	$P_8 = 0.56 P_4$
6极改2极	$N_2 = (0.53 \sim 0.54) \frac{a_2 K_{dP_2}}{a_3 K_{dP_3}} N_6$	$S_2 = (1.38 \sim 1.53) \frac{a_2}{a_3} S_6$	$P_2 = (1.63 \sim 1.82) P_6$
6极改4极	$N_4 = (0.75 \sim 0.85) \frac{a_2 K_{dP_2}}{a_3 K_{dP_3}} N_6$	$S_4 = (1.15 \sim 1.20) \frac{a_2}{a_3} S_6$	$P_4 = (1.25 \sim 1.30) P_6$
6极改8极	$N_8 = (1.25 \sim 1.30) \frac{a_4 K_{dP_4}}{a_3 K_{dP_3}} N_6$	$S_8 = (0.80) \frac{a_4}{a_3} S_6$	$P_8 = 0.8 P_6$
8极改4极	$N_4 = (0.6 \sim 0.81) \frac{a_2 K_{dP_2}}{a_1 K_{dP_1}} N_8$	$S_4 = (1.26 \sim 1.38) \frac{a_2}{a_1} S_8$	$P_4 = (1.5 \sim 1.63) P_8$
8极改6极	$N_6 = (0.8 \sim 0.95) \frac{a_2 K_{dP_2}}{a_1 K_{dP_1}} N_8$	$S_6 = (1.1) \sim 1.15) \frac{a_2}{a_1} S_8$	$P_6 = (1.2 \sim 1.25) P_8$

注：1.匝数系数的选择，对于绕线质量不好和近年产品取大值，反之取小值。  
2.导线截面积系数，对于早年产品取大值，近年产品取小值。

$$d_4 = (1.07 \sim 1.09) \frac{U_{46} a_n}{U_{44} a_4} d_3$$

$$S_{44} = (1.15 \sim 1.20) \frac{a_n}{a_4} S_{36}$$

原导线线径为  $\phi 1.30$  及  $\phi 1.25$ , 总截面积  $S_{36}$  等于  $2.554 \text{ mm}^2$ , 代入上式得到

$$S_{44} = (1.15 \sim 1.20) \frac{3}{2} \times 2.544 = 4.6 \text{ mm}^2$$

(系数取 1.20)

所以选用 3— $\phi 1.20$  及 1— $\phi 1.25$  并绕。

改后电机容量由表查出:

$$\begin{aligned} P_4 &= (1.25 \sim 1.30) P_3 \quad (\text{取系数 } 1.30) \\ &= 1.30 \times 22 = 28.6 \text{ kW} \end{aligned}$$

取 28 kW。

**例3-122** 有两台三相异步电动机, 如图3-21所示,  $M_1$  是三相绕线转子异步电动机, 其极数为  $2p$ , 电源频率为  $f_1$ , 将此台电动机定子接到三相电源上, 从其转子集电环间引出电流, 供第二台  $M_2$  三相笼型异步电动机, 从  $M_1$  集电环引出的电流频率为  $f_2$ , 又知  $M_2$  的极数是  $2p_2$ , 设第二台电动机  $M_2$  的转差率为  $s_2$ , 问第一台  $M_1$  的转差率  $s_1$  应是多少, 此两台电动机是用联轴器硬性联结在一起运转。

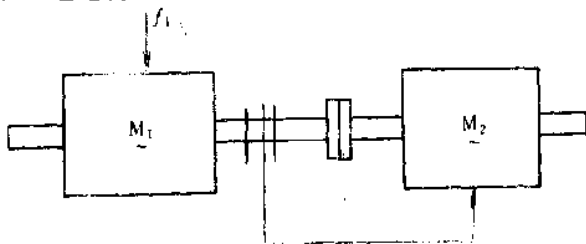


图3-21 两台三相异步电动机联结

已知  $M_1$  的转差率为  $s_1$ , 则  $f_2 = s_1 f_1$ , 电动机  $M_1$  的转速  $n$



为

$$n = n_1(1 - s_1) = \frac{60f_1}{p_1}(1 - s_1)$$

电动机  $M_2$  的转速  $n'$  为

$$n' = n_2(1 - s_2) = \frac{60f_2}{p_2}(1 - s_2) = \frac{60s_1f_1}{p_2}(1 - s_2)$$

式中  $n_1$  ——  $M_1$  电动机的固定转速 (r/min) ,

$n_2$  —— 为  $M_2$  电动机的同步转速 (r/min) 。

由于两台电动机用联轴器联结在一起, 所以  $n = n'$ , 则有

$$\frac{f_1(1 - s_1)}{p_1} = \frac{f_2(1 - s_2)}{p_2} = \frac{s_1f_1(1 - s_2)}{p_2}$$

所以

$$\frac{1 - s_1}{p_1} = \frac{s_1(1 - s_2)}{p_2}$$

由此可得出  $s_1$  为

$$s_1 = \frac{p_2}{p_2 + p_1(1 - s_2)}$$

显然, 利用此法可进行调速。

例3-123 Y225M-2型45kW三相异步电动机, 已知  $n_1 = 2970\text{r/min}$ ,  $f_1 = 50\text{Hz}$ ,  $U_N = 380\text{V}$ , 使用在400V,  $f_2 = 60\text{Hz}$  电源上, 保持  $s_N$ 、 $I_2 \cos\varphi_2$  不变, 且不考虑磁路饱和的影响, 试求:

(1) 此台电动机使用在50Hz、380V电源上时同步转速  $n_1$ 、额定转差率  $s_N$ 、额定转矩  $T_N$  各是多少。

(2) 使用在60Hz、400V电源上时, 同步转速  $n'_1$ 、额定转矩  $T'_N$ 、额定功率  $P'_N$  各是多少。

(1) 在50Hz、380V电源上

$$n_1 = \frac{60f_1}{p} = \frac{60 \times 50}{4} = 3000\text{r/min}$$

$$s_N = \frac{n_1 - n_N}{n_1} = \frac{3000 - 2970}{3000} = 0.01$$

$$T_N = 9550 \frac{P_N}{n_N} = 9550 \times \frac{45}{2970} = 144.7 \text{ N}\cdot\text{m}$$

(2) 在 60 Hz、400 V 电源上

$$n_1 = \frac{60f_2}{p} = \frac{60 \times 60}{1} = 3600 \text{ r/min}$$

由  $n'_N = (1 - s_N) \frac{60f_2}{p}$  和  $n_N = (1 - s_N) \frac{60f_1}{p}$  知

$$n'_N = n_N \frac{f_2}{f_1} = 2970 \times \frac{60}{50} = 3564 \text{ r/min}$$

设 50 Hz 时, 电动势方程为

$$U_1 \approx E_1 = 4.44f_1 N_1 K_{d\rho_1} \Phi_1$$

60 Hz 时, 电动势方程为

$$U'_1 \approx E'_1 = 4.44f_2 N_1 K_{d\rho_1} \Phi'_1$$

将以上两个方程联立求解得:

$$\frac{U_1}{U'_1} \approx \frac{f_1 \Phi_1}{f_2 \Phi'_1} = \frac{50}{60} \frac{\Phi_1}{\Phi'_1} = \frac{380}{400}$$

$$\therefore \Phi'_1 = \frac{50}{60} \times \frac{400}{380} \times \Phi_1 = 0.88 \Phi_1$$

$$\begin{aligned} T'_N &\approx c_T \Phi'_1 I'_2 \cos \varphi_2 = c_M (0.88 \Phi_1) I'_2 \cos \varphi_2 \\ &= 0.88 (c_T \Phi_1 I'_2 \cos \varphi_2) = 0.88 T_N \\ &= 0.88 \times 144.7 = 127.3 \text{ N}\cdot\text{m} \end{aligned}$$

额定转矩下降率为

$$\begin{aligned} \Delta T &= \frac{T_N - T'_N}{T_N} \times 100\% = \frac{144.7 - 127.3}{144.7} \times 100\% \\ &= 12\% \end{aligned}$$

输出功率为

$$P'_N = \frac{T'_N n'}{9550} = \frac{127.3 \times 3564}{9550} = 47.5 \text{ kW}$$

容量增加率为

$$\Delta P_N = \frac{P'_N - P_N}{P_N} \times 100\% = \frac{47.5 - 45}{47.5} \times 100\% = 5.26\%$$

### 六、改频、改压、改极重绕计算

#### 1. 绕组每相匝数与电压、频率、极数的关系及计算公式

假定电动机重绕前后相数和过载系数不变，且  $\gamma_1 \ll x_1 + x'_2$  时，绕组每相匝数与电压、频率、极数之间的关系以及计算公式如表3-20所示。

表3-20 绕组匝数与电压、频率、极数间的关系

计算项目 计算条件	绕组每相匝数与电压、频率、极数的关系	当 $p' = p$ ， 同时变更电压和频率时	当 $U'_1 = U_1$ ， 同时变更极数和频率时	当 $U'_1 = U_1$ ， 只变更频率时
恒转矩负载	$N'_\phi = N_\phi \frac{U'_1}{U_1}$ $\times \frac{f_1}{f'_1} \sqrt{\frac{p'}{p}}$	$N'_\phi = N_\phi \frac{U'_1}{U_1}$ $\times \frac{f_1}{f'_1}$	$N'_\phi = N_\phi$ $\times \frac{f_1}{f'_1} \sqrt{\frac{p'}{p}}$	$N'_\phi = N_\phi$ $\times \frac{f_1}{f'_1}$
恒功率负载	$N'_\phi = N_\phi \frac{U'_1}{U_1}$ $\times \sqrt{\frac{p'}{p}} \sqrt{\frac{f_1}{f'_1}}$	$N'_\phi = N_\phi$ $\times \frac{U'_1}{U_1} \sqrt{\frac{f_1}{f'_1}}$	$N'_\phi = N_\phi$ $\times \sqrt{\frac{p'}{p}} \sqrt{\frac{f_1}{f'_1}}$	$N'_\phi = N_\phi$ $\times \sqrt{\frac{f_1}{f'_1}}$

注： $N'_\phi$ 、 $N_\phi$ ——重绕后和重绕前每相绕组匝数；  
 $U'_1$ 、 $U_1$ ——重绕后和重绕前电源电压（V）；  
 $f'_1$ 、 $f_1$ ——重绕后和重绕前电源频率（Hz）；  
 $p'$ 、 $p$ ——重绕后和重绕前电机极对数；  
 $\gamma_1$ ——定子相电阻（ $\Omega$ ）；  
 $x_1$ ——定子漏电抗（ $\Omega$ ）；  
 $x'_2$ ——折合到定子边的转子漏电抗（ $\Omega$ ）。

#### 2. 常用的变频简易计算

通常会遇到下面两种情况的改频计算：

(1) 改频时，保持电源电压、极数和转矩不变，重绕前后电动机输出功率变化。

(2) 改频时，保持电源电压、极数和功率不变，重绕前后电动机输出转矩变化。

计算公式见表3-21

表 3-21 常用的两种改频计算

计算项目 改频条件	每相串联匝数 $N_{\phi}$ 或每槽导体数 $N_{sc}$	导线截面积 $S_e$ ( $\text{mm}^2$ )	输出功率 $P_2$ (kW) 或电动机转矩 $T$ (kgf·m)	同步转速 $n_1$ (r/min)	改频后的电流 $I$ (A)
保持电源电压、级数和转矩不变	$N'_{\phi} = N_{\phi} \sqrt{\frac{f_1}{f_2}} \text{ 或}$ $N'_{sc} = N_{sc} \frac{f_1}{f_2}$	$S'_e = S_e \frac{f_1}{f_2}$	$P'_2 = P_2 \times \frac{f'_1 \cos \phi' \eta'}{f_1 \cos \phi \eta}$ $\eta$ —电动机效率 $\cos \phi$ —功率因数 60Hz改为50Hz时: $P'_2 = 0.83 P_2$ 50Hz改为60Hz时: $P'_2 = 1.2 P_2$ (设 $\cos \phi$ 和 $\eta$ 不变)	$n'_1 = n_1 \frac{f_1}{f_2}$	$I'_1 = I_1 \frac{f_1}{f_2}$
保持电源电压、级数和转速不变	60Hz改为50Hz时: $N'_{\phi} = 1.2 N_{\phi}$ $N'_{sc} = 1.2 N_{sc}$ 50Hz改为60Hz时: $N'_{\phi} = 0.83 N_{\phi}$ $N'_{sc} = 0.83 N_{sc}$	60Hz改为50Hz时: $S'_e = 0.83 S_e$ 50Hz改为60Hz时: $S'_e = 1.2 S_e$	60Hz改为50Hz时: $P'_2 = 0.83 P_2$ 50Hz改为60Hz时: $P'_2 = 1.2 P_2$ (设 $\cos \phi$ 和 $\eta$ 不变)	60Hz改为50Hz时: $n'_1 = 0.83 n_1$ 50Hz改为60Hz时: $n'_1 = 1.2 n_1$	60Hz改为50Hz时: $I'_1 = 0.83 I_1$ 50Hz改为60Hz时: $I'_1 = 1.2 I_1$
保持电源电压、级数和输出功率不变	$N'_{\phi} = N_{\phi} \sqrt{\frac{f_1}{f_2}} \text{ 或}$ $N'_{sc} = N_{sc} \sqrt{\frac{f_1}{f_2}}$	$S'_e = S_e \sqrt{\frac{f_1}{f_2}}$	$T' = \frac{f_1}{f_2} T$	$n'_1 = n_1 \frac{f_1}{f_2}$	$I'_1 = I_1$
保持电源电压、级数和输出功率不变	60Hz改为50Hz时: $N'_{\phi} = 1.095 N_{\phi}$ 或 $N'_{sc} = 1.095 N_{sc}$ 50Hz改为60Hz时: $N_{\phi} = 0.913 N_{\phi}$ 或 $N'_{sc} = 0.913 N_{sc}$	60Hz改为50Hz时: $S'_e = 0.913 S_e$ 50Hz改为60Hz时: $S'_e = 1.095 S_e$	60Hz改为50Hz时: $T' = 1.2 T$ 60Hz改为60Hz时: $T' = 0.83 T$	60Hz改为50Hz时: $n'_1 = 0.83 n_1$ 50Hz改为60Hz时: $n'_1 = 1.2 n_1$	电流基本不变

### 3. 计算时注意事项

(1) 由于上述一系列公式是在  $\gamma_1 \ll (x_1 + x_2')$  条件下推导出来的, 当频率很低时或  $\gamma_1$  很大时 (对于小容量电动机), 表中公式有一定误差, 因此当 10kW 以下电动机改频计算时要考虑此因素, 为此在计算过程中要修正匝数 (使匝数适当减少些), 但对于 10kW 以上电动机, 上述公式具有足够的准确度。

(2) 增加频率, 电动机转速相应增加, 所以要考虑转子强度能否适应高转速运行要求, 为此, 要校验转子线速度  $v$ , 即

$$v = \frac{\pi D_2 n_1}{60} \quad (\text{m/s})$$

式中  $D_2$  —— 转子铁心外径 (m);

$$n_1 \text{ —— 同步转速, } n_1 = \frac{60f_1}{p} \quad (\text{r/min})$$

绕线转子  $v \geq 30 \sim 40 \text{ m/s}$ ;

笼型转子  $v \geq 40 \sim 60 \text{ m/s}$ 。

(3) 转速提高后, 还要校核绑扎无纬玻璃丝带的绑箍强度, 即

$$\delta' b' \geq \delta b \left( \frac{n'_p}{n_p} \right)^2$$

式中  $\delta'$ 、 $\delta$  —— 绑扎后和绑扎前的无纬带的厚度;

$b'$ 、 $b$  —— 绑扎后和绑扎前的无纬带的宽度;

$n'_p$ 、 $n_p$  —— 绑扎后和绑扎前的转子飞逸转速, 可取额定转速的 1.2 倍。

当  $b' = b$  时, 则有

$$\delta' = \delta \left( \frac{n'_p}{n_p} \right)^2 = \delta \left( \frac{f'_1}{f_1} \right)^2$$

(4) 转速提高时, 电动机通风冷却效果增强, 允许电流密度增大 10%~15%。

(5) 当过分提高频率时 (比如由 50Hz 提高至 200Hz 以上), 由于铜耗和铁耗均增加, 使电动机效率降低, 所以计算出的电动机输出功率应降低 15%~30%。

**例3-124** 有一台 JO2-22-2型三相异步电动机，功率为 2.2 kW， $\Delta/\text{Y}$ 联结，电压为 220V/380V，电流为 8.06A/4.60A。转速 2860r/min， $\cos\phi = 0.88$ ，功率  $\eta = 81.5\%$ ， $f = 50\text{Hz}$ ，E 级绝缘，要求电动机定子绕组重绕后改用在 100Hz 电源上，并希望改绕后电源电压和电动机转矩不变。

测得转子直径  $D_2 = 0.0816\text{m}$ ，定子槽数 18，绕组导线线径  $\phi 0.93(\text{QZ})$ ， $S_{e1} = 0.679\text{mm}^2$ ，并绕根数为 1，并联支路数为 1，每槽匝数  $= Z_1 = 60$ ，绕组为单层交叉式。

在改频重绕时，保持原来的绕组形式，并绕根数、并联支路数和接线方式不变。

(1) 改频后每槽匝数  $Z_2$

$$Z_2 = Z_1 \frac{f_1}{f_2} = 60 \frac{50}{100} = 30 \text{ 匝}$$

(2) 导线截面积  $S_{e2}$

$$S_{e2} = S_{e1} \frac{f_2}{f_1} = 0.679 \frac{100}{50} = 1.36\text{mm}^2$$

选用导线线径为  $\phi 1.30$  ( $S_{e2} = 1.33\text{mm}^2$ )

(3) 改频后的输出功率  $P_2$

改频后，电动机功率大致与频率成正比地变化，即  $P_2 \approx P_1$ 。

$\frac{f_2}{f_1} = 2.2 \frac{100}{50} = 4.4\text{kW}$ ，按此功率和电动机型式查阅样本数据得： $\eta_2 = 84\%$ ， $\cos\phi_2 = 0.88$ ，于是算得改频后的输出功率为

$$P_2 = P_1 \frac{f_2 \cos\phi_2 \eta_2}{f_1 \cos\phi_1 \eta_1} = 2.2 \frac{100 \times 0.88 \times 0.84}{50 \times 0.88 \times 0.815} \approx 4.5\text{kW}$$

(4) 改极后的电流  $I_2$

$$I_2 = I_1 \frac{f_2}{f_1} = 4.66 \frac{100}{50} = 9.3 \text{ A (Y联结)}$$

$$\text{或 } I_2 = 8.06 \times \frac{100}{50} = 16.1 \text{ A (\Delta联结)}$$

(5) 改频后的同步转速  $n_2$

$$n_2 = n_1 \frac{f_2}{f_1} = 3000 \frac{100}{50} = 6000 \text{ r/min}$$

校验转子线速度  $v$

$$v = \frac{\pi D_2 n}{60} = \frac{\pi \times 0.0816 \times 6000}{60} \\ \approx 25.7 \text{ m/s} < 40 \sim 60 \text{ m/s}$$

综上所述, 改频后电机参数如下:

新铭牌数据:

功率为4.5kW, 电压为220V/380V, 电流为16A/9A, 接线为 $\Delta/\text{Y}$ ,  $\cos\varphi$ 为0.88,  $\eta$ 为84%, 频率为100Hz。

重绕线圈施工数据:

导线为 $\phi 1.30$  (QZ), 绕组形式为单层交叉式, 每槽匝数为30匝, 并绕根数为1, 并联支路数为1, 线圈跨距为1~9 (2个)、1~8 (1个)。

例3-125 60Hz的三相异步电动机使用在相同电压下的50Hz三相电源上, 问这时电动机的空载电流、电动机温升和转速都有哪些变化, 为什么?

(1) 空载电流增加, 由公式  $U \approx E_1 = 4.44 f K_{ap1} N \Phi$  知, 当  $U$  不变时,  $E_1$  几乎不变, 而对一台具体电动机而言,  $K_{ap1} N$  不变, 所以  $f\Phi$  的乘积是常数, 当电源频率从60Hz降为50Hz时,

磁通应增加  $\frac{60}{50} = 1.2$  倍, 由于铁心饱和, 所以空载电流的增加要超过1.2倍。

(2) 假定负载电流和电源电压在两种频率电源下是保持不变的, 则由于电源频率从60Hz降为50Hz, 所以与频率相反的磁滞损耗要增加, 即磁滞损耗与  $U^2/f$  成正比, 但满流损耗仅与电压平方成正比, 所以不变, 这样电动机在磁通增大1.2倍情况下, 电动机铁损耗又因磁滞损耗增加而增加, 所以空载电流增加很多, 虽然负载电流不变, 电动机的总电流也要增加, 使电动机铜

耗增加，由于电动机铜耗和铁耗均增加，所以电动机的温升是增加的。

(3) 电动机转速降低，因为电动机的同步转速与电源频率成正比，而电动机实际转速大小又接近于同步转速，所以用同步转速来制定电动机的转速大小。

设50Hz时电动机同步转速为 $n_1'$ ，频率为 $f'$ ，60Hz时同步转速为 $n_1$ ，频率为 $f$ ，则有

$$n_1' = n_1 \cdot \frac{f'}{f} = \frac{50}{60} n_1 = 0.83 n_1, \text{ 即电动机在 } 50\text{Hz} \text{ 电源下}$$

运行时，电动机的转速降到原有的83%，也就是电动机转速降了17%。

### 七、甩线圈法的计算

占用较少的停机时间，把绕组中故障线圈甩掉，让电动机继续运行的办法，是在生产当中修理电动机的一种应急措施。这种临时应急办法在实际生产检修当中经常碰到。

故障线圈被甩掉后，使每相绕组匝数减少，引起电动机气隙磁通密度增加，因此电动机的空载电流增加，铁损耗增加。如果仍按电动机铭牌的额定电流使用时，电动机会因损耗增加而发热。另外，由于甩掉一只或几只故障线圈，三相电流因三相阻抗不相等而造成三相不对称，尤其并联路数多的绕组，将在每相并联支路中产生循环电流。由于阻抗较小，所以这些循环电流值是不可低估的。为了避免发生循环电流，在甩故障线圈时，应使三相中每相线圈数相等，尤其每个并联支路中的线圈数目应相同。

考虑到甩线圈后的电动机铁心磁路要比正常时接近饱和，以及电动机空载电流与每相串联匝数的平方成反比，所以用下面公式来计算甩线圈后的空载电流 $I_{02}$ ，即

$$I_{02} = 1.15 \left( \frac{N_{\phi 1}}{N_{\phi 2}} \right)^2 I_{01} \quad (\text{A})$$

式中  $N_{\phi 1}$ 、 $N_{\phi 2}$ ——甩线圈前和甩线圈后的每相串联匝数，或者每相串联线圈数；



$I_{01}$ ——甩线圈前的电动机空载电流 (A)。

由于电动机绕组经甩掉线圈后铁损耗增加,空载电流也相应增加,所以在额定电压运行下的电动机经甩线圈后,必须降低出力使用,否则电动机发热严重,甚至不能运行。也就是说,如果负载机械要求电动机必须运行在额定输出功率时,则电动机不允许甩线圈。事实上,许多电动机并不都是在满载下运行,一般负载率都低于100%。因此为甩线圈后的电动机仍可能正常运行创造了条件。

在采取甩线圈修理电动机绕组之前,应考虑下列问题:

(1)电动机经甩线圈后,能否继续正常使用。

(2)甩线圈后的电动机电流应控制多大才能保证电动机温升不超限,正常运行。

(3)如果生产机械允许电动机甩线圈后降低出力,那么到底允许降低到什么程度。

为了回答上面一些问题,我们假设电动机经甩线圈修理后的最大负载电流为 $I_{2max}$ ,只要计算出来的 $I_{2max} \leq I_N$ (铭牌额定电流),就可以采用甩线圈法修理电机。另外,设电机未甩线圈之前,电机定子电流为 $I_1$ 。这个 $I_1$ 往往是小于 $I_N$ 的,即 $I_1 < I_N$ ,满足这个条件,就有可能保证甩线圈后的电机正常使用,下面用例子说明。

**例3-126** 一台JS117-4型三相异步电动机,150kW,额定电压3kV,额定电流36A。已知每相导线数24,定子槽数48,双层绕组,并联路数为1,空载电流为10A,有一只线圈对地击穿,为了应急生产,欲甩掉此故障线圈。问经甩掉线圈修理后的电动机的空载电流为多少,并确定经甩线圈后最大负载电流 $I_{2max}$ 是多大?已知此台电机是运行在满载情况下,实际定子电流 $I_1$ 等于额定电流 $I_N$ ,那么甩线圈后电动机负载电流将要超过额定电流,问超过多少,在不超额定电流的条件下,如果负载电流 $I_2$ 控制在35A左右,问定子电流 $I_1$ 应控制在多少。

已知电动机绕组为双层绕组,所以线圈总数等于电机槽数或

齿数，因此每相的线圈只数为  $\frac{48}{3} = 16$  只，现在欲甩去一只线圈，因此剩下 15 只，则甩后的电动机空载电流  $I_{02}$  为

$$I_{02} = 1.15 \left( \frac{16}{15} \right)^2 \times 10 = 13.08 \quad (\text{A})$$

已知电动机实际定子电流  $I_1$  为 36A，所以负载电流  $I_{2\max}$  为

$$I_{2\max} = \sqrt{(I_1^2 - I_{01}^2) + I_{02}^2} = \sqrt{(36^2 - 10^2) + 13.08^2} \\ = 36.97 (\text{A})$$

已知  $I_n = 36\text{A}$ 。

可见，甩线圈后最大负载电流大于电动机额定电流。为了使用这台电机，被迫要降低出力，即降低负载电流  $I_2$ ，比如  $I_2$  降低到 35A，这时电机定子电流  $I_1$  为

$$I_1 = \sqrt{I_2^2 + I_{01}^2 - I_{02}^2} = \sqrt{35^2 + 10^2 - 13.08^2} \\ = 33.96 (\text{A})$$

因此，电动机在运行时，只要控制定子电流不超过 34A，那么就可以保证最大负载电流在额定电流限度内，也就是保证电机不发热，能够正常运行。

**例3-127** 一台 JS115-6型三相异步电动机，75kW，额定电压380V，额定电流140A，每槽导线数为12，三路并联，空载电流为36A，定子槽数为72，实测定子电流  $I_1$  为120A。发现有一个线圈接地，欲采用甩线圈办法修复，问修理后空载电流是多少？电动机经甩线圈后能否带动原负载继续正常运行？

由于定子绕组是双层绕组，所以每相线圈数等于  $72/3 = 24$  个，但每相是三路并联，因此每相每个并联支路的线圈数为  $24/3 = 8$  个，甩掉一个剩 7 个，所以甩线圈后的空载电流为

$$I_{02} = 1.15 \left( \frac{8}{7} \right)^2 \times 36 = 54.07 (\text{A})$$

在甩线圈时，为了使各支路平衡，要使每相每支路都甩一个线圈，所以三相绕组共甩去 9 个线圈，并且要求在定子内圆对应的部位甩线圈，以防各支路不对称、产生循环电流和烧毁电机。

甩线圈后的最大负载电流  $I_{2\max}$  为

$$I_{2\max} = \sqrt{(I_1^2 - I_{01}^2) + I_{02}^2} = \sqrt{(120^2 - 36^2) + 54.07^2} \\ = 126.6 \text{ (A)}$$

由于计算出的  $I_{2\max}$  比额定电流小，所以电动机甩线圈后能正常运行。

对于并联路数为 1 的电动机绕组（见例 3-112），在甩某相线圈时，另外两相的相应的线圈可以不甩掉。实践表明，这种作法对电动机运行没有明显影响。甩掉的线圈（即切断的线圈）要将切断处用绝缘包扎好，因为短路线圈匝间还会产生感应电动势，形成环流。

#### 八、改制三相正弦绕组的计算

正弦绕组也叫  $\Delta$ - $\gamma$  混合绕组，或叫 30 度相带绕组。

$\Delta$ - $\gamma$  混合绕组是把普通电动机绕组的每极每相槽数为  $q$  的  $q$  个线圈分成两部分，比如  $q$  为偶数，就把  $\Delta$  联结部分的每极每相槽数  $q_{\Delta}$  分为  $\frac{q}{2}$ ，同样把  $\gamma$  联结部分的每极每相槽数的  $q_{\gamma}$

也分为  $\frac{q}{2}$ ，即  $q_{\Delta} = q_{\gamma}$ ，比如  $q = 6$ ，则  $q_{\Delta} = q_{\gamma} = 3$ 。这样每个

$q_{\Delta}$  或  $q_{\gamma}$ ，各占据 30° 相带（原来只占据 60° 相带），因此又把  $\Delta$ - $\gamma$  混合绕组称为 30° 相带绕组。线圈组分配好后，把所有  $q_{\Delta}$  线圈组按普通绕组规律连接在一起构成  $\Delta$  形部分绕组，再把所有  $q_{\gamma}$  线圈组联结在一起构成  $\gamma$  形部分绕组。因此，把 60° 相带的一套绕组分成两套绕组，这两套绕组可以接成延边三角形（ $\Delta$  形）或混合三角形（ $\Delta$  形），一般都是接成延边三角形。这两套绕组分别产生自己的旋转磁场，电动机气隙中的总磁场是由这两部分合成的。由于  $\gamma$  形部分绕组中的电流比  $\Delta$  形部分绕组中的电流滞后 30° 电角度，所以定子槽中总电流在任一瞬间，沿圆周分布更接近正弦形，所以这种绕组能改善电动机性能，降低损耗，提高电动机效率，改善电动机功率因数和噪声等。通过实践表明，改用此绕组后，电动机效率提高 2% ~ 4%，尤其少极电机，效果

更显著。

**例3-128** 有一台三相笼型转子异步电动机，已知定了槽数  $Z_1$  为48槽，4极，试改为三相正弦绕组。

每极每相槽数为

$$q = \frac{Z_1}{2mp} = \frac{48}{3 \times 4} = 4$$

槽距角为

$$\alpha_1 = \frac{60^\circ}{q} = \frac{60^\circ}{4} = 15^\circ$$

因  $q = 4$ ，所以  $q_\Delta = q_Y = \frac{q}{2} = 2$ ，即把每个极相组中的4个串联线圈分成相等的两部分，相邻两个串联线圈属于Y形部分，另外两个相邻串联的线圈属于Δ形部分。

图3-22是原来绕组联结图（仅画出一相），图3-23是把原来的60°相带绕组分成30°相带后的联结简图（仅画出一相）。现用1、2、3、……表示每槽的线圈号，则上面简图可画出实际联结图。图3-24是各相绕组的联结图，图3-25是接成Y形和Δ形联结图（一般不采用Δ形联结，因为易产生环流）。

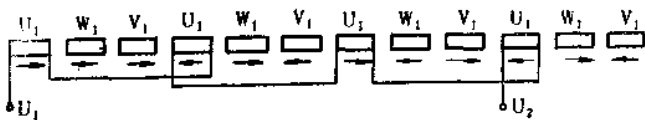


图3-22 60°相带绕组联结简图

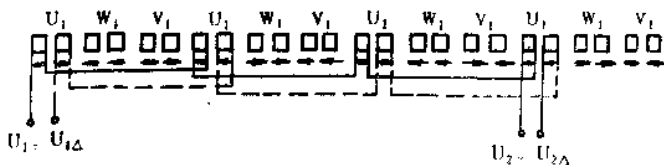


图3-23 改Δ-Y混合绕组联结简图

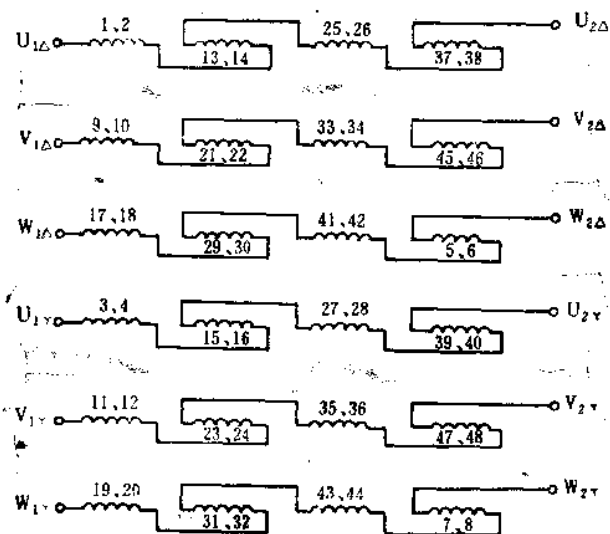


图3-24 各相绕组的联结图

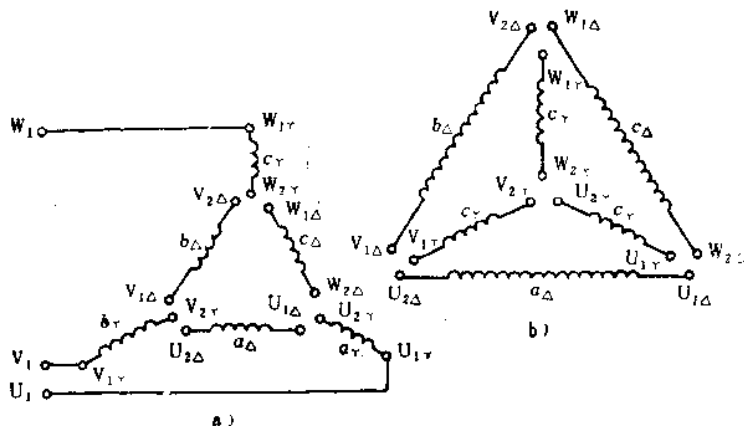


图3-25 A形和Δ形联结图

a) A形联结图 b) Δ形联结图

如果  $q$  是奇数, 可把  $q$  分为一个偶数和一个奇数, 比如  $q = 6$ , 可分为  $q_{\Delta} = 2$  和  $q_Y = 1$ , 或者分为  $q_{\Delta} = 2$ ,  $q_{Y1} = 3$  ( $q_{Y2} = 2$ ,  $q_{Y3} = 1$ )。

**例3-129** 将 J2-81-8 三相异步电动机绕组改绕为  $\Delta$ -Y 混合联结的正弦绕组, 试计算绕组线圈匝数和导线截面积。已知电机容量为 22kW,  $2\Delta$  联结, 380V, 45.2A, 定子槽数  $Z_1$  为 72 槽, 双叠绕组, 线圈节距  $y_1$  为 1~9 槽, 并联路数  $a = 2$ , 每槽导体数为 30, 每线圈匝数为 15 匝, 导线为 2- $\phi 1.25$ mm。

因为每极每相槽数  $q = \frac{Z_1}{2mp} = \frac{72}{3 \times 8} = 3$ , 故采取  $q_{\Delta} =$

2,  $q_Y = 1$  的分配方案, 极距  $\tau = \frac{Z_1}{2p} = \frac{72}{8} = 9$ , 线圈节距  $y_1 = 8$ 。

查表 3-22 计算  $\Delta$  联结中的 Y 形部分线圈匝数和  $\Delta$  形部分线圈匝数, 同时可确定出相应的导线截面积  $S_Y$  和  $S_{\Delta}$ 。

Y 形部分线圈匝数为

$$N_Y = \frac{1.1}{\sqrt{3}} N_{原} = \frac{1.1}{\sqrt{3}} \times 15 = 9.52 \text{ 匝, 取 } 10 \text{ 匝}$$

$\Delta$  形部分线圈匝数为

$$N_{\Delta} = N_{原} = 15 \text{ 匝}$$

式中  $N_{原}$ ——为原绕组的线圈匝数。

Y 形部分导线截面积为

$$S_Y = \frac{\sqrt{3}}{1.1} S_{原} = \frac{\sqrt{3}}{1.1} \times 2 \times 1.227 = 3.864 \text{ mm}^2$$

选用 2- $\phi 1.56$ mm 导线,  $S_{原}$  为原导线截面积。

$\Delta$  形部分导线截面积  $S_Y = S_{原} = 2.454 \text{ mm}^2$

仍采用 2- $\phi 1.25$ mm 电磁线。

**例3-130** 有一台 JS116-4 型 125kW 三相异步电动机, 3kV, Y 联结, 线圈节距  $y_1 = 1 \sim 11$ , 定子槽数  $Z_1$  为 48 槽, 每槽导体数为 32, 定子线规为 1-1.56 $\times$ 3.53, 双层叠绕组。求改绕成

表 3-22 三相绕组改 A 联结时匝数和导线截面积计算

每槽导体数和导线截面积	A 联结时各部匝数和导线截面积计算					
	A 联结的 Y 形部分			A 联结的 Δ 形部分		
	q 为偶数	q 为奇数	q 为偶数	q 为奇数	q 为偶数	q 为奇数
原三相绕组 为 Y 联结	$q_Y = q_{\Delta} = \frac{q}{2}$	$q_Y = 3$ $q_{\Delta} = 2$ $q_Y = 1$	$q_Y = 5$ 及以上	$q_Y = q_{\Delta} = \frac{q}{2}$	$q_Y = 3$ $q_{\Delta} = 2$ $q_Y = 1$ ①	$q_Y = 5$ 及以上
	$N_Y = N_{原}$	$N_Y = N_{原}$	$N_Y = N_{原}$	$N_{\Delta} = \sqrt{3} N_{原}$	$N_{\Delta} = \frac{\sqrt{3}}{1.1} N_{原}$	$N_{\Delta} = \sqrt{3} N_{原}$
原三相绕组 为 Δ 联结	$S_Y = S_{原}$	$S_Y = S_{原}$	$S_Y = S_{原}$	$S_{\Delta} = \frac{1}{\sqrt{3}} S_{原}$	$S_{\Delta} = \frac{1.1}{\sqrt{3}} S_{原}$	$S_{\Delta} = \frac{1}{\sqrt{3}} S_{原}$
	$N_Y = \frac{1}{\sqrt{3}} N_{原}$	$N_Y = \frac{1.1}{\sqrt{3}} N_{原}$	$N_Y = \frac{1}{\sqrt{3}} N_{原}$	$N_{\Delta} = N_{原}$	$N_{\Delta} = N_{原}$	$N_{\Delta} = N_{原}$
	$S_Y = \sqrt{3} S_{原}$	$S_Y = \frac{\sqrt{3}}{1.1} S_{原}$	$S_Y = \sqrt{3} S_{原}$	$S_{\Delta} = S_{原}$	$S_{\Delta} = S_{原}$	$S_{\Delta} = S_{原}$

① 选用跨距  $y_1 = \frac{8}{9} - \tau$  比  $y_2 = \frac{11}{12} - \tau$  优越。

△-Y混合绕组时的线圈匝数和导线截面积。

因为每极每相槽数  $q = \frac{Z_1}{2mp} = \frac{48}{3 \times 4} = 4$ ，所以选  $q_{\Delta} = q_Y = 2$ 。已知双层绕组，每槽导体数为32，则每线圈匝数为16，按表3-22公式计算得：

$$N_Y = N_{原} = 16 \text{匝}$$

$$N_{\Delta} = \sqrt{3} N_{原} = 27.7 \text{匝，选28匝}$$

$$S_Y = S_{原} = 3.9468 \text{mm}^2$$

$$S_{\Delta} = \frac{1}{\sqrt{3}} S_{原} = 2.28 \text{mm}^2$$

最后按槽满率，选用导线规格。

#### 4. 改制后绕组系数的计算

(1)  $q$  为偶数 (即  $q_Y = q_{\Delta} = \frac{q}{2}$ ) 时计算方法 △形部分的绕组系数为

$$K_{sp\Delta} = \frac{\sin\left(\frac{q}{2} \frac{v\alpha_1}{2}\right)}{\frac{q}{2} \sin\left(\frac{v\alpha_1}{2}\right)} \cdot \sin\left(p \frac{y_1}{\tau} \frac{\pi}{2}\right)$$

Y形部分的绕组系数  $K_{spY}$  同△形部分

式中  $q$ ——原绕组的每极每相槽数， $q = \frac{Z_1}{2m_1 p}$ ；

$p$ ——电机的极对数；

$m_1$ ——电机相数；

$Z_1$ ——定子槽数；

$\alpha_1$ ——定子槽距角， $\alpha_1 = \frac{60^\circ}{q}$ ；

$v$ —— $v$ 次谐波，分别为1、3、5、7、9、11、13…，  
对于基波， $v = 1$ ；

$\tau$ ——电机的极距， $\tau = \frac{Z_1}{2p}$ ；



$y_1$ ——定子线圈跨距（槽）。

计算出  $K_{ap\Delta}$  和  $K_{apY}$  后，便可按下式计算  $\Delta$ - $Y$  混合绕组的各次谐波绕组系数  $K_{apv}$ 。

因  $q$  为偶数，所以  $\Delta$  形部分绕组和  $Y$  形部分绕组所占槽数相等，故有

$$K_{apv} = \frac{\frac{Z_{\Delta}}{a_{\Delta}} K_{apv\Delta} + (-1)^k \sqrt{\frac{3}{8}} \frac{Z_Y}{a_Y} K_{apvY}}{\frac{Z_{\Delta}}{a_{\Delta}} + \sqrt{\frac{3}{8}} \frac{Z_Y}{a_Y}}$$

式中  $Z_{\Delta}$ 、 $Z_Y$ —— $\Delta$  形部分绕组和  $Y$  形部分绕组的每槽导体数或每线圈匝数；

$a_{\Delta}$ 、 $a_Y$ —— $\Delta$  形部分绕组和  $Y$  形部分绕组的并联路数；

$K$ ——系数，当  $K = 1$  时，为反相位，对应 5、7 次谐波；当  $K = 2$  时，为同相位，对应 1、11、13 次谐波。

**例3-131** 有一台 JO2-82-2 型三相异步电动机，40kW，定子槽数为 36 槽，每线圈匝数为 13 匝，双层绕组，线圈节距  $y_1 = 1 \sim 13$  槽， $\Delta$  接线，380V，并联路数  $a = 2$ ，线圈导线为  $1-\phi 1.50$  和  $2-\phi 1.56$  并绕，改三相正弦绕组时，试计算其绕组系数

每极每相槽数  $q = \frac{Z_1}{2m_1p} = \frac{36}{3 \times 2} = 6$ ，为偶数，所以  $\Delta$  形和  $Y$  形部分的每极每相槽数为

$$q_Y = q_{\Delta} = \frac{q}{2} = 3$$

槽距角为

$$\alpha_1 = \frac{60^\circ}{q} = \frac{60^\circ}{6} = 10^\circ$$

已知线圈节距  $y_1 = 12$ ，所以极距为

$$\tau = \frac{Z_1}{2p} = \frac{36}{2} = 18$$

Y形、△形部分的绕组系数为

$$K_{apY} = K_{ap\Delta} = \frac{\sin(3\nu \times 5^\circ)}{\sin(\nu \times 5^\circ)} \sin\left(\nu \times \frac{12}{18} \times \frac{180^\circ}{2}\right)$$

当  $\nu = 1$  时，即基波绕组系数为

$$K_{ap1\Delta} = K_{ap1Y} = \frac{\sin 15^\circ}{3 \sin 15^\circ} \sin 60^\circ = 0.859$$

当  $\nu = 5$  时，即5次谐波绕组系数为

$$K_{ap5\Delta} = K_{ap5Y} = \frac{\sin(15^\circ \times 5)}{3 \sin(5 \times 5^\circ)} \sin(5 \times 60^\circ) = 0.381$$

当  $\nu = 7$  时，即7次谐波绕组系数为

$$K_{ap7\Delta} = K_{ap7Y} = \frac{\sin(15^\circ \times 7)}{3 \sin(7 \times 5^\circ)} \sin(7 \times 60^\circ) = 0.486$$

当  $\nu = 11$  时，即11次谐波绕组系数为

$$K_{ap11\Delta} = K_{ap11Y} = \frac{\sin(15^\circ \times 11)}{3 \sin(11 \times 5^\circ)} \sin(11 \times 60^\circ) = -0.0913$$

当  $\nu = 13$  时，即13次谐波绕组系数为

$$K_{ap13\Delta} = K_{ap13Y} = \frac{\sin(15^\circ \times 13)}{3 \sin(13 \times 5^\circ)} \sin(13 \times 60^\circ) = -0.0824$$

已知原绕组为双层叠绕组，△接线，每线圈13匝， $a = 2$ ，查表3-22，则可求出改制三相正弦绕组时的△和Y形部分的每线圈匝数分别为

$$N_Y = \frac{1}{\sqrt{3}} N_{原} = 7.51 \text{匝，取8匝}$$

$$N_{\Delta} = N_{原} = 13 \text{匝}$$

即  $Z_{\Delta}$  为13， $Z_Y$  为8，计算△-Y绕组系数(令  $a_Y = a_{\Delta} = a =$

2 不变) 为

$$K_{ap\nu} = \frac{\left(\frac{Z_{\Delta}}{a_{\Delta}} + (-1)^{\nu} \sqrt{3} \frac{Z_Y}{a_Y}\right) K_{ap\nu Y}}{\frac{Z_{\Delta}}{a_{\Delta}} + \sqrt{3} \frac{Z_Y}{a_Y}}$$

$$= \frac{[13 + (-1)^{\nu} \sqrt{3} \times 8] K_{ap\nu Y}}{13 + \sqrt{3} \times 8}$$

当  $\nu = 1$  时, 基波绕组系数  $K_{ap1}$  为

$$K_{ap1} = \frac{(13 + 14)0.859}{27} = 0.859$$

当  $\nu = 5$  时, 5 次谐波绕组系数  $K_{ap5}$  为

$$K_{ap5} = \frac{(13 - 14)0.381}{27} = -0.0141$$

当  $\nu = 7$  时, 7 次谐波绕组系数  $K_{ap7}$  为

$$K_{ap7} = \frac{(13 - 14)0.486}{27} = -0.018$$

当  $\nu = 11$  时, 11 次谐波绕组系数  $K_{ap11}$  为

$$K_{ap11} = \frac{(13 + 14)(-0.0913)}{27} = -0.0913$$

当  $\nu = 13$  时, 13 次谐波绕组系数  $K_{ap13}$  为

$$K_{ap13} = \frac{(13 + 14)(-0.0824)}{27} = -0.0824$$

(2)  $q$  为奇数时计算方法  $q$  为奇数, 即  $q = 3, q_{\Delta} = 2, q_Y = 1$  和  $q = 5, q_{\Delta} = 2, q_Y = 3(q_{Y1} = 2, q_{Y2} = 1)$  时的计算方法。

1)  $q = 3, q_{\Delta} = 2, q_Y = 1$  的情况

例 3-132 JO2-62-4 三相异步电动机, 已知电机容量为 17 kW, 4 极, 定子槽数为 36 槽, 并联路数  $a = 1$ , 双层叠绕组, 每线圈 12 匝, 线圈节距  $y_1 = 7$ ,  $\Delta$  联结, 导线  $1 - \phi 1.45$ 。

槽距角为

$$\alpha_1 = \frac{60^\circ}{q} = \frac{60^\circ}{3} = 20^\circ$$

极距为

$$\tau = \frac{Z_1}{2p} = \frac{36}{4} = 9$$

由于  $q_{\Delta} = 2$ ，所以  $\Delta$  形部分的绕组系数计算公式为

$$K_{dp\Delta} = \frac{\sin(\nu a_1)}{2\sin\left(\frac{\nu a_1}{2}\right)} \sin\left(\nu \frac{y_1}{\tau} \frac{\pi}{2}\right)$$

由于  $q_Y = 1$ ，所以  $Y$  形部分的绕组系数计算公式为

$$K_{dpY} = \sin\left(\nu \frac{y_1}{\tau} \frac{\pi}{2}\right)$$

将已知数据代入，求出  $\Delta$  形部分绕组系数为

$$K_{dp1\Delta} = \frac{\sin 20^\circ}{2\sin 10^\circ} \sin(70^\circ) = 0.926$$

$$K_{dp2\Delta} = \frac{\sin 100^\circ}{2\sin 50^\circ} \sin(5 \times 70^\circ) = -0.112$$

$$K_{dp3\Delta} = \frac{\sin 140^\circ}{2\sin 70^\circ} \sin(7 \times 70^\circ) = 0.262$$

$$K_{dp4\Delta} = \frac{\sin 220^\circ}{2\sin 110^\circ} \sin(11 \times 70^\circ) = -0.262$$

$$K_{dp5\Delta} = \frac{\sin 260^\circ}{2\sin 130^\circ} \sin(13 \times 70^\circ) = 0.112$$

将已知数据代入，求出  $Y$  形部分绕组系数为

$$K_{dp1Y} = \sin\left(\frac{1 \times 7}{9} \times \frac{180}{2}\right) = 0.940$$

$$K_{dp2Y} = \sin\left(\frac{5 \times 7}{9} \times \frac{180}{2}\right) = -0.174$$

$$K_{dp3Y} = \sin\left(\frac{7 \times 7}{9} \times \frac{180}{2}\right) = 0.766$$

$$K_{dp4Y} = \sin\left(\frac{11 \times 7}{9} \times \frac{180}{2}\right) = -0.766$$

$$K_{ap13Y} = \sin \left( \frac{13 \times 7}{9} \times \frac{180}{2} \right) = -0.174$$

$\Delta$ -Y混合绕组的绕组系数  $K_{apv}$  为

$$K_{apv} = \frac{\frac{2Z_{\Delta}}{a_{\Delta}} K_{apv\Delta} + (-1)^k \sqrt{3} \frac{Z_Y}{a_Y} K_{apvY}}{\frac{2Z_{\Delta}}{a_Y} + \sqrt{3} \frac{Z_Y}{a_Y}}$$

为了计算Y- $\Delta$ 混合绕组系数，还要先计算出  $Z_{\Delta}$ 和 $Z_Y$ 或  $N_{\Delta}$ 和  $N_Y$  按表3-22得知：

$$N_Y = \frac{1.1}{\sqrt{3}} N_{原} = \frac{1.1}{\sqrt{3}} \times 12 = 7.62 \text{ 匝, 取 7 匝}$$

$$N_{\Delta} = N_{原} = 12 \text{ 匝}$$

下面为简单起见，只求基波绕组系数  $K_{ap1}$ ，即

$$K_{ap1} = \frac{\frac{2 \times 12}{1} \times 0.926 + \sqrt{3} \times \frac{7}{2} \times 0.940}{\frac{2 \times 12}{1} + \sqrt{3} \times \frac{7}{2}} = 0.928$$

当线圈节距采用  $\frac{11}{12}$ ， $\tau = \frac{11}{12} \times 9 = 8.25$ ，取  $y = 8$  时，

则 $\Delta$ 形和Y形部分绕组的基波绕组系数为

$$K_{ap1\Delta} = \frac{\sin 20^{\circ}}{2 \sin 10^{\circ}} \sin \left( \frac{8}{9} \times 90^{\circ} \right) = 0.970$$

$$K_{ap1Y} = 0.985$$

$\Delta$ -Y混合绕组的基波绕组系数  $K_{ap1}$  为

$$K_{ap1} = \frac{2 \times 12 \times 0.97 + 6 \times 0.985}{30} = 0.973$$

未改 $\Delta$ -Y混合绕组之前，电机绕组的基波绕组系数为

$$K_{ap} = \frac{\sin \left( \frac{20}{2} \times 3 \right)}{3 \sin \left( \frac{20}{2} \right)} \sin \left( \frac{7}{9} \times 90^{\circ} \right)$$

$$= 0.902$$

可见，改后绕组系数提高。为了保持原电机的有效匝数不变，则有条件在 $\Delta$ - $Y$ 混合绕组时减少电机匝数，从而给增大导线截面创出条件。

按上述计算得  $N_Y = 7.62$ 匝， $N_\Delta = 12$ 匝，考虑绕组系数提高后，修正  $N_Y$ 和  $N_\Delta$ 分别为

$$N'_Y = \frac{0.902}{0.973} \times 7.62 = 7.06 \text{匝，取 7 匝}$$

$$N'_\Delta = \frac{0.902}{0.973} \times 12 = 11.12 \text{匝，取 11匝}$$

已知原导线为1- $\phi 1.45$ ，其截面积为  $1.651 \text{mm}^2$ ，按表3-22计算 $\Delta$ - $Y$ 混合绕组的导线截面积为

$$S_Y = \frac{\sqrt{3}}{1.1} S_{\text{原}} = \frac{\sqrt{3}}{1.1} \times 1.651 = 2.60 \text{mm}^2$$

$$S_{\text{原}} = S_{\text{原}} = 1.651 \text{mm}^2$$

考虑绕组系数的提高，修正的导线截面积分别为

$$S'_Y = \frac{0.973}{0.902} \times 2.60 = 2.804 \text{mm}^2，\text{取 } \phi 1.35 \text{mm 导线两根}$$

并绕， $\phi 1.35$ 的截面积为  $1.431 \text{mm}^2$ ，两根截面积为  $2.862 \text{mm}^2$ ，接近  $S'_Y$ 。

$$S'_\Delta = \frac{0.973}{0.902} \times 1.651 = 1.781 \text{mm}^2，\text{取 } \phi 1.50 \text{mm 导线单}$$

根绕，其截面积接近  $S'_\Delta$ 。

2)当  $q = 5$ ， $q_\Delta = 2$ 、 $q_Y = 3$  ( $q_{Y1} = 2$ ， $q_{Y2} = 1$ ) 的情况。对于这种方案，为了使总合成磁场势波形很接近正弦波， $\Delta$ 形部分绕组与 $Y$ 形部分绕组的线圈匝数比应按下面规律分配，即

$$N_{Y2} : N_{Y1} : N_\Delta = 1 : 0.3473 : 1.185$$

$$\text{即 } N_{Y1} = 0.3473 N_{Y2}，N_\Delta = 1.185 N_{Y2}$$

设  $q_Y$ 的3个线圈匝数分别为  $N_{Y1}$ 、 $N_{Y1}$ 、而 $\Delta$ 形部分的  $q_\Delta$ 线圈匝数为  $N_\Delta$ ，则应先确定  $N_{Y2}$ ，便可按上述关系求出  $N_{Y1}$ 、

$N_{\Delta}$ 。

已知原绕组的接线方式为 $\Delta$ 形，即  $N_{原} = 12$ 匝，从表3-22得知：

$$N_{Y2} = \frac{1}{\sqrt{3}} N_{原} \approx \frac{1}{\sqrt{3}} \times 12 = 6.928 \text{匝，取 7 匝}$$

$$N_{Y1} = \frac{0.3473}{\sqrt{3}} N_{原} \approx \frac{0.3473}{\sqrt{3}} \times 12 = 2.41 \text{匝，取 2 匝}$$

$$N_{\Delta} = 1.185 \times 6.928 = 8.21 \text{匝，取 8 匝}$$

导线截面积按表3-22计算得：

$$S_{Y1} = \frac{\sqrt{3}}{0.3473} S_{原} = \frac{\sqrt{3}}{0.3473} \times 1.651 = 8.241 \text{mm}^2$$

选用5- $\phi 1.45$ mm 导线并绕。

$$S_{Y2} = \sqrt{3} S_{原} = 2.859 \text{mm}^2$$

选用2- $\phi 1.35$ mm 并绕。

$$S_{\Delta} = \frac{1}{1.185} S_{Y2} = \frac{2.859}{1.185} = 2.413 \text{mm}^2$$

选用2- $\phi 1.30$ mm 并绕。

### 九、三相异步电动机改成三相异步发电机的计算

根据电动机可逆原理，如果用原动机拖动三相异步电动机旋转，利用电动机内部剩磁，并配以适当的励磁电容器进行励磁，就可以当发电机使用。发电量大小和运行情况取决于配制的电容器电容量大小、电动机转速高低以及负载性质。电容器的领先电流能使电动机自励，建立发电机所需的空载电压，所以发电机空载电压大小与电动机转速和励磁电容器的电容量大小有关，可见计算电容器的电容量是三相异步发电机的关键问题。

励磁电容器的联结有Y联结和 $\Delta$ 联结两种，三相三线制两种异步发电机与电容器的联结，如图3-26和图3-27所示；三相四线制的四种异步发电机与电容器的联结，如图3-28和图3-29所示。

#### 1. 励磁电容 $C_1$ 的计算

电容器 $\Delta$ 接时则有

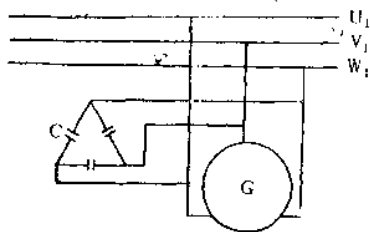


图3-26 发电机绕组 $\Delta$ （或Y）  
联结电容为 $\Delta$ 联结

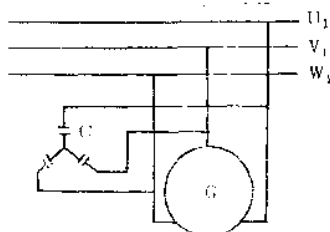


图3-27 发电机绕组 $\Delta$ （或Y）联  
结电容为Y联结

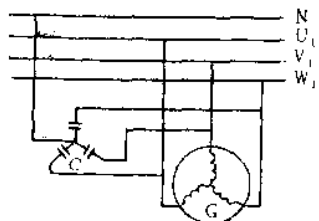


图3-28 发电机绕组 $\Delta$ 联结，电容  
Y联结，中性点从电容抽出

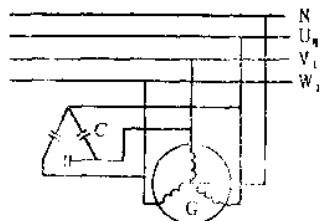


图3-29 发电机绕组Y联结，电容  
 $\Delta$ 联结，中性点从发电机抽出

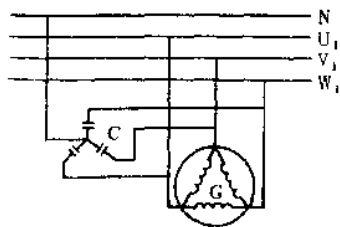


图3-30 发电机及电容均是Y联  
结，中性点从电容抽出

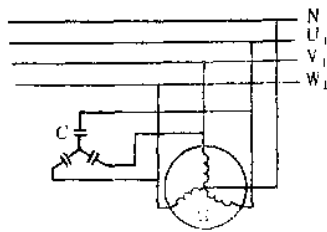


图3-31 发电机及电容均是Y联结，  
中性点从发电机抽出



$$C_1 = \frac{I_0 \times 10^0}{2\pi f \sqrt{3} U_N} \quad (\mu\text{F})$$

电容器Y接时则有

$$C_1 = \frac{\sqrt{3} I_0 \times 10^0}{2\pi f U_N} \quad (\mu\text{F})$$

式中  $I_0$ ——电动机空载电流(A)；

$U_N$ ——电动机额定电压(V)；

$f$ ——电动机额定频率(Hz)。

为了维持发电机端电压的稳定，当发电机接负载后，必须增加适当电容量来补偿。

### 2. 辅助电容计算

若负载是纯电阻时，增加25%，即

$$C_2 = 1.25C_1$$

若负载是感性负载时，设其功率因数为  $\cos\varphi$ ，额定时要增加电容以补偿负载无功功率，即

$$C_3 = \frac{P_N \times 10^3 / \cos\varphi_N (\sqrt{1 - \cos^2\varphi}) \times 10^0}{3 \times 2\pi f U_N^2} \quad (\mu\text{F})$$

式中  $P_N / \cos\varphi_N$ ——是发电机的容量(kVA)；

$\cos\varphi$ ——是负载功率因数；

$\cos\varphi_N$ ——是电动机的额定功率因数。

总的电容量  $C_T$  为

$$C_T = C_2 + C_3 \quad (\mu\text{F})$$

电容器选择注意事项：

- (1) 电容器不可长时间过载；
- (2) 不要选用直流电解电容器；
- (3) 电容器接法尽可能选用△联结，比Y接省1/3电容量。

**例3-133** 有一台75kW三相异步电动机，已知  $U_N = 380\text{V}$ ， $I_N = 134.5\text{A}$ ， $\cos\varphi_N = 0.85$ ， $I_0 = 20.8\text{A}$ ，负载功率因数  $\cos\varphi = 0.8$ ，电容器采用△联结，改发电机使用，问励磁电容量大小如何确定。

励磁电容  $C_1$  为

$$C_1 = \frac{I_0 \times 10^8}{2\pi f \sqrt{3} U_N} = \frac{20.8 \times 10^8}{2\pi \times 50 \times \sqrt{3} \times 380} = 100.6 \mu\text{F}$$

辅助电容  $C_2$  为

$$C_2 = 1.25 \times C_1 = 1.25 \times 100.6 = 125.7 \mu\text{F}$$

补偿电容  $C_3$  为

$$C_3 = \frac{P_N \times 10^8 / \cos \varphi_N (\sqrt{1 - \cos^2 \varphi})}{3 \times 2\pi f \cdot U_N^2} \times 10^6$$

$$= \frac{75000}{3 \times 2\pi \times 50 \times 380^2} \times 10^6 = \frac{52941.2 \times 10^6}{136 \times 10^6}$$

$$= 389.3 \mu\text{F}$$

总电容量  $C_t$  为

$$C_t = C_2 + C_3 = 121.7 + 389.3 = 515 \mu\text{F}$$

**例3-134** 有一台 Y160M-4 三相异步电动机，欲改为三相异步发电机使用，已知  $P_N = 11 \text{ kW}$ ， $U_N = 380 \text{ V}$ ， $f = 50 \text{ Hz}$ ， $I_0 = 7.2 \text{ A}$ ，试求励磁电容大小。

电容器  $\Delta$  联结时则有

$$C_1 = \frac{I_0 \times 10^8}{2\pi f \sqrt{3} U_N} = \frac{7.2 \times 10^8}{2\pi \times 50 \times \sqrt{3} \times 380} = 34.8 \mu\text{F}$$

电容器  $\text{Y}$  联结时则有

$$C_t = \frac{\sqrt{3} I_0 \times 10^8}{2\pi f U_N} = \frac{\sqrt{3} \times 7.2 \times 10^8}{2\pi \times 50 \times 380} = 104.5 \mu\text{F}$$

$$C_t / C_1 = \frac{104.5}{34.8} = 3$$

可见采用  $\text{Y}$  联结时比  $\Delta$  联结时的电容器容量要大 3 倍，所以尽量采用  $\Delta$  联结。

**例3-134** 一台 JO2-31-2 电动机，已知  $P_N = 3 \text{ kW}$ ， $U_N = 380 \text{ V}$ ， $I_N = 6.1 \text{ A}$ ， $I_0 = 1.95 \text{ A}$ ，如做发电机使用时，问电容器  $\Delta$  联结时，总电容是多少，已知负载是纯电阻。

励磁电容 $C_1$ 为

$$C_1 = \frac{I_0 \times 10^9}{2\pi f \sqrt{3} U_N} = \frac{1.95 \times 10^9}{2\pi \times 50 \times \sqrt{3} \times 380}$$

$$= 9.43 \mu\text{F}$$

考虑到纯电阻负载电容量增加25%，则有

$$C_2 = 1.25C_1 = 1.25 \times 9.43 = 11.8 \mu\text{F}$$

电容器总电容量为11.8 $\mu\text{F}$

**例3-135** 一台Y132M-4三相异步电动机，已知 $P_N = 7.5 \text{ kW}$ ， $U_N = 380 \text{ V}$ ， $\cos\varphi_N = 0.85$ ， $I_0 = 4.5 \text{ A}$ ，负载功率因数 $\cos\varphi = 0.8$ ，改为发电机使用，电容器采用 $\Delta$ 联结，试求电容器的总电容量是多少。

(1) 空载励磁电容 $C_1$ 为

$$C_1 = \frac{I_0 \times 10^9}{2\pi f \sqrt{3} U_N} = \frac{4.5 \times 10^9}{2\pi \times 50 \times \sqrt{3} \times 380}$$

$$= 21.8 \mu\text{F/相}$$

(2) 考虑负载辅助电容 $C_2$ 为

$$C_2 = 1.25C_1 = 1.25 \times 21.8 = 27.2 \mu\text{F/相}$$

(3) 补偿无功功率所需电容值 $C_3$ 为

$$C_3 = \frac{P_N \times 10^9 / \cos\varphi_N (\sqrt{1 - \cos^2\varphi})}{3 \times 2\pi f U_N^2}$$

$$= \frac{7500 / 0.85 (\sqrt{1 - 0.8^2})}{3 \times 2\pi \times 50 \times 380^2} = 38.9 \mu\text{F/相}$$

(4) 总电容值 $C$ 为

$$C = C_2 + C_3 = 27.2 + 38.9 = 66.1 \mu\text{F/相}$$

## 十、三相异步电动机空壳铁心配定子绕组的简易计算

### 1. 确定电机的极数

$$2p = \frac{D_{i1}}{1.8k_{e1}}$$

式中  $D_{i1}$ ——定子铁心内径(cm)，

$h_{e1}$ ——定子铁心轭部高度(cm)。

将计算出的数值选取一个接近的正偶数。

为了电动机重绕后起动性能良好、运行正常，要求下列不等式成立。

(1) 为防止改后的电动机“爬行”现象，要求

$$Z_2 \neq p(3i + 1)$$

$$Z_2 \neq p(3i)$$

(2) 为防止起动时发生卡住现象，要求

$$Z_2 \neq Z_1 + \frac{p}{2}$$

$$Z_2 \neq Z_1 + p$$

$$Z_2 \neq 0.5Z_1 + \frac{p}{2}$$

$$Z_2 \neq 2Z_1 + p$$

(3) 为防止电动机振动和噪声，要求

$$Z_2 \neq p(3i \pm 1)$$

$$Z_2 \neq 3i \pm (p - 1)$$

以上式中  $i$ ——自然整数，如1, 2, 3, 4, …,  $n$ ;

$p$ ——电机极对数;

$Z_1$ ——定子槽数;

$Z_2$ ——转子槽数。

## 2. 估算电动机功率

根据电机定子铁心长度、内径、极数和电动机形式，查阅国产同类型相近铁心尺寸的电动机进行比较，从而估算出近似功率。

对于早年和国外老产品，可按下式估算电动机的额定功率，即

$$P_N = \frac{(0.74 \sim 0.97) D_{i1}^2 l B_d A n_1}{10^6} \quad (\text{kW})$$

$$n_1 = \frac{120f_1}{2p} \quad (\text{r/min})$$

上两式中  $l$ ——定子铁心长度 (cm) ;

$B_\delta$ ——气隙磁通密度 (T) , 见表3-23, 60年代后见表3-24;

$A$ ——线负载(A/cm), 见表3-23;

$n_1$ ——电动机同步转速(r/min);

$f_1$ ——电源频率(Hz);

0.74~0.97——经验系数, 容量大者选大值, 反之取小值。

表3-23 三相异步电动机气隙磁密 $B_\delta$ 和线负载 $A$ (老系列电动机)

极数	参数	极距 $\tau$ (cm)		
		20以下	20~40	40~70
$2p=2$	$B_\delta$ (T)	0.50~0.60	0.65~0.65	0.65~0.58
$2p=2$	$A$ (A/cm)	120~200	200~300	300~420
$2p=4$	$B_\delta$ (T)	0.65~0.70	0.70~0.73	0.73~0.76
$2p=4$	$A$ (A/cm)	200~300	300~380	380~460
$2p=6$	$B_\delta$ (T)	0.70~0.73	0.73~0.76	0.76~0.78
$2p=6$	$A$ (A/cm)	220~320	320~380	380~460

### 3. 计算每槽导线根数

(1) 根据气隙磁密计算每槽导体数

$$N_\delta = \frac{(1.12 \sim 1.23)U_\phi 2p \times 10^2}{D_{i1} l Z_1 B_\delta K_{d\phi 1}} \quad (\text{根/槽})$$

式中  $U_\phi$ ——相电压(V);

$K_{d\phi 1}$ ——定子绕组系数, 初算按0.96计算, 可查表3-24~表3-27。

具有通风道的定子铁心, 其长度为

$$l = \text{铁心总长} - \frac{\text{通风道总长}}{2} \quad (\text{cm})$$

(2) 根据齿部磁密计算每槽导体数

表3-24 铁芯磁通密度 (60年代后生产的电动机)

电机极数	磁通密度 (T)	定子铁心内径(cm)		
		15以下	15~25	25以上
2	$B_d$	0.6~0.67		
2~6		0.65~0.8	0.8~0.9	
2	$B_{d1}$	1.2~1.6	1.2~1.7	
2~6		1.1~1.5	1.2~1.5	1.3~1.5
不论极数齿高1/3处	$B_{d1}$	1.3~1.5	1.5~1.8	

$$N_s = \frac{(3.82 \sim 4.21) U_e 2p \times 10^2}{Z_1^2 b_{d1} l B_{d1} K_{d p1}} \quad (\text{根/槽})$$

式中  $b_{d1}$ ——齿宽的最窄处宽度 (cm) ;

$B_{d1}$ ——定子齿磁密, 一般取1.40~1.75T, 不可超过1.80T。

(3) 根据 轭部磁密计算每槽导体数

$$N_e = \frac{(1.27 \sim 1.39) U_e \times 10^2}{Z_1 h_{e1} l B_{e1} K_{d p1}} \quad (\text{根/槽})$$

式中  $h_{e1}$ ——定子铁心轭高(cm);

$B_{e1}$ ——定子轭部磁密, 一般取1.20~1.50T, 不可超过1.70T。

如果定子轭部具有不同厚度 (如铁心只有轴向通风道或固定铁心的螺栓孔), 其厚度按下式计算, 即

$$h_{e1} = \frac{h'_{e1} + h''_{e1}}{3} \quad (\text{cm})$$

式中  $h'_{e1}$ ——轭部较薄处的厚度(cm);

$h''_{e1}$ ——轭部较厚处的厚度(cm)。

按以上3种情况计算出的每槽导体数, 可选其中导体数最多者, 铁心磁密可按表3-24选取。

在选取各部分磁通密度时, 要考虑以下因素。

表3-25 三相双星绕组短距系数

线圈节距	每 极 槽 数												
	24	18	16	15	14	13	12	11	10	9	8	7	6
1-25	1.0												
1-24	0.998												
1-23	0.991												
1-22	0.981												
1-20	0.966												
1-20	0.947												
1-19	0.924	1.0											
1-18	0.897	0.896											
1-17	0.866	0.885	1.0										
1-16	0.832	0.896	0.995	1.0									
1-15	0.793	0.940	0.981	0.995	1.0								
1-14	0.752	0.896	0.956	0.978	0.994								
1-13	0.707	0.866	0.924	0.951	0.975	1.0							
1-12		0.809	0.882	0.914	0.944	0.971	1.0						
1-11		0.766	0.831	0.866	0.901	0.935	0.969	0.990	1.0				
1-10		0.707	0.779	0.809	0.847	0.884	0.924	0.960	0.988	1.0			
1-9			0.707	0.743	0.782	0.833	0.866	0.910	0.951	0.985	1.0		
1-8				0.669	0.707	0.749	0.793	0.841	0.891	0.940	0.981	1.0	
1-7						0.663	0.707	0.756	0.809	0.866	0.924	0.975	1.0
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

表3-26 三相双层对称分数槽绕组短距系数

每极每相槽数 $q$	节 距 $y$	短距系数 $K_{p1}$	每极每相槽数 $q$	节 距 $y$	短距系数 $K_{p1}$
$1^{1/2}$	1~5	0.985	$3^{1/2}$	1~11	0.997
				1~10	0.974
$1^{4/5}$	1~6	0.994		1~9	0.930
				1~8	0.936
$1^{7/8}$	1~6	0.985	$3^{2/5}$	1~11	0.990
				1~10	0.970
$2^{1/10}$	1~7	0.998		1~9	0.917
	1~6	0.955			
$2^{1/8}$	1~7	0.992	$3^{3/4}$	1~11	0.985
	1~6	0.943		1~10	0.951
$2^{1/7}$	1~7	0.995	$3^{4/5}$	1~11	0.980
	1~6	0.940		1~10	0.945
$2^{1/5}$	1~7	0.990	$3^{5/7}$	1~11	0.978
	1~6	0.925		1~10	0.940
$2^{1/4}$	1~8	0.995	$4^{1/5}$	1~12	0.980
	1~7	0.951		1~11	0.945
	1~6	0.800			
$2^{4/7}$	1~8	0.987	$4^{1/3}$	1~12	0.980
	1~7	0.940		1~11	0.943
$2^{4/5}$	1~9	0.997	$4^{1/4}$	1~12	0.980
	1~8	0.966		1~11	0.944
	1~7	0.902			
$2^{7/8}$	1~9	0.994	$4^{1/2}$	1~13	0.985
	1~8	0.956		1~12	0.959
$3^{1/5}$				~11	0.917
	1~10	0.995		1~13	0.970
	1~9	0.960		1~12	0.935
$3^{1/4}$	1~10	0.993	$4^{4/5}$	1~14	0.988
	1~9	0.959		1~13	0.966
	1~8	0.903			
$3^{6/7}$	1~10	0.981	$4^{7/3}$	1~14	0.985
	1~9	0.940		1~13	0.939
			$5^{1/2}$	1~15	0.944
				1~14	0.972







(续)

绕组线 圈 节 距  $\gamma$  (以槽数计)

极数	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	
4 <sup>1/2</sup>	0.7310	0.8020	0.8500	0.9050	0.9360	0.9520	0.9540	0.9490	0.9120	0.8700	0.8140	0.762											
4 <sup>1/4</sup>	0.7250	0.7960	0.8550	0.9010	0.9330	0.9510	0.9550	0.9440	0.9190	0.8800	0.8110	0.803											
4 <sup>3/8</sup>	0.5070	0.7780	0.8300	0.8870	0.9240	0.9450	0.9550	0.9510	0.9330	0.9020	0.8590	0.827											
4 <sup>1/2</sup>	0.6950	0.7660	0.8270	0.8770	0.9150	0.9410	0.9540	0.9540	0.9410	0.9150	0.8770	0.8480	0.7920	0.727									
4 <sup>3/4</sup>	0.6820	0.7520	0.8110	0.8670	0.9070	0.9350	0.9510	0.9550	0.9460	0.9250	0.8920	0.8750	0.8270	0.7790	0.703								
4 <sup>5/8</sup>	0.7370	0.8000	0.8520	0.8940	0.9260	0.9460	0.9550	0.9520	0.9370	0.9120	0.8820	0.8310	0.7820	0.7180	0.645								
5	0.7310	0.7940	0.8470	0.8870	0.9220	0.9440	0.9530	0.9410	0.9170	0.8910	0.8400	0.8290	0.7740	0.711									
5 <sup>1/8</sup>	0.7110	0.7740	0.8290	0.8740	0.9100	0.9360	0.9510	0.9570	0.9510	0.9360	0.9310	0.9050	0.8700	0.8270	0.7750	0.7160	0.653						
5 <sup>1/4</sup>	0.6820	0.7470	0.8020	0.8500	0.8890	0.9190	0.9410	0.9510	0.9550	0.9470	0.9410	0.9200	0.8910	0.8530	0.8080	0.7550	0.695						
5 <sup>3/8</sup>	0.6690	0.7310	0.7880	0.8360	0.8770	0.9080	0.9330	0.9450	0.9550	0.9520	0.9450	0.9280	0.9020	0.8690	0.8270	0.7780	0.7220	0.659					
5 <sup>1/2</sup>	0.6590	0.7220	0.7780	0.8270	0.8690	0.9020	0.9280	0.9450	0.9540	0.9540	0.9330	0.9250	0.9000	0.8670	0.8270	0.7800	0.7270	0.668					
5 <sup>3/4</sup>	0.6980	0.7540	0.8040	0.8480	0.8840	0.9130	0.9350	0.9480	0.9550	0.9540	0.9450	0.9290	0.9040	0.8740	0.8360	0.7900	0.7390	0.681					
6	0.6930	0.7600	0.8000	0.8440	0.8840	0.9100	0.9330	0.9470	0.9540	0.9560	0.9530	0.9240	0.9240	0.8960	0.8670	0.8280	0.7830	0.7320	0.670				
6 <sup>1/8</sup>	0.6760	0.7320	0.7830	0.8280	0.8670	0.8980	0.9240	0.9420	0.9530	0.9540	0.9550	0.9480	0.9360	0.9160	0.8900	0.8570	0.8140	0.7750	0.7250	0.670			
6 <sup>1/4</sup>	0.6580	0.7140	0.7660	0.8110	0.8590	0.8840	0.9110	0.9320	0.9540	0.9530	0.9550	0.9500	0.9380	0.9200	0.8950	0.8640	0.8270	0.7840	0.7360	0.682			
6 <sup>3/8</sup>	0.6560	0.7100	0.7610	0.8060	0.8460	0.8820	0.9080	0.9300	0.9540	0.9510	0.9530	0.9530	0.9530	0.9330	0.9200	0.8950	0.8640	0.8270	0.7840	0.7360	0.682		
6 <sup>1/2</sup>	0.697	0.759	0.814	0.871	0.923	0.948	0.954	0.954	0.948	0.923	0.894	0.865	0.836	0.807	0.778	0.749	0.720	0.691	0.662	0.633			
6 <sup>3/4</sup>	0.689	0.751	0.803	0.855	0.907	0.932	0.957	0.957	0.951	0.932	0.903	0.874	0.845	0.816	0.787	0.758	0.729	0.700	0.671	0.642			
7	0.6690	0.7110	0.7660	0.8080	0.8450	0.8770	0.9050	0.925	0.932	0.940	0.9510	0.9550	0.9530	0.9460	0.9330	0.9150	0.8910	0.8620	0.8270	0.787			
7 <sup>1/8</sup>																							

注:如果是120°相带(每对极3个极相组)的绕组时,还应将上述的绕组系数乘以0.866。

1) 开启式电动机选上限, 封闭式电动机选中间值, 防爆电动机选下限。

2) 考虑电动机的冷却方式, 冷却好的可选上限。

3) 定子有轴向通风孔的, 轭部磁密  $B_{\sigma 1}$  可取 1.80T; 有些高速微电机,  $B_{\sigma 1}$  值可选得更高些。

4) 三相双层绕组短距系数可查表 3-25, 三相双层对称分数槽绕组的短距系数, 可查表 3-26。

4. 计算绕组导线截面积

(1) 电动机额定电流

$$I_n = \frac{P_N}{\sqrt{3} U_n \cos\varphi \cdot \eta} \quad (\text{A})$$

式中  $P_N$ ——电动机额定功率(W);

$U_n$ ——电源额定电压(V);

$\cos\varphi$ ——功率因数;

$\eta$ ——电动机效率。

(2) 计算导线截面积  $S_{\text{裸}}$

$$S_{\text{裸}} = \frac{I_s}{a N_1 J_1}$$

式中  $I_s$ ——定子绕组相电流,  $\text{Y}$  联结时  $I_s = I_n$ ,  $\Delta$  联结时  $I_s = I_n / \sqrt{3}$  (A);

$a$ ——定子绕组并联支路数;

$N_1$ ——定子绕组并绕根数;

$J_1$ ——定子绕组导线电流密度(A/mm<sup>2</sup>), 可按表 3-28 选出。

表3-28 绕组导线电流密度

形 式	2 极时电流密度 (A/mm <sup>2</sup> )	4 极时电流密度 (A/mm <sup>2</sup> )	6和8极时电流密度 (A/mm <sup>2</sup> )
开 启 式	5.5~6.5	5~6.5	5~6.3
封 启 式	3.5~5.5	5~6	4.5~5.5

选择电流密度时要考虑, 1)电机绝缘等级, E级的要比A级的电流密度大些; 2)极数少的可选大些, 容量大的可选小些; 3)通风情况和电机工作状况; 4)电机结构形式和材料等。

算出的截面积, 要先换算出导线线径, 然后查出国家标准规定的线规。

### 5. 槽满率的计算

槽满率计算公式为

$$sf = \frac{S_0}{S}$$

式中  $S_0$ ——槽内导线铜的总面积( $\text{mm}^2$ ),

$S$ ——空槽面积( $\text{mm}^2$ )。

计算出的 $sf$ 应在0.45以内。

### 6. 线负载校核

电动机的线负载计算公式为

$$A = \frac{Z_1 N_{sc} I_s}{\pi D_{i1} a} \quad (\text{A/cm})$$

式中  $N_{sc}$ ——每槽导线数(选计算最多的匝数)。

计算值应符合表3-23内允许范围。

**例3-137** 有一台笼型三相异步电动机, 定子无线圈, 只有空壳铁心, 无铭牌数据, 要求配定子线圈, 问如何计算。

对原电动机铁心进行测绘, 数据如下

1)定、转子槽数  $Z_1 = 36$ ,  $Z_2 = 46$ ;

2)铁心外径  $D_1 = 343\text{mm}$ , 铁心内径  $D_{i1} = 214\text{mm}$ , 气隙长度  $\delta = 0.7\text{mm}$ , 铁心长度  $l = 140\text{mm}$ ,

3)槽形尺寸如图3-32所示。

#### (1) 极数的确定

1)定子轭铁高度  $h_{c1}$

$$h_{c1} = \frac{D_1 - D_{i1}}{2} - h_c = \frac{343 - 214}{2} - 30.3 = 34.7\text{mm}$$

2)极数估算

$$2p = \frac{D_{i1}}{1.8k_{e1}} = \frac{214}{1.8 \times 34.2} = 3.5, \text{ 取 4 级}$$

(2) 槽配合校验

1)  $Z_2 \neq p(3i + 1)$ ;

2)  $Z_2 \neq p2i$ ;

3)  $Z_2 \neq Z_1 + \frac{p}{2}$ ,

$$Z_2 \neq Z_1 + 2,$$

$$Z_2 \neq 0.5 Z_1 + \frac{p}{2},$$

$$Z_2 \neq 2Z_1 + p,$$

4)  $Z_2 \neq 2(3i + 1)$ ,

$$Z_2 \neq 3i \pm (p - 1).$$

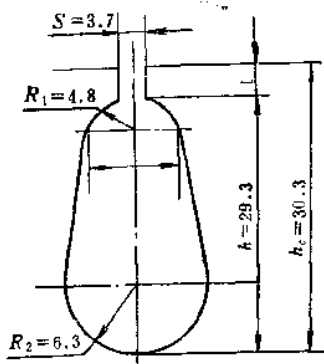


图3-32 笼型三相异步电动机

校验结果，只有  $Z_2 \neq 3i \pm (p - 1)$  不合要求，但考虑到老系列电动机改造，有点轻微振动无大影响。

(3) 估算电动机功率

$$P_N = \frac{(0.74 \sim 0.97) D_{i1}^2 \cdot l B_s A n_1}{10^8}$$

$$= \frac{0.9 \times 21.4^2 \times 14 \times 0.8 \times 300 \times 1500}{10^8} = 21 \text{ kW}$$

式中  $A$  取  $300 \text{ A/cm}$ ;

$B_s$  取  $0.8$  (见表 3-23);

$n_1$  —— 同步转速,

$$n_1 = \frac{60f}{p} = \frac{60 \times 50}{2} = 1500 \text{ r/min.}$$

(4) 计算每槽导线根数

1) 根据气隙磁密  $B_g$  计算

$$N_g = \frac{(1.12 \sim 1.23) U_s 2p \times 10^2}{D_{i1} l Z_1 B_g K_{sp}}$$

$$= \frac{1.2 \times 380 \times 4 \times 10^2}{21.4 \times 14 \times 36 \times 0.8 \times 0.96} = 22 \text{ 根/槽}$$

初算  $K_{ap1}$  取 0.96, 系数选用 1.20,  $B_s$  取  $0.8T$ 。

2) 根据轭部磁密  $B_{c1}$  计算 (选  $B_{c1} = 1.2T$ )

$$N_c = \frac{(1.27 \sim 1.39)U_s \times 10^2}{Z_1 k_{c1} l B_{c1} K_{ap1}}$$

$$= \frac{1.3 \times 380 \times 10^2}{36 \times 3.42 \times 14 \times 1.2 \times 0.96} = 24.9 \text{ 根/槽}$$

通过上面计算, 取 25 根/槽, 双层叠绕组。

(5) 节距选择

1) 极距为

$$\tau = \frac{Z_1}{2p} = \frac{36}{4} = 9$$

2) 节距为

$$y = 0.83\tau = 0.83 \times 9 = 7.5, \text{ 取 } 8$$

$$\therefore y = 1 \sim 9 \text{ 槽}$$

(6) 计算绕组导线截面积

1) 电动机额定电流  $I_N$

$$I_N = \frac{P_N \times 10^3}{\sqrt{3} U \cos \varphi \eta} = \frac{21 \times 10^3}{\sqrt{3} \times 380 \times 0.88 \times 0.90}$$

$$= 40.3 \text{ A}$$

式中  $\eta$ ——电动机额定效率, 查类似电动机为 0.88;

$\cos \varphi$ ——电动机功率因数, 查类似电动机为 0.90。

2) 导线截面积  $S_{\text{裸}}$

$$S_{\text{裸}} = \frac{I_s}{\alpha N_1 J} = \frac{40.3 / \sqrt{3}}{2 \times 2 \times 6} = 0.969 \text{ mm}^2$$

式中  $J$ ——电流密度, 按表 3-28 选  $6 \text{ A/mm}^2$ ;

$\alpha, N_1$ ——并联支路数和并绕根数均为 2, 查表 3-29 导线直径

为  $\phi 1.12\text{mm}$ 。

因  $d = \sqrt{\frac{4S_{\text{裸}}}{\pi}} = \sqrt{\frac{4 \times 0.969}{\pi}} = 1.11\text{mm}$ ，归化到国家标准导线直径。

(7) 线负载校核

$$A = \frac{Z_1 N_c I_s}{\pi D_1 a} = \frac{36 \times 25 \times 40.3 / \sqrt{3}}{\pi \times 21.4 \times 2} = 156\text{A/cm}$$

小于  $A$  初选值允许。

例3-138 有一台额定容量为  $P_N(\text{kW})$  的三相异步电动机，做空载试验时，测出空载输入功率为  $P_0(\text{W})$ ，做堵转试验时，测出堵转输入功率为  $P_K(\text{W})$ ，已知此台电动机在额定负载运行时的视在功率为  $P_i(\text{kVA})$ 。试求此台电动机在额定负载下运行的效率  $\eta_N$  和功率因数  $\cos\varphi_N$  是多少。

空载输入功率  $P_0$  可视为铁损耗  $P_{Fe}$  和机械损耗  $p_m$  之和（忽略很小空载铜耗），堵转输入功率  $P_K$  可视为额定铜损耗（ $P_{Cu1}$  和  $P_{Cu2}$ ）及附加损耗  $p_f$  之和。这样，电动机输入功率  $P_1 = P_N + \Sigma P = P_N + (P_{Fe} + P_{Cu1} + P_{Cu2} + p_m + p_f) \times 10^{-3}(\text{kW})$ ，于是得到电动机的额定效率  $\eta_N$  为

$$\begin{aligned} \eta_N &= \frac{P_N}{P_1} \times 100\% \\ &= \frac{P_N}{P_N + (P_{Fe} + P_{Cu1} + P_{Cu2} + p_m + p_f) \times 10^{-3}} \times 100\% \end{aligned}$$

又知  $P_i = \sqrt{3} U_N I_N$ ， $P_1 = \sqrt{3} U_N I_N \cos\varphi_N$ ，所以额定功率因数  $\cos\varphi_N$  为

$$\begin{aligned} \cos\varphi_N &= \frac{P_1}{P_i} = \frac{(P_N + \Sigma P) \times 10^{-3}}{P_i} \times 100\% \\ &= \frac{(P_N + P_{Fe} + P_{Cu1} + P_{Cu2} + p_m + p_f) \times 10^{-3}}{P_i} \times 100\% \end{aligned}$$



## 第四章 直流电机常用参数计算

### 第一节 直流电机的基本概念

#### 一、直流电机结构、工作原理和铭牌数据

##### 1. 直流电机主要结构

直流电机跟普通交流电机一样也是由定子和转子两部分组成。由于转子要旋转，所以定、转子之间要有气隙隔开。定子是由能够导磁的机座（用钢板或铸钢制成）、薄钢板制成的主极磁铁、外面套入励磁绕组以及帮助换向的换向磁极和换向极绕组所组成，大中型电机还有补偿绕组。除此之外，还要有电刷装置。转子是用0.5mm硅钢板冲制的电枢铁心，其槽内嵌入电枢绕组以及换向器、风扇、转轴和轴承等。

##### 2. 基本工作原理

定子励磁绕组内通入直流励磁电流，产生励磁磁场，当电枢旋转时，电枢绕组切割气隙磁场在电枢绕组中产生感应电动势，并产生感应电流，此交流电流经换向器整流后输出直流电，如果从外界引入直流电，经电刷传给换向器，再通过换向器转化为交流电引入电枢绕组，此电枢交流电流与气隙磁场相互作用，便产生转矩，这就是直流电动机的工作原理。

可见换向器的作用，对于发电机是把电枢内的交流电转变为直流电而输出；对于电动机，换向器是把外界的直流电转化为交流电而输入电枢绕组。但不论是直流发电机还是直流电动机，电枢绕组中的电流总是交流电，而电刷两端的电动势总是直流成分。

##### 3. 电机铭牌

电机铭牌上都要标志出电机型号、额定功率  $P_N$ 、额定电压

$U_N$ 、额定电流  $I_N$  和额定转速  $n_N$  等。

(1) 额定功率  $P_N$  对于直流电动机， $P_N$  是指从转轴上输出的机械功率；对于直流发电机， $P_N$  是指从电刷两端输出的电功率。

(2) 额定电压  $U_N$  对于直流电动机是指从电刷两端输入给电动机的电源电压；而对于直流发电机是指从电刷两端发出的电压值。

(3) 额定电流  $I_N$  对于直流电动机是指从电刷输入给电枢绕组中的电流；对于发电机是指从电刷两端输出的直流电流值。

额定电流  $I_N$  与电枢电流  $I_a$ ，对于串励和他励直流电机是相等的，而对于并励直流电机两者不相同。

## 二、直流电机励磁方式

直流电机励磁方式有他励和自励两种。自励又分为并励、串励、复励；复励又有积复励和差复励之分，具体分法如下：

他励

直流电机励磁方式

并励

自励

串励

复励

积复励

差复励

直流电机励磁方式如图4-1所示。

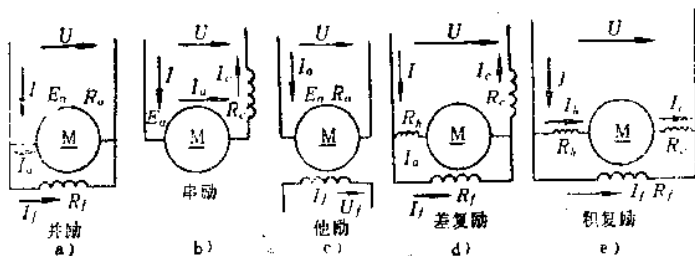


图4-1 直流电机励磁方式

1. 并励直流电动机

$$I = I_a + I_f$$

$$I_f = \frac{U}{R_f}$$

$$U = E_a + I_a R_a$$

2. 串励直流电动机

$$I = I_f = I_a$$

$$U = E_a + (R_f I_f + R_a I_a)$$

3. 他励直流电动机

$$I = I_a$$

$$I_f = U_f / R_f$$

$$U = E_a + I_a R_a$$

4. 差复励(欠复励)直流电动机

$$I = I_a + I_f = I_h + I_f = I_a$$

$$I_a = I_h$$

$$U = E_a + (I_a R_a + I_h R_h + I_f R_f)$$

5. 激复励(过复励)直流电动机

$$I = I_a + I_f, \quad I_a = I_h$$

$$U = E_a + (I_a R_a + I_h R_h + I_f R_f)$$

式中  $I$ ——电源电流, 或额定电流(A);

$I_a$ ——电枢电流(A);

$I_f$ ——励磁电流(A);

$R_f$ ——励磁电阻( $\Omega$ );

$R_a$ ——电枢电阻( $\Omega$ );

$U$ ——电动机端电压, 或电源电压(V);

$I_h$ ——换向极电流(A);

$I_c$ ——串励绕组电流(A);

$R_h$ ——换向极绕组电阻( $\Omega$ );

$R_c$ ——串励绕组电阻( $\Omega$ )。

三、直流电动机和直流发电机的平衡方程式

直流电动机是将电源的电能为从转轴上输出的机械能的电磁转换装置；直流发电机是将原动机输入的机械能转变为从换向器上输出的电能的电磁转换装置。

不论发电机还是电动机均在转子内进行能量转换，所以直流电机的转子不再叫转子，而叫电枢。

直流电机有三种平衡方程式：电动势平衡方程式、转矩平衡方程式、功率平衡方程式。下面以并励电动机为例加以说明。

### 1. 并励电动机电动势平衡方程式

$$U_N = E_a + I_a R_a$$

$$U_f = I_f R_f$$

式中  $U_N$ ——电动机电枢端电压(V)；

$E_a$ ——电枢感应电动势(V)；

$I_a$ ——电枢电流(A)；

$R_a$ ——电枢电阻( $\Omega$ )；

$U_f$ ——励磁电压(V)；

$I_f$ ——励磁电流(A)；

$R_f$ ——励磁电阻( $\Omega$ )。

从上式看出，电动机状态时， $U_N > E_a$ ，即额定电压  $U_N$  是感应电动势  $E_a$  加上电压降  $I_a R_a$  之和。

### 2. 电动机转矩平衡方程式

$$T_M = T_N + T_0$$

式中  $T_M$ ——电磁转矩 ( $N \cdot m$ )；

$T_N$ ——额定转矩 (不是额定时为  $T_L$ ) ( $N \cdot m$ )；

$T_0$ ——空载转矩 ( $N \cdot m$ )。

说明在电动机状态时， $T_M > T_N$ ，即电磁转矩是负载转矩  $T_N$  加上空载转矩  $T_0$  之和。

### 3. 电动机功率平衡方程式

$$P_1 = P_M + P_{Cu_a} + P_{Cu_f}$$

$$P_M = P_N + P_{F_0} + p_m = P_N + P_0 = T \Omega$$

$$P_N = T_N \Omega = \eta_N P_1$$

上面三个功率平衡方程式表明：

输入给并励直流电动机的输入电功率  $P_1$  与电磁功率  $P_M$  和电枢内总铜耗 ( $P_{Cu_a} = I_a^2 R$  和  $P_{Cu_f} = I_f^2 R_f$ ) 相平衡。

电磁功率  $P_M$  与额定功率  $P_N$  和铁损耗  $P_{Fe}$ 、机械损耗  $p_m$  相平衡。铁损耗  $P_{Fe}$  和机械损耗  $p_m$  之和称为空载损耗  $P_0$ 。

电动机额定输出功率  $P_N$  等于输入功率  $P_1$  乘上效率  $\eta_N$ 。

图4-2表示出并励直流电动机能量图，可以清楚地看出上面的平衡方程式的各种关系。

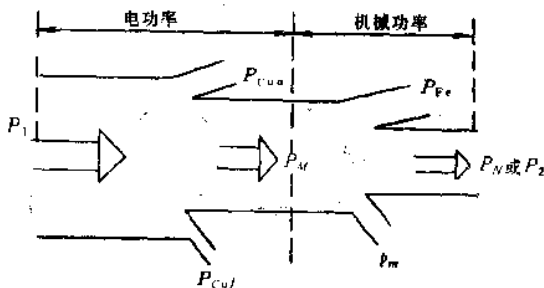


图4-2 并励直流电动机能量图

电动机效率，电动机效率等于输出功率  $P_2$  除以输入功率  $P_1$ ，额定效率等于额定输出功率  $P_N$  除以输入功率  $P_1$ ，即

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} \quad \text{或} \quad \eta_N = \frac{P_N}{P_1}$$

下面再介绍发电机平衡方程式：

#### 4. 发电机电动势平衡方程式

$$E_a = U_N + I_a R_a$$

式中  $E_a$ ——电枢电动势(V)；

$U_N$ ——电枢两端额定电压(V)；

$I_a$ ——电枢电流(A)；

$R_a$ ——电枢电阻( $\Omega$ )。

说明在发电机状态时， $E_a > U_N$ ，而电动机状态时是  $U_N > E_a$ ，

这是判断直流电机是处于发电机运行状态还是电动机运行状态的条件。

上式说明电枢电动势 $E_a$ 等于电枢两端电压 $U_N$ 与电压降 $I_a R_a$ 之和。如果是串励发电机,还要加上励磁电压降 $U_f = I_f R_f$ 。

### 5. 发电机转矩平衡方程式

$$T_1 = T_M + T_0$$

式中  $T_1$ ——原动机输入的转矩( $N \cdot m$ );

$T_M$ ——电磁转矩( $N \cdot m$ );

$T_0$ ——空载转矩( $N \cdot m$ );

发电机时  $T_1 > T_0$ 。

上式说明,原动机输入给发电机轴上的输入转矩 $T_1$ 等于电磁转矩和空载转矩之和。

### 6. 发电机功率平衡方程式

$$P_N = U_N I_N \quad \text{或} \quad P_2 = UI$$

$$P_M = E_a I_a = P_N + P_{Cu a} + P_{Cu f} = T \Omega$$

$$P_m = P_M + P_{Fe} + p_m = P_M + P_0$$

式中  $\Omega$ ——角速度,  $\Omega = \frac{2\pi n}{60}$ ,  $n$  为电机转速。

能量图如图4-3所示。

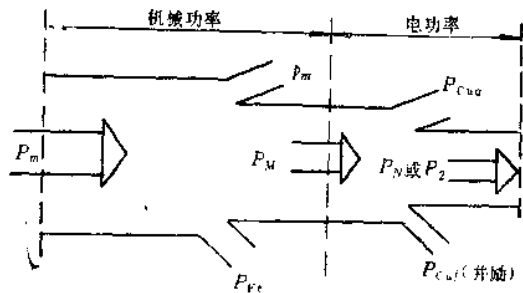


图4-3 并励直流发电机能量图

从原动机输入给发电机轴上的机械功率 $P_m$ 首先要使电枢旋

转, 于是克服机械损耗  $p_m$  和铁心损耗  $P_{Fe}$ , 然后才转化为电磁功率  $P_M$ 。电磁功率再克服绕组铜损耗  $p_{Cu_a} + P_{Cu_f}$  (并励时) 才能输出电功率  $P_N$  (额定值) 或  $P_2$ 。

#### 四、直流电机可逆原理

从电机学知道, 直流机的电枢电动势  $E_a$  和电磁转矩  $T$  的计算公式如下:

电枢电动势为

$$E_a = \frac{pN}{60a} n \Phi = c_e n \Phi$$

电磁转矩为

$$T = \frac{pN}{2\pi a} I_a \Phi = c_T I_a \Phi$$

式中  $p$ ——电机的极对数;

$N$ ——电枢绕组总导体数;

$n$ ——电机转速 (r/min);

$\Phi$ ——气隙磁通, 包括电枢反应在内的气隙中的合成磁通 (Wb);

$I_a$ ——电枢电流 (A);

$a$ ——电枢绕组支路数;

$c_e$ ——电动势常数,  $c_e = \frac{pN}{60a}$ ;

$c_T$ ——转矩常数,  $c_T = \frac{pN}{2\pi a}$ 。

对于具体电机而言,  $p$ 、 $N$ 、 $a$  均为常数, 故  $c_e$ 、 $c_T$  是常数。两个常数比值如下:

$$c_e/c_T = \frac{\frac{pN}{60a}}{\frac{pN}{2\pi a}} = 0.105, \text{ 即 } c_e = 0.105c_T$$

直流电机的电磁功率  $P_M$ , 对于发电机  $P_M = E_a I_a$ ; 对于电动

机为  $P_M = T \Omega$ 。

$$P_M = E_a I_a = \left( \frac{pN}{60a} n \Phi \right) I_a = \frac{pN}{2\pi a} I_a \Phi \frac{2\pi n}{60} = T \Omega$$

式中  $\Omega$ ——角速度,  $\Omega = 2\pi n/60$

上式证明直流发电机和电动机的电磁功率是可以转换的, 这个原理叫直流电机可逆原理。

发电机特征:

- ①  $E_a > U_N$ ;
- ②  $E_a$  与  $I_a$  同方向;
- ③  $T_M$  与  $n$  反方向;
- ④  $T_1 < T_M$ 。

电动机特征:

- ①  $U_N > E_a$ ;
- ②  $E_a$  与  $I_a$  反向;
- ③  $T_M$  与  $n$  同方向;
- ④  $T_M > T_N$ 。

## 五、直流电动机工作特性和机械特性

直流电动机工作特性有:

- (1) 转速特性  $n = f(I_a)$ ;
- (2) 转矩特性  $T = f(I_a)$ ;
- (3) 效率特性  $\eta = f(I_a)$ 。

机械特性是  $n = f(T)$ , 当  $U_N$ 、 $\Phi_N$ 、 $R_a$  为常数时, 是自然机械特性, 也叫固有机械特性; 只要改变任一参数, 如  $U$ 、 $\Phi$ 、 $R_a$  等, 便可获得人工机械特性。

## 第二节 直流电机计算实例

例4-1 试画出他励直流发电机和他励直流电动机的能量图, 并写出它们的功率、转矩和电动势平衡方程式。

### 一、他励直流发电机

发电机是将输入的机械功率  $P_m$  经电磁转化变为电功率  $P_e$  输



出, 在转化过程中, 输入的机械功率  $P_m$  首先要克服机械损耗  $p_m$  和铁损耗  $P_{Fe}$ , 也就是空载损耗  $P_0$ , 转化为电磁功率  $P_M$ , 电磁功率  $P_M$  再克服绕组中的铜耗  $P_{Cu}$  便是输出功率  $P_2$ , 所以功率平衡方程式为

$$P_m - P_0 = P_1 - (p_m + P_{Fe}) = P_M$$

$$P_2 = P_M - P_{Cu}$$

式中  $P_M$ ——电磁功率,  $P_M = E_a I_a$ ;

$P_0$ ——空载损耗,  $P_0 = p_m + P_{Fe}$ 。

能量图如图4-4所示。

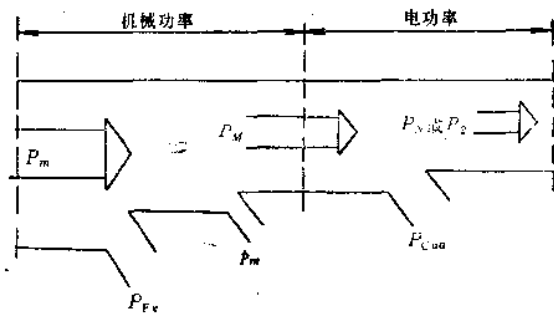


图4-4 他励直流发电机能量图

转矩平衡方程式:

用角速度  $\Omega = \frac{2\pi n}{60}$  除上式, 可得转矩平衡方程式:

$$\frac{P_m}{\Omega} = \frac{P_0}{\Omega} + \frac{P_M}{\Omega}$$

得  $T_1 = T_0 + T_M$

式中  $T_1$ ——原动机输入的机械转矩 ( $N \cdot m$ );

$T_0$ ——空载转矩 ( $N \cdot m$ );

$T_M$ ——电磁转矩 ( $N \cdot m$ )。

电动势平衡方程式:

已知  $P_2 = P_M - P_{Cu}$  即  $UI = E_a I_a - I_a^2 R_a$

用  $I_a$  除上式, 得:

$$U = E_a - I_a R_a$$

或  $E_a = U + I_a R_a$

可见  $E_a > U$  为发电机状态。

## 二、他励直流电动机

直流电动机是将输入的电功率  $P_1$  转化为轴上输出的机械功率  $P_2$ , 在转化过程中,  $P_1$  首先要克服绕组中铜耗, 然后才转化为电磁功率  $P_M$ , 电磁功率  $P_M$  再克服空载损耗  $P_0$  才转化成机械功率  $P_2$ ; 而输出, 因此他励直流电动机的功率方程式为:

$$P_1 - P_{Cu} = P_M$$

$$P_2 = P_M - P_0$$

式中  $P_1$ ——输入电功率,  $P_1 = UI$ ;

$P_M$ ——电磁功率,  $P_M = E_a I_a$ ;

$P_0$ ——空载损耗,  $P_0 = p_m + P_{Fe}$ ;

$P_{Cu}$ ——电枢铜耗,  $P_{Cu} = I_a^2 R_a$ 。

能量图如图4-5所示。

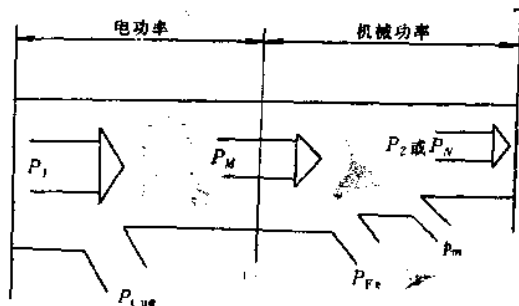


图4-5 他励直流电动机能量图

用  $I_a$  除上式, 得到电动势平衡方程式:

$$\frac{UI}{I_a} = \frac{E_a I_a}{I_a} + \frac{I_a^2 R_a}{I_a} \quad (\text{因他励, } I_a = I)$$

得到

$$U = E_c + I_a R_a$$

用  $\Omega$  除  $P_2 = P_M - P_0$ , 得到转矩平衡方程式, 即

$$\frac{P_2}{\Omega} = \frac{P_M}{\Omega} - \frac{P_0}{\Omega}$$

得到

$$T_2 = T_M - T_0$$

例4-2 有一台 Z2-82型直流电动机, 已知额定功率  $P_N = 40 \text{ kW}$ , 额定电压  $U_N = 220 \text{ V}$ , 额定转速  $n_N = 1500 \text{ r/min}$ , 额定效率  $\eta_N = 0.85$ , 试求额定电流  $I_N$ 、额定输入功率  $P_1$  是多少。

额定电流为

$$I_N = \frac{P_N}{U_N \eta_N} = \frac{40 \times 10^3}{220 \times 0.85} = 214 \text{ A}$$

额定输入功率为

$$P_1 = P_N / \eta_N = \frac{40}{0.85} = 47 \text{ kW}$$

例4-3 有一台直流发电机, 已知  $P_N = 20 \text{ kW}$ ,  $U_N = 230 \text{ V}$ ,  $n_N = 1490 \text{ r/min}$ ,  $\eta_N = 0.96$ , 试求: (1)  $I_N$ ; (2) 额定输入功率  $P_1$  是多少。

额定电流为

$$I_N = P_N / U_N = \frac{20 \times 10^3}{230} = 87 \text{ A}$$

额定输入功率为

$$P_1 = P_N / \eta_N = 20 / 0.96 = 20.83 \text{ kW}$$

例4-4 有一台直流发电机, 已知  $P_N = 7 \text{ kW}$ ,  $U_N = 230 \text{ V}$ ,  $n_N = 1480 \text{ r/min}$ ,  $2a = 2$ , 4极, 电枢总导体数  $N = 586$  根, 气隙磁通  $\Phi = 84.2 \times 10^{-4} \text{ Wb}$ , 试求:

(1) 额定电流  $I_N$  是多大;

(2) 当磁通降到  $40 \times 10^{-4} \text{ Wb}$  时, 感应电动势  $E_c$  是多少;

(3) 原感应电动势  $E_c$  是多少;

(4) 当磁通  $\Phi$  不变时, 使转速  $n$  降到  $1000 \text{ r/min}$ , 这时感应电动势  $E_c$  又是多少。

(1) 额定电流  $I_N$

$$I_N = P_N / U_N = \frac{7 \times 10^3}{230} = 30.4 \text{ A}$$

(2) 原电动势  $E_a$ 。

$$E_a = \frac{pN}{60a} n \Phi = \frac{2 \times 586}{60 \times 1} \times 1480 \times 84.2 \times 10^{-4} = 243.4 \text{ V}$$

(3) 当磁通  $\Phi$  降为  $\Phi' = 40 \times 10^{-4} \text{ Wb}$  时 ( $n$  不变), 则有

$$E'_a = \frac{pN}{60a} n \Phi' = \frac{2 \times 586}{60 \times 1} \times 1480 \times 40 \times 10^{-4} = 115.6 \text{ V}$$

(4) 当  $n$  降到  $n' = 1000 \text{ r/min}$  时 ( $\Phi$  不变), 则有

$$\begin{aligned} E'_a &= \frac{pN}{60a} n' \Phi = \frac{2 \times 586}{60 \times 1} \times 1000 \times 84.2 \times 10^{-4} \\ &= 164.5 \text{ V} \end{aligned}$$

**例4-5** 有一台他励直流发电机, 已知  $E_a = 238 \text{ V}$ , 电枢回路总电阻  $R_a = 0.01 \Omega$ , 负载电阻  $R_{\text{负}}$  为  $0.18 \Omega$ , 试求:

- (1) 输出电流  $I$  是多少;
- (2) 电磁功率  $P_M$  大小;
- (3) 端电压  $U$  为多大;
- (4) 铜损耗  $P_{\text{Cu}}$  是多少;
- (5) 输出功率  $P_2$  是多少。

(1) 因为是他励发电机, 所以  $I = I_a$ , 则有

$$I = I_a = \frac{E_a}{R_{\text{负}} + R_a} = \frac{238}{0.18 + 0.01} = 1252.6 \text{ A}$$

$$(2) P_M = E_a I_a = 238 \times 1252.6 \times 10^{-3} = 298 \text{ kW}$$

$$(3) U = E_a - I_a R_a = 238 - 1252.6 \times 0.01 = 225.5 \text{ V}$$

$$\text{或 } U = I_a R_{\text{负}} = 1252.6 \times 0.18 = 225.5 \text{ V}$$

$$(4) P_{\text{Cu}} = I_a^2 R_a = 1252.6^2 \times 0.01 \times 10^{-3} = 15.7 \text{ kW}$$

$$(5) P_2 = U I_a = 225.5 \times 1252.6 \times 10^{-3} = 282.5 \text{ kW}$$

**例4-6** 一台并励直流电动机, 已知额定电压  $U_N = 440 \text{ V}$ , 额定电流  $I_N = 40 \text{ A}$ , 在  $75^\circ \text{C}$  时, 电枢电阻  $R_a = 0.14 \Omega$ , 励磁绕组电阻  $R_f = 204 \Omega$ , 额定效率  $\eta_N = 86\%$ , 试求:

- (1) 额定输入功率  $P_1$ ;
  - (2) 额定输出功率  $P_2$ ;
  - (3) 总损耗  $\Sigma P$ ;
  - (4) 励磁电流  $I_f$ 、电枢电流  $I_a$ ;
  - (5) 电枢铜耗  $P_{Cu_a}$ 、励磁铜耗  $P_{Cu_f}$  各是多少。
- (1)  $P_1 = U_N I_N = 440 \times 40 \times 10^{-3} = 17.6 \text{ kW}$
- (2)  $P_N = P_1 \times \eta_N = U_N I_N \eta_N = 440 \times 40 \times 10^{-3} \times 0.86 = 15.1 \text{ kW}$
- (3)  $\Sigma P = P_1 - P_N = 17.6 - 15.1 = 2.5 \text{ kW}$
- (4)  $I_f = U_N / R_f = \frac{440}{204} = 2.16 \text{ A}$
- $I_a = I_N - I_f = 40 - 2.16 = 37.8 \text{ A}$
- (5)  $P_{Cu_a} = I_a^2 R_a = 37.8^2 \times 0.14 = 200 \text{ W} = 0.2 \text{ kW}$
- $P_{Cu_f} = I_f^2 R_f = 2.16^2 \times 204 = 952 \text{ W} = 0.952 \text{ kW}$

**例4-7** 有一台他励直流电动机，22kW，额定电压为220V，额定转速  $n_n = 1450 \text{ r/min}$ ，并联支路数  $a = 1$ ，极对数  $p = 2$ ，气隙磁通  $\Phi = 1.15 \times 10^{-4} \text{ Wb}$ ，电枢总导体数  $N = 366$ ，电枢总电阻  $R_a = 0.21 \Omega$ ，铁耗  $P_{Fe} = 364 \text{ W}$ ，机械损耗  $p_m = 202 \text{ W}$ ，试求：

- (1) 感应电动势  $E_a$ ;
  - (2) 电枢电流  $I_a$ ;
  - (3) 电磁转矩  $T_M$ ;
  - (4) 输入功率  $P_1$ 、输出功率  $P_2$ ;
  - (5) 电动机效率  $\eta$  是多少。
- (1) 感应电动势

$$E_a = \frac{pN}{60a} \Phi n = \frac{2 \times 366}{60 \times 1} \times 1.15 \times 10^{-2} \times 1450 = 203.4 \text{ V}$$

- (2) 电枢电流

$$I_a = \frac{U - E_a}{R_a} = \frac{220 - 203.4}{0.21} = 79 \text{ A}$$

(3) 电磁转矩

$$T_M = \frac{pN}{2\pi a} I \Phi = \frac{2 \times 366}{2\pi \times 1} \times 79 \times 1.15 \times 10^{-2} = 106 \text{ N}\cdot\text{m}$$

(4) 输入功率

$$P_1 = U_N I_N = 220 \times 79 = 17380 \text{ W} = 17.38 \text{ kW}$$

输出功率为

$$\begin{aligned} P_2 &= R_M - P_{Fe} - p_m = E_a I_a - P_{Fe} - p_m \\ &= 203.4 \times 79 - 364 - 202 \\ &= 15500 \text{ W} = 15.5 \text{ kW} \end{aligned}$$

(5) 电机效率

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} \times 100\% = \frac{15.5}{17.38} \times 100\% = 89.2\%$$

**例4-8** 有一台他励直流电动机, 已知  $P_N = 26 \text{ kW}$ ,  $U_N = 115 \text{ V}$ ,  $I_N = 226 \text{ A}$ ,  $n_N = 1450 \text{ r/min}$ , 电枢总电阻  $R_a = 0.06 \Omega$ 。在额定负载时突然在电枢回路中加入调速电阻  $R_0 = 0.2 \Omega$ , 试求:

(1) 电枢感应电动势  $E'_a$ ;

(2) 电枢电流  $I'_a$  (不考虑电枢反应和电路电感的影响, 调速时负载转矩不变);

(3) 电磁转矩  $T_M$  各是多少。

(1) 因转速尚未来得及改变, 所以有

$$E'_a = E_a = U_N - I_a R_a = 115 - 226 \times 0.06 = 101.4 \text{ V}$$

(2) 电枢电流

$$I'_a = \frac{U_N - E'_a}{R_a + R_0} = \frac{115 - 101.4}{0.06 + 0.2} = 52.3 \text{ A}$$

$$\begin{aligned} (3) \quad T_M &= c_T \Phi I'_a = \frac{c_T \Phi}{0.105} I'_a = \frac{E'_a / n_N}{0.105} \times I'_a \\ &= \frac{101.4 \times 52.3}{0.105 \times 1450} = 348.3 \text{ N}\cdot\text{m} \end{aligned}$$

**例4-9** 一台  $100 \text{ kW}$  他励直流电动机,  $U_N = 440 \text{ V}$ ,  $I_N = 257 \text{ A}$ ,  $n_N = 1200 \text{ r/min}$ ,  $R_a = 0.064 \Omega$ , 换向极绕组电阻  $R_{换} = 0.012 \Omega$ , 补偿绕组电阻  $R_{补} = 0.042 \Omega$ , 电刷接触电阻  $r_{触} = 0.0039 \Omega$ , 空载

损耗  $P_0 = 3.1 \text{ kW}$ , 试求:

- (1) 输入功率  $P_1$ ;
- (2) 额定效率  $\eta_N$ ;
- (3) 电枢铜耗  $P_{Cu_a}$ ;
- (4) 电磁功率  $P_M$ ;
- (5) 输出转矩  $T_2$  是多少。

$$(1) P_1 = U_N I_N = 440 \times 257 \times 10^{-3} = 113 \text{ kW}$$

(2) 已知  $P_N = 100 \text{ kW}$ , 所以额定效率  $\eta_N$  为

$$\eta_N = \frac{P_N}{P_1} \times 100\% = \frac{100}{113} \times 100\% = 88.5\%$$

$$(3) P_{Cu_a} = I_a^2 R_{\Sigma} = 257^2 (R_a + R_{\text{换}} + R_{\text{补}} + r_{\text{触}}) \times 10^{-3} \\ = 257^2 (0.064 + 0.012 + 0.042 + 0.0039) \times 10^{-3} \\ = 8.05 \text{ kW}$$

$$(4) P_M = P_1 - P_{Cu_a} = 113 - 8.05 = 104.9 \text{ kW}$$

$$(5) T_2 = 9550 \frac{P_N}{n_N} = 9550 \times \frac{100}{1200} = 795.8 \text{ N}\cdot\text{m}$$

**例4-10** 有一台并励直流电动机, 已知  $P_N = 3 \text{ kW}$ ,  $U_N = 110 \text{ V}$ ,  $I_N = 33.2 \text{ A}$ ,  $n_N = 3000 \text{ r/min}$ , 最大励磁功率为  $82 \text{ kW}$ , 试求:

- (1) 电枢电流  $I_a$ ;
- (2) 励磁电阻  $R_f$ ;
- (3) 输入功率  $P_1$ ;
- (4) 电枢铜耗  $P_{Cu_a}$ ;
- (5) 励磁回路铜耗  $P_{Cu_f}$ ;
- (6) 电磁功率  $P_M$ ;
- (7) 输出转矩  $T_2$ ;
- (8) 电动机效率  $\eta$  是多少。

$$(1) I_a = I_N - I_f = 55.8 - 2.3 = 53.5 \text{ A}$$

$$(2) R_f = \frac{U}{I_f} = \frac{220}{2.3} = 95.7 \Omega$$

$$(3) P_1 = U_N I_N = 220 \times 55.9 = 12276 \text{ W} = 12.276 \text{ kW}$$

$$(4) P_{\text{Cu}_a} = I_a^2 R_a = 53.5^2 \times 0.51 = 1459.7 \text{ W}$$

$$(5) P_{\text{Cu}_f} = I_f^2 R_f = 2.3^2 \times 95.7 = 506.3 \text{ W}$$

$$(6) P_M = P_1 - P_{\text{Cu}_a} - P_{\text{Cu}_f} = 12276 - 1459.7 - 506.3 \\ = 10310 \text{ W} = 10.310 \text{ kW}$$

$$(7) T_2 = 9550 \times \frac{P_N}{n_N} = 9550 \frac{100}{1000} = 95.5 \text{ N}\cdot\text{m}$$

$$(8) \eta_N = \frac{P_N}{P_1} = \frac{10 \times 10^3}{12276} = 0.82$$

例4-11 一台20kW并励直流发电机, 已知  $U_N = 230 \text{ V}$ ,  $n_N = 3000 \text{ r/min}$ ,  $R_a = 0.45 \Omega$ ,  $R_f = 104 \Omega$ , 除电枢铜耗和励磁铜耗外, 其余损耗已知占额定功率的3%, 试求:

- (1) 额定电流  $I_N$ 、励磁电流  $I_f$  和电枢电流  $I_a$ ;
- (2) 感应电动势  $E_a$ ;
- (3) 总损耗  $\Sigma P$ ;
- (4) 输入功率  $P_1$ ;
- (5) 电动机效率  $\eta$  是多少。

$$(1) I_N = \frac{P_N}{U_N} \times 10^3 = \frac{20}{230} \times 10^3 = 87 \text{ A}$$

$$I_f = \frac{U_N}{R_f} = \frac{230}{104} = 2.2 \text{ A}$$

$$I_a = I_N + I_f = 87 + 2.2 = 89.2 \text{ A}$$

$$2) E_a = U_N + I_a R_a = 230 + 89.2 \times 0.45 = 270 \text{ V}$$

3) 电枢铜耗

$$P_{\text{Cu}_a} = I_a^2 R_a = 89.2^2 \times 0.45 = 3580 \text{ W}$$

励磁铜耗

$$P_{\text{Cu}_f} = I_f^2 R_f = 2.2^2 \times 104 = 503.4 \text{ W}$$

$$\text{其余损耗} \quad \frac{3}{100} \times 20 \times 10^3 = 600 \text{ W}$$

$$\Sigma P = 3580 + 503.4 + 600 = 4683.9 \text{ W}$$



$$(4) P_1 = P_N + \sum P = 20 \times 10^3 + 4683.9 = 24683 \text{ W} \\ = 24.683 \text{ kW}$$

$$(5) \eta_N = \frac{P_N}{P_1} = \frac{20 \times 10^3}{24683} = 0.81$$

例4-12 有一台直流电动机，测定空载饱和曲线的数据如表4-1所示。

表4-1 空载饱和曲线的数据

空载电流 $I_f$ (A)	0	0.6	1.30	1.63	2.05	2.67
感应电动势 $E_a$ (V)	15	100	200	240	280	320

按表中试验数据，可以把空载饱和曲线用近似公式  $E_a = \frac{aI_f}{b+I_f}$  表达出来。根据表中数据确定  $E_a$  为200V和320V时的公式中常数  $a$  和  $b$  值。

根据表中数据  $E_a = 200\text{V}$  和  $E_a = 320\text{V}$  两点对应的  $I_f$  数据，则有

$$320 = \frac{2.67a}{b+2.67}$$

$$200 = \frac{1.30a}{b+1.30}$$

经整理，得到：

$$2.67a - 320b = 320 \times 2.67 = 854.4$$

$$3a - 200b = 200 \times 1.3 = 260$$

解两联立方程式，得到：

$$a = \frac{854.4 \times 200 - 260 \times 320}{2.67 \times 200 - 1.30 \times 320} = 743$$

$$b = \frac{1.30 \times 743 - 260}{200} = 3.53,$$

所以近似公式为

$$E_a = \frac{aI_f}{b + I_f} = \frac{743I_f}{3.53 + I_f}$$

**例4-13** 一台并励直流电动机，接在100V电源上运行，测出输入电动机的电流是60A，测出空载电流 $I_0$ 为4A。已知励磁回路电阻为40Ω，电枢电阻0.1Ω，电刷压降2V，试求此台电动机输出功率是多少。

按题意画出电动机的线路图，如图4-6所示。

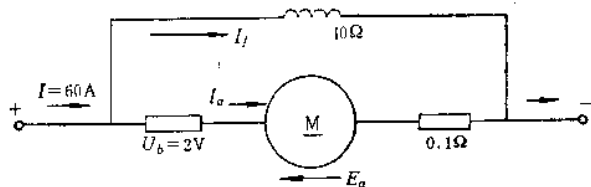


图4-6 电动机线路图

励磁电流为

$$I_f = \frac{U}{R_f} = \frac{100}{40} = 2.5\text{A}$$

空载电枢电流为

$$I_{a0} = I_0 - I_f = 4 - 2.5 = 1.5\text{A}$$

这个 $I_{a0}$ 供空载损耗（铁损耗+机械损耗），在负载时，这个损耗不变。所以按下式计算出输出功率 $P$ ，即

$$P = E(I_a - I_{a0})$$

由题意知： $I_a = 60 - I_f = 57.5\text{A}$ ，则有

$$E = 100 - 0.1 \times 57.5 = 90.3\text{V}$$

$$P = 90.3(57.5 - 1.5) = 5056.8\text{W}$$

**例4-14** 有一台他励直流电动机，已知 $U_N = 200\text{V}$ ， $R_a = 0.03\Omega$ ，要求电动机的负载特性是转矩与转速平方成正比。在200V运行时，电枢电流 $I_a = 280\text{A}$ ， $n = 800\text{r/min}$ ，如果转速降到400r/min时，电枢电压应是多少伏（已知刷压降是2V，不考虑电枢反应）。

设电动机转速为800r/min时电枢电压为 $U$ 、电枢电流为 $I_a$ ，

角速度为  $\omega_m$ 、转矩为  $T$ ，当  $n$  为  $400\text{r/min}$  时，上面参数分别为  $U'$ 、 $I'_a$ 、 $\omega'_m$ 、 $T'$ ，电刷压降用  $U_b$  表示，则有

$$\omega_m = \frac{U - R_a I_a - U_b}{c_T \Phi}$$

$$\omega'_m = \frac{U' - R_a I'_a - U_b}{c_T \Phi}$$

$$\therefore \frac{\omega'_m}{\omega_m} = \frac{400}{800} = \frac{U' - R_a I'_a - U_b}{U - R_a I_a - U_b}$$

又知负载转矩与转速平方成正比，即

$$T' = \left(\frac{\omega'_m}{\omega_m}\right)^2 T$$

因为  $T = c_T \Phi I_a$ ， $T' = c_T \Phi I'_a$ ，则有

$$I'_a = \left(\frac{\omega'_m}{\omega_m}\right)^2 I_a = \frac{280}{4} = 70\text{A}$$

供给电枢电压  $U'$  为

$$\begin{aligned} U' &= \frac{1}{2} (U - I_a R_a - V_b) + R_a I'_a + V_b \\ &= \frac{1}{2} (200 - 280 \times 0.03 - 2) + 0.03 \times 70 + 2 \\ &= 98.9\text{V} \end{aligned}$$

**例4-15** 一台串励直流电动机，已知以转矩  $T$ 、转速  $n$ 、电枢电流  $I$  在运行。现在将此台电动机的励磁线圈短去36%匝数，为原有的64%，问这时  $T'$ 、 $n'$ 、 $I'$  都是多少（这时电源电压不变，不考虑励磁绕组和电枢绕组的电阻），且磁通与电流成正比，负载转矩与转速平方成正比。

设每极磁通为  $\Phi$ ，励磁绕组总匝数为  $N$ ，则有

$$\Phi = cNI$$

式中  $c$ ——比例常数。

按上式关系，转矩与转速可写成下式：

$$T = c_T \Phi I = c_T c N I^2$$

$$n = \frac{U}{c_e \Phi} = \frac{U}{c_e c N I}$$

设负载转矩为  $T_1$ , 依题意负载转矩与转速平方成正比即  $T_1 = c_e n^2$ , 则有

$$T = T_1 = c_e n^2$$

将上式消除  $T$  和  $n$ , 则得出电流  $I$ , 即

$$c_T c N I^2 = c_e \left( \frac{U}{c_e c N I} \right)^2$$

$$I = \left( \frac{c_e U^2}{c_T c_e^2 c^3 N^3} \right)^{\frac{1}{2}} = K_4 N^{-\frac{3}{4}}$$

式中  $K_4$ ——比例常数。

$$\therefore T = c_T c N I^2 = c_T c N K_4^2 N^{-\frac{3}{2}} = K_6 N^{-\frac{1}{2}}$$

$$\therefore n = \frac{U}{c_e c N I} = \frac{U}{c_e c N K_4 N^{-\frac{3}{4}}} = K_6 N^{-\frac{1}{4}}$$

当励磁绕组短了36%时,  $N$ 变为 $(1-0.36)N$ , 则有

$$I' = \left( \frac{0.64}{N} \right)^{-\frac{3}{4}} I = 1.4I$$

$$T' = 0.64^{-\frac{1}{2}} T = 1.25T$$

$$n' = 0.64^{\frac{1}{4}} \cdot n = 1.12n$$

**例4-16** 一台并励直流电动机, 已知端电压 $U$ 、输入电流 $I$ 、电枢回路总电阻 $R_a$ 、励磁回路电阻 $R_f$ 、空载电流 $I_0$ , 求此台电动机的效率是多少。

设铁损耗为 $P_{Fe}$ 、机械损耗为 $p_m$ 、励磁铜耗为 $P_{Cu_f}$ , 由于 $I_0$ 很小, 忽略, 则有

$$P_{Fe} + p_m + P_{Cu_f} = UI_a$$

电枢电流为

$$I_a = I - \frac{U}{R_f}$$

电枢铜耗为

$$P_{Cu_a} = R_a I_a^2 = R_a \left( I - \frac{U}{R_f} \right)^2$$

所以电动机效率  $\eta$  为

$$\begin{aligned} \eta &= \frac{UI - (P_{Fe} + P_m + P_{Cu_f} + P_{Cu_a})}{UI} \times 100\% \\ &= \frac{UI - \{UI + R_a(I - U/R_f)^2\}}{UI} \times 100\% \end{aligned}$$

**例4-17** 有一台并励直流电动机，输出功率为 9 kW 时，端电压为 220V，输入电流为 51.5A，励磁电流为 1.5A，转速为 1500r/min，试求电动机运行时电磁功率  $P_M$  和电机效率  $\eta$  是多少（已知电枢回路电阻为 0.1Ω）。

依题意，画出电动机的电路图如图4-7所示。

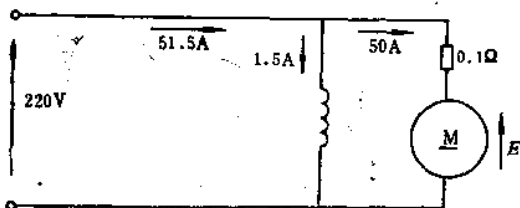


图4-7 并励直流电动机

设感应电动势为  $E_a$ ，电枢电流为  $I_a$ ，则电磁功率为

$$\begin{aligned} P_M &= E_a I_a = \{220 - 0.1 \times (51.5 - 1.5)\} \times (51.5 - 1.5) \\ &= 215 \times 50 = 10750 \text{ W} \end{aligned}$$

电磁转矩  $T_M$  为

$$T_M = 9550 \times \frac{P_M}{n} = 9550 \times \frac{10.75}{1500} = 68.44 \text{ N} \cdot \text{m}$$

电动机效率  $\eta$  为

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} \times 100\% = \frac{9000}{220 \times 51.5} \times 100\% = 79.4\%$$

例4-18 一台20kW、200V直流并励电动机，已知满负荷时效率为85%，又知电枢绕组、并励绕组、补偿极绕组的电阻分别为0.08、76.5、0.015Ω，电刷压降，正负电刷各1V，如果机械损耗为1kW，问这台电动机铁损耗是多少。

这台电动机输入电流  $I$  为

$$I = \frac{P}{U\eta} = \frac{20 \times 10^3}{200 \times 0.85} = 117.6\text{A}$$

励磁绕组电流为

$$I_f = \frac{U}{R_f} = \frac{200}{76.5} = 2.61\text{A}$$

电枢电流为

$$I_a = I - I_f = 117.6 - 2.61 = 115.1\text{A}$$

总损耗为

$$\Sigma P = UI - P = UI(1 - \eta) = 200 \times 117.6 \times (1 - 0.85) = 3528\text{W}$$

电动机铁耗为

$$\begin{aligned} P_{Fe} &= \Sigma P - \{(0.08 + 0.015) \times 115.1^2 + 2 \times 1.0 \\ &\quad \times 115.1 + 200 \times 2.61 + 1.0 \times 10^3\} \\ &= 3528 - (1259 + 230 + 522 + 1000) \\ &= 517\text{W} \end{aligned}$$

例4-19 一台并励直流电动机接入120V电源上运行，已知负载电流为53A、空载电流为4.25A，励磁回路电阻  $R_f = 40\Omega$ ，电枢回路电阻  $R_a = 0.1\Omega$ ，问电动机输出功率是多少，效率是多少（已知电刷电压降为2V）。

设空载电枢电流为  $I_{a0}$ ，电枢电流为  $I_a$  时，输出功率  $P$  为

$$\begin{aligned} P &= P_M - P_{Fe} - p_m = E_a(I_a - I_{a0}) \\ &= (U - RI_a - U_\delta)(I_a - I_{a0}) \end{aligned}$$

式中  $U$ ——端电压 (V)；

$R_a$ ——电枢回路电阻(Ω)；

$U_b$ ——正负电刷电阻压降(V)。

励磁电流为

$$I_f = \frac{120}{40} = 3 \text{ A}$$

$$I_a = 53 - 3 = 50 \text{ A}$$

$$I_{a0} = 4.25 - 3 = 1.25 \text{ A}$$

电动机输出功率  $P$  为

$$P = (120 - 0.1 \times 50 - 2)(50 - 1.25) = 5510 \text{ kW}$$

电动机效率  $\eta$  为

$$\eta = \frac{P}{UI} \times 100\% = \frac{5510}{120 \times 53} \times 100\% = 86.6\%$$

例4-20 一台额定电压为100V的并励直流电动机，已知  $R_f = 40\Omega$ ， $R_a = 0.1\Omega$ ，电刷电压降  $U_b = 2\text{V}$ ，空载电流为4A，求这台电动机最大效率时的输入电流和输出功率各是多少。

电动机效率  $\eta$  为

$$\eta = \frac{E(I_a - I_{a0})}{U(I_a + I_f)} = \frac{(U - U_b - R_a I_a)(I_a - I_{a0})}{U(I_a + I_f)}$$

求最大效率时，应使  $\frac{d\eta}{dI_a} = 0$ ，因此有

$$\frac{(-2R_a I_a + U - U_b + R_a I_{a0})(I_a + I_f) - (U - U_b - R_a I_a)(I_a - I_{a0})}{U(I_a + I_f)^2}$$

= 0

$$\therefore R_a I_a^2 + 2R_a I_f I_{a0} - (U - U_b)(I_f + I_{a0}) - R_a I_{a0} I_f = 0$$

已知  $I_f = \frac{100}{40} = 2.5 \text{ A}$

$$I_{a0} = 4 - I_f = 1.5 \text{ A}$$

将  $R_a = 0.1\Omega$ 、 $U = 100\text{V}$ 、 $U_b = 2\text{V}$  代入上式，则有

$$0.1 I_a^2 - 0.5 I_a - 392.4 = 0$$

$$\therefore I_a = \frac{-0.5 \pm \sqrt{0.5^2 + 4 \times 0.1 \times 392.4}}{2 \times 0.1} = 60.2 \text{ A}$$

当  $I_a > 0$ , 取正号, 输入电流  $I_1$  为

$$I_1 = I_a + I_f = 60.2 + 2.5 = 62.7 \text{ A}$$

最大效率时输出功率  $P$  为

$$\begin{aligned} P &= E(I_a - I_{a0}) = (100 - 0.1 \times 60.2 - 2)(60.2 - 1.5) \\ &= 5400 \text{ W} \end{aligned}$$

电动机效率  $\eta$  为

$$\eta = \frac{P}{UI_1} = \frac{5400}{100 \times 62.7} = 0.861$$

例4-21 一台6极并励直流电动机, 已知  $P_N = 18 \text{ kW}$ ,  $U_N = 230 \text{ V}$ ,  $n_N = 960 \text{ r/min}$ ,  $I_N = 82.5 \text{ A}$ , 电枢回路总电阻  $R_a = 0.10 \Omega$ , 励磁电阻  $R_f = 200 \Omega$ , 忽略电枢反应, 试求:

- (1) 额定转矩  $T_N$ ;
- (2) 额定效率  $\eta_N$ ;
- (3) 励磁电流  $I_f$ 、电枢电流  $I_a$ ;
- (4) 额定负载转矩  $T_N$ ;
- (5) 理想空载转速 ( $I_a = 0$ )  $n_0$ ;
- (6) 在电枢回路中串入电阻  $R' = 0.2 \Omega$  时, 转速  $n$  是多少。

(1) 额定转矩  $T_N$

$$T_N = 9550 \times \frac{P_N}{n_N} = 9550 \times \frac{18}{960} = 179 \text{ N} \cdot \text{m}$$

(2) 励磁电流  $I_f$

$$I_f = \frac{U_f}{R_f} = \frac{230}{200} = 1.15 \text{ A}$$

电枢电流  $I_a$  为

$$I_a = I_N - I_f = 82.5 - 1.15 = 81.4 \text{ A}$$

(3) 额定效率  $\eta_N$

$$\eta_N = \frac{P_N}{P_1} = \frac{18 \times 10^3}{U_N I_N} = \frac{18000}{230 \times 82.5} = 95\%$$

(4) 额定负载转矩  $T_N$

由  $U = E_a + I_a R_a = c_e n \Phi + I_a R_a$  知,



$$c_e \Phi = \frac{U - I_a R_a}{n} = \frac{230 - 81.4 \times 0.1}{960} = 0.23$$

$$\begin{aligned} T_N &= c_m \Phi I_a = 9.55 c_e \Phi I_a \\ &= 9.55 \times 0.23 \times 81.4 = 178.8 \text{ N}\cdot\text{m} \end{aligned}$$

(5) 当  $I_a = 0$  时,  $n_0 = U_N / c_e \Phi = \frac{230}{0.23} = 1000 \text{ r/min}$

(6) 串入电阻  $R = 0.2 \Omega$ , 在额定转矩下的转速  $n$  为

$$\begin{aligned} n &= \frac{U_N - I_a (R_a + R')}{c_e \Phi} = \frac{230 - 81.4 \times (0.1 + 0.2)}{0.23} \\ &= 894 \text{ r/min} \end{aligned}$$

例4-22 一台42kW他励直流电动机, 已知 $U_N = 230\text{V}$ ,  $I_N = 209\text{A}$ ,  $n_N = 1500\text{r/min}$ ,  $R_a = 0.08\Omega$ , 试求:

- (1) 额定感应电动势  $E_a$ ;
- (2) 额定效率  $\eta_N$ ;
- (3) 额定转矩  $T_N$ 、空载转矩  $T_0$ 、电磁转矩  $T_M$ ;
- (4) 理想转速  $n_0$ 。

(1) 由  $U = E_a + I_a R_a$  可知:

$$E_a = U - I_a R_a = 230 - 209 \times 0.082 = 212.9 \text{ V}$$

(2)  $c_e \Phi = \frac{E_a}{n_N} = \frac{212.9}{1500} = 0.142$

$$c_M \Phi = 9.55 c_e \Phi = 1.36$$

(3) 电磁转矩

$$T_M = c_M \Phi I_a = 1.36 \times 209 = 283 \text{ N}\cdot\text{m}$$

额定转矩为

$$T_N = 9550 \times \frac{P_N}{n_N} = 9550 \times \frac{42}{1500} = 267.4 \text{ N}\cdot\text{m}$$

空载转矩为

$$T_0 = T_M - T_N = 283 - 267.4 = 15.6 \text{ N}\cdot\text{m}$$

(4) 理想转速

$$n_0 = \frac{U_N}{c_e \Phi} = \frac{230}{0.142} = 1620 \text{ r/min}$$

**例4-23** 有一台  $P_N = 50 \text{ kW}$ ,  $U_N = 200 \text{ V}$ ,  $n_n = 1000 \text{ r/min}$  的他励直流发电机。已知电枢回路电阻  $R_a = 0.04 \Omega$ , 当发电机额定状态运行时, 如果使转速降为  $800 \text{ r/min}$ , 问此时发电机的端电压和输出功率有什么变化 (不考虑电枢反应, 并认为负载电阻不变)。

依题意可画出发电机线路图, 如图 4-8 所示。

(1) 额定电流

$$I_N = \frac{P_N \times 10^3}{U_N} = \frac{50 \times 10^3}{200} = 50 \text{ A}$$

(2) 感应电动势

$$E_a = U + R_a I_a = 200 + 0.04 \times 50 = 210 \text{ V}$$

由于负载电阻不变, 电枢电路电压和电流与感应电动势成正比。所以当  $n = 800 \text{ r/min}$  时, 设此时端电压为  $U'$ , 电枢电流为  $I'_a$ , 则有

$$\text{由 } \frac{U'}{U_N} = \frac{E'}{E_N} \text{ 得出,}$$

$$U' = 200 \times \frac{168}{210} = 160 \text{ A}$$

$$\text{由 } \frac{I'_a}{I_N} = \frac{E'}{E_N}, \text{ 得出,}$$

$$I'_a = 250 \times \frac{168}{210} = 200 \text{ A}$$

此时发电机发出的输出功率  $P$  为

$$P = 160 \times 200 = 32 \text{ kW}$$

**例4-24** 试求并励直流电动机的效率最大时, 电枢电流  $I_a$  应该是多少, 已知端电压  $U$ 、电枢回路总电阻  $R_a$ 、励磁电流  $I_f$ 、空载时电枢电流  $I_{a0}$ 。

负载时输入功率  $P_1$  为

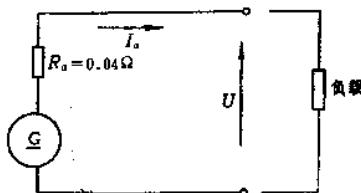


图4-8 50kW直流发电机线路图

$$P_1 = U(I_a + I_f)$$

设负载时铁损耗  $P_F$  和机械损耗  $p_m$  等于  $UI_{a0}$ , 则电动机效率  $\eta$  为

$$\eta = \frac{P_1 - \Sigma P}{P_1} = \frac{U(I_a + I_f) - (I_a^2 R_a + UI_{a0} + UI_f)}{U(I_a + I_f)}$$

为了求出最大效率时的  $I_a$ , 应使  $\frac{d\eta}{dI_a} = 0$

$$\frac{d\eta}{dI_a} = \frac{(U - 2R_a I_a)(I_a + I_f) - UI_a - R_a I_a^2 - UI_{a0}}{U(I_a + I_f)^2}$$

$$= \frac{-R_a I_a^2 + U(I_f + I_{a0}) - 2R_a I_a I_f}{U(I_a + I_f)^2} = 0$$

$$\therefore I_a^2 R_a + 2R_a I_f I_a = U(I_f + I_{a0})$$

$$\therefore I_a = \frac{-R_a I_f \pm \sqrt{(R_a I_f)^2 + R_a U(I_f + I_{a0})}}{R_a}$$

$$= \sqrt{\frac{U(I_f + I_{a0})}{R_a}} + I_f - I_f$$

### 第三节 直流电动机调速及计算

#### 一、并励直流电动机调速计算

已知直流电动机电动势平衡方程式为  $U = E_a + I_a R_a$ , 此式说明外施电压  $U$  与感应电动势(反电势)和电枢回路的电压降  $I_a R_a$  相平衡。当电枢旋转时, 电枢绕组导体切割气隙磁场, 在电枢绕组内产生感应电动势, 这个电动势的方向与外施电源电压  $U$  的方向相反, 所以叫反电势。

如前所述, 反电势  $E_a$  可写成:

$$E_a = \frac{pN}{60a} \Phi n = c_e \Phi n (V)$$

将此式代入上式, 并经整理, 可得到:

$$n = \frac{U - I_a R_a}{c_e \Phi}$$

从此式看出,欲改变电动机的转速 $n$ ,只要改变外施电源电压 $U$ 、励磁磁场、减弱磁通 $\Phi$ 、改变电枢回路电阻 $R_a$ 即可。

1. 改变外施电压 $U$  ( $\Phi$ 和 $R_a$ 不变)

调节外施电压 $U$ 一般是降电压,使电动机转速 $n$ 下降,因为将 $U$ 提高许多,转速上升,对电动机换向和绝缘以及机械强度均带来不良的影响。

假设电压 $U$ 降到 $U'$ ,则电枢电流 $I_a$ 降为 $I'_a$ ,这时电动机转速 $n'$ 变成:

$$n' = \frac{U' - I'_a R_a}{c_e \Phi}$$

将此 $n'$ 与原有转速 $n$ 相比,得到:

$$\frac{n'}{n} = \frac{U' - I'_a R_a}{U - I_a R_a}$$

一般 $I_a R_a$ 很小,可忽略,则上式简化为

$$\frac{n'}{n} = \frac{U'}{U}$$

说明电动机的转速 $n$ 与外施电压 $U$ 成正比。

例4-25 有一台并励直流电动机,已知 $P_N = 50\text{kW}$ ,  $U_N = 230\text{V}$ ,  $I_a = 60\text{A}$ ,  $n_N = 1450\text{r/min}$ ,  $R_a = 0.08\Omega$ ,当电压 $U_N$ 降到 $U' = 190\text{V}$ 时,问这时电动机转速 $n'$ 是多少。

在调压时保持 $I_a$ 不变,即 $I'_a = I_a$ ,则有

$$n' = n \left( \frac{U' - I_a R_a}{U - I_a R_a} \right) = 1450 \left( \frac{190 - 60 \times 0.08}{230 - 60 \times 0.08} \right) = 1193\text{r/min}$$

如果忽略 $I_a R_a$ ,用近似公式计算得到:

$$n' = n \frac{U'}{U} = 1450 \times \frac{190}{230} = 1198\text{r/min}$$

误差为

$$\frac{1198 - 1193}{1193} \times 100\% = 0.4\%$$

可见误差不大,可在工程上使用。

降低电源电压调速法，仍保持  $\Phi$  和  $I_a$  不变，则电动机转矩  $T = c_T \Phi I_a$  也不变，所以此法称为恒转矩调速方法，一般是从  $n_N$  向下调。

**例4-26** 一台7.5kW并励直流电动机， $U_N = 110V$ ， $\eta_N = 0.83$ ， $n_N = 1000r/min$ ， $R_a = 0.15\Omega$ ， $R_f = 41.5\Omega$ ，当外施电压  $U$  从110V降到70V时，问这台电动机的转速  $n'$  是多少。

电动机输入功率为

$$P_1 = \frac{P_N}{\eta_N} = \frac{7.5}{0.83} = 9.04\text{kW}$$

额定电流为

$$I_N = \frac{P_1}{U_N} = \frac{9.04 \times 10^3}{110} = 82.2\text{A}$$

励磁电流为

$$I_f = \frac{U_N}{R_f} = \frac{110}{41.5} = 2.7\text{A}$$

电枢电流为

$$I_a = I_N - I_f = 82.2 - 2.7 = 79.5\text{A}$$

电压降到70V时电动机的转速  $n'$  为

$$\begin{aligned} n' &= n \left( \frac{U' - I_a R_a}{U - I_a R_a} \right) = 1000 \left( \frac{70 - 79.5 \times 0.15}{110 - 79.5 \times 0.15} \right) \\ &= 592.2\text{r/min} \end{aligned}$$

**例4-27** 有一台并励直流电动机，已知  $U_N = 110V$ ， $n_N = 3000r/min$ ， $I_a = 78A$ ， $R_a = 0.35\Omega$ ，又知电动机在空载时，空载电流  $I_0 = 14A$ ，问此台电动机空载转速  $n_0$  是多少，静差度  $\delta$  是多少。

空载时反电势  $E_0 = U_N - I_0 R_a = 110 - 14 \times 0.35 = 105.1V$ ，额定运行时反电势  $E_N = U_N - I_a R_a = 110 - 78 \times 0.35 = 82.7V$ ，所以空载时电动机转速  $n_0$  为

$$n_0 = n_N \frac{E_0}{E_N} = 3000 \times \frac{105.1}{82.7} = 3812.6\text{r/min}$$

静差度为

$$\delta = \frac{n_n - n_N}{n_N} \times 100\% = \frac{3812.6 - 3000}{3000} \times 100\% = 27.1\%$$

## 2. 改变磁通 $\Phi$ ( $U$ 、 $R_a$ 不变)

调节励磁电流，使磁通  $\Phi$  改变为  $\Phi'$ ，保持电源电压  $U$  和电枢电阻  $R_a$  不变，这时电动机的转速从  $n$  变到  $n'$  时，则有

$$n' = \frac{U - I_a' R_a}{c_e \Phi'}$$

$n'$  与原转速  $n$  比值，为

$$\frac{n'}{n} = \frac{c_e \Phi}{c_e \Phi'}, \quad \frac{U - I_a' R_a}{U - I_a R_a} = \frac{\Phi}{\Phi'} \cdot \frac{U - I_a' R_a}{U - I_a R_a}$$

考虑  $I_a' R_a$  很小时，可得近似公式为

$$\frac{n'}{n} = \frac{\Phi}{\Phi'}$$

可见，调励磁变磁通调速，当电枢电流变化很小时，电动机转速  $n$  与磁通  $\Phi$  成反比。

这种调速方法由于调节磁场，励磁电流很小，所以调节变阻器容量小，价格便宜。又由于变阻器串入磁场电路中，使励磁电流  $I_f$  向下降，使磁通  $\Phi$  降低，所以此法只适合于提高电动机转速，但换向和电枢机械强度等又不允许转速提高太高，所以此调速范围有一定限度，只适合于恒功率调速，因为用做恒转矩调速时，不经济。

**例4-28** 有一台 5kW 并励直流电动机，已知  $U_N = 220\text{V}$ ， $n_N = 500\text{r/min}$ ， $R_a = 1.3\Omega$ ， $I_a = 28.5\text{A}$ ， $I_f = 0.7\text{A}$ ，在  $I_a$  不变情况下，调节励磁使磁通降低 50%，问这时电动机的转速  $n'$  是多少。

$$\begin{aligned} n' &= n \left( \frac{\Phi}{\Phi'} \cdot \frac{U - I_a' R_a}{U - I_a R_a} \right) = n \frac{\Phi}{\Phi'} = 500 \times \frac{1}{0.5} \\ &= 1000\text{r/min} \end{aligned}$$

例4-29 有一台并励直流电动机，已知  $U_N = 220\text{V}$ ， $n_N = 1450\text{r/min}$ ， $I_a = 79.5\text{A}$ ，在负载转矩  $T_L$  不变条件下，将磁通  $\Phi$  降了20%，问稳定转速  $n'$  是多少。

转速改变前  $T_M = c_T \Phi I_a$ ，转速改变后  $T'_M = c_T \Phi' I'_a$ ，按题意， $T'_M = T_M$ ，所以有

$$\frac{I'_a}{I_a} = \frac{\Phi}{\Phi'}$$

电枢电流与磁通成反比，由此可算出电枢电流为

$$I'_a = I_a \times \frac{\Phi}{\Phi'} = 79.5 \times \frac{1}{0.80} = 99.4\text{A}$$

改磁通前电动机转速为

$$n = \frac{U - I_a R_a}{c_e \Phi}$$

改磁通后电动机转速为

$$n' = \frac{U - I'_a R_a}{c_e \Phi'}$$

两式相比，得到：

$$\begin{aligned} n' &= n \left( \frac{U - I'_a R_a}{U - I_a R_a} \right) \frac{\Phi}{\Phi'} = 1450 \times \left( \frac{220 - 99.4 \times 0.31}{220 - 79.5 \times 0.31} \right) \frac{1}{0.80} \\ &= 1755\text{r/min} \end{aligned}$$

### 3. 改变电枢回路电阻 $R_a$ ( $U$ 和 $\Phi$ 不变)

当电动机的外施电源电压  $U$  和磁通  $\Phi$  不变时，在电枢回路中串入外加电阻  $R_0$ ，这时电动机的转速变为  $n'$ ，即

$$n' = \frac{U - I_a (R_a + R_0)}{c_e \Phi}$$

$n'$  与原有转速  $n$  相比，得到：

$$\frac{n'}{n} = \frac{U - I_a (R_a + R_0)}{U - I_a R_a}$$

由于电枢电流很大，所以串入  $R_0$  后的损耗也很大 ( $I_a^2 R_0$ )，此法调速不经济，发热量大，不适于容量大的电动机采用。

例4-30 有一台18kW并励直流电动机，已知  $U_N = 220\text{V}$ ，

$I_a = 94\text{A}$ ,  $n_N = 1000\text{r/min}$ ,  $R_a = 0.15\Omega$ , 为了使转速降到  $n' = 850\text{r/min}$  运行,  $I_a$  和  $U$  不变, 那么电枢回路中应串入多大电阻  $R_0$ ,  $R_0$  上的损耗是多大。

$$n' = n \left[ \frac{U - I_a(R_a + R_0)}{U - I_a R_a} \right]$$

$$= 1000 \left[ \frac{220 - 94(0.15 + R_0)}{220 - 94 \times 0.15} \right] = 850 \text{ r/min}$$

解出  $R_0 = 0.329\Omega$ , 应串入  $0.329\Omega$ , 电动机转速可达  $850\text{r/min}$ 。

又  $R_0$  上的损耗为

$$I_a^2 R_0 = 94^2 \times 0.329 = 2907\text{W}$$

可见这种调速法损耗很大。

电枢回路串电阻调速是向下调速的方法, 适于恒转矩负载调速。由于损耗大, 所以适用于电动机容量不大, 调速范围小, 调速时间短的场合, 优点是初投资较省。

采用电枢回路串电阻调速时, 当负载有变动, 会引起  $I_a R_a$  变化很大, 所以电动机转速波动很大, 对生产有影响。为了克服这种现象, 除了电枢回路串入电阻  $R_0$  外, 还要并联一个电阻  $R_{并}$ , 如图4-9所示。

这时电动机的转速  $n'$  为

$$n' = \frac{(U - IR_0) - I'R_a}{c_e \Phi} = \frac{U'' - I'R_a}{c_e \Phi}$$

设  $I_{并} = I - I'$ ,  $U'' = U - IR_0$ , 因此有

$$I = \frac{U - U''}{R_0}$$

$$R_{并} = \frac{U''}{I_{并}}$$

$n'$  与原转速  $n$  的比值为

$$\frac{n'}{n} = \frac{U'' - I'R_a}{U - IR_a}$$

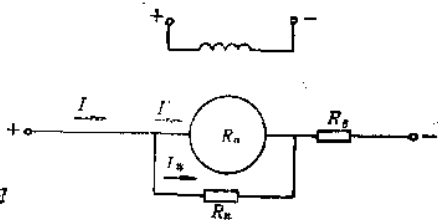


图4-9 电枢回路串、并电阻调速



**例4-31** 一台并励直流电动机, 已知  $U_N = 220\text{V}$ ,  $I_a = 94\text{A}$ ,  $R_a = 0.15\Omega$ ,  $n_N = 1000\text{r/min}$ ,  $R_0 = 1\Omega$ , 当使转速降为  $300\text{r/min}$  时, 问并联电阻  $R_{\text{并}}$  应是多少。

由  $\frac{n'}{n} = \frac{300}{1000} = \frac{U'' - 94 \times 0.15}{220 - 94 \times 0.15}$ , 求出  $U''$  为

$$U'' = \frac{300}{1000}(220 - 94 \times 0.15) + 94 \times 0.15 = 75.87\text{V}$$

电动机输入电流为

$$I = \frac{U - U''}{R_0} = \frac{220 - 75.87}{1} = 144.5\text{A}$$

并联电路电流为

$$I_{\text{并}} = I - I' = 144 - 94 = 50\text{A}$$

应并联电阻为

$$R_{\text{并}} = \frac{U''}{I_{\text{并}}} = \frac{75.87}{50} = 1.52\Omega$$

**例4-32** 有一台  $17\text{kW}$  并励直流电动机, 已知  $U_N = 110\text{V}$ ,  $I_N = 193\text{A}$ ,  $n_N = 600\text{r/min}$ ,  $R_a = 0.08\Omega$ ,  $R_f = 30\Omega$ , 在负载转矩  $T_e$  不变情况下, 电枢回路中串入外加电阻  $R_0 = 0.2\Omega$ , 由于拖动系统惯性大, 此时电动机转速未变, 求电枢电流  $I'_a$  和电磁转矩  $T_m$  是多少, 当电动机进入新的稳定状态后, 电枢电流  $I'_a$  和转速  $n'$  各是多少。

(1) 电枢电流

$$I_a = I_N - I_f = I_N - \frac{U_N}{R_f} = 193 - \frac{110}{30} = 189.3\text{A}$$

(2) 接入串联电阻  $R_0$  后, 由于  $n$  未变,  $n = n_N$  所以  $E'_a = E_a$  未变, 则有

$$E'_a = c_e \Phi n_N = U_N - I_a R_a = 110 - 189.3 \times 0.08 = 94.9\text{V}$$

此瞬间电枢电流为

$$I'_a = \frac{U_N - E'_a}{R_a + R_0} = \frac{110 - 94.9}{0.08 + 0.2} = 53.9\text{A}$$

电动势常数乘  $\Phi$  为

$$c_e \Phi = \frac{E_a}{n_N} = \frac{94.9}{600} = 0.158$$

转矩常数乘  $\Phi$  为

$$c_T \Phi = \frac{c_e \Phi}{0.105} = 1.51$$

此时电磁转矩为

$$T_M = c_T \Phi I_a = 1.51 \times 53.9 = 81.4 \text{ N}\cdot\text{m}$$

电动机稳定后, 电枢电流不变, 此时转速  $n'$  为

$$\begin{aligned} n' &= \frac{U_N - I_a(R_a + R_b)}{c_e \Phi} = \frac{110 - 189.3(0.08 + 0.2)}{0.158} \\ &= 316 \text{ r/min} \end{aligned}$$

**例4-33** 一台10kW 并励直流电动机, 已知  $U_N = 110\text{V}$ ,  $\eta_N = 83\%$ ,  $n_N = 1000\text{r/min}$ ,  $R_f = 40\Omega$ ,  $R_a = 0.14\Omega$ 。在额定负载时, 电枢内串入附加电阻  $R_0 = 0.5\Omega$ , 试求:

- (1) 输入功率  $P_1$ ;
- (2) 额定电流  $I_N$ , 励磁电流  $I_f$ , 电枢电流  $I_a$ ;
- (3) 电枢铜耗  $P_{Cu a}$ , 励磁回路铜耗  $P_{Cu f}$ ;
- (4) 电磁功率  $P_M$ ;
- (5) 额定转矩  $T_N$ ;
- (6) 电枢回路串入电阻  $R_0$  后, 如果负载转矩不随转速而变化, 达到稳定运行后电动机转速是多少。

$$(1) \quad P_1 = \frac{P_N}{\eta_N} = \frac{10}{0.83} = 12 \text{ kW}$$

$$(2) \quad I_N = \frac{P_1}{U_N} = \frac{12 \times 10^3}{110} = 109 \text{ A}$$

$$I_f = \frac{U_N}{R_f} = \frac{110}{40} = 2.75 \text{ A}$$

$$I_a = I_N - I_f = 109 - 2.75 = 106.3 \text{ A}$$

$$(3) \quad P_{Cu a} = I_a^2 R_a = 106.3^2 \times 0.14 = 1582 \text{ W}$$

$$P_{CuI} = I_a^2 R_f = 2.75^2 \times 40 = 303 \text{ W}$$

$$(4) \quad P_M = P_1 - (P_{CuI} + P_{CuI}) = 12 \times 10^3 - (1582 + 303) \\ = 10115 \text{ W}$$

$$(5) \quad T_N = 9550 \times \frac{P_N}{n_N} = 9550 \times \frac{10}{1000} = 95.5 \text{ N} \cdot \text{m}$$

(6) 电枢回路串入附加电阻  $R_0$  后, 电动机转速  $n'$  为

$$n' = n_n \left[ \frac{U_N - I_a (R_a + R_0)}{U_N - I_a R_a} \right] = 1000 \times \left[ \frac{110 - 106.3(0.14 + 0.5)}{110 - 106.3 \times 0.14} \right] \\ \approx 553 \text{ r/min}$$

**例4-34** 有一台 5 kW 并励直流电动机, 200V, 电枢电阻  $R_a = 0.2 \Omega$ , 拖动恒转矩负载运行, 电流为 20A, 转速为 1000 r/min, 现对相同的负载, 电枢回路串入电阻, 使转速降到 800 r/min, 问应串入多大电阻。

因负载转矩一定,  $T = c_M \Phi I_a$  中的  $\Phi$  和  $I_a$  不变。设 1000 r/min 和 800 r/min 时的转速分别为  $n$ 、 $n'$ , 串入电阻为  $R_0$ , 则有

$$n = \frac{U - R_a I_a}{c_e \Phi}, \quad n' = \frac{U - I_a (R_a + R_0)}{c_e \Phi}$$

$$\therefore n' = n \left( \frac{800}{1000} \right) \left( \frac{U - R_a I_a - R_0 I_a}{U - R_a I_a} \right)$$

$$\therefore R_0 = \frac{0.2(U - R_a I_a)}{I_a} = \frac{0.2(200 - 0.2 \times 20)}{20} = 1.96 \Omega$$

**例4-35** 有一台并励直流电动机, 接线图如图4-10所示, 拖动恒转矩负载运行, 已知电源电压为  $U_1$  时, 电枢电流为  $I_1$ , 转速为  $n_1$ 。现在电源电压改为  $U_2$  时, 问电枢电流  $I_2$  和转速  $n_2$  各为多少 (不考虑磁饱和和电枢反应, 电枢回路电阻和串入的电阻之和为  $R$ )。

因为不考虑磁饱和和电枢反应, 所以磁通与电枢电压成正比, 当电源电压为  $U_1$  时, 磁通为  $\Phi_1$ , 电源电压为  $U_2$  时, 磁通为  $\Phi_2$ , 则有

$$\frac{\Phi_2}{\Phi_1} = \frac{U_2}{U_1}$$

由于负载转矩恒定，所以  $T = c_T \Phi_1 I_1 = c_T \Phi_2 I_2$ ，因此有

$$I_2 = \frac{\Phi_1}{\Phi_2} I_1 = \frac{U_1}{U_2} I_1 \quad (\text{A})$$

根据电枢回路电动势平衡方程式

$$U_1 = c_e \Phi_1 n_1 + R I_1$$

$$U_2 = c_e \Phi_2 n_2 + R I_2$$

解出：

$$n_2 = \frac{U_2 - R I_2}{c_e \Phi_2} = \frac{U_2 - R I_2 \Phi_1}{U_1 - R I_1 \Phi_2} n_1$$

整理上式并消除  $\Phi_1$ 、 $\Phi_2$ 、 $I_2$  得到：

$$n_2 = \frac{U_1 (U_2^2 - U_1 R I_1)}{U_2^2 (U_1 - R I_1)} n_1 \quad (\text{r/min})$$

例4-36 有一台电动发电机组，如图4-11所示。

拖动恒转矩负载运行，其端电压  $U = 210\text{V}$ ，电流为  $100\text{A}$ ，转速为  $1000\text{r/min}$ ，这时如果使发电机磁通降为75%，问电动机转速是多少。

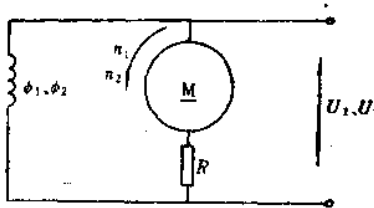


图4-10 并励直流电动机接线图

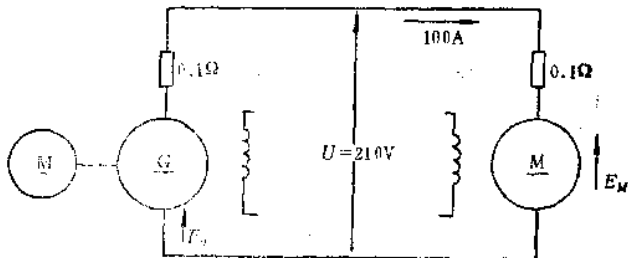


图4-11 电动发电机组接线图

已知发电机端电压为  $210\text{V}$ ，电流为  $100\text{A}$  时，感应电动势为

$$E_G = 210 + 0.1 \times 100 = 220 \text{ V}$$

电动机感应电动势为

$$E_M = 210 - 0.1 \times 100 = 200 \text{ V}$$

当磁通降为原有的75%时,发电机电动势  $E_G' = 220 \times 0.75 = 165 \text{ V}$ 。由于负载转矩一定,所以电动机磁通也一定,电枢电流  $100 \text{ A}$ 一定,此时电动机的感应电动势  $E_M' = E_G' - (0.1 + 0.1) \times 100 = 145 \text{ V}$ 。

由于电动机磁通一定,其转速应与感应电动势成正比,即

$$n = \frac{145}{200} \times 1000 = 725 \text{ r/min}$$

## 二、串励直流电动机调速计算

串励直流电动机特点是磁通是由电枢电流决定的,当负载大时,电枢电流增大,则磁通也增大,但它们之间不是正比关系,而是一条饱和曲线,当电流增加很大时,磁通因铁心饱和的缘故,增加不多,甚至不再增加。

由  $U = E + I_a R_a = c_e \Phi n + I_a R_a$  知:

$$n = \frac{U - I_a R_a}{c_e \Phi}$$

$R_a$  是电枢电阻和串励磁场绕组电阻之和。

所以串励直流电动机调节转速时,也是改变电源电压  $U$ 、磁通  $\Phi$  和电枢回路电阻大小。

### 1. 改变外施电源电压 $U$

当  $U$  降到  $U'$  时,电动机转速从  $n$  变到  $n'$ , 即  $n' = \frac{U' - I_a R_a}{c_e \Phi}$ ,

与原转速  $n$  相比, 得到:

$$\frac{n'}{n} = \frac{U' - I_a R_a}{U - I_a R_a}$$

**例4-37** 有一台串励直流电动机,已知  $U_N = 220 \text{ V}$ ,  $I_N = 65 \text{ A}$ ,  $n_N = 1000 \text{ r/min}$ , 电枢及串励磁场电阻总和为  $0.3 \Omega$ , 问当外施电压降到  $110 \text{ V}$  时, 电动机的转速  $n'$  是多少。

$$n' = n \left( \frac{U' - I_a' R_a}{U - I_a R_a} \right) = 1000 \times \left( \frac{110 - 65 \times 0.3}{220 - 65 \times 0.3} \right) \\ = 450 \text{ r/min}$$

例4-38 仍用上例串励直流电动机，当电枢电流降到  $I_a' = 45 \text{ A}$  时，问这台电动机的转速  $n'$  是多少。

$$n' = n \left( \frac{U' - I_a' R_a}{U - I_a R_a} \right) = 1000 \times \left( \frac{110 - 45 \times 0.3}{220 - 65 \times 0.3} \right) \\ = 480 \text{ r/min}$$

上述调速方法也是向下调速，使用在恒转矩负载的场合。

## 2. 电枢串电阻 $R_0$

电枢回路串入电阻  $R_0$  后，电动机转速为

$$n' = \frac{U - I_a'(R_a + R_0)}{c_a \Phi'}, \quad n' \text{ 与 } n \text{ 相比得:}$$

$$\frac{n'}{n} = \frac{U - I_a'(R_a + R_0)}{U - I_a R_a} \cdot \frac{\Phi}{\Phi'}$$

当  $I_a' = I_a$  不变时，则  $\Phi' = \Phi$  不变，有以下关系：

$$\frac{n'}{n} = \frac{U - I_a(R_a + R_0)}{U - I_a R_a}$$

例4-39 一台串励直流电动机，已知  $U_N = 220 \text{ V}$ ,  $I_N = 70 \text{ A}$ ,  $n_N = 800 \text{ r/min}$ ,  $R_a = 0.22 \Omega$ ，当电枢中串入电阻  $R_0 = 2 \Omega$  时，电枢电流变为  $I_a' = 30 \text{ A}$ ，这时磁通  $\Phi$  降为 60%，问电动机此时的转速是多少。

$$\frac{n'}{n} = \frac{U - I_a'(R_a + R_0)}{U - I_a R_a} \cdot \frac{\Phi}{\Phi'} = \frac{220 - 30(0.22 + 2)}{220 - 70 \times 0.22}$$

$$\times \frac{1}{60\%} = 0.937$$

$$\therefore n' = 0.937 \times 800 = 750 \text{ r/min}$$

这种调速方法最适于恒转矩负载。

## 3. 励磁绕组并联电阻

见图4-12，这种调速方法适合于快速增加转速的场合。设串

励磁场电阻为  $R_c$ ，并联电阻为  $R_{并}$ ，则电动势平衡方程式为

$$U = c_e \Phi' n' + I_a R_a + I_c R_c$$

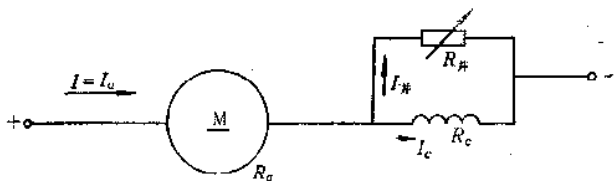


图 4-12

从图4-12中可看出以下关系：

因为  $I_c R_c = I_{并} R_{并}$ ，所以  $I_{并} = I_c \frac{R_c}{R_{并}}$ ，而  $I = I_a = I_c + I_{并}$

代入上式，得出：

$$I = I_c + I_c \frac{R_c}{R_{并}} = I_c \left( 1 + \frac{R_c}{R_{并}} \right)$$

或

$$I_c = \frac{I}{1 + \frac{R_c}{R_{并}}}$$

将  $I_c$  代入电动势平衡方程式内，并整理可得到电动机转速  $n'$  为

$$n' = \frac{U - I \left( \frac{R_c R_a + R_a R_{并} + R_{并} R_c}{R_c + R_{并}} \right)}{c_e \Phi'}$$

**例4-40** 有一台串励电动机，已知  $U_N = 220V$ 、 $I_N = 80A$ ， $n_N = 660r/min$ ，电枢电阻为  $0.11\Omega$ ，串励磁场的电阻  $R_c$  为  $0.1\Omega$ ，磁场绕组并联电阻  $R_{并} = 1\Omega$ ，当  $\Phi' = 87\% \Phi$  时， $I_c = 40A$ ，求电动机转速  $n'$  是多少。

$$I_{并} = I_c \frac{R_c}{R_{并}} = 40 \times \frac{0.1}{1} = 4A$$

$$\therefore I = I_c + I_{并} = 40 + 4 = 44A$$

$$n' = \frac{220 - 44 \left( \frac{0.1 \times 0.11 + 0.11 \times 1 + 1 \times 0.1}{0.1 + 1} \right)}{c_e \Phi'}$$

未并联电阻时,  $R_a$  包括电枢电阻和串励绕组电阻, 所以  $R_a = 0.1 + 0.11 = 0.21 \Omega$ 。

$$\text{又 } n = \frac{U - IR_a}{c_e \Phi} \quad \therefore \quad 660 = \frac{220 - 80(0.1 + 0.11)}{c_e \Phi}$$

代入上式, 得出:

$$\begin{aligned} n' &= \frac{220 - 44(0.1 \times 0.11 + 0.11 \times 1 + 1 \times 0.1)}{\frac{220 - 80(0.1 + 0.11)}{660} \frac{\Phi'}{\Phi}} \\ &= \frac{210.3}{0.308 \times 0.67} \approx 1021 \quad \text{r/min} \end{aligned}$$

#### 4. 电枢并联电阻

此调速方法常用在铸钢车间起重机等设备的电动机上, 是降低转速的, 接线如图4-13所示。

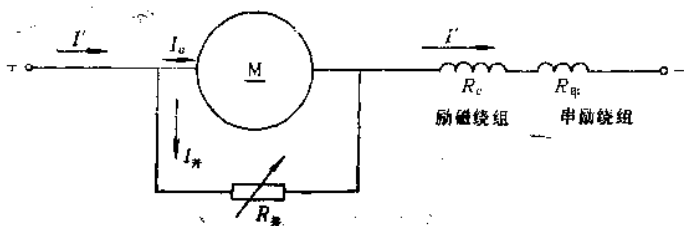


图4-13 电动机接线图

从图中看出电动势方程式为

$$U = c_e \Phi' n' + I'(R + R_a + R_{\text{串}})$$

$$U = I_{\text{并}} R_{\text{并}} + I'(R + R_a)$$

用  $R_a$  代  $R + R_{\text{串}}$ , 联立解上面两方程式, 得出

$$n' = \frac{1}{c_e \Phi'} \left[ \frac{R_a + R_{\text{并}}}{R_{\text{并}}} U - \frac{I'(R_a R_{\text{并}} + R_a R_a + R_a R_{\text{串}})}{R_{\text{并}}} \right]$$

这种调速方法会引起很大电耗, 但在特殊场合应用可获得较大的调速范围。

例4-41 一台串励直流电动机, 以端电压为  $U$ 、转速为  $n$  在



运行, 将它改为他励发电机运行时, 用相同的励磁电流, 并以转速  $n_0$  运行, 电枢感应电压为  $U_0$ , 当端电压为  $U'$  时, 问这时转速是多少 (已知负载转矩不变, 不考虑电枢反应的影响)。

由于串励电动机负载转矩不变, 所以电枢电流  $I_a$  和每极磁通  $\Phi$  不变, 为此设电枢回路总电阻为  $r$ ,  $c_e$  为常数、电压为  $U'$ , 转速为  $n'$  时, 则可列出下列方程式:

$$U = c_e \Phi n - r I_a$$

$$U_0 = c_e \Phi n_0$$

$$U' = c_e \Phi n' - r I_a$$

按式  $U' - U = c_e \Phi (n' - n)$  解出:

$$n' = \frac{U' - U}{c_e \Phi} + n = \frac{U' - U}{U_0} n_0 + n$$

**例4-42** 一台串励直流电动机拖动恒转矩负载运行时,  $I_a = 100\text{A}$ ,  $n = 1000\text{r/min}$ , 电源电压不变, 切换串励线圈匝数为原有的81%, 问这时电流  $I'_a$ 、转速  $n'$  各是多少 (假定铁心不饱和、无电枢反应影响)。

设额定运行时每极磁通为  $\Phi$ , 当串励绕组匝数减到81%时, 每极磁通变为  $\Phi'$ , 不考虑磁饱和, 则有

$$\Phi' = \frac{0.81N_s I'_a}{N_s I_a} = \frac{0.81 I'_a}{I_a} \Phi$$

另外, 当负载转矩  $T$  不变时, 则有

$$T = c \Phi I_a = c \Phi' I'_a$$

从上面两式中消去  $\Phi'$ , 则有

$$\frac{I_a}{I'_a} = 0.81 \frac{I'_a}{I_a}, \quad \therefore I'_a = \frac{I_a}{0.9} = \frac{100}{0.9} = 111.1\text{A}$$

又从  $U = c_e \Phi n = c_e \Phi' n'$  及  $\Phi / \Phi'$  与  $I'_a / I_a$  成比例关系知:

$$n' = \frac{\Phi}{\Phi'} n = \frac{I'_a}{I_a} n = \frac{n}{0.9} = \frac{1000}{0.9} = 1111.1\text{r/min}$$

**例4-43** 一台励磁绕组电阻为  $0.1\Omega$ 、电枢绕组电阻为  $0.12\Omega$  的串励直流电动机, 与  $230\text{V}$  电源接上运行。如果负载电流为  $80\text{A}$  时, 转速为  $750\text{r/min}$ , 那么当负载电流降为  $20\text{A}$  时, 问此台

电动机转速是多少（电动机负载电流20A时励磁磁通是80A时的45%）。

设端电压为 $U$ ，每极磁通为 $\Phi$ ，转速为 $n$ ，电枢电流为 $I_a$ ，电枢回路电阻为 $R_a$ ，则有

$$U = c_e \Phi n + R_a I_a$$

式中 $c_e$ 为常数，按给定的条件则有

$$230 = c_e \Phi \times 750 + (0.1 + 0.12)80$$

$$230 = c_e \frac{45}{100} \Phi N + (0.1 + 0.12)20$$

$$\therefore c_e \Phi = \frac{230 - 0.22 \times 80}{750} = \frac{212.5}{750}$$

代入上式，得出：

$$n = \frac{230 - 0.22 \times 20}{0.45 c_e \Phi} = \frac{225.6}{0.45 \times 212.5} \times 750 = 1770 \text{ r/min}$$

例4-44 有一台拖动恒转矩负载的串励直流电动机，端电压为 $U_a$ 时，其转速为 $n_a$ ，当端电压改为 $U_b$ 时，转速变为 $n_b$ ，当电压改为 $U_c$ 时，问转速 $n_c$ 是多少。

由于负载转矩恒定，所以电流恒定，因为是串励电动机，转速也恒定，因此有以下方程式：

$$U_a = R_a I_a + c_e \Phi n_a$$

$$U_b = R_a I_a + c_e \Phi n_b$$

$$U_c = R_a I_a + c_e \Phi n_c$$

式中  $\Phi$ ——每极磁通；

$R_a$ ——包含电枢绕组电阻的全部电阻；

$c_e$ ——常数。

解上述方程

得  $c_e \Phi = \frac{U_a - R_a I_a}{n_a} = \frac{U_b - R_a I_a}{n_b}$ ，因此有得到：

$$R_a I_a = \frac{n_b U_a - U_b n_a}{n_a - n_b}$$

运行, 将它改为他励发电机运行时, 用相同的励磁电流, 并以转速  $n_0$  运行, 电枢感应电压为  $U_0$ , 当端电压为  $U'$  时, 问这时转速是多少 (已知负载转矩不变, 不考虑电枢反应的影响)。

由于串励电动机负载转矩不变, 所以电枢电流  $I_a$  和每极磁通  $\Phi$  不变, 为此设电枢回路总电阻为  $r$ ,  $c_e$  为常数、电压为  $U'$ , 转速为  $n'$  时, 则可列出下列方程式:

$$U = c_e \Phi n - r I_a$$

$$U_0 = c_e \Phi n_0$$

$$U' = c_e \Phi n' - r I_a$$

按式  $U' - U = c_e \Phi (n' - n)$  解出:

$$n' = \frac{U' - U}{c_e \Phi} + n = \frac{U' - U}{U_0} n_0 + n$$

例4-42 一台串励直流电动机拖动恒转矩负载运行时,  $I_a = 100\text{A}$ ,  $n = 1000\text{r/min}$ , 电源电压不变, 切换串励线圈匝数为原有的81%, 问这时电流  $I'_a$ 、转速  $n'$  各是多少 (假定铁心不饱和、无电枢反应影响)。

设额定运行时每极磁通为  $\Phi$ , 当串励绕组匝数减到81%时, 每极磁通变为  $\Phi'$ , 不考虑磁饱和, 则有

$$\Phi' = \frac{0.81 N_f I'_a}{N_f I_a} = \frac{0.81 I'_a}{I_a} \Phi$$

另外, 当负载转矩  $T$  不变时, 则有

$$T = c \Phi I_a = c \Phi' I'_a$$

从上面两式中消去  $\Phi'$ , 则有

$$\frac{I'_a}{I_a} = 0.81 \frac{I'_a}{I_a}, \quad \therefore I'_a = \frac{I_a}{0.9} = \frac{100}{0.9} = 111.1\text{A}$$

又从  $U = c_e \Phi n = c_e \Phi' n'$  及  $\Phi / \Phi'$  与  $I_a / I'_a$  成比例关系知,

$$n' = \frac{\Phi}{\Phi'} n = \frac{I'_a}{I_a} n = \frac{n}{0.9} = \frac{1000}{0.9} = 1111.1\text{r/min}$$

例4-43 一台励磁绕组电阻为  $0.1\Omega$ 、电枢绕组电阻为  $0.12\Omega$  的串励直流电动机, 与  $230\text{V}$  电源接上运行。如果负载电流为  $80\text{A}$  时, 转速为  $750\text{r/min}$ , 那么当负载电流降为  $20\text{A}$  时, 问此台

从式(4-6)、(4-7)、(4-8)得:

$$c_1 \Phi' = \frac{0.9 \times 0.5}{n_1 - n_2} U$$

$$R_a I_a' = 0.81 \times \frac{0.5n_1 - n_2}{n_1 - n_2} U$$

此时电动机转速 $n_3$ 为

$$\begin{aligned} n_3 &= \frac{U - I_a' R_a}{c_e \Phi'} = \frac{n_1 - n_2}{0.45} \left( 1 - \frac{0.405n_1 - 0.81n_2}{n_1 - n_2} \right) \\ &= \frac{0.595n_1 - 0.19n_2}{0.45} = 1.32n_1 - 0.42n_2 \end{aligned}$$

### 三、复励直流电动机调速计算

如图4-14所示,一台电动机有二套励磁绕组,一套是串励绕组;一个是并励绕组,根据二套绕组不同的联结和不同匝数,可以得到不同的工作特性。

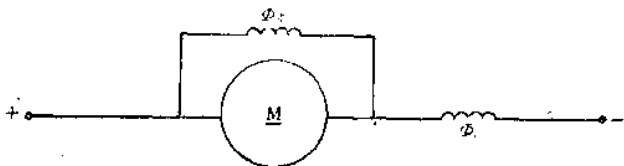


图4-14 复励直流电动机绕组的联结

用 $\Phi_s$ 、 $\Phi_{并}$ 分别表示串励绕组和并励绕组的磁通,复励电动机转速公式如下:

$$n = \frac{U - I_a R_a}{c_e (\Phi_{并} \pm \Phi_s)}$$

$\Phi_s$ 和 $\Phi_{并}$ 同方向叫超复励直流电动机(也叫积复励直流电动机), $\Phi_s$ 和 $\Phi_{并}$ 反方向,叫欠复励或差复励直流电动机,由于工作特性不稳定,很少采用。

按转速公式,可看出改变复励电动机转速的方法有以下几种:

- (1) 改变电源电压  $U$ ;
- (2) 改变励磁绕组磁通  $\Phi$  并;
- (3) 电枢串入电阻  $R_a$ ;
- (4) 电枢回路并联电阻  $R$  并。

#### 第四节 直流电动机起动及计算

##### 一、概述

电动机的起动是指电动机投入电源从静止状态 ( $n=0$ ) 到稳定运行状态的全部过程。由于起动瞬间  $n=0$ , 所以反电动势  $E_a = c_e \Phi n = 0$ , 由电动势平衡方程式知  $U = E_a + I_a R_a = 0 + I_a R_a$ , 因此  $I_a = U/R_a$  非常大, 与  $I_a$  成比例的电动机转矩也非常大, 这对电动机换向、绕组绝缘以及机械强度都有很大的影响, 所以直接起动直流电动机时要限制起动电流。由电动势平衡方程式看出, 限制起动电流有两种方法, 一是降低电源电压  $U$ ; 二是在电枢回路中串入附加电阻, 随着电动机转速的提高, 逐级切除附加电阻。

##### 二、起动电阻的计算

设并励直流电动机的端电压为  $U$ 、电枢回路总电阻为  $R_a$ 。电动机在起动过程中, 要求限制起动电流, 在最大起动电流  $I_{max}$  和最小起动电流  $I_{min}$  范围内, 那么起动变阻器起动段数  $n$  可按下列式计算:

$$n = \lg\left(\frac{U}{R_a I_{max}}\right) / \lg\left(\frac{I_{max}}{I_{min}}\right)$$

设起动时各段数的起动电阻和电枢电阻  $R_a$  之和, 分别为  $R_1$ 、 $R_2$ 、 $R_3$ 、……, 则有:

$$R_1 = U / I_{max} (\Omega)$$

$$R_2 = R_1 (I_{min} / I_{max}) (\Omega)$$

$$R_3 = R_2 (I_{min} / I_{max}) (\Omega)$$

⋮

按上式可计算出起动电阻器的各段的电阻值，上述公式是在假定磁通  $\Phi$  不变的条件下推导出来的，所以对于直流串励电动机，由于  $\Phi$  随  $I$  变化的，不能用简单公式计算。

**例4-46** 有一台并励直流电动机，已知额定电压  $U_N = 200\text{V}$ ， $I_N = 55\text{A}$ ， $R_a = 0.42\Omega$ ，励磁电路总电阻  $R_f = 69\Omega$ ，要求此台电动机在起动时最大电流为额定电流的150%，最小电流为电枢额定电流，试求起动电阻器各段的起动电阻值。

(1) 额定电枢电流

$$I_a = I_N - I_f = 55 - \frac{U_N}{R_f} = 55 - \frac{200}{69} = 52.1\text{A}$$

$$I_{\max} = 150\% I_a = 1.5 \times 52.1 = 78.2\text{A}$$

(2) 电阻器起动段数的确定

$$\begin{aligned} n &= \lg\left(\frac{U}{R_a I_{\max}}\right) / \lg\left(\frac{I_{\max}}{I_{\min}}\right) \\ &= \lg\left(\frac{200}{0.42 \times 78.2}\right) / \lg\left(\frac{78.2}{52.1}\right) \\ &= \lg 6.10 / \lg 1.5 = 0.785 / 0.176 = 4.46 \end{aligned}$$

改变一下上面公式形式，则有

$$\begin{aligned} \lg\left(\frac{I_{\max}}{I_{\min}}\right)^n &= \lg \frac{U}{R_a I_{\max}} \\ I_{\min} &= I_{\max} / \left(\frac{U}{R_a I_{\max}}\right)^{1/n} \end{aligned}$$

取整数  $n = 4$

这时最小电流  $I_{\min}$  为

$$I_{\min} = \frac{78.2}{\sqrt[4]{6.10}} = \frac{78.2}{1.57} = 49.8\text{A}$$

$$\frac{I_{\min}}{I_a} \times 100\% = \frac{49.8}{52.1} \times 100\% = 95.6\% \approx 1$$

可见  $I_{\min}$  差不多等于电枢电流  $I_a$ 。

第一阶段的起动电阻  $R_1 = U / I_{\max} = 200 / 78.2 = 2.56\Omega$ ；第

二阶段的起动电阻  $R_2$ , 从  $R_1 I_{\min} = R_2 I_{\max}$  得到:

$$R_2 = \frac{I_{\min}}{I_{\max}} R_1 = \frac{2.56}{1.57} = 1.63 \Omega$$

$$R_3 = \frac{1.62}{1.57} = 1.04 \Omega$$

$$R_4 = \frac{1.036}{1.57} = 0.66 \Omega$$

因此, 起动电阻器各段的电阻值如下:

$$r_1 = R_1 - R_2 = 0.93 \Omega$$

$$r_2 = R_2 - R_3 = 0.59 \Omega$$

$$r_3 = R_3 - R_4 = 0.38 \Omega$$

$$r_4 = R_4 - R_5 = 0.24 \Omega$$

例4-47 一台20kW、220V串励直流电动机, 已知  $I_N = 100$  A,  $n = 800$  r/min, 如图4-15所示。

采用起动电阻器分三段起动, 要求起动最大电流为  $1.5 I_N$ , 当起动电流等于额定电流时, 顺序短路起动电阻, 试求起动电阻  $R_1$ 、 $R_2$  及  $R_3$ , 再有, 把全部起动电阻短路瞬间时的电流是多少, 已知电枢回路电阻  $R_a + R_r = 0.2 \Omega$ , 磁通与电流平方成正比。

设起动时各段电枢回路总电阻为  $r_1$ 、 $r_2$ 、 $r_3$ 、 $r_4$ , 则有

$$r_1 = R_a + R_r + R_1 + R_2 + R_3$$

$$r_2 = R_a + R_r + R_1 + R_2$$

$$r_3 = R_a + R_r + R_1$$

$$r_4 = R_a + R_r$$

在刚起动时, 下式成立:

$$\frac{220}{r_1} = 150 \quad \therefore r_1 = \frac{220}{150} = 1.467 \Omega$$

当转速升高时, 感应电动势  $E_1$  也增大, 这时如果把  $R_1$  短路, 则有

$$100 = \frac{220 - E_1}{r_1}$$

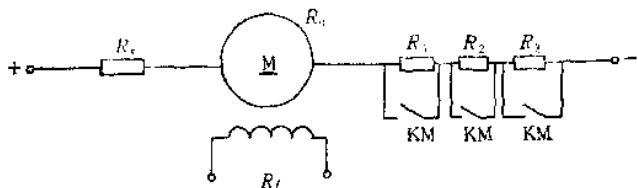


图4-15 20kW串励直流电动机接线图

$$150 = \frac{220 - \sqrt{1.5} E_1}{r_2}$$

$$\therefore r_2 = 0.817r_1 - 0.33 = 0.869\Omega$$

$$\text{又 } r_3 = 0.817r_2 - 0.33 = 0.38\Omega$$

从以上各式求出:

$$R_1 = r_1 - r_2 = 0.596\Omega$$

$$R_2 = r_2 - r_3 = 0.489\Omega$$

$$R_3 = r_3 - r_1 = 0.38 - 0.20 = 0.18\Omega$$

设起动电阻器全部短路瞬间电流为  $I$ , 在短路前后有以下关系:

设  $E_s$  是短路前感应电动势, 则有

$$100 = \frac{220 - E_s}{r_3}$$

$$I = \frac{220 - E_s \sqrt{I} / 100}{r_4}$$

已知  $r_3 = 0.38$ ,  $r_4 = 0.2$ , 代入上式消去  $E_s$ , 得:

$$0.2I + 18.2\sqrt{I} - 220 = 0$$

$$\therefore \sqrt{I} = \frac{-9.1 \pm \sqrt{9.1^2 + 0.2 \times 220}}{0.2} = 10.8$$

$$I = 10.8^2 = 117\text{A}$$

例4-48 有一台30kW并励直流电动机, 已知,  $U_N = 220\text{V}$ ,  $I_N = 155\text{A}$ ,  $n_N = 3000\text{r/min}$ , 试求:

(1) 直接起动电动机时, 起动电流  $I_{st}$  是多大, 为额定电流



的多少倍;

(2) 在电枢回路中串入多大附加电阻能将  $I_{st}$  限制在两倍额定电流范围内。

(1) 电枢电阻  $R_a$

$$R_a = \frac{1}{2} \left( \frac{U_N}{I_N} - \frac{P_N \times 10^3}{I_N^2} \right) = \frac{1}{2} \left( \frac{220}{155} - \frac{30 \times 10^3}{155^2} \right) \\ = 0.085 \Omega$$

直接起动时, 起动电流  $I_{st}$  为

$$I_{st} = \frac{U - E_a}{R_a} = \frac{U}{R_a} = \frac{220}{0.085} = 2588 \text{ A} \\ \frac{I_{st}}{I_N} = \frac{2588}{155} = 16.7 \text{ 倍}$$

(2) 设  $I'_{st} = 2I_N = 2 \times 155 = 310 \text{ A}$ , 则有

$$I'_{st} = \frac{U_N}{R_a + R_{st}} = \frac{220}{0.085 + R_{st}} = 310 \text{ A}$$

$$\therefore R_{st} = \frac{220}{310} - 0.085 = 0.625 \Omega$$

应串入附加电阻  $R_{st} = 0.625 \Omega$ 。

例4-49 一台  $13 \text{ kW}$  并励直流电动机, 已知  $U_N = 220 \text{ V}$ ,  $n_N = 1000 \text{ r/min}$ ,  $\eta_N = 86\%$ , 试求:

- (1) 额定电流  $I_N$ ;
- (2) 电枢电阻  $R_a$ ;
- (3) 直接起动时电流  $I_{st}$ ;
- (4) 串入多大电阻  $R_{st}$ , 使起动电流  $I'_{st} = 2I_N$ 。

$$(1) \quad I_N = \frac{P_1}{U_N} = \frac{P_2}{U_N \cdot \eta_N} = \frac{13 \times 10^3}{220 \times 0.86} = 68.7 \text{ A}$$

$$(2) \quad R_a = \frac{1}{2} \left( \frac{U_N}{I_N} - \frac{P_N \times 10^3}{I_N^2} \right) = \frac{1}{2} \left( \frac{220}{68.7} - \frac{13 \times 10^3}{68.7^2} \right) \\ = 0.225 \Omega$$

$$(3) I_{st} = \frac{220}{0.225} = 977.8 \text{ A}$$

为额定电流的  $\frac{977.8}{68.7} = 14.2$  倍

(4) 串电阻起动电流  $I_{st} = 2 I_N$  时, 应串入的电阻值

$$R_{st} = \frac{U}{2I_N} - R_a = \frac{220}{2 \times 68.7} - 0.225 = 1.38 \Omega$$

**例4-50**  $Z_2$ 系列90kW他励直流电动机, 已知  $U_N = 230 \text{ V}$ ,  $I_N = 391 \text{ A}$ ,  $R_a = 0.06 \Omega$ ,  $n_N = 960 \text{ r/min}$ , 忽略电枢反应, 试求直接起动时起动电流是额定电流的多少倍, 欲限制起动电流为两倍额定电流, 应串入多大电阻。

(1) 直接起动时起动电阻  $I_{st}$

$$I_{st} = \frac{U_N}{R_a} = \frac{230}{0.06} = 3833.3 \text{ A}$$

$$I_{st}/I_N = \frac{3833.3}{391} = 9.8 \text{ 倍}$$

(2) 附加电阻

$$R_{st} = \frac{U_N}{2I_N} - R_a = \frac{230}{2 \times 391} - 0.06 = 0.234 \Omega$$

**例4-51** 一台22kW并励直流电动机, 已知  $U_N = 220 \text{ V}$ ,  $n_N = 1000 \text{ r/min}$ ,  $R_f = 28 \Omega$ ,  $\eta_N = 0.84$ , 试求:

(1) 输入功率  $P_{1st}$

(2) 额定电流  $I_N$ 、电枢电流  $I_a$ 、励磁电流  $I_f$

(3) 电枢电阻  $R_a$

(4) 直接起动时, 起动电流  $I_{st}$

(5) 加入附加电阻  $R_{st}$  后, 使起动电流等于1.5倍额定电流时,  $R_{st}$  应多大,

(6) 电枢回路铜耗  $P_{Cu_a}$ 、励磁回路铜耗  $P_{Cu_f}$

(7) 额定转矩  $T_N$

(8) 反电动势  $E_a$ ;

(9) 电磁转矩  $T_M$ , 各是多少。

$$(1) P_1 = \frac{P_N}{\eta_N} = \frac{22 \times 10^3}{0.84} = 26190 \text{ W}$$

$$(2) I_N = P_1 / U_N = \frac{26190}{220} = 119 \text{ A}$$

$$I_f = \frac{U_N}{R_f} = \frac{220}{28} = 7.9 \text{ A}$$

$$I_a = I_N - I_f = 119 - 7.9 = 111 \text{ A}$$

$$(3) R_a = \frac{1}{2} \left( \frac{U_N}{I_N} - \frac{P_N \times 10^3}{I_N^2} \right) = \frac{1}{2} \left( \frac{220}{111} - \frac{22 \times 10^3}{111^2} \right) \\ = 0.15 \Omega$$

$$(4) I_{a'} = \frac{U_N}{R_a} = \frac{220}{0.15} = 1467 \text{ A}$$

(5) 加  $R_{a'}$  后, 使  $I_{a'} = 1.5 I_N = 1.5 \times 119 = 178.5 \text{ A}$

$$\text{则 } R_{a'} = \frac{U_N}{I_{a'}} - R_a = \frac{220}{178.5} - 0.15 = 1.08 \Omega$$

$$(6) P_{Cu_a} = I_a^2 R_a = 111^2 \times 0.15 = 1848.2 \text{ W}$$

$$P_{Cu_f} = I_f^2 R_f = 7.9^2 \times 28 = 1747.5 \text{ W}$$

$$(7) \text{总损耗 } \Sigma P = P_1 - P_N = 26190 - 22000 = 4190 \text{ W}$$

空载损耗为

$$P_0 = P_{F_0} + p_m = \Sigma P - (P_{Cu_a} + P_{Cu_f}) \\ = 4190 - 3595.7 = 594.3 \text{ W}$$

(8) 额定转矩

$$T_N = 9550 \frac{P_N}{n_N} = 9550 \times \frac{22}{1000} = 210.1 \text{ N} \cdot \text{m}$$

(9) 反电动势

$$E_a = U - I_a R_a = 220 - 111 \times 0.15 = 203.4 \text{ V}$$

(10) 电磁转矩

$$T_M = 9550 \frac{E_a I_a \times 10^3}{n_N}$$

$$= 9550 \times \frac{203.4 \times 111 \times 10^3}{1000} = 215.6 \text{ N} \cdot \text{m}$$

第五节 直流电动机的机械特性及计算

一、基本概念

当电动机外施的电源电压  $U$ 、励磁电流  $I_f$  和电枢总电阻  $R_a$  为常数时，电动机转速  $n$  与电磁转矩  $T$  之间的关系，即  $n = f(T)$  曲线，称为直流电动机的机械特性。

把电动势平衡方程式  $U = E_a + I_a(R_a + R_0)$ ，转矩公式  $T = c_T \Phi I_a$  以及电动势公式  $E_a = c_e \Phi n$  的三个公式联解，可得到电动机的机械特性一般表达式，即

$$n = \frac{U}{c_e \Phi} - \frac{R_a + R_0}{c_e c_T \Phi^2} T$$

当  $U = U_N$ 、 $R_0 = 0$ 、 $\Phi = \Phi_N$  时，可得到固有机械特性，也叫自然机械特性，即

$$n = \frac{U_N}{c_e \Phi_N} - \frac{R_a}{c_e c_T \Phi_N^2} T = n_0 - \Delta n_N$$

式中  $n_0$  称为理想空载转速， $n_0 = \frac{U_N}{c_e \Phi_N}$ ；

$\Delta n_N$  称为转速降  $\Delta n_N = \frac{R_a}{c_e c_T \Phi_N^2} T = \frac{R_a}{c_e \Phi_N} I_{aN}$ 。

对于一般直流电动机， $\Delta n_N$  很小， $\Delta n_N = (0.03 \sim 0.08) n_N$ ，所以机械特性较硬。

他励直流电动机的机械特性曲线如图4-16所示。

当特性公式中的  $U$ 、 $\Phi$ 、 $R_a$  任一个参数改变时，机械特性曲线也改变（叫人工机械特性），比如：

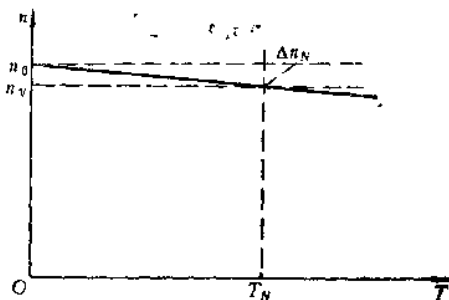


图4-16 他励直流电动机机械特性曲线

(1) 仅  $U$  改变时,  $n_0$  点改变, 而  $\Delta n$  不变, 即曲线斜率不变, 所以这时的机械特性是一簇与固有机机械特性平行的线。

(2) 仅  $R_a$  改变时,  $n_0$  点未变, 而  $\Delta n$  改变, 即曲线斜率改变, 是以  $n_0$  为固定点的一组直线。

(3) 仅  $\Phi$  改变时, 机械特性是随  $\Phi$  减少而斜率  $\Delta n$  增大的一组直线。

## 二、机械特性计算

1. 从电机铭牌数据求并励和他励直流电动机的自然机械特性

(1) 已知自然机械特性

$$n = \frac{U_N}{c_e \Phi_N} - \frac{R_a}{c_e c_M \Phi_N^2} T$$

只要求出  $R_a$ 、 $c_e \Phi_N$ 、 $c_M \Phi_N$ , 便可写出机械特性方程式。

(2)  $R_a$  的求法

$$R_a = \frac{1}{2} \left( \frac{U_N}{I_N} - \frac{P_N \times 10^3}{I_N^2} \right)$$

$U_N$ 、 $I_N$ 、 $P_N$  均可从电机铭牌上查出, 所以电动机的电枢电阻  $R_a$  可按此式计算出。

此公式是在电动机运行效率最高时得到的, 即是可变损耗等于固定损耗, 也就是说当可变损耗  $I_N^2 R_a$  等于电机总损耗  $\Sigma P$  一半时, 电动机效率最高, 于是得出

$$\Sigma P = P_1 - P_N = U_N I_N - P_N \times 10^3$$

$$I_N^2 R_a = \frac{1}{2} \Sigma P = \frac{1}{2} (U_N I_N - P_N \times 10^3)$$

$$\begin{aligned} \therefore R_a &= \frac{1}{2} \left( \frac{U_N I_N}{I_N^2} - \frac{P_N \times 10^3}{I_N^2} \right) \\ &= \frac{1}{2} \left( \frac{U_N}{I_N} - \frac{P_N \times 10^3}{I_N^2} \right) \end{aligned}$$

(3)  $c_e \Phi_N$  和  $c_T \Phi_N$  求法

$$\begin{aligned} \text{由 } U_N = c_e \Phi_N n_N - I_N R_a \text{ 知 } c_e \Phi_N &= \frac{U_N - I_N R_a}{n_N}, \text{ 又知 } c_e \\ &= \frac{pN}{60a}, \quad c_T = \frac{pN}{2\pi a}, \text{ 因此有} \end{aligned}$$

$$\frac{c_e}{c_T} = \frac{2\pi a}{60a} = \frac{2\pi}{60} = 0.105$$

$$c_e = 0.105 c_T \text{ 或 } c_T = \frac{c_e}{0.105} = 9.55 c_e$$

$$c_T \Phi_N = 9.55 c_e \Phi_N$$

电磁转矩为

$$T_M = c_T \Phi_N I_N = 9.55 \left( \frac{U_N - I_N R_a}{n_N} \right) I_N$$

额定转矩为

$$T_N = 9550 \frac{P_N \times 10^3}{n_N}$$

空载转矩为

$$T_0 = T_M - T_N$$

任意负载空载时为

$$T_0 = T_M - T_2$$

## 2. 机械特性计算示例

**例4-52** 一台并励直流电动机, 已知  $P_N = 13 \text{ kW}$ ,  $U_N = 220 \text{ V}$ ,  $I_N = 72.1 \text{ A}$ ,  $n_N = 750 \text{ r/min}$  等数据, 根据此数据计算出此台电动机的自然机械特性和转矩方程式。

(1) 电枢电阻

$$R_a = \frac{1}{2} \left( \frac{U_N}{I_N} - \frac{P_N \times 10^3}{I_N^2} \right) = \frac{1}{2} \left( \frac{220}{72.1} - \frac{13 \times 10^3}{72.1^2} \right) = 0.275 \Omega$$

$$(2) \quad c_r \Phi_N = \frac{U_N - I_N R_a}{n_N} = \frac{220 - 72.1 \times 0.275}{750} = 0.267$$

$$c_T \Phi_N = 9.55 c_r \Phi_N = 9.55 \times 0.267 = 2.55$$

$$c_r \Phi_N c_T \Phi_N = 0.267 \times 2.55 = 0.681$$

$$(3) \quad n_0 = \frac{U_N}{c_r \Phi_N} = \frac{220}{0.267} = 824 \text{ r/min}$$

$$\Delta n_N = \frac{R_a}{c_r c_T \Phi_N^2} T = \frac{0.275}{0.681} T = 0.40 T$$

(4) 于是得出自然机械特性

$$n = n_0 - \Delta n_N = 824 - 0.40 T$$

(5) 电磁转矩为

$$T_M = c_T \Phi_N I_N = 2.55 \times 72.1 = 183.9 \text{ N}\cdot\text{m}$$

额定转矩为

$$T_N = 9550 \times \frac{P_N}{n_N} = 9550 \times \frac{13}{750} = 165.5 \text{ N}\cdot\text{m}$$

空载转矩为

$$T_0 = T_M - T_N = 183.9 - 165.5 = 18.4 \text{ N}\cdot\text{m}$$

(6) 实际空载转速  $n'_0$

$$n'_0 = n_0 - \Delta n = 824 - 0.4 T_0$$

$$= 824 - 0.4 \times 18.4 = 824 - 7.36 = 816.6 \text{ r/min}$$

**例4-53** 有一台4极直流并励电动机, 已知  $P_N = 75 \text{ kW}$ ,  $U_N = 220 \text{ V}$ ,  $I_N = 385 \text{ A}$ ,  $n_N = 1000 \text{ r/min}$ ,  $R_f = 51 \Omega$ ,  $R_a = 0.055 \Omega$ , 此台电动机带动额定位能负载运行, 不考虑电枢反应, 试求:

(1) 使电动机运行在  $400 \text{ r/min}$  时, 电枢回路中应串入多大电阻, 或者降低端电压达到  $400 \text{ r/min}$  时, 电压值应降到多少, 这时电动机运行在什么状态,

(2) 电动机在额定负载运行时，若在电枢回路中串入电阻

$$R_N = \frac{U_N}{I_N} = \frac{220}{385} = 0.571\Omega, \text{ 问这时电动机的转速变成多少, 此}$$

时运行在什么状态;

(3) 试画出固有机械特性和人工机械特性曲线。

(1) 电枢电流

$$I_a = I_N - I_f = 385 - \frac{U_N}{R_f} = 385 - \frac{220}{51} = 380.7\text{A}$$

(2) 电动势系数

$$c_e \Phi = \frac{U_N - I_a R_a}{n_N} = \frac{220 - 380.7 \times 0.055}{1000} \\ = 0.199$$

(3) 为使电动机在转速  $n = 400\text{r/min}$  运行，串入电枢回路中的电阻  $R_0$ 。

$$R_0 = \frac{U_N - c_e \Phi n}{I_a} - R_a = \frac{220 - 0.199 \times 400}{380.7} - 0.055 \\ = 0.31\Omega$$

(4) 如果改变电源电压为  $U'$ ，使电动机运行在  $400\text{r/min}$  时，电压  $U'$  为

$$U' = c_e \Phi n + I_a R_a \\ = 0.199 \times 400 + 380.7 \times 0.055 = 100.5\text{V}$$

电动机端电压应调到  $100.5\text{V}$ ，由  $c_e \Phi n = E_a = 0.199 \times 400 = 79.6\text{V} < U$  可知，此时电机是运行在电动状态。

(5) 设  $R$  为电枢串入  $R_N$  后总电阻，即  $R = R_N + R_0 = 0.571 + 0.055 = 0.626\Omega$  时，电动机转速  $n'$  为

$$n' = \frac{U_N - I_a (R_a + R_N)}{c_e \Phi} = \frac{220 - 380.7(0.571 + 0.055)}{0.199} \\ = -92\text{r/min}$$

由于  $E'_a = I_a (R_a + R_N) = 238.3\text{V} > U_N = 220\text{V}$ ，说明电机此时



处于发电制动状态。

(6) 机械特性曲线绘制

1) 自然机械特性曲线 如图4-17所示, 曲线1是自然机械特性曲线, A点是 $n_0$ 点,  $I_a = 0$ , 则有

$$n_0 = n_s = \frac{U_N}{c_e \Phi} = \frac{220}{0.199} = 1105.5 \text{ r/min}$$

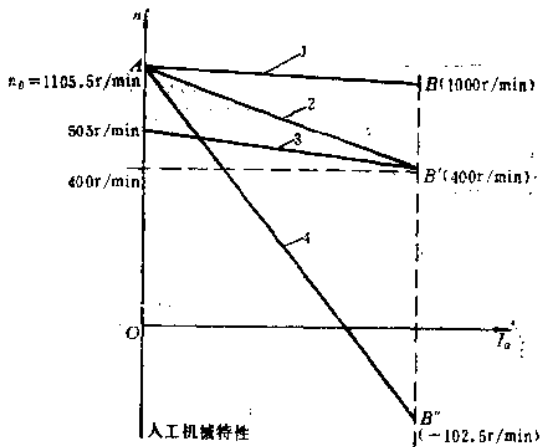


图4-17 人工机械特性

B点,  $I_a = 380.7 \text{ A}$ , 则有

$$n = n_N = 1000 \text{ r/min}$$

2) 人工机械特性 电枢内串入 $R_a$ 电阻时机械特性如曲线2所示。由于端电压 $U$ 未变, 所以 $n_0$ 点不变,

A点,  $n_0 = 1105 \text{ r/min}$ ,  $I_a = 0$

B'点,  $n = 400 \text{ r/min}$ ,  $I_a = 380.7 \text{ A}$

端电压降为 $100.7 \text{ V}$ 时的机械特性, 如曲线3所示。

A点,  $I_a = 0$ ,  $n_0 = \frac{U}{c_e \Phi} = \frac{100.5}{0.199} = 505 \text{ r/min}$

$B'$ 点,  $I_a = 380.7\text{A}$   $n = 400\text{r/min}$

当电枢回路串入  $R_0$  时的机械特性如曲线 4 所示。

$A$ 点,  $I_a = 0$ ,  $n_0 = 1105.5\text{r/min}$

$B''$ 点,  $I_a = 380.7\text{A}$   $n = -92\text{r/min}$

电动机处于发电制动状态。

## 第六节 直流电动机制动方式及计算

### 一、直流电动机制动概念

通常直流电动机的运行有两种运行方式：一种是电动运行方式；一种是制动运行方式。电动运行方式特征如前所叙，是电磁转矩  $T_M$  与转速  $n$  同方向， $T_M$  是推动负载机械运动的。由于  $T_M$  和  $n$  同方向，所以电动运行方式曲线总是处于坐标的第一、三象限，处于第一象限的曲线表示电动机正向运行，处于第三象限的曲线表示电动机反向运行。

当  $T_M$  与  $n$  的方向相反时，表示电动机是处于制动运行方式，其机械特性曲线在坐标的第二、四象限内。处于第二象限时，是能耗制动过程（见图4-18中线段  $OA$ ）、电源反接制动过程（见线段  $-T_M B$ ）和正向回馈制动（线段  $n_0 C$ ），处于第四象限时，是电动机能耗制动运行（见图4-18中线段  $OD$ ）、倒拉反接制动运行（线段  $T_M E$ ）和反向回馈运行（线段  $-n_0 F$ ）。

#### 1. 能耗制动

能耗制动是指运行的直流电动机突然断开电源（ $U = 0$ ），在电枢回路中串入附加电阻  $R_0$ ，由于惯性能量消耗在电阻上，使电动机快速制动。这时机械特性曲线如图4-18中  $OA$  和  $OD$  线段，稳态的机械特性表达式为

$$n = - \frac{R_a + R_0}{C_e C_T \Phi^2} T$$

当  $T$  为正时， $n$  为负；反之  $T$  为负时， $n$  为正，所以机械特性曲线处于第 2、4 象限内。

电动势平衡方程式为

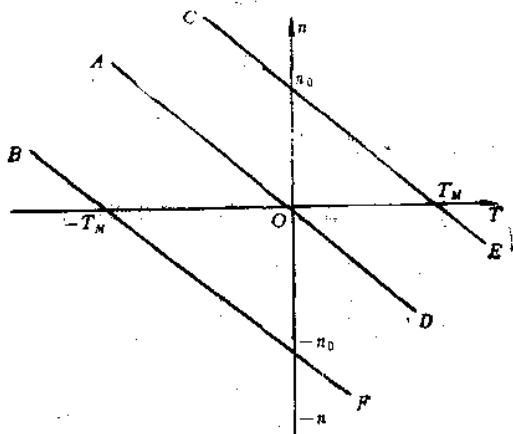


图4-18 各种运行方式的机械特性

$$U = 0 = E_a + I_a(R_a + R_0)$$

$$E_a = -I_a(R_a + R_0)$$

由于  $I_a(R_a + R_0) > 0$ ,  $\therefore E_a < 0$

由于  $U = 0$ , 所以输入功率  $P_1 = 0$

## 2. 电源反接制动过程

为了快速停车, 突然把正在运行的电动机的电枢电压反接 ( $U < 0$ ), 并在电枢回路中串入附加电阻  $R_0$ , 这种运行方式称为电源反接制动, 这时电动势平衡方程式为

$$-U = E_a + I_a(R_a + R_0)$$

机械特性为

$$n = \frac{-U}{c_e \Phi} - \frac{R_a + R_0}{c_e c_T \Phi^2} T = -n_0 - \Delta n$$

将电动势平衡方程式两端乘以  $I_a$  (此时  $I_a$  为负, 因电源已反接), 则有

$$I_a U = -E_a I_a + I_a^2 (R_a + R_0)$$

或 
$$P_1 = -P_M + I_a^2(R_a + R_0)$$

电压反接, 但并不为零, 所以  $P_1 \neq 0$ ,  $P_1 < 0$ , 表明电源仍输入电功率。

$I_a^2(R_a + R_0) > 0$ , 表明负载释放的动能均消耗在电阻上。

$P_M < 0$ , 说明电磁功率也消耗在电阻上。

### 3. 倒拉反接制动过程

直流电动机拖动位能负载运行时, 电枢回路串入电阻  $R_0$ , 则电动机转速降低, 当转速降到零时, 电动机转矩变为制动转矩  $T_T$ , 当  $T_T$  小于位能负载转矩  $T_Z$  时, 即  $T_T < T_Z$ , 则电动机在  $T_Z$  作用下, 沿  $T_Z$  方向起动, 最后达到稳速运行, 这种运行方式, 称为倒拉反接制动运行, 其机械特性曲线处于第 4 象限上。这时电动势平衡方程式为

$$U = E_a + I_a(R_a + R_0)$$

由于  $R_0$  很大, 使  $I_a(R_a + R_0) > U$ ,  $\therefore E_a < 0$ , 电动机反向转动,  $n$  反向。

这时的机械特性跟电动机相同, 即

$$n = \frac{U}{c_e \Phi} - \frac{R_a + R_0}{c_e c_T \Phi^2} T = n_0 - \Delta n$$

由于  $R_0$  很大, 所以  $\Delta n > n_0$ , 使  $n < 0$ , 这时输入功率  $P_1 > 0$ ,  $P_M = E_a I_a < 0$ 。

表明电源供给的电功率  $P_1$  和负载减少位能而送入的机械功率均变为电功率消耗在电枢电阻上, 即  $I_a^2(R_a + R_0) > 0$ 。

### 4. 回馈制动运行

直流电动机回馈制动是指电动机在制动时把电功率返回电源, 见图 4-12 所示。

回馈制动的转速绝对值均高于空载转速  $n_0$ , 如第 2 象限中的线段  $n_0 c$  为正向回馈制动过程 (见图 4-18), 第 4 象限中的线段  $-n_0 F$  为反向回馈制动运行。

(1) 正向回馈制动过程 当电动机减速时, 使电源电压突然降低到  $U'$ ,  $U' < U$ , 这时感应电动势  $E_a$  尚来不及变化, 于是出

现  $E_a > U'$ , 电动势平衡方程式为

$$I_a = \frac{U' - E_a}{R_a} < 0$$

由于  $I_a < 0$ , 反向流动, 说明是向电源流动, 同时转矩  $T$  也反向, 但  $n > 0$ 。由于  $I_a < 0$  如将电动势平衡方程式两端乘以  $I_a$  时, 则得到:

$$-P_1 = -U'I_a = -E_a I_a + I_a^2 R_a$$

$$\therefore P_1 = -U'I_a < 0 \quad P_M = -E_a I_a < 0$$

电动机转速从高到低所释放的动能变成电能, 一部分消耗在电枢回路的电阻上, 一部分返回电源。

(2) 反向回馈制动运行 这是位能负载拖动电动机的运行状态, 当直流电动机拖动位能负载进行反接制动时, 系统转速降低。当  $n = 0$  时, 则  $T_z > T_r$  时, 电动机从减速到反转, 一直达到  $-n_0$  点时,  $T = 0$ 。继续减速时, 则反向加速, 这时  $T > 0$ ,  $n < 0$ , 制动特性曲线处于第 4 象限内。电动势平衡方程式为

$$I_a = \frac{-U + E_a}{R_a} > 0$$

由于  $E_a > U$ , 上式两端乘以  $I_a$ , 则得:

$$I_a^2 R_a = -UI_a + E_a I_a$$

由于电压反接为负值, 所以输入功率  $P_1$  小于零, 即  $P_1 = -UI_a < 0$ , 由于位能负载释放能量, 所以电磁功率反向, 即  $P_M = E_a I_a < 0$ , 其特性方程式为

$$n = \frac{-U}{c_e \Phi} - \frac{R_a}{c_e c_r \Phi^2} T$$

由于功率回馈给电源, 所以这种制动方式是经济的。

## 二、计算实例

例4-54 有一台他励直流电动机,  $P_N = 14\text{kW}$ ,  $U_N = 230\text{V}$ ,  $I_N = 60.9\text{A}$ ,  $n_N = 960\text{r/min}$ ,  $R_a = 0.27\Omega$ , 当电动机稳定运行在额定转速  $n_N$  时, 突然断电进入能耗制动状态, 为了使制动电流  $\leq 2I_N$ , 问电枢回路应串入多大电阻  $R_b$ 。

$$c_e \Phi = \frac{U_N - I_N R_a}{n_N} = \frac{230 - 60.9 \times 0.27}{960} = 0.22$$

由于进入能耗制动状态, 所以  $U = 0$

$$c_e \Phi n_N = 0 - I_a (R_a + R_0)$$

$$\therefore R_0 = \frac{c_e \Phi n_N}{2 I_N} - R_a = \frac{0.22 \times 960}{2 \times 60.9} - 0.27 = 1.46 \Omega$$

应串入附加电阻值为  $1.46 \Omega$

**例4-55** 有一台他励直流电动机,  $P_N = 26 \text{ kW}$ ,  $U_N = 115 \text{ V}$ ,  $I_N = 226 \text{ A}$ ,  $n_N = 960 \text{ r/min}$ ,  $R_a = 0.14 \Omega$ , 电动机处于稳定状态下运行, 要求迅速反接制动, 允许制动电流为额定电流  $I_N$  的两倍, 向电枢回路中应串入多大电阻  $R_0$ 。

$$c_e \Phi = \frac{U_N - I_N R_a}{n_N} = \frac{115 - 226 \times 0.14}{960} = 0.087$$

反接制动时

$$c_e \Phi = \frac{-U_N - 2I_N(R_a + R_0)}{n_N}$$

$$\begin{aligned} \therefore R_0 &= \frac{c_e \Phi n_N + U_N}{-2(-I_N)} - R_a \\ &= \frac{0.087 \times 960 + 115}{2 \times 226} - 0.14 = 0.53 \Omega \end{aligned}$$

因为反接,  $U_N$  和  $I_N$  以负号代入公式。

**例4-56** 一合并励直流电动机, 已知  $P_N = 22 \text{ kW}$ ,  $U_N = 110 \text{ V}$ ,  $I_N = 239.5 \text{ A}$ ,  $n_N = 750 \text{ r/min}$ ,  $R_f = 10 \Omega$ ,  $R_a = 0.1 \Omega$ , 试求:

(1) 电动机额定负载运行时, 为使转速降低, 采用反接制动, 允许制动电流为  $2I_N$ , 电枢回路串入电阻  $R_0$  是多少;

(2) 为了使电动机快速停车, 在  $n = 450 \text{ r/min}$  时切除电源, 进行能耗制动, 求电枢回路应串入多大电阻  $R_0$ 。

$$I_a = I_N - \frac{U_N}{R_f} = 239.5 - 6.5 = 233 \text{ A}$$

$$c_r \Phi = \frac{U_N - I_N R_a}{n_N} = \frac{110 - 233 \times 0.10}{750} = 0.116$$

(1) 反接制动时则有

$$c_r \Phi \cdot n = -U_N - 2I_N(R_a + R_0)$$

$$\begin{aligned} \therefore R_0 &= \frac{c_r \Phi R_N + U_N}{2I_N} - R_a = \frac{0.116 \times 750 + 110}{2 \times 239.5} - 0.10 \\ &= 0.15 \Omega \end{aligned}$$

(2) 在  $n = 450 \text{ r/min}$  时进行能耗制动时则有

$$n = \frac{U - I_N(R_a + R_0')}{c_r \Phi}$$

$$\begin{aligned} \therefore R_0' &= \frac{c_r \Phi n}{I_N} - R_a = \frac{0.116 \times 450}{239.5} - 0.10 \\ &= 0.12 \Omega \end{aligned}$$

## 第七节 直流电动机改压重绕计算

### 一、改电压目的和原则

#### 1. 改电压目的

(1) 适应励磁电压的变更, 励磁绕组电压要相应改变, 比如原励磁电压为 220V, 现在改为 110V, 则励磁绕组要做相应重绕计算, 否则原励磁绕组因电压降低, 电流增大而被烧毁。

(2) 降低电动机绕组温升, 为此通过重绕计算可增大绕组导体截面积, 减薄绝缘, 提高散热能力, 提高绝缘耐热等级等。

(3) 改善换向, 解决刷人, 换向绕组匝数和截面积不适合, 造成换向磁场偏强或偏弱, 引起换向困难, 可通过重绕换向绕组来解决。

(4) 改变绕组结构, 增强散热能力, 比如励磁绕组改用多边形铜排; 改变电枢绕组端部形状, 以增强端部通风; 用无纬带代替槽楔绑扎固定电枢绕组, 从而可加大电枢绕组截面积。

#### 2. 改电压原则

(1) 单纯为了改变电压, 要在重绕计算时保持原电流密度和

磁通密度基本不变。

(2)为了降温、增容改善电动机温升,可通过重绕计算增加一些绕组匝数和导线截面积来解决。

## 二、励磁绕组改压计算

### 1. 并励绕组改压计算

#### (1) 重绕后导线截面积计算

$$S'_f = S_f \frac{U_f}{U'_f} \quad (\text{mm}^2)$$

式中  $S_f$ 、 $S'_f$ ——改压重绕计算前、后励磁绕组的截面积( $\text{mm}^2$ )。

或 
$$d' = d \sqrt{\frac{N_f}{N'_f}} = d \sqrt{\frac{U_f}{U'_f}} \quad (\text{mm})$$

式中  $d$ 、 $d'$ ——改绕前后励磁绕组导线线径( $\text{mm}$ );

$U_f$ 、 $U'_f$ ——改绕前后励磁绕组电压( $\text{V}$ );

$N_f$ 、 $N'_f$ ——改绕前后励磁绕组每极匝数。

#### (2) 重绕后的每极匝数

$$N'_f = N_f \frac{U'_f}{U_f} = N_f \frac{S'_f}{S_f} \quad (\text{匝/极})$$

#### (3) 重绕后的励磁电流

$$I'_f = I_f \frac{N_f}{N'_f} \quad (\text{A})$$

式中  $I_f$ 、 $I'_f$ ——改绕前、后的励磁绕组电流。

#### (4) 改压重绕后的铜重计算。

$$G'_f = K_g 2p l_f N'_f S'_f \times 8.9 \times 10^{-5} \quad (\text{kg})$$

式中  $K_g$ ——导线绝缘厚度引起铜重增加的附加系数,裸铜

$K_g = 1$ ; 漆包线  $K_g = 1.03 \sim 1.05$ ; 双玻璃丝包铜线  $K_g = 1.05 \sim 1.08$ ;

$l_f$ ——励磁绕组的平均匝长( $\text{cm}$ );

$2p$ ——电动机的极数。

### 2. 考虑并励绕组改变电流密度和励磁容量的改压计算

励磁容量是指额定励磁电压与额定工况下的励磁压降的比值。



(1) 重绕后导线截面积

$$S'_1 = S_1 \frac{U_1 K'_1}{U'_1 K_1}$$

式中  $K_1$ 、 $K'_1$ ——改绕前后励磁容量。

(2) 重绕后的励磁绕组每极匝数

$$N'_1 = N_1 \frac{U'_1 J_1}{U J'_1}$$

式中  $J_1$ 、 $J'_1$ ——改绕前、后励磁绕组的电流密度 ( $A/mm^2$ )。

3. 串励绕组的励磁绕组改压计算

(1) 重绕后每极匝数

$$N'_c = N_c \frac{U'_c \cdot a'_c}{U_c \cdot a_c} \quad (\text{匝/极})$$

式中  $N_c$ 、 $N'_c$ ——重绕前、后串励绕组每极匝数；

$a_c$ 、 $a'_c$ ——重绕前、后串励绕组的并联支路数；

$U_c$ 、 $U'_c$ ——重绕前、后串励绕组的电压。

(2) 重绕后导线截面积

$$S'_c = S_c \frac{U_c}{U'_c} = S_c \frac{N_c}{N'_c} \quad (mm^2)$$

4. 换向极绕组重绕计算

(1) 重绕后每极匝数

$$N'_w = N_w \frac{U'_w a_w}{U a'_w}$$

式中  $a_w$ 、 $a'_w$ ——改绕前后换向极绕组的并联支路数。

如果  $N_w$  未知时，可按下式估算，即

$$N'_w = (1.2 \sim 1.3) \frac{N'_1}{8ap}$$

式中  $N'_1$ ——改绕后电枢绕组的有效导体数；

$a$ ——电枢绕组并联支路数；

$p$ ——电动机的极对数。

(2) 重绕后的导线截面积

$$S'_w = S_w \frac{U}{U'} \cdot \frac{a'_w}{a_w} \quad (\text{mm}^2)$$

(3) 平均匝长度

$$L_w = 2l_{wm} + \pi(b_{wm} + b_w + 1) \quad (\text{cm})$$

式中  $l_{wm}$ 、 $b_{wm}$ ——换向极铁心的长度和宽度(cm);

$b_w$ ——换向极线圈的宽度(cm)。

(4) 换向极绕组铜重

$$G_w = 1.05 \times 2pW'_w l_w S'_w \times 8.9 \times 10^{-5} \quad (\text{kg})$$

### 三、电枢绕组及换向极绕组改压重绕计算

电枢绕组改电压时,除考虑上述改压原则之外,还要考虑换向片间电压不可超过允许值;另外还要考虑改后的电压值不可超过绕组绝缘等级限度。如果改电压时引起电机的转速增高,这时要考虑电动机转速的限度,不可超过电动机转速允许值。

(1) 改压后的电枢绕组总的有效导体数

$$N'_z = N_z \frac{U_z}{U'_z} \cdot \frac{n}{n'} \cdot \frac{a_z}{a'_z}$$

式中  $N_z$ 、 $N'_z$ ——改绕前后电枢绕组总有效导体数;

$U_z$ 、 $U'_z$ ——改绕前后电枢电压(V);

$n$ 、 $n'$ ——改绕前后电机转速(r/min);

$a_z$ 、 $a'_z$ ——改绕前后电枢绕组并联支路数。

(2) 每槽导体数

$$W'_z = \frac{N'_z}{Z_L}$$

式中  $Z_L$ ——电枢槽数。

(3) 每槽线圈匝数

$$N'_s = \frac{K}{Z_L}$$

式中  $K$ ——换向片数。

(4) 导线截面积

$$S'_1 = S_1 \frac{U_1}{U'_1} \quad (\text{mm}^2)$$

式中  $S_1$ 、 $S'_1$ ——改绕前后电枢线圈导线截面积( $\text{mm}^2$ )。

(5) 电枢绕组平均半匝长度

$$L_1 = l_1 + 1.4\tau \quad (\text{cm})$$

式中  $l_1$ ——电枢铁心长度( $\text{cm}$ )；

$\tau$ ——电枢极距( $\text{cm}$ )。

(6) 电枢绕组铜重

$$G_1 = 1.1 \times N_1 I_1 S_1 8.9 \times 10^{-6} \quad (\text{kg})$$

**例4-57** 有一台Z3-81-4型13kW并励直流电动机，已知额定电压为220V，转速600r/min，并励的励磁绕组导线直径 $\phi$ 为0.96mm，励磁电流 $I_f$ 为2.32A，每相励磁绕组匝数 $N_f = 1320$ 匝，试求电压改为110V时，并励绕组每极匝数和导线直径以及励磁电流各是多少。

(1) 改110V后的励磁绕组每极匝数

$$N'_f = N_f \frac{U'}{U} = 1320 \times \frac{110}{220} = 660 \text{匝/极}$$

(2) 改压后的导线直径

$$d' = d \sqrt{\frac{N_f}{N'_f}} = 0.96 \times \sqrt{\frac{1320}{660}} = 1.358 \text{mm}$$

查线规标准，选用 $\phi 1.40 \text{mm}$ 。

(3) 励磁电流变

$$I'_f = I_f \frac{S'}{S} = I_f \frac{N_f}{N'_f} = 2.32 \times \frac{1320}{660} = 4.62 \text{A}$$

**例4-58** 有一台复励直流电动机，已知额定电压为230V，额定容量48kW，4极，并励绕组导线直径 $\phi$ 为1.3mm，940匝，励磁电流为4A，并联支路 $a = 1$ ，现欲改为400V使用，试求改电压后的励磁绕组每极匝数、导线线径和励磁电流各是多少。

改电压后的每极匝数为

$$N'_f = N_f \frac{U_f}{U'_f} = 940 \times \frac{400}{230} = 1635 \text{ 匝}$$

改压后的励磁绕组线径为

$$d' = d \sqrt{\frac{N_f}{N'_f}} = 1.3 \times \sqrt{\frac{230}{400}} \\ = 0.986 \text{ mm}$$

取标准线规为  $\phi 1.0 \text{ mm}$ 。

改后的励磁电流变为

$$I'_f = I_f \frac{S_f}{S'_f} = I_f \left( \frac{d'}{d} \right)^2 = 4 \times \left( \frac{1.0}{1.3} \right)^2 \\ = 2.37 \text{ A}$$

例4-59 一台 Z2-71型并励直流电动机，额定功率为13kW，额定电压为220V，额定电流为48.1A，转速为1450r/min，4极，电枢槽数  $Z_2 = 35$ ，电枢绕组总匝数为630，并联支路数  $a = 2$ ，电枢绕组导线为  $1.16 = 3.051/1.50 \times 3.38 \text{ mm}$ ；换向极极长为95mm，极宽为28mm，每极匝数为48匝，导线线规为  $1.68 \times 6.4/2.02 \times 6.73 \text{ mm}$ ；励磁绕组每极匝数为1500匝，励磁磁极的宽度为68mm，其长度为125mm，励磁电流为1.35A，导线直径  $\phi$  为0.83/0.92mm，（分母表示带绝缘的尺寸），换向片数  $K = 100$ ，要求电压改为110V，试求：

(1) 并励绕组的每极匝数  $N'_f$ ，并励绕组导线直径  $d'$ 、励磁电流  $I'_f$ 、励磁绕组铜重；

(2) 电枢绕组每槽匝数  $N'_a$ ，导线截面积  $S'_a$ ；

(3) 换向极绕组每极匝数  $N'_c$ ，导线截面积  $S'_c$  为多少。

(1) 并励绕组计算 并励绕组每极匝数为

$$N'_f = N_f \frac{U_f}{U'_f} = 1500 \times \frac{110}{220} = 750 \text{ 匝}$$

并励绕组导线线径为

$$d'_f = d_f \sqrt{\frac{N_f}{N'_f}} = 0.83 \sqrt{\frac{1500}{750}}$$

表4-3 扁铜线、扁铝线的计算截面积  $a$  (mm)

宽度 $b$ (mm)	厚 度 $a$ (mm)												
	0.80	0.85	0.90	0.95	1.00	1.06	1.12	1.18	1.25	1.32	1.40	1.50	1.60
	$r = 0.5\text{mm}$												
	$r = a/2$												
	计 算 截 面 积 (mm <sup>2</sup> )												
2.00	1.463	1.545	1.626	1.706	1.785	1.905	2.025	2.145	2.285	2.425	2.585	3.145	3.369
2.12	1.559	1.754	1.905	2.025	2.159	2.294	2.428	2.585	2.736	2.910	3.085	3.285	3.561
2.24	1.655	1.749	1.842	1.934	2.025	2.145	2.28	2.435	2.585	2.736	2.910	3.085	3.369
2.36	1.751	1.970	2.076	2.181	2.285	2.435	2.585	2.736	2.910	3.085	3.285	3.535	3.785
2.50	1.853	1.970	2.076	2.181	2.285	2.435	2.585	2.736	2.910	3.085	3.285	3.535	3.785
2.65	1.983	2.225	2.348	2.466	2.585	2.755	2.921	3.089	3.285	3.481	3.705	3.965	4.265
2.80	2.103	2.225	2.348	2.466	2.585	2.755	2.921	3.089	3.285	3.481	3.705	3.965	4.265
3.00	2.283	2.523	2.661	2.799	2.985	3.124	3.313	3.502	3.723	3.943	4.195	4.510	4.825
3.15	2.383	2.523	2.661	2.799	2.985	3.124	3.313	3.502	3.723	3.943	4.195	4.510	4.825
3.35	2.543	2.883	3.021	3.179	3.385	3.548	3.761	3.974	4.223	4.471	4.755	5.110	5.465
3.55	2.703	2.883	3.021	3.179	3.385	3.548	3.761	3.974	4.223	4.471	4.755	5.110	5.465
3.75	2.863	3.245	3.426	3.606	3.785	4.025	4.285	4.605	4.785	5.065	5.385	5.785	6.185
4.00	3.063	3.245	3.426	3.606	3.785	4.025	4.285	4.605	4.785	5.065	5.385	5.785	6.185
4.23	3.263	3.670	3.876	4.081	4.285	4.565	4.825	5.085	5.410	5.726	6.085	6.535	6.985
4.50	3.463	3.670	3.876	4.081	4.285	4.565	4.825	5.085	5.410	5.726	6.085	6.535	6.985
4.75	3.663	4.095	4.101	4.556	4.585	5.105	5.105	5.685	5.723	6.385	6.435	7.285	7.385
5.00	3.863	4.095	4.326	4.556	4.785	5.085	5.385	5.685	6.035	6.385	6.785	7.285	7.785
5.50	4.103	4.605	4.586	5.126	5.085	5.721	6.057	6.393	6.410	7.177	7.205	8.265	8.265
5.60	4.243	4.605	4.856	5.126	5.385	5.721	6.057	6.393	6.785	7.177	7.625	8.185	8.745
6.00	4.663	5.200	5.220	5.791	5.785	6.463	6.841	7.219	7.285	8.101	8.185	9.385	9.385
6.30	4.903	5.200	5.496	5.791	6.025	6.463	6.841	7.219	7.660	8.101	8.605	9.235	9.855

6.70	5.885	6.485	7.289	8.160	9.165	10.51
7.10	6.218	6.885	7.717	8.560	9.725	11.15
7.50	6.551	7.285	8.185	9.160	10.28	11.79
8.00		7.785	8.746	9.785	10.99	12.59
8.50			9.305	10.41	11.69	13.39
9.00			9.865	11.04	12.39	14.19
9.50				11.66	13.09	14.99
10.00				12.29	13.79	15.79
10.60					14.63	16.75
11.20					15.47	17.71
11.80					16.59	18.67
12.50						19.79
13.20						
14.00						
15.00						
16.00						
17.00						
18.00						
19.00						
20.00						
21.20						
22.40						
23.60						
25.00						
26.50						
28.00						
30.00						
31.50						
33.50						
35.50						

(续)

宽度 b (mm)	厚 度 α(mm)													
	1.70	1.80	1.90	2.00	2.12	2.24	2.36	2.50	2.65	2.80	3.00	3.15	3.35	3.55
	r = 0.8mm													
	r = 0.65mm													
	计 算 截 面 (mm <sup>2</sup> )													
2.00														
2.12														
2.24														
2.36														
2.50														
2.65				4.957	5.237	5.638								
2.80	4.397	4.412	4.677	5.638	6.315	6.893								
3.00		6.038				7.141								
3.15	4.992	5.307	5.837	6.337										
3.35		5.667												
3.55	5.672	6.027	6.382	6.737	7.183	7.589	7.829	8.326						
3.75		6.387		7.137	8.037	8.837		8.826						
4.00	0.473	6.837	7.237	7.637	8.117	8.597	8.891	9.451	10.05	10.65				
4.25		7.287		8.137	9.157	9.717		10.08		11.35				
4.50	7.287	7.737	8.187	8.637	9.117	9.717	10.07	10.70	11.88	12.85	13.63			
4.75		8.187		9.137	10.28	10.28		11.83		12.75				
5.00	8.137	8.637	9.137	9.637	10.24	10.84	11.2E	11.95	12.70	13.45	14.45	16.20	17.29	
5.30		9.177		10.24	11.51	11.51		12.70		14.29		16.15	18.27	
5.60	9.157	9.717	10.28	10.84	11.51	12.18	12.67	13.48	14.29	15.13	16.25	17.09	18.21	19.33
6.00		10.44		11.64	13.08	13.08		14.45		16.25		18.35	20.75	
6.30	10.35	10.98	11.61	12.24	12.99	13.75	14.32	15.20	16.15	17.09	18.35	19.30	20.56	21.82





(续)

宽度 $b$ (mm)	厚 度 $a$ (mm)						$r = 1.20\text{mm}$					
	3.75	4.00	4.25	4.50	4.75	5.00		5.30	5.60	6.00	6.30	6.70
2.00	计 算 面 积 (mm <sup>2</sup> )											
2.12												
2.24												
2.36												
2.50												
2.65												
2.80												
3.00												
3.15												
3.35												
3.55												
3.75												
4.00												
4.25												
4.50												
4.75												
5.00												
5.30												
5.60												
6.00												
6.30	20.14	21.54	26.92		27.49	32.87		34.61	39.14		41.54	43.94
6.70	22.77	24.34	25.94	27.54	29.14	30.74	32.34	33.94	35.54	37.14	38.74	40.34
7.10	25.77	27.54	29.32	31.09	32.87	34.64	36.41	38.19	39.96	41.74	43.51	45.29
7.50	29.14	31.14	33.14	35.14	37.14	39.14	41.14	43.14	45.14	47.14	49.14	51.14
8.00	32.77	34.34	35.92	37.49	39.07	40.64	42.21	43.79	45.36	46.94	48.51	50.09

8.51	32.89	37.14	37.83	37.83	31.85	41.64	46.24	49.74	74.14	71.51	82.51	87.31
9.00	35.14	39.64	37.83	39.64	31.85	44.14	46.24	49.74	74.14	81.92	82.51	87.31
9.50	37.14	41.89	41.89	41.89	46.64	48.64	52.14	55.14	83.14	86.90	92.56	92.56
10.00	39.14	44.14	41.89	44.14	46.64	49.14	52.14	55.14	83.14	86.90	92.56	92.56
10.50	41.54	46.64	41.89	46.64	46.64	52.14	52.14	58.50	83.14	86.90	92.56	92.56
11.20	41.14	49.54	46.74	49.54	52.34	55.14	58.50	61.86	83.14	86.90	92.56	92.56
11.80	46.34	52.24	46.74	52.24	58.82	58.14	65.39	65.22	83.14	86.90	92.56	92.56
12.50	46.02	49.14	52.27	55.39	58.82	61.64	65.39	65.22	83.14	86.90	92.56	92.56
13.20	51.94	51.94	58.54	58.54	65.64	65.14	73.34	77.54	83.14	86.90	92.56	92.56
14.00	51.64	55.14	58.54	62.14	65.64	69.14	73.34	77.54	83.14	86.90	92.56	92.56
15.00	59.14	59.14	67.14	68.64	75.14	74.14	83.14	83.14	83.14	86.90	92.56	92.56
16.00	69.14	69.14	67.14	71.14	75.14	79.14	83.94	88.74	83.14	86.90	92.56	92.56
17.00	67.14	67.14	67.14	75.64	75.64	84.14	83.94	88.74	83.14	86.90	92.56	92.56
18.00	66.64	71.14	75.64	80.14	84.64	89.14	84.54	94.34	83.14	86.90	92.56	92.56
19.00	75.14	75.14	75.64	84.64	84.64	94.14	84.54	99.94	83.14	86.90	92.56	92.56
20.50	74.14	79.14	84.14	84.14	88.14	99.14	105.1	111.1	83.14	86.90	92.56	92.56
21.20	83.14	83.94	94.34	94.54	105.1	105.1	105.1	117.9	83.14	86.90	92.56	92.56
22.40	83.14	88.74	94.34	99.94	105.5	111.1	117.9	124.8	83.14	86.90	92.56	92.56
23.60	92.89	92.84	105.4	105.3	117.1	117.1	131.6	131.6	83.14	86.90	92.56	92.56
25.00	92.89	99.14	105.4	111.6	117.9	124.1	131.6	139.1	83.14	86.90	92.56	92.56
26.50	104.1	105.1	118.1	118.4	132.1	131.6	147.5	147.5	83.14	86.90	92.56	92.56
28.00	117.3	119.1	133.0	125.1	148.8	156.6	166.1	166.1	83.14	86.90	92.56	92.56
31.50	117.3	125.1	133.0	140.9	149.9	166.6	166.1	166.1	83.14	86.90	92.56	92.56
33.50	132.3	141.1	150.0	158.9	167.8	176.6	187.3	187.3	83.14	86.90	92.56	92.56
35.50	132.3	141.1	150.0	158.9	167.8	176.6	187.3	197.9	83.14	86.90	92.56	92.56

注: 1. 计算板面时已考虑了扇形的圆角。

2. 厚度 (a边) 和宽度 (b边) 的允许偏差 (mm) 为: 0.8~1.20 ± 0.02, 1.21~2.86 ± 0.03, 2.86~6.00 ± 0.05, 6.01~9.50 ± 0.07, 9.51~15.00 ± 0.09, 15.01~20.00 ± 0.12, 20.01~25.00 ± 0.15, 25.01~35.50 ± 0.18。

3. r 为圆角半径。

$$= 1.17 \text{ mm}$$

选用标准线规  $\phi 1.2 \text{ mm}$ 。

励磁电流为

$$I_f = I_1 \left( \frac{d_f}{d_1} \right)^2 = 1.35 \times \left( \frac{1.2}{0.83} \right)^2$$

$$= 2.82 \text{ A}$$

励磁绕组铜重为

$$G_f = K_a 2pl_f N_f S_f \times 8.9 \times 10^{-5}$$

$$= 1.08 \times 4 \times (7.6 + 13.3) \times 2 \times 750 \times 8.9 \times 10^{-5}$$

$$= 13.6 \text{ kg}$$

(2) 电枢绕组计算 改电压后电枢绕组总匝数为

$$N_1' = N_1 \frac{U_1'}{U_1} \frac{\pi}{\pi'} \frac{a_1}{a_1'} = 630 \times \frac{110}{220} \times \frac{1}{1} \times \frac{1}{1}$$

$$= 315 \text{ 匝}$$

每槽匝数为

$$N_1'' = \frac{N_1'}{Z_2} = \frac{315}{35} = 9$$

导线截面积

$$S_1' = S_1 \frac{U_1'}{U_1} = (1.16 \times 3.051) \times \frac{220}{110}$$

$$= 7.08 \text{ mm}^2$$

(3) 换向极绕组计算 改压后换向极绕组匝数为

$$N_w' = N_w \frac{U_1' a_c'}{U_c a_c} = 48 \times \frac{110}{220} \times \frac{1}{1} = 24 \text{ 匝}$$

改压后换向极绕组导线截面积为

$$S_w' = S_w \times \frac{U_w' a_w'}{U_w a_w} = (1.68 \times 6.4) \times \frac{220}{110} \times \frac{1}{1}$$

$$= 21.5 \text{ mm}^2$$

新导线尺寸选为：厚度  $= \frac{21.5}{6.4} = 3.38 \text{ mm}$ ，宽度为  $6.4 \text{ mm}$

不变，查表4-3得出新线规为 $3.38 \times 6.4 \text{mm}^2$ 。

### 第八节 直流发电机计算

#### 一、直流发电机接线及电流、电压关系式

##### 1. 直流他励发电机

他励电压  $U_f$  与他励电流  $I_f$  关系（见图4-19）为

$$I_f = \frac{U_f}{R_f}$$

负载电压为

$$U = E_a - I_a R_a - I_b R_b$$

电枢电流为

$$I_a = I_b = I_e$$

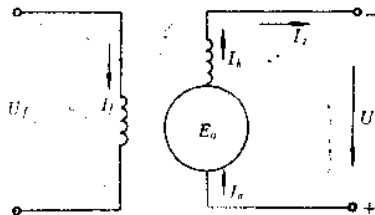


图4-19 他励发电机

式中  $I_e$ ——负载电流 (A)；

$I_b$ ——换向极电流 (A)；

$R_f$ ——励磁绕组电阻 ( $\Omega$ )。

##### 2. 并励发电机

并励发电机如图4-20所示，其各参数关系如下：

励磁电流为

$$I_f = \frac{U}{R_f}$$

电枢电流为

$$I_a = I_b = I_f + I_e$$

端电压为

$$U = E_a - I_a R_a - R_b I_b$$

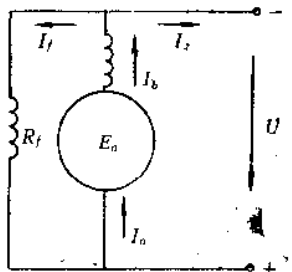


图4-20 并励发电机

##### 3. 串励发电机

串励发电机如图4-21所示，其各参数关系如下：

电枢电流为

$$I_a = I_f = I_e = I_b$$

端电压为

$$U = E_a - I_a(R_a + R_f + R_b)$$

#### 4. 激复励发电机

激复发电机如图4-22所示，

其参数关系如下：

电枢电流为

$$I_a = I_h = I_{cf}$$

$$I_a = I_f + I_a$$

励磁电压为

$$U_f = U / R_f$$

端电压为

$$U = E_a - I_a(R_a + R_{cf} + R_b)$$

#### 5. 差复励发电机

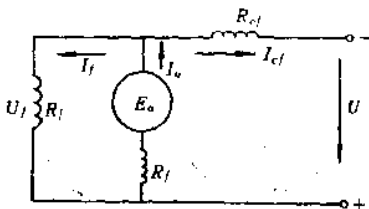


图4-22 激复励发电机

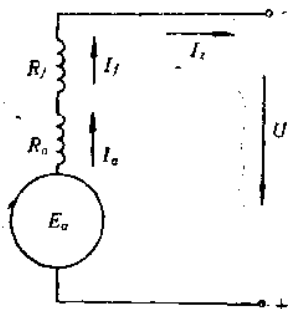


图4-21 串励发电机

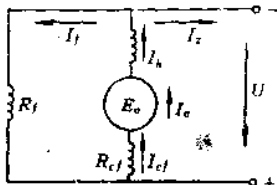


图4-23 差复励发电机

差复励发电机如图4-23所示，其参数关系如下：

电枢电流为

$$I_a = I_h = I_f + I_a$$

串励绕组电流为

$$I_{cf} = I_a$$

端电压为

$$U = E_a - (I_a R_a + I_a R_{cf} + I_a R_b)$$

## 二、直流电枢绕组及励磁绕组

### 1. 直流电动机电枢绕组的基本形式

一种是单叠绕组；另一种是单波绕组，如图4-24和图4-25所示，单叠绕组线圈节距  $y$  的计算为

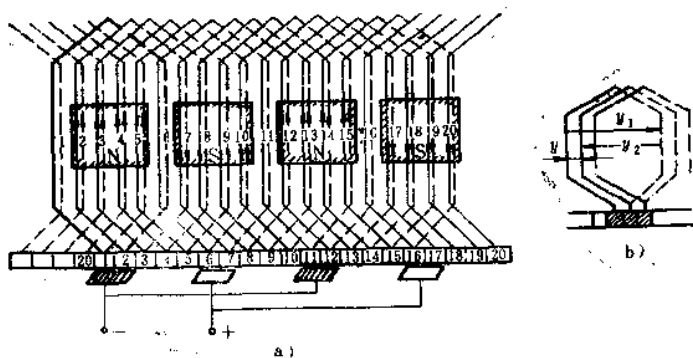


图4-24 直流电动机电枢的单叠绕组

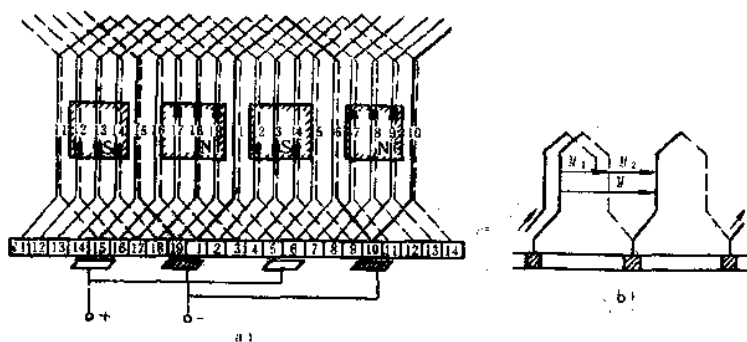


图4-25 直流电动机电枢的单波绕组

$$y = \frac{Z_p}{2p} \mp e = \text{整数}$$

式中  $Z_p$ ——虚槽数。

直流电动机叠绕组有单叠绕组和复叠绕组之分，单叠绕组是指后一绕组元件相对于前一绕组元件仅移过一个槽，每个元件相互叠放，故称单叠绕组，特点是合成节距  $y = 1$ ，如图4-24所

示，此图是20槽，20个换向片，4极，40个导体的单叠绕组展开图。节距计算如下：

第一节距  $y_1$  为

$$y_1 = \frac{Z_c}{2p} \pm e = \text{整数}$$

$$\text{图中 } y_1 = \frac{Z_c}{2p} \pm e = \frac{20}{4} \pm 0 = 5$$

因为是单叠绕组，合成节距  $y = 1$ ，故第二节距  $y_2$  为

$$y_2 = y - y_1 = 1 - 5 = -4 \quad (\text{负号表示右行绕组})$$

合成节距  $y$  为

$$y = y_1 + y_2 = 5 + (-4) = 1$$

$Z_c$  是虚槽数，这里  $Z_c$  分别等于线圈元件数  $S$  和换向片数  $K$ ，即  $Z_c = S = K$ 。从图4-24中看出，单叠绕组特征是在同一磁极下的各元件组成一条支路，因此并联支路数  $2a$  等于电动机的极数  $2p$ ，即  $2a = 2p$ ，每一条支路又与两个不同极性电刷相接，每两个电刷分别连接两条不同支路，所以电刷杆数等于支路数。

直流电动机波绕组也有单波绕组和复波绕组之分。单波绕组是指相邻两个元件相隔约2个极距，第一个元件处于某一对极面下，第二个元件处于相邻的另一对极面下（见图4-25），如电动机有  $p$  对磁极时，则连接  $p$  个元件之后，才回到出发的元件附近，相隔一个槽口各元件连接规律像波浪形状，故称为波绕组。

单波绕组特点为  $2a = 2$ ，即  $a = 1$ ，计算公式如下：

第一节距  $y_1$  为

$$y_1 = \frac{Z_c}{2p} \pm e = \text{整数}$$

$$\text{如图4-25所示, } Z_c = 19, 2p = 4 \text{ 故 } y_1 = \frac{19}{4} \pm e = \frac{19+1}{4} =$$

第二节距  $y_2$  为

$$y_2 = y - y_1 = 9 - 5 = 4$$

合成节距  $y$  为

$$y = \frac{Z_c \pm 1}{p} = \frac{K \pm 1}{p} \quad \text{本例 } Z_c = K = S$$

所以 
$$y = \frac{19 \pm 1}{2} = 9$$

波绕组通常选左行绕组，而单叠绕组选右行绕组，目的是为了节省铜材。

### 2. 励磁绕组采用的形式

该绕组采用集中绕组形式，所以产生的磁场形状如礼帽状，磁场方向是从N极到S极。电动机带载后，电枢绕组中有电流流通，产生电枢磁场，这个磁场形状如马鞍形，两个磁场在电动机内空间形成合成磁场，称为气隙磁场，合成结果使磁极磁场（礼帽状）发生扭斜，称为电枢反应。

电枢反应引起：1)每极磁通量减少，对于发电机，使后极尖处去磁，对于电动机，使前极尖处去磁；2)由于磁场被扭斜，使物理中性线偏斜，对于发电机是顺着电枢转向偏移一角度；对于电动机是逆着电枢转向偏移一角度；3)使换向器的片间峰值电压不相等，造成换向恶化。

### 三、发电机的基本方程式

发电机是把原动机供给的机械能，经电枢电磁转化作用变成电能输出的电磁转化装置。

为了计算方便，这里再把发电机基本方程式归纳如下

#### 1. 电枢电动势

$$E_a = \frac{pN}{60a} n \Phi = c_e n \Phi$$

#### 2. 电磁转矩 $T$

$$T = \frac{pN}{2\pi a} I_a \Phi = c_T I_a \Phi$$



- 式中  $p$ ——极对数；  
 $N$ ——电枢绕组总导体数；  
 $a$ ——电枢绕组并联支路数；  
 $\Phi$ ——气隙磁通(Wb)；  
 $n$ ——发电机转速(r/min)；  
 $I_a$ ——电枢电流(A)；  
 $c_e$ ——电动势常数；  
 $c_T$ ——转矩常数。

3. 电动势平衡方程式

$$E_a = U_N + I_a R_a$$

励磁回路为

$$U_f = R_f I_f$$

4. 转矩平衡方程式

$$T_1 = T_M + T_0$$

式中  $T_1$ ——输入发电机的机械转矩(N·m)；

$T_M$ ——电磁转矩(N·m)；

$T_0$ ——空载转矩(N·m)。

5. 功率平衡方程式

额定输出功率为

$$P_N = U_N I_N$$

非额定输出功率为

$$P_2 = UI$$

电磁功率为

$$P_M = E_a I_a = P_2 + P_{Cu2} + (P_{Cu1} \text{ 有并励时}) = T_M \Omega$$

输入功率为

$$P_1 = P_M + P_{Fe} + p_m = P_M + P_0$$

式中  $P_{Fe}$ ——铁损耗(W)；

$p_m$ ——机械损耗(W)；

$E_a$ ——电枢电动势(V)；

$U$ ——发电机发出的电压(V)；

$I$ ——发电机发出的电流(A)；

$P_{Cu_a}$ ——电枢回路铜损耗， $P_{Cu_a} = I_a^2 R_a$  (W)。

#### 四、计算实例

例4-60 有一台并励直流发电机，拟将其单叠绕组改接为单波绕组，要求改后各支路中电流  $i_a$  不变，问这时电磁转矩是否改变。

单叠绕组特点是并联支路数等于电机的极数，即  $2a = 2p$ ，设电枢绕组的每个支路内电流为  $i_a$ ，则电枢电流  $I_a = 2ai_a = 2pi_a$ ，则电磁转矩为

$$\begin{aligned} T_M &= \frac{pN}{2\pi a} \Phi I_a = \frac{pN}{2\pi a} \Phi (2pi_a) \\ &= \frac{pN}{2\pi} \Phi 2i_a \end{aligned}$$

单波绕组特点是并联支路数  $2a = 2$ ，电枢电流  $I_a = 2ai_a$ ，代入电磁转矩公式中，则电磁转矩为

$$T'_M = \frac{pN}{2\pi a} \Phi I_a = \frac{pN}{2\pi a} \Phi (2i_a) = \frac{pN}{2\pi} \Phi (2i_a)$$

可见， $T_M = T'_M$ ，说明单叠改单波绕组时，只要保持支路中电流  $i_a$  不变，则电动机的电磁转矩也不变。

例4-61 将一台极数为  $2p$  的直流发电机电枢绕组，由单叠绕组改为单波绕组后，其电枢绕组电阻  $R_a$  和电枢电流  $I_a$  各为多少。

(1) 对于单叠绕组而言，设每个支路中电流为  $i_a$ ，则电枢电流  $I_a = 2pi_a = 2ai_a$ ，单叠绕组的电枢电阻为  $R_a$ ，则每支路电阻为  $2aR_a = 2pR_a$ ，对于单波绕组而言， $2a = 2$ ，也就是并联支路对数总等于 1，其电枢中电流  $I'_a = 2ai_a = 2i_a$ 。

单波绕组每支路电阻为单叠绕组的每个支路电阻的  $p$  倍，即单波绕组电枢电阻为单叠绕组电枢电阻的  $p(2pR_a) = 2p^2R_a = p^2(2R_a)$  倍。

则单波绕组电枢电阻变为  $\frac{1}{2}(p^2 2R_a) = p^2 R_a$ ，即改为单波绕组后电枢电阻增加到  $p^2$  倍。

(2) 单叠绕组时，每支路电流为  $\frac{I_a}{2\alpha} = \frac{I_a}{2p}$ ，改为单波绕组后，并联支路变为  $2\alpha = 2$ ，保持支路中电流不变时，则单波绕组中电枢电流为

$$2\alpha \left( \frac{I_a}{2p} \right) = 2 \left( \frac{I_a}{2p} \right) = \frac{I_a}{p}$$

降低为原有的  $\frac{1}{p}$  倍。

例4-62 有一台并励直流发电机，已知端电压为 230V，励磁回路电阻  $R_f = 50\Omega$ ，负载电阻  $R_L = 6\Omega$ ，电枢回路总电阻  $R_a = 0.20\Omega$ ，试求：

- (1) 励磁绕组电流  $I_f$ ；
- (2) 负载电流  $I_L$ ；
- (3) 电枢电流  $I_a$ 、电枢电动势  $E_a$ ；
- (4) 输出功率  $P_2$ 、电磁功率  $P_M$  各多少。

(1) 励磁绕组电流  $I_f$

$$I_f = \frac{U}{R_f} = \frac{230}{50} = 4.6 \text{ A}$$

(2) 负载电流  $I_L$

$$I_L = \frac{U}{R_L} = \frac{230}{6} = 38.3 \text{ A}$$

(3) 电枢电流  $I_a$

$$I_a = I_f + I_L = 4.6 + 38.3 = 42.9 \text{ A}$$

(4) 电枢电动势  $E_a$

$$E_a = U + I_a R_a = 230 + 42.9 \times 0.20 = 238.6 \text{ V}$$

(5) 输出功率  $P_2$

$$P_2 = UI_a = 230 \times 38.3 \times 10^{-3} = 8.8 \text{ kW}$$

(6) 电磁功率  $P_M$

$$P_M = E_a \cdot I_a = 238.6 \times 42.9 \times 10^{-3} = 10.24 \text{ kW}$$

例4-63 一台4极直流发电机, 已知端电压  $U = 230\text{V}$ , 电枢电流  $I_a = 40\text{A}$ , 电枢电阻  $R_a = 0.6\Omega$ , 单叠绕组, 每极磁通  $\Phi = 0.04\text{Wb}$ , 总导体数  $N$  为380根, 试求:

- (1) 电枢电动势  $E_a$ ;
- (2) 发电机转速;
- (3) 电磁功率;
- (4) 电磁转矩各是多少。

(1) 电枢电动势  $E_a$

$$E_a = U + I_a R_a = 230 + 40 \times 0.6 = 254\text{V}$$

(2) 发电机转速  $n$

$$n = \frac{E_a}{\frac{pN}{60a} \Phi} = \frac{E_a}{\frac{pN}{60p} \Phi}$$

单叠绕组  $2p = 2a$ ,  $a = p$ , 则有

$$n = \frac{254}{\frac{2 \times 380}{60 \times 2} \times 0.04} = 1002.6 \text{ r/min}$$

(3) 电磁功率  $P_M$

$$P_M = E_a I_a = 254 \times 40 = 10160 \text{ W}$$

(4) 电磁转矩  $T_M$

$$\begin{aligned} T_M &= \frac{pN}{2\pi a} \Phi I_a = \frac{2 \times 380}{2\pi \times 2} \times 0.04 \times 40 \\ &= 96.8 \text{ N}\cdot\text{m} \end{aligned}$$

或者用另外公式计算:

$$T_M = \frac{P_M}{n} = \frac{P_M}{\frac{2\pi n}{60}} = \frac{10160}{\frac{2\pi \times 1002.6}{60}} = 96.8 \text{ N}\cdot\text{m}$$

**例4-64** 一台激复励发电机，已知额定功率为10kW， $U_N = 230\text{V}$ ， $n_N = 980\text{r/min}$ ， $2p = 6$ 极， $a = 1$ ， $R_a = 0.50\Omega$ ，换向极绕组电阻  $R_h = 0.2\Omega$ ，串励绕组电阻  $R_c = 0.06\Omega$ ，并励绕组电阻  $R_f = 160\Omega$ ，正负极电刷压降  $\Delta U = 2\text{V}$ ，又知额定运行时，电枢铜耗  $P_{Cu_a} = 740\text{W}$ ，铁耗  $P_{Fe} = 250\text{W}$ ，机械损耗  $p_m = 45\text{W}$ （不考虑附加损耗），试求：

- (1) 各绕组中电流；
- (2) 电枢电动势；
- (3) 电磁功率和电磁转矩；
- (4) 输入功率及电机效率各是多少。

按题意，可画出发电机接线图，如图所示。

- (1) 额定电流  $I_N$

$$I_N = \frac{P_N}{U_N} = \frac{10 \times 10^3}{230} = 43.5\text{A}$$

- (2) 并励回路电流  $I_f$

$$I_f = \frac{U_N}{R_f} = \frac{230}{160} = 1.44\text{A}$$

- (3) 电枢电流  $I_a$

$$I_a = I_f + I_N = 1.44 + 43.5 = 44.9\text{A}$$

- (4) 电枢电动势  $E_a$

$$\begin{aligned} E_a &= U_N + I_a(R_a + R_c + R_h) + \Delta U \\ &= 230 + 44.9 \times (0.5 + 0.06 + 0.2) + 2 \\ &= 266\text{V} \end{aligned}$$

- (5) 电磁功率  $P_M$

$$P_M = E_a I_a = 266 \times 44.9 = 11943.4\text{W}$$

- (6) 电磁转矩  $T_M$

$$T_M = \frac{P_M}{\Omega} = \frac{P_M}{\frac{2\pi n}{60}} = \frac{11943.4}{\frac{2\pi \times 980}{60}} = 116.4\text{N}\cdot\text{m}$$

- (7) 输入功率  $P_1$

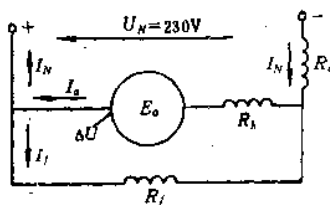


图4-26 激复励发电机

$$P_1 = P_M + P_{Cu} + P_{Fe} = 11943.4 + 250 + 45 \\ = 12238.4 \text{ W}$$

(8) 发电机效率  $\eta$

$$\eta = \frac{P_N}{P_1} \times 100\% = \frac{10 \times 10^3}{12238.4} \times 100\% = 82\%$$

例4-65 一台8kW并励直流发电机,拟改为差复励直流发电机使用,已知 $U_N = 230\text{V}$ ,每极励磁绕组匝数 $N_f = 450$ 匝,在额定电压下,额定空载励磁电流 $I_{f0} = 1.0\text{A}$ ,负载励磁电流 $I_{fN} = 1.3\text{A}$ ,问串励绕组的每极匝数 $N_c$ 应是多少。

额定电流 $I_N$ 为

$$I_N = \frac{P_N}{U_N} = \frac{8 \times 10^3}{230} = 34.8 \text{ A}$$

在额定电压下额定负载时等效安匝数 $\Delta I N_f$ 为

$$\Delta I N_f = (1.3 - 1.0) \times 450 = 135 \text{ 安匝}$$

在保持 $U_N$ 和 $I_N$ 不变条件下,改为差复励直流发电机时,每极串励绕组匝数 $N_c$ 为

$$N_c = \frac{\Delta I N_f}{I_N} = \frac{135}{34.8} = 4 \text{ 匝}$$

例4-66 一台四极直流发电机,已知电枢槽数 $Z_a = 37$ ,每槽导体数为6,感应电动势 $E_a$ 为230V,额定转速 $n_N = 1450\text{r}/\text{min}$ ,试求:

(1) 每极磁通 $\Phi$ ;

(2) 导体中电动势频率 $f$ 是多少。

(1) 电枢总导体数

$$N = 6 \times Z_a = 6 \times 37 = 222 \text{ 根}$$

(2) 每极磁通 $\Phi$

$$\Phi = \frac{E_a}{c_{em}} = \frac{E_a}{\frac{pNn}{60a}} = \frac{230}{\frac{2 \times 222 \times 1450}{60 \times 1}}$$

$$= 0.0214 \text{ Wb}$$

(3) 导体中频率

$$f = \frac{pn}{60} = \frac{2 \times 1450}{60} = 48.3 \text{ Hz}$$

例4-70 有一台20kW直流发电机, 额定电压  $U_N = 230\text{V}$ , 额定转速  $n_N = 1450\text{r/min}$ , 额定效率  $\eta_N = 0.86$ , 试求:

- (1) 额定电流  $I_N$ ;
- (2) 额定输入功率  $P_1$  是多少。

$$(1) \quad I_N = \frac{P_N}{U_N} = \frac{20 \times 10^3}{230} = 87\text{A}$$

$$(2) \quad P_1 = \frac{P_N}{\eta} = \frac{20}{0.86} = 23.3\text{kW}$$

例4-67 一台直流发电机, 已知  $P_N = 20\text{kW}$ ,  $U_N = 230\text{V}$ ,  $n_N = 1450\text{r/min}$ ,  $2p = 4$  极, 每极气隙磁通  $\Phi = 0.0087\text{Wb}$ , 单波绕组,  $N = 450$  根, 试求:

- (1) 额定电流  $I_N$ ;
- (2) 电枢电动势  $E_a$  为多少。

$$(1) \quad I_N = \frac{P_N}{U_N} = \frac{20 \times 10^3}{230} = 87\text{A}$$

$$(2) \quad E_a = \frac{pN}{60a} n \Phi = \frac{2 \times 450}{60 \times 1} \times 1450 \times 0.0087 = 189.2\text{V}$$

因为是单波绕组, 所以  $a = 1$ 。

例4-72 一台6极他励直流电机, 不知是电动机还是发电机, 接在320V电源上运行, 实测转速  $n = 1000\text{r/min}$ ,  $N = 460$  根,  $\Phi = 0.016\text{Wb}$ , 单波绕组,  $R_a = 0.20\Omega$ , 铁耗  $P_{Fe} = 11.3\text{kW}$ ,  $p_m = 8\text{kW}$ , 试求:

- (1) 判断此台电机是发电机还是电动机;
- (2) 求出此台电机的电枢电流  $I_a$ 、电磁转矩  $T_M$ ;
- (3) 求出输入功率  $P_1$  和电机效率  $\eta$  各是多少。

(1) 发电机特征是  $E_a > U$ , 而电动机  $E_a < U$ , 所以按此来判

断。

$$E_a = \frac{pN}{60\alpha} n \Phi = \frac{3 \times 460}{60 \times 1} \times 1000 \times 0.016 = 368\text{V}$$

由于  $E_a > U$ ，所以这台电机是一台发电机。

(2) 由  $E_a = U + I_a R_a$  知

$$I_a = \frac{E_a - U}{R_a} = \frac{368 - 320}{0.20} = 240\text{A}$$

电磁转矩为

$$T_M = \frac{pN}{2\pi\alpha} \Phi I_a = \frac{3 \times 460}{2\pi \times 1} \times 0.016 \times 240 = 843.4\text{N}\cdot\text{m}$$

(3) 输入功率  $P_1$

$$P_1 = UI_a = 320 \times 240 = 76.8\text{kW}$$

(4) 电磁功率  $P_M$ 、输出功率  $P_2$

$$P_M = E_a I_a = 368 \times 240 = 88320\text{W}$$

$$P_2 = P_M - P_{Fe} - p_m = 88320 - 11300 - 3000 = 74.02\text{kW}$$

(5) 电机效率  $\eta$

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} \times 100\% = \frac{74.02}{76.8} \times 100\% = 96.4\%$$

例4-68 一台并励直流发电机， $U_N = 230\text{V}$ ， $I_{aN} = 26\text{A}$ ， $n_N = 1450\text{r/min}$ ， $R_a = 0.59\Omega$ ， $R_f = 177\Omega$ ，将此台发电机改为电动机运行，接在220V电源上，使电动机的电枢电流  $I_a = I_{aN}$ ，问电动机的转速应多大。

在发电机运行时励磁电流为

$$I_f = \frac{U_f}{R_f} = \frac{U_N}{R_f} = \frac{230}{177} = 1.3\text{A}$$

电动势系数为

$$c_e \Phi = \frac{U_N + I_{aN} \cdot R_a}{n_N} = \frac{230 + 26 \times 0.59}{1450}$$



$$= 0.169$$

在电动机运行时励磁电流  $I_f$  为

$$I_f = \frac{U}{R_f} = \frac{220}{177} = 1.24 \text{ A}$$

考虑磁路为线性, 则有

$$c_e \Phi' = c_e \Phi \frac{I_f'}{I_f} = \frac{0.169 \times 1.24}{1.3} = 0.162$$

则电动机的转速  $n$  为

$$n = \frac{U - I_a R_a}{c_e \Phi'} = \frac{220 - 26 \times 0.59}{0.162} = 1263 \text{ r/min}$$

**例4-69** 一台他励直流发电机在额定状态下运行, 已知  $P_N = 5 \text{ kW}$ ,  $U_N = 115 \text{ V}$ ,  $n_N = 1500 \text{ r/min}$ , 电枢电路电阻 (包括电刷电阻在内) 为  $0.15 \Omega$ , 不考虑电枢反应, 保持励磁电流  $I_f$  和负载电阻不变, 这时使发电机转速降为  $1200 \text{ r/min}$  时, 问发电机的端电压和负载电流变为多大。

(1) 额定电流  $I_N$

$$I_N = \frac{P_N \times 10^3}{U_N} = \frac{5 \times 10^3}{115} = 43.5 \text{ A}$$

(2) 在额定状态下运行时的电动势  $E$ 。

$$E = U + R_a I_a = 115 + 0.15 \times 43.5 = 121.5 \text{ V}$$

(3) 当励磁电流  $I_f$  一定时, 使转速降为  $1200 \text{ r/min}$  时, 电枢电动势  $E'$  为

$$E' = \frac{1200}{1500} E = \frac{1200}{1500} \times 121.5 = 97.2 \text{ V}$$

(4) 由于负载电路电阻不变, 当  $E$  变为  $E'$  时, 电流  $I_a'$  为

$$I_a' = \frac{E'}{E} I_N = \frac{97.2}{121.5} \times 43.5 = 34.8 \text{ A}$$

(5) 这时发电机端电压

$$U' = E' - R_a I_a' = 97.2 - 0.15 \times 34.8 = 92 \text{ V}$$

**例4-70** 有两台直流发电机并联运行, 供给100A 负载使用, 各发电机的感应电动势和内部电阻分别为110V、0.04Ω 和112V、0.06Ω, 问在这种情况下, 每台发电机所发出的电流各为多少。

设两台发电机的感应电动势、内部电阻和电枢电流分别为  $E_1$ 、 $R_{a1}$ 、 $I_{a1}$ 、 $E_2$ 、 $R_{a2}$ 、 $I_{a2}$ , 则有

$$U = E_1 - R_{a1}I_{a1} = E_2 - R_{a2}I_{a2}$$

$$\therefore R_{a1}I_{a1} - R_{a2}I_{a2} = E_1 - E_2 = 110 - 112 = -2V$$

$$\text{又知, } I_{a1} + I_{a2} = 100A$$

从上面联立方程式可得出:

$$I_{a1} = \frac{\begin{vmatrix} -2 & -R_{a2} \\ 100 & 1 \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} R_{a1} & -R_{a2} \\ 1 & 1 \end{vmatrix}} = \frac{100R_{a2} - 2}{R_{a1} + R_{a2}}$$

$$= \frac{100 \times 0.06 - 2}{0.04 + 0.06} = 40A$$

$$I_{a2} = \frac{100R_{a1} + 2}{R_{a1} + R_{a2}} = \frac{100 \times 0.04 + 2}{0.04 + 0.06} = 60A$$

**例4-71** 一台他励直流发电机在额定状态下运行, 已知  $P_N = 50kW$ ,  $U_N = 200V$ ,  $n_N = 1000r/min$ ,  $R_a = 0.04\Omega$ , 如果将此台发电机转速降为800r/min 时, 求此时发电机的端电压和输出功率各多少; 不考虑电枢反应, 并且降速时负载电阻不改变。

(1) 额定电流  $I_N$

$$I_N = I_a = \frac{P_N}{U_N} = \frac{50 \times 10^3}{200} = 250A$$

因为他励发电机, 所以  $I_N = I_a$ 。

(2) 额定感应电动势  $E_a$

$$E_a = U + R_a I_a = 200 + 0.04 \times 250 = 210V$$

(3) 当转速降为800r/min 时, 感应电动势  $E'$  为

$$E' = \frac{800}{1000} \times 210 = 168V$$

(4) 由于负载电阻不变, 所以电枢电压和电流与感应电动势成比例变化。令  $800\text{r/min}$  时, 端电压为  $U'$ , 电枢电流为  $I'_a$ , 则有

$$U' = 200 \times \frac{168}{210} = 160\text{V}$$

$$I'_a = 250 \times \frac{168}{210} = 200\text{A}$$

(5) 对应  $800\text{r/min}$  时的输出功率  $P_2$

$$P_2 = 160 \times 200 = 32\text{kW}$$

(6) 额定状态时负载电阻  $R_L$

$$R_L = \frac{U}{I_a} = \frac{200}{250} = 0.8\Omega$$

(7) 按  $E' = 168\text{V}$ , 求出电枢电流  $I'_a$

$$I'_a = \frac{E'}{0.04 + R_a} = \frac{168}{0.84} = 200\text{A}$$

例4-72 有一台直流发电机, 已知电枢电阻  $R_a = 0.05\Omega$ , 转速  $n = 1000\text{r/min}$ , 端电压  $U = 220\text{V}$  时电枢电流  $I_a = 100\text{A}$ , 现想把此台发电机作为电动机使用, 并保持端电压  $U$  和电枢电流  $I_a$  不变, 问在这种情况下, 电机转速应该是多少 (不考虑电枢反应)。

设直流并励电动机的每极磁通为  $\Phi$  (Wb), 感应电动势为  $E$  (V), 则有

$$n = \frac{E}{c_e \Phi} = \frac{U - R_a I_a}{c_e \Phi}$$

由于改电动机运行时保持端电压不变, 所以励磁电流不变, 由于不考虑电枢反应, 所以每极磁通  $\Phi$  不变, 于是在发电机状态下运行时, 感应电动势  $E$  为

$$E = c_e \Phi n = c_e \Phi \times 1000 = U + R_a I_a$$

把  $c_e \Phi = \frac{U + R_a I_a}{1000}$  代入上面转速公式中得到,

$$n = \frac{U - R_a I_a}{U + R_a I_a} \times 1000 = \frac{220 - 0.05 \times 100}{220 + 0.05 \times 100} \times 1000$$

$$= 956 \text{r/min}$$

**例4-73** 发电机-电动机组如图4-27所示，直流电动机 M 拖动恒转矩负载运行，其端电压为 210V，电流为 100A，转速为 1000r/min，这时如果将发电机 G 的磁场磁通降到原来的 75% 时，试计算电动机的转速是多少。已知发电机和电动机内部电阻均为 0.1Ω，电动机励磁恒定，不考虑空载损耗和连接导线的损耗。

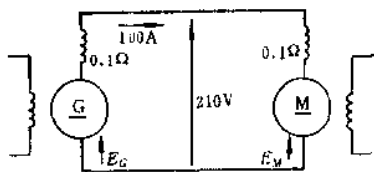


图4-27 发电机-电动机组

设端电压为 210V、电流为 100A 时，发电机的感应电动势为  $E_G$ ，电动机感应电动势为  $E_M$ ，则有

$$E_G = 210 + 0.1 \times 100 = 220 \text{V}$$

$$E_M = 210 - 0.1 \times 100 = 200 \text{V}$$

当发电机磁场磁通降到 75% 时，发电机感应电动势  $E'_G$  为

$$E'_G = 220 \times 0.75 = 165 \text{V}$$

由于负载转矩恒定，所以电动机磁通也恒定，电枢电流为 100A 也恒定，所以这时电动机的感应电动势  $E'_M$  为

$$E'_M = E'_G - (0.1 + 0.1) \times 100 = 145 \text{V}$$

由于电动机磁通恒定，所以转速与感应电动势成正比，电动机转速  $n$  为

$$n = \frac{145}{200} \times 1000 = 725 \text{r/min}$$

## 第五章 变压器的计算

### 第一节 基本概念

#### 一、变压器工作原理及结构特点

变压器是利用电磁感应原理进行电能变换的一种电磁转换装置。将交流电一次侧的电压或电流或信号通过电磁感应传递给二次侧，使二次侧的电压、电流或信号的数值与一次侧不同或相同，从而达到电能传递的目的，在传递时电源频率不变。由上述情况可看出，直流电源是不能利用变压器传递能量的，因为直流电源是恒定磁场，不能在绕组中感应出电动势，所以不能传递能量。

变压器广泛应用于生产、电力输送、电力分配和需用电能的各个用电系统中，另外还可做特殊电源用于电子线路方面。

常用的变压器有单相和三相之分。三相变压器在结构上有三相心式变压器和三相组式变压器，三相组式变压器是由三台独立的单相变压器所组成，所以各相磁路相互独立，而三相心式变压器的磁路不是独立的，各相磁通均以另外两相磁路做为自己的磁路而相互联系。由于三相磁路的路线长度不等，所以三相空载电流  $I_0$  不对称， $V_1$  相磁路短，所以  $V_1$  相的空载电流  $I_{0V1}$  要小些，一般情况下， $I_{0V1} = (0.67 \sim 0.83) I_{0N}$ ，因此试验空载电流时，要取三相空载电流的算术平均值，即

$$I_0 = \frac{1}{3} (I_{0U1} + I_{0V1} + I_{0W1})$$

式中  $I_{0U1}$ 、 $I_{0V1}$ 、 $I_{0W1}$ —— $U_1$ 、 $V_1$  相和  $W_1$  相的空载电流(A)。

变压器因无转动部分，其效率高于电机，也就是说变压器损耗较小，如果忽略变压器的损耗和空载电流，则变压器一次、二次侧的视在功率相等，或者说一次、二次侧的额定容量相等。

对于单相变压器则有

$$U_{N1} \cdot I_{N1} = U_{N2} \cdot I_{N2}$$

对于三相变压器则有

$$\sqrt{3} U_{N1} \cdot I_{N1} = \sqrt{3} U_{N2} I_{N2}$$

式中  $U_{N1}$ 、 $U_{N2}$ ——一次、二次额定电压 (V)；

$I_{N1}$ 、 $I_{N2}$ ——一次、二次额定电流 (A)。

但一次侧、二次侧功率是不一定相等的。

## 二、变压器铭牌数据

变压器接电源有输入功率的一侧，称为一次侧，接负载端有输出功率的一侧，称为二次侧。对于降压变压器，一次侧是高电压侧，二次侧是低电压侧；对于升压变压器，一次侧是低电压侧，而二次侧是高电压侧。笼统认为高压边就是一次侧，显然是不对的。

### 1. 额定容量 $P_N$

它是反映变压器在额定运行时（在额定电压、额定频率、额定负载、额定功率条件下）能够传递最大的电功率的能力。单相变压器  $P_N = U_N \cdot I_N$ ；三相变压器  $P_N = \sqrt{3} U_N \cdot I_N$ ，其中  $U_N$ 、 $I_N$  为额定线电压和额定线电流。

$P_N$  单位有：VA、kVA、MVA 等。

例5-1 有一台 10kVA 单相变压器，电压比为 380V/110V，要求  $I_0$  为  $I_N$  的 10.5%，问做空载试验时， $I_0$  不大于多少安为合格？

二次电流  $I_1$  为

$$I_1 = \frac{P_N \times 10^3}{380} = 26.3 \text{ A}$$

空载电流  $I_0$  为

$$I_0 = 10.5\% \times 26.3 = 2.76 \text{ A}$$

空载试验时  $I_0$  不大于 2.76A 为合格。

例5-2 一台三相变压器， $P_N = 1250 \text{ kVA}$ ， $U_{N1} = 10 \text{ kV}$ ， $U_{N2} = 0.4 \text{ kV}$ ，负载功率因数  $\cos\varphi = 0.8$ ，试求此台变压器的额定

电流  $I_{N1}$  和实际输出的电功率  $P_2$  是多少。

(1) 额定电流

$$I_{N1} = \frac{P_N}{\sqrt{3} U_{N1}} = \frac{1250}{\sqrt{3} \times 10} = 72.3 \text{ A}$$

(2) 输出功率  $P_2$

$$P_2 = \sqrt{3} U_{N1} I_{N1} \cos\varphi = \sqrt{3} \times 10 \times 72.3 \times 0.8 = 1002 \text{ kVA}$$

**例5-3** 有一台三相用电设备,其工作额定电压为 380V,电流为 1440A,负载功率因数  $\cos\varphi = 0.76$ ,问此台电气设备应选用多大容量的变压器合适? 这台用电设备工作时消耗的电功率是多少?

所需容量为

$$P = \sqrt{3} U_N I_N = \sqrt{3} \times 380 \times 1440 \times 10^{-3} = 947.8 \text{ kVA}$$

这台电气设备消耗的电功率  $P'$  为

$$P' = \sqrt{3} \times U_N I_N \cos\varphi = \sqrt{3} \times 380 \times 1440 \times 0.76 \times 10^{-3} = 720.3 \text{ kW}$$

用电设备耗用电功率为 700.3kW, 但选用变压器时要用视在功率, 即 947.8kVA (可选用 1000kVA 变压器), 说明负载的功率因数  $\cos\varphi$  越低, 则所需变压器的容量越大, 可见提高用电设备的功率因数对减少变压器容量是有很大意义的。

## 2. 额定电压 $U_N$

铭牌上标志的电压是额定电压, 对三相变压器是指线电压。当变压器一次侧施加额定电压、额定频率时, 二次侧各绕组开路, 测出的二次电压称为二次额定电压。

电压单位用 V、kV 表示。国内输电电压等级有: 500、330、220、110kV; 配电电压有 10、6、0.4kV。

额定电压比  $K$  是指一次绕组电动势  $E_1$  与二次绕组电动势  $E_2$  之比。如果忽略一次、二次绕组的漏阻抗压降后, 可以认为  $U_1 \sim E_1$ ,  $U_2 \sim E_2$ , 则有以下关系:

$$\frac{U_1}{U_2} \approx \frac{E_1}{E_2} = \frac{4.44f_1N_1\Phi_m}{4.44f_1N_2\Phi_m} = \frac{N_1}{N_2} = K$$

式中  $N_1$ 、 $N_2$ ——一次、二次绕组匝数；

$\Phi_m$ ——主磁通 (Wb)；

$f_1$ ——电源频率 (Hz)。

对于三相变压器一般要求相电压比值。

例5-4 一台100kVA三相变压器，额定电压  $U_{N1} = 6300V$ ， $U_{N2} = 400V$ ，联结组别为 YN，d11，试求电压比  $K$  是多少。

高压侧的相电压为

$$U_{1\phi} = \frac{U_{N1}}{\sqrt{3}} = \frac{6300}{\sqrt{3}} = 3637V$$

低压侧的相电压为

$$U_{2\phi} = U_{N2} = 400V$$

$$\therefore K = \frac{U_{1\phi}}{U_{2\phi}} = \frac{3637}{400} = 9.09$$

当变压器为空载时， $I_0$  很小，所以  $U_1 \approx E_1$ 、 $U_2 = E_2$ ，因此电动势之比等于电压之比，即电压比可写成  $K = \frac{E_1}{E_2} = \frac{U_1}{U_2}$ 。

当变压器为带载时，一次、二次侧有电流  $I_1$ 、 $I_2$ ，数值较大不能忽略，这时  $K = \frac{E_1}{E_2} \neq \frac{U_1}{U_2}$ ，因此变压器带满载时的电压

比，不能认为  $K = \frac{U_1}{U_2}$ ，只能近似认为  $\frac{U_1}{U_2} \approx \frac{N_1}{N_2}$ 。

根据磁动势平衡原理则有

$$N_1I_1 + N_2I_2 = N_2I_0$$

满载时， $I_0$  很小，相对于  $I_1$  和  $I_2$  可忽略，即上式写成  $N_1I_1 + N_2I_2 = 0$ ，于是有

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{N_2}{N_1} = \frac{1}{K}$$

这个公式叫变压器的电流比，可见变压器在空载时，上式电流比不能成立，因为这时  $I_0$  不能忽视，而电压比在满载时不能成立。



### 3. 额定电流 $I_N$

铭牌上标的电流值是变压器的额定电流值。当变压器运行时，线圈中流过的电流值达到变压器铭牌上所规定的电流值，则称为变压器在额定状态下运行，或称满载运行，如果超过额定电流，则称为变压器过载运行，变压器绕组会严重发热。三相变压器的额定电流均指线电流，单位用 A、kA 表示。

**例5-5** 一台 200kVA 对焊机用焊接变压器，已知  $U_1 = 220V$ ， $I_2 = 10700A$ ， $N_1 = 36$  匝， $N_2 = 1$  匝，试求  $I_1$  和  $U_2$  各是多少。

焊接变压器是单相变压器，一次电流为

$$I_1 = I_2 \frac{N_2}{N_1} = 10700 \times \frac{1}{36} = 297.2A$$

二次电压  $U_2$  为

$$U_2 = U_1 \frac{N_2}{N_1} = 220 \times \frac{1}{36} = 6.1V$$

**例5-6** 一台 100kVA 单相变压器，已知  $U_1 = 6kV$ ， $U_2 = 220V$ ， $N_2 = 100$  匝，试求  $I_1$ 、 $I_2$ 、 $N_1$  各多少。

一次侧匝数为

$$N_1 = N_2 \frac{U_1}{U_2} = 100 \times \frac{6 \times 10^3}{220} = 2727.3 \text{匝}$$

取整数 2727 匝。

一次电流为

$$I_1 = \frac{P_N}{U_1} = \frac{100}{6} = 16.7A$$

二次电流为

$$I_2 = \frac{P_N}{U_2} = \frac{100 \times 10^3}{220} = 455A$$

**例5-7** 有一台单相照明用变压器， $P_N = 20kVA$ ，电压比为 3300V/220V，二次侧接上 60W、220V 白炽灯，如使变压器在额定情况下运行，问此台变压器能接多少盏白炽灯，同时求出一次电流  $I_1$  和二次电流  $I_2$  各是多少。

一次电流为

$$I_1 = \frac{P_N \times 10^3}{U_1} = \frac{20 \times 10^3}{3300} = 6.06 \text{ A}$$

二次电流为

$$I_2 = \frac{P_N \times 10^3}{U_2} = \frac{20 \times 10^3}{220} = 90.9 \text{ A}$$

满载时能接白炽灯的盏数为

$$\frac{P_N \times 10^3}{60} = \frac{20 \times 10^3}{60} = 333 \text{ 盏}$$

例5-8 一台100kVA三相变压器，已知额定电压比为10kV/0.4kV，试求此台变压器一次、二次侧的额定电流各多少，带负载时的功率因数 $\cos\varphi = 0.75$ ，问变压器满载输出功率是多少。

一次额定电流为

$$I_{N1} = \frac{P_N}{\sqrt{3} U_{N1}} = \frac{100}{\sqrt{3} \times 10} = 5.8 \text{ A}$$

二次额定电流为

$$I_{N2} = \frac{P_N}{\sqrt{3} U_{N2}} = \frac{100}{\sqrt{3} \times 0.4} = 144.3 \text{ A}$$

额定输出功率为

$$\begin{aligned} P_2 &= \sqrt{3} U_{N1} \cdot I_{N1} \cos\varphi \\ &= \sqrt{3} \times 10 \times 5.8 \times 0.75 = 75 \text{ kW} \end{aligned}$$

或

$$\begin{aligned} P_2 &= \sqrt{3} U_{N2} I_{N2} \cos\varphi \\ &= \sqrt{3} \times 0.4 \times 144.3 \times 0.75 = 75 \text{ kW} \end{aligned}$$

### 6. 阻抗电压 $u_k\%$ 或短路阻抗百分数 $Z_k\%$

阻抗电压表示二次绕组在额定负载和 $\cos\varphi$ 下所出现的漏阻抗或电压降落。比如变压器铭牌上标出 $u_k\% = 5.5\%$ ，则指变压器输出额定电流时，阻抗电压降相对于额定电压的百分数。在正常运行时为了使变压器运行稳定，使电压随负载变动小些，这可使 $u_k\%$ 小些。如果为了限制变压器的短路电流，又希望 $u_k\%$ 大些。国家标准对此值有规定，因为此值还影响变压器的价格、效率和机械强度等，是变压器的重要参数。

阻抗电压的百分数( $u_k\%$ )也是短路阻抗的百分数( $Z_k\%$ )，

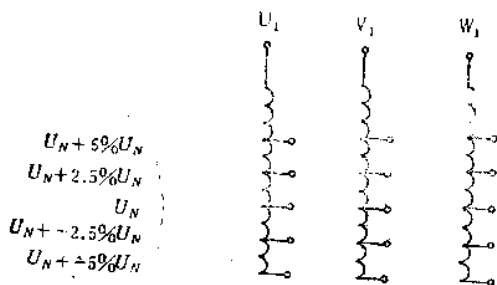


图5-1 变压器的分接头

由

$$Z_K \% = \frac{Z_K}{Z_N} \times 100 = \frac{Z_K}{U_N / I_N} \times 100$$

$$= \frac{I_N Z_K}{U_N} \times 100 = \frac{U_K}{U_N} \times 100 \% = u_K \%$$

采用百分数或标么值表示的目的是：

- (1) 缩小参数变化范围，便于比较；
- (2) 一次和二次侧的物理量不需折算；
- (3) 使计算方便。

### 7. 分接

分接系指变压器的分接开关的调压范围和级数，一般变压器一次绕组有许多抽头，称为分接头，靠分接开关进行调整电压。目前有无载分接开关和有载分接开关两种。

如 SF-20000/35 型电力变压器，一次额定电压为  $35 \pm 2 \times 2.5\%$ ，这表示绕组每相有 5 个抽头，如图 5-1 所示。

### 8. 损耗及空载电流

变压器在传递电能时，总会产生损耗，损耗包括空载损耗和负载损耗两种。

空载电流是用百分数表示的，国家标准中均有规定。

### 9. 绕组联结图及联结组标号

绕组联结图有双绕组、三绕组以及自耦变压器的绕组联结图。联结组标号有：Y, y<sub>n</sub>；YN, d<sub>11</sub>；Y, d；D, y 等。

### 1. 额定温升

变压器指定部位的温度和冷却介质的温度之差称为温升。冷却介质对于空冷变压器则是指周围空气；对于水冷却变压器是指冷却水入口的水温。

冷却方式 有干式自冷、干式风冷、干式水冷、油浸自冷、油浸风冷、强迫油循环风冷以及强迫油循环水冷等。

### 三、感应电动势计算

接到交流电源上的变压器，便有磁通产生，此磁通通过铁心磁路而闭合，并且切割一次、二次绕组，在一次、二次绕组中感应出感应电动势，此感应电动势的有效值为  $E_1$ 、 $E_2$ ，则有

$$E_1 = 4.44f_1 \cdot N_1 \Phi_m = 4.44f_1 N_1 B S_c$$

$$E_2 = 4.44f_1 \cdot N_2 \Phi_m = 4.44f_1 N_2 B S_c$$

式中  $E_1$ 、 $E_2$ ——一次、二次绕组感应电动势的有效值 (V)；

$f_1$ ——电源频率，我国为50Hz；

$N_1$ 、 $N_2$ ——一次、二次绕组匝数；

$\Phi_m$ ——主磁通最大值 (Wb)；

$S_c$ ——铁心柱截面积 ( $m^2$ )；

$B$ ——磁通密度 (T)。

除了切割一、二次绕组并仅在铁心中闭合的主磁通（或称工作磁通）外，还有一部分漏磁通，用  $\Phi_{1\sigma}$ 、 $\Phi_{2\sigma}$  表示一、二次绕组的漏磁通，漏磁通仅切割本身绕组产生感应电动势，不穿入另一绕组，所以漏磁通的磁路是空气和油（指油浸变压器）及本身铁心柱，一般漏磁通很小，占工作磁通的10%左右。

变压器二次侧接上负载，二次侧有电流  $I_2$  产生，产生相应的磁动势  $N_2 I_2$ ，二次侧漏磁通  $\Phi_{2\sigma}$  切割二次绕组产生二次感应电动势  $E_{2\sigma}$ ，它们的电动势可写成：

$$E_{1\sigma} = 4.44f_1 N_1 \Phi_{1\sigma}$$

$$E_{2\sigma} = 4.44f_1 N_1 \Phi_{2\sigma}$$

式中  $E_{1\sigma}$ 、 $E_{2\sigma}$ ——漏磁通在一次、二次侧产生的感应电动势 (V)；

$\Phi_{1\sigma}$ 、 $\Phi_{2\sigma}$ ——一次、二次侧的漏磁通 (Wb)。

如果忽略损耗和漏磁通, 则有

$$U_1 \approx E_1 = 4.44f_1 N_1 \Phi_m$$

$$U_2 \approx E_2 = 4.44f_1 N_2 \Phi_m$$

于是有  $\frac{U_1}{U_2} = \frac{N_1}{N_2}$ , 说明一次、二次电压比与其绕组匝数成正比 (只在空载时成立)。

**例5-9** 一台100kVA单相变压器, 已知  $f = 50\text{Hz}$ ,  $U_1 = 220\text{V}$ ,  $N_1 = 177$ 匝,  $N_2 = 50$ 匝, 求  $U_2$  和  $\Phi$  各多少。

二次电压  $U_2$  为

$$U_2 = U_1 \frac{N_2}{N_1} = 220 \frac{50}{177} = 62.1\text{V}$$

$$\Phi = \frac{U_1}{4.44N_1f} = \frac{220}{4.44 \times 177 \times 50} = 5.6 \times 10^{-3}\text{Wb}$$

**例5-10** 一台1kVA单相变压器, 一次电压  $U_1 = 220\text{V}$ , 二次电压  $U_2 = 127\text{V}$  和  $U_3 = 36\text{V}$ , 每匝电压  $e_r$  为  $1.2\text{V/匝}$ , 磁通密度  $B = 0.9\text{T}$ , 试求各绕组的匝数和铁心截面积。

一次绕组匝数为

$$N_1 = \frac{220}{e_r} = \frac{220}{1.2} = 183\text{匝}$$

二次绕组匝数为

$$N_2 = \frac{127}{e_r} = \frac{127}{1.2} = 106\text{匝}$$

$$N_3 = \frac{36}{e_r} = \frac{36}{1.2} = 30\text{匝}$$

铁心截面积为

$$S_e = \frac{U_1}{4.44f_1 B N_1} = \frac{220}{4.44 \times 50 \times 0.9 \times 184} \approx 0.00598\text{m}^2$$

**例5-11** 有一台单相变压器, 已知  $U_{N1} = 380\text{V}$ ,  $U_{N2} = 127\text{V}/36\text{V}/6.3\text{V}$ ,  $N_1 = 305$ 匝, 试求各绕组匝数  $N_2$ 、 $N_3$ 、 $N_4$ 。如果在  $36\text{V}$  电路中接入  $40\text{W}$ 、 $36\text{V}$  电灯两盏, 此时  $I_1$  和  $I_2$  各多少。

二次绕组匝数为

$$N_2 = 127 \times \frac{305}{380} = 102 \text{匝}$$

$$N_3 = 36 \times \frac{305}{380} = 29 \text{匝}$$

$$N_4 = 6.3 \times \frac{305}{380} = 5 \text{匝}$$

电流  $I_3$  和  $I_4$  为

$$I_3 = \frac{P_2}{U_3} = \frac{2 \times 40}{36} = 2.2 \text{A}$$

$$I_4 = N_3 \frac{I_3}{N_1} = 29 \times \frac{2.2}{305} = 0.21 \text{A}$$

**例5-12** 一台 2kVA 单相变压器，已知一、二次电压比  $U_1/U_2 = 220\text{V}/110\text{V}$ ， $50\text{Hz}$ ，又知磁通密度  $B = 1.1\text{T}$ ，铁心截面积  $S_e = 26\text{cm}^2$ ，如在  $N_2$  绕组接上  $200\Omega$  电阻  $R$ ，试求一、二次侧匝数  $N_1$  和  $N_2$  及一、二次电流  $I_1$ 、 $I_2$  各多少，用多少欧姆电阻接在二次绕组上能使变压器满载运行？

一次绕组匝数为

$$N_1 = \frac{U_1}{4.44 f_1 B S_e}$$

$$= \frac{220 \times 10^4}{4.44 \times 50 \times 1.1 \times 26} = 346 \text{匝}$$

二次绕组匝数为

$$N_2 = \frac{U_2}{U_1} N_1 = \frac{110}{220} \times 346 = 173 \text{匝}$$

二次电流为

$$I_2 = \frac{U_2}{R} = \frac{110}{200} = 0.55 \text{A}$$

一次电流为

$$I_1 = \frac{U_2}{U_1} I_2 = \frac{110}{220} \times 0.55 = 0.275 \text{A}$$

二次额定电流为

$$I_{N2} = \frac{P_N}{U_2} = \frac{2000}{110} = 18.2 \text{ A}$$

所需电阻为

$$R_2 = \frac{U_2}{I_{N2}} = \frac{110}{18.2} = 6.44 \Omega$$

## 第二节 变压器运行

### 一、变压器空载运行

变压器二次侧断开不接负载，让一次侧接上交流电压  $U_1$ ，于是一次绕组中有电流流过，这个电流称为空载电流  $I_0$ ，也称为励磁电流，同时产生交变励磁磁动势  $N_1 I_0$ ，并建立交变磁场，这个交变磁场在变压器铁心中通过，并且切割一、二次绕组的全部匝数  $N_1$ 、 $N_2$  而闭合，这个磁通就是工作磁通  $\Phi_m$ ，也称为主磁通，分别在一次、二次绕组中感应出感应的电动势  $E_1$ 、 $E_2$ 。

除主磁通之外，还有少部分磁通经过空气或变压器油，仅交链本身绕组的全部匝数，这个磁通称为漏磁通，用  $\Phi_l$  表示，一次侧漏磁通为  $\Phi_{l1}$ ，二次侧漏磁通为  $\Phi_{l2}$ ，他们切割本身绕组，相应可产生本身的感应电动势  $E_{l1}$  和  $E_{l2}$ 。

空载电流  $I_0$  可看成是由两部分组成，一部分电流分量供给铁心磁滞损耗、涡流损耗和电阻的消耗上，称为有功分量；剩下一部分电流分量供变压器励磁用，这部分电流称为无功分量或叫磁化电流。这部分电流对于变压器无论是空载运行还是负载运行，基本都是一样的。

漏磁通  $\Phi_l$  所经过的路径是非铁磁物质（空气或变压器油），所以磁导率  $\mu$  是常数，用漏电抗  $X_l$  表示漏磁通对电路的电磁效应，即

$$E_{l1} = X_l I_0$$

主磁通  $\Phi_m$  所经过的路线是铁磁材料（铁心内通过），所以磁导率  $\mu$  是变数，铁心越饱和， $\mu$  越小，因此用励磁电抗  $X_m$  表示主磁通对铁心材料磁化性能的程度，即

$$E_1 = X_m I_0 \quad \text{或} \quad X_m = E_1 / I_0$$

另外考虑铁耗的等效电阻  $r_m$ ，则变压器的励磁阻抗  $Z_m = r_m + jX_m$ 。设绕组的电阻为  $r_1$ ，则变压器空载时电动势平衡方程式用相量表示时，则有

$$\begin{aligned} \dot{U}_1 &= -\dot{E}_1 + I_0 r_1 - \dot{E}_{1\sigma} \\ &= I_0 (r_1 + jX_1) + I_0 Z_m = I_0 Z_1 + I_0 Z_m \\ \dot{E}_2 &= -I_0 Z_m \end{aligned}$$

等效电路图和相量图如图5-2和图5-3所示。

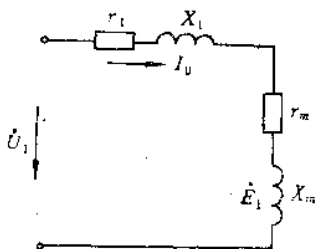


图5-2 等效电路图

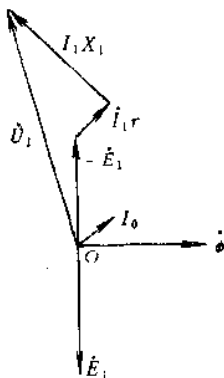


图5-3 相量图

**例5-13** 额定频率为50Hz的变压器接在相同电压的60Hz的电源上运行时，问变压器的铁损耗如何变化。

由上述知道变压器铁损耗包括磁滞损耗  $P_h$  和涡流损耗  $P_e$ ，它们的计算公式如下：

$$P_h = \sigma_h \frac{f}{100} B^2 m \quad (\text{W})$$

$$P_e = \sigma_e \left( \frac{f}{100} B \right)^2 m \quad (\text{W})$$

式中  $\sigma_h, \sigma_e$ ——与铁心材料有关的常数；

$f$ ——电源频率 (Hz)；

$B$ ——磁通密度 (T)；

$m$ ——铁心质量 (kg)。



用  $B = \frac{E}{4.44fNS_e}$  代入上式, 则得:

$$P_h = \sigma_h \frac{f}{100} \frac{E^2 m}{(4.44NS_e)^2}$$

$$P_c = \sigma_c \left( \frac{f}{100} \frac{E}{4.44NS_e} \right)^2 m$$

从上式看出,  $P_h$  与  $f$  成正比, 而  $P_c$  与  $f$  的平方成正比。所以50Hz的变压器使用在相同电压的60Hz电源上时, 磁滞损耗增高  $6/5 = 1.2$  倍, 而涡流损耗增高  $(6/5)^2 = 1.44$  倍。

如果60Hz的国外变压器使用在国内相同电压的50Hz电源上时, 磁滞损耗降低  $5/6 = 0.833$ , 涡流损耗降低  $(5/6)^2 = 0.69$ , 使变压器铁损耗降低。

**例5-14** 有一台单相变压器, 已知  $P_N = 80\text{kVA}$ ,  $U_{N1}/U_{N2} = 3.3\text{kV}/0.22\text{kV}$ , 50Hz, 试求:

- (1) 一、二次额定电流;
- (2) 40W 的白炽灯, 220V, 在满载情况下能接入多少盏;
- (3) 如果改用300W 的220V 白炽灯, 在满载情况下, 又可以接入多少盏;
- (4) 如果负载改为单相小型电动机, 其电压为220V, 功率为300W,  $\cos\varphi = 0.8$ , 问满载情况下, 又可以接入多少台。

(1) 一次额定电流  $I_{N1}$

$$I_{N1} = \frac{P_N}{U_{N1}} = \frac{80}{3.3} = 24.2\text{A}$$

(2) 二次额定电流  $I_{N2}$

$$I_{N2} = \frac{P_N}{U_{N2}} = \frac{80}{0.22} = 364\text{A}$$

(3) 设接入40W、220V 白炽灯时, 可以接入  $x$  盏, 则有

$$x = \frac{P_N \times 10^3}{40} = 2000 \text{ 盏}$$

(4) 设接入300W, 220V 的白炽灯时, 可以接入  $y$  盏, 则有

$$y = \frac{P_N \times 10^3}{300} = 266 \text{ 盏}$$

(5) 设接入300W, 220V单相小型电动机  $z$  台, 则有

$$z = \frac{P_N \times 10^3}{300} \cdot \cos\phi = \frac{80000 \times 0.8}{300} = 213 \text{ 台}$$

**例5-15** 有两台电压比为3000V/100V的单相变压器, 现将两台变压器高压侧串联(图5-4)在一起, 与5000V电源联接, 两台变压器的低压侧分别与5Ω和7Ω的电阻接上。已知高压侧的感应电动势分别为  $E_1$ 、 $E_2$ , 问  $E_1$ 、 $E_2$  大约是多少。

低压侧的电阻比为5 : 7, 把此关系换算到高压侧时不会改变。各电阻值与对应的高压侧的感应电动势应成比例分配。即

$$E_1 = 5000 \times \frac{5}{7+5} = 2083\text{V}$$

$$E_2 = 5000 \times \frac{7}{7+5} = 2917\text{V}$$

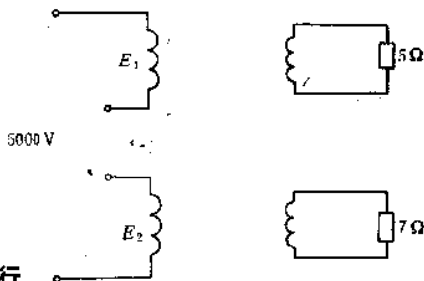


图5-4 两台变压器高压侧串联

## 二、变压器负载运行

### 1. 负载运行原理

变压器二次侧接上负载, 二次绕组有电流  $I_2$  流过, 其大小随负载大小而变化, 负载大, 电流也大。由于有二次电流  $I_2$  产生, 所以二次绕组产生交变磁动势  $I_2 N_2$ , 并建立交变磁场, 其中有一部分漏磁通  $\phi_{2\sigma}$  与二次绕组交链, 在二次绕组中产生感应电动势  $E_{2\sigma} = X_2 I_2$ , 这时, 主磁路上有两个磁动势, 即变压器一次绕组产生的磁动势  $F_1 = I_1 N_1$  和二次绕组产生的磁动势  $F_2 = I_2 N_2$ , 在工程上可以认为这两个磁动势的合成磁动势能够代替等于空载时磁动势  $I_0 N_1$ , 这是因为电源电压  $U_1$  不变, 由  $U_1 = 4.44 f N_1 \Phi$  知,  $f$  和  $N_1$  不变, 所以磁通  $\Phi$  不变, 按上述理由, 可写出变压器负载运行时的磁动势平衡方程式;

$\dot{F}_1 + \dot{F}_2 = \dot{F}_0$ ,  $\dot{I}_1 N_1 + \dot{I}_2 N_2 = \dot{I}_0 N_1$ , 在满载时, 因  $I_0$  很小, 如果忽略  $I_0$  时, 则有

$$I_1 N_1 = -I_2 N_2$$

或

$$\frac{-I_1}{I_2} = \frac{N_2}{N_1}$$

改变一下形式, 则有

$$\frac{I_1 U_1}{I_2 U_2} = \frac{N_1 N_2}{N_2 N_1} = 1$$

因此得到

$$U_1 I_1 = U_2 I_2$$

$U_1 I_1$  和  $U_2 I_2$  分别为一、二次侧的视在功率。

从  $\dot{I}_1 = \dot{I}_0 + (-N_2 \dot{I}_2 / N_1)$  看出:

(1) 一次绕组中电流  $\dot{I}_1$  是由两部分组成, 一部分电流维持建立主磁通的励磁电流  $\dot{I}_0$ ; 另一部分是为抵消二次绕组产生的磁动势所产生的负载分量, 即  $\Delta \dot{I}_1 = -\dot{I}_2 N_2 / N_1$ , 也就是说,  $\Delta \dot{I}_1 N_1$  抵消  $\dot{I}_2 N_2$ , 而维持  $\dot{I}_0 N_1$  不变。

(2) 还看出,  $I_2$  变化时, 会引起  $I_1$  变化。

(3) 由  $\dot{U}_2 = \dot{E}_2 - \dot{I}_2 Z_2 = \dot{E}_2 - \dot{I}_2 (r_2 + jX_2)$  可知, 当  $I_2$  变化时, 电阻压降  $\dot{I}_2 r_2$  和漏抗压降  $jX_2 \dot{I}_2$  也变化, 引起  $\dot{U}_2$  变化,  $\dot{U}_2$  与负载阻抗  $Z_L$  关系是  $\dot{U}_2 = \dot{I}_2 Z_L$ 。

## 2. 变压器的等效电路

变压器特点是一、二次绕组的能量传递是靠磁耦合传递的, 没有与电路的直接联系 (自耦变压器除外), 为了计算方便将磁路和电路系统全部用等效电路来计算, 但要做以下工作。

一般变压器一、二次绕组的匝数是不相等的, 或变压比  $K \neq 1$ , 所以一、二次电压、电流和阻抗值相差很大, 使计算困难, 而且很难计算精确, 所以有必要使一次、二次侧归算到同一水准上进行分析, 于是必须作绕组折算工作, 一般是把二次侧量归算到一次侧, 归算原则是二次侧归算后, 使能量关系不变。二次侧对一次侧的影响是二次磁动势  $\dot{F}_2 = \dot{I}_2 N_2$  中的  $\dot{F}_2$  不变, 折算结

果对一次侧无影响。因此，可把二次绕组的匝数假想为  $N_1$ ，电流为  $I'_2$ ，这时二次磁动势为  $F_2 = I_2 N_2 = I'_2 N_1$ 。

实际值与归算值的换算关系是：对电流量纲为  $\frac{1}{K}$ ，即  $I'_2 = \frac{I_2}{K}$ ；对电压量纲为  $K^2$ ，于是变压器归算后的基本方程式为

$$\dot{U}_1 = -\dot{E}_1 + \dot{I}_1 Z_1$$

$$\dot{U}'_2 = \dot{E}'_2 - \dot{I}'_2 Z'_2$$

$$\dot{U}'_2 = \dot{I}'_2 Z_j$$

$$\dot{E}_1 = \dot{E}'_2$$

$$\dot{E}_1 = -\dot{I}_0 Z_{1m}$$

$$\dot{I}_1 + \dot{I}'_2 = \dot{I}_0$$

这样归算后，把原来表示有磁概念的磁动势平衡方程式变成了电流平衡方程式。另外由于归算后的方程组有同位点，即  $\dot{E}_1 = \dot{E}'_2$ ，所以可以画出等效电路图，如图5-5所示。

由于  $I_0$  很小， $I_1 \gg I_0$ ，可忽略  $I_0$ ，这样上面等效电路可简

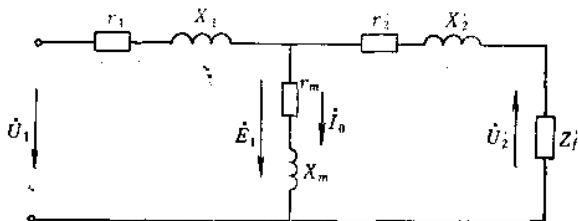


图5-5 变压器等效电路

化成图5-6所示的等效电路。

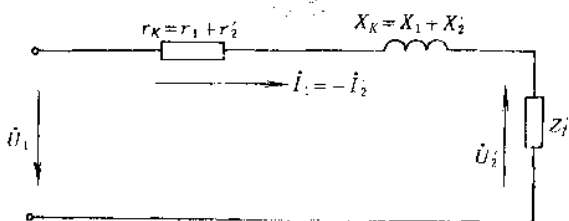


图5-6 变压器简化等效电路

以上电路图和基本方程式是表示一相的数值，如果是对称三相要考虑绕组联结方式和相、线之间的关系。

例5-16 已知一台单相变压器，电压比为3300V/660V，一次绕组电阻 $R_1 = 0.16\Omega$ ，二次绕组电阻 $R_2 = 0.058\Omega$ ，一次电抗 $X_1 = 0.25\Omega$ 、二次电抗 $X_2 = 0.02\Omega$ ，试求：（1）折算到二次侧的电阻 $R'_2$ 、二次侧的电抗 $X'_2$ 、二次侧的阻抗 $Z'_2$ ；（2）负载功率因数为0.8（滞后），电流为504A时二次侧额定时的电压调整率 $e$ 是多少。

（1）折算后的电阻、电抗和阻抗

$$R'_2 = R_2 + \left(\frac{N_2}{N_1}\right)^2 R_1 = 0.0058 + \left(\frac{U_2}{U_1}\right)^2 \times 0.16$$

$$= 0.0058 + \left(\frac{660}{3300}\right)^2 \times 0.16 = 0.0122\Omega$$

$$X'_2 = X_2 + \left(\frac{N_2}{N_1}\right)^2 X_1 = 0.02 + 0.04 \times 0.25 = 0.030\Omega$$

$$Z'_2 = \sqrt{(R'_2)^2 + (X'_2)^2} = \sqrt{0.0122^2 + 0.03^2}$$

$$= 0.0324\Omega$$

（2）电阻 $R'_2$ 和电抗 $X'_2$ 的标么值 $q'_r$ 、 $q'_x$

$$q'_r = \frac{R'_2 I_2}{U_2} \times 100 = \frac{0.0122 \times 504}{660} \times 100$$

$$= 0.93$$

$$q'_x = \frac{X'_2 I_2}{U_2} \times 100 = \frac{0.030 \times 504}{660} \times 100$$

$$= 2.3$$

电压百分比为

$$U'_2 = U_2 - q'_r \cos\varphi_2 - q'_x \sin\varphi_2$$

$$= 100 - 0.93 \times 0.8 - 2.3 \times 0.6$$

$$= 97.9\%$$

电压调整率为

$$\varepsilon = (100 - 97.9)\% = 2.1\%$$

例5-17 一台单相变压器，已知  $U_{N1} = 3300\text{V}$ ， $N_1/N_2 = 25$ ，负载  $R_2 = 2\Omega$ ， $X_2 = 2\Omega$ ， $R_1 = 75\Omega$ ， $X_1 = 150\Omega$  ( $I_0$  忽略)，试求：

- (1) 二次电流  $I_2$ ；
- (2) 二次端电压  $U_2$ ；
- (3) 一次电流  $I_1$ ；
- (4) 功率因数  $\cos\varphi$ 。

$$R_2' = R_2 \left( \frac{25}{1} \right)^2 = 2 \times 25^2 = 1250\Omega$$

$$X_2' = X_2 \left( \frac{25}{1} \right)^2 = 2 \times 25^2 = 1250\Omega$$

$$I_2' = \frac{U}{\sqrt{R_2'^2 + X_2'^2}} = \frac{3300}{\sqrt{(1250 + 75)^2 + (1250 + 150)^2}}$$

$$= 1.7\text{A}$$

$$I_2 = I_2' K = 1.7 \times 25 = 43\text{A}$$

$$U_2 = I_2 Z_2 = I_2 \sqrt{R_2^2 + X_2^2} = 43 \times \sqrt{2^2 + 2^2}$$

$$= 122\text{V}$$

$$I_1 = I_2' = 1.7\text{A}$$

$$\cos\varphi_1 = \frac{R}{Z} = \frac{R_1 + R_2'}{\sqrt{(R_1 + R_2')^2 + (X_1 + X_2')^2}}$$

$$= \frac{75 + 1250}{\sqrt{(75 + 1250)^2 + (150 + 1250)^2}} = 0.69$$

例5-18 一台200kVA单相变压器，电压比为  $U_{N1}/U_{N2} = 6\text{kV}/0.4\text{kV}$ ，50Hz，接入负载运行，已知负载阻抗  $Z = 0.54 + j0.36\Omega$ ，电压为380V，试求：

- (1) 一、二次额定电流各是多少；
- (2) 变压器输出功率是多少；

(3) 已知变压器效率  $\eta = 96.2\%$ ，问变压器输出和输入功率各是多少千瓦。

(1) 一次额定电流

$$I_{N1} = \frac{P_N}{U_{N1}} = \frac{200}{6} = 33.3 \text{ A}$$

(2) 二次额定电流

$$I_{N2} = \frac{P_N}{U_{N2}} = \frac{200}{0.4} = 500 \text{ A}$$

(3) 负载功率因数角  $\varphi$

$$\varphi = \arctg \frac{X}{R} = \arctg \frac{0.36}{0.54} = 33.69^\circ$$

负载功率因数  $\cos \varphi$

$$\cos \varphi = \cos 33.69^\circ = 0.83$$

(4) 变压器输出功率  $P_2$

$$P_2 = U_2 I_{N2} \cos \varphi = 380 \times 500 \times 0.83 = 157.7 \text{ kW}$$

(5) 变压器输入功率  $P_1$

$$P_1 = \frac{P_2}{\eta} = \frac{157.7}{0.962} = 164 \text{ kW}$$

### 三、变压器运行特性计算

变压器运行特性主要有两个：一是电压调整率或叫电压变化率；另一个是变压器的效率。

#### 1. 电压调整率

电压调整率表明电网电压的稳定性，反映出电源质量，是变压器重要性能指标之一。

电压调整率是指变压器带负载运行时，二次空载电压与二次额定电压之差对二次额定电压的比值，即

$$e = \frac{U_{20} - U_{N2}}{U_{N2}} \times 100\%$$

对于双线圈变压器在额定运行时，电压调整率  $e$  为

$$e = \left[ q_r \cos \varphi_2 + q_x \sin \varphi_2 + \frac{1}{200} (q_x \cos \varphi_2 - q_r \sin \varphi_2)^2 \right] 100\%$$

当阻抗电压很小，在4%以下时，上式可简化成：

$$e = [q_r \cos \varphi_2 + q_x \sin \varphi_2] 100\%$$

式中  $q_r$  ——电阻标么值；  
 $q_x$  ——电抗标么值；  
 $\cos\varphi_2$  ——负载功率因数；  
 $U_{N2}$  ——二次额定电压(V)；  
 $U_{20}$  ——二次空载电压(V)。

可见电压调整率  $\varepsilon$  与负载功率因数、电阻标么值和电抗标么值有关。对于感性负载， $\varepsilon > 0$ ，表明二次电流  $I_2$  增加时，二次电压降低；对于容性负载， $\varepsilon < 0$ ，表明二次电流  $I_2$  增加时，二次电压也增加。

阻抗压在20%以上时，精确计算公式如下：

$$\varepsilon = \frac{2A + (A^2 + B^2)}{1 + \sqrt{(1+A)^2 + B^2}} \times 100\%$$

式中  $A = (q_r \cos\varphi_2 + q_x \sin\varphi_2) \times 100\%$ ，  
 $B = (q_x \cos\varphi_2 - q_r \sin\varphi_2) \times 100\%$ 。

## 2. 变压器效率

变压器在能量传递过程中，要产生损耗，主要是铜耗和铁耗，它们都包括基本损耗和附加损耗两部分。基本铜耗是导体中电阻损耗 ( $I^2R$ )，附加铜耗是由于集肤效应使导线中电流分布不均，使电阻增加。中小型变压器附加铜耗较小，工程计算时可忽略。

基本铁耗主要是磁滞损耗和涡流损耗，附加铁耗主要是结构中涡流以及因磁密分布造成的损耗，在工程中也不计算。

变压器的效率  $\eta$  是输出功率  $P_2$  与输入功率  $P_1$  之比并以百分数表示，即  $\eta = \frac{P_2}{P_1} \times 100\%$ 。

输入功率为

$$P_1 = P_2 + \sum P = U_2 I_2 \cos\varphi_2 + (P_{Cu} + P_{Fe})$$

$$\therefore \eta = \frac{U_2 I_2 \cos\varphi_2}{U_2 I_2 \cos\varphi_2 + P_{Cu} + P_{Fe}} \times 100\%$$

式中  $P_2$  ——二次输出功率， $P_2 = U_2 I_2 \cos\varphi_2$  (kW)；



$P_{Cu}$ ——总铜耗,  $P_{Cu} = r I_1^2$  (kW);

$P_{Fe}$ ——总铁损耗(kW)。

在作变压器试验时, 在额定电压下, 空载损耗  $P_0$  近似等于  $P_{Fe}$ ; 作短路试验时, 铜耗  $P_{Cu}$  接近等于额定电流时的短路损耗  $P_K$ 。对于任一负载下的铜耗  $P_{Cu} = (I_2/I_{N2})^2 P_K = \beta^2 P_K$ ,  $\beta$  是负载系数, 于是变压器在任一负载下的效率公式为

$$\begin{aligned} \eta &= \frac{P_2}{P_1} \times 100\% = \frac{P_2}{P_2 + P_0 + \beta^2 P_K} \times 100\% \\ &= \left( 1 - \frac{P_0 + \beta^2 P_K}{P_2 + P_0 + \beta^2 P_K} \right) \times 100\% \\ &= \left( 1 - \frac{P_0 + \beta^2 P_K}{\beta U_2 I_2 \cos \varphi_2 + P_0 + \beta^2 P_K} \right) \times 100\% \end{aligned}$$

变压器运行时最大效率  $\eta_{max}$  的条件是:

$$r I_1^2 = P_{Fe} \quad (\text{总铜耗} = \text{总铁耗})$$

对应最大效率时的负载率  $\beta_m = 0.5 \sim 0.6$ 。

**例5-19** 有一台15kVA单相变压器, 电压比为6300V/210V, 50Hz, 已知阻抗电压为185V, 阻抗功率为250W, 此台变压器在输出为5kVA时, 带动负载的功率因数  $\cos \varphi_2 = 0.8$  (滞后), 试计算此时变压器的电压调整率  $\varepsilon$  是多少。

设变压器在额定负载15kVA时的电抗百分比、电阻百分比、阻抗百分比分别为  $q_x$ 、 $q_r$ 、 $Z$ , 则有

$$Z = \frac{185}{6300} \times 100\% = 2.94\%$$

$$\begin{aligned} q_r &= \frac{(r_1 + K^2 r_2) I_{N1}}{U_{N1}} \times 100\% = \frac{W_s}{U_{N1} I_{N1}} \times 100\% \\ &= \frac{250}{15 \times 10^3} \times 100\% = 1.67\% \end{aligned}$$

$$q_x = \sqrt{Z^2 - q_r^2} = 2.42\%$$

式中  $U_{N1}$ 、 $I_{N1}$ ——变压器一次额定电压和额定电流;

$W_s$ ——阻抗功率;

$K$ ——匝数比,  $K = N_1/N_2$ 。

当变压器输出5kVA时,电阻百分比为 $q_r$ 、电抗百分比为 $q_x$ ,则有

$$q_r' = \frac{5}{15} q_r, \quad q_x' = \frac{5}{15} q_x$$

所以这时电压调整率 $\varepsilon$ 为

$$\begin{aligned} \varepsilon &= \frac{5}{15} (q_r \cos \varphi_2 + q_x \sin \varphi_2) \\ &= \frac{1}{3} (1.69 \times 0.8 + 2.42 \times \sqrt{1 - 0.8^2}) = 0.93\% \end{aligned}$$

例5-20 有一台变压器在额定负载下运行,电源频率为50Hz,负载功率因数 $\cos \varphi_2 = 0.8$ (滞后),电压调整率为10%,如果把这台变压器改换在60Hz电源上,电压和电流保持额定不变,试求:带 $\cos \varphi_2 = 0.8$ (滞后)负载运行时,电压调整率是多少。已知变压器运行在额定状态时,电抗百分比为电阻百分比的10倍。

$$\text{已知 } \varepsilon = q_r \cos \varphi_2 + q_x \sin \varphi_2 + \frac{1}{200} (q_x \cos \varphi_2 - q_r \sin \varphi_2)^2,$$

依题意知 $q_x = 10q_r$ ,  $\cos \varphi_2 = 0.8$ , 则有

因 $\sin \varphi_2 = \sqrt{1 - \cos^2 \varphi_2} = 0.6$ ,  $\varepsilon = 10$ , 代入上式,经整理,得到:

$$0.274q_r^2 + 6.8q_r - 10 = 0$$

$$q_r = \frac{-3.4 \pm \sqrt{3.4^2 + 0.274 \times 10}}{0.274}$$

由于 $\varepsilon > 0$ , 所以采取正号, 则有

$$q_r = \frac{10}{\sqrt{14.3} + 3.4} = \frac{10}{7.18} = 1.393$$

换到60Hz电源后,电抗百分比增到 $\frac{60}{50}$ 倍,因此电压调整率

为

$$\begin{aligned} \varepsilon' &= q_r (\cos\varphi_2 + 12\sin\varphi_2) + \frac{q_r^2}{200} (\cos\varphi_2 - 12\sin\varphi_2)^2 \\ &= 1.393(0.8 + 12 \times 0.6) + \frac{1.393^2}{200} (0.8 - 12 \times 0.6)^2 \\ &= 11.54\% \end{aligned}$$

**例5-21** 有一台额定功率为  $P$  (kW) 的变压器, 功率因数为  $\cos\varphi$ , 铁耗为  $P_{Fe}$  (kW)、铜耗为  $P_{Cu}$  (kW), 当负载为额定功率的  $m$  倍时, 求此时变压器的效率是多少, 最大效率又是多少。

(1) 当负载为额定功率的  $m$  倍时, 输出功率变为

$$mP\cos\varphi \quad (\text{kW})$$

(2) 这时铜耗变为  $m^2P_{Cu}$ ,  $m$  倍负载时的效率  $\eta$  为

$$\eta = \frac{mP\cos\varphi}{mP\cos\varphi + P_{Fe} + m^2P_{Cu}} \times 100\%$$

下面求最大效率  $\eta_{\max}$ , 首先将上式分子、分母消去  $m$ , 得:

$$\eta = \frac{P\cos\varphi}{P\cos\varphi + P_{Fe}/m + mP_{Cu}} \times 100\%$$

对分母取微分, 并使等于零, 则有

$$\frac{d}{dm} \left( P\cos\varphi + \frac{P_{Fe}}{m} + mP_{Cu} \right) = 0$$

$$\therefore -\frac{P_{Fe}}{m^2} + P_{Cu} = 0 \quad \therefore P_{Fe} = m^2P_{Cu}$$

即  $m = \sqrt{P_{Fe}/P_{Cu}}$ , 将此式代入上式中, 则得到最大效率  $\eta_{\max}$  为

$$\eta_{\max} = \frac{\sqrt{P_{Fe}/P_{Cu}} P\cos\varphi}{\sqrt{P_{Fe}/P_{Cu}} \cdot P\cos\varphi + 2P_{Fe}} \times 100\%$$

**例5-22** 已知一台变压器带动 60% 负载时,  $\cos\varphi = 0.8$ , 最大效率为 98%。求当此台变压器带动  $\cos\varphi = 1$  满负载运行时的效率和电压调整率是多少。

设变压器二次额定电压为  $U_2$ , 额定电流为  $I_2$ , 铁损耗为  $P_{Fe}$ , 额定铜耗为  $P_{Cu}$ 。最大效率时铜耗等于铁耗, 铜耗与负

铁率的平方成正比, 即  $(60\%)^2 P_{Cu} = P_{Fe}$

对于  $\cos\varphi = 0.8$ 、负载为60%时, 其最大效率  $\eta_m$  为

$$\eta_m = 98 = \frac{0.6U_2 I_2 \times 0.8}{0.6U_2 I_2 \times 0.8 + 2 \times 0.6^2 P_{Cu}} \times 100\%$$

$$\therefore \frac{P_{Cu}}{U_2 I_2} = \frac{2}{3} \times \frac{1}{49} = 0.0136$$

当  $\cos\varphi = 1$  时, 额定负载时的效率  $\eta$  为

$$\begin{aligned} \eta &= \frac{U_2 I_2}{U_2 I_2 + P_{Cu} + 0.6^2 P_{Cu}} \times 100\% \\ &= \frac{1}{1 + 1.36(P_{Cu}/U_2 I_2)} = \frac{100}{1.0186} = 98.2\% \end{aligned}$$

当  $\cos\varphi = 1$  时, 电压调整率  $\varepsilon$  为

$$\varepsilon = q_r + \frac{1}{200} q_x^2 \quad (\%)$$

由于电抗百分比非常小, 所以  $q_x^2/200$  可忽略, 此时为

$$\varepsilon = q_r = \frac{r I_2}{U_2} \times 100\% = \frac{P_{Cu}}{U_2 I_2} \times 100\% = 1.36\%$$

例5-23 有一台100kVA变压器, 已知  $P_{Fe} = 900\text{W}$ , 满载时  $P_{Cu} = 1.2\text{kW}$ , 此台变压器在一日之内, 空载运行10h;  $\cos\varphi = 100\%$  时, 半载运行6h;  $\cos\varphi = 0.85$  时, 满载运行8h, 问全日此台变压器效率是多少?

设额定输出功率为  $P(\text{kVA})$ , 功率因数为  $\cos\varphi$ , 空载时间为  $t(\text{h})$ , 一日之内输出电量为

$$P_2 = \left(\frac{1}{2} \times 100\right) \times 1 \times 6 + 100 \times 0.85 \times 8 = 980\text{kW}\cdot\text{h}$$

一日之内消耗的电量  $P_1$  为

$$\begin{aligned} P_1 &= 0.9 \times (10 + 6 + 8) + \left(\frac{1}{2}\right)^2 \times 1.2 \times 6 + 1.2 \times 8 \\ &= 33\text{kW}\cdot\text{h} \end{aligned}$$

输入总电量  $P_1 = P_2 + P_1 = 980 + 33 = 1013\text{kW}\cdot\text{h}$

变压器全日效率  $\eta_d$  为

$$\eta_2 = \frac{P_2}{P_1} \times 100\% = \frac{980}{1013} \times 100\% = 96.7\%$$

例5-24 有一台变压器，已知电阻百分比为2%，电抗百分比为3%，当负载功率因数 $\cos\varphi = 0.8$ 时，问电压调整率是多少，最大电压调整率和此时的功率因数又是多少。

由于电抗百分比在4%以下，所以可采用近似公式计算电压调整率 $\varepsilon$ ，即

$$\varepsilon = q_r \cos\varphi + q_x \sin\varphi$$

将题中给定的条件代入得：

$$\varepsilon = 2 \times 0.8 + 3 \times 0.6 = 3.4\% \quad (\text{滞后})$$

$$\varepsilon = 2 \times 0.8 - 3 \times 0.6 = -0.2\% \quad (\text{超前})$$

将上面公式的形式改为

$$\varepsilon = \sqrt{q_r^2 + q_x^2} \cos(\varphi - \alpha)$$

$$\cos\alpha = \frac{q_r}{\sqrt{q_r^2 + q_x^2}}$$

当 $\varphi = \alpha$ 时，得最大值为

最大电压调整率为

$$\varepsilon_m = \sqrt{\left(\frac{2}{100}\right)^2 + \left(\frac{3}{100}\right)^2} = 3.61\%$$

此时功率因数 $\cos\varphi$ 为

$$\cos\varphi = \cos\alpha = \frac{2}{\sqrt{2^2 + 3^2}} = 0.554$$

例5-25 有一台变压器使用在50Hz电源上，带动75%额定负载运行（功率因数滞后），这时电压调整率为5%，在相同条件的负载下，变压器又改在60Hz电源上运行，问这时电压调整率是多少，已知在额定时电抗百分比等于电阻百分比的10倍。

可采用近似公式计算，即 $\varepsilon = q_r \cos\varphi + q_x \sin\varphi$ ，因 $\sin\varphi = \sqrt{1 - \cos^2\varphi} = \sqrt{1 - 0.75^2} = 0.661$ ，则有

$$5 = 0.75q_r + 0.661 \times 10q_r = 7.36q_r$$

$$q_r = \frac{5}{7.36} = 0.68$$

从50Hz改到60Hz电源上运行时,电抗百分比增 $\frac{60}{50}$ 倍,所以这时 $e'$ 为

$$e' = 0.68 \times 0.75 + 0.68 \times 10 \times \frac{60}{50} \times 0.661 = 5.9\%$$

**例5-26** 有一台50kVA单相变压器,50Hz,电压比为6.3kV/210V,  $\cos\varphi = 0.8$  (滞后),空载损耗为0.65%,电阻百分比为4%,试求这台变压器满负载时的效率是多大。

用 $U_N$ 、 $I_N$ 、 $\cos\varphi_N$ 表示变压器的额定电压,额定电流、额定功率因数,则有

额定输出功率为

$$P_N = U_N I_N \cos\varphi_N$$

空载损耗为

$$P_0 = P_N \times (0.65/100)$$

电阻损耗为

$$I_N^2 R = \left( \frac{I_N R}{U_N} \right) U_N I_N = \frac{q_r}{100} \frac{P_N}{\cos\varphi_N}$$

在满负载时变压器效率 $\eta$ 为

$$\begin{aligned} \eta &= \frac{P_N}{P_N + P_0 + I_N^2 R} \times 100\% \\ &= \frac{1}{1 + 0.65/100 + 1.4/(100 \times 0.8)} \times 100\% \\ &= 97.7\% \end{aligned}$$

**例5-27** 有一台配电变压器,输出功率为2kW和8kW时,功率因数 $\cos\varphi$ 均为100%,并且效率均是96%,试求:

- (1) 输出功率是8kW时,铁耗 $P_{Fe}$ 和铜耗 $P_{Cu}$ 各是多少;
- (2) 输出功率为多少时变压器效率最高;
- (3) 最高效率值是多少。

设铁损耗为 $P_{Fe}$ (W),输出功率为8kW时的铜耗为 $P_{Cu}$ (W),铜耗与输出负载率平方成正比,则输出功率为2kW时,铜耗为原铜耗的1/16,即

$$\left(\frac{2}{8}\right)^2 P_{Cu} = P_{Cu}/16 \quad (\text{W})$$

依题意则有

$$0.96 = \frac{2 \times 10^3}{2 \times 10^3 + P_{Cu}/16 + P_{Fe}}$$

输出功率为8kW时

$$0.96 = \frac{8 \times 10^3}{8 \times 10^3 + P_{Cu} + P_{Fe}}$$

从上面两公式求出:

$$P_{Cu} = 1600/6 = 267 \text{ W}$$

$$P_{Fe} = 200/3 = 66.7 \text{ W}$$

(2) 最高效率时输出功率为  $P$ , 则有

$$267 \times \left(\frac{P}{8}\right)^2 = 66.7$$

$$P = 4 \text{ kW}$$

(3) 最高效率值  $\eta_{\max}$

$$\begin{aligned} \eta_{\max} &= \frac{4 \times 10^3}{4 \times 10^3 + 2 \times 200/3} \times 100\% \\ &= \frac{12}{124} \times 100\% = 96.8\% \end{aligned}$$

#### 四、变压器能量流程图

变电器从电网吸收电能, 则输入的有功功率  $P_1 = U_1 I_1 \cos \varphi_1$ , 通过一次绕组产生电阻铜损耗  $P_{Cu} = I_1^2 r_1$ , 变成磁场能量  $P_w = P_1 - I_1^2 r_1 = E_1 I_1 \cos \varphi_1$ , 磁场能量  $P_w$  有一部分消耗在铁心上, 产生铁损耗  $P_{Fe}$ , 剩下的能量通过电磁感应传给二次绕组, 这个传递的功率叫电磁功率  $P_M$ , 即

$$P_w = P_M + P_{Fe} = E_2 I_2 \cos \varphi_2 + E_1 I_{000}$$

其中

$$P_M = E_2 I_2 \cos \varphi_2$$

$$P_{Fe} = E_1 I_{000}$$

式中  $I_{000}$ ——空载电流的有功分量(A);

$E_1, E_2$ ——一、二次侧感应电动势(V);

$\cos\varphi_1, \cos\varphi_2$ ——、二次侧的功率因数。

传给二次绕组的电磁功率有一部分消耗在二次绕组电阻上 ( $I_2^2 r_2$ )，剩下的部分才是输出的有功功率  $P_2$ ，即

$$P_M = P_2 + I_2^2 r_2$$

$$P_2 = U_2 I_2 \cos\varphi_2$$

图5-7 表示变压器负载运行的能量传递图。 $P_2$  与  $P_1$  比值叫

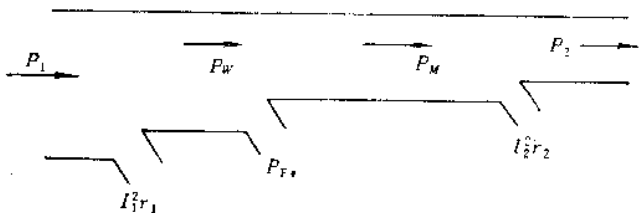


图5-7 变压器能量流程图

变压器效率  $\eta$ ， $\eta = \frac{P_2}{P_1} \times 100\%$ ，效率随负载电流  $I_2$  的变化规律，叫变压器的效率特性，即  $\eta = f(I_2)$  或  $\eta = f(\beta)$ 。

### 第三节 变压器联结组别及并联运行计算

#### 一、绕组的标记及极性

##### 1. 绕组的标记

三相变压器高压绕组首端常用  $U_1, V_1, W_1$  标记，末端用  $U_2, V_2, W_2$  标记，低压绕组首端常用  $u_1, v_1, w_1$  标记，末端用  $u_2, v_2, w_2$  标记，中压绕组首端常用  $U_{m1}, V_{m1}, W_{m1}$  标记，末端用  $U_{m2}, V_{m2}, W_{m2}$  标记。低压绕组中性点用  $n$  表示，高压绕组中性点用  $N$  表示，中压绕组中性点用  $N_m$  表示。

单相变压器高压绕组用  $U_1 U_2$  标记，低压用  $u_1 u_2$  标记。

##### 2. 绕组的左绕和右绕

从绕组顶端看入，如果绕制方向是反时针方向为左绕；反之，绕制方向是顺时针方向为右绕，图5-8a为左绕，图b为右绕。

##### 3. 绕组的极性



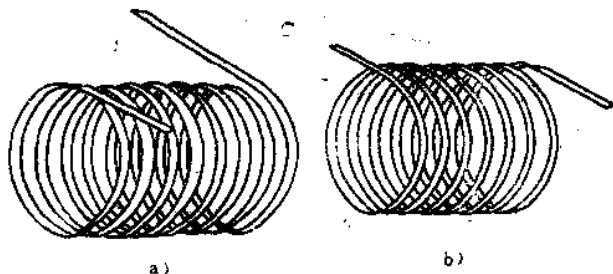


图5-8 绕组的绕向

a) 左绕 b) 右绕

图5-9是单相变压器绕组绕制图，图a中高压和低压绕组都是左绕，共同交链一个磁通 $\Phi$ ，此脉动磁通 $\Phi$ 分别在两个绕组中感应出电动势 $E_{U_1U_2}$ 、 $E_{u_1u_2}$ ，这两个电势的方向取决于绕组的绕向和绕组端头的标志。图5-9a中两个绕组都是左绕，端头 $U_1$ 和 $u_1$ 都是正，称为同极性端头。

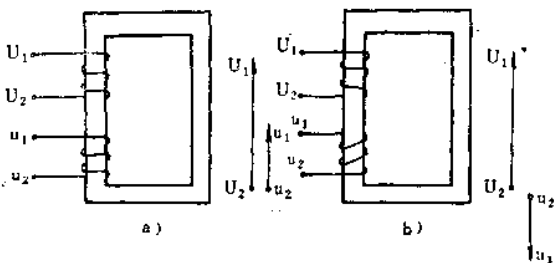


图5-9 单相变压器绕组绕制图

a) 绕线方向相同的同极性端头标志 b) 绕线方向相反的同极性端头标志

图5-9b中两绕组绕向不同，高压绕组仍是左绕，而低压绕组为右绕，为了磁通方向 $\Phi$ 不变，要符合右手螺旋定则。

磁通 $\Phi$ 的方向应符合右手螺旋定则，但首末端标志是可以改变的，如图5-10a、b所示为减极性和加极性表示法。

从图5-10中可以更清楚看出：绕组的绕向要符合右手螺旋定

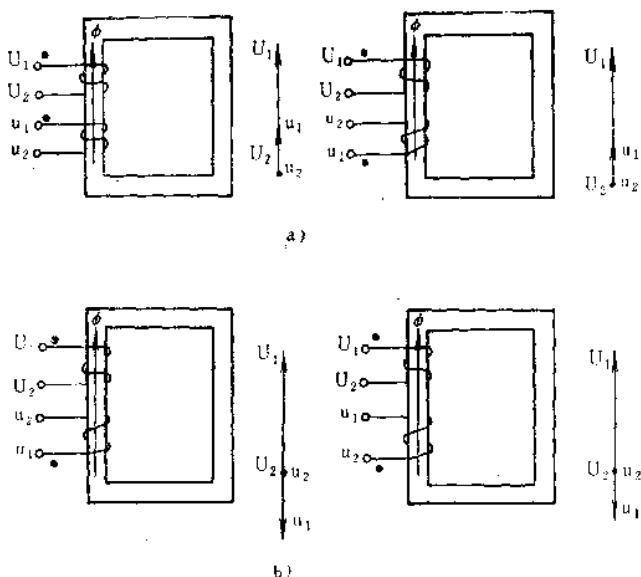


图5-10 减极性和加极性表示法

a) 同极性 (减极性) b) 异极性 (加极性)

则，保证铁心内  $\Phi$  方向一致，而电动势方向取决于绕组的绕向和首末端的标志。

由于绕组首末端头标志和极性（或绕向）不同，高低压绕组的相量之间相位差不同。通常是用时钟法表示，即高压绕组电动势（或线电压）相量指向12点位置，固定不动，低压绕组电动势（或线电压）相量指向时钟某一位置（短针）便构成变压器的联结组别，如图5-9a所示，为  $I/I-12$  联结组，高压电动势相量做为分针指向12点。而低压绕组电动势相量做为时针也指向12点位置，它们的相位差为零，由于时针指向12点，所以用  $I/I-12$  表示，也可用  $I/I-0$  表示。

图5-9b及图5-10b中，高压绕组电动势相量仍指向12点位置，

而低压绕组电动势相量却指向 6 点, 所以联结组为  $I/I-6$ , 其中  $I/I$  表示单相变压器的意思。

#### 4. 变压器极性测定法

图 5-11 是测量变压器极性接线图, 其测定方法如下:

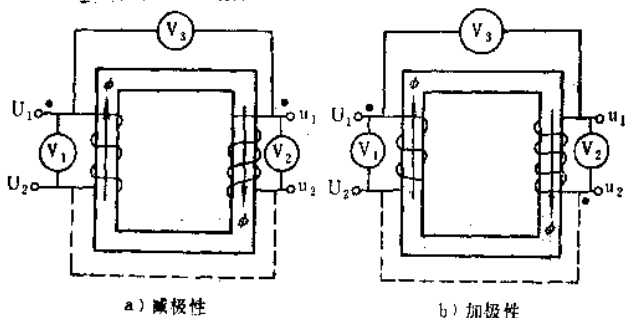


图 5-11 变压器极性测量

- (1) 将高低压绕组末端  $U_2$  和  $u_2$  短接, 如图 5-11 虚线所示。
- (2) 在高压绕组首末端  $U_1$ 、 $U_2$  之间, 低压绕组首末端  $u_1$ 、 $u_2$  之间以及高低压绕组首端  $U_1$ 、 $u_1$  之间装上电压表, 分别为  $V_1$ 、 $V_2$  和  $V_3$ 。
- (3) 在高压侧  $U_1$ 、 $U_2$  端加交流电压  $U$ , 这时读电压表读数分别为  $U_1$ 、 $U_2$ 、 $U_3$ 。
- (4) 如果电压表值符合  $U_3 = U_1 - U_2$ , 则表示两个电动势相位相同, 称为减极性, 因为  $U_1 - U_2$ , 所以叫减极性。  
如果  $U_3 = U_1 + U_2$ , 则表示两个电动势相位是相反的, 称为加极性。
- (5) 如果改变任一绕组的绕向或绕组端的标记, 就可以改变极性, 比如加极性可以改为减极性, 只要把符号“·”从首端改到末端, 或者将  $U_1$  改为  $U_2$  等, 但如果高低压绕组同时改符号“·”或绕组端标记, 则极性不变。

### 二、三相变压器绕组的联结

最常用的有两种联结方法: 星形联结和三角形联结。高压绕

组以字母 Y (星形联结) 和 D (三角形联结) 表示, 中压和低压绕组用 y (星形联结) 和 d (三角形联结) 表示, 高压中性点用 N 表示, 低压中性点用 n 表示。

**例5-28** 一台双绕组三相变压器, 高压和低压绕组都是星形联结, 低压绕组有中性点引出, 两绕组是同相位 (时钟序号为 0), 则联结组标号为 Y, yn0

**例5-29** 一台三绕组三相变压器, 高压绕组星形联结有中性点引出, 中压绕组也是星形联结, 也有中性点引出, 两个星形绕组电压是同相位 (时钟序号为 0), 而低压绕组是三角形联结, 其电压相量超前其他电压相量  $30^\circ$  (时钟序号 11), 则联结组标号为 YN, yn0, d11。

**例5-30** 一台双绕组单相变压器, 同相位, 则联结组标号为 I, I0。

**例5-31** 一台双绕组变压器, 高压绕组可以接成星形和三角形, 而低压绕组是三角形联结, 其电压相量比高压绕组相量超前  $30^\circ$  (时钟序号 11) 并与调压器连接, 则这台变压器联结组标号为 Y-D, d11-0。

国内常用五种联结组标号有

Y, yn0; Y, d11; YN, d11; YN, y0; Y, y0

### 1. 星形联结

将三相变压器每相绕组的末端或首端联结在一起构成中性点, 将剩下的三相绕组首端或末端接入电源, 便构成星形联结, 如图 5-12 所示。图 5-12<sup>o</sup> 是带有中性点引出的星形联结。相量图如图 5-13 所示, 因三相主磁通在相位上互差  $120^\circ$ , 所以三相电动势 (或电压) 之间夹角也互差  $120^\circ$ 。

线电压  $U_{U_1V_1}$  为相电压  $U_{U_1}$  或  $U_{V_1}$  的  $\sqrt{3}$  倍, 这个关系可用余弦定律很容易求出。

设相电压为 1, 则线电压应为  $\sqrt{3}$ 。

在  $U_1U_2V_1$  三角形中, 可写出,

$$U_{U_1V_1}^2 = U_{U_1}^2 + U_{V_1}^2 - 2U_{U_1}U_{V_1}\cos 120^\circ$$

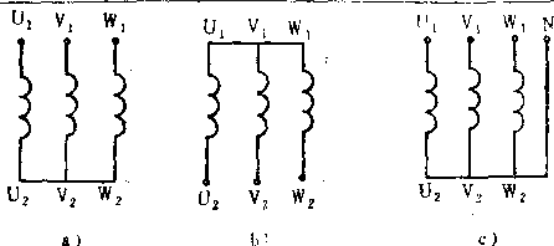


图5-12 星形联结

即 
$$U_{U_1V_1} = \sqrt{U_{U_1}^2 + U_{V_1}^2 - 2U_{U_1}U_{V_1}\cos 120^\circ}$$

$$= \sqrt{1^2 + 1^2 - 2 \times 1 \times 1 \times (-0.5)} = \sqrt{3}$$

### 2. 三角形联结

在国内标准联结中，三角形联结常用于低压绕组，联结顺序有两种，一种是按顺序联结（图5-14a），一种是按逆序联结（图5-14b）。顺序联结顺序是  $u_1v_2 - v_1w_2 - w_1u_2$ ，而逆序联结的顺序是  $u_2v_1 - v_2w_1 - w_2v_1$ 。

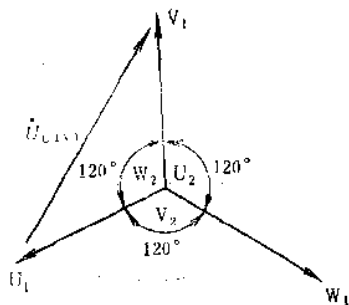


图5-13 星形联结测量图

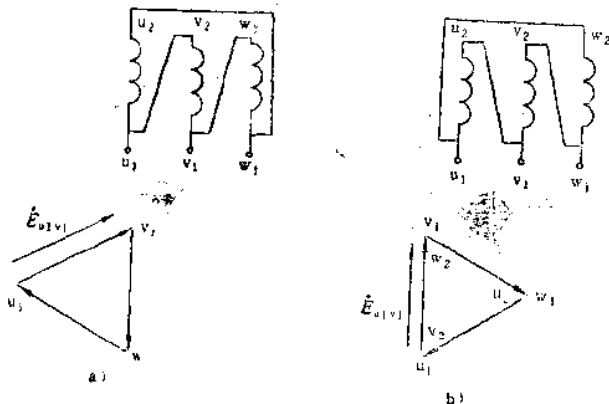


图5-14 三角形联结及和量图

图5-14a三角形联结中的  $E_{U_1V_1}$  比图5-13中星形联结中的相量  $\dot{U}_{U_1V_1}$  顺时针转了  $30^\circ$  角, 即滞后  $30^\circ$  角, 如果星形联结  $\dot{U}_{U_1V_1}$  相量指向12点, 则三角形联结的相量  $\dot{E}_{U_1V_1}$  将指向1点钟, 如果星形联结是高压侧, 三角形联结是低压侧, 则它们组成的联结组别应是Y, d<sub>1</sub>。

图5-14b三角形联结的  $\dot{E}_{U_1V_1}$  相量比图5-13星形联结中相量  $\dot{U}_{U_1V_1}$  越前  $30^\circ$ , 即指向11点, 所以它们组成的联结组别应是Y, d<sub>11</sub>。

除了正常的Y联结和D联结之外, 还有Z形联结和A形联结等。

### 三、三相变压器绕组的联结组别

三相变压器联结组别是指一次和二次绕组电动势相量之间相位差的关系, 这种相位差取决于三方面:

- (1) 绕组的绕向(左绕还是右绕)或符号“·”的标记位置。
- (2) 绕组出线端标记, 如  $U_1$ 、 $V_1$ 、 $W_1$ ;  $u_2$ 、 $v_2$ 、 $w_2$  等。
- (3) 三相绕组的联结方式, 如Y联结、D联结等。

我国电力变压器制造标准, 有下列三种联结组别:

(1) Y, y<sub>0</sub> 主要用在二次电压为400~230V的配电变压器中, y<sub>0</sub>表示二次侧中性点引到变压器箱壳外面接地。

(2) Y, d<sub>11</sub> 主要用于低压为400V, 高压为35kV及以下的输配电变压器中。

(3) YN, d<sub>11</sub> 用在110kV及220kV超高压系统中, 也可用在低压侧高于400V, 高压侧为35kV及其以下的输配电系统中。

图5-15a是Y, y<sub>0</sub>联结组, 图5-15b是Y, y<sub>6</sub>联结组。

图5-16a是Y, d<sub>11</sub>联结组, 图5-16b是Y, d<sub>1</sub>联结组。由于一、二次绕组的联结方式、极性和出线头标志不同, 使一、二次侧相对应的线电压之间相位关系不同, 为了表示低压绕组所感应的线电动势(或线电压)超前或滞后于高压绕组线电动势一定角度, 习惯采用时钟表示法, 即把高压线电动势的相量做为分针指到12点位置不动, 低压绕组相应相的线电压相量做为时针, 它指

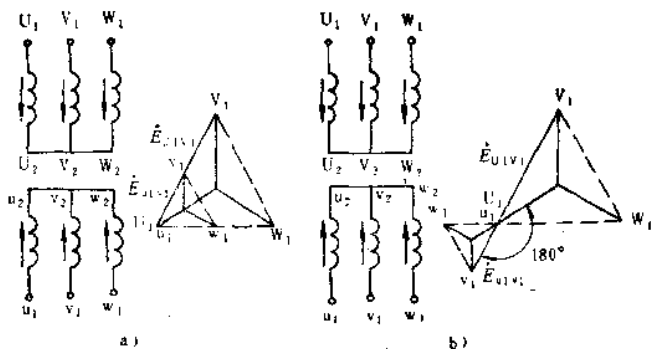


图5-15 Y, y联结组

a) Y, y0 b) Y, y6

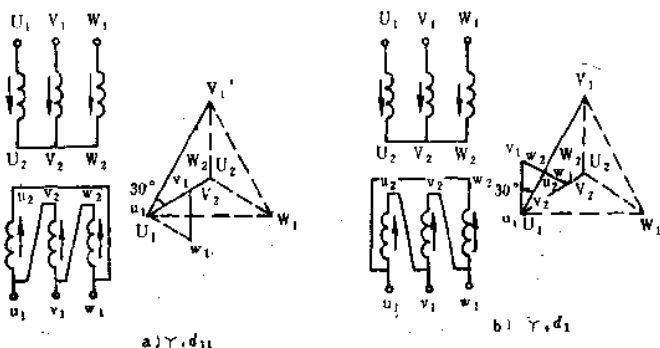


图5-16 Y, d联结组

a) Y, d11联结组 b) Y, d1联结组

在什么位置，与高压绕组线电动势相量（12点）之间的差别（相位差，为30°的倍数）即表示变压器联结组的组别。

判别组别方法（见图5-17）：

(1) 组别 Y, y0 首先画出高压和低压绕组电动势相量图，然后画出高、低压绕组线电压，如高压为  $\dot{E}_{U_1V_1}$ ，低压为  $\dot{E}_{u_1v_1}$ 。画相量图时要注意每相（每个铁心柱）中的高低压绕组电动势相

量方向是平行的（或者同方向；或者相反，差 $180^\circ$ ）。

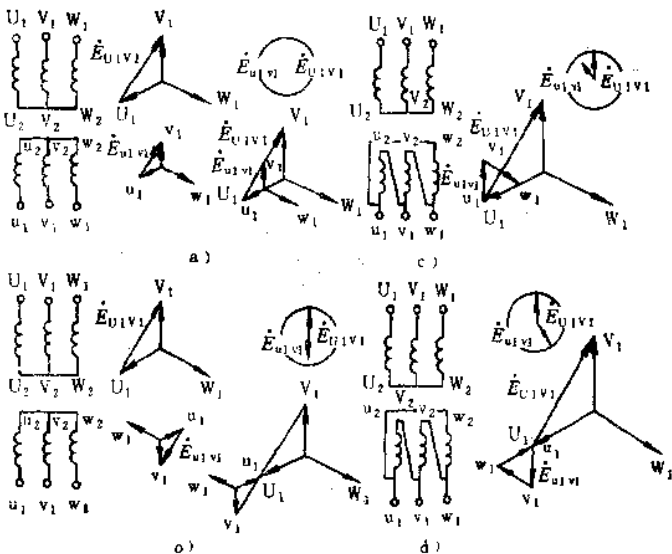


图5-17 Y, y和Y, d联结组及相量图

- a) Y, y0联结组和相量图
- b) Y, y6联结组和相量图
- c) Y, d11联结组和相量图
- d) Y, d5联结组和相量图

将 $U_1$ 点和 $u_1$ 点重合在一起，这时看 $\dot{E}_{U_1V_1}$ 和 $\dot{E}_{u_1v_1}$ 之间的夹角，便是联结组别。

图5-17a是Y, y0联结组，图b是Y, y6联结组，图c是Y, d11联结组，图d是Y, d5联结组。

例5-32 有一台变压器高低压绕组联结方式如图5-18a所示，试判别其联结组别。

首先画出高压绕组和低压绕组的相量图，然后将 $U_1$ 和 $u_1$ 点重合在一起，看出 $\dot{E}_{U_1V_1}$ 与 $\dot{E}_{u_1v_1}$ 之间夹角为 $90^\circ$ ， $\frac{90^\circ}{30} = 3$ ，说明这台变压器联结组别是Y, d3（见图5-18b）。



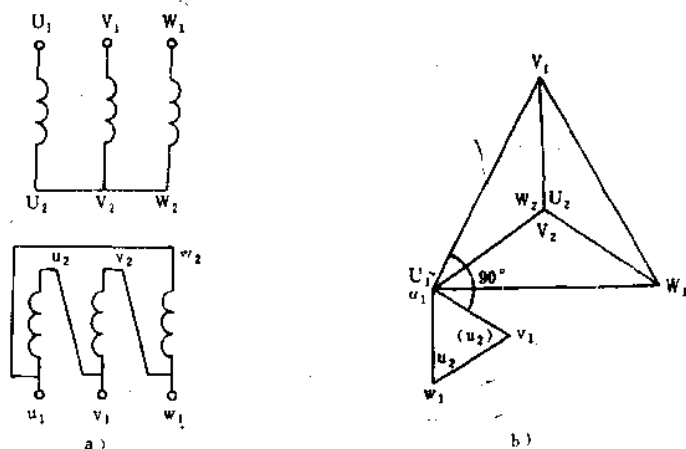


图5-18 Y, d3联结组

例5-33 一台变压器高低压绕组联结方式如图5-19所示，

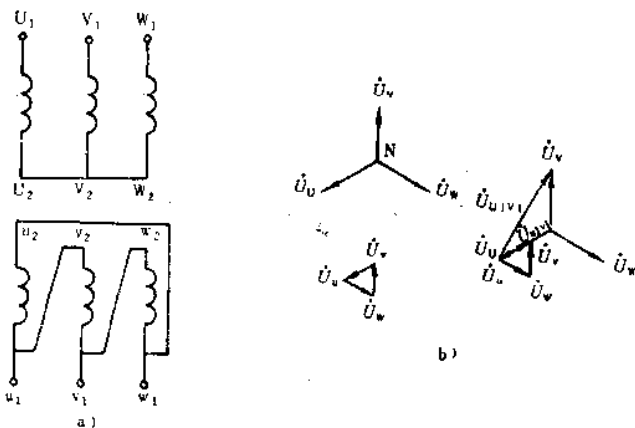


图5-19 Y, d1联结组

试判别这台变压器的联结组别？

(1) 画出高压边的星形联结相量和低压边三角形联结相量图。

(2) 然后将  $\dot{U}_{U_1}$  点和  $\dot{U}_{u_1}$  点重合在一起。

(3) 画出  $\dot{U}_{U_1V_1}$  和  $\dot{U}_{u_1v_1}$  两指针所夹的角度, 这里是  $30^\circ$ , 即  $\frac{30^\circ}{30} = 1$ , 则这台变压器联结组别为 Y, d<sub>1</sub>。

**例5-34** 试判别图 5-20a 变压器绕组的联结组别?

画出高低压绕组星形联结相量图, 然后将  $U_1$  和  $u_1$  点重合, 便可看出线电压  $\dot{U}_{U_1V_1}$  和  $\dot{U}_{u_1v_1}$  之间的夹角是  $120^\circ$ ,  $\frac{120^\circ}{30} = 4$  所以这台变压器联结组别是 Y, y<sub>4</sub>。

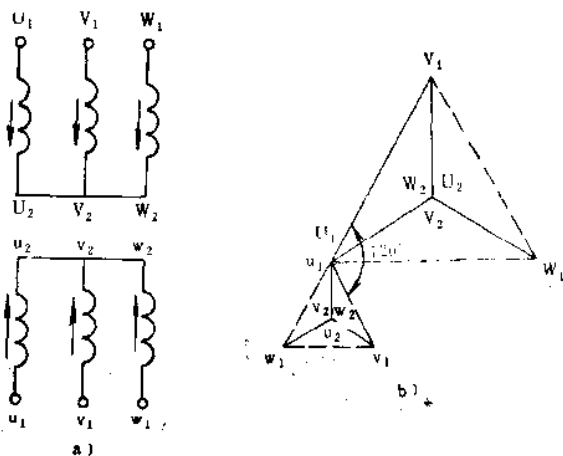


图5-20 Y, y<sub>4</sub>联结组

**例5-35** 一台变压器一、二次绕组均是星形联结, 但绕组出线端标记不同, 试判别其联结组别 (图5-21a)?

经过画相量图和  $U_1$ 、 $u_1$  点重合, 看出线电压  $\dot{U}_{U_1V_1}$  与  $\dot{U}_{u_1v_1}$  之间夹角为  $240^\circ$ , 所以  $\left(\frac{240}{30} = 8\right)$  这台变压器联结组别为 Y, y<sub>8</sub> (图5-21b)。

由于三相绕组感应电动势相位互差  $120^\circ$ , 在时钟上相差 4 个

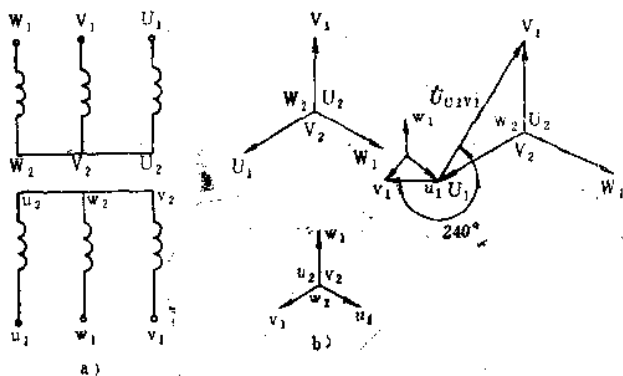


图5-21 判别联结组别

钟点，所以如果把图5-15a二次绕组相序从  $u_1$ 、 $v_1$ 、 $w_1$  顺序推移到  $v_1$ 、 $w_1$ 、 $u_1$  和  $w_1$ 、 $u_1$ 、 $v_1$  时，对于 Y, y0 连接组（或 Y, y12）相应得到：

$$Y, y_{12-4} = Y, y_8 \text{ (见图5-21)}$$

$$Y, y_{12-2 \times 4} = Y, y_4 \text{ (见图5-20)}$$

同理，如果把图5-15b中的二次绕组相序  $u_1$ 、 $v_1$ 、 $w_1$  顺序推移为  $v_1$ 、 $w_1$ 、 $u_1$  和  $w_1$ 、 $u_1$ 、 $v_1$ ，则 Y, y6 联结组相应变成：

$$Y, y_{6-4} = Y, y_2$$

$$Y, y_{6-4 \times 2} = Y, y_{(-2)} = Y, y_{10}$$

“-2”表示反向转动时针，所以得10。

由上面看出，Y, y 联结组可以得到 2、4、6、8、10、12 偶数的联结组别。

同理，对于 Y, d11 (图5-16a) 的  $u_1$ 、 $v_1$ 、 $w_1$  顺序推移为  $v_1$ 、 $w_1$ 、 $u_1$  和  $w_1$ 、 $u_1$ 、 $v_1$ ，则可得到：

$$Y, d_{11-4} = Y, d_7$$

$$Y, d_{11-2 \times 4} = Y, d_3 \text{ (见图5-18)}$$

另外，对于 Y, d5 的  $u_1$ 、 $v_1$ 、 $w_1$  顺序推移为  $v_1$ 、 $w_1$ 、 $u_1$  和  $w_1$ 、 $u_1$ 、 $v_1$ ，则可得到：

$Y, d5 - 4 = Y, d1$  (见图5-16b)

$Y, d5 - 2 \times 4 = Y, d(-3) = Y, d9$

因此从  $Y, d$  联结组别中, 只要改变相序就可以得到 1、3、5、7、9、11 奇数联结组别。

另外, 如果将一、二次绕组出线端标志任意两相对换, 使相序反转, 还可以得到许多不同的联结组别, 如  $U_1、V_1、W_1、u_1、v_1、w_1$  改为  $U_1、W_1、V_1、u_1、w_1、v_1、V_1、U_1、W_1、v_1、u_1、w_1$  以及  $W_1、V_1、U_1、w_1、v_1、u_1$  等。

#### 四、变压器并联意义及并联条件

将两台或两台以上的变压器, 额定电压高的一次侧接到高压共同母线上, 额定电压低的二次侧接到低压共同母线上运行, 这种运行方式称为变压器并联运行。

图5-22是两台单相变压器并联运行原理图。

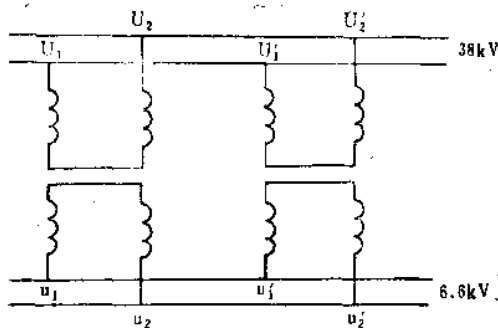


图5-22 两台单相变压器并联运行原理图

##### 1. 变压器并联运行的必要性

(1) 多台变压器并联运行, 便于灵活调节功率大小来适应电力负载变化的需要, 从而提高运行经济性, 并提高电网功率因数。

(2) 多台变压器运行, 可保障用户用电不间断, 有故障的变压器可以单独退出运行, 进行修理后再投入运行, 从而提高供电

连续性和可靠性。

(3)有些大容量发电厂和变电所需用的大容量变压器无法用一台承担,所以必需采用多台变压器并联运行。

(4)考虑变电所负载的发展,要逐年增加变压器台数,以使初投资减少。

(5)有利于计划检修。

但不是并联台数越多越好,因为大容量变压器比多台小容量变压器效率高,价格便宜,所以要经过计算采用合理的台数并联运行。

要求多台变压器并联运行时不存有循环电流,空载时应像一台变压器运行一样。负载时各变压器承担的负载电流,按变压器本身额定功率大小成比例分配,使各台变压器容量总和等于负载总和,充分发挥各台变压器的工作能力。

## 2. 变压器并联条件

(1)各台变压器一次和二次额定电压相等,变压比相同,且所有绕组分接头电压比也相等。

(2)各台变压器的接线组别要相同,且投入电网时,相序要确认一致。

(3)各台变压器并联运行的阻抗电压(短路电压)百分数要接近相等,误差在 $\pm 10\%$ 之内,阻抗相角在 $10^\circ \sim 20^\circ$ 之内。同时要求短路电压的阻抗分量百分数和感抗分量百分数分别相等。

(4)各台变压器的容量比不大于 $3:1$ ,否则会引起负载分配不合理,小容量变压器过载,而大容量变压器欠载。

## 五、并联变压器要求额定电压相等

图5-23是两台具有相同额定电压并联运行的单相变压器 $T_1$ 、 $T_2$ 的原理图,由于正确的并联运行,所以一、二次绕组只有电网供给的电流,不会产生循环电流,也就是在 $U_1, U_1', U_2, U_2'$ 和 $u_1, u_1', u_2, u_2'$ 回路中总电动势等于零,所以不产生循环电流。

如果第二台( $T_2$ )变压器的低压端,如 $u_2'$ 接入 $6.6\text{kV}$ ,而低压另一端 $u_2$ 经电压表接上另端母线 $6.6\text{kV}$ ,则电压表应指零(图

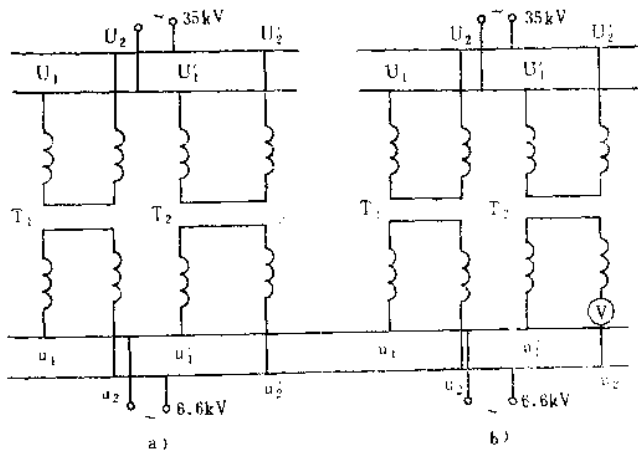


图5-23 两台单相变压器并联运行

a) 两台单相变压器并联运行原理图 b) 并联之前用电压表检查变压器5-23b)。

当变压器额定电压不同和不同的容量接入电网时，则在高压侧的 $U_1, U_1'; U_2, U_2'$ 和低压侧的 $u_1, u_1' (u_2, u_2')$ 回路中（图5-23a）产生循环电流，这个电流大小取决于回路电压差和回路阻抗大小。

为确定额定电压不同的变压器循环电流，最好采用双绕组变压器等效电路图（图5-24），图中 $I_1, I_2, U$ 分别是变压器一、

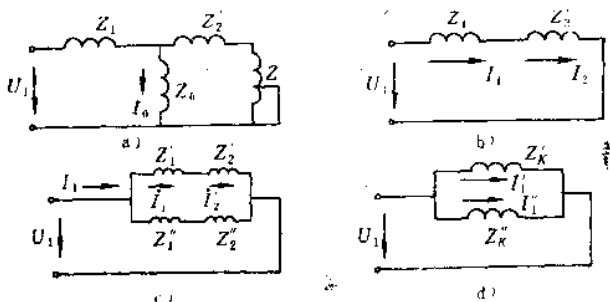


图5-24 双绕组变压器等效电路图

a) 单台双绕组变压器等效电路图 b) 单台双绕组变压器简化等效电路图（不考虑励磁电流） c) 两台并联运行变压器的等效电路图 d) 两台并联运行变压器简化等效电路图

二侧的电流和一次侧电压； $Z_1$ 、 $Z_2$ 是归算到相同绕组匝数后的一、二次侧的绕组阻抗； $Z$ 为变压器归算后的负载阻抗； $I_0$ 、 $Z_0$ 为分别表示变压器的励磁电流和励磁阻抗； $Z'_k$ 、 $Z''_k$ 为换算到同一绕组匝数后的第一台变压器和第二台变压器的阻抗。

从短路试验中可以确定出，即

$$Z'_1 + Z'_2 = Z'_k$$

$$Z''_1 + Z''_2 = Z''_k$$

短路阻抗 $Z_k(\Omega)$ 从短路试验取得：

$$Z_k = U_k / I_N$$

式中  $U_k$ ——变压器短路电压， $U_k = \frac{U_N}{100} u_k$ ，

$u_k$ ——标志在变压器铭牌上的短路电压标幺值， $u_k =$

$$\frac{U_k}{U_N} \times 100\%；$$

$U_N$ ——变压器额定电压 (V)；

$I_N$ ——变压器额定电流 (A)。

所以得出：

$$Z_k = \frac{u_k U_N}{100 I_N}$$

循环电流 $I_y$ 为

$$I_y = \frac{U'_N - U''_N}{Z'_k + Z''_k}$$

式中  $U'_N$ 、 $U''_N$ ——分别表示第一台和第二台变压器的额定电压 (V)；

$Z'_k$ 、 $Z''_k$ ——分别表示第一台和第二台变压器的短路阻抗。

$I_y$ 为图 5-24d 回路中的循环流动，其大小取决于 $U'_N - U''_N$ 之差和两台变压器的短路阻抗 $Z'_k + Z''_k$ 之和。

可见，当 $U'_N - U''_N = 0$ 时，即两台变压器额定电压相等时， $I_y = 0$ ，无循环电流。

改变 $I_y$ 公式的形式，可得下面公式：

$$I_y = \frac{U_N^I - U_N^{\text{II}}}{\frac{u_{K1}}{100} \frac{U_N^I}{I_N^I} + \frac{u_{K2}}{100} \frac{U_N^{\text{II}}}{I_N^{\text{II}}}}$$

式中  $U_N^I$ ——第一台变压器额定线电压(V);

$U_N^{\text{II}}$ ——第二台变压器额定线电压(V);

$I_N^I$ ——第一台变压器额定线电流(A);

$I_N^{\text{II}}$ ——第二台变压器额定线电流(A)。

由于有循环电流存在,在空载时就会引起变压器功率分配不均。

当变压器带载运行时,循环电流增大了变压器绕组的负载,也就是说,变压器负载总电流是由负载电流和循环电流组成。

上面计算循环电流的公式是忽略了绕组导体电阻,实际循环电流比计算值要小些。

图5-25是三相变压器并联运行原理图,各台变压器并联之前,要在二次绕组端点测出  $U_N^I$  和  $U_N^{\text{II}}$  如图5-25b所示。还可测出  $U_N^I - U_N^{\text{II}}$  之差,对第一台变压器可按接线图重复测量一、二次线电压。第二台变压器高压侧投入电网,其低压侧一个端接入电网(如图5-25b,端点  $w_1$ ),然后用电压表测量变压器端点  $v_1$  和电网  $v_1$  点之间电压,以及变压器端点  $u_1$  和电网  $u_1$  点之间电压,如果两台

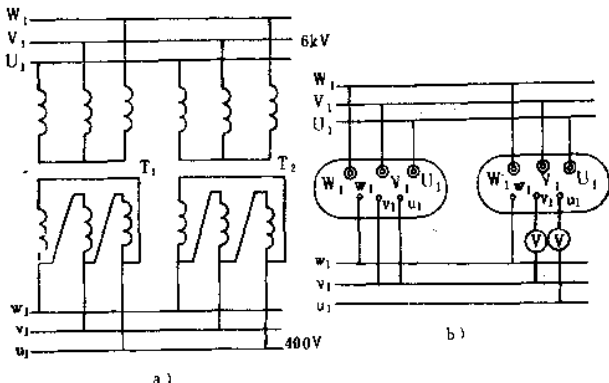


图5-25 三相变压器并联运行原理图

a) 两台三相变压器并联运行 b) 并联运行前用电压表检查



变压器电压相等，电压表不会有指示。

确定不同电压变压器并联运行时产生的循环电流。

例5-36 三相双绕组变压器并联运行时，高压侧电压相同，低压侧电压不同，试计算低压绕组中循环电流大小，已知变压器参数如下：

第一台变压器	第二台变压器
$P_{N1} = 2400 \text{ kVA}$	$P_{N2} = 3200 \text{ kVA}$
$U'_{N1} = 35000 \text{ V}$	$U'_{N1} = 35000 \text{ V}$
$U'_{N2} = 6600 \text{ V}$	$U'_{N2} = 6000 \text{ V}$
$I'_{N1} = 39.7 \text{ A}$	$I'_{N1} = 52.8 \text{ A}$
$I'_{N2} = 210 \text{ A}$	$I'_{N2} = 309 \text{ A}$
$u_{K1} = 5\%$	$u_{K2} = 5.4\%$

(1) 低压额定电压差

$$U'_N - U''_N = 6600 - 6000 = 600 \text{ V}$$

(2) 第一台变压器阻抗  $Z'_K$

$$Z'_K = \frac{u_{K1} U'_{N2}}{100 I'_{N2}} = \frac{5 \times 6600}{100 \times 210} = 1.57 \Omega$$

第二台变压器阻抗  $Z''_K$  为

$$Z''_K = \frac{u_{K2} U'_{N2}}{100 I'_{N2}} = \frac{5.4 \times 6000}{100 \times 309} = 1.05 \Omega$$

(3) 低压绕组中循环电流  $I_y$

$$I_y = \frac{U'_{N2} - U''_{N2}}{\frac{u_{K1} U'_{N2}}{100 I'_{N2}} + \frac{u_{K2} U'_{N2}}{100 I'_{N2}}} = \frac{600}{1.57 + 1.05} = 229 \text{ A}$$

可见流入变压器绕组的循环电流超过第一台的额定电流，使这台变压器绕组发热。

此循环电流占额定电流百分数为

$$\frac{229}{210} \times 100\% = 109\%$$

下面再计算变压器高压绕组中循环电流大小，变压器低压侧接到电压为6600V 电网上。

(4) 变压器高压侧感应电压

$$U'_{N1} = 6600 \times \frac{35000}{6600} = 35000 \text{ V}$$

$$U''_{N1} = 6600 \times \frac{35000}{6000} = 38500 \text{ V}$$

(5) 电压差

$$U'_{N1} - U''_{N1} = 35000 - 38500 = -3500 \text{ V}$$

负号表示电流是从第二台流向第一台。

(6) 第一台变压器阻抗  $Z'_K$

$$Z'_K = \frac{u_{K1} U'_{N1}}{100 I'_{N1}} = \frac{5 \times 35000}{100 \times 39.7} = 44.3 \Omega$$

第二台变压器阻抗  $Z''_K$  为

$$Z''_K = \frac{u_{K2} U''_{N1}}{100 I''_{N1}} = \frac{5.4 \times 35000}{100 \times 52.8} = 35.8 \Omega$$

(7) 循环电流  $I_{y1}$

$$I_{y1} = \frac{U'_{N1} - U''_{N1}}{Z'_{K1} + Z''_{K1}} = \frac{3500}{44.3 + 35.8} = 43.3 \text{ A}$$

循环电流超过变压器一次额定电流百分数为

$$\frac{43.3}{39.7} \times 100\% = 109\%$$

可见流在高压绕组中的循环电流也和流在低压绕组中的循环电流百分数相同。

如果已知低压绕组中的循环电流等于 229A，那么高压绕组中的循环电流可用此电流乘上电压比得到，即  $I_{y1}$  为

$$I_{y1} = 229 \times \frac{6600}{35000} = 43.3 \text{ A}$$

例5-37 两台单相变压器并联运行，已知技术数据如下：

第一台变压器

$$P'_N = 1200 \text{ kVA}$$

$$U'_{N1} = 35000 \text{ V}$$

$$U'_{N2} = 3150 \text{ V}$$

第二台变压器

$$P''_N = 1200 \text{ kVA}$$

$$U''_{N1} = 35000 \text{ V}$$

$$U''_{N2} = 3150 \text{ V}$$

$$I'_{N1} = 34.3 \text{ A}$$

$$I''_{N1} = 34.3 \text{ A}$$

$$I'_{N2} = 381 \text{ A}$$

$$I''_{N2} = 381 \text{ A}$$

$$u_{K1} = 3.5\%$$

$$u_{K2} = 3.52\%$$

高压侧投入电网，两台变压器的一次绕组均为1822匝，二次绕组匝数均为165匝，但在修理重绕时，绕成161匝，少绕4匝，求引起的循环电流是多少。

(1) 正常时，低压绕组匝数165匝，电压为3150V，现在匝数为161匝，匝数与电压成正比，所以这时低压绕组电压应为

$$3150 \times \frac{161}{165} = 3075 \text{ V}$$

电压差为

$$U'_{N2} - U''_{N2} = 3150 - 3075 = 75 \text{ V}$$

(2) 阻抗电压计算

第一台为

$$Z'_K = \frac{u_{K1} U'_{N2}}{100 I'_{N2}} = \frac{3.5 \times 3150}{100 \times 381} = 0.29 \Omega$$

第二台为

$$Z''_K = \frac{u_{K2} U''_{N2}}{100 I''_{N2}} = \frac{3.52 \times 3075}{100 \times 381} = 0.284 \Omega$$

(3) 循环电流  $I_y$

$$I_y = \frac{U'_{N2} - U''_{N2}}{Z'_K + Z''_K} = \frac{75}{0.29 + 0.284} = 130 \text{ A}$$

占额定电流百分数为

$$\frac{I_y}{I'_N} = \frac{130}{34.3} \times 100\% = 34.3\%$$

**例5-38** 仍用上例数据，重绕高压线圈时多绕10匝，当低压侧投入电网时，问这时变压器绕组中循环电流是多少。

(1) 重绕后绕组中感应电压值  $U'_N$

$$U'_N = 35000 \times \frac{1832}{1822} = 35200 \text{ V}$$

(2) 电压差

$$U'_N - U''_N = 35200 - 35000 = 200\text{V}$$

(3) 第一台阻抗  $Z'_K$

$$Z'_K = \frac{u_{K1} U'_N}{100 I'^2_N} = \frac{3.5 \times 35200}{100 \times 34.3} = 35.7\Omega$$

第二台阻抗  $Z''_K$  为

$$Z''_K = \frac{u_{K2} U''_N}{100 I''^2_N} = \frac{3.52 \times 35000}{100 \times 34.3} = 35.9\Omega$$

(4) 循环电流  $I_y$

$$I_y = \frac{U'_N - U''_N}{Z'_K + Z''_K} = \frac{200}{35.7 + 35.9} = 2.79\text{A}$$

$I_y$  占额定电流的 8.15%

例5-39 两台变压器并联运行，绕组联结组别为 Y, y，供变压器电源电压为 33250V，如果已知循环电流占额定电流的 116%，试确定第一台变压器高压绕组抽头位置。

第一台变压器数据

第二台变压器数据

$$P_{N1} = 4200\text{kVA}$$

$$P_{N2} = 10000\text{kVA}$$

$$U'_{N1} = 35000 \pm 5\%$$

$$U''_{N1} = 33250\text{V}$$

$$U'_{N2} = 6600\text{V}$$

$$U''_{N2} = 6600\text{V}$$

$$I'_{N1} = 69.3\text{A}$$

$$I''_{N1} = 173.5\text{A}$$

$$I'_{N2} = 368\text{A}$$

$$I''_{N2} = 875\text{A}$$

$$u_{K1} = 5.7\%$$

$$u_{K2} = 6.2\%$$

(1) 第一台变压器短路阻抗  $Z'_K$

$$Z'_K = \frac{u_{K1} U'_{N2}}{100 I'^2_{N2}} = \frac{5.7 \times 6600}{100 \times 368} = 1.02\Omega$$

第二台  $Z''_K$  为

$$Z''_K = \frac{u_{K2} U''_{N2}}{100 I''^2_{N2}} = \frac{6.2 \times 6600}{100 \times 875} = 0.47\Omega$$

(2) 低压绕组中循环电流

$$I_y = 1.16 I''_N = 1.16 \times 368 = 428\text{A}$$

(3) 电压差

$$U'_N - U''_N = I_y (Z'_K + Z''_K) = 428(1.02 + 0.47) = 636\text{V}$$

(4) 第一台低压绕组电压

$$U_1' = 6600 - 636 = 5964 \text{ V}$$

高压绕组电压

$$U_2' = \frac{6600}{5964} \times 33250 = 36750 \text{ V}$$

超过额定电压 35000V 的 105%，因此可以断定第一台变压器分接开关位置应调在 -5% 处，这样两台变压器并联运行就不会出现循环电流了。

计算循环电流的另一种表达式为

$$I_y = \frac{\gamma I_N'}{u_{K1} + \frac{u_{K2}}{\beta} + \gamma \frac{u_{K1}}{100}}$$

式中  $I_N'$  —— 第一台变压器额定电流 (A)；

$\beta$  —— 第二台与第一台变压器额定电流之比， $\beta = \frac{I_N''}{I_N'}$ ；

$u_{K1}$ 、 $u_{K2}$  —— 变压器短路电压；

$\gamma$  —— 第一台变压器额定电压与第二台额定电压之差与第

二台额定电压之比的百分数， $\gamma = \frac{U_N' - U_N''}{U_N''} \times 100$

$$= \left( \frac{U_N'}{U_N''} - 1 \right) \times 100, \text{ 或 } \frac{U_N'}{U_N''} = \frac{\gamma}{100} + 1.$$

此计算循环电流公式与以前介绍的是一致的，并且可以从前面公式导出此公式，即

$$\begin{aligned} I_y &= \left( \frac{\frac{U_N' - U_N''}{100 I_N'} \cdot \frac{100 I_N'}{U_N''}}{\frac{u_{K1} U_N'}{100 I_N'} + \frac{u_{K2} U_N''}{100 I_N''}} \right) \cdot \frac{100 I_N'}{U_N''} \\ &= \frac{\frac{U_N'}{U_N''} 100 I_N' - 100 I_N'}{u_{K1} \times \frac{U_N'}{U_N''} + u_{K2} \times \frac{I_N'}{I_N''}} = \frac{\left( \frac{U_N'}{U_N''} - 1 \right) 100 I_N'}{u_{K1} \frac{U_N'}{U_N''} + u_{K2} \frac{I_N'}{I_N''}} \\ &= \frac{\gamma I_N'}{u_{K1} \left( \frac{\gamma}{100} + 1 \right) + \frac{u_{K2}}{\beta}} = \frac{\gamma I_N'}{\frac{\gamma u_{K1}}{100} + u_{K1} + \frac{u_{K2}}{\beta}} \end{aligned}$$

有时利用此公式比以前介绍的公式进行计算更方便些。

例5-40 仍用例5-36的变压器数据，试确定低压绕组的循环电流。

(1) 确定  $\gamma$  值

$$\gamma = \frac{U'_N}{U''_N} \times 100 - 100 = \frac{6600}{6000} \times 100 - 100 = 10$$

(2) 确定  $\beta$  值

$$\beta = \frac{I'_N}{I''_N} = \frac{309}{210} = 1.47$$

(3) 循环电流  $I_\nu$

$$I_\nu = \frac{\gamma I'_N}{u_{K1} + \frac{u_{K2}}{\beta} + \gamma \frac{u_{K1}}{100}} = \frac{10 \times 210}{5 + \frac{5.4}{1.47} + 10 \times \frac{5}{100}} = 229\text{A}$$

可见计算结果与例5-36同

例5-41 两台一次电压相等的变压器并联运行，试确定高压绕组中循环电流。

已知两台变压器低压绕组电压相同，两台变压器数据如下：

第一台变压器

$$P_{N1} = 5600\text{kVA}$$

$$U'_{N1} = 36600\text{V}$$

$$I'_{N1} = 88.5\text{A}$$

$$u_{K1} = 6.9\%$$

第二台变压器

$$P_{N2} = 5600\text{kVA}$$

$$U'_{N2} = 40400\text{V}$$

$$I'_{N2} = 80.2\text{A}$$

$$u_{K2} = 7.3\%$$

(1) 确定  $\gamma$  值

$$\gamma = \frac{U'_N}{U''_N} \times 100 - 100 = \frac{40400}{36600} \times 100 - 100 = 10$$

(2) 确定  $\beta$  值

$$\beta = \frac{I'_N}{I''_N} = \frac{80.2}{88.5} = 0.90$$

(3) 循环电流  $I_\nu$

$$I_\nu = \frac{\gamma I'_N}{u_{K1} + \frac{u_{K2}}{\beta} + \gamma \frac{u_{K1}}{100}} = \frac{10 \times 88.5}{6.9 + \frac{7.3}{0.90} + 10 \times \frac{6.9}{100}}$$

$$= 56.2 \text{ A}$$

### 六、并联变压器要求短路电压接近相等

短路电压是将变压器二次侧短接，一次侧接入适当电压，使一、二次绕组中流有额定电流，这时施加给变压器的电压为短路电压，并以额定电压百分数表示，即  $u_k\%$ 。通常变压器的短路电压在  $4.5\% \sim 10.5\%$  之间，特大型变压器可达  $13\%$  或以上。多台变压器并联运行时，要求各变压器的短路电压接近相等，完全相等是很难办到的，短路电压（阻抗电压）在铭牌上有记载。

#### 1. 两台容量相同而短路电压不同的变压器并联运行时的负载分配

图5-26为两台变压器并联的简化等效图。显然，两台变压器的电压降（阻抗压降）应相等，即

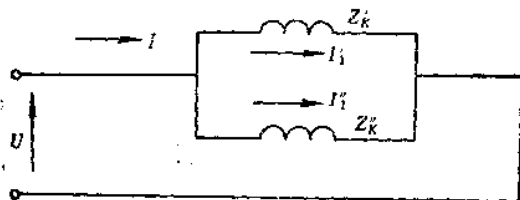


图5-26 两台变压器并联的简化等效电路图

$$I' Z_k' = I'' Z_k''$$

或

$$\frac{I'}{I''} = \frac{Z_k''}{Z_k'}$$

式中  $I'$ 、 $I''$ ——第一台变压器和第二台变压器负载电流 (A)；  
 $Z_k'$ 、 $Z_k''$ ——第一台和第二台变压器的阻抗。

如用短路电压  $u_k$  代表阻抗  $Z_k$  时，得，

$$\frac{I'}{I''} = \frac{Z_k''}{Z_k'} = \frac{u_{k2} U_{100} I_{1N}}{u_{k1} U_{100} I_{2N}}$$

因为两台变压器容量相同，所以  $I_1 = I_2$ ，另外电源电压是一个，所以上式简化为

$$\frac{I'}{I''} = \frac{u_{k2}}{u_{k1}}$$

说明容量相同的两台变压器并联运行时，负载电流的分配与其短路电压成反比。

如果上式用负载容量大小表示时，则有

$$\frac{U10^3}{U'10^3} = \frac{I'}{I''} = \frac{u_{K2}}{u_{K1}}$$

或

$$\frac{P_{x1}}{P_{x2}} = \frac{u_{K2}}{u_{K1}}$$

式中  $P_{x1}$ 、 $P_{x2}$ ——第一台和第二台变压器的负载(kVA)。

说明两台容量相同的变压器并联运行时，分配给变压器的容量与其短路电压成反比，也就是说短路电压小的变压器，要承担较多的负载。

**例5-42** 有两台容量相同的变压器并联运行(容量100kVA)，第一台变压器短路电压  $u_K^1 = 5\%$ ，第二台变压器短路电压  $u_K^2 = 7\%$ ，已知总负载为150kVA，问各台变压器承担的负载是多少。

从上面分析知道，容量相同的变压器并联运行时，短路电压小的分配负载要多，反之要少。

设第一台变压器承担的负载为  $P_{x1}$ ，则第二台承担的负载应为  $150 - P_{x1}$ ，于是有

$$\frac{P_{x1}}{150 - P_{x1}} = \frac{u_{K2}}{u_{K1}} = \frac{7}{5}$$

$$P_{x1} = 87.5 \text{ kVA}$$

$$P_{x2} = 150 - 87.5 = 62.5 \text{ kVA}$$

可见第一台变压器承担88%的负载，而第二台承担63%的负载。

现在假设总负载是200kVA，为两台变压器容量的总和，问各台变压器承担负载各是多少。

由  $\frac{P_{x1}}{200 - P_{x1}} = \frac{7}{5}$  解出：

$$P_{x1} = 116.7 \text{ kVA}$$

$$P_{x2} = 200 - 116.7 = 83.3 \text{ kVA}$$



可见, 第一台变压器过载17%, 而第二台变压器欠载17%。

如果让第二台变压器满载运行, 即 $P_{x2} = 100\text{kVA}$ , 则第一台变压器负载为 $140\text{kVA}$ , 超载40%。

2. 两台容量不同短路电压也不相同的变压器并联运行时的负载分配

仍用图5-24中的简化等效电路, 得到:

$$I' Z'_K = I'' Z''_K$$

或

$$\frac{I'}{I''} = \frac{Z''_K}{Z'_K}$$

用 $u_K$ 代替 $Z_K$ , 则有

$$\frac{I'}{I''} = \frac{Z''_K}{Z'_K} = \frac{u_{K2} U 100 I_1}{u_{K1} U 100 I_2}$$

或

$$\frac{I'}{I''} = \frac{I_1 u_{K2}}{I_2 u_{K1}}$$

式中  $I'$ 、 $I''$ ——第一台变压器和第二台变压器的负载电流(A);

$I_1$ 、 $I_2$ ——第一台和第二台变压器的额定电流(A);

$u_{K1}$ 、 $u_{K2}$ ——第一台和第二台变压器的短路电压。

用 $\frac{U 10^3}{I 10^3}$ 乘上式两端, 得到变压器额定功率 $P_1$ 、 $P_2$ 与负载分配关系, 即

$$\frac{P_{x1}}{P_{x2}} = \frac{P_1}{P_2} \cdot \frac{u_{K2}}{u_{K1}}$$

说明, 容量不同和短路电压不同的两台变压器并联运行时, 各变压器分配的负载大小与其容量成正比, 与其短路电压成反比。

例5-43 有三台变压器并联运行, 技术参数如下, 已知总负载为 $350\text{kVA}$ , 问各变压器承担负载各是多少。

$$P' = 180\text{kVA} \qquad u_{K1} = 6\%$$

$$P'' = 100\text{kVA} \qquad u_{K2} = 4\%$$

$$P''' = 75\text{kVA} \qquad u_{K3} = 3\%$$

设三台变压器之间负载分配比值为

$$I : II : III = \frac{180}{6} : \frac{100}{4} : \frac{75}{3}$$

即  $I : II : III = 30 : 25 : 25$

上式总数  $30 + 25 + 25 = 80$ ，所以第一台变压器负载占  $30/80$ ，第二台和第三台占  $25/80$ 。

由此算出各台变压器承担的负载为

第一台  $\frac{30}{80} \times 350 = 132 \text{ kVA}$ ，欠载运行，占额定功率的  $73.3\%$ 。

第二台  $\frac{25}{80} \times 350 = 109 \text{ kVA}$ ，超载  $9\%$ 。

第三台  $\frac{25}{80} \times 350 = 109 \text{ kVA}$ ，超载  $45.3\%$ 。

### 3. 多台变压器并联运行时负载的分配计算

当多台（超过两台）变压器并联运行时，按上例5-43进行负载分配计算是困难的，所以有必要推导出多台变压器并联运行时负载分配计算方法。

设多台变压器并联运行时总负载为  $P$ ，每台变压器所承担的负载为  $P_{r1}$ 、 $P_{r2}$ 、 $P_{r3}$ ... $P_{rn-1}$ 、 $P_{rn}$ ，则有

$$P = P_{r1} + P_{r2} + P_{r3} + \dots + P_{rn-1} + P_{rn}$$

当各台变压器容量相同时，每台变压器分配的负载大小与其短路电压成反比。设各台变压器的短路电压为  $u_{K1}$ 、 $u_{K2}$ 、 $u_{K3}$ ... $u_{Kn-1}$ 、 $u_{Kn}$ ，现将短路电压归化到同一容量上，比如归化到第一台变压器的容量上，则有

$$u'_{K1} = u_{K1} \times \frac{P_1}{P_1}, \quad u'_{K2} = u_{K2} \frac{P_1}{P_2}$$

$$u'_{K3} = u_{K3} \frac{P_1}{P_3}, \quad u'_{Kn-1} = u_{Kn-1} \frac{P_1}{P_{Kn-1}}$$

$$u'_{Kn} = u_{Kn} \frac{P_1}{P_n}$$

式中  $u'_{K1}, u'_{K2}, \dots, u'_{Kn-1}, u'_{Kn}$  ——归算到第一台变压器容量后的短路电压;

$P_1, P_2, \dots, P_{n-1}, P_n$  ——各台变压器的额定功率 (kVA)。

各台变压器的负载分配与归化后的短路电压成反比, 则有

$$\frac{P_{x1}}{P_{x2}} = \frac{u'_{K2}}{u'_{K1}}$$

或

$$P_{x1}u'_{K1} = P_{x2}u'_{K2}$$

$$\frac{P_{x1}}{P_{x3}} = \frac{u'_{K3}}{u'_{K1}}$$

或

$$P_{x1}u'_{K1} = P_{x3}u'_{K3}$$

⋮

$$\frac{P_{x1}}{P_{xn}} = \frac{u'_{Kn}}{u'_{K1}}$$

或

$$P_{x1}u'_{K1} = P_{xn}u'_{Kn}$$

由此得出:

$$\begin{aligned} P_{x1}u_{K1} &= P_{x2}u'_{K2} = P_{x3}u'_{K3} = \dots = \\ &= P_{xn-1}u'_{Kn-1} = P_{xn}u'_{Kn} \end{aligned}$$

从上式还可得出:

$$P_{x2} = P_{x1} \frac{u'_{K1}}{u'_{K2}}, \quad P_{x3} = P_{x1} \frac{u'_{K1}}{u'_{K3}}$$

$$P_{xn-1} = P_{x1} \frac{u'_{K1}}{u'_{Kn-1}}, \quad P_{xn} = P_{x1} \frac{u'_{K1}}{u'_{Kn}}$$

负载总值  $P$  可用下式表示, 即

$$\begin{aligned} P &= P_{x1} + P_{x2} + P_{x3} + \dots + P_{xn-1} + P_{xn} \\ &= P_{x1} \left( 1 + \frac{u'_{K1}}{u'_{K2}} + \frac{u'_{K1}}{u'_{K3}} + \frac{u'_{K1}}{u'_{K4}} + \dots + \frac{u'_{K1}}{u'_{Kn-1}} + \frac{u'_{K1}}{u'_{Kn}} \right) \\ &= P_{x1} \left( \frac{u'_{K1}}{u'_{K1}} + \frac{u'_{K1}}{u'_{K2}} + \frac{u'_{K1}}{u'_{K3}} + \dots + \frac{u'_{K1}}{u'_{Kn-1}} + \frac{u'_{K1}}{u'_{Kn}} \right) \\ &= P_{x1}u'_{K1} \left( \frac{1}{u'_{K1}} + \frac{1}{u'_{K2}} + \dots + \frac{1}{u'_{Kn-1}} + \frac{1}{u'_{Kn}} \right) \\ &= P_{x1}u'_{K1}K \end{aligned}$$

$$\text{式中 } K = \frac{1}{u'_{k1}} + \frac{1}{u'_{k2}} + \dots + \frac{1}{u'_{k_{n-1}}} + \frac{1}{u'_{kn}}$$

$$\therefore P_{x1} = \frac{P}{K u'_{k1}} = \frac{P}{K} \times \frac{1}{u'_{k1}}$$

从以上式可得：

$$P_{x2} = P_{x1} \frac{u'_{k1}}{u'_{k2}} = \frac{P}{K u'_{k1}} \cdot \frac{u'_{k1}}{u'_{k2}} = \frac{P}{K} \cdot \frac{1}{u'_{k2}}$$

$$P_{x3} = P_{x1} \frac{u'_{k1}}{u'_{k3}} = \frac{P}{K u'_{k1}} \cdot \frac{u'_{k1}}{u'_{k3}} = \frac{P}{K} \cdot \frac{1}{u'_{k3}}$$

⋮

$$P_{x_{n-1}} = P_{x1} \frac{u'_{k1}}{u'_{k_{n-1}}} = \frac{P}{K u'_{k1}} \cdot \frac{u'_{k1}}{u'_{k_{n-1}}} = \frac{P}{K} \cdot \frac{1}{u'_{k_{n-1}}}$$

$$P_{xn} = P_{x1} \frac{u'_{k1}}{u'_{kn}} = \frac{P}{K u'_{k1}} \cdot \frac{u'_{k1}}{u'_{kn}} = \frac{P}{K} \cdot \frac{1}{u'_{kn}}$$

用  $P' = \frac{P}{K}$  代入上式得出各台变压器承担的负载为

$$P_{x1} = \frac{P'}{u'_{k1}}$$

$$P_{x2} = \frac{P'}{u'_{k2}}$$

$$P_{x3} = \frac{P'}{u'_{k3}}$$

⋮

$$P_{x_{n-1}} = \frac{P'}{u'_{k_{n-1}}}$$

$$P_{xn} = \frac{P'}{u'_{kn}}$$

#### 4. 多台变压器并联运行负载分配计算的几种特殊情况

(1) 多台变压器容量相同，短路电压不同

$$P_1 = P_2 = P_3 = \dots = P_{n-1} = P_n$$

归算后的短路电压为

$$u'_{K1} = u_{K1} \frac{P_1}{P_1} = u_{K1}, \quad u'_{K2} = u_{K2} \frac{P_1}{P_2} = u_{K2} \frac{P_1}{P_1} = u_{K2}, \quad \dots$$

$$u'_{K_{n-1}} = u_{K_{n-1}} \frac{P_1}{P_{n-1}} = u_{K_{n-1}} \frac{P_1}{P_1} = u_{K_{n-1}}, \quad u'_{Kn} = u_{Kn} \frac{P_1}{P_n} = u_{Kn} \frac{P_1}{P_1} = u_{Kn}$$

$$\frac{P_1}{P_1} u_{Kn}$$

于是得到在这种特殊情况下各变压器负载分配计算公式如下:

$$P_{x1} = \frac{P'}{u_{K1}}$$

$$P_{x2} = \frac{P'}{u_{K2}}$$

$$P_{x3} = \frac{P'}{u_{K3}}$$

$$\vdots$$

$$P_{x_{n-1}} = \frac{P'}{u_{K_{n-1}}}$$

$$P_{xn} = \frac{P'}{u_{Kn}}$$

式中  $P' = \frac{P}{K}$ 。

从上式看出, 这时变压器负载分配与其短路电压成反比。

(2) 各台变压器容量不同而短路电压相同

$$u_{K1} = u_{K2} = u_{K3} = \dots = u_{Kn} = u_K$$

所以有

$$u'_{K1} = u_K \frac{P_1}{P_1}, \quad u'_{K2} = u_K \frac{P_1}{P_2}, \quad u'_{K3} = u_K \frac{P_1}{P_3},$$

$$u'_{K_{n-1}} = u_K \frac{P_1}{P_{n-1}}, \quad u'_{Kn} = u_K \frac{P_1}{P_n}$$

$$\begin{aligned}
 K &= \frac{1}{u'_K} + \frac{1}{u_{K2}} + \frac{1}{u'_{K3}} + \dots + \frac{1}{u'_{K_{n-1}}} + \frac{1}{u'_{Kn}} \\
 &= \frac{P_1}{u_K P_1} + \frac{P_2}{u_K P_1} + \frac{P_3}{u_K P_1} + \dots + \frac{P_{n-1}}{u_K P_1} + \frac{P_n}{u_K P_1} \\
 &= \frac{P_1 + P_2 + P_3 + \dots + P_{n-1} + P_n}{P_1 u_K} = \frac{\sum_1^n P}{P_1 u_K}
 \end{aligned}$$

式中  $K = \frac{\sum_1^n P}{P_1 u_K}$

$$P' = \frac{P}{K} = \frac{P}{\frac{\sum_1^n P}{P_1 u_K}} = \frac{P P_1 u_K}{\sum_1^n P}$$

每台变压器负载分配计算如下:

$$P_{x1} = \frac{P'}{u_{K1}} = \frac{P P_1 u_K P_1}{\sum_1^n P u_K P_1} = \frac{P}{\sum_1^n P} P_1$$

$$P_{x2} = \frac{P'}{u_{K2}} = \frac{P P_1 u_K P_2}{\sum_1^n P u_K P_1} = \frac{P}{\sum_1^n P} P_2$$

$$P_{x3} = \frac{P}{\sum_1^n P} P_3$$

⋮

$$P_{xn-1} = \frac{P}{\sum_1^n P} P_{n-1}$$

$$P_{xn} = \frac{P}{\sum_1^n P} P_n$$

从上面关系看出, 对于具有不同容量和相同短路电压多台变

压器并联运行时,每台变压器所承担的负载大小与其容量成正比。

(3) 各台变压器容量相同,短路电压也相同

$$u_{K1} = u_{K2} = u_{K3} = \dots = u_{Kn-1} = u_{Kn}$$

$$P_1 = P_2 = P_3 = \dots = P_{n-1} = P_n$$

所以

$$u'_{K1} = u'_{K2} = u'_{K3} = \dots = u'_{Kn-1} = u'_{Kn}$$

$$K = \frac{1}{u'_{K1}} + \frac{1}{u'_{K2}} + \frac{1}{u'_{K3}} + \dots + \frac{1}{u'_{Kn-1}} + \frac{1}{u'_{Kn}}$$

$$= \frac{1}{u_K} n$$

即

$$K = \frac{n}{u_K}$$

$$P' = \frac{P}{K} = \frac{P}{n} u_K$$

由此可得出每台变压器承担负载为

$$P_{x1} = \frac{P'}{u_{K1}} = \frac{P u_K}{n u_{K1}} = \frac{P}{n}$$

$$P_{x2} = \frac{P'}{u'_{K2}} = \frac{P u_K}{n u_{K2}} = \frac{P}{n}$$

⋮

$$P_{xn} = \frac{P'}{u'_{Kn}} = \frac{P u_K}{n u_{Kn}} = \frac{P}{n}$$

$$P_{x1} = P_{x2} = P_{x3} = \dots = \frac{P}{n}$$

可见这时各台变压器所承担的负载是均匀的。

例5-44 有四台变压器并联运行,它们的额定容量和短路电压如下:

$$P_1 = 3200 \text{ kVA} \quad u_{K1} = 5.2\%$$

$$P_2 = 2400 \text{ kVA} \quad u_{K2} = 5.5\%$$

$$P_3 = 1800 \text{ kVA} \quad u_{K3} = 5.9\%$$

$$P_4 = 1350 \text{ kVA} \quad u_{K4} = 5\%$$

已知总负载为8750kVA，试求各变压器所承担的负载大小。  
 归化到第一台变压器容量的短路电压为

$$u'_{k1} = u_{k1} \frac{P_1}{P_1} = 5.2 \times \frac{3200}{3200} = 5.2\%$$

$$u'_{k2} = u_{k2} \frac{P_1}{P_2} = 5.5 \times \frac{3200}{2400} = 7.35\%$$

$$u'_{k3} = u_{k3} \frac{P_1}{P_3} = 5.9 \times \frac{3200}{1800} = 10.5\%$$

$$u'_{k4} = u_{k4} \frac{P_1}{P_4} = 5.6 \times \frac{3200}{1350} = 11.88\%$$

系数  $K$  值为

$$\begin{aligned} K &= \frac{1}{u'_{k1}} + \frac{1}{u'_{k2}} + \frac{1}{u'_{k3}} + \frac{1}{u'_{k4}} \\ &= \frac{1}{5.2} + \frac{1}{7.35} + \frac{1}{10.5} + \frac{1}{11.88} = 0.507 \end{aligned}$$

$$P' = \frac{P}{K} = \frac{8750}{0.507} = 17250 \text{ kVA}$$

于是得出各台变压器承担的负载为

$$P_{x1} = \frac{P'}{u'_{k1}} = \frac{17250}{5.2} = 3320 \text{ kVA} \quad \text{过载} 3.5\%$$

$$P_{x2} = \frac{P'}{u'_{k2}} = \frac{17250}{7.35} = 2340 \text{ kVA} \quad \text{欠载} 2.5\%$$

$$P_{x3} = \frac{P'}{u'_{k3}} = \frac{17250}{10.5} = 1640 \text{ kVA} \quad \text{欠载} 9\%$$

$$P_{x4} = \frac{P'}{u'_{k4}} = \frac{17250}{11.88} = 1450 \text{ kVA} \quad \text{过载} 7.4\%$$

总负载  $P$  为

$$\begin{aligned} P &= P_{x1} + P_{x2} + P_{x3} + P_{x4} = 3320 + 2340 + 1640 + 1450 \\ &= 8750 \text{ kVA} \end{aligned}$$

短路电压也可归化到别的变压器容量，比如归化到第二台变



压器容量时，则有

$$u'_{k1} = u_{k1} \frac{P_2}{P_1} = 5.2 \times \frac{2400}{3200} = 3.92\%$$

$$u'_{k2} = u_{k2} \frac{P_2}{P_2} = 5.5 \times \frac{2400}{2400} = 5.5\%$$

$$u'_{k3} = u_{k3} \frac{P_2}{P_3} = 5.9 \times \frac{2400}{1800} = 7.9\%$$

$$u'_{k4} = u_{k4} \frac{P_2}{P_4} = 5 \times \frac{2400}{1350} = 8.9\%$$

$K$  值为

$$\begin{aligned} K &= \frac{1}{u'_{k1}} + \frac{1}{u'_{k2}} + \frac{1}{u'_{k3}} + \frac{1}{u'_{k4}} \\ &= \frac{1}{3.92} + \frac{1}{5.5} + \frac{1}{7.9} + \frac{1}{8.9} = 0.676 \end{aligned}$$

$$P' = \frac{P}{K} = \frac{8750}{0.676} = 12950 \text{ kVA}$$

各台变压器承担的负载为

$$P_{x1} = \frac{P'}{u'_{k1}} = \frac{12950}{3.92} = 3320 \text{ kVA} \quad \text{过载} 3.5\%$$

$$P_{x2} = \frac{P'}{u'_{k2}} = \frac{12950}{5.5} = 2340 \text{ kVA} \quad \text{欠载} 2.5\%$$

$$P_{x3} = \frac{P'}{u'_{k3}} = \frac{12950}{7.9} = 1640 \text{ kVA} \quad \text{欠载} 9\%$$

$$P_{x4} = \frac{P'}{u'_{k4}} = \frac{12950}{8.9} = 1450 \text{ kVA} \quad \text{欠载} 7.4\%$$

所得结果与上面归算第一台变压器容量时相同。读者如感兴趣，也可归化到第三台或第四台变压器的容量上，所得结果是相同的。

**例5-45** 有五台变压器并联运行，技术数据如下，

$P_1 = 4200 \text{ kVA}$	$u_{K1} = 4.0\%$
$P_2 = 5600 \text{ kVA}$	$u_{K2} = 4.95\%$
$P_3 = 7500 \text{ kVA}$	$u_{K3} = 6.05\%$
$P_4 = 10000 \text{ kVA}$	$u_{K4} = 9.82\%$
$P_5 = 15000 \text{ kVA}$	$u_{K5} = 12.0\%$

已知总负载为40000kVA，问每台变压器所承担的负载大小。

归化到第一台变压器容量的短路电压为

$$u'_{K1} = u_{K1} \frac{P_1}{P_1} = 4 \times \frac{4200}{4200} = 4.0\%$$

$$u'_{K2} = u_{K2} \frac{P_1}{P_2} = 4.95 \times \frac{4200}{5600} = 3.71\%$$

$$u'_{K3} = u_{K3} \frac{P_1}{P_3} = 6.05 \times \frac{4200}{7500} = 3.39\%$$

$$u'_{K4} = u_{K4} \frac{P_1}{P_4} = 9.82 \times \frac{4200}{10000} = 4.12\%$$

$$u'_{K5} = u_{K5} \frac{P_1}{P_5} = 12.0 \times \frac{4200}{15000} = 3.36\%$$

$K$  值为

$$K = \frac{1}{u'_{K1}} + \frac{1}{u'_{K2}} + \frac{1}{u'_{K3}} + \frac{1}{u'_{K4}} + \frac{1}{u'_{K5}}$$

$$= \frac{1}{4.0} + \frac{1}{3.71} + \frac{1}{3.39} + \frac{1}{4.12} + \frac{1}{3.36} = 1.356$$

换算容量  $P'$  为

$$P' = \frac{P}{K} = \frac{40000}{1.356} = 29500 \text{ kVA}$$

各台变压器负载分配:

第一台负载  $P_{s1}$  为

$$P_{s1} = \frac{P'}{u'_{K1}} = \frac{29500}{4.0} = 7380 \text{ kVA}$$

额定容量为4200kVA，过载75.5%。

第二台负载  $P_{x2}$  为

$$P_{x2} = \frac{P'}{u'_{k2}} = \frac{29500}{3.71} = 7960 \text{ kVA}$$

额定容量 5600 kVA, 过载 42%。

第三台负载  $P_{x3}$  为

$$P_{x3} = \frac{P'}{u'_{k3}} = \frac{29500}{3.39} = 8710 \text{ kVA}$$

额定容量 7500 kVA, 过载 16%。

第四台负载  $P_{x4}$  为

$$P_{x4} = \frac{P'}{u'_{k4}} = \frac{29500}{4.12} = 7160 \text{ kVA}$$

额定容量为 10000 kVA, 欠载 28.4%。

第五台负载  $P_{x5}$  为

$$P_{x5} = \frac{P'}{u'_{k5}} = \frac{29500}{3.36} = 8790 \text{ kVA}$$

额定容量为 15000 kVA, 欠载 41.5%。

总负载  $P$  为

$$\begin{aligned} P &= P_{x1} + P_{x2} + P_{x3} + P_{x4} + P_{x5} \\ &= 7380 + 7960 + 8710 + 7160 + 8790 = 40000 \text{ kVA} \end{aligned}$$

从此例看出, 并联变压器的短路电压值差别太大时, 不能进入并联运行。因此在这种情况下, 具有较小的短路电压的变压器要超载许多, 调节办法是将具有较大短路电压的容量降低, 提高具有较小短路电压的变压器容量。

例5-46 有五台变压器并联运行, 技术数据如下:

$$P_1 = 5600 \text{ kVA} \quad u_{k1} = 4.52\%$$

$$P_2 = 5600 \text{ kVA} \quad u_{k2} = 4.55\%$$

$$P_3 = 4200 \text{ kVA} \quad u_{k3} = 5.20\%$$

$$P_4 = 7500 \text{ kVA} \quad u_{k4} = 4.20\%$$

$$P_5 = 3200 \text{ kVA} \quad u_{k5} = 5.5\%$$

已知总负载为 25000 kVA, 问各台变压器的负载各是多少。

归化到第一台变压器容量的短路电压如下:

$$u'_{k1} = u_{k1} \frac{P_1}{P_1} = 4.52 \times \frac{5600}{5600} = 4.52\%$$

$$u'_{k2} = u_{k2} \frac{P_1}{P_2} = 4.55 \times \frac{5600}{5600} = 4.55\%$$

$$u'_{k3} = u_{k3} \frac{P_1}{P_3} = 5.20 \times \frac{5600}{4200} = 6.94\%$$

$$u'_{k4} = u_{k4} \frac{P_1}{P_4} = 4.20 \times \frac{5600}{7500} = 3.14\%$$

$$u'_{k5} = u_{k5} \frac{P_1}{P_5} = 5.50 \times \frac{5600}{3200} = 9.62\%$$

$K$  值为

$$\begin{aligned} K &= \frac{1}{u'_{k1}} + \frac{1}{u'_{k2}} + \frac{1}{u'_{k3}} + \frac{1}{u'_{k4}} + \frac{1}{u'_{k5}} \\ &= \frac{1}{4.52} + \frac{1}{4.55} + \frac{1}{6.94} + \frac{1}{3.14} + \frac{1}{9.62} \\ &= 1.008 \end{aligned}$$

换算容量  $P'$  为

$$P' = \frac{P}{K} = \frac{2500}{1.008} = 24800 \text{ kVA}$$

各台变压器承担负载:

第一台负载为

$$P_{x1} = \frac{P'}{u'_{k1}} = \frac{24800}{4.52} = 5500 \text{ kVA}$$

额定容量为5600kVA, 欠载2%。

第二台负载为

$$P_{x2} = \frac{P'}{u'_{k2}} = \frac{24800}{4.55} = 5450 \text{ kVA}$$

额定容量为5600kVA, 欠载2.5%。

第三台负载为

$$P_{x3} = \frac{P'}{u'_{k3}} = \frac{24800}{6.94} = 3580 \text{ kVA}$$

额定容量为4200kVA，欠载14.5%。

第四台负载为

$$P_{x4} = \frac{P'}{u'_{k4}} = \frac{24800}{3.14} = 7900 \text{ kVA}$$

额定容量为7500kVA，过载5%。

第五台负载为

$$P_{x5} = \frac{P'}{u'_{k5}} = \frac{24800}{9.62} = 2570 \text{ kVA}$$

额定容量为3200kVA，欠载19.7%。

总负载  $P$  为

$$\begin{aligned} P &= P_{x1} + P_{x2} + P_{x3} + P_{x4} + P_{x5} \\ &= 5500 + 5450 + 3580 + 7900 + 2570 = 25000 \text{ kVA} \end{aligned}$$

从此例看出，如果各台变压器容量相差不多时，变压器负载分配将与短路电压成反比。

例5-47 有四台变压器并联运行，容量相同，都是1000kVA，而短路电压不同： $u_{K1} = 4.8$ ， $u_{K2} = 5.4$ ， $u_{K3} = 5.9$ ， $u_{K4} = 5.5$ ，总负载为3500kVA，试计算各台变压器所承担的负载大小。

$$\begin{aligned} u'_{k1} &= u_{K1} = 4.8\% & u'_{k2} &= u_{K2} = 5.4\% \\ u'_{k3} &= u_{K3} = 5.9\% & u'_{k4} &= u_{K4} = 5.5\% \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} K &= \frac{1}{u'_{k1}} + \frac{1}{u'_{k2}} + \frac{1}{u'_{k3}} + \frac{1}{u'_{k4}} \\ &= \frac{1}{4.8} + \frac{1}{5.4} + \frac{1}{5.9} + \frac{1}{5.5} \\ &= \frac{1}{4.8} + \frac{1}{5.4} + \frac{1}{5.9} + \frac{1}{5.5} = 0.745 \end{aligned}$$

$$P' = \frac{P}{K} = \frac{3500}{0.745} = 4700 \text{ kVA}$$

各台变压器负载如下：

$$P_{x1} = \frac{P'}{u'_{k1}} = \frac{4700}{4.8} = 980 \text{ kVA} \quad \text{欠载 } 2\%$$

$$P_{x2} = \frac{P'}{u'_{k2}} = \frac{4700}{5.4} = 870 \text{ kVA} \quad \text{欠载} 13\%$$

$$P_{x3} = \frac{P'}{u'_{k3}} = \frac{4700}{5.9} = 795 \text{ kVA} \quad \text{欠载} 20.5\%$$

$$P_{x4} = \frac{P'}{u'_{k4}} = \frac{4700}{5.5} = 855 \text{ kVA} \quad \text{欠载} 14.5\%$$

总负载  $P$  为

$$\begin{aligned} P &= P_{x1} + P_{x2} + P_{x3} + P_{x4} = 980 + 870 + 795 + 855 \\ &= 3500 \text{ kVA} \end{aligned}$$

从此例看出，分配负载越多的变压器，其具有的短路损耗越小。

如果总负载等于四台变压器总额定功率  $4000 \text{ kVA}$ ，那么带有小的短路电压的变压器将会超载。现在设  $P = 4000 \text{ kVA}$ ， $K = 0.745$ ，则换算容量为

$$P' = \frac{P}{K} = \frac{4000}{0.745} = 5370 \text{ kVA}$$

各变压器负载为

$$P_{x1} = \frac{P'}{u_{k1}} = \frac{5370}{4.8} = 1120 \text{ kVA} \quad \text{过载} 12\%$$

$$P_{x2} = \frac{P'}{u_{k2}} = \frac{5370}{5.4} = 995 \text{ kVA} \quad \text{欠载} 0.5\%$$

$$P_{x3} = \frac{P'}{u_{k3}} = \frac{5370}{5.9} = 910 \text{ kVA} \quad \text{欠载} 9\%$$

$$P_{x4} = \frac{P'}{u_{k4}} = \frac{5370}{5.5} = 975 \text{ kVA} \quad \text{欠载} 2.5\%$$

总负载  $P$  为

$$\begin{aligned} P &= P_{x1} + P_{x2} + P_{x3} + P_{x4} = 1120 + 995 + 910 + 975 \\ &= 4000 \text{ kVA} \end{aligned}$$

从此例看出，短路电压最小的第一台变压器超载12%，而其余变压器全欠载运行。

例5-48 有四台变压器并联运行，技术数据如下：

$$P_1 = 1850 \text{ kVA} \quad u_{k1} = 5.0\%$$

$$P_2 = 2400 \text{ kVA} \quad u_{k2} = 5.0\%$$

$$P_3 = 1350 \text{ kVA} \quad u_{k3} = 5.0\%$$

$$P_4 = 1000 \text{ kVA} \quad u_{k4} = 5.0\%$$

总负载为6000kVA，问各台变压器分配负载各是多少。

$$\begin{aligned} \sum_1^n P &= P_1 + P_2 + P_3 + P_4 \\ &= 1850 + 2400 + 1350 + 1000 = 6600 \text{ kVA} \end{aligned}$$

由于各台变压器的短路电压相等，所以有

第一台负载  $P_{x1}$  为

$$P_{x1} = \frac{P}{\sum_1^n P} P_1 = \frac{6000}{6600} \times 1850 = 1680 \text{ kVA}$$

占额定功率的90.7%。

第二台负载  $P_{x2}$  为

$$P_{x2} = \frac{P}{\sum_1^n P} P_2 = \frac{6000}{6600} \times 2400 = 1280 \text{ kVA}$$

占额定功率的90.7%

第三台负载  $P_{x3}$  为

$$P_{x3} = \frac{P}{\sum_1^n P} P_3 = \frac{6000}{6600} \times 1350 = 1230 \text{ kVA}$$

占额定功率的90.7%

第四台负载  $P_{x4}$  为

$$P_{x4} = \frac{P}{\sum_1^n P} P_4 = \frac{6000}{6600} \times 1000 = 910 \text{ kVA}$$

占额定功率的90.7%。

总负载  $P$  为

$$\begin{aligned} P &= P_{x1} + P_{x2} + P_{x3} + P_{x4} = 1680 + 2180 + 1230 + 910 \\ &= 6000 \text{ kVA} \end{aligned}$$

从此例看出，具有相同的短路电压的各变压器所分配的负载与其额定功率成正比，因此这四台变压器都在欠载运行，其负载均占额定功率的90.7%，因此并联运行的变压器要求短路电压相等是很必要的，但事实上，既或同一厂家，同一时期所生产的同型变压器的短路电压也不会相同的，因此要求相接近即可，各台变压器的短路电压之差在 $\pm 10\%$ 之内。

### 七、并联运行变压器的容量比

短路电压接近相等还不能保证并联电压器的正常运行，因为对于不同容量的变压器，即使短路电压相等，但其阻抗分量  $u_a$  和感抗分量  $u_p$  不同，表5-1给出具有相同短路电压的三相变压器的  $u_a$  和  $u_p$  值。

表5-1 具有相同短路电压的三相变压器的  $u_a$  及  $u_p$  值

变压器型号	$u_K(\%)$	$u_a(\%)$	$u_p(\%)$
TM5/6	5.5	3.71	4.05
TM10/6	5.5	3.35	4.35
TM100/6	5.5	2.40	4.94
TM1000/10	5.5	1.50	5.29
TM3200/10	5.5	1.16	5.35
TM5600/10	5.5	1.00	5.40

正常的变压器并联运行，应使每相绕组中只流过正常允许的电流，不应有循环电流产生，要达到这个要求，对于并联运行的变压器，不但要求短路电压  $u_K$  相等或接近相等，还要求  $u_K$  的阻抗分量  $u_a$  和感抗分量  $u_p$  的比值  $u_a/u_p$  相等。从表5-1看出，变压器容量不同，虽然  $u_K$  值相同，但  $u_a$  和  $u_p$  值随容量不同而异，因此一般要求并联变压器的容量比不大于3:1，如果不遵守这个规定条件，容量小的变压器将过载，而容量大的变压器又欠载运



行。

另外，制造厂生产的相同容量的变压器， $u_a$ 和 $u_p$ 也不同，就是说并联变压器即使具有相同的短路电压 $u_K$ ，并且容量比控制在3:1，也会出现 $u_a/u_p$ 值不相同，因此引起变压器一次电流 $I_1$ 和二次电流 $I_2$ 因 $u_a/u_p$ 或 $u_a/u_K$ 不相等而产生角位移 $\alpha$ 。下面确定 $I_1$ 、 $I_2$ 与总电流 $I$ 之间关系以及阻抗分量和感抗分量与 $u_K$ 之间的关系。

图5-27给出两台并联运行变压器电压相量图，由于两台并联，所以两台变压器阻抗电压相等，即

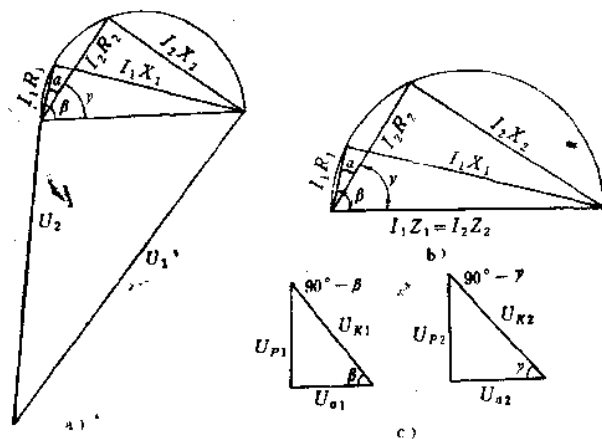


图5-27 两台变压器并联运行时的电压相量图

$$I_1 Z_1 = I_2 Z_2$$

第一台变压器的电压降 $I_1 Z_1$ 是由 $I_1 R_1$ 和 $I_1 X_1$ 组成的。

设 $\beta$ 是第一台变压器阻抗分量 $I_1 R_1$ 与短路电压 $I_1 Z_1$ 之间夹角， $\gamma$ 是第二台变压器的 $I_2 R_2$ 与 $I_2 Z_2$ 间夹角。

$\alpha$ 、 $\beta$ 、 $\gamma$ 之间关系为

$$\alpha = \beta - \gamma$$

图5-28给出电流 $I_1$ 、 $I_2$ 相量图， $I_1$ 和 $I_2$ 间夹角为 $\alpha$ ，下面推导用 $I$ 和 $\alpha$ 表示 $I_1$ 和 $I_2$ 的公式，按余弦定理可写出：

$$I^2 = I_1^2 + I_2^2 - 2I_1 I_2 \cos(180 - \alpha)$$

或

$$I^2 = I_1^2 + I_2^2 + 2I_1I_2\cos\alpha$$

变压器容量比值用  $m$  表示, 则有

$$\frac{P_2}{P_1} = m$$

或

$$\frac{I_2}{I_1} = m$$

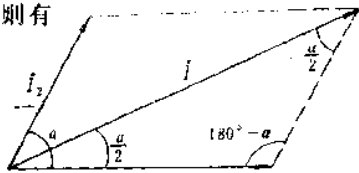


图5-28 电流  $I_1$ 、 $I_2$  相量图

由此得  $I_2 = mI_1$ , 将此式代入上式, 得到:

$$I^2 = I_1^2 + m^2I_1^2 + 2mI_1^2\cos\alpha = I_1^2(1 + m^2 + 2m\cos\alpha)$$

$$\therefore I_1 = \frac{I}{\sqrt{1 + m^2 + 2m\cos\alpha}}$$

$$I_2 = \frac{mI}{\sqrt{1 + m^2 + 2m\cos\alpha}}$$

式中  $I_1$ 、 $I_2$ ——第一台和第二台变压器的电流(A),

$I$ ——总负载电流(A)。

从图5-27相量图中得到  $\alpha = \beta - \gamma$ , 于是有

$$\cos\alpha = \cos(\beta - \gamma) = \cos\beta\cos\gamma + \sin\beta\sin\gamma$$

$\sin\beta$ 、 $\sin\gamma$ 、 $\cos\beta$ 和  $\cos\gamma$  可从图5-27c 中的直角三角形求得, 于是得到:

$$\sin\beta = \frac{u_{p1}}{u_{K1}}$$

$$\cos\beta = \frac{u_{a1}}{u_{K1}}$$

$$\sin\gamma = \frac{u_{p2}}{u_{K2}}$$

$$\cos\gamma = \frac{u_{a2}}{u_{K2}}$$

将此四式代入上式, 得到:

$$\begin{aligned} \cos\alpha &= \cos\beta\cos\gamma + \sin\beta\sin\gamma \\ &= \frac{u_{a1}}{u_{K1}} \frac{u_{a2}}{u_{K2}} + \frac{u_{p1}}{u_{K1}} \frac{u_{p2}}{u_{K2}} \end{aligned}$$

或 
$$\cos \alpha = \frac{u_{a1}}{u_{K1}} \frac{u_{a2}}{u_{K2}} + \frac{u_{p1}}{u_{K1}} \frac{u_{p2}}{u_{K2}}$$

如果知道变压器短路电压  $u_{K1}(\%)$ 、 $u_{K2}(\%)$  和短路损耗  $P_{K1}$ 、 $P_{K2}$ ，则  $u_{a1}$ 、 $u_{a2}$  和  $u_{p1}$ 、 $u_{p2}$  可按下式计算出来：

$$u_a = \frac{P_K}{10P_N} (\%)$$

$$u_p = \sqrt{u_K^2 - u_a^2} (\%)$$

式中  $P_K$ ——变压器短路损耗，可从变压器短路试验中得到，也可查表；

$P_N$ ——变压器额定功率 (kVA)。

下面研究电流  $I_1$  和  $I_2$  的计算情况：

第一种情况，各台并联变压器的  $\frac{u_a}{u_K}$  相同， $\frac{u_p}{u_K}$  也相同，则

有

$$\cos \alpha = \frac{u_{a1}^2}{u_{K1}^2} + \frac{u_{p1}^2}{u_{K1}^2} = \frac{u_{K1}^2}{u_{K1}^2} = 1$$

所以

$$I_1 = \frac{I}{1+m}$$

$$I_2 = \frac{mI}{1+m}$$

在这种特殊情况下，各变压器之间负载分配与其容量成正比。

第二种情况 除了  $\frac{u_a}{u_K}$  和  $\frac{u_p}{u_K}$  相同之外，各台变压器容量也

相同，即  $m = \frac{P_1}{P_2} = 1$ ，则有

$$I_1 = I_2 = \frac{I}{2}$$

说明在这种情况下，每台变压器按平均负载分配。

**例5-49** 两台三相变压器具有相同的  $u_K\%$  值，但是容量不

同，试确定负载电流如何分配，已知各台变压器参数如下：

第一台变压器

第二台变压器

$$P_{N1} = 10 \text{ kVA}$$

$$P_{N2} = 1000 \text{ kVA}$$

$$u_{K1} = 5.5\%$$

$$u_{K2} = 5.5\%$$

$$u_{a1} = 3.35\%$$

$$u_{a2} = 1.5\%$$

$$u_{p1} = 4.35\%$$

$$u_{p2} = 5.29\%$$

计算  $\cos\alpha$ ，即

$$\begin{aligned} \cos\alpha &= \frac{u_{a1}}{u_{K1}} \frac{u_{a2}}{u_{K2}} + \frac{u_{p1}}{u_{K1}} \frac{u_{p2}}{u_{K2}} \\ &= \frac{3.35}{5.5} \times \frac{1.5}{5.5} + \frac{4.35}{5.5} \times \frac{5.29}{5.5} = 0.926 \end{aligned}$$

容量比  $m$  为

$$m = \frac{P_2}{P_1} = \frac{1000}{10} = 100$$

第一台变压器负载电流  $I_1$  为

$$\begin{aligned} I_1 &= \sqrt{\frac{I^2}{1 + 100^2 + 2 \times 100 \times 0.926}} = \sqrt{\frac{I}{10186.2}} \\ &= 0.00908 I \end{aligned}$$

第二台变压器负载电流  $I_2$

$$I_2 = \frac{100}{100 \times 92} = 0.99092 I$$

如果  $\frac{u_{a1}}{u_{K1}} = \frac{u_{a2}}{u_{K2}}$ ， $\frac{u_{p1}}{u_{K1}} = \frac{u_{p2}}{u_{K2}}$ ，则各台变压器负载电流变为

$$I_1 = \frac{I}{1 + m} = \frac{I}{1 + 100} = 0.009901 I$$

$$I_2 = \frac{mI}{1 + m} = \frac{100I}{101} = 0.9901 I$$

可见，即使变压器的短路电压相同，而容量不同时，可得到不同的负载分配。

对于第一台变压器负载电流  $I_1$  的误差为

$$\frac{0.009908 - 0.009901}{0.009908} \times 100\% = +0.08\%$$

对于第二台变压器负载电流  $I_2$  的误差为

$$\frac{0.990092 - 0.990099}{0.990092} \times 100\% = -0.007\%$$

例5-50 两台三相变压器并联运行，短路电压相同，问负载如何分配，变压器数据如下：

第一台变压器	第二台变压器
$P_1 = 1000 \text{ kVA}$	$P_2 = 3200 \text{ kVA}$
$u_{K1} = 5.5\%$	$u_{K2} = 5.5\%$
$u_{a1} = 1.5\%$	$u_{a2} = 1.16\%$
$u_{p1} = 5.29\%$	$u_{p2} = 5.35\%$

(1)  $\cos\alpha$  值

$$\cos\alpha = \frac{1.5}{5.5} \times \frac{1.16}{5.5} + \frac{5.29}{5.5} \times \frac{5.35}{5.5} = 0.989$$

(2)  $m$  值

$$m = \frac{P_2}{P_1} = \frac{3200}{1000} = 3.2$$

(3) 第一台变压器负载电流  $I_1$

$$I_1 = \frac{I}{\sqrt{1 + 3.2^2 + 2 \times 3.2 \times 0.989}} = 0.239 I$$

(4) 第二台变压器负载电流  $I_2$

$$I_2 = 0.239 \times 3.2 I = 0.761 I$$

如果  $\frac{u_a}{u_K}$  和  $\frac{u_p}{u_K}$  相等，那么  $I_1$  和  $I_2$  为

$$I_1 = \frac{I}{1 + m} = \frac{I}{4.2} = 0.238 I$$

$$I_2 = \frac{mI}{1 + m} = \frac{3.2I_1}{4.2} = 0.762 I$$

与上面计算的结果差值为

$$\frac{0.239}{0.238} \times 100\% = 100.4\% \quad \text{即} +0.4\%$$

$$\frac{0.761}{0.762} \times 100\% = 99.87\% \quad \text{即} -0.13\%$$

例5-51 两台三相变压器并联运行,问负载电流如何分配,已知数据如下:

第一台变压器

第二台变压器

$$P_1 = 3200 \text{ kVA}$$

$$P_2 = 5600 \text{ kVA}$$

$$u_{K1} = 5.5\%$$

$$u_{K2} = 5.8\%$$

短路损耗 37 kW

短路损耗 56 kW

确定短路电压的阻抗分量  $u_{a1}$  和感抗分量  $u_{p1}$

$$u_{a1} = \frac{P_K}{100P} \times 100\% = \frac{37000}{32000} \times 100\% = 1.16\%$$

$$u_{p1} = \sqrt{u_{K1}^2 - u_{a1}^2} \times 100\% = \sqrt{5.5^2 - 1.16^2} \times 100\% = 5.35\%$$

$$u_{a2} = \frac{56000}{56000} \times 100\% = 1.00\%$$

$$u_{p2} = \sqrt{5.8^2 - 1^2} \times 100\% = 5.7\%$$

$\cos\alpha$  值为

$$\cos\alpha = \frac{1.16}{5.5} \times \frac{1.00}{5.8} + \frac{5.35}{5.5} \cdot \frac{5.7}{5.8} = 0.993$$

容量比  $m$  为

$$m = \frac{5600}{3200} = 1.75$$

第一台变压器负载电流  $I_1$  为

$$I_1 = \sqrt{\frac{I^2}{1 + 1.75^2 + 2 \times 1.75 \times 0.993}} = 0.367 I$$

第二台变压器负载电流  $I_2$  为

$$I_2 = 1.75 \times 0.367 I = 0.633 I$$

如果  $\frac{u_a}{u_K}$  和  $\frac{u_b}{u_K}$  相等, 则  $I_1$ 、 $I_2$  为

$$I_1 = \frac{I}{1+m} = \frac{I}{2.75} = 0.363 I$$

$$I_2 = \frac{mI}{1+m} = \frac{1.75I}{2.75} = 0.637 I$$

产生的误差为

$$\frac{0.367}{0.363} \times 100\% = 101.1\%, \text{ 即 } +1.1\%$$

$$\frac{0.633}{0.637} \times 100\% = 99.3\%, \text{ 即 } -0.7\%$$

例5-52 两台容量相同变压器并联运行, 问负载如何进行分配, 其技术数据如下:

第一台变压器	第二台变压器
$P_1 = 15000 \text{ kVA}$	$P_1 = 15000 \text{ kVA}$
$u_K = 10.4\%$	$u_K = 10.5\%$
短路损耗 133 kW	短路损耗 133 kW

变压器短路损耗  $u_K$  的阻抗分量和感抗分量为

$$u_{s1} = u_{s2} = \frac{P_K}{10P} \times 100\% = \frac{133000}{150000} = 0.885\%$$

$$u_{p1} = \sqrt{u_{K1}^2 - u_{s1}^2} \times 100\% = \sqrt{10.4^2 - 0.885^2} \times 100\% \\ = 10.36\%$$

$$u_{p2} = \sqrt{u_{K2}^2 - u_{s2}^2} \times 100\% = \sqrt{10.5^2 - 0.885^2} \times 100\% \\ = 10.47\%$$

$\cos\alpha$  值为

$$\cos\alpha = \frac{0.885}{10.4} \times \frac{0.885}{10.5} + \frac{10.36}{10.4} \times \frac{10.47}{10.5} = 0.9995$$

变压器负载电流:

第一台变压器负载电流  $I_1$  为

$$I_1 = \sqrt{\frac{I}{1+1+2 \times 0.9995}} = \sqrt{\frac{I}{3.998}} = 0.50 I$$

$$I_2 = 0.50 I$$

### 八、确定并联变压器的最佳台数

为了满足电力系统总容量的需要，可以用数台变压器并联运行。到底选用多少台变压器并联运行合适，要以所有变压器空载损耗  $P_0$  和额定负载损耗  $P_K$  最小为依据。

变压器负载损耗  $P'_K$  等于变压器额定负载损耗  $P_K$  与负载率  $\beta$  的平方乘积，即

$$P'_K = \beta^2 P_K$$

式中  $P'_K$ ——变压器负载率为  $\beta$  时的负载损耗；

$\beta$ ——变压器实际负载与其额定负载的比值；

$P_K$ ——变压器额定时的短路损耗。

负载损耗  $P'_K$  在  $\beta = 0$ （变压器不带载）和  $\beta = 1$ （变压器带满载）范围内变化。

空载损耗  $P_0$  不管在  $\beta = 0$  或  $\beta = 1$  的所有情况下总是存在的，而且数值不变，所以变压器总损耗中，不管变压器处于小负载还是满载时，总要包含空载损耗，因此希望变压器采用单位损耗低的冷轧硅钢片制造铁心（ $0.5 \text{ W/kg}$  或更小，磁通密度  $B = 1 \text{ T}$ ）。

当几台变压器并联运行时，要降低总损耗值，这就要求合理并联变压器的最佳台数以降低总损耗。

下面研究一台变压器与两台变压器带相同负载条件下，看哪个方案损耗最小，更合理。

一台变压器总损耗为

$$P_0 + \beta^2 P_K$$

两台变压器总损耗

$$2P_0 + 2 \left( \frac{\beta}{2} \right)^2 P_K$$



当一台变压器和两台变压器总损耗相等时, 即

$$P_0 + \beta^2 P_K = 2P_0 + 2 \left( \frac{\beta}{2} \right)^2 P_K$$

由此等式解出负载率  $\beta$ , 即

$$\beta = \sqrt{\frac{2P_0}{P_K}}$$

当一台变压器带负载比两台变压器并联带相同负载时总损耗低, 即  $\beta < \beta_2$  ( $\beta_2$  指两台并联运行时的负载率)。

当一台变压器带负载比两台变压器带相同负载时损耗大, 即  $\beta > \beta_2$ 。

有两台 1000kVA 变压器, 已知短路损耗  $P_K = 15000\text{W}$ , 空载损耗  $P_0 = 5000\text{W}$ , 则有

$$P_K/P_0 = \frac{15000}{5000} = 3$$

$$\therefore \beta_2 = \sqrt{\frac{2P_0}{P_K}} = \sqrt{\frac{2}{3}} = 0.816$$

也就是说, 当负载为  $0.816 \times 1000\text{kVA} = 816\text{kVA}$  时或大于  $816\text{kVA}$  时, 两台变压器并联运行比一台变压器带同样的负载损耗要小。

为了证实这个问题, 下面用两种负载来检验上面的说明。

一种情况负载为  $500\text{kVA}$  ( $0.5 < 0.816$ ), 另一种情况负载为  $1000\text{kVA}$  ( $1 > 0.816$ )。

第一种情况 (负载为  $500\text{kVA}$ ,  $\beta = 0.5$ ) :

(1) 采用一台变压器带载时其总损耗

$$P_0 + \beta^2 P_K = 5000 + 0.5^2 \times 15000 = 8750\text{W}$$

(2) 采用两台变压器带相同负载时其总损耗

$$2P_0 + 2 \left( \frac{\beta}{2} \right)^2 P_K = 2 \times 5000 + 2 \left( \frac{0.5}{2} \right)^2 \times 15000$$

$$= 11875\text{W}$$

显见, 两台并联运行不合理, 总损耗比单台运行时大  $3125\text{W}$ 。

第二种情况 (负载为  $1000\text{kVA}$ ,  $\beta = 1$ ) :

(1) 用单台变压器时总损耗

$$P_0 + \beta^2 P_K = 5000 + 1^2 \times 15000 = 20000 \text{ W}$$

(2) 两台变压器并联运行时总损耗

$$\begin{aligned} 2P_0 + 2 \left( \frac{\beta}{2} \right)^2 P_K &= 2 \times 5000 + 2 \left( \frac{1}{2} \right)^2 \times 15000 \\ &= 17500 \text{ W} \end{aligned}$$

可见, 在这种情况下 ( $\beta > 0.816$ ), 两台并联运行比单台运行合理, 总损耗降低 2500 W。

下面再检查负载为  $0.816 \times 1000 = 816 \text{ kVA}$  的两种情况。

第一种情况, 单台运行时总损耗为

$$P_0 + \beta^2 P_K = 5000 + 0.816^2 \times 15000 = 15000 \text{ W}$$

第二种情况, 两台并联运行的总损耗为

$$\begin{aligned} 2P_0 + 2 \left( \frac{\beta}{2} \right)^2 P_K &= 2 \times 5000 + 2 \left( \frac{0.816}{2} \right)^2 \times 15000 \\ &= 15000 \text{ W} \end{aligned}$$

可见两种情况的总损耗一样。

当负载为 816 kVA 或大于 816 kVA 时, 可用两台 1000 kVA 变压器并联运行, 负载越大, 总损耗越低; 当负载少于 816 kVA, 应去掉一台变压器, 只用一台 1000 kVA 变压器运行, 这样可实现低损耗的经济运行。

如果不是两台并联运行, 而是三台, 则损耗平衡方程式为

$$2P_0 + 2 \left( \frac{\beta}{2} \right)^2 P_K = 3P_0 + 3 \left( \frac{\beta}{3} \right)^2 P_K$$

$$2 \left( \frac{\beta}{2} \right)^2 P_K - 3 \left( \frac{\beta}{3} \right)^2 P_K = P_0$$

故 
$$\beta^2 = \frac{6P_0}{P_K} \quad \therefore \beta_3 = \sqrt{\frac{6P_0}{P_K}}$$

三台变压器并联时的负载率用脚标 3 表示, 即  $\beta_3$ , 而两台时用 2, 即  $\beta_2$ ,  $n$  台时用  $\beta_n$  表示。

当  $\beta > \beta_3$  时, 可采用三台变压器并联运行比较经济。

当四台变压器并联运行时, 则有

$$3P_0 + 3\left(\frac{\beta}{3}\right)^2 P_K = 4P_0 + 4\left(\frac{\beta}{4}\right)^2 P_K$$

故

$$\beta_4 = \sqrt{\frac{12P_0}{P_K}}$$

当  $\beta > \beta_4$  时, 采用四台变压器并联运行比较经济。

当有  $n$  台变压器并联运行时, 可得到:

$$\beta_n = \sqrt{\frac{n(n-1)P_0}{P_K}}$$

当  $\beta > \beta_n$  时, 采用  $n$  台变压器并联运行比较经济。

国产电力变压器的  $P_0$  和  $P_K$  值可查表5-2~表5-22。

对于容量在20000kVA及以下, 高压电压在38.5kV的国外电力变压器则有

$$\frac{P_K}{P_0} \approx 3$$

对于3200~31500kVA 三相变压器, 高压为121kV时, 则有

$$\frac{P_K}{P_0} \approx 2.5$$

特大容量变压器,  $P_K/P_0$  则更小些。

**例5-53** 有四台变压器并联运行, 每台容量为1000kVA, 并具有相同的损耗:  $P_0 = 5000\text{W}$ ,  $P_K = 15000\text{W}$ , 试确定出总损耗最小的负载率  $\beta_4$  是多大。

$$\beta_4 = \sqrt{\frac{12P_0}{P_K}} = \sqrt{\frac{12 \times 5000}{15000}} = \sqrt{\frac{4}{4}} = 2$$

当  $\beta > \beta_4 = 2$  时, 即负载大于  $2 \times 1000 = 2000\text{kVA}$  时, 采用四台变压器并联运行有利。

下面检查这个结论是否正确:

设负载为2500kVA,  $\beta > \beta_4$ , 看三台并联和四台变压器并联时, 哪个方案更有利。

(1) 采用三台变压器并联运行时

$$\beta_3 = \frac{2500}{1000} = 2.5 > 2$$

三台并联时总损耗为

$$\begin{aligned} 3P_0 + 3\left(\frac{\beta}{3}\right)^2 P_K &= 3 \times 5000 + 3\left(\frac{2.5}{3}\right)^2 \times 15000 \\ &= 46250 \text{ W} \end{aligned}$$

四台并联时，总损耗为

$$\begin{aligned} 4P_0 + 4\left(\frac{\beta}{4}\right)^2 P_K &= 4 \times 5000 + 4\left(\frac{2.5}{4}\right)^2 \times 15000 \\ &= 43800 \text{ W} \end{aligned}$$

可见，四台并联的总损耗比三台并联时少2450W。

再检查一下当负载为1500kVA时的情况：

$$\beta = \frac{1500}{1000} = 1.5 \quad (\beta < \beta_4)$$

三台并联时总损耗为

$$\begin{aligned} 3P_0 + 3\left(\frac{\beta}{3}\right)^2 P_K &= 3 \times 5000 + 3\left(\frac{1.5}{3}\right)^2 \times 15000 \\ &= 26250 \text{ W} \end{aligned}$$

四台并联时总损耗为

$$\begin{aligned} 4P_0 + 4\left(\frac{\beta}{4}\right)^2 P_K &= 4 \times 5000 + 4\left(\frac{1.5}{4}\right)^2 \times 15000 \\ &= 28400 \text{ W} \end{aligned}$$

可见，四台并联时的总损耗比三台并联多2150W，这时就应该脱掉一台变压器，让三台变压器并联运行。

例5-54 试确定两台变压器并联运行比单台变压器运行时损耗少，这时负载控制多大有利。

已知变压器技术参数如下：

$$P_N = 10000 \text{ kVA}$$

$$P_K = 100 \text{ kW}$$

$$P_0 = 40 \text{ kW}$$

两台并联时  $\beta_2$  为

$$\beta_2 = \sqrt{\frac{2P_0}{P_K}} = \sqrt{\frac{2 \times 40}{100}} = 0.892$$

当负载等于或大于  $0.892 \times 10000 = 8920 \text{ kVA}$  时, 采用两台变压器并联运行更有利。

现在检查当负载为  $10000 \text{ kVA}$  ( $\beta = 1$ ) 时的情况,

单台变压器运行时的总损耗为

$$P_0 + \beta^2 P_K = 40 + 1^2 \times 100 = 140 \text{ kW}$$

两台并联运行时的总损耗为

$$\begin{aligned} 2P_0 + 2\left(\frac{\beta}{2}\right)^2 P_K &= 2 \times 40 + 2\left(\frac{1}{2}\right)^2 \times 100 \\ &= 130 \text{ kW} \end{aligned}$$

可见两台变压器并联运行时总损耗比单台运行少  $10 \text{ kW}$ 。

例5-55 仍用上例, 只是  $P_0 = 20 \text{ kW}$ , 短路损耗  $P_K = 100 \text{ kW}$  不变, 试确定  $\beta_2$  值是多大。

$$\beta_2 = \sqrt{\frac{2 \times 20}{100}} = 0.63$$

当负载为  $0.63 \times 10000 = 6300 \text{ kVA}$  及以下时, 将两台并联运行的变压器脱掉一台, 采用单台变压器运行更有利。

例5-56 两台变压器并联运行, 额定功率为  $5600 \text{ kVA}$ , 已知损耗值如下:

第一台变压器	第二台变压器
$P_0 = 18 \text{ kW}$	$P_0' = 17.5 \text{ kW}$
$P_K = 55.8 \text{ kW}$	$P_K' = 54.2 \text{ kW}$

试确定负载为多大时, 采用两台并联运行有利。

损耗比值:

第一台变压器为

$$\frac{P_K''}{P_0} = \frac{55.8}{18} = 3.1$$

第二台变压器为

$$\frac{P_K''}{P_0''} = \frac{54.2}{17.5} = 3.1$$

两台并联运行时的负载率 $\beta_2$ 为

$$\beta_2 = \sqrt{\frac{2P_0}{P_K}} = \sqrt{\frac{2}{3.1}} = 0.8$$

$$0.8 \times 5600 = 4480 \text{ kVA}$$

当负载小于4480kVA时，必须单台变压器运行；当负载大于4480kVA时，必须两台变压器并联运行。

现在研究当负载分别为4000kVA( $\beta = 0.714$ )和5000kVA( $\beta = 0.892$ )时两种运行情况。

(1) 当负载为4000kVA( $\beta = 0.714$ ,  $\beta^2 = 0.51$ )

单台运行的损耗为

$$P_0' + \beta^2 P_N = 18 + 0.51 \times 55.8 = 46.5 \text{ kW}$$

两台并联运行的损耗为

$$\begin{aligned} (P_0' + P_0'') + \left(\frac{\beta}{2}\right)^2 (P_{K'} + P_{K''}) &= (18 + 17.5) + \\ \frac{0.51}{4} (55.8 + 54.2) &= 49.35 \text{ kW} \end{aligned}$$

在此负载下单台运行有利。

(2) 当负载为5000kVA( $\beta = 0.892$ ,  $\beta^2 = 0.80$ )单台运行的总损耗为

$$P_0' + \beta^2 P_{K'} = 18 + 0.8 \times 55.8 = 62.5 \text{ kW}$$

两台并联运行的总损耗为

$$\begin{aligned} (P_0' + P_0'') + \left(\frac{\beta}{2}\right)^2 (P_{K'} + P_{K''}) &= (18 + 17.5) \\ + \frac{0.8}{4} (55.8 + 54.2) &= 57.5 \text{ kW} \end{aligned}$$

两台并联运行有利。

表5-2 30~1600kVA双绕组无励磁调压配电变压器

额定容量 (kVA)	电 压 组 合			联结组 标号	空载损耗 (kW)	负载损耗 (kW)	空载电流 (%)	阻抗 电压 (%)
	高 压 (kV)	高压分 接范围	低 压 (kV)					
30	6, 6.3, 10, 10.5, 11	±5%	0.4	Y, yn0	0.15	0.8	2.8	4
50				0.19	1.15	2.6		
				0.19	1.25	2.6		
63				0.22	1.40	2.5		
				0.225	1.50	2.7		
80				0.27	1.65	2.4		
				0.275	1.80	2.6		
100				0.32	2.00	2.3		
				0.325	2.15	2.5		
125				0.37	2.45	2.2		
				0.38	2.50	2.4		
160				0.46	2.85	2.1		
				0.47	3.10	2.3		
200				0.54	3.40	2.1		
				0.55	3.60	2.3		
250				0.64	4.00	2.0		
				0.66	4.30	2.2		
315				0.76	4.80	2.0		
				0.78	5.20	2.2		
400				0.92	5.80	1.9		
	0.94	6.20	2.0					
500	1.08	6.90	1.9					
	1.10	7.40	2.0					

(续)

额定容量 (kVA)	电 压 组 合			联结组 标号	空载损耗 (kW)	负载损耗 (kW)	空载电流 (%)	阻抗 电压 (%)
	高 压 (kV)	高压分 接范围	低 压 (kV)					
630	6			Y, yn0	1.30	8.10	1.8	4.5
800	6.3				1.54	9.90	1.5	
1000	10	±5%	0.4		1.80	11.60	1.2	
1250	10.5				2.20	13.80	1.2	
1600	11				2.65	16.50	1.1	

注：1.表中横线上方的数值为 Y, yn0 联结组变压器用，横线下方的数值为 Y, zn11 联结组变压器用。

2.根据要求变压器的高压分接范围可供  $\pm 2 \times 2.5\%$ 。

表5-3 630~6300kVA双绕组无励磁调压变压器

额定容量 (kVA)	电 压 组 合			联结组 标号	空载损耗 (kW)	负载损耗 (kW)	空载电流 (%)	阻抗 电压 (%)
	高 压 (kV)	高压分 接范围	低 压 (kV)					
630				Y, d11	1.30	8.1	1.8	5.5
800					1.54	9.9	1.5	
1000			3.00		1.80	11.6	1.2	
1250	6, 6.3,		3.15		2.20	13.8	1.2	
1600	10, 10.5,		6.3		2.65	16.5	1.1	
2000	11	±5%			3.10	19.8	1.0	
2500					3.65	23.0	1.0	
3150					4.40	27.0	0.9	
4000					5.30	32.0	0.8	
5000	10, 10.5,		3.15, 6.3		6.40	36.7	0.8	
6300	11			7.50	41.0	0.7		

注：根据要求变压器的高压分接范围可供  $\pm 2 \times 2.5\%$ 。



表5-4 200~1600kVA双绕组有载调压变压器

额定容量 (kVA)	电 压 组 合			联结组 标号	空载损耗 (kW)	负载损耗 (kW)	空载电流 (%)	阻抗 电压 (%)
	高 压 (kV)	高压分 接范围	低 压 (kV)					
200					0.54	3.4	2.1	4
250					0.64	4.0	2.0	
315					0.76	4.8	2.0	
400					0.92	5.8	1.9	
500	6, 6.3,	±4× 2.5%	0.4	Y, yn0	1.08	6.9	1.9	
630	10				1.40	8.5	1.8	
800					1.66	10.4	1.8	4.5
1000					1.93	12.18	1.7	
1250					2.35	14.49	1.6	
1600					3.00	17.3	1.5	

注：根据使用部门的需要可提供高压绕组为10.5及11kW。

表5-5 50~1600kVA双绕组无励磁调压配电变压器

额定容量 (kVA)	电 压 组 合			联结组 标号	空载损耗 (kW)	负载损耗 (kW)	空载电流 (%)	阻抗 电压 (%)
	高 压 (kV)	高压分 接范围	低 压 (kV)					
50					0.265	1.35	2.8	6.5
100					0.27	2.25	2.6	
125					0.42	2.65	2.5	
160					0.47	3.15	2.4	
200					0.55	3.70	2.2	
250					0.64	4.40	2.0	
315	35	±5%	0.4	Y, yn0	0.76	5.30	2.0	
400					0.92	6.40	1.9	
500					1.08	7.70	1.9	
630					1.30	9.20	1.8	
800					1.54	11.00	1.5	
1000					1.80	13.50	1.4	
1250					2.20	16.30	1.2	
1600					2.65	19.50	1.1	

注：根据要求变压器的高压分接范围可供±2×2.5%。

表5-6 800~31500kVA双绕组无励磁调压电力变压器

额定容量 (kVA)	电 压 组 合			联结组 标号	空载损耗 (kW)	负载损耗 (kW)	空载电流 (%)	阻抗 电压 (%)	
	高 压 (kV)	高压分 接范围	低 压 (kV)						
800	35	±5%	3.15	Y, d11	1.54	11.0	1.6	6.5	
1000					1.80	13.5	1.4		
1250					2.20	16.3	1.3		
1600					2.65	19.5	1.2		
2000					3.40	19.8	1.1		
2500					4.00	23.0	1.1		
3150	35, 38.5	±5%	3.15	Y, d11	4.75	27.0	1.0	7	
4000			6.3		5.65	32.0	1.0	7	
5000			6.3		6.75	36.7	0.9	7	
6300			10.5		8.20	41.0	0.9	7.5	
8000	35, 38.5	±2× 2.5%	3.15	YN, d11	11.5	45	0.8	7.5	
10000					13.6	53	0.8	7.5	
12500					3.3	16.0	63	0.7	8
16000					6.3	19.0	77	0.7	8
20000					6.5	22.5	93	0.7	8
25000					10.5	26.6	112	0.6	8
25000					10.5	26.6	112	0.6	8
31500					11	31.6	132	0.6	8

注：根据要求高压分接范围可供±2×2.5%。

表5-7 2000~12500kVA双绕组有载调压变压器

额定容量 (kVA)	电 压 组 合			联结组 标号	空载损耗 (kW)	负载损耗 (kW)	空载电流 (%)	阻抗 电压 (%)
	高 压 (kV)	高压分 接范围	低 压 (kV)					
2000	35	±3× 2.5%	6.3, 10.5	Y, d11	3.60	20.08	1.4	6.5
2500					4.25	24.15	1.4	
3150	35, 38.5	±3× 2.5%	6.3, 10.5	Y, d11	5.05	28.90	1.3	7.0
4000					6.05	34.10	1.3	
5000					7.25	40.00	1.2	
6300					8.80	43.00	1.2	
8000	35, 38.5	±3× 2.5%	6.3, 6.6	YN, d11	12.30	47.50	1.1	7.5
10000			10.5, 11		14.50	56.20	1.1	
12500			10.5, 11		17.10	66.50	1.0	
12500			10.5, 11		17.10	66.50	1.0	

表5-8 630~6300kVA双绕组无励磁调压变压器

额定容量 (kVA)	电 压 组 合			联结组 标号	空载损耗 (kW)	负载损耗 (kW)	空载电流 (%)	阻抗 电压 (%)
	高 压 (kV)	高压分 接范围	低 压 (kV)					
630	60, 63, 66	±5%	6.3, 6.6, 10.5, 11	Y, d11	2.0	8.4	2.0	8
1000					2.0	11.6	1.9	
1600					3.9	16.5	1.8	
2000					4.6	19.5	1.7	
2500					5.4	23	1.6	
3150					6.4	27	1.5	
4000	7.6	32	1.4	9				
5000	9.0	36	1.3					
6300	60, 63, 66	±2× 2.5%	6.3, 6.6, 10.5, 11		YN, d11	11.6	40	1.2
8000						14.0	47.5	1.1
10000						16.5	56	1.1
12500						19.5	66.5	1.0
16000						23.5	81.7	1.0
20000						27.5	99	0.9
25000						32.5	117	0.9
31500						38.5	141	0.8
40000						46.0	165.5	0.8
50000				55.0		205	0.7	
63000				65.0		247	0.7	

表5-9 6300~63000kVA双绕组有载调压变压器

额定容量 (kVA)	电 压 组 合			联结组 标号	空载损耗 (kW)	负载损耗 (kW)	空载电流 (%)	阻抗 电压 (%)
	高 压 (kV)	高压分 接范围	低 压 (kV)					
6300	60, 63, 66	±8× 1.25%	6.3, 6.6, 10.5, 11	YN, d11	12.5	40	1.3	9
8000					15.0	47.5	1.2	
10000					17.8	56	1.1	
12500					21.0	66.5	1.0	
16000					25.3	81.7	1.0	
20000					30	99	0.9	
25000					35.5	117	0.9	
31500					42.2	141	0.8	
40000					50.5	165.5	0.8	
50000					58.7	205	0.7	
63000					71	247	0.7	

表5-10 6300~120000kVA双绕组无励磁调压变压器

额定容量 (kVA)	电压组合			联结组 标号	I		II		负载 损耗 (kW)	阻抗 电压 (%)
	高压 (kV)	高压分 接范围	低压 (kV)		空载 损耗 (kW)	空载 电流 (%)	空载 损耗 (kW)	空载 电流 (%)		
6300					11.6	1.1	12.5	1.4	41	
8000					14	1.1	15	1.4	50	
10000					16.5	1.0	18	1.3	59	
12500					19.5	1.0	21.2	1.3	70	
16000			6.3,		23.5	0.9	25	1.2	86	
20000	110,	$\pm 2 \times$	6.6	YN, d11	27.5	0.9	30	1.2	104	10.5
25000	121	2.5%	10.5,		32.5	0.8	35	1.1	123	
31500					38.5	0.8	42	1.1	148	
40000			11		46	0.7	50	1.0	174	
50000					55	0.7	60	1.0	216	
63000					65	0.6	70	0.9	260	
90000					85	0.6	93	0.9	330	
120000					106	0.5	116	0.8	422	

注: 1.表中带“\*”号标记的电压作为降压变压器用。  
 2.表中所列组II数据为过流标准。

表5-11 6300~63000kVA三绕组无励磁调压变压器

额定 容量 (kVA)	电压组合及分接范围			联结 组标 号	I		II		负载 损耗 (kW)	阻抗电压(%)	
	高压 (kV)	中压 (kV)	低压 (kV)		空载 损耗 (kW)	空载 电流 (%)	空载 损耗 (kW)	空载 电流 (%)		升压	降压
6300					14	1.3	16	1.7	53		
8000					16.6	1.3	19	1.7	63		
10000		35,		YN, y <sub>0</sub> , d11	19.8	1.2	22	1.6	74	高一中	高一中
12500	110*	38.5,	6.3,		23	1.2	26	1.6	87	17~18	10.5
16000		$\pm 2 \times$	6.6,		28	1.1	31.5	1.5	106	高一低	高一低
20000	121	2.5%			33	1.1	36.5	1.5	125	10.5	17~18
25000	$\pm 2 \times$		10.5		38.5	1.0	42.5	1.4	148		
31500	2.5%		11		46	1.0	50	1.4	175	中一低	中一低
40000		35,			54.5	1.9	60	1.3	210	6.5	6.5
50000		38.5			65	0.9	70	1.3	250		
63000		$\pm 5 \%$			77	0.8	83	1.2	300		

注: 1.表中带“\*”号标记的电压作为降压变压器用。  
 2.高、中、低压绕组的额定容量均为100%。  
 3.根据需要联结组标号可为YN, d11, y10。  
 4.表中所列组II数据为过流标准。

表5-12 6300~63000kVA双绕组有载调压变压器

额定容量 (kVA)	电 压 组 合			联结组 标号	空载损耗 (kW)	负载损耗 (kW)	空载电流 (%)	阻抗电压 (%)
	高 压 (kV)	高压分 接范围	低 压 (kV)					
6300	110	$\pm 8 \times$ 1.25%	6.3, 6.6, 10.5, 11	YN, d11	12.5	41	1.4	10.5
8000					15.0	50	1.4	
10000					17.8	59	1.3	
12500					21.0	70	1.3	
16000					25.3	86	1.2	
20000					30.0	104	1.2	
25000					35.5	123	1.1	
31500					42.2	148	1.1	
40000					50.5	174	1.0	
50000					59.7	216	1.0	
63000	71.0	260	0.9					

- 注：1. 有载调压变压器，暂提供降压结构产品。  
 2. 根据使用部门与制造厂协商，可提供其他电压组合的产品。

表5-13 6300~63000kVA三绕组有载调压变压器

额定容量 (kVA)	电压组合及分接范围			联结组 标号	空载 损耗 (kW)	负载 损耗 (kW)	空载 电流 (%)	阻抗 电压 (%)	容量分配 (%)
	高压 (kV)	中压 (kV)	低压 (kV)						
6300	110	$\pm 8 \times$ 1.25%	6.3, 6.6, 10.5, 11	YN, ynd, d11	15	53	1.7	高一中 高一低 17~18 中一低 6.5	100/ /100/ /100
8000					18	63	1.7		
10000					21.3	74	1.6		
12500					25.2	87	1.6		
16000					30.3	106	1.5		
20000					35.8	125	1.5		
25000					42.3	148	1.4		
31500					50.3	175	1.4		
40000					60.2	210	1.3		
50000					71.2	250	1.3		
63000	84.7	300	1.2						

- 注：1. 有载调压变压器，暂提供降压结构产品；  
 2. 根据需装联结组标号可为YN, d11, y10。

表5-14 6300~63000kVA双绕组低压为35kVA级无功磁调压变压器

额定容量 (kVA)	电 压 组 合			联结组 标号	空载损耗 (kW)	负载损耗 (kW)	空载电流 (%)	阻抗电压 (%)
	高 压 (kV)	高压分 接范围	低 压 (kV)					
6300					12.5	44	1.5	
8000					15.0	53	1.5	
10000					17.5	62	1.4	
12500					20.5	74	1.4	
16000					24.5	91	1.3	
20000	110或123	$\pm 2 \times$ 2.5%	35或38.5	YN, d11	29.0	110	1.3	10.5
25000					34.2	129	1.2	
31500					40.5	156	1.2	
40000					48.3	183	1.1	
50000					57.8	227	1.1	
63000					68.3	273	1.0	

注：表5-2~表5-14的高压中性点绝缘水平：工频耐受电压95kV，雷电冲击耐受电压250kV。

表5-15 31500~360000kVA双绕组无功磁调压变压器

额定 容量 (kVA)	电压组别及 分接范围		联结组 标号	I			II			阻抗 电压 (%)
	高 压 (kV)	低 压 (kV)		空载 损耗 (kW)	负载 损耗 (kW)	空载 电流 (%)	空载 损耗 (kW)	负载 损耗 (kW)	空载 电流 (%)	
31500				44	150	1.1	48	170	1.5	
40000		6.3, 6.6		52	175	1.1	57	200	1.5	
50000		10.5, 11*		61	210	1.0	67	240	1.4	
63000				73	245	1.0	80	290	1.4	
90000	220*或		YN, d11	96	320	0.9	105	380	1.3	
120000	242	10.5, 13.8, 11*		118	385	0.9	126	490	1.3	12~14
150000	$\pm 2 \times$	11*, 13.8		140	450	0.8	132	600	1.2	
180000	2.5%			160	510	0.8	170	688	1.2	
240000		15.75		200	630	0.7	216	854	1.1	
300000		18.75,		237	750	0.6	255	1010	1.0	
360000		18		272	860	0.6	293	1160	1.0	

注：1.表中带“\*”号标记的电压作为降压变压器用。

2.根据需要也可提供额定容量小于31500kVA的变压器及其他电压组合的变压器。

3.表中所列组II数据为过渡标准。

4.根据需要也可提供低压为35kV及38.5kV的变压器。

表5-16 31500~240000kVA三绕组无励磁调压变压器

额定容量 (kVA)	电压组合及分接电压			联结组标号		I			II			阻抗电压%	
	高压 (kV)	中压 (kV)	低压 (kV)	空载损耗 (kW)	负载损耗 (kW)	空载电流 (%)	负载损耗 (kW)	空载损耗 (kW)	空载电流 (%)	负载损耗 (kW)	空载电流 (%)	升压	降压
31500			6.3, 6.0*	50	180	1.1	59	225	1.5				
40000			10.5, 11*	60	210	1.0	69	264	1.4				
50000			35, 38.5	70	250	0.9	81	316	1.3				
63000	220*或242			83	290	0.9	95	376	1.3			高—中	高—中
90000		69, 121	10.5, 11*, 13.8, 35*	108	390	0.8	119	500	1.2			高—低	高—低
120000	±2×2.5%		38.5*	133	480	0.8	148	640	1.2			12~14	22~24
150000			11*, 13.8,	157	570	0.7	172	750	1.1			7~9	7~9
180000			15.75, 35,	178	650	0.7	196	870	1.1			中—低	中—低
240000			38.5*	220	800	0.6	238	1080	1.0				

注：1.表中带“\*”号标记的电压作为降压变压器用。

2.表中的负载损耗其容量分配为100/100/100，升压结构者其容量分配可为100/50/100及降压结构者其容量分配为100/100/50或100/50/100。

3.根据需要也可提供额定容量小于31500kVA的变压器及其他电压组合的变压器。

4.表中所列组别I数应为过励标准。

表5-17 31500~240000kVA电压为63kV级无励磁调压变压器

额定容量 (kVA)	电 压 组 别		联结组标号	空载损耗 (kW)	负载损耗 (kW)	空载电流 (%)	阻抗电压 (%)
	高压 (kV)	高压分接范围					
31500				48	168	1.4	
40000				56	196	1.4	
50000				66	235	1.3	
63000				79	275	1.3	
90000	220	$\pm 2 \times 2.5\%$	YN, d11	104	359	1.2	12~24
120000				128	431	1.2	
150000				152	504	1.1	
180000				173	571	1.1	
240000				216	706	1.0	



表5-18 31500~24000kVA三绕组无励磁调压自耦变压器

额定容量 (kVA)	电压组合及分接范围			联结组标号	升压组合			降压组合			阻抗电压 %	
	高压 (kV)	中压 (kV)	低压 (kV)		空载损耗 (kW)	负载损耗 (kW)	空载电流 (%)	空载损耗 (kW)	负载损耗 (kW)	空载电流 (%)	升压	降压
31500					31	130	0.9	28	110	0.8	高—中	高—中
40000			6.0*, 10.5,		37	160	0.9	33	135	0.8	12~14	8~10
50000			11*, 13.8,		42	189	0.8	38	160	0.7	高—低	高—低
63000			35*, 38.5*		50	224	0.8	45	190	0.6	8~12	28~34
90000	220*或242	121		YN, a 0, d11	63	307	0.7	57	260	0.6	中—低	中—低
120000	$\pm 2 \times 2.5\%$				77	378	0.7	70	320	0.5	14~18	18~24
150000			10.5, 11*,		91	450	0.6	82	380	0.5		
180000			13.8, 15.75,		105	515	0.6	95	430	0.5		
240000			18, 35*, 38.5*		124	662	0.5	112	560	0.4		

注: 1.表中带“\*”号标记的电压作为降压变压器用。

2.容量分配: 升压组合为100/50/100, 降压组合为100/100/50。

3.表中阻抗电压为100%额定容量时的数值。

表5-19 31500~180000kVA双绕组有载调压变压器

额定容量 (kVA)	电压组合及分接范围		联结组 标号	I			II			阻抗电压 (%)
	高 压 (kV)	低 压 (kV)		空载损耗 (kW)	负载损耗 (kW)	空载电流 (%)	空载损耗 (kW)	负载损耗 (kW)	空载电流 (%)	
31500		6.3, 6.6,	YN, d11	48	150	1.1	53	170	1.4	12~14
40000		10.5, 11,		57	175	1.0	62	200	1.3	
50000		35, 38.5		67	210	0.9	72	240	1.2	
63000	220 ±8×1.25%			67	245	0.9	87	290	1.2	
80000				101	320	0.8	110	380	1.1	
120000		10.5, 11,		124	385	0.8	135	490	1.1	
150000		35, 38.5		146	450	0.7	160	600	1.0	
180000				169	520	0.7	185	710	0.9	

注：1. 低电压可为3.3kV级的产品，其性能数据另订。

2. 表中所列组别数据为过渡数据。

表5-20 31500~180000kVA三绕组有载调压变压器

额定容量 (kVA)	电压组合及分接范围			联结组 标号	I			II			容量分配 (%)	调抗电压 (%)
	高压 (kV)	中压 (kV)	低压 (kV)		空载损耗 (kW)	负载损耗 (kW)	空载电流 (%)	空载损耗 (kW)	负载损耗 (kW)	空载电流 (%)		
31500			6.3, 6.6,		55	180	1.2	62	225	1.5	100/100/100	
40000			10.5, 11,		65	210	1.1	72	284	1.4		
50000			35, 38.5		76	250	1.0	85	316	1.3		
63000	220	69, 121		Y <sub>0</sub> / Y <sub>0</sub> , D <sub>11</sub>	89	290	1.0	100	376	1.3		高一中 12~14
90000	$\pm 8 \times 1.25\%$				116	390	0.9	125	500	1.2	100/50/100	高一低 22~24
120000			10.5, 11,		144	480	0.9	155	640	1.2		中一低
150000			35, 38.5		170	570	0.8	180	750	1.1	50/100/100	7~9
180000					195	700	0.8	206	920	1.1		

注：1.表中所列数据为降压结构产品，也可提供升压结构产品。

2.表中的负载损耗其容量分配为100/100/100。

3.表中所列组I数据为过流标准。

表5-21 31500~240000kVA有载调压自耦变压器

额定容量 (kVA)	电压组合及分接范围			联结组 标号	空载	负载	空载	容量分配	阻抗电压
	高压 (kV)	中压 (kV)	低压 (kV)		损耗 (kW)	损耗 (kW)	电流 (%)		
31500	220 $\pm 8 \times 1.25\%$	121	6.3, 6.6, 10.5, 11, 35, 38.5	YN, a0, d11	32	121	0.9	100/ /100/ /50	高一中
40000					38	147	0.9		8~10
50000					45	175	0.8		高一低
63000					53	210	0.8		28~34
90000					64	275	0.7		中一低
					80	343	0.7		18~24
120000					95	406	0.6		
150000					107	469	0.6		
180000	130	600	0.5						
240000									

注：表中所列数据为降压结构产品。

表5-22 63000~180000kVA有载调压自耦变压器

额定容量 (kVA)	电压组合及分接范围			联结组 标号	空载	负载	空载	容量分配	阻抗 电压
	高压 (kV)	中压 (kV)	低压 (kV)		损耗 (kW)	损耗 (kW)	电流 (%)		
63000	$\pm 8 \times 1.25\%$	121	6.3, 6.6, 10.5, 11, 35, 38.5	YN, a0, d11	54	190	0.9	100/100, 50	高一中
90000					66	260	0.8		8~10
120000					82	320	0.8		高一低
150000					97	380	0.7		28~34
					110	435	0.6		中~低
180000									18~24

注：表中所列数据为降压结构产品。

#### 第四节 变压器计算

##### 一、小型壳式变压器计算

常用的控制变压器、行灯变压器、电源变压器均属于小型壳式变压器，计算如下：

##### 1. 变压器输出功率的确定

变压器二次侧常备有几套绕组，在计算变压器输出功率  $P_2$  时，要将所有绕组总功率加在一起，即总输出功率  $P_2$  为

$$P_2 = U_2 I_2 + U_3 I_3 + \dots + U_n I_n \quad (\text{W})$$

式中  $U_2, I_2$ ——二次侧第一套绕组的电压和电流；

$U_3, I_3$ ——二次侧第二套绕组的电压和电流；

$U_n, I_n$ ——二次侧第“ $n-1$ ”套绕组的电压和电流。

##### 2. 变压器输入功率的确定

输入功率  $P_1$  为

$$P_1 = \frac{P_2}{\eta} \quad (\text{W})$$

式中  $\eta$ ——变压器的效率，在0.8~0.9之间，功率大的取大值；反之，取小值。

##### 3. 一次额定电流 $I_{N1}$ 的确定

$$I_{N1} = (1.1 \sim 1.2) \frac{P_1}{U_{N1}}$$

式中  $U_{N1}$ ——变压器一次额定电压 (V)；

1.1~1.2——经验系数。

##### 4. 计算功率 $P_{2\prime}$ 的确定

计算时应取计算功率进行计算，即

$$P_{2\prime} = \frac{P_1 + P_2}{2} \quad (\text{W})$$

##### 5. 铁心截面积 $S_c$ 计算

$$S_c = k \sqrt{P_{2\prime}} \quad (\text{cm}^2)$$

式中  $k$ ——系数，在1~2间变化，功率小者取大值；硅钢片质量好者取小值，比如10W及以下，取  $k=2$ ，1000W

及以上,  $k$ 取1。

$S_c = a \times b (\text{cm}^2)$ , 如图5-29所示。

铁心叠压系数选为0.9, 则铁心厚度 $b'$ 为

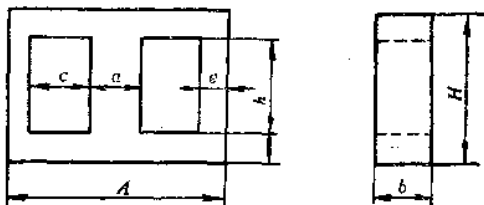


图5-29 铁心尺寸

$$b' = \frac{b}{0.9} = 1.1b \text{ cm}$$

$b'$ 值可参照表5-23选择。

表5-23 控制变压器铁心尺寸

功率 (W)	尺寸	a	c	b'	$\frac{a}{2} = d$	$\frac{a}{2} = e$	H	A	b
25		24	12	26	12	12	60	72	36
50		28	14	32	14	14	70	84	42
100		34	17	36	17	17	85	102	51
150		34	17	52	17	17	85	102	51
300		48	24	48	24	24	120	144	72
500		48	24	70	24	24	120	144	72
700		58	30	60	30	30	149	178	89
1000		58	30	80	30	30	149	178	89
1500		64	33	95	33	33	164	196	98

### 6. 绕组匝数的确定

由 $U = 4.44fN\Phi$ 知, 每匝电压为

$$e_s = \frac{U}{\text{匝}} = 4.44f\Phi = 4.44fBS_c \times 10^{-4} (\text{V/匝})$$

式中  $U$ ——电源电压 (V) ;  
 $f$ ——电源频率  $f = 50\text{Hz}$  ;  
 $\Phi$ ——工作磁通 (Wb) ;  
 $B$ ——磁通密度 (T) ;  
 $S_c$ ——铁心截面积 ( $\text{cm}^2$ ) 。

每伏匝为

$$\frac{1}{e_1} = \frac{1}{4.44f\Phi} = \frac{1}{4.44fBS_c \times 10^{-4}}$$

将  $f = 50$  代入, 则得:

$$e_1 = 222BS_c \times 10^{-4} \quad (\text{V/匝})$$

或

$$\frac{1}{e_1} = \frac{45}{BS_c} \quad (\text{匝/V})$$

磁通密度根据硅钢片材质按表5-24选用。

表5-24 磁通密度  $B$  的选择

硅钢片牌号		$B(\text{T})$
旧型号	新型号	
D11		0.8
D21、D22	DR530-50	1.0
D41、D42	DR350-50 DR315-50	1.1~1.2
D310、D320	DW240-35 DW360-35	1.2~1.4

一次绕组总匝数  $N_1$  为

$$N_1 = \frac{U_{N1}}{e_1}$$

二次侧各绕组匝数为

$$N_2 = \frac{U_{N2}}{e_1} \quad N_3 = \frac{U_{N3}}{e_1}, \dots, N_n = \frac{U_{Nn}}{e_1}$$

为了补偿二次绕组因损耗引起的电压降, 二次侧匝数应比计算值再加2.5%~5%, 或者一次侧减少2.5%~5%匝数, 减少

匝数时，要考虑磁通密度是否合适。

### 7. 导线线径的确定

导线线径  $d$  按下式确定：

$$d = 1.13 \sqrt{\frac{I}{J}} \quad (\text{mm})$$

式中  $I$  —— 工作电流 (A)；

$J$  —— 电流密度 (A/mm<sup>2</sup>)。

连续使用时， $j$  选 2~2.5 A/mm<sup>2</sup>，断续使用可选为 4~5 A/mm<sup>2</sup>。通常对于连续使用的 100 W 及以下选用 2.5 A/mm<sup>2</sup>，100 W 以上选 2 A/mm<sup>2</sup>。

计算出来的导线直径  $d$  要查标准，选用标准线规。

### 8. 核算铁心窗口尺寸

根据绕组总匝数、线径（导线截面积）、绝缘厚度等核算铁心窗口尺寸，使绕组和绝缘总面积比铁心窗口面积要小，否则容纳不下绕组和绝缘总面积。

导线总截面积为

$$S_x = (d_1^2 N_1 + d_2^2 N_2 + \dots + d_n^2 N_n) \frac{\pi}{4}$$

导线和总绝缘面积为

$$\frac{S_x}{k_i} = \frac{S_x}{0.2 \sim 0.4} < k \times c \quad (\text{窗口面积})$$

例5-57 有一台单相变压器铁心，线圈已烧毁，实测铁心尺寸如图5-30所示。查表5-23知道是100W的变压器，铁心硅钢片牌号为DR530-50，要求重绕线圈，电源电压为380V，二次电压36V，频率为50Hz，功率为100W，问绕组匝数和导线线径各是多少。

(1) 铁心截面积  $S_c$ 。

$$S_c = 34 \times 36 \times 0.9 \times 10^{-2} = 11 \text{cm}^2$$

(2) 按铁心牌号，取磁通密度

$$B = 1.0 \text{T}$$



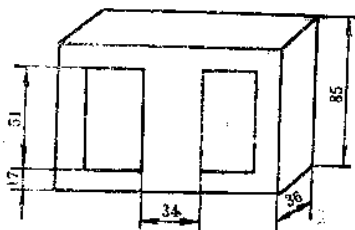


图5-30 铁心尺寸

(3) 每匝电压  $e_1$ ,

$$e_1 = 222 BS_c \times 10^{-4} = 222 \times 1 \times 11 \times 10^{-4} = 0.2442 \text{ V/匝}$$

(4) 绕组匝数

一次绕组匝数  $N_1$  为

$$N_1 = \frac{U_{N1}}{e_1} = \frac{380}{0.2442} = 1556 \text{ 匝}$$

二次绕组匝数  $N_2$

$$N_2 = \frac{U_{2N}}{U_1} N_1 = \frac{36}{380} \times 1556 = 147.4$$

考虑二次侧电压降, 加大2.5%, 所以  $N_2 = 147.4(1 + 2.5\%) = 151$  匝

(5) 一次绕组电流  $I_{N1}$

$$I_{N1} = \frac{P_N}{U_{N1}} = \frac{100}{380} = 0.26 \text{ A}$$

(6) 二次绕组电流  $I_{N2}$

$$I_{N2} = \frac{P_N}{U_{N2}} = \frac{100}{36} = 2.78 \text{ A}$$

选一次电流密度  $J_1 = 2 \text{ A/mm}^2$ , 二次电流密度  $J_2 = 2.5 \text{ A/mm}^2$ .

(7) 一、二次线圈导线线径

一次线圈导线线径 $d_1$ 为

$$d_1 = \sqrt{\frac{4I_1 N_1}{\pi J_1}} = \sqrt{\frac{4 \times 0.26}{\pi \times 2}} = 0.41 \text{ mm}$$

二次线圈导线线径 $d_2$ 为

$$d_2 = \sqrt{\frac{4I_2 N_2}{\pi J_2}} = \sqrt{\frac{4 \times 2.78}{\pi \times 2.5}} = 1.24 \text{ mm}$$

选择标准线规:

$$d_1 = 0.41, \text{ 带绝缘} 0.47 \text{ mm}$$

$$d_2 = 1.25, \text{ 带绝缘} 1.28 \text{ mm}$$

**例5-58** 利用旧硅钢片制做一台行灯变压器,如图5-31所示。硅钢片牌号为DR530-50型,要求行灯变压器有5盏行灯,其中三盏是60W,36V;二盏是40W,24V,另外还有一个6.3V的指示灯(电流0.3A)电源电压为220V,试计算行灯变压器的容量、电流、铁心截面积、线圈匝数以及导线直径等各是多少。

(1)总容量 $P_2$

$$P_2 = 3 \times 60 + 2 \times 40 + 0.3 \times 6.3 = 262 \text{ W}$$

(2)输入功率 $P_1$  ( $\eta$ 取0.82)

$$P_1 = \frac{P_2}{\eta} = \frac{262}{0.82} = 327 \text{ W}$$

(3)一次电流 $I_1$  (系数取1.2)

$$I_1 = 1.2 \times \frac{P_1}{U_1} = 1.2 \times \frac{327}{220} = 1.79 \text{ A}$$

(4)二次电流 $I_2$ 、 $I_3$ 、 $I_4$

$$I_2 = \frac{3 \times 60}{36} = 5 \text{ A}$$

$$I_3 = \frac{2 \times 40}{24} = 3.3 \text{ A}$$

$$I_4 = 0.3 \text{ A}$$

(5)铁心截面积 $S_c$

$$S_c = k \sqrt{\frac{P_1 + P_2}{2}} = 1.45 \sqrt{\frac{327 + 262}{2}} = 1.45 \sqrt{\frac{327 + 262}{2}}$$

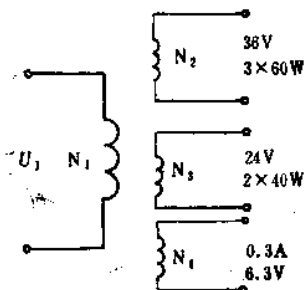


图5-31 行灯变压器电路图

$$= 1.45\sqrt{294.5} = 24.9\text{cm}^2 \approx 25\text{cm}^2$$

根据表5-23, 选用 $a$ 值为48mm, 则有

$$b = \frac{S_c}{a} = \frac{25 \times 10^2}{48} = 52\text{mm}$$

$$b' = 1.1 \times b = 1.1 \times 52 = 57\text{mm}$$

所以铁心截面积 $S_c$ 为

$$S_c = a \times b' = 4.8 \times 5.7 = 27.4\text{cm}^2$$

铁心尺寸如图5-32所示。

(6) 每匝电压 $e_1$ (选 $B = 1.0\text{T}$ ,  $k$ 取0.9)

$$\begin{aligned} e_1 &= \frac{U}{\text{匝}} = 4.44fBS_cK \times 10^{-4} \\ &= 4.44 \times 50 \times 1 \times 27.4 \times 0.9 \times 10^{-4} \\ &= 0.5475\text{V/匝} \end{aligned}$$

(7) 各绕组匝数计算

$$N_1 = \frac{220}{e_1} = \frac{220}{0.5475} = 402\text{匝}$$

$$N_2 = \frac{36}{0.5475} = 65.8$$

$$N_3 = \frac{24}{0.5475} = 43.84$$

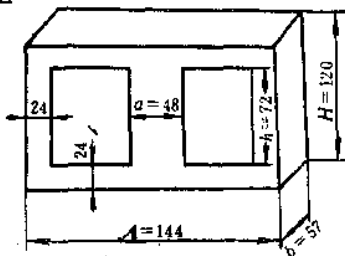


图5-32 铁心尺寸

$$N_4 = \frac{6.3}{0.5475} = 11.51$$

考虑电压降，二次绕组加2.5%匝数，则有

$$N'_2 = N_2(1 + 2.5\%) = 67 \text{匝}$$

$$N'_3 = N_3(1 + 2.5\%) = 45 \text{匝}$$

$$N'_4 = N_4(1 + 2.5\%) = 12 \text{匝}$$

(8) 导线直径的确定

已知， $I_1 = 1.79\text{A}$ ， $I_2 = 5\text{A}$ ， $I_3 = 3.33\text{A}$ ， $I_4 = 0.3\text{A}$ ，选平均电流密度为 $2\text{A}/\text{mm}^2$ ，则各绕组导线直径为

$$d_1 = \sqrt{\frac{4I_1}{\pi J_1}} = \sqrt{\frac{4 \times 1.79}{\pi \times 2}} = 1.07\text{mm}$$

选标准直径为 $1.08\text{mm}$ ，QZ型绝缘直径 $1.19\text{mm}$ 。

$$d_2 = \sqrt{\frac{4I_2}{\pi J_2}} = \sqrt{\frac{4 \times 5}{\pi \times 2}} = 1.78\text{mm}$$

选标准直径为 $1.81\text{mm}$ ，QZ型绝缘直径 $1.98\text{mm}$ 。

$$d_3 = \sqrt{\frac{4I_3}{\pi J_3}} = \sqrt{\frac{4 \times 3.33}{\pi \times 2}} = 2.12\text{mm}$$

选标准直径为 $2.1\text{mm}$ ，QZ型，绝缘直径 $2.23\text{mm}$ 。

$$d_4 = \sqrt{\frac{4I_4}{\pi J_4}} = \sqrt{\frac{4 \times 0.3}{\pi \times 2}} = 0.19\text{mm}$$

选标准直径为 $0.19\text{mm}$ ，绝缘直径为 $0.23\text{mm}$ 。

(9) 校核铁心窗口尺寸

一次绕组每层匝数 $N_1$ 为

$$N_1 = \frac{0.9[h - (2 \sim 3)]}{d'_1} = \frac{0.9(72 - 2)}{1.19} = 53 \text{匝/层}$$

$$\text{层数 } m_1 = \frac{402}{53} = 7.6, \text{ 取 } 8 \text{ 层。}$$

二次绕组每层匝数为 $N_2$ 、 $N_3$ 、 $N_4$

$$N_2 = \frac{0.9(72 - 2)}{d'_2} = \frac{0.9(72 - 2)}{1.98} = 31 \text{匝/层, 取 } 3 \text{ 层}$$

$$N_3 = \frac{0.9(72-2)}{d'_3} = \frac{0.9(72-2)}{2.23} = 28 \text{匝/层, 取一层}$$

$$N_4 = \frac{0.9(72-2)}{d'_4} = \frac{0.9(72-2)}{0.23} = 273 \text{匝/层, 取一层,}$$

(10) 计算绕组总厚度  $c$

$$c = (1.1 \sim 1.2) \left\{ c_0 + \sum_1^n (m_n(d'_n + \delta_n) + \gamma_n) \right\}$$

式中  $c_0$ ——框架绝缘厚度, 取0.7mm;

(1.1~1.2)——系数, 取1.1;

$m$ ——每套绕组层数;

$N$ ——每层匝数;

$d'$ ——绝缘导线外径(mm);

$\delta$ ——层间绝缘, 一次侧0.2mm, 二次侧0.07mm绝缘纸;

$\gamma$ ——对地绝缘, 选0.2mm绝缘纸。

$$\begin{aligned} c &= 1.1[0.7 + m_1(d'_1 + \delta_1) + \gamma_1 + m_2(d'_2 + \delta_2) + \gamma_2 \\ &\quad + m_3(d'_3 + \delta_3) + \gamma_3 + m_4(d'_4 + \delta_4) + \gamma_4] \\ &= 1.1[0.7 + 8(1.19 + 0.02) + 0.2 + 3(1.98 + 0.07) + 0.2 \\ &\quad + 1(2.23 + 0.07) + 0.2 + 1(0.23 + 0.07) + 0.2] \\ &= 21.9 \text{mm} \end{aligned}$$

已知铁心窗宽24mm,  $21.9 < 24$ , 所以能容纳下全部线圈和绝缘。

例5-59 试设计一台单相电源变压器, 各绕组电压、电流如图5-33所示。 $W_2$ 供全波整流用, 要求其输出的功率为计算视在功率的0.7~0.8即可, 电源电压为380V。

(1) 二次侧总功率  $P_2$

$$\begin{aligned} P_2 &= 0.75(2I_2U_2) + I_3U_3 + I_4U_4 \\ &= 0.75(2 \times 0.3 \times 320) + 0.1 \times 36 + 0.2 \times 24 = 152.4 \text{W} \end{aligned}$$

(2) 变压器输入视在功率  $P_1$  ( $\eta$ 取0.80)

$$P_1 = \frac{P_2}{\eta} = \frac{152.4}{0.80} = 190.5 \text{W}$$

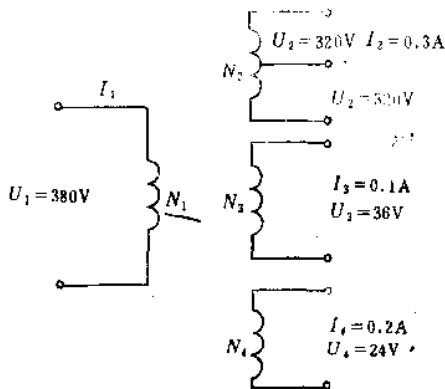


图5-33 单相电源变压器

(3) 一次电流  $I_1$

$$I_1 = (1.1 \sim 1.2) \frac{P_1}{U_1} = 1.15 \times \frac{190.5}{380} = 0.58 \text{ A}$$

(4) 铁心截面积  $S_c$

$$S_c = k \sqrt{P_{2\sigma}} = 1.4 \sqrt{171.5} = 18.3 \text{ cm}^2$$

式中  $P_{2\sigma} = \frac{P_1 + P_2}{2} = \frac{152.4 + 190.5}{2} = 171.5 \text{ W}$

选用DR360-50牌号硅钢片,  $B$ 取1T。

初选  $a = 34 \text{ mm}$ , 则有

$$b' = 1.1 \times \frac{S_c}{a} = 1.1 \times \frac{18.3}{3.4} = 5.92 \text{ cm}, \text{ 取 } 5.9 \text{ mm}$$

(5) 铁心尺寸如图5-34所示。

(6) 绕组匝数确定

每匝电压  $e_r$  为

$$e_r = 4.44 \times f B S_c \times 10^{-4} = 4.44 \times 50 \times 1 \times 18.3 \times 10^{-4} = 0.4063 \text{ V/匝}$$

$$N_1 = \frac{U_1}{e_r} = \frac{380}{0.4063} = 935.3 \text{ 匝}, \text{ 取 } 935 \text{ 匝}$$

$$N_1 = \frac{U_2}{e_1} = \frac{320}{0.4063} = 787.6 \text{匝}$$

$$N_3 = \frac{U_3}{e_1} = \frac{36}{0.4063} = 88.6 \text{匝}$$

$$N_4 = \frac{U_4}{e_1} = \frac{24}{0.4063} = 59 \text{匝}$$

一次侧加2.5%，则有

$$N'_1 = N_1(1 + 2.5\%) = 787.6(1 + 2.5\%) = 807 \text{匝}$$

$$N'_3 = N_3(1 + 2.5\%) = 88.6(1 + 2.5\%) = 91 \text{匝}$$

$$N'_4 = N_4(1 + 2.5\%) = 59(1 + 2.5\%) = 64 \text{匝}$$

(7) 各绕组导线直径

选  $J = 2.5 \text{ A/mm}^2$ ，则有

一次线圈导线截面积  $S_1$  为

$$S_1 = I_1/J = \frac{0.58}{2.5} = 0.232 \text{ mm}^2$$

二次线圈导线截面积  $S_2$ 、

$S_3$ 、 $S_4$  为

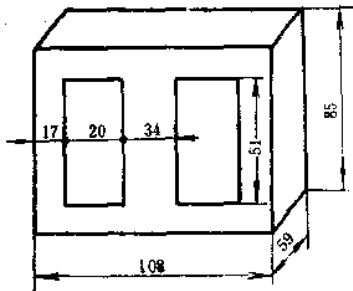


图5-34 铁心尺寸

$$S_2 = I_2/J = \frac{0.3}{2.5} = 0.12 \text{ mm}^2$$

$$S_3 = I_3/J = \frac{0.1}{2.5} = 0.04 \text{ mm}^2$$

$$S_4 = I_4/J = \frac{0.2}{2.5} = 0.08 \text{ mm}^2$$

各线圈导线直径为

$$d_1 = \sqrt{\frac{4S_1}{\pi}} = \sqrt{\frac{4 \times 0.232}{\pi}} = 0.54 \text{ mm}$$

选标准线径 0.55/0.62 mm。

$$d_2 = \sqrt{\frac{4S_2}{\pi}} = \sqrt{\frac{4 \times 0.12}{\pi}} = 0.39 \text{ mm}$$

选标准线径0.41/0.47mm。

$$d_3 = \sqrt{\frac{4S_3}{\pi}} = \sqrt{\frac{4 \times 0.04}{\pi}} = 0.23 \text{ mm}$$

选标准线径0.23/0.28mm。

$$d_4 = \sqrt{\frac{4 \times S_4}{\pi}} = \sqrt{\frac{4 \times 0.08}{\pi}} = 0.32 \text{ mm}$$

选标准线径0.33/0.38mm，以上线规均为QZ型，分母为绝缘后导线外径。

(8) 窗口尺寸校核

已知窗高 $h=51\text{mm}$ ，各绕组每层匝数为

$$N_1 = \frac{0.9[h - (2 \sim 4)]}{d_1'} = \frac{0.9 \times (51 - 2)}{0.62} = 71 \text{ 匝/层}$$

$$N_2 = 2 \times \frac{0.9(51 - 2)}{0.47} = 93 \text{ 匝/层}$$

$$N_3 = \frac{0.9(51 - 2)}{0.28} = 157 \text{ 匝/层}$$

$$N_4 = \frac{0.9(51 - 2)}{0.38} = 116 \text{ 匝/层}$$

各绕组层数 $m$ 为

$$m_1 = \frac{935}{71} = 13.2, \text{ 取 } 14 \text{ 层}$$

$$m_2 = \frac{N_2'}{93} = \frac{807}{93} = 8.7, \text{ 取 } 9 \text{ 层}$$

$m_3$ 和 $m_4$ 各1层。

绕组总宽度 $c$ 为

$$\begin{aligned} c &= 1.1 \left[ c_0 + \sum_1^4 m(d_1' + \delta) + \gamma \right] \\ &= 1.1 \left[ 0.7 + m_1(d_1' + \delta_1) + \gamma_1 + m_2(d_2' + \delta_2) + \gamma_2 \right. \\ &\quad \left. + m_3(d_3' + \delta_3) + \gamma_3 + m_4(d_4' + \delta_4) + \gamma_4 \right] \\ &= 1.1 \left[ 0.7 + 14(0.62 + 0.02) + 0.2 + 9(0.47 + 0.07) \right] \end{aligned}$$



$$\begin{aligned}
 &+ 0.2 + 1(0.28 + 0.07) + 0.2 + 1(0.38 + 0.07) \\
 &+ 0.2] \\
 &= 1.1 \times (0.7 + 9.16 + 5.06 + 0.55 + 0.65) \\
 &= 1.1 \times 16.20 \\
 &= 17.7 \text{ mm}
 \end{aligned}$$

已知窗口宽为20mm，所以能容纳下全部绕组和绝缘。

## 二、小型心式变压器计算

### 1. 额定值确定

额定功率 $P_N$ (W)

一次额定电压 $U_{N1}$ 和额定电流 $I_{N1}$

$$U_{N1} = \frac{P_N}{I_{N1}} \quad (\text{V})$$

$$I_{N1} = \frac{P_N}{U_{N1}} \quad (\text{A})$$

二次额定电压 $U_{N2}$ 和额定电流 $I_{N2}$

$$U_{N2} = \frac{P_N}{I_{N2}} \quad (\text{V})$$

$$I_{N2} = P_N / U_{N2} \quad (\text{A})$$

### 2. 铁心尺寸确定

一、二次绕组缠绕在两个铁心柱上，图5-35所示为这类变压器铁心结构。

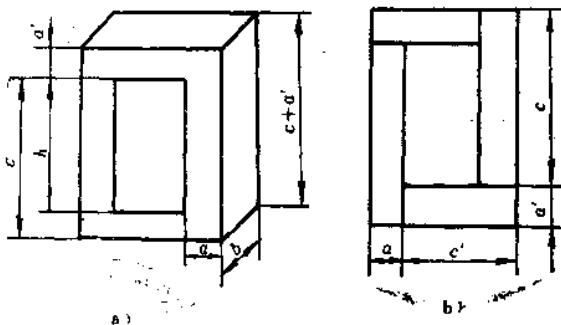


图5-35 一、二次绕组缠绕在两个铁心柱上的变压器铁心结构

铁心截面积 $S_c$ 为

$$S_c = (0.5 \sim 0.6) \sqrt{P_N} \quad \text{cm}^2$$

铁心净面积 $S'_c$ 为

$$S'_c = k_{F_0} S_c$$

式中  $k_{F_0}$ ——铁心叠压系数，在0.90~0.93范围内变化，硅钢片质量好的取0.93，质量差的选0.90；

$$S_c = a \times b \quad \text{cm}^2$$

铁心厚度 $b$ 为

$$b = (1.5 \sim 2) a \quad (\text{cm})$$

窗口高度 $h$ 为

$$h = (2.5 \sim 3.5) a \quad (\text{cm})$$

为了降低空载电流，轭高应为铁心柱宽 $a$ 的5%~10%，即

$$a' = (1.05 \sim 1.10) a$$

对于阶梯形铁心容量大于2kVA的变压器 可选用阶梯形铁心，仍按 $S_c = (0.5 \sim 0.6) \sqrt{P_N}$ 计算出铁心毛面积，然后查表5-25便可得到铁心柱直径 $D$ 、叠片厚度 $T$ ，净重 $S'_c$ 以及各冲片尺寸 $a$ 和 $b$ 等

铁心柱冲片长为

$$c = h + a'$$

窗口高度为

$$h = (2.5 - 3.5) D$$

铁轭宽度为

$$a' = \frac{(1.05 - 1.1) S'_c}{T}$$

式中  $T$ ——铁心叠厚

3. 二次绕组匝数 $N_2$

$$N_2 = \frac{U_2}{4.44 f B S'_c} \quad (\text{匝})$$

式中  $U_2$ ——二次电压 (V)；

$f$ ——电源频率(Hz)；

$B$ ——磁通密度 (T) ;

$S_c'$ ——铁心净截面积 ( $\text{cm}^2$ )。

磁通密度选择, 冷轧钢片, 取1.3~1.5T; 热轧钢片取1.0~1.3T。

4. 一次绕组匝数  $N_1$

$$N_1 = \frac{U_1}{U_2} N_2 \quad (\text{匝})$$

式中  $U_1$ ——一次电压, 额定值为  $U_{N1}$  (V)。

5. 导线截面积  $S$

$$S = \frac{I}{J}$$

式中  $J$ ——电流密度, 内绕组选1.6~1.9A/ $\text{mm}^2$ ; 外绕组散热好, 选2.4~2.8A/ $\text{mm}^2$ , 如有强迫通风装置, 可选3~5A/ $\text{mm}^2$ 。

6. 用料计算

(1) 铁心柱重  $G_1$

$$G_1 = 2 \times 7.6 \times S_c \times c \times 10^{-3} \text{ (kg)}$$

(2) 铁心轭重  $G_c$

$$G_c = 2 \times 7.6 \times S_c \times c' \times 10^{-3} \text{ (kg)}$$

(3) 导线用铜重  $G_{Cu}$

$$G_{Cu} = 8.9 \times L_{cp} N S \times 10^{-6} \text{ (kg)}$$

式中  $L_{cp}$ ——线圈平均长度 (mm);

$S$ ——导线截面积 ( $\text{mm}^2$ );

7.6——硅钢片密度 ( $\text{g}/\text{cm}^3$ );

8.9——铜密度 ( $\text{g}/\text{cm}^3$ );

$N$ ——线圈匝数。

例5-60 欲设计一台4kVA单相心式变压器, 频率为50Hz, 一次电压为220V, 二次电压为16±2V, 试确定铁心尺寸、导线线规和绕组匝数等。

铁心截面积  $S_c$  为

$$S_c = (0.5 \sim 0.6) \sqrt{P_N} = 0.543 \times \sqrt{4000} = 34.3 \text{ cm}^2$$

查表5-25得出:

铁心直径  $D = 70 \text{ mm}$

净面积  $S_c' = 31.56 \text{ mm}^2$  ( $k_{Fe}$  取 0.92)

铁心阶梯为 5 级, 具体数值如图 5-36 所示。

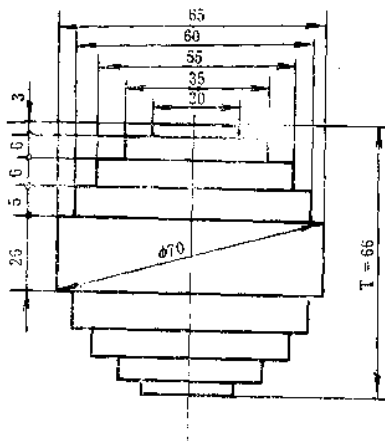
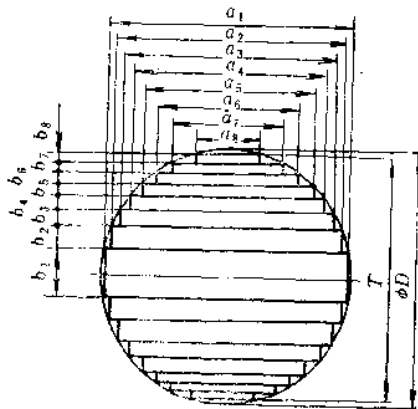


图5-36 铁心柱截面尺寸

表5-25 铁柱各级尺寸及截面表



(续)

直 径 $D(\text{mm})$	视在面积 $S_s(\text{cm}^2)$	净 面 积 $S_e(\text{cm}^2)$		
		$0.91S_e$	$0.92S_e$	$0.95S_e$
70	94.30	31.21	31.56	32.95
75	99.90	36.31	36.71	37.91
80	45.30	41.22	41.68	43.04
85	51.00	46.41	46.92	48.45
90	57.75	52.55	53.13	54.86
95	64.30	58.52	59.16	61.09
100	70.95	64.57	65.27	67.40
105	79.50	72.35	73.14	75.53
110	87.15	79.31	80.18	82.79
115	95.00	86.45	87.40	90.25
120	104.10	94.73	95.77	98.90
125	112.80	102.65	103.78	107.16
130	122.55	111.52	112.75	116.42
135	132.00	120.12	121.44	125.40
140	141.95	129.18	130.57	134.85
145	152.20	138.50	140.02	144.50
150	165.00	150.15	151.80	156.75
155	175.80	159.09	161.74	167.01
160	188.30	171.35	173.24	178.89
165	199.46	180.51	183.50	189.49
170	211.55	190.51	194.63	200.97
175	224.30	204.11	206.36	213.09
180	237.30	215.94	218.32	223.44
185	250.44	227.90	230.40	237.92

(续)

直 径 $D(\text{mm})$	视在面积 $S_e(\text{cm}^2)$	净 面 积 $S_e(\text{cm}^2)$		
		$0.91S_e$	$0.92S_e$	$0.95S_e$
190	263.65	239.92	242.56	250.47
195	278.50	253.44	256.22	264.58
200	292.50	265.18	269.10	277.38
205	308.69	280.83	283.91	293.17
210	322.08	293.05	296.31	305.93
215	339.20	308.67	312.06	322.24
220	353.60	321.78	323.31	335.92
225	372.65	339.11	342.84	354.02
230	387.10	352.26	356.13	367.75
235	404.20	367.82	371.86	383.99
240	422.90	384.84	389.07	401.78
245	443.10	403.22	407.65	420.93
250	460.90	419.42	424.03	437.86
255	480.70	437.44	422.24	456.67
260	500.34	453.31	460.31	475.32
265	517.10	470.86	475.73	491.25
270	530.60	491.04	496.42	512.61
275	557.85	507.63	513.40	529.94
280	581.06	528.76	534.58	552.01
285	600.80	546.73	552.74	570.76
290	621.90	565.93	572.15	590.81
295	643.16	585.28	591.71	611.00
300	663.20	603.51	610.14	630.04

(续)

直径 $D$ (mm)	视在面积 $S_e$ ( $\text{cm}^2$ )	铁柱宽度 (mm)							
		$a_1$	$a_2$	$a_3$	$a_4$	$a_5$	$a_6$	$a_7$	$a_8$
70	34.30	65	60	50	35	20	—	—	—
75	39.90	70	65	55	40	25	—	—	—
80	45.30	75	65	55	40	25	—	—	—
85	51.00	80	70	60	45	25	—	—	—
90	57.75	85	75	65	50	30	—	—	—
95	64.30	90	80	65	50	30	—	—	—
100	70.95	95	85	70	55	30	—	—	—
105	79.50	100	90	80	65	50	30	—	—
110	87.15	105	95	85	70	55	30	—	—
115	95.00	110	100	90	75	55	30	—	—
120	104.10	115	105	90	75	60	35	—	—
125	112.30	120	110	95	80	60	35	—	—
130	122.50	125	115	100	85	65	35	—	—
135	132.00	130	115	105	85	65	40	—	—
140	140.95	135	120	110	90	70	40	—	—
145	152.20	140	125	115	95	70	40	—	—
150	165.00	145	135	120	100	90	65	40	—
155	175.80	148	140	125	110	98	70	40	—
160	188.30	155	145	130	115	95	70	40	—
165	199.40	160	148	135	115	95	70	45	—
170	211.55	165	155	140	120	100	75	45	—
175	224.30	170	160	140	125	100	75	45	—
180	237.30	175	160	145	125	105	80	45	—
185	250.44	180	165	148	130	110	80	45	—

(续)

直径 $D(\text{mm})$	视在面积 $S_e$ ( $\text{cm}^2$ )	铁柱宽度 (mm)							
		$a_1$	$a_2$	$a_3$	$a_4$	$a_5$	$a_6$	$a_7$	$a_8$
190	268.65	185	170	165	135	110	85	50	—
195	278.50	185	175	160	140	115	85	50	—
200	292.50	195	180	160	140	115	85	50	—
205	308.00	200	185	165	145	120	90	50	—
210	322.08	200	185	170	148	120	90	55	—
215	339.20	210	195	175	148	125	95	55	—
220	353.60	210	200	180	155	130	95	55	—
225	372.60	215	200	180	160	130	100	55	—
230	387.10	220	205	185	160	135	100	65	—
235	404.20	225	210	185	165	135	100	65	—
240	422.90	230	215	195	170	140	105	65	—
245	443.10	235	220	200	180	155	130	100	60
250	460.90	240	225	210	185	165	135	100	60
255	480.70	245	230	215	185	165	135	100	60
260	500.34	250	235	220	195	170	140	105	65
265	517.10	255	240	225	200	175	140	110	60
270	539.60	260	245	225	205	175	145	110	65
275	557.85	265	248	230	205	180	145	110	65
280	581.06	270	255	235	210	180	148	115	65
285	620.05	275	260	240	215	185	155	115	70
290	621.90	280	265	245	220	185	155	120	70
295	643.16	285	270	248	220	190	155	120	70
300	663.20	290	275	250	225	190	160	115	70



(续)

直径 $D(\text{mm})$	现在面积 $S_2(\text{cm}^2)$	铁柱厚度 (mm)								铁心厚度 $T$
		$b_1$	$b_2$	$b_3$	$b_4$	$b_5$	$b_6$	$b_7$	$b_8$	
70	34.30	26	5	6	6	3	—	—	—	66
75	39.90	27	5	7	6	4	—	—	—	71
80	45.30	23	9	6	5	4	—	—	—	76
85	51.00	28	10	6	6	4	—	—	—	80
90	57.75	29	10	7	6	5	—	—	—	85
95	64.30	30	11	9	5	5	—	—	—	90
100	70.95	31	11	9	6	6	—	—	—	95
105	79.50	32	11	7	7	5	—	—	—	100
110	87.13	33	11	7	8	5	5	—	—	105
115	95.00	34	11	8	7	7	5	—	—	110
120	103.50	34	12	11	7	5	5	—	—	114
125	112.80	35	12	11	8	6	5	—	—	119
130	122.55	35	13	11	8	7	6	—	—	125
135	132.00	37	17	7	10	7	5	—	—	129
140	141.95	37	18	7	10	7	7	—	—	135
145	152.20	38	18	10	8	8	7	—	—	140
150	165.60	38	14	12	9	6	×	—	—	144
155	175.80	45	11	12	9	9	6	5	—	149
160	188.30	40	14	13	9	8	8	6	—	156
165	199.46	41	16	11	12	8	7	5	—	161
170	211.55	41	14	14	12	8	8	6	—	163
175	224.39	41	15	17	9	10	8	6	—	169
180	237.30	42	20	12	12	8	8	4	—	174
185	250.44	43	20	14	10	9	8	6	—	179

(续)

直径 $D(\text{mm})$	视在面积 $S_e(\text{cm}^2)$	铁柱厚度 (mm)								铁心厚度 $T$
		$b_1$	$b_2$	$b_3$	$b_4$	$b_5$	$b_6$	$b_7$	$b_8$	
190	263.65	43	21	12	12	11	7	7	—	183
195	278.50	62	12	13	12	11	9	6	—	188
200	292.50	44	21	17	11	11	8	7	—	194
205	308.00	45	22	16	12	11	9	7	—	199
210	322.08	64	18	11	13	12	9	6	—	202
215	339.20	46	23	17	15	10	8	8	—	208
220	353.60	66	13	17	15	11	10	7	—	212
225	372.65	67	18	16	12	13	9	8	—	219
230	387.10	67	19	16	14	10	11	8	—	223
235	404.20	68	19	17	12	12	10	7	—	226
240	422.90	69	19	17	14	13	11	7	—	231
245	443.10	68	20	16	13	11	10	8	7	238
250	460.90	70	20	13	16	10	11	9	7	242
255	480.70	72	19	14	19	10	10	9	7	248
260	500.34	78	17	14	16	13	11	9	7	252
265	517.10	70	21	14	17	12	13	8	9	258
270	539.60	76	29	18	13	15	13	9	8	262
275	557.85	73	23	16	16	12	13	9	8	267
280	581.06	74	21	19	16	15	11	9	8	272
285	600.80	74	21	19	17	15	11	10	8	276
290	621.90	76	21	19	16	17	12	9	9	282
295	643.16	76	21	21	18	17	11	9	8	286
300	663.20	77	21	19	20	15	13	12	7	291

柱铁冲片长度 $c$ 为

$$c = h + a' = 3d + a' = 3 \times 70 + a'$$

轭宽 $a'$ 为

$$a' = \frac{1.05 S_e}{T} = \frac{1.05 \times 34.3 \times 10^2}{66} = 55 \text{ mm}$$

二次绕组匝数 $N_2$ 为

$$N_2 = \frac{U_2 \times 10^4}{4.44 f B S_e'} = \frac{36 \times 10^4}{4.44 \times 50 \times 1 \times 31.56} = 50.6 \text{ 匝}$$

取52匝

分接头 $N$ 分为

$$N_{\text{分}} = N_1 \frac{U_2}{U_1} = 318 \times \frac{34 \sim 36 \sim 38}{220} = 49 \sim 52 \sim 55 \text{ 匝}$$

$$N_1 = \frac{U_1}{U_2} N_2 = \frac{220}{36} \times 52 = 318 \text{ 匝}$$

导线截面积 $S$ 为

一次电流 $I_1$ 为

$$I_1 = \frac{P_N}{U_1} = \frac{4 \times 10^3}{220} = 18.2 \text{ A}$$

二次电流 $I_2$ 为

$$I_2 = \frac{P_N}{U_2} = \frac{4 \times 10^3}{36} = 111 \text{ A}$$

取 $J_1 = 2 \text{ A/mm}^2$ ,  $J_2 = 2.5 \text{ A/mm}^2$ , 则有

一次绕组导线截面积 $S_1$ 为

$$S_1 = \frac{I_1}{J_1} = \frac{18.2}{2} = 9.1 \text{ mm}^2$$

二次绕组导线截面积 $S_2$ 为

$$S_2 = \frac{I_2}{J_2} = \frac{111}{2.5} = 44.4 \text{ mm}^2$$

选用双玻璃丝包扁铜线绕制。

### 三、三相小型变压器计算

1. 每匝电压值 $e_1$ 的确定

$$e_1 = (0.4 \sim 0.5) \sqrt{P_N} \quad (\text{V/匝})$$

式中  $P_N$ ——三相变压器额定功率(kVA)

2. 每柱铁心截面积  $S_c$

$$S_c = \frac{e_1 10^4}{4.44 f B} \quad (\text{cm}^2)$$

式中  $B$ ——磁通密度(T)。

按硅钢片牌号从表5-26中选取。

表5-26 硅钢片牌号与磁通密度

旧 牌 号	新 牌 号	$B(\text{T})$
D330 D340	DQ151-35	1.65~1.8
D310 D320	DW360-35 DW325-35	1.3~1.6
D41 D42	DR60-50 DR315-50	1.1~1.4
D21, D22	DR530-50	1.0~1.2

查表5-25确定  $S_c'$ 、 $D$ 和铁心阶梯数以及各部尺寸。

3. 铁心柱冲片长  $c$

$$c = h + a' \quad (\text{cm})$$

式中  $a'$ ——铁轭宽度  $S_{cc}$ ,  $a' = \frac{S_{cc}}{b} = \frac{(1.05 \sim 1.1) S_{cc}'}{b}$  (cm);

$S_{cc}$ ——轭部铁心面积 (cm<sup>2</sup>);

$h$ ——窗口高度,  $h = (2.5 \sim 3.5) D$  (cm);

$D$ ——铁心柱直径(cm)。

4. 绕组匝数计算

二次绕组匝数  $N_2$  为

$$N_2 = \frac{U_2}{e_1}$$

一次绕组匝数  $N_1$  为

$$N_1 = N_2 \frac{U_1}{U_2}$$

$N_1$  有  $\pm 5\%$  或  $\pm 2.5\%$  抽头, 其匝数计算如下:

$$N_1(+5\%) = 1.05N_2 \frac{U_1}{U_2}$$

$$N_1(-5\%) = 0.95N_2 \frac{U_1}{U_2}$$

$$N(+2.5\%) = 1.025N_2 \frac{U_1}{U_2}$$

$$N(-2.5\%) = 0.975N_2 \frac{U_1}{U_2}$$

### 5. 绕组电流计算

一次线电流  $I_1$  为

$$I_1 = \frac{P_N \times 10^3}{\sqrt{3} U_1} \quad (\text{A})$$

二次线电流  $I_2$  为

$$I_2 = \frac{P_N \times 10^3}{\sqrt{3} U_2} \quad (\text{A})$$

△联结时，相电流为

$$I = \frac{\text{线电流 } I}{\sqrt{3}}$$

Y联结时相电流为

$$I_l = \text{线电流 } I$$

### 6. 绕组导线截面积计算

$$S = \frac{I}{j} \quad (\text{mm}^2)$$

式中  $I$ ——电流 (A)；

$j$ ——电流密度 (A/mm<sup>2</sup>)。

**例5-61** 有一台  $P_N = 30\text{kVA}$  三相变压器， $f = 50\text{Hz}$ ，一次额定电压  $U_{N1} = 380\text{V}$ ，二次额定电压  $U_{N2} = 200\text{V}$ ，试计算变压器铁心、绕组和导线截面积 (Y, y0 接线)。

(1) 确定电流

$$I_{N1} = \frac{P_N \times 10^3}{\sqrt{3} U_{N1}} = \frac{30 \times 10^3}{\sqrt{3} \times 380} = 45.6 \text{ A}$$

$$I_{N2} = \frac{P_v \times 10^3}{\sqrt{3} U_{N2}} = \frac{30 \times 10^3}{\sqrt{3} \times 200} = 86.6 \text{ A}$$

(2) 每匝电压  $e_r$ ,

$$e_r = K \sqrt{P_N} = 0.4 \sqrt{30} = 2.19 \text{ V/匝}$$

(3) 确定铁心截面积

$$S_c = \frac{e_r \cdot 10^4}{4.44 f B} = \frac{2.19 \times 10^4}{4.44 \times 50 \times 1.45} = 68 \text{ cm}^2$$

查表5-25  $S_c = 70.95 \text{ cm}^2$ , 铁心柱外径  $D = 100 \text{ mm}$ , 净面积  $S'_c = 64.57 \text{ cm}^2$  (按0.91计, 硅钢片采用D42-0.35牌)

铁心断面尺寸如图5-37所示。

(4) 计算绕组匝数

$$U_{c2} = \frac{200}{\sqrt{3}} = 115.5 \text{ V}$$

二次绕组匝数  $N_2$  为

$$N_2 = \frac{U_{c2}}{e_r} = \frac{115.5}{2.19} = 52.7 \text{ 匝}$$

取52匝

一次绕组匝数  $N_1$  为

$$N_1 = \frac{U_{A1}}{e_r} = \frac{220}{2.19} = 100.5, \text{ 取 } 100 \text{ 匝}$$

(5) 确定导线截面积  $S$

选  $J_1 = 2.2 \text{ A/mm}^2$ ,  $J_2 = 1.8 \text{ A/mm}^2$  则有

一次绕组导线截面积  $S_1$  为

$$S_1 = \frac{I_1}{J_1} = \frac{45.6}{2.2} = 20.7 \text{ mm}^2$$

二次绕组导线截面积  $S_2$  为

$$S_2 = \frac{I_2}{J_2} = \frac{86.6}{1.8} = 48.1 \text{ mm}^2$$

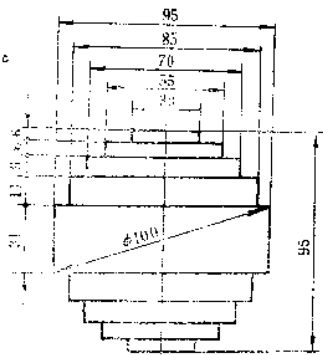


图5-37 铁心断面尺寸

**例5-62** 试设计一台三相变压器, 技术数据要求如下:

$P_N = 50 \text{ kVA}$ ,  $f_N = 50 \text{ Hz}$ , 联结组别为Y, d11

$U_{N1} = 220 \text{ V}$ ,  $U_{N2} = 400 \text{ V}$ , 硅钢片采用D42-0.5型  
空气自冷, 求绕组匝数、铁心尺寸、导线规格。

(1) 额定电流

$$I_{N1} = \frac{P_N 10^3}{\sqrt{3} U_{N1}} = \frac{50 \times 10^3}{\sqrt{3} \times 220} = 131.2 \text{ A}$$

$$I_{N2} = \frac{P_N 10^3}{\sqrt{3} U_{N2}} = \frac{50 \times 10^3}{\sqrt{3} \times 400} = 72.2 \text{ A}$$

一次相电流为

$$I_{\phi 1} = I_{N1} \quad (\text{Y联结})$$

二次相电流为

$$I_{\phi 2} = \frac{I_{N2}}{\sqrt{3}} = 41.7 \text{ A} \quad (\Delta \text{联结})$$

(2) 每匝电压  $e_1$

$$e_1 = k \sqrt{P_N} = 0.4 \sqrt{50} = 2.83 \text{ V/匝}$$

(3) 铁心面积

$$S_c = \frac{e_1 10^4}{4.44 f B} = \frac{2.83 \times 10^4}{4.44 \times 50 \times 1.10} = 115.9 \text{ cm}^2$$

查表5-25, 选  $S_c = 122.55 \text{ cm}^2$ , 则查出铁心直径  $D = 130 \text{ mm}$ ,  
阶梯数为6级, 净面积  $S'_c = 0.93 S_c$ , 即  $116.42 \text{ cm}^2$ , 铁心断面图  
如图5-38所示。

(4) 铁心尺寸

铁轭宽为

$$a' = \frac{1.1 A_c}{T} = \frac{1.1 \times 122.55 \times 10^2}{125} = 107.8 \text{ mm}$$

铁心窗高为

$$h = 2.5 D = 2.5 \times 130 = 325 \text{ mm}$$

铁柱冲片长度为

$$c = h + a' = 325 + 107.8 = 432.8 \text{ mm}$$

(5) 绕组计算

二次绕组匝数  $N_2$  为

$$N_2 = \frac{U_2}{e_1} = \frac{400}{2.83} = 141 \text{匝}$$

一次绕组匝数  $N_1$  为

$$N_1 = N_2 \frac{U_1}{U_2} = 141 \times \frac{220}{400} = 78 \text{匝}$$

(6) 导线截面积  $S$

一次绕组导线截面积  $S_1$  为

$$S_1 = \frac{I_1}{J_1} = \frac{131.2}{2} = 65.6 \text{mm}^2$$

二次绕组导线截面积  $S_2$  为

$$S_2 = \frac{I_2}{J_2} = \frac{41.7}{2} = 21 \text{mm}^2$$

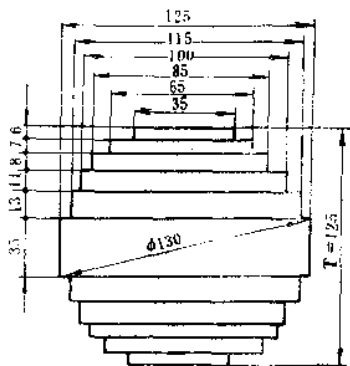


图 5-38 铁心断面尺寸

## 第五节 变压器试验及计算

### 一、变压器线圈直流电阻的测试

#### 1. 测试目的

(1) 检查三相绕组的直流电阻是否合格，三相直流电阻是否平衡。

(2) 检查导线之间、导线与引线之间、引线与套管连接的质量和焊接质量。

(3) 检查导线规格和材质是否符合要求。

(4) 检查线圈并绕根数和并联路数是否正确。

(5) 提供精确的直流电阻值，供计算附加损耗和电阻损耗之用，所以要求直流电阻的测量误差不得超过  $\pm 0.2\%$ 。

变压器线圈的直流电阻可从  $U_1$ 、 $V_1$ 、 $W_1$  端测线间电阻，有中性点引出的变压器，要测出相电阻。

#### 2. 测试方法

(1) 电桥法 常用的电桥有单臂电桥（惠斯登电桥）和双臂



电桥（凯尔文电桥）两种。测量线圈电阻在 $10\Omega$ 以上的采用单臂电桥；测量线圈电阻在 $10\Omega$ 以下的要采用双臂电桥，采用电桥法测量直流电阻准确度较高，并可直接读数，比较方便。

(2) 电压降法 用电压表和电流表测出电压  $U$  和电流  $I$ ，然后按欧姆定律计算出线圈电阻  $R$ ，即  $R = \frac{U}{I}$ 。为了减少测量误差，测量小电阻时可选用图5-39a的接线方式，测量大电阻时，可选用图5-39b的接线方式。

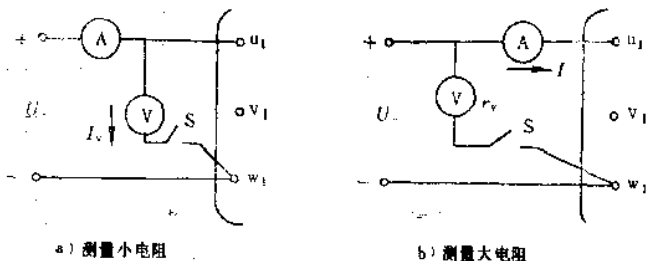


图5-39 测量电阻接线图

a) 测量小电阻 b) 测量大电阻

图中  $I_v$  是电压表分流电流， $r_v$  是电压表的内阻，电源电压可采用  $6 \sim 12V$  的蓄电池电源  $U_0$ ，电压表和电流表的准确度不低于0.5级。

按图5-39接线时，线圈电阻  $R$  为

$$R = \frac{U_0}{I - I_v} = \frac{U_0}{I - U/r_v} (\Omega)$$

式中  $U_0$ ——直流电源电压 (V)；

$I_v$ ——电压表分路电流， $I_v = \frac{U}{r_v}$  (A)；

$r_v$ ——电压表内电阻 ( $\Omega$ )。

按图5-39b接线时，线圈电阻  $R$  为

$$R = \frac{U - I r_A}{I} (\Omega)$$

式中  $r_A$ ——电流表内电阻( $\Omega$ );

$I r_A$ ——电流表的电压降(V)。

**例5-63** 有一台单相变压器,采用电压降法测量该变压器低压线圈的直流电阻,已知使用电源电压为0.05V,流过电路的电流  $I = 2.5\text{A}$ ,又知电压表内电阻  $r_v$  为13.8 $\Omega$ ,试求低压线圈的直流电阻是多少。

低压线圈的直流电阻  $R$  为

$$R = \frac{U - I r_A}{I - \frac{U - I r_A}{r_v}} = \frac{0.05}{2.5 - \frac{0.05}{13.8}} = 0.02\Omega$$

如果不考虑电压表的内电阻,计算直流电阻  $R'$ ,则有

$$R' = \frac{U}{I} = \frac{0.05}{2.5} = 0.02\Omega$$

可见在工程上有时不考虑电压表的内电阻进行计算时,误差也不大。

### 3. 直流电阻的换算

测出的线间直流电阻,还要换算为相电阻,然后再换算到75 $^{\circ}\text{C}$ 时的电阻值,为变压器出厂的依据。

$$R_{75^{\circ}\text{C}} = K R_t$$

$$K = \frac{T + 75}{T + t}$$

式中  $R_{75^{\circ}\text{C}}$ ——75 $^{\circ}\text{C}$ 时电阻值( $\Omega$ );

$R_t$ ——环境温度为 $t^{\circ}\text{C}$ 时电阻值( $\Omega$ );

$T$ ——导体系数,铜导线为235,铝导线为225;

$t$ ——环境温度( $^{\circ}\text{C}$ )。

当三相电阻值平衡时,线电阻换算相电阻,则有  
Y联结时为

$$R_{\phi} = R_{\text{线}}/2$$

$\Delta$ 联结时为

$$R_{\phi} = 1.5 R_{\text{线}}$$

式中  $R_{\phi}$ ——相电阻 ( $\Omega$ );

$R_{\text{线}}$ ——线电阻 ( $\Omega$ )。

当三相电阻不平衡率超过 2% 时, 无法测试出相电阻时, 可按下式换算:

Y 联结时为

$$R_{u1} = (R_{u1v1} + R_{u1w1} - R_{v1w1}) / 2$$

$$R_{v1} = (R_{u1v1} + R_{v1w1} - R_{v1w1}) / 2$$

$$R_{w1} = (R_{v1w1} + R_{u1w1} - R_{u1v1}) / 2$$

$\Delta$  联结时为 ( $u_1-v_2$ 、 $v_1-w_2$ 、 $w_1-u_2$  联结时, 图 5-40b)

$$R_{u1} = (R_{u1w1} - R_{\phi}) - R_{u1v1}R_{v1w1} / (R_{u1w1} - R_{\phi})$$

$$R_{v1} = (R_{u1v1} - R_{\phi}) - R_{u1w1}R_{v1w1} / (R_{u1v1} - R_{\phi})$$

$$R_{w1} = (R_{v1w1} - R_{\phi}) - R_{u1v1}R_{u1w1} / (R_{v1w1} - R_{\phi})$$

如果为  $u_1-w_2$ 、 $v_1-u_2$ 、 $w_1-v_2$  联结时, 见图 5-40a, 上式  $R_{u1}$  改  $R_{w1}$ ,  $R_{v1}$  改  $R_{u1}$ ,  $R_{w1}$  改  $R_{v1}$ , 其余不变即可。

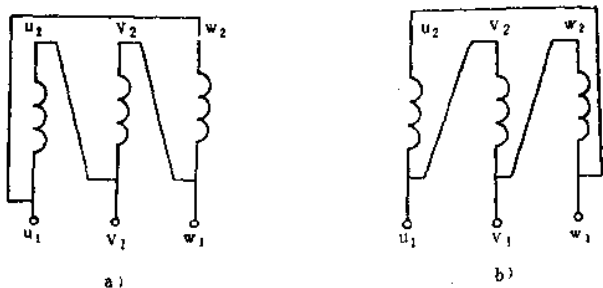


图 5-40 三角形的两种联结方法

式中  $R_{u1}$ 、 $R_{v1}$ 、 $R_{w1}$ ——分别表示  $U_1$  相、 $V_1$  相、 $W_1$  相的相电阻 ( $\Omega$ );

$R_{u1v1}$ 、 $R_{v1w1}$ 、 $R_{w1u1}$ ——分别表示三相线间的线电阻 ( $\Omega$ )。

$$R_{\phi} = \frac{R_{u1v1} + R_{v1w1} + R_{w1u1}}{3}$$

三相电阻不平衡率  $\Delta R$  为

$$\Delta R = \frac{R_{\phi \max} - R_{\phi \min}}{R_{\phi}} \times 100\%$$

式中  $R_{\phi_{max}}$ ——三相中最大的相电阻；

$R_{\phi_{min}}$ ——三相中最小的相电阻；

$R_{\phi_p}$ ——三相的相电阻之和的平均值，

$$R_{\phi_p} = \frac{R_{\phi_a} + R_{\phi_b} + R_{\phi_c}}{3}$$

630kVA 以下的变压器  $\Delta R \geq \pm 4\%$ （线电阻不平衡率  $\geq \pm 2\%$ ）。

630kVA 以上的变压器  $\Delta R \geq 2\%$ 。

**例5-64** 测出一台三相变压器的线电阻值如下： $R_{u1v1} = 0.125\Omega$ ， $R_{v1w1} = 0.130\Omega$ ， $R_{w1u1} = 0.136\Omega$ ，已知三相绕组为Y联结，试求三相的相电阻各是多少，并判断这台变压器直流电阻是否合格？

相电阻计算如下：

$$R_{u1} = (R_{u1v1} + R_{w1u1} - R_{v1w1})/2 = (0.125 + 0.136 + 0.130)/2 = 0.0655\Omega$$

$$R_{v1} = (R_{u1v1} + R_{v1w1} - R_{u1w1})/2 = (0.125 + 0.130 + 0.136)/2 = 0.0595\Omega$$

$$R_{w1} = (R_{v1w1} + R_{u1w1} - R_{u1v1})/2 = (0.130 + 0.136 - 0.125)/2 = 0.0705\Omega$$

判别直流电阻是否合格，即

$$\begin{aligned} \Delta R &= \frac{R_{\phi_{max}} - R_{\phi_{min}}}{R_{\phi_p}} \times 100\% \\ &= \frac{0.0705 - 0.0595}{\frac{0.0655 + 0.0595 + 0.0705}{3}} \times 100\% \\ &= \frac{0.011}{0.0652} \times 100\% = 16.9\% \end{aligned}$$

不合格，超过  $\pm 4\%$ 。

**例5-65** 一台1250kVA 三相变压器，测出三相线电阻分别为： $R_{u1v1} = 0.143\Omega$ ， $R_{v1w1} = 0.1422\Omega$ ， $R_{w1u1} = 0.1432\Omega$ ，接线如图5-40b所示，试求：

(1) 相电阻  $R_{u1}$ 、 $R_{v1}$ 、 $R_{w1}$  各多少;

(2) 并判断  $\Delta R$  是否合格。

$$\begin{aligned} (1) \quad R_p &= \frac{R_{u1v1} + R_{v1w1} + R_{w1u1}}{2} \\ &= \frac{0.143 + 0.1422 + 0.1432}{2} = 0.2142\Omega \end{aligned}$$

(2) 各相电阻

$$\begin{aligned} R_{u1} &= (R_{u1w1} - R_p) - R_{u1v1}R_{v1w1}/(R_{u1w1} - R_p) \\ &= (0.1432 - 0.2142) - 0.143 \times 0.1422/(0.1432 \\ &\quad - 0.2142) = 0.2150\Omega \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} R_{v1} &= (R_{u1v1} - R_p) - R_{v1w1}R_{u1w1}/(R_{u1v1} - R_p) \\ &= (0.143 - 0.2142) - 0.1432 \times 0.1422/(0.143 - 0.2142) \\ &= 0.2148\Omega \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} R_{w1} &= (R_{v1w1} - R_p) - R_{u1v1}R_{u1w1}/(R_{v1w1} - R_p) \\ &= (0.1422 - 0.2142) - 0.143 \times 0.1432/(0.1422 \\ &\quad - 0.2142) = 0.2124\Omega \end{aligned}$$

(3) 三相电阻不平衡率  $\Delta R$

$$\begin{aligned} \Delta R &= \frac{R_{\phi_{max}} - R_{\phi_{min}}}{R_{\phi_p}} \times 100\% \\ &= \frac{0.2150 - 0.2124}{0.401} \times 100\% = 0.648\% \end{aligned}$$

$$R_{\phi_p} = \frac{R_{u1} + R_{v1} + R_{w1}}{3} = 0.401$$

由于  $0.648\% < 2\%$ , 故合格。

## 二、三相变压器的变压比测试

### 1. 测试目的

- (1) 验证变压器的电压变换是否符合设计要求;
- (2) 检查各线圈匝数是否正确;
- (3) 检查分接引线装配是否正确;
- (4) 检查分接开关指示是否正确;

(5) 检查变压器短路、断路、接线、分接引线焊接等故障问题。

## 2. 试验方法

通常采用电桥法和双电压表法两种。

(1) 电桥法 电桥法试验的优点是试验电压低 (220V)，所以安全，操作也方便。试验时不受试验电源稳定度的限制，精确度和灵敏度较高。

(2) 双电压表法 这是在现场常用的一种方法，用双电压表测量电压比时，在某一侧绕组的某个分接位置上，施加一试验电压，然后用仪表或仪器测出另一侧绕组相应端的电压值，将两边电压表指示值相比，即为变压器的电压比  $K$

$$K = \frac{U_{\phi 1}}{U_{\phi 2}} = \frac{N_1}{N_2}$$

式中  $K$ ——相电压比；

$U_{\phi 1}$ 、 $U_{\phi 2}$ ——一、二次相电压 (V)；

$N_1$ 、 $N_2$ ——一、二次绕组匝数。

双电压表法有许多缺点：1) 试验电压在千伏以上，不安全；2) 需用精密仪器，但测量准确度不高，不能满足测量要求；3) 只能做检查性试验。

## 3. 计算

(1) 单相变压器的 D, d 联结及 Y, y<sup>n</sup> 联结的变压比计算  
额定电压比为

$$K_N = \frac{U_{N1}}{U_{N2}}$$

试验测出电压的电压比为

$$K = \frac{U_1}{U_2}$$

误差  $\Delta K$  % 为

$$\Delta K \% = \frac{K_N - K}{K_N} \times 100 \%$$

对于一、二次侧接线方式相同的三相变压器， $U_1$  和  $U_2$  可以同时是一、二次侧的相电压或同时是一、二次侧的线电压。

例5-66 一台 Y, y 联结的三相变压器, 一次、二次额定电压比为  $U_{N1}/U_{N2} = 3.5\text{kV}/0.4\text{kV}$ , 从低压侧施加  $380\text{V}$  电压, 即  $U_{u1v1} = U_2 = 380\text{V}$ , 在高压侧相应端测出电压  $U_{U1V1} = U_1 = 33.1\text{kV}$ , 其联结如图5-41所示, 试求:

- (1) 额定电压比  $K_N$ ;
- (2) 相电压比  $K_\phi$  (实测);
- (3) 电压比误差  $\Delta K\%$ 。

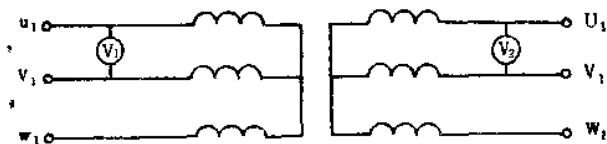


图5-41 三相变压器单相测量

- (1) 额定电压比  $K_N$  为

$$K_N = \frac{U_{N1}}{U_{N2}} = \frac{3.5}{0.4} = 87.5$$

实测电压比为

$$K_\phi = \frac{U_{U1V1}}{U_{u1v1}} = \frac{U_1}{U_2} = \frac{33.1}{0.38} = 87.1$$

电压比误差  $\Delta K\%$  为

$$\begin{aligned} \Delta K\% &= \frac{K_N - K}{K_N} \times 100\% = \frac{87.5 - 87.1}{87.5} \times 100\% \\ &= 0.457\% \end{aligned}$$

(2) 对于 Y, d 和 D, y 联结的三相变压器, 相电压比的计算

1) 对于 Y, d 联结的三相变压器

$$K_\phi = \frac{U_{\phi 1}}{U_{\phi 2}} = \frac{U_{N1}/\sqrt{3}}{U_{N2}} = \sqrt{\frac{U_{N1}}{3U_{N2}}}$$

2) 对于 D, y 联结的三相变压器

$$K_\phi = \frac{U_{\phi 1}}{U_{\phi 2}} = \frac{U_{N1}}{U_{N2}/\sqrt{3}} = \frac{\sqrt{3}U_{N1}}{U_{N2}}$$

式中  $U_{N1}$ 、 $U_{N2}$ ——一次、二次额定电压 (V);

$U_{\phi 1}$ 、 $U_{\phi 2}$ ——一次、二次相电压 (V)。

以上两种联结的三相变压器，其额定电压比均为  $K_N = \frac{U_{N1}}{U_{N2}}$ 。

例5-67 一台 Y,d 联结的三相变压器，已知  $U_{N1}/U_{N2} = 6 \text{ kV}/0.4 \text{ kV}$ ，由二次侧施加单相电压  $U_{u1v1} = U_2 = 200 \text{ V}$ ，实测出高压边电压  $U_{U1V1} = U_1 = 5190 \text{ V}$ ，试求：

- 1) 额定电压比  $K_N$ ；
- 2) 相电压比  $K_s$ ；
- 3) 电压比误差  $\Delta K\%$ 。

1) 额定电压比  $K_N$

$$K_N = \frac{U_{N1}}{U_{N2}} = \frac{6}{0.4} = 15$$

2) 相电压比  $K_s$

$$K_s = \frac{U_{U1V1}}{\sqrt{3} U_{u1v1}} = \frac{5190}{\sqrt{3} \times 200} = 14.98$$

3) 电压比误差  $\Delta K\%$

$$\begin{aligned} \Delta K\% &= \frac{K_N - K}{K_N} \times 100\% = \frac{15 - 14.98}{15} \times 100\% \\ &= 0.133\% \end{aligned}$$

(3) 对三相变压器单相通电测试双相的电压比计算

1) 对于 Y,y 及 D,d 联结的三相变压器的相电压比计算

将电源接通变压器的一对线端，如  $u_1v_1$  端，在另一侧接对应的线端，如  $U_1V_1$  端，测量电压  $U_2$ ，则电压比  $K$  为

$$K = \frac{U_{U1V1}}{U_{u1v1}}, \quad K = \frac{U_{V1W1}}{U_{v1w1}}, \quad K = \frac{U_{W1U1}}{U_{w1u1}}$$

三相分别测完为止。

如果变压器有分接头，每个分接头还要分别测试，如图5-42示，测试方法同上述。

$u_1v_1$  相通入单相电，测量另一侧对应端  $U_1V_1$ ，得出分接头电压比为

$$K_{U'_1} = \frac{U_{U'_1V'_1}}{U_{u1v1}}, \quad K_{U'_2} = \frac{U_{U'_2V'_2}}{U_{u1v1}}, \quad K_{U'_3} = \frac{U_{U'_3V'_3}}{U_{u1v1}}$$



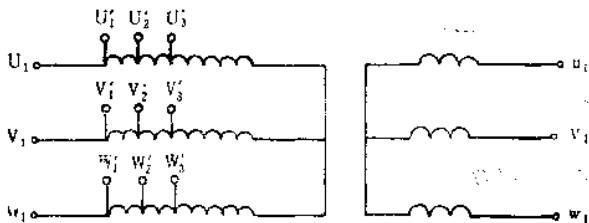


图5-42 有分接头的变压器

同样方法从  $v_1 w_1$  和  $w_1 u_1$  相通入单相电，测量另一侧对应端，得出分接头变压比为

$$K_{V_1'} = \frac{U_{V_1'W_1'}}{U_{v_1w_1}}, \quad K_{V_2'} = \frac{U_{V_2'W_2'}}{U_{v_1w_1}}$$

$$K_{V_2'} = \frac{U_{V_2'W_2'}}{U_{v_1w_1}}$$

$$K_{W_1'} = \frac{U_{W_1'U_1'}}{U_{w_1u_1}}, \quad K_{W_2'} = \frac{U_{W_2'U_2'}}{U_{w_1u_1}}$$

$$K_{W_2'} = \frac{U_{W_2'U_2'}}{U_{w_1u_1}}$$

2) 对于 Y, d 联结的三相变压器电压比计算 (见图 5-43 及表 5-27)

表 5-27 Y、d 联结的三相变压器的通电及测量相

通电相	$u_1 v_1$	$v_1 w_1$	$w_1 u_1$
测量相	$U_1 V_1$	$V_1 W_1$	$W_1 U_1$
感应相	$v_1 w_1$	$u_1 w_1$	$u_1 v_1$

$$K_s = \frac{U_{+1}}{U_{+2}} = \frac{2U_1}{\sqrt{3}U_2} = 1.155 \frac{U_1}{U_2}$$

式中  $U_1, U_2$ ——电压表指示值 (V)。

3) 对于 D, y 联结的三相变压器电压比计算 (见图 5-44 及表 5-28)。

因  $U_1 = U_{\phi 1}$ ,  $U_{\phi 2} = 2\left(\frac{U_2}{\sqrt{3}}\right)$ , 于是有

$$K_s = \frac{U_{\phi 1}}{U_{\phi 2}} = \frac{U_1}{2U_2/\sqrt{3}} = \frac{\sqrt{3}}{2} \frac{U_1}{U_2} = 0.866 \frac{U_1}{U_2}$$

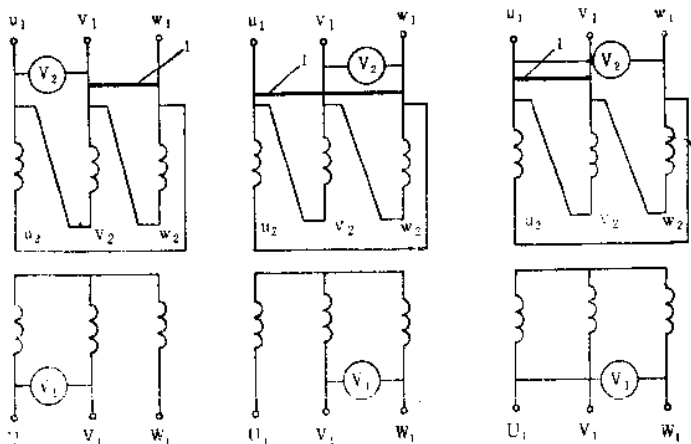


图5-13 Y, d联结的三相变压器

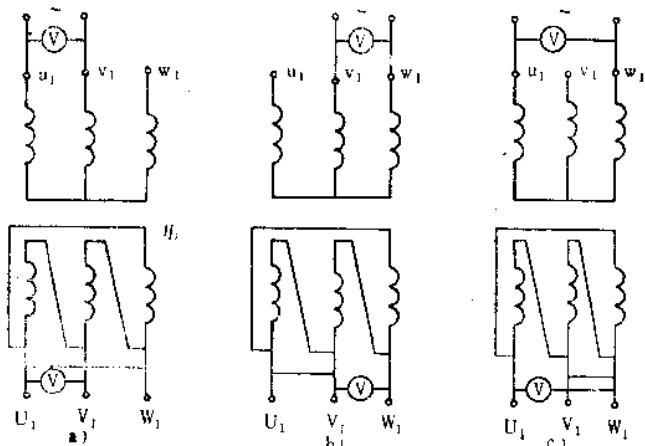


图5-44 D, y联结的三相变压器

(4) 对于 D, yn11联结的三相变压器的相电压比计算

表5-23 D、y联结的三相变压器的通电相与测量相

通电相	$u_1, v_1$	$v_1, w_1$	$w_1, u_1$
测量相	$U_2, V_2$	$V_2, W_2$	$W_2, U_2$
短接相	$U_1, W_1$	$U_2, V_2$	$V_2, W_2$

因二次侧无有中性点，所以只要按图5-44所示次序进行测量三相即可。

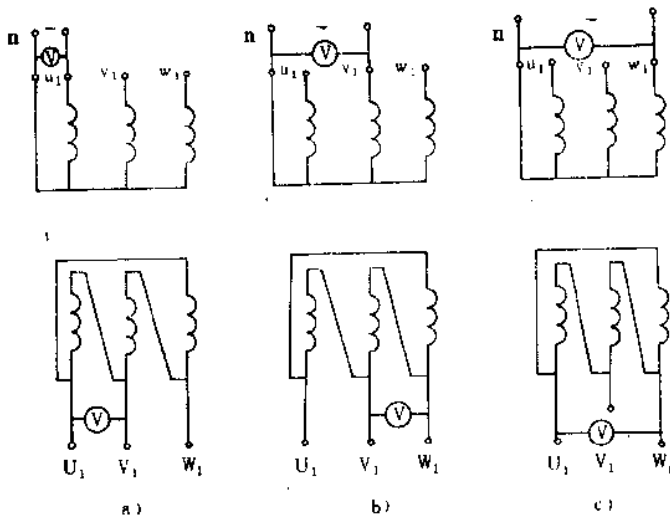


图5-45 具有中性点的D, yn11联结的三相变压器

**例** 一台6300kVA三相变压器，额定电压比为  $U_{N1}/U_{N2} = 35\text{kV}/0.63\text{kV}$ ，联结方式为Y,d11，试验时，采用单相电源，从二次侧通电，测量接线如图5-43所示，测试程序和测量结果见表5-29，试求：

- (1) 额定电压比；
- (2) 实测电压比；
- (3) 用  $K_{v_1 w_1}$  计算电压比误差，各是多少。

表5-29 三相变压器测试程序和结果

通 电 相	短 接 相	高 压 侧 $U_1$ (kV)	低 压 侧 $U_2$ (kV)
$u_1, v_1$	$v_1, w_1$	18.280	0.380
$v_1, w_1$	$u_1, w_1$	18.274	0.380
$w_1, u_1$	$u_1, v_1$	18.278	0.380

(1) 额定电压比  $K_N$

$$K_N = \frac{U_{N1}}{U_{N2}} = \frac{35}{0.65} = 55.6$$

(2) 实测电压比

$$K_{u_1v_1} = 1.155 \times \frac{U_1}{U_2} = 1.155 \times \frac{U_{u_1v_1}}{U_{v_1w_1}}$$

$$= 1.155 \times \frac{18.28}{0.38} = 55.56$$

$$K_{v_1w_1} = 1.155 \times \frac{U_1}{U_2} = 1.155 \times \frac{U_{v_1w_1}}{U_{v_1w_1}}$$

$$= 1.155 \times \frac{18.274}{0.38} = 55.54$$

$$K_{w_1u_1} = 1.155 \times \frac{U_1}{U_2} = 1.155 \times \frac{U_{w_1u_1}}{U_{w_1u_1}}$$

$$= 1.155 \times \frac{18.278}{0.38} = 55.56$$

(3) 用  $K_{v_1w_1}$  计算电压比误差  $\Delta K\%$

$$\Delta K\% = \frac{K_N - K_{v_1w_1}}{K_N} \times 100\% = \frac{55.6 - 55.54}{55.6} \times 100\%$$

$$= 0.102\% < 0.5\% \quad \text{合格}$$

### 三、工频耐压试验

#### 1. 试验目的

表5-30 电力变压器电容量参考值

(pF)

额定电容量 (kVA)	1000	1000	1800	3200	10000	18000	18000	16000	1800	2000	5600	6300
额定电压 (kV)	10	10	10	10	20	23	35	40	40	40	40	10
电容量	0.4	3	3	3	3	3	6	6	3	6	3	3
一次侧	3458	3061	3060	7960	5024	2040	3680	3874	3774	5776	4776	7134
二次侧	-	4780	5100	8750	2542	3162	5650	4190	5100	6686	6686	11140
额定电容量 (kVA)	7500	8000	10000	15000	630	1800	2000	3200	5600	6300	8000	1600
额定电压 (kV)	40	40	40	40	60	60	60	60	60	60	60	60
电容量	3	2	4	6	6	6	6	6	6	6	6	6
一次侧	5142	7950	7320	7460	2700	3100	4100	4350	4600	6368	7000	8000
二次侧	3552	12700	12750	14900	4000	6000	6600	7100	9400	10200	11000	15300

(1) 考核变压器的主绝缘强度，查出绝缘缺陷和隐患，从而提高变压器运行可靠性。

(2) 试验出厂的关键项目。

(3) 为冲击电压试后进行复查试验。

试验时，向被试变压器施加工频正弦波电压，按标准规定电压值施压，应能承受1min不发生任何异常现象。

### 2. 试验变压器容量的计算

试验变压器的高压额定电压不应低于被试变压器的最大试验电压，额定电流不应低于被试变压器的最大电容电流。

试验变压器容量  $P_s$  为

$$P_s = 1.2 \times 2\pi f C_x U^2 \times 10^{-9} \quad (\text{kVA})$$

式中  $U$  —— 被试变压器最大试验电压 (V)；

$C_x$  —— 被试变压器最大电容可按表5-30、表5-31选用；

1.2 —— 容量系数。

**例5-68** 有一台3200kVA三相变压器，额定电压比  $U_{N1}/U_{N2} = 60\text{kV}/6\text{kV}$ ，进行耐压试验前，拟选择试验变压器，问试验变压器的容量选多大合适。

表5-31 110kV中点半绝缘变压器电容量参考值 (pF)

被试变压器容量(kVA)	6600	3150	10000	20000	31500	50000
高压对中压、低压、地电容量	4200	7200	6150	8700	11400	14200
中压对高压、低压、地电容量	—	—	9600	13200	11800	24800
低压对高压、中压、地电容量	6800	14800	9400	12000	19300	19300

查表5-30知一次侧对二次侧及地的电容量为4350pF，二次侧对一次侧及对地的电容量为7100pF，查表5-32知，一次试验电压为140kV，二次试验电压为25kV。

(1) 一次侧需用试验变压器的容量  $P_{s1}$

$$P_{s1} = 1.2 \times 2\pi f C_x U^2 \times 10^{-9}$$

表5-32 正常绝缘的电力变压器工频耐压试验标准

额定电压 (kV)	0.5	3	6	10	15	35	44	60	110 <sup>①</sup>	110	154 <sup>①</sup>	154	220 <sup>①</sup>	330 <sup>①</sup>
试验电压 (kV)	6	18	25	35	45	85	95	140	200	230	275	320	400	510

① 为中性点直接接地系统。

$$= 1.2 \times 2\pi \times 50 \times 4350 \times 140^2 \times 10^{-9}$$

$$= 32.1 \text{ kVA}$$

(2) 二次侧需用试验变压器的容量  $P_{12}$

$$P_{12} = 1.2 \times 2\pi f C_2 U^2 \times 10^{-9}$$

$$= 1.2 \times 2\pi \times 50 \times 7100 \times 25^2 \times 10^{-9}$$

$$= 1.67 \text{ kVA}$$

例5-69 一台JS7系列20000kVA三相变压器额定电压  $U_{N1} = 110 \text{ kV}$ ,  $U_{N2} = 35 \text{ kV}$ , 入厂检查试验工频耐压, 选用试验变压器容量, 问应选择多大容量的试验变压器。

按出厂试验标准进行打耐压试验, 查表5-32知一次侧110kV, 应打230kV, 二次侧35kV 应试85kV。

另外, 查表5-30及表5-31知一次电容量为8700pF, 二次电容量为12000pF。

一次侧对试验变压器的容量  $P_{11}$ 为

$$P_{11} = 1.2 \times 2\pi f C_1 U^2 \times 10^{-9}$$

$$= 1.2 \times 2\pi \times 50 \times 8700 \times 230^2 \times 10^{-9} = 173.5 \text{ kVA}$$

二次侧对试验变压器的容量  $P_{12}$ 为

$$P_{12} = 1.2 \times 2\pi f C_2 U^2 \times 10^{-9}$$

$$= 1.2 \times 2\pi \times 50 \times 12000 \times 85^2 \times 10^{-9} = 32.7 \text{ kVA}$$

### 3. 工频耐压试验接线及操作要点

#### (1) 接线图

1) 试验电压50kV以下的中小型变压器试验接线图, 如图5-46所示。

2) 50kV以上变压器的试验接线图, 如图5-47所示。

#### (2) 操作要点

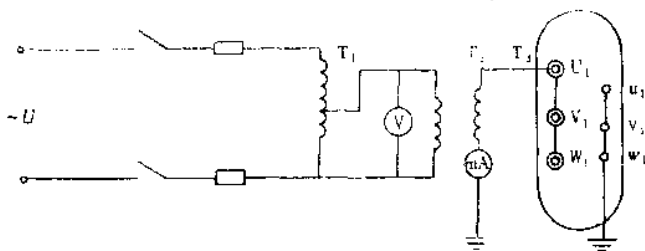


图5-46 50kV以下中小型变压器试验接线图

$T_1$ —调压器  $T_2$ —试验变压器  $T_3$ —被试变压器

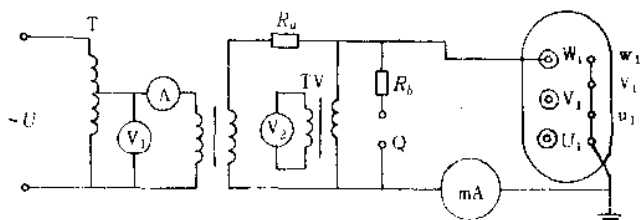


图5-47 50kV以上变压器试验接线图

$R_a$ —保护电阻,按 $0.1 \sim 1 \Omega/V$ 选  $TV$ —电压互感器  $Q$ —球隙

1) 检查接线线路,通电空试,检查仪表指示和保护装置是否正常。

2) 检查调压器是否在零位。

3) 对于新注油变压器,注油后要静置一段时间。10kV及以下变压器静置5~6h;35kV的变压器注油后静置12~16h;110kV,静置20h后再做耐压试验。

4) 试验电压在1/3以下时,升速无要求,以后的升压速度按每秒3%的速度均匀升压。试验持续1min后,迅速将调压器调至输出电压的40%以下,最后为零,切断电源。

5) 升压过程中,要监视电压表、电流表,操作人员手不能离开调压器手柄。

6) 在试验过程中,如果发现气体继电器有气体,要检查变压器内部是否有放电现象,查明原因。



7) 试验未发现异常现象, 承受 1 min 考验, 则证明被试变压器试验合格。

#### 四、变压器空载试验

变压器空载试验一般是从低压侧施加正弦波额定频率的额定电压, 在其他绕组开路情况下进行试验和测量的。

##### 1. 试验目的

- (1) 测量变压器的空载损耗和空载电流;
- (2) 检查磁路局部或整体的缺陷;
- (3) 检查线圈缺陷, 如线圈短路、匝数错误、接线是否正确等。

空载试验时, 空载电流  $I_0$  很小, 所以空载电阻损耗  $I_0^2 R$  很小, 不到总损耗的 2%, 另外, 附加损耗也很小, 都可忽略, 因此认为空载损耗全部消耗在铁耗上。

大中型变压器空载电流与额定电流的比值为 0.6% ~ 2.4%, 中小型变压器占 4% ~ 16%。

空载电流  $I_0$  值要取三相算术平均值, 这是因为三相心式变压器铁心两边 ( $U_1$ 、 $W_1$  相) 磁路对称而且相等, 中间相 ( $V_1$  相) 磁路较短, 因此两边相电流比中间的大, 一般  $V_1$  相电流为  $U_1$ 、 $W_1$  相电流的 20% ~ 35%。另外还跟三相绕组联结方式有关, 如 Y 联结时, 三相空载电流相对关系为

$$I_{U1} = I_{W1} > I_{V1}$$

如果三角联结, 当为  $u_1 - v_2$ 、 $v_1 - w_2$ 、 $w_1 - u_2$  联结时, 由于线电流  $I_{U1}$  等于  $U_1$  相电流和  $V_1$  相电流的几何和, 电流  $I_{V1}$  等于  $V_1$  相电流和  $W_1$  相电流的几何和, 电流  $I_{W1}$  等于  $W_1$  相电流和  $U_1$  相电流的几何和, 所以有

$$I_{U1} = I_{V1} < I_{W1}$$

如果三角联结, 当为  $u_1 - w_2$ 、 $v_1 - u_2$ 、 $w_1 - v_2$  联结时, 由于几何相加关系, 则有

$$I_{V1} = I_{W1} < I_{U1}$$

##### 2. 试验电源容量计算

要求试验电源的三相电压平衡，试验过程中电压保持稳定，并有足够的试验电源容量  $P_s$ 。

试验电源容量为

$$P_s = (3 \sim 5)P_N I_0\% \quad (\text{kVA})$$

式中  $P_s$ ——被试变压器在做空载试验时所需试验电源的容量 (kVA)；

$P_N$ ——被试变压器的额定容量 (kVA)；

$I_0\%$ ——空载电流占额定电流的百分数；

3~5——容量裕度系数。

**例5-70** 有一台 320kVA 三相电力变压器，已知额定电压比  $U_{N1}/U_{N2} = 6\text{kV}/0.4\text{kV}$ ，为 Y、y0 联结，已知空载电流为额定电流 5.3%，从低压侧通电做空载试验，试求试验电源容量应选多大。

试验电源容量  $P_s$  为

$$\begin{aligned} P_s &= (3 \sim 5)P_N I_0\% = 5 \times 320 \times 5.3\% \\ &= 101\text{kVA} \end{aligned}$$

**例5-71** 一台 S7 系列 6300kVA 三相变压器，已知  $U_{N1}/U_{N2} = 35\text{kV}/6.3\text{kV}$ ， $I_0\% = 0.9\%$ ，从 6.3kV 侧通电，做空载试验，为 Y、d11 联结，试求试验电源容量大小。

试验电源容量  $P_s$  为

$$\begin{aligned} P_s &= KP_N I_0\% = 5 \times 6300 \times 0.9\% \\ &= 284\text{kVA} \end{aligned}$$

### 3. 试验接线

**单相变压器接线** 图 5-48 为单相变压器空载试验测量接线图；图 5-49 为三相变压器空载试验测量接线图。

### 4. 额定电压下空载电流和空载损耗计算

#### (1) 空载电流百分数计算

单相为

$$I_0\% = \frac{I_0}{I_N} \times 100\%$$

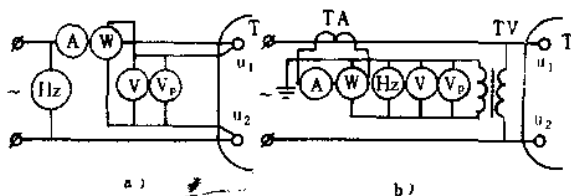


图5-48 单相变压器空载试验测量接线图

a) 直接测量 b) 经过互感器测量

TA—标准电流互感器 TV—标准电压互感器 T—被试变压器  
 $V_p$ —平均值电压表 V—有效值电压表

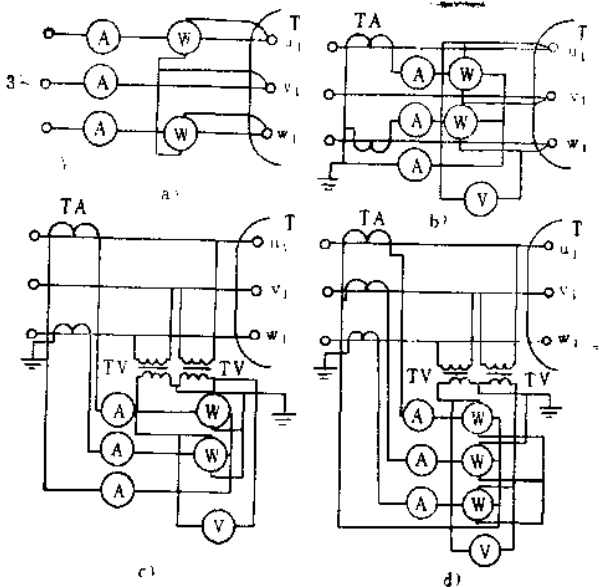


图5-49 三相变压器空载试验测量接线图

a) 直接测量的双瓦特表法 b) 经过电流互感器连接的双瓦特表法 c) 经过电流和电压互感器连接的双瓦特表法 d) 经过电流和电压互感器连接的三瓦特表法 (图中未表示频率表, 有效值电压表和平均值电压表的连接)

三相为

$$I_0\% = \frac{I_{u1} + I_{v1} + I_{w1}}{3I_N} \times 100\%$$

式中

$I_0$ ——单相变压器空载电流 (A) ;

$I_{u1}$ 、 $I_{v1}$ 、 $I_{w1}$ ——三相变压器  $u_1$ 、 $v_1$ 、 $w_1$  相的各相空载电流 (A);

$I_N$ ——被测变压器的额定电流 (A)。

(2) 空载损耗计算

单相为

$$P'_0 = K_V K_I K_W \alpha_1 \quad (\text{W})$$

三相为

$$P'_0 = K_V K_I K_W [\alpha_1 + (\pm \alpha_2)] (\text{W})$$

空载损耗  $P_0$  为

$$P_0 = P'_0 - P_{WV} - P_r$$

式中  $P'_0$ ——实际仪表指示的空载损耗 (W) ;

$P_{WV}$ ——仪表损耗 (W) ;

$P_r$ ——电缆损耗,  $P_r = I_0^2 r$  (W);

$I_0$ ——试验时的空载电流 (A) ;

$r$ ——从仪表到被试变压器之间一段电缆电阻 ( $\Omega$ ) ;

$K_V$ ——电压互感器变比倍数;

$K_I$ ——电流互感器变比倍数;

$K_W$ ——功率表倍数;

$\alpha_1$ 、 $\alpha_2$ ——仪表刻度指示的读数, 双功率表法测量时, 如果两功率表指针指向同方向, 取 + 号; 如有 - 表指示反向, 应改变接头极性, 用读数大的减去读数小的。

(3) 单相和三相变压器测量线路、电压表、功率表损耗计算

1) 单相变压器

$$P_{WV1} = U^2 \left( \frac{1}{R_V} + \frac{1}{R_W} \right) (\text{W})$$

2)三相变压器 在双功率表、电压表测量线路中,电压表、功率表损耗计算为

$$P_{WVS} = U^2 \left( \frac{1}{R_V} + \frac{2}{R_W} \right) \quad (\text{W})$$

式中  $P_{WV1}$ ——单相测量线路中仪表损耗 (W);

$P_{WVS}$ ——三相测量线路中仪表损耗 (W);

$R_V$ ——电压表线圈电阻 ( $\Omega$ );

$R_W$ ——功率表线圈电阻 ( $\Omega$ );

$U$ ——测量时仪表指示电压 (V)。

#### (4)空载损耗允许偏差

空载电流  $I_0$  允许偏差 +22%

空载损耗  $P_0$  允许偏差 +15%

例5-72 有一台125kVA三相变压器,额定电压比  $U_{N1}/U_{N2} = 10\text{kV}/0.4\text{kV}$ ,额定电流比  $I_{N1}/I_{N2} = 7.2\text{A}/180.4\text{A}$ , Y, yn0接线,空载电流标准  $I_0 = 2.81\%$ ,空载损耗标准  $P_0 = 370\text{W}$ ,在低压侧通电作空载试验,问这台变压器的空载电流和空载损耗是否合格。

#### (1)选用仪表

1)电流表 5A,满刻度100格

2)电压表 600V,  $r_V = 2 \times 10^3 \Omega$ ,满刻度150格

3)功率表 电压线圈150V,  $r_W = 5 \times 10^3 \Omega$ ,串入附加电阻  $15 \times 10^3 \Omega$ ,电流线圈5A,满刻度150格

4)电流互感器 20A/5A

#### (2)试验结果

低压加400V

电流表指示  $u_1$ 相24.7格

$v_1$ 相25格

$w_1$ 相24.9格

功率表指示  $u_1$ 相42格

$w_1$ 相-36格

$$\text{电流表每格安培 } A_i = \frac{5}{100} = 0.05 \text{ A/格}$$

$$\text{电压表每格伏特 } K_V = \frac{600}{150} = 4 \text{ V/格}$$

$$\text{功率表每格瓦数 } K_W = \frac{5 \times 600}{150} = 20 \text{ W/格}$$

$$\text{电流互感器常数 } K_I = 20/5 = 4$$

(3) 仪表损耗

$$\begin{aligned} P_{WVs} &= U^2 \left( \frac{1}{r_V} + \frac{2}{r_W + r_I} \right) \\ &= \left( \frac{1}{2000} + \frac{2}{15000 + 5000} \right) \times 400^2 = 96 \text{ W} \end{aligned}$$

电缆损耗  $P_c = 23 \text{ W}$ 。

(4) 空载电流占额定电流的百分数

$$\begin{aligned} I_0\% &= K_i K_I \left( \frac{I_{w1} + I_{w2} + I_{w3}}{3I_N} \right) \times 100\% \\ &= 0.05 \times 4 \times \left( \frac{24.7 \text{ 格} + 25 \text{ 格} + 24.9 \text{ 格}}{3 \times 180.4} \right) \times 100\% \\ &= 2.76\% \end{aligned}$$

(5) 空载损耗  $P_0$

$$\begin{aligned} P_0 &= K_W K_V [\alpha_1 + (\pm \alpha_2)] - P_{WVs} - P_c \\ &= 20 \times 4 \times [42 + (-36)] - 96 - 23 = 361 \text{ W} \end{aligned}$$

(6) 判定此台变压器  $P_0$ 、 $I_0$  是否合格

由于  $P_0 < P_{0\text{标}} = 370 \text{ W}$

$$I_0\% < I_{0\text{标}}\% = 2.81\%$$

所以此台变压器空载试验合格。

### 5. 非额定下的空载损耗试验

(1) 降低电压下空载试验计算 当试验电源容量不足时, 可降低额定电压进行空载试验, 但最低电压不能低于额定电压的 90%, 测量点不应少于 5 点, 否则误差太大。由于这种试验方法

误差较大，所以一般情况下不采用。

1) 换算到额定电压时空载电流百分数

$$I_0\% = I_0'\% \left( \frac{U_N}{U'} \right)^2$$

式中  $I_0'\%$ ——实测空载电流百分数；

$U'$ ——实际电压 (V)；

$U_N$ ——额定电压 (V)。

2) 换算到额定电压时的空载损耗

$$P_0 = P_0' \left( \frac{U_N}{U'} \right)^n$$

式中  $P_0$ ——额定电压时的空载损耗 (W)；

$P_0'$ ——电压为  $U'$  时测出的空载损耗 ( $U' < U_N$ ) (W)；

$n$ ——与铁心硅钢片种类有关的系数，热轧钢片  $n = 1.8$ ，

冷轧钢片  $n = 1.9 \sim 2.0$ 。

当试验电压小于额定电压的 5% 时， $n$  值可按下式计算

$$n = \frac{\lg \frac{P_{N0}}{P_0'}}{\lg \frac{U_N}{U'}}$$

式中  $P_{N0}$ ——额定电压时空载损耗 (W)；

$P_0'$ ——降低电压时实测空载损耗 (W)。

(2) 非额定频率下的空载试验计算 允许电源频率与额定频率 (50Hz) 相差  $\pm 5\%$  (即 47.5~52.5Hz) 情况下做空载试验。

1) 施加变压器的电压改为  $U'$

$$U' = U_N \frac{f'}{f_N}$$

或

$$U' = U_N \frac{f'}{50}$$

式中  $f'$ ——施加电压为  $U'$  时电源实际频率 (Hz) ;

$f_N$ ——额定频率 (Hz) ;

$U_N$ ——额定电压 (V) 。

2) 换算到额定频率  $f_N$  时的空载损耗

$$P_0 = P'_0 \left( \frac{60}{f'} - 0.2 \right)$$

式中  $P'_0$ ——在频率  $f'$  和电压  $U'$  下测出的空载损耗 (W) 。

**例5-73** 有一台三相变压器,  $f_N = 50\text{Hz}$ ,  $U_{N1}/U_{N2} = 35\text{kV}/6.3\text{kV}$ , 试验时从低压侧  $6.3\text{kV}$  端加入  $U' = 3\text{kV}$  电压, 实测出  $I_0\% = 1.2\%$ ,  $P'_0 = 4200\text{W}$ , 变压器铁心是用  $0.35\text{mm}$  厚热轧钢片制造, 试求额定电压时的  $I_0\%$  和  $P_0$  各是多少。

额定时空载电流百分数为

$$I_0\% = I'_0\% \left( \frac{U_{N2}}{U'} \right)^{1.8} = 1.2 \times \left( \frac{6.3}{3} \right)^{1.8} = 4.56\%$$

额定电压时的空载损耗为

$$P_0 = P'_0 \left( \frac{U_{N2}}{U'} \right)^{1.8} = 4200 \times \left( \frac{6.3}{3} \right)^{1.8} = 4200 \times 3.8 = 15968\text{W}$$

**例5-74** 一台三相变压器, 额定频率  $f_N = 50\text{Hz}$ , 在频率  $f' = 47.5\text{Hz}$  下做空载试验, 问应施加多大试验电压  $U'$ , 已知  $U_{N1}/U_{N2} = 35\text{kV}/0.4\text{kV}$ , 在  $U'$  下实测出空载损耗为  $P'_0 = 645$ , 问额定电压、额定频率时的空载损耗是多少。

1) 应施加的电压  $U'$

$$U' = U_N \frac{f'}{f_N} = 0.4 \times \frac{47.5}{50} = 380\text{V}$$

2) 额定频率下空载损耗  $P_0$

$$P_0 = P'_0 \left( \frac{60}{f'} - 0.2 \right) = 645 \times \left( \frac{60}{47.5} - 0.2 \right) = 686\text{W}$$

(3) 电压波形畸变的影响 电源电压波形畸变时, 对于三角形联结 (如 D, d 联结) 的变压器线圈, 空载电流中出现的高次谐



波，幅值最大的是三次谐波；对于星形联结的线圈（如Y，y联结），高次谐波中以五次谐波幅值最大。这时如果采用一般常用的有效值电压表测量输入电压时，会使测出的 $P_0$ 和 $I_0$ 产生很大误差，所以要进行校正。

校正方法是用平均值电压表进行，具体操作和计算如下：

1) 测量线路中除接入有效值电压表外，还接入平均值电压表。

2) 接入被测变压器，施加额定电压 $U_N'$ ，以有效值电压表指示为准，同时记录空载电流 $I_0'$ 和空载损耗 $P_0'$ 。

3) 改变施加的电压大小，以电压表的平均值 $U''$ 为准，使 $U'' = U_N$ ，在此电压值下，读取空载电流 $I_0''$ 和空载损耗 $P_0''$ 以及有效值电压表的读数 $U'$ 。

4) 按下式计算出校正后的空载电流 $I_0$ 和空载损耗 $P_0$ ，即

$$I_0 = \frac{I_0' + I_0''}{2}$$

$$P_0 = \frac{\alpha}{\alpha + 1} + \frac{1}{\alpha + 1} \left( \frac{U'}{1.11U''} \right)^2$$

$$= P_0'' \frac{\alpha + 1}{\alpha + \left( \frac{U'}{1.11U''} \right)^2}$$

式中  $\alpha$ ——在正弦波电压作用下测出铁心钢片的磁滞损耗与涡流损耗之比，热轧钢片 $\alpha = 4$ ，冷轧钢片 $\alpha = 1$ ；

$U''$ ——第二次以平均值电压表测出的电压值，因为 $U''$ 为准，所以这时可使 $U'' = U_N(\text{V})$ ；

$U'$ ——第二次测量时，有效值电压表读数， $U' > U_N(\text{V})$ ；

$I_0'$ 、 $P_0'$ ——第二次以平均值电压表为准时，测出的空载电流和空载损耗；

$I'_0$ ——第一次以有效值电压表为准，测出的空载电流(A)。

**例5-75** 一台2500kVA双绕组电力变压器，因电源电压波形含有高次谐波，所以要校正波形带来的误差。额定电压 $U_{N1}/U_{N2} = 35\text{kV}/10.5\text{kV}$ ，联结组为Y，d11。第一次以有效值电压表为准，测出 $U_N = 10.5\text{kV}$ ，而平均值电压表为 $10\text{kV}$ ，这时 $I'_0$ 为 $127\text{A}$ ， $P'_0$ 为 $4000\text{W}$ ；第二次以平均值电压表为准，即 $U'' = 10.5\text{kV}$ ，测出有效值电压表指示 $U' = 11\text{kV}$ ， $I''_0 = 165\text{A}$ ， $P''_0 = 4195\text{W}$ ，试求校正后的 $I_0$ 和 $P_0$ 各是多少。

(1)校正后的空载电流 $I_0$ 。

$$I_0 = \frac{I'_0 + I''_0}{2} = \frac{127 + 165}{2} = 146\text{A}$$

(2)校正后的空载损耗 $P_0$ 。

$$\begin{aligned} P_0 &= P''_0 \frac{\alpha + 1}{\alpha + \left(\frac{U'}{1.11U''}\right)^2} \\ &= 4195 \times \frac{1 + 1}{1 + \left(\frac{11}{1.0 \times 10.5}\right)^2} \\ &= 4000\text{W} \end{aligned}$$

$1.0U''$ 是考虑平均值电压表刻度是有效值，现在使用的平均值电压表不是按有效值刻度，故去掉1.11，而用1.0系数。

6. 三相变压器采用单相电源做空载试验的计算

(1)采用单相电源试验的目的

1)可以对各相空载损耗单独测试、分析比较，以及各相分布情况，从而检查和判断出故障情况。

2)缺乏三相试验电源或其他原因不能进行三相试验。

试验时，可施以单相额定电压，然后再换算到三相的空载数据。

(2) 单相试验时注意事项

1) 由于单相试验时电压波形畸变较严重，所以要校正波形对空载数据的影响。

2) 做单相试验时，要将三相变压器中的每一相依次短接，短接的目的是使该相无磁通通过，无损耗产生。

(3) 试验接线和短接次序以及  $I_0$ 、 $P_0$  计算

1) 对于  $u_1-w_2$ 、 $v_1-w_2$ 、 $w_1-u_2$  联结的三角形接线时，测量次序如表5-33所示，接线图如图5-50所示（施加额定电压  $U_N$ ）。

表5-33 三角形联结的测量次序

次序	供电端	短路端	测出 $P_0$ (W)	测出 $I_0$ (A)
1	$u_1 v_1$	$v_1 w_1$	$P_0 U_1 V_1$	$I_{0u_1 v_1}$
2	$v_1 w_1$	$u_1 w_1$	$P_0 V_1 W_1$	$I_{0v_1 w_1}$
3	$u_1 w_1$	$u_1 v_1$	$P_0 U_1 W_1$	$I_{0u_1 w_1}$

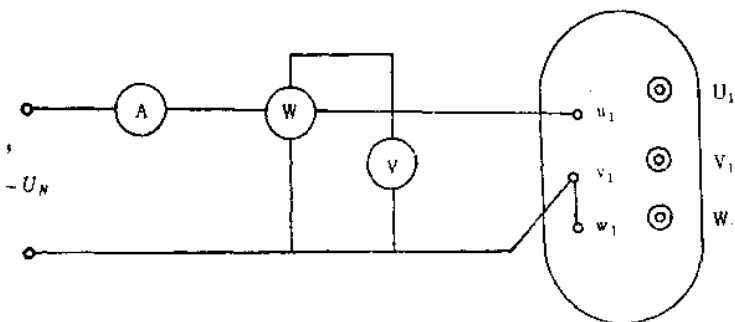


图5-50 三角形联结时的测量接线图

2) 对于  $u_1-w_2$ 、 $v_1-u_2$ 、 $w_1-v_2$  联结的三角形接线时，测量次序见表5-34，接线图如图5-51所示（施加电压为  $U_N$ ）。

表5-34  $u_1-w_2, v_1-u_2, w_1-v_2$ 联结时的测量次序

次序	供电端	短接端	测出 $P_0$ (W)	测出 $I_0$ (A)
1	$u_1 w_1$	$u_1 v_1$	$P_{0U_1W_1}$	$I_{0u_1v_1}$
2	$v_1 w_1$	$u_1 w_1$	$P_{0V_1W_1}$	$I_{0v_1w_1}$
3	$u_1 v_1$	$v_1 w_1$	$P_{0U_1V_1}$	$I_{0u_1v_1}$

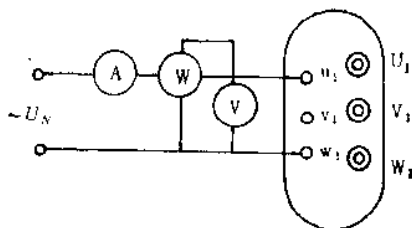


图5-51  $u_1-w_2, v_1-u_2, w_1-v_2$ 联结时测量接线图

以上两种三角形联结的空载电流，换算到三相空载电流  $I_0$  可按下式计算，即

$$I_0 = \frac{0.289(I_{0u_1v_1} + I_{0v_1w_1} + I_{0u_1w_1})}{I_N} \times 100\%$$

换算到三相的空载损耗  $P_0$  为

$$P_0 = \frac{P_{0U_1V_1} + P_{0V_1W_1} + P_{0U_1W_1}}{2}$$

3) 测量 Y、yn 联结时，测量次序见表5-35，接线图如图5-52

表5-35 Y, yn联结时的测量次序

次序	供电端	短接端	测出 $P_0$ (W)	测出 $I_0$ (A)
1	$u_1 v_1$	$w_1 n$	$P_{0U_1V_1}$	$I_{0u_1v_1}$
2	$v_1 w_1$	$u_1 n$	$P_{0V_1W_1}$	$I_{0v_1w_1}$
3	$w_1 u_1$	$v_1 n$	$P_{0U_1W_1}$	$I_{0u_1w_1}$

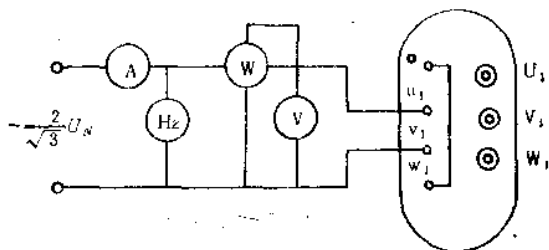


图5-52 Y, y联结时测量接线图

所示, 这时施加的电压  $U = \frac{2}{\sqrt{3}} U_N$ 。

换到三相时的空载电流  $I_0$

$$I_0 = \frac{0.333(I_{0u_1v_1} + I_{0v_1w_1} + I_{0w_1u_1})}{I_N} \times 100\%$$

换算到三相时的空载损耗  $P_0$  为

$$P_0 = \frac{P_{0u_1v_1} + P_{0v_1w_1} + P_{0w_1u_1}}{2}$$

4) 对于YN, y12联结, 在一次侧有中性点引出时, 试验次序如表5-36所示, 接线图如图5-53所示。

表5-36 YN, y12联结时的测量次序

次序	供电端	短接端	测出 $P_1$ (W)	测出 $I_0$ (A)
1	$u_1v_1$	$W_1N$	$P_{0u_1v_1}$	$I_{0u_1v_1}$
2	$v_1w_1$	$U_1N$	$P_{0v_1w_1}$	$I_{0v_1w_1}$
3	$w_1u_1$	$V_1N$	$P_{0w_1u_1}$	$I_{0w_1u_1}$

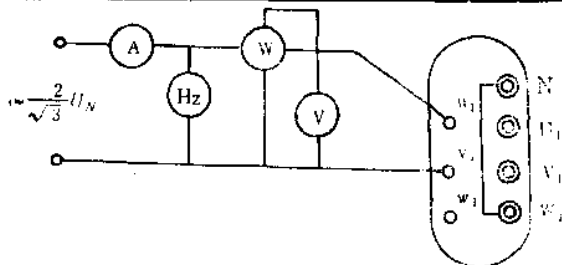


图5-53 YN, y12联结时测量接线图

三相空载电流  $I_0$  为

$$I_0 = \frac{0.333(I_{0u1v1} + I_{0v1w1} + I_{0w1u1})}{I_N} \times 100\%$$

三相空载损耗  $P_0$  为

$$P_0 = \frac{P_{0u1v1} + P_{0v1w1} + P_{0w1u1}}{2}$$

5) 对于 D, y11 联结时, 测量次序和接线分别如表 5-37 和图 5-54 所示。

表 5-37 D, y11 联结时的测量次序

次序	供电端	短接端	测出 $P_0$ (W)	测出 $I_0$ (A)
1	$u_1v_1$	$V_1w_1$	$P_{0u1v1}$	$I_{0u1v1}$
2	$v_1w_1$	$U_1w_1$	$P_{0v1w1}$	$I_{0v1w1}$
3	$w_1u_1$	$U_1V_1$	$P_{0w1u1}$	$I_{0w1u1}$

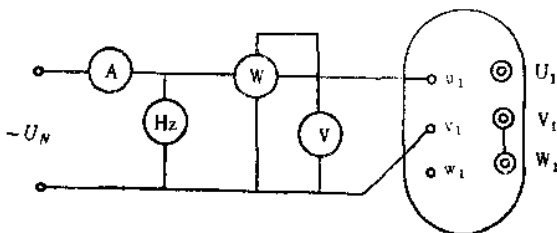


图 5-54 D, y11 联结时测量接线图

三相空载电流  $I_0$  为

$$I_0 = \frac{0.289(I_{0u1v1} + I_{0v1w1} + I_{0w1u1})}{I_N} \times 100\%$$

三相空载损耗  $P_0$  为

$$P_0 = \frac{P_{0u1v1} + P_{0v1w1} + P_{0w1u1}}{2}$$

(4) 修正计算

1) 电压没有加到额定值时换算

三角形联结时为

$$P_0 = \frac{P_{0ulvl} + P_{0v1wl} + P_{0w1ul}}{2} \times \left(\frac{U_N}{U}\right)^n \quad (\text{W})$$

$$I_0\% = \frac{0.289(I_{0ulvl} + I_{0v1wl} + I_{0w1ul})}{I_N} \times \left(\frac{U_N}{U}\right)^n \times 100\%$$

星形联结时为

$$P_0 = \left(\frac{P_{0ulvl} + P_{0v1wl} + P_{0w1ul}}{2}\right) \times \left(\frac{U_N}{U}\right)^n \quad (\text{W})$$

$$I_0\% = \frac{0.333(I_{0ulvl} + I_{0v1wl} + I_{0w1ul})}{I_N} \times \left(\frac{U_N}{U}\right)^n \times 100\%$$

式中  $U$ ——试验电压 (V) ;

$U_N$ ——额定电压 (V) ;

$n$ ——幂次, 热轧钢片  $n = 1.8$ , 冷轧钢片  $n = 1.9 \sim 2.0$ 。

2) 对于经过波形校正的单相损耗数据应符合下列要求:

$$P_{0ulvl} = P_{0v1wl} \quad |P_{0ulwl} - P_{0v1wl}| \times 100\% < 3\%$$

$$P_{0ulwl} = KP_{0ulvl} = KP_{0v1wl}$$

$$K = \frac{P_{0ulwl}}{P_{0ulvl}} = \frac{P_{0v1wl}}{P_{0v1wl}} = \frac{H + 2M_0 \left(\frac{S_1}{S_2}\right)}{H + M_0 \left(\frac{S_1}{S_2}\right)}$$

式中  $H$ ——铁心窗高 (mm) ;

$M_0$ ——铁心柱中心距离 (mm) ;

$S_1$ ——铁心柱截面积 ( $\text{cm}^2$ ) ;

$S_2$ ——铁轭截面积 ( $\text{cm}^2$ ) 。

变压器尺寸如图4-55所示。

一般  $K$  在  $1.3 \sim 1.4$  之间, 如果测试不符合上述两条要求, 则说明变压器有局部缺陷。

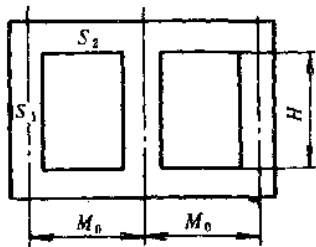


图5-55 变压器尺寸

例5-76 有一台5000kVA三相电力变压器, 已知额定电压比

$U_{N1}/U_{N2} = 38.5\text{kV}/10.5\text{kV}$ , 额定电流比  $I_{N1}/I_{N2} = 75\text{A}/275\text{A}$ , 空载损耗标准  $P_0 = 7.25\text{kW}$ , 空载电流  $I_0 = 1.2\%$ , 联结组别为 Y, d11, 从低压侧通入单相电压  $10.5\text{kV}$ , 空载试验数据如表5-38所示, 试判断  $P_0$  和  $I_0$  是否合格。

表5-38 空载试验数据

次 序	通 电 端	短 接 端	试验电压 (kV)	$I_0$ (A)	$P_0$ (kW)
1	$U_1V_1$	$v_1w_1$	10.5	3.5	4.86
2	$V_1W_1$	$u_1w_1$	10.5	3.45	4.80
3	$W_1U_1$	$u_1v_1$	10.5	3.48	4.82

(1) 空载损耗  $P_0'$

$$P_0' = \frac{4.86 + 4.80 + 4.82}{2} = 7.24\text{kW}$$

(2) 空载电流  $I_0'$

$$I_0' = \frac{0.289(3.5 + 3.45 + 3.48)}{275} \times 100\% = 1.10\%$$

由于  $P_0' < P_0$ 、 $I_0' < I_0$ , 所以这台变压器空载数据是合格的。

例5-77 有一台三相电力变压器, 已知额定容量为  $8000\text{kVA}$ , 额定电压比  $U_{N1}/U_{N2} = 35\text{kV}/3.15\text{kV}$ , 额定电流  $I_{N1}/I_{N2} = 132\text{A}/916\text{A}$ , 联结组别为 YN, d11, 空载损耗标准  $P_0 = 11.5\text{kW}$ , 空载电流标准  $I_0 = 0.8\%$ , 试通过单相测定空载数据来判定此台变压器的空载数据是否合格, 试验数据如表5-39所示。

表5-39 空载试验数据

次 序	通 电 端	短 路 端	试验电压 (kV)	$I_0$ (A)	$P_0$ (kW)
1	$u_1v_1$	$v_1w_1, W_1N$	3.15	8.42(7.4)	7.74(7.60)
2	$v_1w_1$	$u_1w_1, U_1N$	3.15	8.50(7.4)	7.86(7.62)
3	$w_1u_1$	$u_1v_1, V_1N$	3.15	10.69(7.69)	8.84(7.70)

注: 括弧内数据为查出故障后第二次测量结果。



(1) 空载电流  $I_0$  :

$$I_0' = \frac{0.289(8.42 + 8.50 + 10.69)}{916} \times 100\% \\ = 0.87\% > 0.8\%, \text{ 不合格}$$

(2) 空载损耗  $P_0$  :

$$P_0' = \frac{7.74 + 7.86 + 8.84}{2} = 12.2 \text{ kW} > 11.5 \text{ kW}, \text{ 不合格}$$

说明此台变压器铁心有故障，吊心检查去掉短路故障后，重测空载数据，计算如下：

$$I_0 = \frac{0.289(7.4 + 7.4 + 7.69)}{916} \times 100\% = 0.71\% < 0.8\%, \text{ 合格},$$

$$P_0 = \frac{7.60 + 7.62 + 7.70}{2} = 11.4 \text{ kW} < 11.5 \text{ kW}, \text{ 合格}$$

## 五、感应高压试验

### 1. 试验目的

在做高频耐压试验时，主要考核和检查线圈主绝缘对地的电气绝缘强度，而变压器的纵绝缘（包括线圈匝间、层间和相间绝缘）要靠感应高压试验进行检查。

### (二) 试验方法

为了提高试验电压值，又不使磁通密度上升过多，所以只有提高试验电源的频率  $f$ （因为  $E = 4.44fWBS \propto Kf$ ）。通常试验电源频率  $f$  取  $100 \sim 200 \text{ Hz}$ ，试验持续时间与频率大小有关，如采用  $100 \text{ Hz}$  电源试验时，持续时间为  $60 \text{ s}$ ，一般按下式计算，即

持续时间为

$$t = 120 \times \frac{f_N}{f} \quad (\text{s})$$

式中  $f$ ——试验电源频率 (Hz)；

$f_N$ ——变压器额定频率 (Hz)。

当  $f = 200 \text{ Hz}$  时，则  $t = 120 \times \frac{50}{200} = 30 \text{ s}$ 。

如果将电源频率提高到300Hz时, 试验持续时间不得少于20s; 双倍工频电源(100Hz)试验的持续时间不得少于15s。

### 3. 试验电源的容量计算

(1) 三倍频变压器的容量计算 三倍频变压器的容量大小一般取被试变压器额定容量的2%~2.5%, 即

$$P_3 = (2\% \sim 2.5\%) P_N$$

式中  $P_N$ ——被试变压器的额定容量(kVA)。

**例5-78** 一台5600kVA三相电力变压器, 拟采用三倍频试验变压器做感应高压试验, 试计算三倍频变压器的容量范围应是多少。

三倍频变压器容量 $P_3$ 为

$$\begin{aligned} P_3 &= (2\% \sim 2.5\%) P_N = (2\% \sim 2.5\%) \times 5600 \\ &= 112 \sim 140 \text{ kVA} \end{aligned}$$

(2) 采用异步电动机组成的变频机组容量的计算

#### 1) 变频机容量计算

试验电源有功功率 $P$ 为

$$P = \left( \frac{f}{f_N} \right)^m P_0$$

试验电源无功功率 $Q$ 为

$$Q = \sqrt{P_0^2 - P^2} \times \frac{U_f}{U_N}$$

试验电源的视在功率 $P_s$ 为

$$P_s = \sqrt{P^2 + Q^2}$$

三相绕线型异步电动机容量 $P'$ 为

$$P' = \frac{1}{2} P_s$$

式中  $f$ ——施于被试变压器的电源频率(Hz);

$f_N$ ——变压器额定频率(Hz);

$m$ ——被试变压器硅钢片品种系数, 冷轧硅钢片  $m = 1.6$ ,

热轧硅钢片  $m = 1.3$ ;

$P_0$  —— 被试变压器做额定空载试验时的电源容量,

$$P_{0r} = \frac{I_0 \%}{100} P_{Nf}$$

$P_0$  —— 被试变压器额定空载损耗 (kW);

$U_N$  —— 被试变压器额定电压 (V);

$U_t$  —— 施加被试变压器的电压 (V);

$P_t$  —— 试验电源的视在功率 (kVA);

$P'$  —— 选用的异步电动机的功率 (kW)。

2) 拖动用电动机的容量计算

$$P = \left( \frac{f_t - f_N}{f_t} \right) \times P' \quad (\text{kW})$$

**例5-79** 有一台3150kVA三相电力变压器, 额定电压比为  $U_{N1}/U_{N2} = 35\text{kV}/3.15\text{kV}$ ,  $f_N = 50\text{Hz}$ , 变压器铁心采用0.35mm冷轧钢板制造, 已知  $P_0 = 4.75\text{kW}$ ,  $I_0 = 1.0\%$ , 试验电压  $U_t = U_N$ , 拟采用两台电动机组合成变频机组, 问变频机容量和电动机容量各是多少。

(1) 选用试验电源频率为150Hz, 试验电源有功功率为

$$P = \left( \frac{f}{f_N} \right)^m \times P_0 = \left( \frac{150}{50} \right)^{1.8} \times 4.75 = 27.6\text{kVA}$$

(2) 试验电源无功功率  $Q$

$$\begin{aligned} Q &= \sqrt{P_{0r}^2 - P_0^2} = \sqrt{(I_0 \% \times P_N)^2 - P_0^2} \\ &= \sqrt{(1\% \times 3150)^2 - 4.75^2} = 31.1\text{kvar} \end{aligned}$$

(3) 试验电源的视在功率  $P_t$

$$P_t = \sqrt{P^2 + Q^2} = \sqrt{27.6^2 + 31.1^2} = 41.6\text{kVA}$$

(4) 选用电动机容量  $P'$

$$P' = \frac{1}{2} P_t = \frac{1}{2} \times 41.6 = 20.8\text{kW}$$

选用22kW三相绕线型异步电动机。

(5) 拖动用三相异步电动机功率为

$$P = \left( \frac{f_s - f_N}{f_s} \right) P' = \left( \frac{150 - 50}{150} \right) \times 22 = 14.7 \text{ kW}$$

选用15kW三相异步电动机拖动22kW三相异步电动机组成变频机组，接线图如图5-56所示，三倍频电源接线图如图5-57所示。

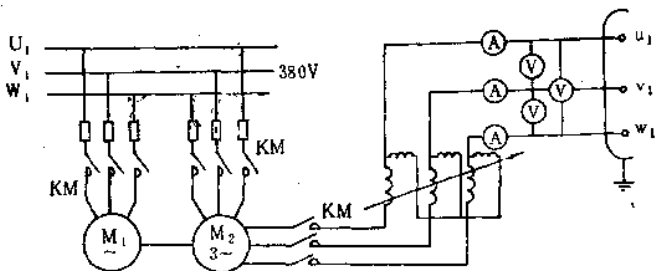


图5-56 用变频机作变压器感应试验接线图

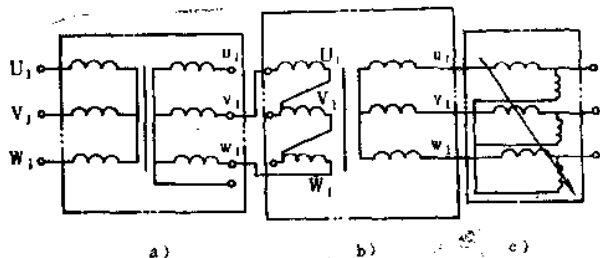


图5-57 三倍频变压器试验全绝缘变压器（V<sub>1</sub>、W<sub>1</sub>相）接线图

a) 全绝缘变压器 b) 三倍频变压器 c) 调压器

## 六、变压器短路试验

### 1. 试验目的和试验方法

为了测试方便，变压器短路试验通常是由高压侧绕组的额定分接头处供电，将非电源测量侧线端人为短路，从高压侧通入额定频率的额定电流，使一、二次绕组都达到额定电流，这时功

率表指示为短路损耗，电压表指示为短路电压。

由于变压器处于短路状态下，所以电压和电流波形都是正弦形，因此不必考虑波形畸变对测量结果的影响。

试验时可用三相电源，也可用单相电源进行试验。

通过短路试验可以确定短路损耗和短路电压，短路电压是变压器并联运行的基本条件之一。通过短路损耗大小的分布和分析，可以判断变压器的故障。

## 2. 试验线路图

短路试验接线图，如图5-58所示。

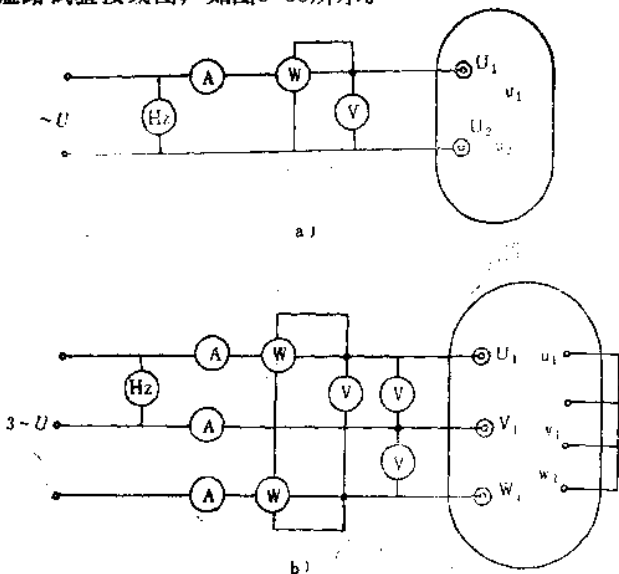


图5-58 短路试验接线图

a) 单相变压器 b) 三相变压器

## 3. 短路试验所需电源容量的计算

电源容量  $P$  为

$$P = \frac{u_k \%}{100} \left( \frac{I'_K}{I_N} \right)^2 P_N \quad (\text{kVA})$$

短路电压  $U_k$  为

$$U_K = U_N \frac{u_K\%}{100} \quad (\text{V})$$

式中  $P_N$ 、 $U_N$ 、 $I_N$ ——被试变压器的额定功率、额定电压、额定电流；

$I'_K$ ——试验时施加的电流(A)；

$u_K\%$ ——用百分数表示的短路电压。

例5-80 一台1600kVA三相油浸电力变压器，额定电压  $U_{N1}/U_{N2} = 10\text{kV}/0.4\text{kV}$ ，绕组联结组别为Y，yn0，又知  $P_K = 16.5\text{kW}$ ， $I_0 = 1.1\%$ ， $u_K = 4.5\%$ ，试求电源容量和短路试验电压值各是多少。

(1) 额定电流

$$I_{N1} = \frac{P_N}{\sqrt{3} U_{N1}} = \frac{1600}{\sqrt{3} \times 10} = 92.4\text{A}$$

$$I_{N2} = \frac{P_N}{\sqrt{3} \times U_{N2}} = \frac{1600}{\sqrt{3} \times 0.4} = 2309\text{A}$$

(2) 从高压侧通入电压，使  $I_{N1} = 92.4\text{A}$ 。

做短路试验所需电源容量  $P$  为

$$P = \frac{u_K\%}{100} \left( \frac{I'_K}{I_N} \right)^2 P_N = \frac{4.5}{100} \left( \frac{92.4}{92.4} \right)^2 \times 1600 = 72\text{kVA}$$

(3) 短路电压  $U_K$

$$U_K = U_{N1} \times \frac{u\%}{100} = 10 \times \frac{4.5}{100} = 450\text{V}$$

例5-81 一台6300kVA三相变压器，电压比  $U_{N1}/U_{N2} = 11\text{kV}/3.15\text{kV}$ ，电流比  $I_{N1}/I_{N2} = 331\text{A}/1155\text{A}$ ，联结组别为Y，d11， $P_K = 41\text{kW}$ ， $I_0 = 0.7\%$ ， $u_K = 5.5\%$ ，试求做短路试验时，试验电源容量和试验电压应是多少。

试验电源容量  $P$  为

$$P = \frac{u_K\%}{100} \left( \frac{I'_K}{I_N} \right)^2 P_N = \frac{5.5}{100} \times \left( \frac{331}{331} \right)^2 \times 6300 = 346.5\text{kVA}$$

试验电压值  $U_K$  为

$$U_K = U_{N1} \times \frac{u_K\%}{100} = 11000 \times \frac{5.5}{100} = 605V$$

#### 4. 短路试验的计算

(1) 额定电流下短路试验计算

短路损耗  $P_{Kt}$  为

$$P_{Kt} = K[\alpha_1 + (\pm \alpha_2)] \quad (W)$$

短路电压  $u_K\%$  为

$$u_K\% = \frac{U_K}{U_N} \times 100\%$$

(2) 非额定电流下短路试验计算

短路损耗为:

$$P_{Kt} = K[\alpha_1 + (\pm \alpha_2)] \left( \frac{I_N}{I'_K} \right)^2 \quad (W)$$

短路电压  $u_K\%$  为

$$u_K\% = \frac{U_K}{U_N} \times \frac{I_N}{I'_K} \times 100\%$$

式中  $I'_K$ ——试验时的电流(A);

$\alpha_1, \alpha_2$ ——功率表指示;

$K$ ——系数;

$U_N, I_N$ ——被试变压器的额定电压和额定电流;

$U_K$ ——试验时所加的电压(V);

(3)  $P_{Kt}, U_{Kt}$  换算到  $75^\circ C$  的  $P_{Kt75^\circ C}$  及  $U_{Kt75^\circ C}$

$P_{Kt}$  换算到  $75^\circ C$  时的值为

$$P_{Kt75^\circ C} = P_{Kt} \times a = P_{Kt} \times \frac{T + 75}{T + t}$$

$U_{Kt}$  换算到  $75^\circ C$  时则为

$$U_{Kt75^\circ C} = \sqrt{(u_{Kt}\% \cdot a)^2 + U_p^2}$$

式中  $U_{Kt}\% = \frac{P_{Kt}}{10P_N} \cdot a \quad (\%)$

$$U_p = \sqrt{(u_{Kt}\%)^2 - (U_{at}\%)^2} = \sqrt{(U_{Kt}\%)^2 - \left(\frac{P_{Kt}}{10P_N}\right)^2}$$

$U_{Kt}$  换算到75℃时

$$\begin{aligned} U_{Kt75^\circ\text{C}} &= \sqrt{U_p^2 + (U_{at}\% \cdot a)^2} \times 100\% \\ &= \sqrt{U_{Kt}^2 - \left(\frac{P_{Kt}}{10P_N}\right)^2 + \left(\frac{P_{Kt}}{10P_N} \cdot a^2\right)^2} \times 100\% \\ &= \sqrt{U_{Kt}^2 + \left(\frac{P_{Kt}}{10P_N}\right)^2 (a^2 - 1)} \times 100\% \end{aligned}$$

式中  $T$ ——系数，铜线  $T = 235$ ，铝线  $T = 225$ ；

$t$ ——测量环境温度 (℃)；

$P_{Kt}$ ——温度为  $t$ ℃时的短路损耗 (W)；

$U_{at}\%$ —— $t$ ℃时短路电压的有功分量；

$U_p\%$ —— $t$ ℃时短路电压的无功分量；

$P_N$ ——被试变压器的额定功率 (kVA)。

例5-82 一台1600kVA三相变压器，从高压侧做短路试验，已知  $U_{N1} = 10\text{kV}$ ， $I_{N1} = 92.4\text{A}$ ， $u_K = 4.5\%$ ，试验时施加电压  $U_c = 380\text{V}$ ， $I'_K = 85\text{A}$ ，测出短路损耗  $P'_K = 14\text{kW}$ ，环境温度  $t = 25^\circ\text{C}$ ，仪表损耗  $P_t = 146\text{W}$ ，试计算：

- (1) 额定时的短路损耗  $P_{Kt}$ ；
- (2) 额定时的短路电压  $u_{Kt}\%$ ；
- (3) 换算到75℃时数值。

额定短路损耗  $P_{Kt}$  为

$$\begin{aligned} P_{Kt} &= (P_K - P_t) \left(\frac{I_N}{I'_K}\right)^2 \\ &= (14000 - 146) \left(\frac{92.4}{85}\right)^2 = 16371\text{W} \end{aligned}$$

额定短路电压  $U_{Kt}$  为



$$U_{K\%} = \frac{U_K}{U_N} \times 100\% \times \frac{I_N}{I'_K} = \frac{380}{10000} \times 100\% \times \frac{92.4}{85} = 4.1\%$$

换算到75℃时的 $P_{K75^\circ C}$ 为

$$P_{K75^\circ C} = P_{K\%} \cdot a = P_{K\%} \times \frac{T+75}{T+L} = 16371 \times \frac{235+75}{235+25} = 19.62 \text{ kW}$$

$$U_{av}\% = \frac{P_{K\%}}{10P_N} \times 100\% = \frac{16.371}{10 \times 1600} \times 100\% = 1.02\%$$

$$U_p\% = \sqrt{(U_{K\%})^2 - (U_{av}\%)^2} = \sqrt{4.1^2 - 1.02^2} = 3.97\%$$

$$U_{K75^\circ C}\% = \sqrt{(U_{av}\%)^2 + U_p^2} \times 100\% = \sqrt{(1.02 \times 1.19)^2 + 3.97^2} = 4.2\%$$

(4) 线圈电阻损耗计算

单相变压器线圈电阻损耗计算, 即

$$P_K = I_{N1}^2 R_1 + I_{N2}^2 R_2 \quad (\text{W})$$

三相变压器线圈电阻损耗计算, 即

1) Y, y联结组

$$P_K = I_{N1}^2 \frac{R_{U1V1\%} + R_{V1W1\%} + R_{W1U1\%}}{2} + I_{N2}^2 \frac{R_{U1V1\%} + R_{V1W1\%} + R_{W1U1\%}}{2} \quad (\text{W})$$

2) D, d联结组

$$P_K = \left(\frac{I_{N1}}{\sqrt{3}}\right)^2 \frac{3(R_{U1V1\%} + R_{V1W1\%} + R_{W1U1\%})}{2} + \left(\frac{I_{N2}}{\sqrt{3}}\right)^2 \frac{3(R_{U1V1\%} + R_{V1W1\%} + R_{W1U1\%})}{2} \quad (\text{W})$$

3) Y, d联结组

$$P_K = I_{N1}^2 \frac{(R_{U1V1\%} + R_{V1W1\%} + R_{W1U1\%})}{2}$$

$$+ \left( \frac{I_{N2}}{\sqrt{3}} \right)^2 \frac{3(R_{U1V1t} + R_{V1W1t} + R_{W1U1t})}{2}$$

换算到75℃时则为

$$P_{K75^{\circ}\text{C}} = \alpha P_{Kt} \quad (\text{W})$$

式中  $R_{U1V1t}, R_{V1W1t}, R_{W1U1t}$  —— 变压器一次绕组温度为  $t^{\circ}\text{C}$  时的电阻值( $\Omega$ );

$R_{U2V2t}, R_{V2W2t}, R_{W2U2t}$  —— 变压器二次绕组温度为  $t^{\circ}\text{C}$  时的电阻值( $\Omega$ );

$I_{N1}, I_{N2}$  —— 变压器一、二次绕组中额定电流(A)。

#### (5) 附加损耗计算

$$P_{f1} = P'_{Kt} - P_{Kt}$$

式中  $P_{f1}$  ——  $t^{\circ}\text{C}$  时附加损耗(W);

$P'_{Kt}$  —— 试验时, 在  $t^{\circ}\text{C}$  时测出的变压器的电阻损耗(W);

$P_{Kt}$  —— 在  $t^{\circ}\text{C}$  时变压器线圈直流电阻损耗(W);

$t$  —— 环境温度( $^{\circ}\text{C}$ )。

$P_{f1}$  换算到75℃时的值为

$$P_{f75^{\circ}\text{C}} = \frac{1}{\alpha} P_{f1} \quad (\text{W})$$

变压器总直流电阻损耗为

$$P_{K75^{\circ}\text{C}} + P_{f75^{\circ}\text{C}} \quad (\text{W})$$

#### 4. 采用单相电源做三相变压器的短路试验

试验目的及试验方法, 采用单相电源做三相变压器短路试验的目的在于: 只有单相电源或三相电源容量不够; 对于短路损耗超出标准或比同类变压器产品的损耗大时, 可采用单相电源测试短路损耗, 以确定每相短路损耗是否平衡、从而查出并绕线圈换位是否正确以及其他故障。

试验时, 低压侧线圈端要人为短接, 从高压侧通入单相低电压, 进行测量。

(1) 高压绕组为Y联结(如Y, y; Y, d组别) 一次绕组分别

通入单相电源，二次绕组短接，测量次序如表5-40所示。

表5-40 高压侧绕组为Y联结时的测量次序

次序	通电相	短接相	试验电压 (V)	测出电流 (A)	测出损耗 (W)
1	$U_1V_1$	$u_1v_1w_1$	$U_{U_1V_1}$	$I_{U_1V_1}$	$P_{KU_1V_1}$
2	$V_1W_1$	$u_1v_1w_1$	$U_{U_1W_1}$	$I_{V_1W_1}$	$P_{KV_1W_1}$
3	$W_1U_1$	$u_1v_1w_1$	$U_{W_1U_1}$	$I_{W_1U_1}$	$P_{KW_1U_1}$

短路损耗  $P_{K_s}$  为

$$P_{K_s} = \frac{P_{KU_1V_1} + P_{KV_1W_1} + P_{KW_1U_1}}{2} - P_{II}$$

仪表损耗  $P_{II}$  为

$$P_{II} = U^2 \frac{R_W R_V}{R_W + R_V}$$

式中  $U$ ——试验电压 (V)；  
 $R_V$ ——电压表内电阻 ( $\Omega$ )；  
 $R_W$ ——功率表内电阻 ( $\Omega$ )。

短路电压  $U_{K_s}\%$  为

$$U_{K_s}\% = \frac{\sqrt{3(U_{KU_1V_1} + U_{KV_1W_1} + U_{KW_1U_1})}}{6} \times 100\%$$

不在额定电压试验时， $I'_k < I_N$ ，则按下面公式换算到额定值，即

$$P_{KN} = P_{K_s} \left( \frac{I_N}{I'_k} \right)^2 \quad (\text{W})$$

$$U_{KN}\% = \frac{U'_k}{U_N} \left( \frac{I_N}{I'_k} \right)$$

(2) 高压侧绕组为D联结 (如D, d, D, y组别)，测量次序见表5-41。

短路损耗  $P_K$  为

$$P_K = \frac{P_{KU_1V_1} + P_{KV_1W_1} + P_{KW_1U_1}}{2} \quad (\text{W})$$

表5-41 高压侧绕组为D联结时的测量次序

次序	通电相	一次线圈 短路相	二次线圈 短路相	通入电压 (V)	测出电流 (A)	测出损耗 (W)
1	U <sub>1</sub> V <sub>1</sub>	W <sub>1</sub>	u <sub>1</sub> v <sub>1</sub> w <sub>1</sub>	U <sub>KU<sub>1</sub>V<sub>1</sub></sub>	I <sub>KU<sub>1</sub>V<sub>1</sub></sub>	P <sub>KU<sub>1</sub>V<sub>1</sub></sub>
2	V <sub>1</sub> W <sub>1</sub>	U <sub>1</sub>	v <sub>1</sub> w <sub>1</sub> u <sub>1</sub>	U <sub>KV<sub>1</sub>W<sub>1</sub></sub>	I <sub>KV<sub>1</sub>W<sub>1</sub></sub>	P <sub>KV<sub>1</sub>W<sub>1</sub></sub>
3	W <sub>1</sub> U <sub>1</sub>	V <sub>1</sub>	w <sub>1</sub> u <sub>1</sub> v <sub>1</sub>	U <sub>KW<sub>1</sub>U<sub>1</sub></sub>	I <sub>KW<sub>1</sub>U<sub>1</sub></sub>	P <sub>KW<sub>1</sub>U<sub>1</sub></sub>

短路电压 $U_K\%$ 为

$$U_K\% = \frac{U_{KU_1V_1} + U_{KV_1W_1} + U_{KW_1U_1}}{3} \times 100\%$$

换算到额定值为

$$P_{KN} = P_K \left( \frac{I_N}{I'_k} \right)^2 \quad (\text{W})$$

$$U_{KN}\% = \frac{U_K\%}{U_N} \frac{I_N}{I'_k} \times 100$$

## 第六章 其他电气设备计算

### 第一节 单相异步电动机重绕计算

#### 一、改电压计算

##### 1. 单相串励电动机改电压计算

##### (1) 改压后的每极匝数

$$N_1' = N_1 \frac{U'}{U} \quad (\text{匝/极})$$

式中  $N_1$ 、 $N_1'$ ——改压前后定子绕组每极匝数；  
 $U$ 、 $U'$ ——改压前后电动机的工作电压(V)。

##### (2) 改压后定子绕组的线径

$$d_1' = d_1 \sqrt{\frac{U}{U'}} \quad (\text{mm})$$

式中  $d_1$ 、 $d_1'$ ——改压前后定子绕组线径(mm)。

##### (3) 改压后电枢绕组匝数

$$N_a' = N_a \frac{U'}{U} \quad (\text{匝})$$

式中  $N_a$ 、 $N_a'$ ——改压前后电枢绕组匝数。

##### (4) 改压后电枢绕组线径

$$d_a' = d_a \sqrt{\frac{N_a}{N_a'}} \quad (\text{mm})$$

式中  $d_a$ 、 $d_a'$ ——改压前后电枢绕组线径(mm)。

**例6-1** 有一台单相串励电动机，40W，220V，50Hz，额定电流为0.42A，额定转速为6000r/min，已知定子磁极每极绕组匝数为470匝，线径 $\phi$ 0.25mm，电枢绕组匝数77匝，线径 $\phi$ 0.17mm，总导体数为3696，换向器片数为24，要求工作电压改为127V，问如何重绕？

(1) 定子每极匝数  $N_1'$

$$N_1' = N_1 \frac{U'}{U} = 470 \times \frac{127}{220} = 271 \text{ 匝}$$

(2) 定子磁极绕组改压后的线径

$$d_1' = d_1 \sqrt{\frac{U}{U'}} = 0.25 \sqrt{\frac{220}{127}} = 0.33 \text{ mm}$$

(3) 电枢绕组匝数

$$N_a' = N_a \frac{U'}{U} = 77 \times \frac{127}{220} = 44 \text{ 匝}$$

(4) 电枢绕组改压后的线径

$$d_a' = d_a \sqrt{\frac{N_a}{N_a'}} = 0.17 \sqrt{\frac{77}{44}} = 0.22 \text{ mm}$$

## 2. 罩极电动机改电压计算

(1) 改电压后的每极匝数

$$N_m' = N_m \frac{U'}{U} \quad \text{匝/极}$$

式中  $N_m$ 、 $N_m'$ ——改压前后的每极匝数。

(2) 改压后的线径

$$d_m' = d_m \sqrt{\frac{U}{U'}} \quad (\text{mm})$$

式中  $d_m$ 、 $d_m'$ ——改压前后的绕组线径(mm)。

**例6-2** 一台风扇罩极电动机，220V，已知定子每极匝数为500匝，线径  $d = 0.40 \text{ mm}$ ，要求改380V使用，试计算改压后的绕组匝数和线径。

(1) 改压后的每极匝数

$$N_m' = N_m \frac{U'}{U} = 500 \times \frac{380}{220} = 864 \text{ 匝/极}$$

(2) 改压后的绕组线径

$$d_m' = d_m \sqrt{\frac{U}{U'}} = 0.4 \times \sqrt{\frac{220}{380}} = 0.30 \text{ mm}$$

## 3. 交流分相电动机改压计算

(1) 改电压后每极匝数

一次绕组为

$$N_{m'} = N_m \frac{U'}{U} \quad (\text{匝/极})$$

二次绕组为

$$N_{s'} = N_s \frac{U'}{U} \quad (\text{匝/极})$$

(2) 改电压后绕组线径

一次绕组为

$$d_{m'} = d_m \sqrt{\frac{U}{U'}} \quad (\text{mm})$$

二次绕组为

$$d_{s'} = d_s \sqrt{\frac{U}{U'}} \quad (\text{mm})$$

(3) 改电压后绕组截面积

一次绕组

$$S_{m'} = \frac{\pi d_{m'}^2}{4} \quad (\text{mm}^2)$$

二次绕组

$$S_{s'} = \frac{\pi d_{s'}^2}{4} \quad (\text{mm}^2)$$

(4) 改压后电容器的容量

$$C'_y = C_y \frac{d_{m'}^2 U}{d_m^2 U'} = C_y \frac{S_{m'} U}{S_m U'} \quad (\mu\text{F})$$

式中  $C_y$ 、 $C'_y$ ——改压前后电容器的电容量( $\mu\text{F}$ )。

(5) 改压后起动电容器的容量

$$C_{s'} = C_{s''} \frac{d_{m'} U}{d_m U'} \quad (\mu\text{F})$$

式中  $C_{s''}$ 、 $C_{s'}$ ——改电压前后起动电容器的电容量( $\mu\text{F}$ )。

**例6-3** 一台750W单相电容起动分相电动机, 220V, 额定电流为6.25A, 已知一次绕组每极匝数为146匝, 线径为0.67mm, 二次绕组每极匝数为165匝, 线径为0.62mm, 起动电容为200 $\mu\text{F}$ ,

要求工作电压改为 105V, 试计算重绕后所需匝数和线径以及电容值各是多少。

(1) 改压后每极匝数

一次绕组为

$$N_{m'} = N_m \frac{U'}{U} = 146 \times \frac{105}{220} = 70 \text{ 匝/极}$$

二次绕组为

$$N_{a'} = N_a \frac{U'}{U} = 165 \times \frac{105}{220} = 79 \text{ 匝/极}$$

(2) 改压后的绕组线径

一次绕组为

$$d_{m'} = d_m \sqrt{\frac{U}{U'}} = 0.67 \times \sqrt{\frac{220}{105}} = 0.97 \text{ mm}$$

二次绕组为

$$d_{a'} = d_a \sqrt{\frac{U}{U'}} = 0.62 \times \sqrt{\frac{220}{105}} = 1.20 \text{ mm}$$

(3) 起动电容器的电容值

$$C_{s'} = C_s \frac{d_{m'}^2 U}{d_m^2 U'} = 200 \left( \frac{0.97}{1.2} \right)^2 \times \frac{220}{105} = 274 \mu\text{F}$$

## 二、简易重绕计算

### 1. 单相串励电动机重绕计算

单相串励电动机只有空壳配线圈时, 按下列计算公式进行计算

(1) 计算功率的确定

$$P_{\text{计}} = \frac{\alpha D_2^2 l_2 B_g n A}{8.6 \times 10^4} \quad (\text{W})$$

式中  $\alpha$ ——极弧系数,  $\alpha = 0.6 \sim 0.7$ ;

$D_2$ ——电枢铁心外径(cm);

$l_2$ ——电枢铁心长度(cm);

$B_g$ ——气隙磁通密度,  $B_g = 0.35 \sim 0.5\text{T}$ ;

$A$ ——线负载,  $A = 60 \sim 120\text{A/cm}$ , 短时工作时可取大



些, 达160A/cm,

$n$ ——电机工作转速, 对于单相串励电动机  $n = 4000 \sim 15000 \text{r/min}$ 。

(2) 电动机输出额定功率

$$P_N = \frac{3\eta}{2 + \eta} P_{\text{计}}$$

式中  $\eta$ ——电动机效率,  $\eta = 0.5 \sim 0.65$ 。

(3) 电枢电流

$$I_a = \frac{P_N}{\eta \cos \varphi U_N} \quad (\text{A})$$

式中  $\cos \varphi$ ——电机功率因数, 一般取0.9~0.95;

$U_N$ ——额定电压,  $U_N = 3.6 \sim 250 \text{V}$ , 要求  $U_N \leq K e_K$ ;

$K$ ——换向片数;

$e_K$ ——相邻换向片间电压。

(4) 转子绕组总导体数

$$N = \frac{\sqrt{2} \times 60 a E}{p n \Phi} \quad (\text{根})$$

式中  $E$ ——电动势,  $E = \frac{2 + \eta}{3} U_N \cos \varphi (\text{V})$ ;

$a$ ——电枢绕组并联支路对数;

$p$ ——电机的极对数;

$\Phi$ ——每极磁通量,  $\Phi = B_s b_p l_1 \times 10^{-4} (\text{Wb})$ ;

$b_p$ ——定子磁极宽度(cm);

$l_1$ ——定子磁极长度(cm)。

(5) 电枢元件匝数

$$N_v = \frac{N}{2K} \quad (\text{匝})$$

(6) 电枢绕组线径

$$d_w = 1.13 \sqrt{\frac{I}{J_u}} \quad (\text{mm})$$

式中  $J$ ——导线电流密度, 连续工作时,  $J = 5 \sim 6.5 \text{A/mm}^2$ ,

负载持续率为60%时,  $J = 6.5 \sim 8.5 \text{A/mm}^2$ ; 40%时, 取  $J = 8 \sim 10 \text{A/mm}^2$ 。

(7) 定子绕组每极匝数

$$N_1 = K_B \frac{N}{2} \quad (\text{匝/极})$$

式中  $K_B$ ——变换系数, 2极时取0.1~0.25; 4极时取0.05~0.1。

(8) 定子绕组线径

$$d_1 = (1.34 \sim 1.45) d_s \quad (\text{mm})$$

(9) 电枢铁心轭部磁通密度

$$B_{r2} = \frac{\Phi}{1.86 h_{r2} l_2} \times 10^4 \quad (\text{T})$$

式中  $h_{r2}$ ——电枢铁心轭部高度(cm)。

连续工作时,  $B_{r2} = 1.3 \sim 1.5 \text{T}$ ; 短时工作时,  $B_{r2} = 1.5 \sim 1.7 \text{T}$ 。

(10) 电枢铁心齿部磁通密度

$$B_r = \frac{B_s t_2}{0.93 b_2} \quad (\text{T})$$

式中  $t_2$ ——电枢齿距(cm);

$b_2$ ——电枢槽齿宽度(cm)。

连续工作时,  $B_r = 1.3 \sim 1.5 \text{T}$ , 短时工作时,  $B_r = 1.5 \sim 1.7 \text{T}$ 。

**例6-4** 有一台交直两用的串励电动机铁心空壳, 拟想配线圈, 使用220V单相交流电源上, 问如何计算。

实测铁心数据:

转子(电枢)外径  $D_2 = 3.81 \text{cm}$ , 电枢铁心长度  $l_2 = 4.4 \text{cm}$ , 电枢铁心轭高  $h_{r2} = 0.76 \text{cm}$ , 电枢铁心齿宽  $b_{r2} = 0.326 \text{cm}$ , 电枢槽数  $Z_2 = 11$ 槽; 换向片数  $K = 33$ 片, 电机极数  $2p = 2$ 极, 定子磁极宽度  $b_p = 3.1 \text{cm}$ 。

(1) 选择电磁参数

- 1) 气隙磁通密度  $B_g = 0.5\text{T}$ ;
- 2) 线负载  $A = 115\text{A/cm}$ ;
- 3) 额定转速  $n = 12000\text{r/min}$ ;
- 4) 极弧系数  $\alpha = 0.65$ ;
- 5) 电动机效率  $\eta = 0.65$ ;
- 6) 电动机功率因数  $\cos\varphi = 0.90$ 。

(2) 计算功率  $P_{\text{计}}$

$$P_{\text{计}} = \frac{\alpha D_1^2 l_2 B_g n A}{8.6 \times 10^4}$$

$$= \frac{0.65 \times 3.81^2 \times 4.4 \times 0.5 \times 12000 \times 115}{8.6 \times 10^4}$$

$$= 333.1\text{W}$$

(3) 额定输出功率  $P_N$

$$P_N = \frac{3\eta}{2+\eta} P_{\text{计}} = \frac{3 \times 0.65}{2+0.65} \times 333.1 = 245\text{W}$$

(4) 电枢电流  $I_2$

$$I_2 = \frac{P_N}{\eta \cos\varphi U_N} = \frac{245}{0.65 \times 0.9 \times 220} = 1.9\text{A}$$

(5) 每极磁通量  $\Phi$

$$\Phi = B_g b_p l_2 \times 10^{-4} = 0.5 \times 3.1 \times 4.4 \times 10^{-4}$$

$$= 6.82 \times 10^{-4}\text{Wb}$$

(6) 电枢绕组电动势  $E$

$$E = (0.75 \sim 0.82) U_N = 165 \sim 180.4\text{V}$$

取  $E = 165\text{V}$ 。

(7) 电枢绕组总导体数  $N$

$$N = \frac{\sqrt{2} \times 60 \alpha E}{p n \Phi} = \frac{\sqrt{2} \times 60 \times 1 \times 165}{1 \times 12000 \times 6.82 \times 10^{-4}}$$

$$= 1705\text{根}$$

(8) 电枢元件匝数  $N_y$

$$N_y = \frac{N}{2K} = \frac{1705}{2 \times 33} = 25.8, \text{ 取 } 25 \text{ 匝}$$

(9) 实际电枢绕组总导体数  $N'$

$$N' = 2KN_y = 2 \times 33 \times 25 = 1650 \text{ 根}$$

(10) 电枢绕组线径  $d_2$

$$d_2 = 1.13 \sqrt{\frac{I_2}{J_2}} = 1.13 \sqrt{\frac{1.9}{12}} = 0.45 \text{ mm}$$

选  $J_2 = 12 \text{ A/mm}^2$ 。

截面积为

$$S_2 = \frac{\pi d_2^2}{4} = \frac{\pi \times 0.45^2}{4} = 0.16 \text{ mm}^2$$

(11) 电枢铁心齿距  $t_2$

$$t_2 = \frac{\pi D_2}{Z_2} = \frac{\pi \times 3.81}{11} = 1.09 \text{ cm}$$

(12) 电枢铁心齿部磁通密度  $B_{r2}$

$$B_{r2} = \frac{B_s t_2}{0.93 \times b_{r2}} = \frac{0.5 \times 1.09}{0.93 \times 0.326} = 1.798 \text{ T}$$

(13) 电枢铁心轭部磁通密度  $B_{j2}$

$$\begin{aligned} B_{j2} &= \frac{\Phi \times 10^4}{1.86 \times h_{j2} l_2} \\ &= \frac{6.82 \times 10^{-4} \times 10^4}{1.86 \times 0.76 \times 4.4} \\ &= 1.096 \text{ T} \end{aligned}$$

(14) 线负载  $A$

$$A = \frac{NI_2}{6.28 D_2} = \frac{1650 \times 1.9}{6.28 \times 3.81} = 131 \text{ A/cm}$$

(15) 相邻换向片电压  $U/K$

$$U/K = \frac{220}{33} = 6.7 < 6.8 \text{ V}$$

(16) 定子每极匝数  $N_1$

$$N_1 = K_B \frac{N'}{2} = 0.21 \times \frac{1650}{2} = 173.3 \text{匝/极}$$

取173匝/极。

(17) 定子绕组导线截面积  $S_1$

$$S_1 = (1.8 \sim 2.1) S_2 = 1.8 \times 0.16 = 0.288 \text{cm}^2$$

$$d_1 = \sqrt{\frac{4S_1}{\pi}} = \sqrt{\frac{4 \times 0.288}{\pi}} = 0.60 \text{mm}$$

2. 罩极电动机空壳配线重绕计算

(1) 电动机计算功率  $P_c$

$$P_c = \frac{\alpha D_{i1}^2 l B_s A}{18.3 p} \quad (\text{W})$$

式中  $\alpha$ ——极弧系数,  $\alpha = 0.6 \sim 0.9$ ;

$D_{i1}$ ——定子铁心内径(cm);

$l$ ——定子铁心长度(cm);

$p$ ——电动机极对数;

$A$ ——线负载, 一般取  $A = 66 \sim 150 \text{A/cm}$ ;

$B_s$ ——气隙磁通密度, 小功率电动机选  $0.3 \sim 0.42 \text{T}$ ; 大功率  $B_s = 0.45 \sim 0.8 \text{T}$ 。

(2) 电动机电流计算

$$I = \frac{P_c}{K_E U_N} \quad (\text{A})$$

式中  $K_E$ ——压降系数,  $K_E = 0.80 \sim 0.94$ 。

(3) 每极磁通  $\Phi$

$$\Phi = \alpha B_s \tau l \times 10^{-4} \quad (\text{Wb})$$

式中  $\tau$ ——极距,

$$\tau = \frac{\pi D_{i1}}{2p} \quad (\text{cm});$$

$l$ ——铁心长度(cm)。

(4) 一次绕组每极匝数  $N_1$

$$N_1 = \frac{K_E U_N}{4.44 f 2p \Phi K_{Ap}}$$

式中  $2p$ ——电动机极数；

$\Phi$ ——每极磁通量(Wb)；

$K_{ap1}$ ——定子绕组系数，集中绕组  $K_{ap1} = 1$ ，分布绕组

$$K_{ap1} = \sin 90^\circ \frac{0.5}{q \sin \frac{30^\circ}{q}};$$

$q$ ——每极每相槽数， $q = \frac{Z_1}{2p_1m}$ ；

$\beta$ ——短距比， $\beta = \frac{y}{\tau}$ ；

$y$ ——线圈节距。

(5) 线圈线径  $d$

$$d = 1.13 \sqrt{\frac{I}{J}} \quad (\text{mm})$$

式中  $J$ ——电流密度， $J = 3 \sim 5 \text{ A/mm}^2$ ；

$I$ ——电动机电流(A)。

(6) 定子铁心轭磁通密度  $B_{j1}$

$$B_{j1} = \frac{\sigma \Phi 10^4}{1.86 b_{j1} l} \quad (\text{T})$$

式中  $\sigma$ ——一次绕组漏磁系数，集中绕组  $\sigma = 1.1 \sim 1.6$ ，分布绕组  $\sigma = 1$ ；

$b_{j1}$ ——定子铁轭高度(cm)。

$B_{j1}$ 最高不得超过1.8T。

(7) 凸极磁极铁心磁通密度  $B_n$

$$B_n = \frac{\sigma \Phi \times 10^4}{0.93 b l} \quad (\text{T})$$

式中  $b$ ——凸极铁心宽度(cm)。

$B_n$ 最大值不可超过1.2T。

(8) 定子铁心齿磁通密度  $B_t$

$$B_t = \frac{1.57 \Phi \times 10^4}{0.93 Q b_t l} \quad (\text{T})$$

式中  $Q$ ——每极槽数,  $Q = \frac{Z_1}{2p}$ ;

$Z_1$ ——定子齿数;

$b_r$ ——定子铁心槽齿部宽度(cm)。

$B_s$ 最大值不得超过1.9T。

例6-5 一台凸极罩极式铁心, 实测出定子铁心尺寸: (1)  $D_{j1} = 8.4\text{cm}$ ; (2)  $l = 10\text{cm}$ ; (3) 凸极宽度  $b = 4.5\text{cm}$ ; (4) 铁心轭高度  $h_{j1} = 1.1\text{cm}$ ; 要求配绕组, 电源电压 220V,  $2p = 4$ , 问绕组数据如何。

(1) 计算功率  $P_i$ ,

$$\begin{aligned} P_i &= \frac{\alpha D_{j1}^2 l B_s A}{18.3p} \\ &= \frac{0.67 \times 8.4^2 \times 10 \times 0.35 \times 140}{18.3 \times 2} \\ &= 633\text{W} \end{aligned}$$

极弧系数  $\alpha$  选用 0.67, 磁通密度  $B_s$  选用 0.35T, 线负载  $A$  选 140A/cm。

(2) 电流  $I$

$$I = \frac{P_i}{K_R U_N} = \frac{633}{0.85 \times 220} = 3.4\text{A}$$

(3) 极距  $\tau$

$$\tau = \frac{\pi D_{j1}}{2p} = \frac{\pi \times 8.4}{4} = 6.6\text{cm}$$

(4) 每极磁通  $\Phi$

$$\begin{aligned} \Phi &= \tau l B_s \times 10^{-4} \\ &= 0.66 \times 6.6 \times 10 \times 0.35 \times 10^{-4} \\ &= 15.3 \times 10^{-4} \text{Wb} \end{aligned}$$

(5) 磁极绕组每极匝数  $N_1$

$$N_1 = \frac{K_R U_N}{4.44 f \cdot \Phi K_{d p 1}}$$

$$= \frac{0.85 \times 220}{4.44 \times 50 \times 15.3 \times 10^{-4} \times 1}$$

$$= 138 \text{匝}$$

式中  $K_{d\phi 1}$ ——集中绕组系数,  $K_{d\phi 1} = 1$ 。

(6) 定子铁轭磁通密度  $B_{j1}$  ( $\sigma = 1.2$ )

$$B_{j1} = \frac{\sigma \Phi \times 10^4}{1.86 k_{j1} l}$$

$$= \frac{1.2 \times 15.3 \times 10^{-4} \times 10^4}{1.86 \times 1.1 \times 10}$$

$$= 0.897 \text{T}$$

(7) 磁极铁心磁通密度  $B_n$

$$B_n = \frac{\sigma \Phi 10^4}{0.93 b l}$$

$$= \frac{1.2 \times 15.3 \times 10^{-4} \times 10^4}{0.93 \times 4.5 \times 10}$$

$$= 0.44 \text{T}$$

(8) 导线线径  $d$  ( $J = 3.6 \text{A/mm}^2$ )

$$d = 1.13 \sqrt{\frac{I}{J}} = 1.13 \sqrt{\frac{3.4}{3.6}} = 1.10 \text{mm}$$

### 3. 分相电动机空壳配线重绕计算

(1) 计算功率  $P_i$

$$P_i = \frac{D_{j1}^2 l B_s A n_1}{10^5} \quad (\text{W})$$

式中  $n_1$ ——同步转速,  $n_1 = \frac{120f}{2p}$  (r/min);

$A$ ——线负载, 一般取  $A = 80 \sim 160 \text{A/cm}^2$ ;

$B_s$ ——气隙磁通密度, 2极电动机  $B_s = 0.25 \sim 0.52 \text{T}$ , 4极电动机  $B_s = 0.35 \sim 0.65 \text{T}$ 。

(2) 额定功率  $P_N$

$$P_N = P_i \cos \varphi \eta$$



式中  $\eta$ ——电能效率,  $\eta = 0.18 \sim 0.65$ 。

(3) 电流  $I$

$$I = \frac{P_N}{U_N \cos \varphi \eta} \quad (\text{A})$$

1) 一次绕组电流  $I_m$

分相起动为 
$$I_m = I \frac{P_i}{P_N} \quad (\text{A})$$

电容起动为 
$$I_m = \frac{I}{\sqrt{2}} \quad (\text{A})$$

2) 二次绕组电流  $I_a$

$$I_a = \frac{I_m}{K}$$

式中  $K$ ——系数,  $K = \frac{N_a K_{ap_a}}{N_m K_{ap_m}}$

$N_m$ 、 $N_a$ ——一、二次绕组每极匝数;

$K_{ap_m}$ 、 $K_{ap_a}$ ——一、二次绕组系数。

(4) 每极磁通  $\Phi$

$$\Phi = \alpha \tau l B_s 10^{-4} \quad (\text{Wb})$$

式中  $\alpha$ ——极弧系数,  $\alpha = 0.6 \sim 0.7$ ;

$\tau$ ——极距,  $\tau = \frac{\pi D_{i1}}{2p} \quad (\text{cm})$ 。

(5) 定子铁齿磁通密度  $B_s$

$$B_s = \frac{B_r t_1}{0.93 b_{r1}} \quad (\text{T})$$

式中  $t_1$ ——定子铁齿距 (cm);

$b_{r1}$ ——定子铁齿宽,  $B_r$  一般取  $1.3 \sim 1.6 \text{T}$ , 最大不得超过  $1.8 \text{T}$ 。

(6) 定子铁轭磁通密度  $B_{r1}$

$$B_{r1} = \frac{\Phi \times 10^4}{1.86 h_{r1} l} \quad (\text{T})$$

式中  $h_{r1}$ ——定子铁轭高度 (cm)。

$B_{j1}$  取 1.1~1.55T, 最大不得超过 1.85T。

(7) 定子绕组系数计算

1) 分相起动电动机

一次绕组的绕组系数  $K_{apm}$  为

$$K_{apm} = \frac{0.75 \times 2p}{Q_m \sin\left(\frac{90^\circ}{\tau}\right)}$$

二次绕组的绕组系数  $K_{apo}$

$$K_{apo} = \frac{0.434 \times 2p}{Q_a \sin\left(\frac{90^\circ}{\tau}\right)}$$

式中  $Q_m$ 、 $Q_a$ ——一次、二次绕组所占槽数。

2) 分相运转电动机

全距单层绕组系数为

$$K_{ap} = \frac{0.707}{q \sin\left(\frac{45^\circ}{q}\right)}$$

短距双层绕组系数为

$$K_{ap} = \frac{0.707}{q \sin\left(\frac{45^\circ}{q}\right)} \sin\left(90^\circ - \frac{y}{\tau}\right)$$

式中  $q$ ——每极每相槽数。

(8) 一次绕组计算

1) 每相匝数  $N_{\phi m}$

$$N_{\phi m} = \frac{K_E U_N}{4.44 f \Phi K_{apm}} \quad (\text{匝/相})$$

式中  $K_E$ ——压降系数,  $K_E = 0.7 \sim 0.94$ 。

2) 每极匝数  $N_m$

$$N_m = \frac{N_{\phi m}}{2p} \quad (\text{匝/极})$$

3) 一次绕组导线线径  $d_m$

$$d_m = 1.13 \sqrt{\frac{I_m}{J_m}} \quad (\text{mm})$$

式中  $J_m$ ——电流密度，一般取  $J = 4 \sim 8 \text{ A/mm}^2$ 。

(9) 二次绕组计算

1) 二次绕组每极匝数  $N_s$ 。

$$N_s = K N_m \frac{K_{Apm}}{K_{Ap_s}} \quad (\text{匝/极})$$

式中  $K$ ——变比系数，分相起动  $K = 0.4 \sim 0.7$ ；电容起动  $K = 0.75 \sim 1.25$ ；电容运行  $K = 0.96 \sim 1.7$ 。

2) 二次绕组线径  $d_s$ 。

$$d_s = t_D d_m$$

式中  $t_D$ ——导线直径比值系数，电阻起动， $t_D = 0.45 \sim 0.75$ ；电容起动， $t_D = 0.55 \sim 0.8$ ；电容运行， $t_D = 0.73 \sim 1.07$ 。

(10) 电容器选择

1) 起动电容器选择

起动电容量  $C_{st}$  为

$$C_{st} = \frac{6600 \sqrt{Z}}{U_N (1 - \eta \cos \varphi)} \quad (\mu\text{F})$$

工作电压  $U_{st}$  为

$$U_{st} \geq (0.65 \sim 1.36) U_N \quad (\text{V})$$

2) 运转电容器选择

电容量  $C_y$  为

$$C_y = 2400 \frac{I}{2p U_N \cos \varphi} \quad (\mu\text{F})$$

式中  $\cos \varphi$ ——电动机功率因数。

运转电容器工作电压  $U_y$  为

$$U_y = (1.42 \sim 2.3) U_N$$

## 第二节 电阻炉计算

### 一、电阻炉额定值计算

#### 1. 单相电阻炉

额定功率为

$$P_N = UI \quad (\text{W})$$

电阻值为

$$R = \frac{U^2}{P_N} \quad (\Omega)$$

## 2. 三相电阻炉

额定功率为

$$P_N = \sqrt{3} UI$$

Y联结:

相电压为

$$U_\phi = \frac{U}{\sqrt{3}} \quad (\text{V})$$

相电流为

$$I_\phi = I = \frac{U_\phi}{R} \quad (\text{A})$$

△联结:

相电压为

$$U_\phi = U \quad (\text{V})$$

相电流为

$$I_\phi = \frac{I}{\sqrt{3}} \quad (\text{A})$$

式中  $U$ 、 $I$ ——分别表示线电压、线电流;  
 $U_\phi$ 、 $I_\phi$ ——分别表示相电压、相电流;  
 $R$ ——相电阻( $\Omega$ )。

## 二、电阻炉用线材直径和带材尺寸计算

### 1. 电阻线直径 $d$

$$d = 0.343 \sqrt[3]{I^2 \times \frac{\rho_t}{\omega}} \quad (\text{mm})$$

### 2. 扁带厚度 $t$ 和宽度 $b$

$$t = K \sqrt[3]{I^2 \times \frac{\rho_t}{\omega}} \quad (\text{mm})$$

表 6-1 为电阻率和电阻变化的修正系数。

表6-1 电阻率 $\rho_t$ 和电阻变化的修正系数 $\alpha_t$ 值

系 数	(°C)	20	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000	1100	1200	容许 偏差
		$\alpha_t$	1.000	1.002	1.005	1.008	1.013	1.017	1.022	1.026	1.029	1.031	1.034	1.036	
$\rho_t$	1.450	1.453	1.457	1.462	1.469	1.475	1.482	1.488	1.492	1.495	1.499	1.502	1.508		
Cr17Al5	$\alpha_t$	1.000	1.004	1.009	1.017	1.025	1.033	1.039	1.045	1.050	1.055	1.058	—	—	—
	$\rho_t$	1.800	1.895	1.912	1.922	1.933	1.943	1.951	1.959	1.965	1.972	1.975	—	—	
Cr13Al4	$\alpha_t$	1.000	1.015	1.029	1.044	1.059	1.074	1.089	1.104	1.120	1.134	—	—	—	
	$\rho_t$	1.260	1.278	1.297	1.315	1.334	1.353	1.372	1.391	1.411	1.429	—	—		
Cr20Ni80	$\alpha_t$	1.000	1.006	1.016	1.024	1.031	1.035	1.026	1.019	1.017	1.021	1.028	1.038	—	—
	$\rho_t$	1.110	1.117	1.128	1.137	1.144	1.148	1.139	1.131	1.129	1.133	1.141	1.152	—	
Cr15Ni85	$\alpha_t$	1.000	1.013	1.028	1.046	1.062	1.074	1.073	1.063	1.059	1.057	1.105	—	—	—
	$\rho_t$	1.100	1.114	1.132	1.151	1.168	1.181	1.180	1.191	1.192	1.207	1.216	—	—	

$$b = K_b \sqrt[3]{I^2 \times \frac{\rho_t}{\omega}} \quad (\text{mm})$$

求出宽度  $b$  与厚度  $l$  的比值即  $b/l = M$ , 可查表6-2得到  $K_t$  和  $K_b$  系数。

表6-2  $K_t$  和  $K_b$  系数值

$M$	5	8	10	12	15
$K_t$	0.119	0.0885	0.077	0.0685	0.0593
$K_b$	0.593	0.708	0.77	0.82	0.889

式中  $K_t$ 、 $K_b$ ——分别表示厚度和宽度系数；

$\rho_t$ ——工作温度时的电阻率，查表6-1；

$\alpha_t$ ——电阻变化的修正系数，查表6-1；

$I$ ——额定电流(A)；

$\omega$ ——表面负荷( $\text{W}/\text{cm}^2$ )。

表面负荷是电热元件单位表面上所承担的功率数，选大表面负荷，省材料，但影响寿命，反而浪费材料，只有选的合理才经济。

(1) 工业用电阻炉的表面负荷范围

线材  $1.4 \sim 1.8 \text{W}/\text{cm}^2$ ；

带材  $1.8 \sim 2.2 \text{W}/\text{cm}^2$ 。

(2) 实验室用电阻炉表面负荷范围

线材  $1.6 \sim 2 \text{W}/\text{cm}^2$  (茂福电炉)；

带材  $2 \sim 2.5 \text{W}/\text{cm}^2$ 。

(3) 高温管式炉的负荷范围

线材  $1.5 \sim 1.9 \text{W}/\text{cm}^2$ ；

带材  $1.9 \sim 2.3 \text{W}/\text{cm}^2$ 。

(4) 民用开启式盘形电炉的负荷范围

线材  $4 \sim 8 \text{W}/\text{cm}^2$ 。

(5) 电烙铁用的负荷范围

线材  $10 \sim 15 \text{ W/cm}^2$ 。

电熨斗、吹风机的 $\omega$ 更高些。

表面负荷数值与元件材料、元件规格、元件敞露还是封闭程度、构造、温度、散热等因素有关。

**例6-6** 有一台单相电阻炉，电阻丝的电阻  $R = 60 \Omega$ ，电阻炉电源电压  $220 \text{ V}$ ，试计算电炉的电流是多少，电炉消耗的功率是多少。

电阻炉电流  $I$  为

$$I = \frac{U}{R} = \frac{220}{60} = 3.7 \text{ A}$$

电阻消耗的功率  $P$  为

$$P = UI = 220 \times 3.7 = 814 \text{ W}$$

**例6-7** 一台工业用三相电阻炉，已知每相电阻  $R = 10 \Omega$ ，试计算：

(1) 额定电压为  $380 \text{ V}$ ， $\Delta$  联结和  $Y$  联结时，此台电阻炉从电网吸取多少功率。

(2) 当在额定电压  $220 \text{ V}$  电源上使用时，接成  $\Delta$ ，此时电阻炉从电网吸取多少功率。

(1)  $U_N = 380 \text{ V}$  时

$\Delta$  联结时，则有

因  $I = \sqrt{3} I_\star$ ， $U_\star = U$

所以  $I_\star = \frac{U_\star}{R} = \frac{380}{10} = 38 \text{ A}$

$$I = \sqrt{3} I_\star = \sqrt{3} \times 38 = 65.8 \text{ A}$$

从电网吸取功率  $P$  为

$$P = \sqrt{3} UI = \sqrt{3} \times 380 \times 65.8 = 43.3 \text{ kW}$$

式中  $U$ 、 $I$ ——分别表示线电压和线电流。

Y联结时, 则有

因 
$$U = \sqrt{3} U_{\phi}, \quad I = I_{\phi}$$

所以 
$$I_{\phi} = \frac{U_{\phi}}{R} = \frac{380/\sqrt{3}}{10} = 22\text{A}, \quad \text{即 } I = 22\text{A}$$

功率  $P$  为

$$P = \sqrt{3} UI = \sqrt{3} \times 380 \times 22 = 14.5\text{kW}$$

(2)  $U_N = 220\text{V}$  时

表 6-3 为铁铬铝电热合金丝技术参数。

$\Delta$ 联结时

$$I_{\phi} = \frac{U_{\phi}}{R} = \frac{220}{10} = 22\text{A}$$

$$I = \sqrt{3} I_{\phi} = \sqrt{3} \times 22 = 38.1\text{A}$$

电阻炉从电网吸取功率  $P$  为

$$P = \sqrt{3} UI = \sqrt{3} \times 220 \times 38.1 = 14.5\text{kW}$$

**例6-8** 有一台箱式电阻炉, 每相电功率为  $20\text{kW}$ , 总功率为  $60\text{kW}$ , Y联结, 投入  $380\text{V}$  的三相电源上工作, 试求:

- (1) 各相电压、电阻、电流各是多少;
- (2) 运行中,  $W_1$  相电阻丝烧断, 试分析电阻炉此时工作情况, 各相电压、电流和功率有何变化。

(1) 相电流

$$I_{\phi u1} = I_{\phi v1} = I_{\phi w1} = \frac{P_{\phi}}{U_{\phi}} = \frac{20 \times 10^3}{380/\sqrt{3}} = 91\text{A}$$

(2) 各相电阻

$$R_{u1} = R_{v1} = R_{w1} = \frac{U_{\phi}}{I_{\phi}} = \frac{220}{91} = 2.4\Omega$$

式中  $P_{\phi}$  —— 每相功率,  $P_{\phi} = 20\text{kW}$ 。

(3) 当  $W_1$  相烧断时,  $I_{w1} = 0$



表6-3 铁铬铝电热合金丝 (0Cr25Al5)

直径 (mm)	每米电阻 20°C (Ω/m)	每米 表面积 (cm <sup>2</sup> /m)	断面积 (mm <sup>2</sup> )	每公斤 长度 (m/kg)	每米重量 (g/m)	每米表面积 20°C (cm <sup>2</sup> /Ω)
0.01	18460	0.3142	0.000079	1793060	0.000357	0.000017
0.02	4614	0.6283	0.000311	448200	0.002231	0.000136
0.03	2051	0.9425	0.000707	199200	0.005019	0.000460
0.04	1154	1.257	0.001257	112000	0.008925	0.001089
0.05	738.7	1.571	0.001963	71730	0.01394	0.002127
0.06	512.9	1.885	0.002827	49339	0.02007	0.003675
0.07	376.8	2.199	0.003848	36600	0.02732	0.005836
0.08	288.4	2.513	0.005027	28020	0.03569	0.008714
0.09	227.9	2.827	0.006363	22140	0.04517	0.01246
0.10	184.6	2.142	0.007854	17900	0.05576	0.01702
0.11	152.6	3.456	0.009503	14820	0.06747	0.02285
0.12	128.2	3.770	0.01131	12450	0.08030	0.02941
0.13	109.3	4.084	0.01327	10610	0.09422	0.03737
0.14	94.22	4.398	0.01539	9149	0.1093	0.04668
0.15	82.06	4.712	0.01767	7970	0.1255	0.05742
0.16	72.10	5.027	0.02011	7002	0.1428	0.06972
0.17	63.88	5.341	0.02270	6203	0.1612	0.08361
0.18	56.97	5.655	0.02545	5534	0.1807	0.09926
0.19	51.15	5.969	0.02835	4968	0.2013	0.1167
0.20	46.14	6.283	0.03142	4482	0.2231	0.1362
0.22	38.15	6.912	0.03801	3705	0.2699	0.1812
0.25	29.54	7.854	0.04809	2860	0.3485	0.2659
0.28	23.55	8.796	0.06158	2287	0.4372	0.3735
0.30	20.51	9.425	0.07069	1992	0.5019	0.4595
0.35	15.07	11.00	0.09021	1404	0.6831	0.7299

(续)

直径 (mm)	每米电阻 20°C (Ω/m)	每米 表面积 (cm <sup>2</sup> /m)	断面 积 (mm <sup>2</sup> )	每公斤 长 度 (m/kg)	每米重量 (g/m)	每伏表面积 20°C (cm <sup>2</sup> /Ω)
0.40	11.54	12.57	0.1257	1120	0.8925	1.089
0.45	9.119	14.14	0.1590	885.7	1.129	1.551
0.50	7.387	15.71	0.1963	717.3	1.394	2.127
0.55	6.103	17.28	0.2376	592.8	1.687	2.831
0.60	5.129	18.85	0.2827	493.3	2.007	3.675
0.65	4.370	20.42	0.3318	421.4	2.356	4.673
0.70	3.768	21.99	0.3848	366.0	2.732	5.836
0.75	3.282	23.56	0.4418	318.8	3.137	7.179
0.80	2.884	25.13	0.5027	280.2	3.569	8.711
0.85	2.555	26.70	0.5675	248.2	4.029	10.47
0.90	2.279	28.27	0.6362	221.4	4.517	12.40
0.95	2.016	29.85	0.7083	198.7	5.032	14.59
1.00	1.846	31.42	0.7854	179.3	5.576	17.02
1.20	1.282	37.70	1.131	124.5	8.030	29.41
1.40	0.9422	43.98	1.539	91.49	10.93	46.68
1.50	0.8206	47.12	1.767	79.70	12.55	57.42
1.60	0.7210	50.27	2.011	70.02	14.28	69.72
1.80	0.5697	56.55	2.545	55.34	18.07	99.26
2.00	0.4614	62.83	3.142	44.82	22.31	136.2
2.20	0.3815	69.12	3.801	37.05	26.99	181.2
2.40	0.3207	75.40	4.524	31.13	32.12	235.3
2.50	0.2954	78.54	4.909	28.69	34.85	265.9
2.60	0.2736	81.68	5.309	26.53	37.69	299.1
2.80	0.2356	87.96	6.158	22.87	43.72	373.5
3.00	0.2051	94.25	7.069	19.92	50.19	459.5

(续)

直径 (mm)	每米电阻 20°C (Ω/m)	每米 表面积 (cm <sup>2</sup> /m)	断面积 (mm <sup>2</sup> )	每公斤 长度 (m/kg)	每米重量 (g/m)	每欧表面积 20°C (cm <sup>2</sup> /Ω)
3.20	0.1803	100.5	8.042	17.50	57.10	557.4
3.50	0.1507	110.0	9.621	14.64	68.31	729.9
3.80	0.1278	119.4	11.34	12.42	80.51	934.3
4.00	0.1154	125.7	12.57	11.20	89.25	1089
4.50	0.09119	141.4	15.90	8.857	112.9	1551
4.80	0.08011	150.8	18.10	7.781	128.5	1882
5.00	0.07387	157.1	19.63	7.173	139.4	2127
5.50	0.06103	172.8	23.76	5.928	168.7	2831
6.00	0.05129	188.5	28.27	4.983	200.7	3675
6.50	0.04370	204.2	33.18	4.673	235.8	4673
7.00	0.03768	219.9	38.48	3.661	273.2	5836
7.50	0.03282	235.6	44.18	3.188	313.7	7179
8.00	0.02884	251.3	50.27	2.802	356.9	8714
8.50	0.02555	267.0	56.75	2.482	402.9	10470
9.00	0.02279	282.7	63.62	2.214	451.7	12400
9.50	0.02046	298.5	70.88	1.987	503.2	14590
10.00	0.01846	314.2	78.54	1.793	557.6	17020
10.50	0.01675	329.9	86.59	1.627	614.8	19700
11.00	0.01529	345.6	95.03	1.482	674.7	22650
11.50	0.01396	361.3	103.9	1.356	737.7	25880
12.00	0.01282	377.0	113.1	1.245	803.0	29410
12.50	0.01182	392.7	122.7	1.148	871.2	33220
13.00	0.01093	408.4	132.7	1.061	942.2	37370
13.50	0.01013	424.1	143.1	0.9843	1016	41860
14.00	0.009422	439.8	153.9	0.9149	1235	46880

这时  $I_{U1} = I_{V1} = \frac{U_{U1V1}}{R_{U1} + R_{V1}} = \frac{380}{2.4 + 2.4} = 79.2\text{A}$ , 则有

相电压为

$$U_u = U_{v1} = \frac{U_{U1V1}}{2} = \frac{380}{2} = 190\text{V}$$

每相功率变为

$$P_{U1} = P_{V1} = U_u I_{U1} = 190 \times 79.2 = 15\text{kW}$$

电炉从电网吸取的总功率  $P$  为

$$P = P_{U1} + P_{V1} = 15 + 15 = 30\text{kW}$$

可见, 这时电阻炉功率下降一半。

例6-9 一台80kW箱式电阻炉, 三相星形联结, 试计算电阻元件规格( $U = 380\text{V}$ )。

$$U_* = \frac{U}{\sqrt{3}} = \frac{380}{\sqrt{3}} = 220\text{V}$$

每相功率为

$$P_* = \frac{P}{m} = \frac{80}{3} = 27\text{kW}$$

式中  $m$ ——相数,  $m = 3$ 。

每相电阻元件的工作电阻值  $R_*$ ,

$$R_* = \frac{U_*^2}{P_*} = \frac{220^2}{27 \times 10^3} = 1.79\Omega$$

相电流  $I_*$  为

$$I_* = \frac{U_*}{R_*} = \frac{220}{1.79} = 123\text{A}$$

选用0Cr25Al5电热丝材料, 电炉丝直径  $d$  为

$$d = 0.343 \sqrt[3]{I_*^2 \frac{\rho_r}{\omega}}$$

$$\begin{aligned}
 &= 0.342 \sqrt[3]{123^2 \times \frac{1.499}{1.8}} \\
 &= 0.343 \sqrt[3]{12199} \\
 &= 7.9 \text{ mm}
 \end{aligned}$$

选  $d = 8 \text{ mm}$  电热丝。

电热丝长度  $L$  为

$$L = \frac{R_1}{0.02884} = \frac{1.79}{0.02884} = 62 \text{ mm}$$

式中 0.02884——20℃每米电阻值，查表6-3。

### 三、简易计算法

一般电阻炉工作温度在1200℃以下，如果选用常用0Cr25Al5电热元件时，可以用简易公式计算电热元件规格。

#### 1. 工业用电炉丝直径计算

$$d = 0.336 \sqrt[3]{I^2} \quad (\text{mm})$$

#### 2. 民用盘形电炉丝直径计算

$$d = 0.217 \sqrt[3]{I^2} \quad (\text{mm})$$

#### 3. 扁带厚度计算

$$t = K_1 \sqrt[3]{I^2} \quad (\text{mm})$$

#### 4. 扁带宽度计算

$$b = K_2 \sqrt[3]{I^2} \quad (\text{mm})$$

例6-10 一台箱式电阻炉，元件电压为380V，功率为15kW，求电炉丝直径 $d$ 和长度 $L$ 各多少。

(1) 直径 $d$

$$\begin{aligned}
 d &= 0.336 \sqrt[3]{I^2} = 0.336 \sqrt[3]{\left(\frac{15 \times 10^3}{380}\right)^2} \\
 &= 0.336 \sqrt[3]{1558} = 3.9 \text{ mm}
 \end{aligned}$$

选  $d = 4.0 \text{ mm}$ 。

(2) 工作电阻 $R_1$

$$R_1 = \frac{U^2}{P} = \frac{380^2}{15 \times 10^3} = 9.65 \Omega$$

(3) 最高温度下电阻

$$R_{2c} = \frac{R_1}{\alpha_1} = \frac{9.65}{1.04} = 9.28 \Omega$$

式中  $\alpha_1$ ——不同温度下电阻变化的修正系数，查表6-1。

(4) 电阻丝长度  $L$

$$L = \frac{9.28}{0.1154} = 80.5 \text{ m}$$

式中 0.1154——每米电阻值查表6-3得出。

**例6-11** 一台单相民用开启式盘形电炉，其电压为220V，元件功率为1kW，试求电炉丝直径、长度、重量各多少。

电流  $I$  为

$$I = \frac{P}{U} = \frac{1 \times 10^3}{220} = 4.55 \text{ A}$$

电阻  $R_1$  为

$$R_1 = \frac{U^2}{P} = \frac{220^2}{1000} = 48.4 \Omega$$

工作温度下电阻  $R_{20}$  为

$$R_{20} = \frac{R_1}{\alpha_r} = \frac{48.4}{1.031} = 47 \Omega \quad (\text{查表6-1 } \alpha_r = 1.031)$$

电炉丝直径为

$$d = 0.217 \sqrt[3]{I^2} = 0.217 \sqrt[3]{20.7} = 0.6 \text{ mm}$$

工作长度为

$$L = \frac{47}{5.129} = 9.2 \text{ m} \quad (\text{查表6-3系数为5.129})$$

重量  $G$  为

$$G = 2.007 \times 9.2 = 18.4g \quad (\text{查表6-3为} 2.007)$$

例6-12 三相箱式电阻炉, 电源电压为380V, 总功率为75kW, 三相Y联结, 试求扁带厚度、宽度、长度和重量各是多少。

(1) 电流 $I$ 和电流平方 $I^2$

$$I = \frac{P \times 10^3}{\sqrt{3} U} = \frac{75 \times 10^3}{\sqrt{3} \times 380} = 114A$$

$$I^2 = 114^2 = 12986$$

(2) 扁带厚度

$$t = K_t \sqrt[3]{I^2} = K_t \sqrt[3]{12986} = 23.5K_t,$$

设扁带宽度与厚度之比为 $M$ , 即 $M = b/t$ , 当 $b/t = 8$ 时,  $K_t = 0.081$ , 见表6-4, 则有

表6-4 系数 $K_t$ 、 $K_b$ 表

$M = \frac{b}{t}$	5	8	10	12	15
$K_t$	0.11	0.081	0.07	0.063	0.054
$K_b$	0.54	0.65	0.70	0.75	0.81

$$t = 23.5 \times 0.081 = 1.9mm$$

(3) 扁带宽度 $b$  ( $K_b = 0.65$ )

$$b = K_b \sqrt[3]{I^2} = 0.65 \times 23.5 = 15.3mm$$

选取 $t = 2.0mm$ ,  $b = 15mm$ , 扁带规格为 $2mm \times 15mm$ 。

表6-5为铁铬铝电阻带的技术参数。

$$\text{因} \quad R_t = \frac{U^2}{P} = \frac{220^2}{25 \times 10^3} = 1.94\Omega$$

$$\text{所以} \quad R_{20} = \frac{R_t}{\alpha_t} = \frac{1.94}{1.04} = 1.86\Omega \quad (\alpha_t \text{查表6-1})$$

长度为

表6-5 铁铬铝电阻带 (0Cr25Al5型)

扁带规格 (mm)	每米电阻 20°C (Ω/m)	每米 表面积 (cm <sup>2</sup> /m)	断面积* (mm <sup>2</sup> )	每公斤 长度 (m/kg)	每米重量 (g/m)	每欧表面积 20°C (cm <sup>2</sup> /Ω)
1.0×10	0.1543	220.0	9.40	14.98	65.74	1426
12	0.1233	260.0	11.76	11.98	83.50	2110
14	0.1057	300.0	13.72	10.26	97.41	2838
15	0.09864	320.0	14.70	9.579	104.4	3244
16	0.09247	340.0	15.68	8.985	111.3	3677
18	0.08220	380.0	17.64	7.987	125.2	4623
20	0.07398	420.0	19.60	7.184	139.2	5677
25	0.05918	520.0	24.50	5.747	174.0	8787
30	0.04932	620.0	29.40	4.792	208.7	12570
1.2×10	0.1285	224.0	11.28	12.49	80.09	1743
12	0.1028	264.0	14.11	9.980	100.2	2568
14	0.08809	304.0	16.46	8.554	116.9	3451
15	0.08220	324.0	17.64	7.987	125.2	3942
16	0.07705	344.0	18.82	7.485	133.6	4465
18	0.06849	384.0	21.17	6.653	150.3	5607
20	0.06165	424.0	23.52	5.988	167.0	6877
25	0.04932	524.0	29.40	4.792	208.7	10620
30	0.04110	624.0	35.28	3.992	250.5	15180
1.4×10	0.1002	228.0	13.16	10.70	93.44	2068
12	0.08809	268.0	16.46	8.554	116.9	3042
14	0.07548	308.0	19.21	7.331	136.4	4081
15	0.07046	328.0	20.58	6.845	146.1	4655
16	0.06606	348.0	21.95	6.418	155.8	5268
18	0.05870	388.0	24.70	5.701	175.4	6610
20	0.05284	428.0	27.44	5.133	194.8	8100



(续)

扁带规格 (mm)	每米电阻 20°C (Ω/m)	每米 表面积 (cm <sup>2</sup> /m)	断面积* (mm <sup>2</sup> )	每公斤 长度 (m/kg)	每米重量 (g/m)	每米表面积 20°C (cm <sup>2</sup> /Ω)
1.4×25	0.04227	528.0	34.30	4.107	243.5	12490
30	0.03523	628.0	41.16	3.422	292.2	17830
1.5×10	0.1028	230.0	14.10	9.990	100.1	2237
12	0.08220	270.0	17.64	7.987	125.2	3285
14	0.07046	310.0	20.58	6.845	146.1	4400
15	0.06576	330.0	22.05	6.386	156.6	5018
16	0.06165	350.0	23.52	5.988	167.0	5677
18	0.05480	390.0	26.46	5.322	187.9	7117
20	0.04932	430.0	29.40	4.792	208.7	8719
25	0.03946	530.0	36.75	3.833	260.9	13430
30	0.03288	630.0	44.10	3.194	313.1	19160
1.6×10	0.09641	232.0	15.04	9.363	106.8	2406
12	0.07705	272.0	18.82	7.485	133.6	3530
14	0.06605	312.0	21.95	6.418	155.8	4723
15	0.06165	332.0	23.52	5.988	167.0	5385
16	0.05779	352.0	25.09	5.615	178.1	6091
18	0.05138	392.0	28.22	4.990	200.4	7629
20	0.04624	432.0	31.36	4.490	222.7	9343
25	0.03699	532.0	39.20	3.593	278.3	14380
30	0.03082	632.0	47.04	2.994	334.0	20510
1.8×10	0.08570	236.0	16.92	7.987	120.1	2754
12	0.06849	276.0	21.17	6.653	150.3	4030
14	0.05870	316.0	24.70	5.701	175.4	5383
15	0.05430	336.0	26.46	5.322	187.9	6131
16	0.05138	356.0	28.22	4.990	200.4	6929

(续)

扁带规格 (mm)	每米电阻 20°C (Ω/m)	每米 表面积 (cm <sup>2</sup> /m)	断面面积 (mm <sup>2</sup> )	每公斤 长度 (m/kg)	每米重量 (kg/m)	每欧表面积 20°C (cm <sup>2</sup> /Ω)
1.8×18	0.04567	396.0	31.75	4.437	225.4	8671
20	0.04110	436.0	35.28	3.992	250.5	10610
25	0.03264	536.0	44.10	3.194	313.1	15930
30	0.02740	636.0	52.92	2.662	375.7	23210
2.0×10	0.07713	240.0	19.80	7.491	133.5	3112
12	0.06165	280.0	23.52	5.988	167.0	4542
14	0.05284	320.0	27.44	5.133	194.8	6056
15	0.04932	340.0	29.40	4.792	208.7	6894
16	0.04624	360.0	31.36	4.490	222.7	7785
18	0.04110	400.0	35.28	3.992	250.5	9732
20	0.03699	440.0	39.20	3.593	278.3	11900
22	0.03363	480.0	43.12	3.266	306.2	14270
25	0.02959	540.0	49.00	2.874	347.9	18250
30	0.02466	640.0	58.80	2.395	417.5	25950
40	0.01849	840.0	78.40	1.797	556.6	45430
2.2×20	0.03363	444.0	43.12	3.266	306.2	13200
22	0.03057	484.0	47.43	2.969	336.8	15830
26	0.02690	544.0	53.90	2.613	382.7	20220
30	0.02242	644.0	64.68	2.178	459.2	28720
40	0.01681	844.0	86.24	1.633	612.3	50210
2.5×20	0.02959	450.0	49.00	2.874	347.9	15210
22	0.02690	490.0	53.90	2.613	382.7	18220
25	0.02367	550.0	61.25	2.299	434.9	23240
30	0.01973	650.0	73.50	1.916	521.9	32940
40	0.01480	850.0	98.00	1.437	695.8	57430

(续)

扁带规格 (mm)	每米电阻 20°C (Ω/m)	每米 表面积 (cm <sup>2</sup> /m)	断面积* (mm <sup>2</sup> )	每公斤 长度 (m/kg)	每米重量 (g/m)	每欧表面积 20°C (cm <sup>2</sup> /Ω)
3.0 × 22	0.02242	500.0	64.68	2.178	459.2	22300
25	0.01973	560.0	73.50	1.916	521.9	28380
30	0.01644	660.0	88.20	1.597	626.2	40140
40	0.01233	860.0	117.6	1.198	835.0	69750
3.5 × 22	0.01922	510.0	75.46	1.866	536.8	26530
25	0.01691	570.0	85.75	1.643	608.8	33710
30	0.01409	670.0	102.9	1.369	730.6	47550
40	0.01057	870.0	137.2	1.027	974.1	82310
4.0 × 25	0.01480	580.0	98.00	1.437	695.8	39190
30	0.01233	680.0	117.6	1.198	835.0	55150
40	0.009247	880.0	156.8	0.8985	1113	95170

$$L = \frac{1.86}{0.049} = 38\text{m} \quad (0.049 \text{查表6-5})$$

重量为

$$G = 208.7 \times 38 \times 10^{-3} = 7.95\text{kg} \quad (208.7, \text{查表6-5})$$

全炉共 3 支电热元件, 所以有

$$\text{总长} \quad L_{\text{总}} = 38 \times 3 = 114\text{m}$$

$$\text{总重} \quad G_{\text{总}} = 7.95 \times 3 = 23.8\text{kg}$$

#### 四、碳化硅电阻炉计算

有棒状和管状两种, 其尺寸规格见表6-6、表6-8。

##### 1. 碳化硅棒计算

(1) 表面积  $S$

$$S = \frac{P \times 10^3}{\omega}$$

式中  $S$ ——碳化硅元件发热部分总表面积( $\text{cm}^2$ );

$P$ ——电阻炉总功率( $\text{kW}$ );

$\omega$ ——碳化硅元件表面负荷, 见表6-7。

(2) 元件支数  $N$

$$N = \frac{S}{\pi dl}$$

式中  $d$ ——碳化硅棒发热部分的直径( $\text{cm}$ );

$l$ ——碳化硅棒发热部位的长度( $\text{cm}$ )。

##### 2. 碳化硅管计算

表面积计算同碳化硅棒计算。

元件数计算为

$$N = \frac{S}{\pi D l}$$

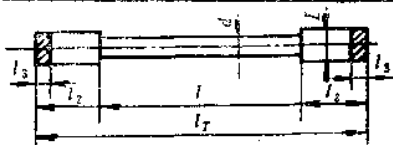
式中  $D$ ——碳化硅外径( $\text{cm}$ );

$l$ ——碳化硅管螺纹带长度( $\text{cm}$ );

$S$ ——碳化硅发热部位总表面积( $\text{cm}^2$ ),

以上  $D$ 、 $l$  值查表6-8。

表6-3 碳化硅棒尺寸规格



规格 $d/l/l_T$ (mm)	发热部位		接线部位		喷铝长度 $l_s$ (mm)	全长 $l_T$ (mm)
	直径 $d$ (mm)	长度 $l$ (mm)	直径 $D$ (mm)	长度 $l_s$ (mm)		
6/60/75	6	60	12	75	25	210
6/100/130		100		130		360
8/100/85	8	100	14	85	30	270
8/100/130		100		130		360
8/150/85		150		85		320
8/150/150		150		150		450
8/180/60		180	60	300		
8/180/150		180	150	480		
8/200/85		200	85	370		
8/200/150		200	150	500		
8/250/100	250	100	450			
8/250/150	8	250	14	150	30	650
8/300/85		300		85		470
8/400/85		400		85		570
12/100/200	12	100	18	200	35	600
12/150/200		150		200		550
12/200/200		200		200		600
12/250/200		250		200		650
12/300/200		300		200		700
12/300/250		300		250		800
14/200/250	14	200	22	250	40	700
14/200/350		200		350		900
14/250/250		250		250		750
14/250/350		250		350		950
14/300/250		300		250		800
14/300/350		300		350		1000
14/400/250		400		250		900

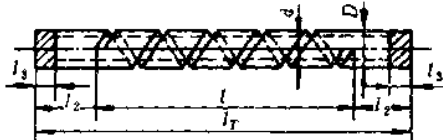
(续)

规格 $d/l/L_1$ (mm)	发火部位		炉膛部位		喷钎长度		全长 $L_T$ (mm)
	直径 $d$ (mm)	长度 $l$ (mm)	直径 $D$ (mm)	长度 $L_1$ (mm)	$L_2$ (mm)	$L_3$ (mm)	
14/400/350	14	400	22	350	40		1100
14/500/250		500		250			1000
14/500/350		500		350			1200
14/600/250		600		250			1100
14/600/350		600		350			1300
18/250/250	18	250	28	250	50		750
18/250/350		250		350			950
18/300/250		300		250			800
18/300/350		300		350			1000
18/300/400		300		400			1100
18/400/250		400		250			900
18/400/350		400		350			1100
18/400/400		400		400			1200
18/500/250		500		250			1000
18/500/350		500		350			1200
18/500/400		500		400			1300
18/600/250		600		250			1100
18/600/350		600		350			1300
18/600/400		600		400			1400
18/800/250		800		250			1300
18/800/350	800	350	1500				
25/300/400	25	300	38	400	70		1100
25/400/400		400		400			1200
25/600/500		600		500			1600
25/800/500		800		500			1800
30/1000/400	30	1000	45	400	100		1800
30/1000/500		1000		500			2000
30/1500/400		1500		400			1300
30/1500/500		1500		500			2500
30/2000/500		2000		500			3000
30/2000/650		2000		650			3300
40/2000/500	40	2000	60	500	100		3000
40/2000/650		2000		650			3300

表6-7 碳化硅元件表面负荷 (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	10.10	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

表6-8 碳化硅管尺寸规格



规格 $D/d \times l_1/l_2$ (mm)	直径		螺 纹 带 长 度 $l_1$ (mm)	接 线 端 长 度 $l_2$ (mm)	喷 铝 长 度 $l_3$ (mm)	全 长 $l_T$ (mm)
	外径 $D$ (mm)	内径 $d$ (mm)				
40/30 × 200/100	40	30	200	100	30	400
40/30 × 300/100			300			500
40/30 × 400/100			400			600
50/40 × 300/100	50	40	300	100	35	500
50/40 × 400/100			400			600
50/40 × 500/100			500			700
60/50 × 400/100	60	50	400	100	40	600
60/50 × 500/100			500			700
60/50 × 600/100			600			800
70/60 × 500/100	70	60	500	100	45	700
70/60 × 600/100			600			800
70/60 × 700/100			700			900
80/70 × 600/100	80	70	600	100	50	800
80/70 × 700/100			700			900
80/70 × 800/100			800			1000
90/80 × 600/100	90	80	600	100	55	800
90/80 × 700/100			700			900
90/80 × 800/100			800			1000
100/90 × 600/100	100	90	600	100	60	800
100/90 × 700/100			700			900
100/90 × 800/100			800			1000



例6-13 一台40kW三相双三角形接线的电阻炉，由12根碳化硅元件组成，线电压为380V，如图6-1所示，试求：

- (1) 相电压、相功率、相电流以及每相碳化硅棒电阻值；
- (2) 当 $V_1$ 相中一个碳化硅元件烧断后，会发生什么现象（见图6-1a）；
- (3) 如若线路上火线 $V_1$ 相烧断，又会产生什么现象（见图6-1b）。

(1) 相电压 $U_\phi = 380V$

每相功率为

$$P_\phi = \frac{P}{3 \times 2} = \frac{40}{6} = 6.7 \text{ kW}$$

相电流为

$$I_\phi = \frac{P_\phi}{U_\phi} = \frac{6.7 \times 10^3}{380} = 17.6 \text{ A}$$

相电阻 $R$ 为

$$R = \frac{U_\phi}{I_\phi} = \frac{380}{17.6} = 21.6 \Omega$$

(2) 若 $V_1$ 相一根碳化硅烧断（见图6-1a）

$I_{v_1 w_1} = 0 \times P_{v_1} = 0$ ，其他两相仍能工作，这时有

$$I_{u_1 v_1} = I_{w_1 u_1} = \frac{U_{u_1}}{R} = \frac{380}{21.6} = 17.6 \text{ A}$$

$$P_{u_1} = P_{w_1} = U_{u_1} I_{u_1} = 380 \times 17.6 = 6.7 \text{ kW}$$

$$\text{总功率 } P = P_{u_1} + P_{v_1} + P_{w_1} = P_{u_1} + P_{w_1}$$

$$= 6.7 + 6.7 = 13.4 \text{ kW}$$

$$I_{U_1} = \sqrt{3} I_{u_1 v_1} = \sqrt{3} \times 17.6 = 30.5 \text{ A}$$

$$I_{V_1} = -I_{u_1 v_1} = -17.6 \text{ A}$$

$$I_{W_1} = I_{w_1 u_1} = 17.6 \text{ A}$$

可见当负载为 $\Delta$ 联结时， $V_1$ 相元件烧断后， $I_{v_1} = 0$ 三个线电流有两个线电流降为相电流，而总功率降为原来的 $2/3$ ，因此炉温要降低。

(3) 若线路上 $V_1$ 相断开（图6-1b）。

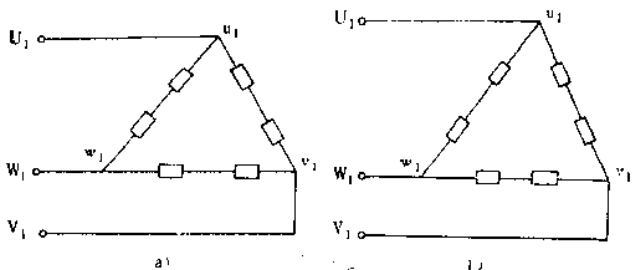


图6-1 40kW三相双三角形接线

$$I_{V1} = 0$$

$$I_{u1v1} = I_{v1w1} = \frac{U_{w1u1}}{2R} = \frac{380}{2 \times 21.6} = 8.8 \text{ A}$$

$$I_{w1u1} = \frac{U_{w1v1}}{R} = \frac{380}{21.6} = 17.6 \text{ A}$$

$$I_{U1} = I_{W1} = I_{u1v1} + I_{w1u1} = 8.8 + 17.6 = 26.4 \text{ A}$$

$$U_{u1v1} = U_{v1w1} = I_{u1v1} R = \frac{U}{2} = \frac{380}{2} = 190 \text{ V}$$

$$U_{w1u1} = U = 380 \text{ V}$$

$$P_{u1} = P_{v1} = U_{u1v1} I_{u1v1} = 190 \times 8.8 = 1.67 \text{ kW}$$

$$P_{w1} = U_{w1u1} I_{w1u1} = 380 \times 17.6 = 6.7 \text{ kW}$$

$$P = P_{u1} + P_{v1} + P_{w1} = 1.67 + 1.67 + 6.7 = 8.46 \text{ kW}$$

△联结的负载有一相火线断开后，断开相的电流为零，其余两极电流降低，有两相电压降低一半，总功率降一半，所以炉温降低很多。

### 第三节 常用低压电器的选择计算

#### 一、交流接触器的选择计算

常用交流接触器有CJ10和CJ12系列交流接触器，CJ10系列交流接触器适用于一般起停和控制交流电动机；CJ12系列交流接触器适用于冶金、轧钢及起重机等电气设备，频繁起制动电动

表6-9 CJ10系列交流接触器技术数据

项目 型号	主触头			辅助触头			380V时 控制电 动机最 大功率 (kW)	接通与分析能力			
	额定工 作电压 (V)	额定工 作电流 (A)	数 量	额定 电压 (V)	发热 电流 (A)	数量		电压 (V)	接通 电流 (A)	分断 电流 (A)	
CJ10-5	380	5	8	交流 380 直流 220	5	一常分	2.2	399	60	50	
CJ10-10		10					4		120	100	
CJ10-20		20					10		240	200	
CJ10-40		40					二常分		20	480	400
CJ10-60		60					二常合		30	720	600
CJ10-100		100							50	1200	1000
CJ10-150		150							75	1800	1500

项目 型号	电寿命 次数 (万次)	机械寿 命次数 (万次)	操 作 频 率	吸引线圈在380V 电压下消耗功率			动作时间 (ms)	
				起动 (VA)	吸 持 (VA)	持 (W)	接 通	断 开
CJ10-5	JK3类60	300	600	35	6	2	—	—
CJ10-10				65	11	5	17	21
CJ10-20				140	22	9	18	18
CJ10-40				230	32	12	23	22
CJ10-60				485	95	26	65	40
CJ10-100				760	105	27	66	35
CJ10-150				950	110	28	75	38

机。CJ10系列交流接触器技术数据，见表6-9，CJ12B系列交流接触器技术数据，见表6-10。

交流接触器主触头额定工作电流为

表6-10 CJ12B系列交流接触器技术数据

项 目	主 触 头			辅 助 触 头		390V时电 磁 制 动 功 率 (kW)		接 通 与 分 断 能 力		
	额定工作 电压(V)	额定工作 电流(A)	极 数	额定电压 (V)	额定电流 (A)	数 量	电 压 (V)	接 通 电 流 (A)	分 断 电 流 (A)	动 作 时 间 (ms)
型 号	380	100	2、3、4、5	交流380 或 直流220	10	六对接 头可组成 五合一分 或四分二 合或三分 三合	50	1200	1000	
		150					1800	1500		
		250					3050	2500		
		400					4000	3200		
		600					6000	4800		
型 号	电寿命次数 (万次)	机械寿 命次数 (万次)	操 作 频 率	起 动 (VA)	吸 引 线 圈 在 380V 时 消 耗 功 率	吸 (W)	接 通	断 开		
CJ12B-100	JK2类15	300	600	三极925	三极22	43	21.5			
CJ12B-150				三极1450	三极30	42.5	19.5			
CJ12B-250				三极2100	三极45	39.5	15			
CJ12B-400				三极4180	三极85	57	31			
CJ12B-600	JK2类10	200	300	三极5600 四、五极3900	三极70 四、五极128	52.6~74.5	29.5~32.5			

$$I = M \frac{P_N \times 10^3}{U_N}$$

式中  $P_N$ ——被控电动机的额定功率(kW)；

$U_N$ ——被控电动机的额定电压(V)；

$M$ ——系数， $M = 1 \sim 0.70$ 。

**例6-14** 有一台 Y180L-4 型 22kW 三相异步电动机， $U_N = 380V$ ，试选一交流接触器。

主触头工作电流  $I (M = 0.78)$

$$I = M \frac{P_N \times 10^3}{U_N} = 0.78 \times \frac{22 \times 10^3}{380} = 44.5A$$

选 CJ10-60 型交流接触器，从表 6-9 看出，主触头额定电流为 60A，电压为 380V 时控制电动机最大功率为 30kW。

**例6-15** 一台 JZ2-63-10 冶金起重用三相异步电动机， $P_N = 50kW$ ， $U_N = 380V$ ， $I_N = 121.1A$ ，试确定交流接触器型号。

主触头额定工作电流  $I$  为

$$I = M \frac{P_N \times 10^3}{U_N} = 0.83 \times \frac{50 \times 10^3}{380} = 109.6A$$

因频繁起控电动机，所以选 CJ12B 系列，即选 CJ12B-250 型交流接触器（见表 6-10）。

## 二、热继电器选择计算

热继电器作为电动机的过载保护。JR16B 系列双金属热继电器技术数据如表 6-11 所示。

选择热继电器时，要按额定电流选择热继电器型号，同时还要按整定电流值选择热元件类型和额定电流。

热继电器额定电流  $I_{热}$  为

$$I_{热} = (0.95 \sim 1.05) I_N$$

式中  $I_N$ ——电动机额定电流(A)。

**例6-16** 一台 Y280S-4 型 75kW 三相异步电动机， $P_N = 75kW$ ， $I_N = 140A$ ， $U_N = 380V$ ，试选择热继电器型号。

$$I_{热} = 1.05 \times I_N = 1.05 \times 140 = 147A$$

表6-11 热继电器的主要技术数据

型 号	额定电流 (A)	热 元 件 等 级	
		热元件额定电流(A)	调节范围(A)
JR16B-20/3 JR16B-20/3D	20	0.35	0.25~0.35
		0.50	0.32~0.50
		0.72	0.45~0.72
		1.1	0.68~1.1
		1.6	1.0~1.6
		2.4	1.5~2.4
		3.5	2.2~3.6
		5	3.2~5
		7.2	4.5~7.2
		11	6.8~11
JR16B-60/3 JR16B-60/3D	60	22	14~22
		32	20~32
		45	28~45
		63	40~63
JR16B-150/3 JR16B-150/3D	150	68	40~63
		85	53~85
		120	75~120
		160	100~160

注：字母D表示带断相保护。

按表6-11选 JR16B-150/3型热继电器，额定电流为150A，电流可调范围为100~160A，热元件电流为160A。

### 三、断路器选择

断路器用于电气设备的过载和短路保护，常用的断路器有DW和DZ两种系列。保护变压器及配电线路选用DW系列；保护电动机选用DZ系列断路器。断路器额定电流有6、10、20、30、50、100、200、400、600、1000、1500、2500、4000、6000、12000A等。

选择时要求断路器的额定电压大于或等于控制线路的额定电压；断路器触头的额定电流要大于或等于瞬时脱扣器的额定电流。

断路器的技术数据见表6-12。

#### 四、熔断器选择计算

选择熔断器时，除要按熔体的额定电流进行选择外，还要考虑熔体动作及选择性的配合。当线路上有短路故障时，要求熔体断开时间小于起动设备断开时间，从而保护了起动设备。

表6-12 断路器的技术数据

型 号	额定电流 (A)	外形尺寸 (mm)			安装尺寸 (mm)	
		N	S	B	L	H
DW10-200	200	367	435	210	205	204
DW10-400	400	380	460	284	213	227
DW10-600	600	380	396	284	213	227
DW10-1000	1000	570	612	355	400	450
DW10-1500	1500					
DW10-2500	2500	750	646	355	584	450
DW10-4000	4000	930	644	374	740	450
DZ10-100	100	108	153	105.5	35	135
DZ10-250	250	155	276	143.5	51	240
DZ10-600	600	210	395	154.5	70	360
DWX15-200	200	240	418	316	220	300
DWX15-400	400					
DWX15-600	600					
DW15-200	200	441	531	433	400	330
DW15-400	400					
DW15-600	600					
DW15-1000	1000	441	531	433	400	330
DW15-1500	1500					
DW15-2500	2500	687	571	462	660	330
DW15-4000	4000	897	571	462	870	330

常用的低压熔断器作为电气设备和导线的短路保护，有RC1A、RL1、RLS等系列，其技术数据如表6-13、表6-14、表

6-15所示。

表6-13 RC1A系列瓷插式熔断器主要技术数据

型 号	熔断器 额定电 流 (A)	熔体额定 电流等级 (A)	额 定 电 压 (V)	极 限 分 断 能 力			外 形 尺 寸 (mm)		
				分 断 电 流 (A)	$\cos\varphi$	允 许 断 开 次 数	长	宽	高
RC1A-5	5	1、2、3、5	三相 380 或 单相 220	300	0.8	2	50	26	43
RC1A-10	10	2、4、6、10		750			62	30	54
RC1A-15	15	12、15		1000			77	38	53
RC1A-30	30	20、25、30		2000	0.7		95	42	60
RC1A-60	60	40、50、60		4000	0.5		124	50	70
RC1A-100	100	80、100		5000			160	58	80
RC1A-200	200	120、150、200		10000			234	64	105

表6-14 RL1系列螺旋式熔断器主要技术数据

型 号	熔 断 器 额 定 电 流 (A)	熔 体 额 定 电 流 等 级 (A)	额 定 电 压 (V)	外 形 尺 寸 (mm)		
				长	宽	高
RL1-15	15	2、4、5、6、10、15	交流380或 直流440	62	39	62
RL1-60	60	20、25、30、35、40、50、60		78	55	77
RL1-100	100	60、80、100		118	82	110
RL1-200	200	100、125、150、200		156	108	116

表6-15 RLS系列螺旋式快速熔断器的主要技术数据表

型 号	熔 断 器 额 定 电 流 (A)	熔 体 额 定 电 流 等 级 (A)	极 限 分 断 电 流 (kA, 有 效 值 $\cos\varphi \leq 0.25$ )	外 形 尺 寸 (mm)		
				长	宽	高
RLS-10	10	3、5、10	50	62	39	62
RLS-50	50	15、20、25、30、40、50		78	55	77
RLS-100	100	60、80、100		118	82	110



计算熔体额定电流公式如下:

1. 单台电动机

$$I_{\text{熔}} \geq (1.5 \sim 2.5) I_N \quad (\text{A})$$

2. 单台频繁起、制动电动机

$$I_{\text{熔}} \geq (3 \sim 3.5) I_N \quad (\text{A})$$

3. 多台电动机

$$I_{\text{熔}} \geq (1.5 \sim 2.5) I_{N_{\text{max}}} + \sum I_N \quad (\text{A})$$

式中  $I_{N_{\text{max}}}$  ——电动机群中最大的额定电流(A);

$\sum I_N$  ——除最大电流的电动机之外,所有电动机的额定电流之和(A);

1.5~2.5——轻载短时启动时选1.5,重载长时间启动时选用2.5。

4. 电阻负载

$$I_{\text{熔}} \geq I_N \quad (\text{A})$$

式中  $I_N$  ——负载额定电流(A)。

5. 考虑启动时尖峰电流对熔体的影响

$$I_{\text{熔}} \geq \frac{I_{st} I_N}{\alpha} \quad (\text{A})$$

式中  $I_{st}$  ——电动机启动电流倍数;

$\alpha$  ——熔体躲过启动电流的安全系数,见表6-16。

例6-17 一台JZR2-71-8型三相异步电动机,  $P_N = 22\text{kW}$ ,  $U_N = 380\text{V}$ ,  $I_N = 56\text{A}$ , 试选熔断器型号。

表6-16 安全系数 $\alpha$

起 动 时 间 2~8s			起 动 时 间 15~20s
熔 体 电 流	50A 以下	$\alpha = 2.5$	$\alpha = 2$
	60~200A	$\alpha = 3.5$	$\alpha = 3$
	200A 以上	$\alpha = 4$	$\alpha = 3$

从  $I_{\text{熔}} \geq (3 \sim 3.5) I_N$  知:

$$I_{\text{熔}} = 3.5 I_N = 3.5 \times 56 = 196\text{A}$$

因是起重电动机，所以系数选用3.5，选RL1-200型熔断器。

**例6-18** 一台JO2-61-4三相异步电动机， $P_N = 13\text{kW}$ ， $U_N = 380\text{V}$ ， $I_{\text{st}} = 6.33$ ，起动时间为2.5s， $I_N = 25.4\text{A}$ ，试计算熔断器的熔体电流。

$$I_{\text{熔}} \geq \frac{I_{\text{st}} I_N}{\alpha} = \frac{6.33 \times 25.4}{3.5} = 46\text{A}$$

选RC1A系列瓷插式熔断器，型号为RC1A-60。

**例6-19** 一组三相异步电动机，其型号如下：

Y160M 4 11kW， $I_N = 23\text{A}$

Y160M1-8 4kW， $I_N = 9.9\text{A}$

Y180L-6 15kW， $I_N = 31\text{A}$

Y288L-8 15kW， $I_N = 34\text{A}$

试选熔断器型号？

$$\begin{aligned} I_{\text{熔}} &= (1.5 \sim 2.5) I_{N\text{max}} + \sum I_N \\ &= 2.5 \times 34 + (23 + 9.9 + 31 + 34) \\ &= 85 + 97.9 \\ &= 182.9\text{A} \end{aligned}$$

选RC1A-200型，三相， $U_N = 380\text{V}$ 。

### 五、低压开关及刀形转换开关的选择

低压开关及刀形转换开关可按电路额定电压、计算电流和断

表6-17 HK系列负荷开关的主要技术数据

型 号	额定电压 (V)	额定电流 (A)	控制相应的 电动机功率 (kW)	熔 丝 规 格	
				含铜量 (不少于，%)	线 径 (不小于，mm)
HK2-10/2	250	10	1.1	99.9	0.25
HK2-15/2	250	15	1.5	99.9	0.41
HK2-30/2	250	30	3.0	99.9	0.58
HK2-15/3	500	15	2.2	99.9	0.45
HK2-30/3	500	30	4.0	99.9	0.71
HK2-60/3	500	60	5.5	99.9	1.12

流量进行选择。

最常用的两种低压开关有HK系列开启式负荷开关(刀开关)和HH系列负荷开关(铁壳开关),其技术数据如表6-17、表6-18所示。

表6-18 HH系列负荷开关主要技术数据

型 号	额定 电流 (A)	开关极限通断能力 (在110%额定电压时)			熔断器极限分断能力			控制电动 机最大 功率 (kW)
		通断电流 (A)	功率 因数 $\cos\varphi$	通断 次数 (A)	分断电流 (A)	功率 因数 $\cos\varphi$	分断 次数	
HH3-15/3	15	60			750			3.0
HH3-30/3	30	120	0.4		1500			7.5
HH3-60/3	60	240		10	3000	0.4	2	13
HH3-100/3	100	250						
HH3-200/3	200	300	0.8					
HH4-15/3 HH4-15/3Z	15	60			750	0.8		3.0
HH4-30/3 HH4-30/3Z	30	120	0.5	10	1500	0.7	2	7.5
HH4-60/3 HH4-60/3Z	60	240	0.4		3000	0.6		13

例6-20 一台Y160M2-6型,  $P_N = 5.5\text{kW}$ ,  $U_N = 380\text{V}$ ,  $I_N = 13\text{A}$ 的三相异步电动机,试选负荷开关型号。

从表6-18中查出HH4-30/3。

### 六、磁力起动器选择

磁力起动器用于交流电动机起、制动和正反转换向,常用的有QC8、QC10和QC12等三种系列,其技术数据如表6-19~表6-21所示。

例6-21 一台30kW三相异步电动机,  $U_N = 380\text{V}$ ,试选磁力起动器型号。

表6-19 QC8系列起动器的形式分类及基本技术数据

容量等级	基本形式				结构形式				电寿命 (额定容量下 通与分断次数)
	不可逆	可逆	不可逆	可逆	无热继电器	带热继电器	无热继电器	可逆	
1	QC8-1/2	QC8-1/3	QC8-1/4	QC8-1/5	QC8-1/5	QC8-1/5	QC8-1/7	QC8-1/8	QC8-1/8
2	QC8-2/2	QC8-2/3	QC8-2/4	QC8-2/5	QC8-2/5	QC8-2/5	QC8-2/7	QC8-2/8	QC8-2/8
3	QC8-3/2	QC8-3/3	QC8-3/4	QC8-3/5	QC8-3/5	QC8-3/5	QC8-3/7	QC8-3/8	QC8-3/8
4	QC8-4/2	QC8-4/3	QC8-4/4	QC8-4/5	QC8-4/5	QC8-4/5	QC8-4/7	QC8-4/8	QC8-4/8
5	QC8-5/2	QC8-5/3	QC8-5/4	QC8-5/5	QC8-5/5	QC8-5/5	QC8-5/7	QC8-5/8	QC8-5/8
6	QC8-6/2	QC8-6/3	QC8-6/4	QC8-6/5	QC8-6/5	QC8-6/5	QC8-6/7	QC8-6/8	QC8-6/8
7	QC8-	QC8-7/3	QC8-7/4	QC8-7/5	QC8-7/5	QC8-7/5	QC8-7/7	QC8-7/8	QC8-7/8
容量等级	内部装置元件				控制电动机的最大 功率 (kW)				电寿命
额定电流 (A)	热继电器型号				接通与分断能力 (当 $U = 380V$ , $\cos\varphi = 0.3 \sim 0.4$ 时, A)				(额定容量下 通与分断次数)
1	C18-10	JR15-10	127V	220V	380V	10 × 10 = 100	≥ 3 × 10 <sup>6</sup>	≥ 0.6 × 10 <sup>6</sup>	
2	C18-20	JR15-20	1.5	2.5	4	20 × 10 = 200			
3	C18-40	JR15-40	3	5.5	10	40 × 10 = 400			
4	C18-60	JR9-300A	6	11	20	60 × 10 = 600			
5	C18-100	JR9-300A	9	17	30	100 × 10 = 1000			
6	C18-150	JR9-300A	17	29	50	150 × 10 = 1500			
7	C18-150	JR9-300A	25	43	75				



表6-21 QC12系列启动器的形式分类及基本技术参数

启动器等级	基本结构形式											
	开		启		式		保		护		式	
	不可逆	可逆	有热继电器	无热继电器	有热继电器	无热继电器	不可逆	有热继电器	无热继电器	可逆	有热继电器	无热继电器
1	QC12-1/K	QC12-1/NWK	QC12-1/NK	QC12-1/WH	QC12-1/H	QC12-1/NWH	QC12-1/WH	QC12-1/H	QC12-1/NWH	QC12-1/NH	QC12-1/WH	QC12-1/H
2	QC12-2/K	QC12-2/NWK	QC12-2/NK	QC12-2/WH	QC12-2/H	QC12-2/NWH	QC12-2/WH	QC12-2/H	QC12-2/NWH	QC12-2/NH	QC12-2/WH	QC12-2/H
3	QC12-3/K	QC12-3/NWK	QC12-3/NK	QC12-3/WH	QC12-3/H	QC12-3/NWH	QC12-3/WH	QC12-3/H	QC12-3/NWH	QC12-3/NH	QC12-3/WH	QC12-3/H
4	QC12-4/K	QC12-4/NWK	QC12-4/NK	QC12-4/WH	QC12-4/H	QC12-4/NWH	QC12-4/WH	QC12-4/H	QC12-4/NWH	QC12-4/NH	QC12-4/WH	QC12-4/H
5	QC12-5/K	QC12-5/NWK	QC12-5/NK	QC12-5/WH	QC12-5/H	QC12-5/NWH	QC12-5/WH	QC12-5/H	QC12-5/NWH	QC12-5/NH	QC12-5/WH	QC12-5/H
6	QC12-6/K	QC12-6/NWK	QC12-6/NK	QC12-6/WH	QC12-6/H	QC12-6/NWH	QC12-6/WH	QC12-6/H	QC12-6/NWH	QC12-6/NH	QC12-6/WH	QC12-6/H
7	QC12-7/K	QC12-7/NWK	QC12-7/NK	QC12-7/WH	QC12-7/H	QC12-7/NWH	QC12-7/WH	QC12-7/H	QC12-7/NWH	QC12-7/NH	QC12-7/WH	QC12-7/H
启动器等级	所配接触器CJ10系列的电流等级 (A)		所配继电器CJ10系列的电流等级 (A)		可控制电动机最大功率 (kW)							
	5	10	20	40	60	100	150	220V	380V	600V	2.2	4
	10	20	40	60	100	150	220V	380V	600V	2.2	4	
1	5	10	20	40	60	100	150	220V	380V	600V	2.2	4
2	10	20	40	60	100	150	220V	380V	600V	2.2	4	
3	20	40	60	100	150	220V	380V	600V	2.2	4	10	26
4	40	60	100	150	220V	380V	600V	2.2	4	10	26	30
5	60	100	150	220V	380V	600V	2.2	4	10	26	30	50
6	100	150	220V	380V	600V	2.2	4	10	26	30	50	75
7	150	220V	380V	600V	2.2	4	10	26	30	50	75	

查表6-19有QC8-3/2型，查表6-20有QC10-5/2型，查表6-21有QC12-5/K型。

#### 第四节 自耦变压器计算

##### 一、概述

自耦变压器传递能量时，除磁传递之外，还有电直接传递，所以其电磁容量小于额定容量（即通过容量），即变压比越接近1，节约效果越大。这种变压器与一般只有磁传递方式的变压器相比，具有以下优点：

- (1) 变压器制造节省材料，因此造价成本低；
- (2) 损耗小、效率高；
- (3) 运输和安装方便。

但也有缺点：

- (1) 电压调整困难；
- (2) 保护复杂；
- (3) 中性点必须接地；
- (4) 引起系统短路，电流增加。

自耦变压器的接线图，如图6-2所示，图6-2a是降压变压器，图6-2b是升压变压器，另外也有单相和三相之分。从图中看出，一、二次绕组有一个公共部分绕组，所以把一、二次侧共用一部分绕组的变压器，叫自耦变压器。

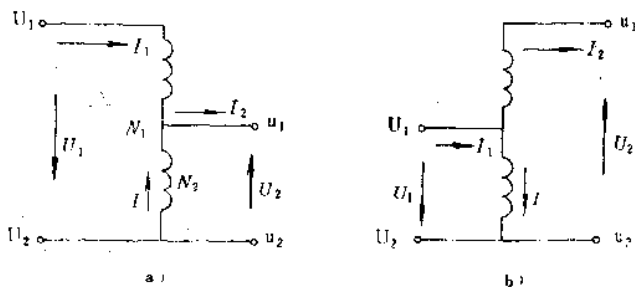


图6-2 自耦变压器接线图

一次、二次绕组共用的部分叫公共绕组，流入其中的电流为 $I_1$ 与 $I_2$ 之差，所以这部分绕组的导线截面积可小。变压器的电压比为

$$K = \frac{U_1}{U_2} = \frac{N_1}{N_2}$$

当 $K > 1$ 时，为降压变压器，

当 $K < 1$ 时，为升压变压器。

电流比为

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{1}{K} = \frac{N_2}{N_1}$$

公共绕组电流为 $I$ ，则有

降压变压器为

$$I = I_2 - I_1 \text{ 或 } I_2 = I + I_1$$

升压变压器为

$$I = I_1 - I_2 \text{ 或 } I_2 = I_1 - I$$

所以 
$$I = I_2 \left( 1 - \frac{1}{K} \right) = I_1 (K - 1)$$

可见， $K$  越接近 1， $I$  越小，导线材料越省，所以自耦变压器 $K$ 越接近1越有利，一般 $K$  选取1.5~2。

自耦变压器的铜耗为普通变压器的 $\left( 1 - \frac{1}{K} \right)$ 倍，所以绕组重量也为普通变压器的 $\left( 1 - \frac{1}{K} \right)$ 倍。

当把普通双绕组变压器改成自耦变压器时，容量可增加 $\left( 1 + \frac{1}{K} \right)$ 倍。

## 二、铭牌数据及计算

变压器容量（或通过容量）：

单相变压器为



$$P_1 = U_1 I_1 \quad (\text{一次绕组功率})$$

$$P_2 = U_2 I_2 \quad (\text{二次绕组功率})$$

三相变压器为

$$P_1 = \sqrt{3} U_1 I_1 \quad (\text{一次绕组功率})$$

$$P_2 = \sqrt{3} U_2 I_2 \quad (\text{二次绕组功率})$$

式中  $I_1$ 、 $I_2$ ——、二次线电流(A)；

$U_1$ 、 $U_2$ ——、二次线电压(V)；

$P_1$ 、 $P_2$ ——、二次视在功率(W)。

输入功率等于输入电压乘以输入电流，而输出功率等于输出电压乘以输出电流，当电流和电压为额定值时，称为额定功率。

绕组容量是该绕组电压与电流的乘积，也叫电磁功率，如降压变压器的  $U_2 I$  部分。公共线圈的容量叫电磁容量。

输出功率为

$$P_2 = U_2 I_2 = U_2 (I_1 - I) = U_2 I_1 - I U_2$$

很明显， $P_2 \neq I U_2$ ，这一点与普通变压器不同，普通变压器输入功率  $P_1 = U_1 I_1$  等于输出功率  $P_2 = U_2 I_2$ ，均等于变压器的绕组容量。

从上式看出，二次侧功率是由两部分组成，一部分是从电路直接传递过去的  $U_2 I_1$ ，另一部分是通过电磁感应传递过去的  $U_2 I$ 。

设线圈  $U_1 u_1$  段匝数和线圈  $u_1 u_2$  段总匝数为  $N_1$ ，公共线圈  $u_1 u_2$  段匝数为  $N_2$  (见图 6-2a)，空载时， $U_1 U_2$ 、 $N_1$ 、 $N_2$  有以下关系：

$$U_2 = U_1 \frac{N_2}{N_1} = \frac{U_1}{\frac{N_1}{N_2}} = \frac{U_1}{K}$$

又因  $I = I_2 - I_1$ ，所以，线圈  $U_1 u_1$  段的磁动势被公共线圈  $u_1 u_2$  段磁动势所平衡，即

$$(N_1 - N_2) I_1 = N_2 I$$

或

$$N_1 I_1 - N_2 I_1 = N_2 I_2 - N_2 I_1$$

电流比为

$$I_2/I_1 = K$$

$$I/I_1 = K - 1, \quad I/I_2 = 1 - \frac{1}{K}$$

又因  $U_{U1a} = \frac{N_1 - N_2}{N_2} = K - 1 = \frac{I}{I_1}$ , 所以有

$$U_{U1a} I_1 = U_2 I$$

此式说明, 自耦变压器串联线圈容量等于公共线圈的容量。

**例6-22** 一台单相自耦变压器, 容量为15kVA, 一次电压为230V,  $N_1 = 850$ 匝, 欲使二次电压为190V, 问 $N_2$ 应是多少, 即绕组抽头应在什么位置上, 额定时, 一次电流、二次电流以及公共线圈中电流各是多少, 如果电流密度选为 $2.3\text{A}/\text{mm}^2$ , 那么各绕组导线截面积又是多少, 接线图如图6-3所示。

(1) 绕组抽头应在 $N_2$ 处, 即

$$N_2 = N_1 \frac{U_2}{U_1} = 850 \times \frac{190}{230} = 702 \text{匝}$$

(2) 各绕组电流一次电流 $I_1$ 为

$$I_1 = \frac{P_N \times 10^3}{U_1} = \frac{15 \times 10^3}{230} = 65.2 \text{A}$$

二次电流 $I_2$ 为

$$I_2 = \frac{N_1}{N_2} I_1 = \frac{850}{702} \times 65.2 = 78.9 \text{A}$$

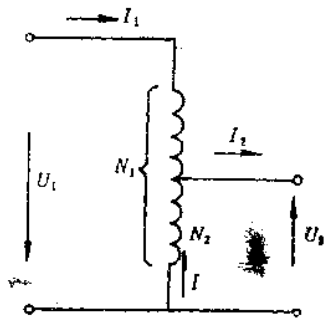


图6-3 15kVA单相自耦变压器接线图

公共绕组中电流 $I$ 为

$$I = I_2 - I_1 = 78.9 - 65.2 = 13.7 \text{A}$$

一次侧导线截面积 $S_1$ 为

$$S_1 = \frac{I_1}{J} = \frac{65.2}{2.3} = 28.3 \text{mm}^2$$

二次侧导线截面积 $S_2$ 为

$$S_2 = \frac{I_2}{J} = \frac{78.9}{2.3} = 34.3 \text{mm}^2$$

公共绕组导线截面积 $S_3$ 为

$$S_3 = \frac{I}{J_1} = \frac{13.7}{2.3} = 5.96 \text{ mm}^2$$

可见公共绕组导线截面积很小。

**例6-23** 试计算一台单相自耦变压器，额定容量为 $10 \text{ kVA}$ ， $50 \text{ Hz}$ ，一次电压 $U_1 = 180 \text{ V}$ ，二次侧负载电压 $U_2 = 220 \text{ V}$ 。

(1) 计算容量 $P_m$

$$\begin{aligned} P_m &= P_2 \left( \frac{U_2 - U_1}{U_2} \right) = 10 \times 10^3 \left( \frac{220 - 180}{220} \right) \\ &= 1818 \text{ VA} \end{aligned}$$

变压器接线图，如图6-4所示。

(2) 铁心截面积 $S_c$

$$S_c = k \sqrt{P_m} = 1.0 \sqrt{1818} = 43 \text{ cm}^2$$

(3) 每匝电压 $e_r$  ( $B = 1 \text{ T}$ )

$$\begin{aligned} e_r &= 4.44 f B S_c \times 10^{-4} = 4.44 \times 50 \times 1 \times 43 \times 10^{-4} \\ &= 0.9546 \text{ V/匝} \end{aligned}$$

(4) 绕组匝数

一次绕组匝数 $N_1$

$$N_1 = \frac{U_1}{e_r} = \frac{180}{0.9546} = 189 \text{ 匝}$$

二次绕组匝数 $N_2$

$$N_2 = \frac{U_2}{e_r} = \frac{220}{0.9546} = 230 \text{ 匝}$$

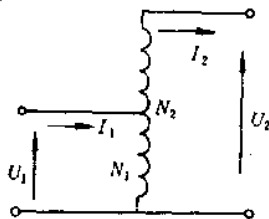


图6-4 变压器接线图

(5) 电流计算

一次电流 $I_1$ 为

$$I_1 = \frac{P_N}{U_1} = \frac{10 \times 10^3}{180} = 55.6 \text{ A}$$

二次电流 $I_2$ 为

$$I_2 = \frac{P_N}{U_2} = \frac{10 \times 10^3}{220} = 45.5 \text{ A}$$

公共部分电流  $I$  为

$$I = I_1 - I_2 = 55.6 - 45.5 = 10.1 \text{ A}$$

公共绕组导体截面积  $S$

$$S = \frac{I}{J} = \frac{10.1}{2} = 5.05 \text{ mm}^2$$

电流密度  $J = 2 \text{ A/mm}^2$ 。

一次侧导体截面积  $S_1$  为

$$S_1 = \frac{I_1}{J} = \frac{55.6}{2} = 27.8 \text{ mm}^2$$

二次侧导体截面积  $S_2$  为

$$S_2 = \frac{I_2}{J} = \frac{45.5}{2} = 22.8 \text{ mm}^2$$

例6-24 试计算一台三相自耦变压器，额定容量为50kVA，50Hz，一次电压为380V，二次电压（为试验国外进口电机） $U_2 = 200\text{V}$ ，铁心采用D34硅钢片，星形联结。

(1) 计算容量  $P_m$

$$P_m = \left( \frac{U_1 - U_2}{U_1} \right) P_N = \left( \frac{380 - 200}{380} \right) \times 50 = 23.7 \text{ kVA}$$

(2) 每匝电压  $e_1$

$$e_1 = 0.4 \sqrt{P_m} = 0.4 \sqrt{23.7} = 1.95 \text{ V/匝}$$

(3) 铁心截面积  $S_c$

$$S_c = \frac{e_1 10^4}{4.44 f B} = \frac{1.95 \times 10^4}{4.44 \times 50 \times 1.5} = 60 \text{ cm}^2$$

$B$  选  $1.5 \text{ T}$ 。

(4) 绕组匝数

二次绕组匝数  $N_2$  为

$$N_2 = \frac{U_2 / \sqrt{3}}{e_1} = \frac{200 / \sqrt{3}}{1.95} = 59 \text{ 匝}$$

一次绕组匝数  $N_1$

$$N_1 = \frac{U_1 - U_2}{\sqrt{3} e_1} = \frac{380 - 200}{\sqrt{3} \times 1.95} = 53 \text{ 匝}$$

变压器星形联结图,如图6-5所示

(5) 每相容量  $P_\phi$

$$P_\phi = \frac{P_N}{3} = \frac{50}{3} = 16.7 \text{ kVA}$$

(6) 相电压  $U_\phi$

一次相电压  $U_{\phi_1}$  为

$$U_{\phi_1} = \frac{U_1}{\sqrt{3}} = \frac{380}{\sqrt{3}} = 220 \text{ V}$$

二次相电压  $U_{\phi_2}$  为

$$U_{\phi_2} = \frac{U_2}{\sqrt{3}} = \frac{200}{\sqrt{3}} = 115.5 \text{ V}$$

(7) 电流计算

一次电流  $I_1$  为

$$I_1 = \frac{P_\phi}{U_{\phi_1}} = \frac{16.7 \times 10^3}{220} = 75.9 \text{ A}$$

二次电流  $I_2$  为

$$I_2 = \frac{P_\phi}{U_{\phi_2}} = \frac{16.7 \times 10^3}{115.5} = 144.6 \text{ A}$$

公共绕组中电流  $I$  为

$$I = I_2 - I_1 = 144.6 - 75.9 = 68.7 \text{ A}$$

公共绕组导线截面积  $S$  为

$$S = \frac{I}{J} = \frac{68.7}{2} = 34.4 \text{ mm}^2$$

一次绕组导线截面积  $S_1$

$$S_1 = \frac{I_1}{J} = \frac{75.9}{2} = 38 \text{ mm}^2$$

二次绕组导线截面积  $S_2$

$$S_2 = \frac{I_2}{J} = \frac{144.6}{2} = 72.3 \text{ mm}^2$$

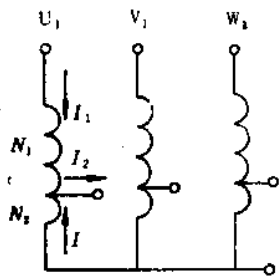


图6-5 三相变压器星形联结图

例6-25 有一台三相自耦变压器,  $U_1 = 6000 \text{ V}$ ,  $U_2 = 6300 \text{ V}$ , 要求输出  $400 \text{ kVA}$  负载运行, 当变压器为  $\text{Y}$  联结、 $\Delta$  联结、 $\text{V}$  联

结和A联结时，变压器所需容量各是多少。

(1) 当变压器采取Y联结时，变压器容量

$$P = \left( \frac{U_2 - U_1}{U_2} \right) P_2 = \frac{6300 - 6000}{6300} \times 400 = 19 \text{ kVA}$$

(2) 当变压器采取Δ联结时的容量

$$P = \frac{U_2^2 - U_1^2}{\sqrt{3} U_2 U_1} \times P_2 = \frac{6300^2 - 6000^2}{\sqrt{3} \times 6300 \times 6000} \times 400 = 22.5 \text{ kVA}$$

(3) 当采用V联结时的容量

$$P = \frac{1}{0.866} \left( \frac{U_2 - U_1}{U_2} \right) P_2 = \frac{1}{0.866} \left( \frac{6300 - 6000}{6300} \right) \times 400 = 22 \text{ kVA}$$

(4) 当采用A联结时的容量

$$P = \left[ -\frac{\sqrt{3}}{2} \left( \frac{U_1}{U_2} \right) + \sqrt{1 - \frac{1}{4} \left( \frac{U_1}{U_2} \right)^2} \right] \times P_2$$

$$= \left[ -\frac{\sqrt{3}}{2} \left( \frac{6000}{6300} \right) + \sqrt{1 - \frac{1}{4} \left( \frac{6000}{6300} \right)^2} \right] \times 400$$

$$= (-0.825 + \sqrt{1 - 0.226}) \times 400$$

$$= 21.6 \text{ kVA}$$

## 第五节 弧焊变压器计算

### 一、概述

一般变压器外特性较硬，不适于金属弧焊的静态和动态特性要求，为了稳弧和防止焊接电流过大而采用弧焊变压器，它的最大特点是具有软特性（图6-6中曲线1或2），为此弧焊变压器要有增大漏磁通的电器元

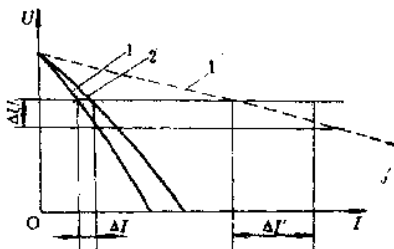


图6-6 弧焊变压器外特性曲线

1、2—弧焊变压器的软特性曲线  
1'—普通变压器的硬特性曲线

件（如电抗器）和特殊的结构形式。

弧焊变压器工作是断续工作的，一般负载持续率为 60% 左右。变压器从空载到短路，又由短路到空载运行时，能承受负载电流的急剧变化。

一般起弧电压约 40~80V，短路工作电压降约 35V，空载电压约 80V 左右。

综上所述，弧焊变压器应满足下面要求：

(1) 具有陡降的外特性，当焊接弧长变化时，焊接电流变化要小，当焊接处于短路状态时，电流要控制在一定范围内。如图 6-6 所示，虚线  $I'$  是普通外特性曲线，特性较硬，实线为弧焊变压器所要求的陡降外特性曲线，当施焊时，一旦弧长变化，引起电压降  $\Delta U$ ，电弧特性从曲线 1 变到曲线 2，引起的电流变化  $\Delta I$  很小，但对于普通变压器，则  $\Delta I'$  很大，甚至把变压器烧毁，所以弧焊机要求弧焊变压器一定要有陡降的外特性。

(2) 次级空载电压能保证顺利引弧和电弧连续性。

(3) 能限制短路电流在两倍额定电流以内，所以要求负载回路感抗要大。

(4) 焊接电流可调，二次电流调节范围在 100~600A。

弧焊变压器一般按增加感抗方法可分为：

- 1) 增大漏磁的弧焊变压器（采用磁分路和漏磁方式）；
- 2) 附加电抗线圈扼流方式的弧焊变压器；
- 3) 采用漏磁与电抗线圈扼流组合式的弧焊变压器；
- 4) 带有整流器的弧焊变压器等。

## 二、增大漏磁的弧焊变压器结构形式

常见的结构形式如图 6-7 所示，图 a 是一次绕组匝数  $N_1$  只放在左铁心柱上，二次绕组一部分匝数  $N_{21}$  绕在左铁心柱上，而其余部分绕在右铁心柱上 ( $N_{22}$ )；图 b 是一次、二次绕组各放在铁心的一边，相当于上图中  $N_{21} = 0$  的情况；图 c 是一次绕组匝数  $N_1$  分两部分绕在左侧的上下横轭铁上，而二次绕组匝数  $N_2$  也分两部分绕在右侧的上下横轭铁上。 $N_1$  的两部分  $N_{11}$  和  $N_{12}$  串

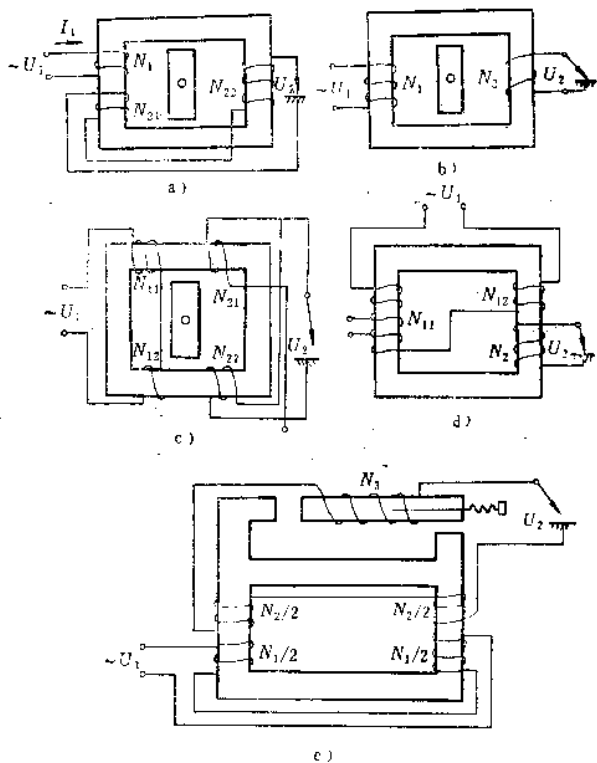


图6-7 常见的弧焊变压器结构形式

联， $N_2$ 的两部分 $N_{21}$ 和 $N_{22}$ 并联，图d是一次绕组匝数 $N_1$ 分绕在两铁心柱上（ $N_{11}$ 和 $N_{12}$ ）而二次绕组仅绕在二次铁心柱上，调一次绕组抽头可调节焊接电流，这种结构常用在手提式轻型电焊机；图e是二次绕组匝数分两相等部分，分别绕在两个铁心柱上，并且和活铁轭的线圈 $N_3$ 串联，一次绕组也分成相等两部分，分别绕在两铁心柱上，然后接到交流电源 $U_1$ 上。

### 三、弧焊机绕组联结法

各绕组联结方法取决于铁心内磁通方向和绕组的绕制方法：

应符合右手螺旋定则（在某瞬间，铁心中各部位磁通方向不应“顶牛”）。



**例6-26** 如图 6-8 所示，一、二次绕组绕制方向相同，分别放置在两铁心柱上，问如何确定首末端。

(1) 先画出磁通中的方向(顺时针 反时针均可)；

(2) 按磁通方向，用右手螺旋定则，判定绕组中电流方向；

(3) 流入绕组端为首端，用  $u_1$  表示，流出绕组端为末端，用  $u_2$  表示。

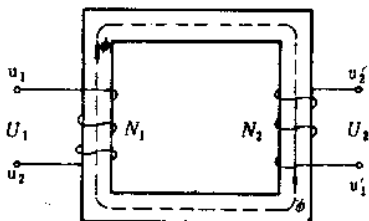


图6-8 判断首末端

**例6-27** 图 6-9 是活铁在中间的弧焊机铁心，一、二次绕组的绕向如图所示，现在

需把二次绕组的两部分串联起来，问如何正确联结。

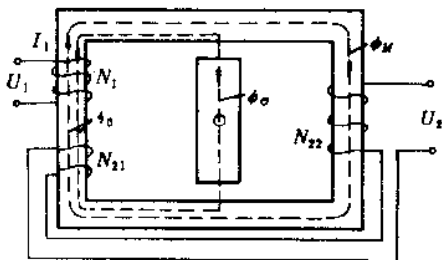


图6-9 正确联结一、二次绕组

(1) 先假定磁通方向，即  $\Phi_0 = \Phi + \Phi_M$ ；

(2) 根据磁通方向来确定各绕组中电流方向；

(3) 根据串、并联要求，将二次绕组串联起来，如图 6-9 所示。

**例6-28** 用上述方法确定图 6-10 中各绕组正确联结？

仍按上述方法先画出磁通  $\Phi$  方向，然后用右手螺旋定则确定出各绕组电流方向，最后将  $N_{21}$ 、 $N_{22}$ 、 $N_{23}$  串联起来，如图 6-11 所示。

#### 四、变压器空载和短路运行分析

当变压器二次侧开路、 $I_2 = 0$  时，在一次绕组上加入电源电压  $U_1$ ，则有电流  $I_1$  在一次绕组中流通，因此在铁心中产生总磁通  $\Phi$ 。这个总磁通一部分通过二次绕组，磁通为  $\Phi_M$ ， $\Phi_M$  是匝链

一、二次绕组公共铁心的主磁通；另一部分磁通从活铁心中通过，用 $\Phi_{\sigma}$ 表示，相当于一次绕组的漏磁通，所以有

$$\dot{\Phi}_0 = \dot{\Phi} + \dot{\Phi}_M \quad (\text{Wb})$$

磁通 $\Phi_0$ 大小取决于电源电压 $U_1$ ，当 $U_1$ 不变时，可视 $\Phi_0$ 为常数，而 $\Phi_{\sigma}$ 的大小与活铁的位置有关，当活

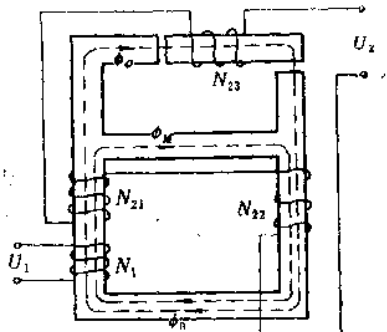


图6-10 正确联结弧焊变压器绕组绕

铁全部伸入铁心内时，这时磁阻最小，所以 $\Phi_{\sigma}$ 最大，而 $\Phi_M$ 最小；反之，活铁全部从铁心抽出来，这时磁阻最大，所以 $\Phi_{\sigma}$ 最小，而 $\Phi_M$ 最大。 $\Phi_M$ 大小与

二次电压大小成正比，当 $\Phi_M$ 大时，二次电压 $U_2$ 也大，输出电流 $I_2$ 也大，输出容量增大；反之，由于 $\Phi_M$ 小， $U_2$ 亦小，在一定负载阻抗下，输出电流 $I_2$ 也小。可见，改变活铁的位置，就能改变二次焊接电压和电

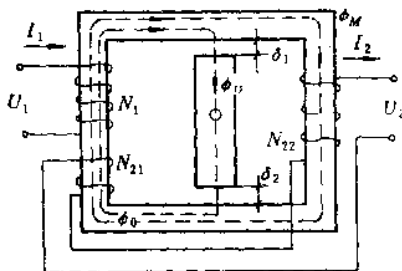


图6-11 变压器空载和短路运行分析

流，从而就能适应焊接规范的变化。

通过试验表明， $\Phi_{\sigma}$ 的变化是从零（活铁全部抽出）变到（7%~10%） $\Phi_0$ ，而 $\Phi_M$ 值是从100% $\Phi_0$ 变到（93%~90%） $\Phi_0$ ，即

$$\dot{\Phi}_0 = \dot{\Phi} + \dot{\Phi}_M = (0 \sim 10\%) \dot{\Phi}_0 + \dot{\Phi}_M$$

$$\therefore \dot{\Phi}_M = [100\% - (0 \sim 10\%)] \dot{\Phi}_0 = (100\% \sim 90\%) \dot{\Phi}_0$$

设 $\Phi_M$ 在二次绕组感应的空载电压为 $U_{20}$ ，则有

$$U_{20} \sim E_2 = 4.44f \cdot (N_{21} \Phi_0 + N_{22} \Phi_M) \quad (\text{V})$$

当 $N_{21} = 0$ 时，跟一般变压器一样，但由于一、二次绕组分

绕在铁心两个柱上，漏抗很大，所以具有陡降特性。

设空载时，一次电压为  $U_{10}$ ，则有

$$U_{10} = E_1 = 4.44fN_1\Phi_0 \quad (\text{V})$$

$$\therefore \Phi_0 = \frac{U_{10}}{4.44fN_1} \quad (\text{Wb})$$

在设计弧焊机时，可取  $\Phi_M \approx 0.9\Phi_0$ 。

可见弧焊机的  $E_2$  不像普通变压器那样能用变比来求，也就是普通变压器的电压变比  $K = \frac{N_1}{N_2}$  在此不适用。必须按下式计算  $E_2$ ，即

$$E_2 = 4.44f(N_{21}\Phi_0 + N_{22}\Phi_0) \quad (\text{V})$$

当变压器二次线圈短路时，二次线圈中有短路电流  $I_2$  流过，这时  $U_2$  可视为零，实际上  $U_2$  不完全为零，还有一个电弧电压  $U_{\text{弧}}$ ，一般  $U_{\text{弧}} = 30 \sim 35 \text{V}$ ，但由于  $U_{\text{弧}}$  很小，所以可视焊机在工作时，额定工作电流几乎等于短路电流。

由于  $U_2 = 0$ ，这时铁心磁通只有一、二次侧漏磁通  $\Phi_{\sigma 1}$ 、 $\Phi_{\sigma 2}$ 。

### 五、弧焊机参数的调整

(1) 为调二次电流  $I_2$ ，可调二次空载电压  $U_{20}$ ，当  $U_{20}$  提高时， $I_2$  也上升，反之， $U_{20}$  下降时， $I_2$  也下降，这一点跟普通变压器不同，普通变压器  $U_2$  下降， $I_2$  提高不同。

为了提高  $U_{20}$ ，将  $N_{22}$  增加。但是，实际上不会使  $I_2$  增加的，甚至  $N_{22}$  增加后， $I_2$  反而降低，这是因为  $N_{22}$  增加后，与  $N_{22}$  平方成正比的电抗要增加，所以使  $I_2$  降低，而  $I_2$  为

$$I_2 = \frac{\sqrt{U_{20}^2 - U_{\text{弧}}^2}}{X_{\sigma}} \approx \frac{\sqrt{U_{20}^2 - U_{\text{弧}}^2}}{N_{22}^2}$$

式中  $U_{20}$  —— 二次空载电压 (V)；

$U_{\text{弧}}$  —— 电弧电压 (V)；

$X_{\sigma}$  —— 电抗。

由上式看出，当  $N_{22}$  增加时， $I_2$  降低，虽然提高  $U_{20}$ ，但  $U_{20}$  的增加因素小于使  $I_2$  降低的因素。

(2) 调节活铁, 当活铁全部插入铁心时, 由于磁阻最小, 使漏抗最大, 使  $I_2$  下降; 反之, 活铁全部抽出铁心时, 磁阻最大, 使  $I_2$  上升。

(3) 减少活铁与铁轭间气隙, 使磁阻减少, 所以使  $I_2$  下降。

(4) 增大活铁截面积, 可扩大二次电流调节范围。当截面积增加, 漏磁增大,  $\Phi_M$  下降, 使  $U_{20}$  降低, 所以  $I_2$  下降。

(5) 当电源电压不变, 二次绕组匝数  $N_2$  不变时, 使一次绕组匝数  $N_1$  增加, 则使每匝电压降低, 所以使二次电流降低。变化次序是: 当  $U_1$  固定时,  $N_1 \uparrow \rightarrow \Phi_0 \downarrow \rightarrow (\Phi_\sigma \text{ 不变}) \rightarrow \Phi_M \downarrow \rightarrow U_{20} \downarrow \rightarrow I_2 \downarrow$ 。

(6) 当二次绕组匝数  $N_2$  不变时 ( $N_2 = N_{21} + N_{22}$ ) 调整  $N_{21}$  和  $N_{22}$  的分配关系, 则对  $U_{20}$  和  $I_2$  有影响。比如, 使  $N_{21}$  增加,  $N_{22}$  降低, 但  $N_2$  不变, 则使  $U_{20} \uparrow$ ,  $I_2 \uparrow$ , 这是因为漏磁减少, 使电抗  $X_c$  降低之故; 反之, 当  $N_{21} \downarrow$ , 使  $N_{22} \uparrow$ , 则使  $U_{20} \downarrow$ ,  $I_2 \downarrow$ 。

## 六、弧焊变压器计算

1. 确定电源额定电压  $U_{N1}$

一般选  $U_{N1} = 380V$  或  $220V$  两种, 频率  $f$  为  $50Hz$ 。

2. 确定二次空载电压  $U_{20}$  和一次额定电流  $I_{N1}$

一般  $U_{20}$  是可调的,  $U_{20}$  选在  $50 \sim 80V$  范围内, 容量小的选小值。

3. 确定焊接电流  $I_2$

通常焊接额定负载持续率为  $65\%$ , 在此负载持续率下, 焊接电流可按焊条直径确定, 即

$$I_2 = (20 + 6d)d \quad (A)$$

式中  $d$  —— 焊条直径 (mm)。

例6-29 已知焊条直径  $d = 4mm$ ,  $U_{20} = 65V$ ,  $U_{N1} = 380V$ , 试求  $I_{N2}$ 、 $I_{N1}$  各多少。

二次电流  $I_2$  为

$$I_2 = (20 + 6d)d = (20 + 6 \times 4) \times 4 = 176A$$

增加一些裕度即可确定出额定焊接电流  $I_{N2}$ , 即

$$I_{N2} = 200 \text{ A,}$$

一次额定电流  $I_{N1}$  为

$$I_{N1} = k \frac{U_{20}}{U_1} I_{N2} = 1.1 \times \frac{65}{380} \times 200 = 37.6 \text{ A}$$

式中  $k$ ——一次电流增加系数,  $k = 1.1 \sim 1.05$ ;

$U_{20}$ ——二次空载电压(A)

4.  $U_{20}$ 和  $I_{N2}$  的调节范围

按表6-22选择或计算。

表6-22  $U_{20}$ 和  $I_{N2}$  调节范围

参数调节范围	磁分路弧焊机变压器	漏磁式弧焊机变压器
$U_{20}$ 调节范围 (V)	60~70 (大容量)	70~80 (大容量)
	70~80 (小容量)	50~65 (小容量)
$I_{N2}$ 调节范围(A)	$1.35I_{N2} \sim \frac{1.35I_{N1}}{5 \sim 8}$	$1.35I_{N1} \sim \frac{1.35I_{N2}}{3 \sim 4}$

5. 额定功率计算

额定输出功率为

$$P_{N2} = U_{20} I_{N2} \times 10^{-3} \quad (\text{kVA})$$

额定输入功率为

$$P_{N1} = (1.05 \sim 1.1) P_{N2} \quad (\text{kVA})$$

6. 每匝电压  $e_r$ ,

$$e_r = (0.5 \sim 0.6) \sqrt{P_{N1}} \quad (\text{V/匝})$$

7. 铁柱截面积  $S_c$ ,

$$S_c = \frac{e_r \times 10^4}{4.44fB} \quad (\text{cm}^2)$$

式中  $B$ ——磁通密度, 热轧硅钢片,  $B = 1.1 \sim 1.3 \text{ T}$ ; 冷轧硅钢片,  $B = 1.4 \sim 1.6 \text{ T}$ 。

8. 铁轭截面积  $S_s$ ,

$$S_s = (1.0 \sim 1.05) S_c \quad (\text{cm}^2)$$

铁心净面积可乘以叠压系数  $0.9 \sim 0.93$  得到。

9. 一般采用矩形截面积 (如图6-12所示)

$$S_c = ab \quad (\text{cm}^2)$$

$$a = (1.2 \sim 1.4)b$$

式中  $a$ ——叠片厚度 (cm)；

$b$ ——叠片宽度 (cm)。

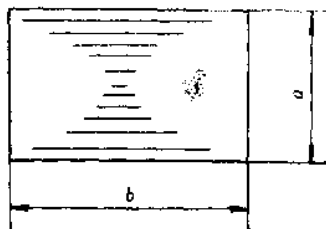


图6-12 矩形截面积

**例6-30** 试计算一台弧焊变压器，已知电源电压  $U_1 = 380\text{V}$ ，电弧电压  $U_{\text{弧}} = 30\text{V}$ ，电源频率  $f = 50\text{Hz}$ ，负载持续率为  $65\%$ ，焊条直径  $\phi 5\text{mm}$ ，试确定：

- (1) 额定电流  $I_{N2}$ 、 $I_{N1}$ ；
- (2) 导线截面积  $S_1$ 、 $S_2$ ；
- (3) 确定  $U_{20}$  和  $I_2$  的范围；
- (4) 一、二次绕组匝数  $N_1$ 、 $N_2$ ；
- (5) 额定功率  $P_{N1}$ 、 $P_{N2}$ ；
- (6) 铁心截面积  $S_c$  是多少。

(1) 查表6-23得到  $U_{20}$  为  $70 \sim 80\text{V}$  (漏磁式弧焊机，中等容量)， $I_2$  调节范围为

$$1.35I_{N2} \sim \frac{1.35I_{N2}}{3 \sim 4} = 1.35 \times 300 \sim \frac{1.35 \times 300}{3 \sim 4} = 405 \sim 101\text{A}$$

$I_{N2}$  的确定，即

$$I_2 = (20 + 6d)d = (20 + 6 \times 5) \times 5 = 250\text{A}$$

$$I_{N2} = 300\text{A} \quad (\text{加}50\text{A} \text{裕度})$$

(2) 一次额定电流  $I_{N1}$

$$I_{N1} = k \frac{U_{20}}{U_1} I_{N2} = 1.1 \times \frac{75}{380} \times 300 = 65\text{A}$$

$U_{20}$  取  $75\text{V}$ ，系数  $k$  取  $1.1$ 。

(3) 导线截面积  $S_1$ 、 $S_2$

一次侧导线截面积  $S_1$  为

$$S_1 = \frac{I_{N1}}{J_1} = \frac{65}{2} = 32.5\text{mm}^2$$

二次侧导线截面积  $S_2$  为

$$S_2 = \frac{I_{N2}}{J_2} = \frac{300}{25} = 120 \text{ mm}^2$$

(4) 额定功率计算

额定输出功率  $P_{N2}$  为

$$P_{N2} = U_{20} I_{N2} \times 10^{-3} = 75 \times 300 \times 10^{-3} = 22.5 \text{ kVA}$$

额定输入功率  $P_{N1}$  为

$$P_{N1} = (1.05 \sim 1.1) P_{N2} = 1.1 \times 22.5 = 25 \text{ kVA}$$

(5) 每匝电压  $e_t$

$$e_t = (0.5 \sim 0.6) \sqrt{P_{N1}} = 0.55 \times \sqrt{25} = 2.75 \text{ V/匝}$$

(6) 一、二次绕组匝数

一次绕组匝数  $N_1$  为

$$N_1 = \frac{U_{N1}}{e_t} = \frac{380}{2.75} = 138 \text{ 匝}$$

二次绕组匝数  $N_2$  为

$$N_2 = \frac{U_{20}}{e_t} = \frac{75}{2.75} = 27 \text{ 匝}$$

(7) 铁柱截面积  $S_c$

$$S_c = \frac{e_t \cdot 10^4}{4.44 f B} = \frac{2.75 \times 10^4}{4.44 \times 50 \times 1.2} = 103.2 \text{ cm}^2$$

$B$  取 1.2T, 因是热轧硅钢片, 则净面积为

$$103.2 \times 0.91 = 94 \text{ cm}^2$$

(8) 铁轭面积  $S_h$

$$S_h = (1.0 \sim 1.05) S_c = 1.05 \times 94 = 98.6 \text{ cm}^2$$

(9) 矩形截面积尺寸

$$a = (1.2 \sim 1.4) b = 1.28 \times 9 = 11.5 \text{ cm}$$

$$b = 9 \text{ cm}$$

## 第六节 起重电磁铁线圈导线代用计算

### 一、提高起重电磁铁起重量的代用计算

在生产实践中, 有时要求起重电磁铁增加起重能力, 通过重绕线圈, 以铜代铝可以达到目的。

1. 确定增加起重量

设代用前后电磁铁功率不变，线圈长度和电压不变，则有

$$P_{Cu} = P_{Al}$$

$$P_{Cu} = I_{Cu}^2 R_{Cu} = I_{Cu}^2 \rho_{Cu} \frac{N_{Cu} L}{S_{Cu}}$$

$$P_{Al} = I_{Al}^2 R_{Al} = I_{Al}^2 \rho_{Al} \frac{N_{Al} L}{S_{Al}}$$

另外，铁心窗口填充系数不变，所以有

$$N_{Cu} S_{Cu} = N_{Al} S_{Al} \quad (\text{填充系数不变})$$

$$\therefore \frac{P_{Cu}}{P_{Al}} = \frac{I_{Cu}^2 \rho_{Cu} \frac{N_{Cu} L}{S_{Cu}}}{I_{Al}^2 \rho_{Al} \frac{N_{Al} L}{S_{Al}}} = \frac{I_{Cu}^2 N_{Cu}^2}{I_{Al}^2 N_{Al}^2} \cdot \frac{\rho_{Cu}}{\rho_{Al}}$$

$$\therefore (I_{Cu} N_{Cu})^2 \rho_{Cu} = (I_{Al} N_{Al})^2 \rho_{Al}$$

$$I_{Cu} N_{Cu} = \sqrt{\frac{\rho_{Al}}{\rho_{Cu}}} (I_{Al} N_{Al}) = \sqrt{1.685} (I_{Al} N_{Al})$$

$$= 1.3 I_{Al} N_{Al}$$

由于电磁吸力与磁动势  $IN$  平方成正比，所以有

$$F_{Cu} = 170\% F_{Al}$$

说明起重量增加70%

2. 代用导线匝数确定

使电阻不变，则有

$$R_{Cu} = R_{Al} = \rho_{Cu} \frac{N_{Cu} L}{S_{Cu}} = \rho_{Al} \frac{N_{Al} L}{S_{Al}}$$

$$\therefore \frac{N_{Cu}}{N_{Al}} = \frac{\rho_{Al}}{\rho_{Cu}} \cdot \frac{S_{Cu} L}{S_{Al} L}$$

又因  $S_{Cu} N_{Cu} = S_{Al} N_{Al}$ ，所以有  $\frac{S_{Cu}}{S_{Al}} = \frac{N_{Al}}{N_{Cu}}$ ，代入上式

得：

$$\frac{N_{Cu}}{N_{Al}} = \frac{\rho_{Al}}{\rho_{Cu}} \left( \frac{N_{Al}}{N_{Cu}} \right)$$



$$N_{Cu} = N_{Al} \sqrt{\frac{\rho_{Al}}{\rho_{Cu}}} = \sqrt{1.685} N_{Al} = 1.3 N_{Al}$$

说明铜导线匝数要比铝导线时增加30%。

式中  $P_{Cu}$ 、 $P_{Al}$ ——铜导线和铝导线的电磁铁功率 (kW) ;  
 $I_{Cu}$ 、 $I_{Al}$ ——铜导线和铝导线的电流 (A) ;  
 $R_{Cu}$ 、 $R_{Al}$ ——铜导线线圈与铝导线线圈的电阻 ( $\Omega$ ) ;  
 $N_{Cu}$ 、 $N_{Al}$ ——铜线圈和铝线圈匝数;  
 $\rho_{Cu}$ 、 $\rho_{Al}$ ——铜导线和铝导线的电阻率,  $\rho_{Cu} = 0.0175$ ,  
 $\rho_{Al} = 0.0295$ ;  
 $L$ ——铜、铝线圈总长度;  
 $S_{Cu}$ 、 $S_{Al}$ ——铜、铝导线截面积 ( $\text{mm}^2$ ) 。

(3) 导线重量

$$\frac{G_{Cu}}{G_{Al}} = \frac{N_{Cu} L S_{Cu} \rho_{Cu}}{N_{Al} L S_{Al} \rho_{Al}} = 1.3 \times 1 \times 0.77 \times 3.3 = 3.3$$

式中  $G_{Cu}$ 、 $G_{Al}$ ——铜线圈和铝线圈的重量 (kg) ;  
 $\rho_{Cu}$ 、 $\rho_{Al}$ ——铜和铝导线的密度,  
 $\rho_{Cu} = 8.9$ ,  $\rho_{Al} = 2.7$ 。

可见铜重要增加3.3倍。

4. 导线截面积  $S$

$$S_{Cu} = S_{Al} \frac{N_{Al}}{N_{Cu}} = \frac{1}{1.3} S_{Al} = 0.77 S_{Al}$$

说明铜导线为铝导线截面积的77%。

式中  $S_{Cu}$ 、 $S_{Al}$ ——铜导线和铝导线的截面积 ( $\text{mm}^2$ ) 。

上面说明以铜代铝可以增加起重能力70%，但用铜量增加3.3倍。

二、保持电磁铁吸力不变功率可降低的计算

为了保持吸力不变，所以在计算时要保持电磁铁线圈的磁动势 (安匝) 不变。由于允许导线重量增加，节能降温，电磁铁功率约降为原有的60%左右，下面介绍计算公式。

1. 铜导线截面积  $S_{Cu}$  的确定

$$S_{Cu} = \frac{\rho_{Al}}{\rho_{Cu}} S_{Al} = \frac{0.0175}{0.0295} \times S_{Al} = 0.593 S_{Al}$$

式中  $\rho_{Al}$ 、 $\rho_{Cu}$ ——铝导线、铜导线的电阻率 ( $\Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$ )。

即以铜代铝时，铜截面积只用铝导线截面积的60%即可。

### 2. 改铜线圈匝数的确定

保持铁心窗口填充系数不变条件下，则有

$$N_{Cu} S_{Cu} = N_{Al} S_{Al}$$

$$\therefore N_{Cu} = N_{Al} \frac{S_{Cu}}{S_{Al}} = N_{Al} \frac{\rho_{Al}}{\rho_{Cu}} = 1.685 N_{Al}$$

即铜导线匝数为铝导线匝数的1.685倍。

### 3. 导线电阻计算

铝电阻为

$$R_{Al} = \rho_{Al} \frac{N_{Al} L_{Al}}{S_{Al}}$$

铜电阻为

$$R_{Cu} = \rho_{Cu} \frac{N_{Cu} L_{Cu}}{S_{Cu}}$$

取  $L_{Al} = L_{Cu}$ ，则有

$$\frac{R_{Cu}}{R_{Al}} = \frac{\rho_{Cu}}{\rho_{Al}}$$

$$R_{Cu} = 1.685 R_{Al}$$

### 4. 电流值

因电源电压  $U$  不变，所以有

$$I_{Cu} R_{Cu} = I_{Al} R_{Al} = U$$

于是有

$$I_{Cu} = \frac{R_{Al}}{R_{Cu}} I_{Al} = 0.593 I_{Al}$$

### 5. 功率 $P$

$$P_{Cu} = U I_{Cu}$$

$$P_{Al} = U I_{Al}$$

改铜线后的功率  $P_{Cu}$  为

$$P_{Cu} = \frac{I_{Cu}}{I_{Al}} P_{Al} = 0.593 P_{Al}$$

说明功率为原有的60%

6. 导线重量  $G$

$$\begin{aligned} \frac{G_{Cu}}{G_{Al}} &= \frac{N_{Cu} L S_{Cu} \rho_{Cu}}{N_{Al} L S_{Al} \rho_{Al}} = 1.685 \times 1 \times 0.593 \times \frac{8.9}{2.7} \\ &= 3.3 \end{aligned}$$

铜导线为原铝线重的3.3倍。

上述代用方法是增加匝数，减少电流而使  $IN$  不变，所以电磁铁吸力不变，但容量可降低40%，为原有的60%。

三、保持功率和安匝不变的代用计算

由于电源电压  $U$  不变，要求功率  $P$  不变，所以  $I_{Cu} = I_{Al}$  不变，又因  $IN$  不变，所以  $N_{Cu} = N_{Al}$  不变。

另外，再让电阻不变，导线长度  $L$  不变，则可确定出铜导线面积  $S_{Cu}$

$$\text{因 } R_{Cu} = \rho_{Cu} \frac{N_{Cu} L_{Cu}}{S_{Cu}}, \quad R_{Al} = \rho_{Al} \frac{N_{Al} L_{Al}}{S_{Al}}$$

使  $R_{Cu} = R_{Al}$ 、 $L_{Cu} = L_{Al}$ ，所以有

$$\begin{aligned} S_{Cu} &= \frac{\rho_{Cu} N_{Cu} L_{Cu}}{\rho_{Al} N_{Al} L_{Al}} S_{Al} = \frac{\rho_{Cu}}{\rho_{Al}} S_{Al} = \frac{0.0175}{0.0295} S_{Al} \\ &= 0.593 S_{Al} \end{aligned}$$

铜导线截面积  $S_{Cu}$  为铝导线的60%。

铜导线的重量为

$$\begin{aligned} G_{Cu} &= G_{Al} \frac{N_{Cu} L_{Cu} S_{Cu} \rho_{Cu}}{N_{Al} L_{Al} S_{Al} \rho_{Al}} \\ &= 1 \times 1 \times 0.593 \times 3.3 G_{Al} \\ &= 2 G_{Al} \end{aligned}$$

即铜重为铝重的2倍。

## 第七章 电工仪表及测量计算

### 第一节 电表量程的扩大

#### 一、分流器

用磁电系电流表测量电流时，只要被测电流不超过它所能容许的电流值，一般在几十 $\mu\text{A}$ 到几十 $\text{mA}$ 之间，都可以直接测量。如果要用它来测量较大的电流值，就必须扩大量程，一般采用分流的方法来扩大量程。

1.分流电阻 一般情况下，当被测电流在50A以下时，采用在电流表内部测量机构上并联一只分流电阻 $R_{jL}$ 的方法来实现分流，以达到扩大量程的目的，如图7-1所示，在测量机构内则有

$$I_c R_c = \frac{R_{jL} R_c}{R_{jL} + R_c} I$$

$$I_c = \frac{R_{jL}}{R_{jL} + R_c} I \quad (7-1)$$

由于 $R_{jL}$ 和 $R_c$ 为常数，所以 $I_c$ 和 $I$ 之间存在着一定的比例关系，如果在电流表刻度时，考虑到上述关系，便可直接读出被测电流 $I$ 。

设扩大量程的倍数为 $n$ ，决定电流表所需的分流电阻值为

$$I = n I_c$$

或 
$$\frac{I_c}{I} = \frac{1}{n}$$

将上式代入此式可得：

$$\frac{R_{jL}}{R_{jL} + R_c} = \frac{1}{n}$$

$$R_{jL} = \frac{R_c}{n - 1} \quad (7-2)$$

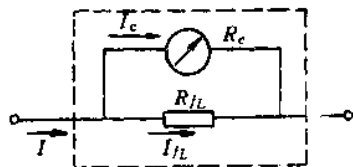


图7-1 分流电阻

这就是说，将磁电式测量机构的量限扩大  $n$  倍的电流表，分流电阻应为磁电系测量机构内阻  $R_c$  的  $(n-1)$  分之一。

**例7-1** 有一个磁电系测量机构，其满刻度偏转电流  $I_c = 500 \mu\text{A}$ ，内阻  $R_c = 400 \Omega$ ，要制成量限为  $2\text{A}$  的电流表，应并联一个多大的分流电阻。

首先确定扩大量限的倍数，即

$$1\text{A} = 10^6 \mu\text{A}$$

$$n = \frac{2}{500 \times 10^{-6}} = 4000$$

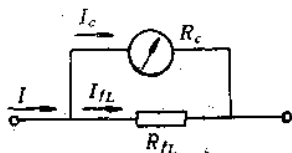


图7-2 分流电阻

将  $n$  值代入式 (7-2) 中得分流电阻值为

$$R_{FL} = \frac{400}{4000 - 1} \approx 0.1 \Omega$$

**例7-2** 一个磁电式电流表的内阻为  $500 \Omega$ ，扩大量限的倍数为  $1000$ ，额定电流为  $0.01\text{A}$ ，求分流器的电阻是多少，当通过电表的电流为  $0.01\text{A}$  时，分流器的电压降是多少，线路电流是多少。

分流电阻为

$$R_{FL} = \frac{R_c}{n - 1} = \frac{500}{1000 - 1} \approx 0.5 \Omega$$

分流器的电压降为

$$U_{FL} = I_c R_c = 0.01 \times 500 = 5\text{V}$$

线路电流为

$$I = n I_c = 1000 \times 0.01 = 10\text{A}$$

**例7-3** 磁电系电流表的内阻为  $50 \Omega$ ，在电表两端并联一个  $10 \Omega$  的电阻用来测量电流时，电表的读数为  $100\text{mA}$ ，问被测电流是多少。

扩大量限的倍数为

$$n = 1 + \frac{R_c}{R_{FL}} = 1 + \frac{50}{10} = 6$$

被测电流为

$$I = n I_c = 6 \times 100 \times 10^{-3} = 0.6\text{A}$$

例7-4 有一微安表头，它的最大量程  $I_c = 150\mu\text{A}$ ，其内阻  $R_c = 1.5\text{k}\Omega$ ，若要改装为最大量程  $I = 150\text{mA}$ ，问分流电阻  $R_{fL}$  应该是多少。

$$I_{fL} = I - I_c = I \frac{R_c}{R_{fL} + R_c}$$

$$R_{fL} = \frac{I_c R_c}{I - I_c}$$

$$= \frac{150 \times 10^{-6} \times 1.5 \times 10^3}{150 \times 10^{-3} - 150 \times 10^{-6}} \approx 1.5\Omega$$

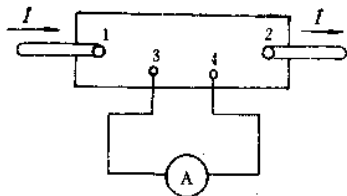


图7-3 附加电阻

2. 外附分流器 在实际工作中，当被测电流在50A以上时，由于分流电阻发热很严重，将影响测量机构的正常工作，而且体积也很大，一般将分流电阻做成单独的装置，称为“外附分流器”，如图7-3所示。

它有两对接线端钮，粗的1、2端钮叫“电流接头”，串接于被测大电流电路中，细的3、4端钮叫“电位接头”把它并联在磁电系测量机构上。

分流器上面一般不标明电阻数值，而是标明“额定电流”和“额定电压”值，额定电压一般都统一规定为75mV或45mV，当测量机构的电压量限（即电流量限与内阻的乘积）等于这一额定电压时，加上分流器后，它的电流量限就等于分流器的额定电流值。

例7-5 一只150A的直流电流表，注明需配用150A、75mV的分流器，如果在实际使用时，没有150A、75mV的分流器，只有450A、75mV的分流器，当电流表读数为30A时，问实际电流值是多少。

量程扩大倍数为

$$n = \frac{450}{150} = 3$$

实际电流值为

$$I = nI_s = 3 \times 30 = 90\text{A}$$

**例7-6** 一只100A的直流电流表，注明需配用100A、75mV的分流器，如果实际使用时，只有100A、45mV的分流器可用，当配上这只分流器，电表读数为50A时，问实际电流是多少。

当使用100A、45mV分流器时，在分流器满载100A的条件下，分流器压降为45mV，此时接到表头为75mV的毫伏计上去，指针应指在

$$\frac{45}{75} \times 100 = 60\text{A}$$

的刻度上，现已知电流表读数为50A，分流器压降应为

$$\frac{50}{100} \times 75 = 37.5\text{mV}$$

实际电流为

$$100:45 = I:37.5$$

$$I = \frac{100 \times 37.5}{45} = 83.3\text{A}$$

**例7-7** 一只100A的直流电流表，注明需配用100A、45mV的分流器，如果实际使用时，只有100A、75mV的分流器可用，当配上这只分流器，电流表读数为50A时，问实际电流是多少。

当使用100A、75mV分流器时，在分流器满载100A的条件下，分流器压降为75mV，此时接到表头为45mV的毫伏计上去，指针指在

$$\frac{75}{45} \times 100 = 167\text{A}$$

的刻度上，现已知电流表读数为50A，分流器压降应为

$$\frac{50}{100} \times 45 = 22.5\text{mV}$$

实际电流为

$$100:75 = I:22.5$$

$$I = \frac{100 \times 22.5}{75} = 30 \text{ A}$$

**例7-8** 某电流表的线圈电阻是 $1.5\Omega$ ，如果分流器的电阻是 $0.001\Omega$ ，表内的电流是 $0.03\text{A}$ ，问电路内的总电流是多少。

分流器的电流为

$$I_{IL} = \frac{I_c R_c}{R_{IL}} = \frac{0.03 \times 1.5}{0.001} = 45 \text{ A}$$

电路的总电流为

$$I = I_{IL} + I_c = 45 + 0.03 = 45.003 \text{ A}$$

## 二、附加电阻

用磁电系电流表测量很低的电压时，可以直接测量，而测量较高电压时，可在测量机构中串联一个电阻 $R_{II}$ 的办法来实现， $R_{II}$ 叫附加电阻，如图7-4所示。

通过测量机构的电流 $I_c$ 相应为

$$I_c = \frac{U}{R_{II} + R_c}$$

只要附加电阻 $R_{II}$ 不变， $I_c$ 与被测两点间的电压 $U$ 成正比。若

扩大量程的倍数为 $m$ ，附加电阻 $R_{II}$ 为

$$(R_{II} + R_c)I_c = U = mR_c I_c$$

$$R_{II} = (m - 1)R_c$$

这就是说，将磁电系测量机构的量程扩大成 $m$ 倍的电压表，需要串联的附加电阻应为磁电系测量机构内阻 $R_c$ 的 $(m-1)$ 倍。

**例7-9** 一个满刻度偏转电流 $I_c = 600\mu\text{A}$ ，内阻 $R_c = 250\Omega$ 的磁电系测量机构，要制成 $45\text{V}$ 量程的电压表，应串联多大的附加电阻。

测量机构满刻度偏转时的两端电压为

$$U_c = I_c R_c = 600 \times 10^{-6} \times 250 = 0.15 \text{ V}$$

扩大量程倍数为

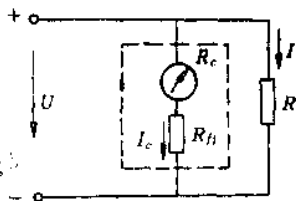


图7-4 附加电阻



$$m = \frac{45}{0.15} = 300$$

应串联的附加电阻为

$$R_{H1} = (m - 1)R_c = (300 - 1) \times 250 = 74800 \Omega = 74.8 \text{ k}\Omega$$

**例7-10** 有一表头，满偏电流为 $200 \mu\text{A}$ ，内阻 $R_c = 2 \text{ k}\Omega$ ，若要改装量程为 $10 \text{ V}$ 的直流电表，问应串联多大的电阻。

$$I_c = \frac{U}{R_c + R_{H1}}$$

$$R_{H1} = \frac{U}{I_c} - R_c = \frac{10}{200 \times 10^{-6}} - 2 \times 10^3$$

$$= 48000 \Omega = 48 \text{ k}\Omega$$

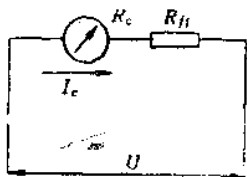


图7-5 串联附加电阻

**例7-11** 有一个直流电流表，它的内阻是 $0.05 \Omega$ ，最大能测量 $5 \text{ A}$ 的电流，如果把它的两端直接接在输出电压为 $5 \text{ V}$ 的电源上，将会产生什么后果。

$$I = \frac{U}{R} = \frac{5}{0.05} = 100 \text{ A}$$

可见通过的电流大大超过电流表所能测量的最大电流，结果会使电流表烧坏。

### 三、电压表盘上“每伏多少欧”表示的意义

它是电压表的一个重要参数，表示电压表中的测量机构在满量程时所允许通过的电流，并作为计算附加电阻的依据。

**例7-12** 有一个电压表的内阻 $R_c = 100 \Omega$ ，表盘上注明 $1 \text{ k}\Omega/\text{V}$ ，如果把它的量程扩大到 $50 \text{ V}$ ，问应串联多大的附加电阻。

测量机构中允许通过的最大电流为

$$I_c = \frac{1}{1000} = 0.001 \text{ A} = 1 \text{ mA}$$

如果把量程扩大到 $50 \text{ V}$ ，电压表的总内阻应该为

$$R_V = 50 \times 1000 = 50000 \Omega = 50 \text{ k}\Omega$$

应串联的附加电阻为

$$R_{H1} = R_V - R_c = 50000 - 100 = 49900 \Omega = 49.9 \text{ k}\Omega$$

例7-13 一个电压表的内阻为 $20\Omega$ ，每V有 $1000\Omega$ ，试求这电表测量 $10V$ 和 $200V$ 时所需的串联电阻。

量程扩大到 $10V$ 和 $200V$ ，电压表的总内阻分别为

$$10 \times 1000 = 10000\Omega = 10k\Omega$$

$$200 \times 1000 = 200000\Omega = 200k\Omega$$

应串联的附加电阻分别为

$$10000 - 20 = 9980\Omega = 9.98k\Omega$$

$$200000 - 20 = 199980\Omega = 199.98k\Omega$$

## 第二节 多种测量范围电表

### 一、多量限的直流电流表和分流电阻的计算

为了能够把同一只磁电系电表改成不同测量范围的电流表，可在电表的两端并联接上大小不同的分流电阻，如图7-6所示。

#### 1. 计算总电阻

按最小电流档的电流量限 $I_{m小}$ ，先计算出各分流器的总电阻 $R_{tL}$ 。

$$R_{tL}(I_{m小} - I_c) = I_c R_c$$

$$R_{tL} = \frac{I_c R_c}{I_{m小} - I_c}$$

#### 2. 计算各档分流器的电阻值

$$R_{fL1} = \frac{R_{tL} I_{m小}}{I_{m1}}$$

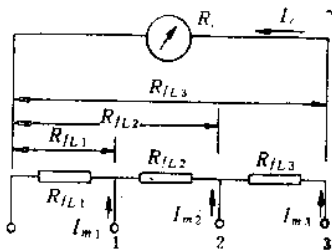


图7-6 分流电阻

$$R_{fL2} = \frac{R_{tL} I_{m小}}{I_{m2}}$$

$$R_{fL0} = \frac{R_{tL} I_{m小}}{I_{m0}}$$

#### 3. 计算各元件的数值

$$R_{f1} = R_{fL1}$$

$$R_{f2} = R_{fL2} - R_{f1}$$

$$R_{f3} = R_{fL3} - R_{fL2}$$

式中  $R_{fL}$ ——闭路式分流器的总电阻；

$I_c$ ——表头的灵敏表电流(mA)；

$R_c$ ——表头内阻；

$I_{m小}$ ——扩大量程中的最小电流档的额定电流(mA)；

$I_{m1}$ 、 $I_{m2}$ 、 $\dots$ 、 $I_{mn}$ ——各电流档所需扩大的量程(mA)；

$R_{f1}$ 、 $R_{f2}$ 、 $\dots$ 、 $R_{fn}$ ——各电流档的分流电阻。

例7-14 现有内阻为  $300\Omega$ 、量程为  $300\mu A$  的表头，用此表头改装成电流档量程为  $5mA$ 、 $50mA$ 、 $500mA$ ，试求各分流电阻。

采用图7-6的电路则有

$$R_c = 300\Omega$$

$$I_c = 300\mu A = 0.3mA$$

$$I_{小} = I_{m3} = 5mA$$

$$I_{m2} = 50mA$$

$$I_{m1} = 500mA$$

$$R_{fL} = \frac{I_c R_c}{I_{m小} - I_c} = \frac{300 \times 0.3}{5 - 0.3} = 19.1\Omega$$

$$R_{f1} = R_{fL1} \frac{R_{fL} I_{m小}}{I_{m小}} = \frac{19.1 \times 5}{500} = 0.191\Omega$$

$$\begin{aligned} R_{f2} &= R_{fL2} - R_{fL1} = \frac{R_{fL} I_{m小}}{I_{m2}} - R_{fL1} = \frac{19.1 \times 5}{50} - 0.191 \\ &= 1.72\Omega \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} R_{f3} &= R_{fL3} - R_{fL2} = \frac{R_{fL} I_{m小}}{I_{m1}} - (R_{f1} + R_{f2}) \\ &= \frac{19.1 \times 5}{5} - (0.191 + 1.72) = 17.2\Omega \end{aligned}$$

例7-15 磁电系电表的内阻为  $60\Omega$ ，现在要将它的电流测量范围扩大到20倍、8倍和4倍，试求分流电阻。

采用图7-6的电路图则有

$$R_c = 60\Omega$$

$$n_1 = \frac{I_{m1}}{I_c} = 20$$

$$n_2 = \frac{I_{m2}}{I_c} = 8$$

$$n_3 = \frac{I_{m3}}{I_c} = 4$$

$$R_{fL3} = \frac{R_c}{n_3 - 1} = \frac{60}{4 - 1} = 20\Omega$$

分流器的总电阻为

$$R_{fL} = R_{fL3} + R_c = 20 + 60 = 80\Omega$$

$$R_{fL1} = \frac{R_{fL}}{n_2} = \frac{80}{8} = 10\Omega$$

$$R_{fL1} = \frac{R_{fL}}{n_1} = \frac{80}{20} = 4\Omega$$

各分流电阻为

$$R_{f1} = R_{fL1} = 4\Omega$$

$$R_{f2} = R_{fL1} - R_{fL1} = 10 - 4 = 6\Omega$$

$$R_{f3} = R_{fL3} - R_{fL2} = 20 - 10 = 10\Omega$$

例7-16 在上题中如电表的读数是30mA，试问在0—1，0—2，0—3两端的电流测量范围各为多少。

0—1两点间的测量范围为

$$I_1 = n_1 \times 30 \times 10^{-3} = 20 \times 30 \times 10^{-3} = 600\text{mA}$$

0—2两点间的测量范围为

$$I_2 = n_2 \times 30 \times 10^{-3} = 8 \times 30 \times 10^{-3} = 240\text{mA}$$

0—3两点间的测量范围为

$$I_3 = n_3 \times 30 \times 10^{-3} = 4 \times 30 \times 10^{-3} = 120\text{mA}$$

## 二、多量程的直流电压表和附加电阻的计算

将一只磁电系电表与几个不同的附加电阻相串联后，就可测量多种范围的直流电压，如图7-7所示。

### 1. 计算表头内阻

根据表头电流  $I_c$  和满刻度表头电压降  $U_c$ ，算出表头内阻  $R_c$ 。

$$R_c = \frac{U_c}{I_c}$$

2. 依次计算各量限的附加电阻

$$R_{fj1} = \frac{U_1 - U_c}{I_c} = \frac{U_1}{I_c} - R_c$$

$$R_{fj2} = \frac{U_2 - U_1}{I_c}$$

$$R_{fjn} = \frac{U_n - U_{n-1}}{I_c}$$

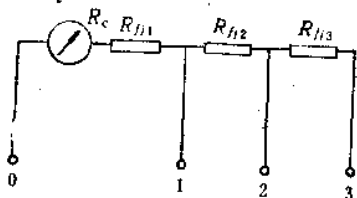


图7-7 多量限直流电压表及附加电阻

式中  $U_1$ ——最低量限的电压值；  
 $U_2$ ——第二量限的电压值；  
 $U_{n-1}$ ——第  $n-1$  量限的电压值；  
 $U_n$ ——第  $n$  量限的电压值；

$R_{fj1}$ 、 $R_{fj2}$ 、 $\dots$ 、 $R_{fjn}$ ——各电压档的附加电阻。

**例7-17** 现有一块  $100\mu\text{A}$  的电流表，表头内阻为  $1500\Omega$ ，将它改成具有  $1\text{V}$ 、 $5\text{V}$ 、 $10\text{V}$  三种测量范围的直流电压表，试求各附加电阻。

采用图7-7的电路则有

$$R_{fj1} = \frac{U_1 - U_c}{I_c} = \frac{U_1}{I_c} - R_c = \frac{1}{100 \times 10^{-6}} - 1500 = 8500\Omega$$

$$R_{fj2} = \frac{U_2 - U_1}{I_c} = \frac{5 - 1}{100 \times 10^{-6}} = 40000\Omega$$

$$R_{fj3} = \frac{U_3 - U_2}{I_c} = \frac{10 - 5}{100 \times 10^{-6}} = 50000\Omega$$

如果附加电阻的连接如图7-8所示，其电阻可按下列式计算：

$$R_{fj} = \frac{U_m}{I_c} - R_c$$

式中  $U_m$ ——测量电压量限值。

**例7-18** 现有内阻为  $200\Omega$  量限为  $100\mu\text{A}$  的表头，将它改成

量限为5V、50V、500V的直流电压表，试计算各附加电阻。

采用图7-8的电路则有

$$U_{m1} = 5V$$

$$U_{m2} = 50V$$

$$U_{m3} = 500V$$

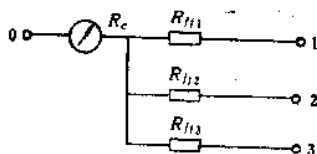


图7-8 另一种多量限电流表及附加电阻

$$R_{f11} = \frac{U_{m1}}{I_c} - R_c = \frac{5}{100 \times 10^{-6}} - 200 = 49890 \Omega = 49.8 k\Omega$$

$$R_{f12} = \frac{U_{m2}}{I_c} - R_c = \frac{50}{100 \times 10^{-6}} - 200 \approx 500 k\Omega$$

$$R_{f13} = \frac{U_{m3}}{I_c} - R_c = \frac{500}{100 \times 10^{-6}} - 200 \approx 5000 k\Omega$$

### 三、多量限的交流电压表和附加电阻的计算

磁电系仪表不能直接测量交流，若要用它来测量交流，必须先将交流变为直流，整流系仪表就是磁电系仪表与整流电路的组合，但对选择参数完全相同的表头，而采用不同的整流线路时，其附加电阻数值也就不同。

#### 1. 半波整流电路附加电阻的计算

如图7-9所示。

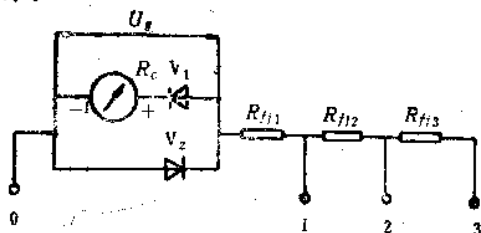


图7-9 半波整流电路及附加电阻

首先用直流毫伏、毫安表测得  $U_g$ 、 $I_g$ ，算出包括表头电阻在内的整流机构等效电阻，即

$$R_g = \frac{U_g}{I_g}$$

各量限附加电阻为

$$R_{f11} = 0.45 \frac{U_1}{I_c} - R_g$$

$$R_{f12} = 0.45 \frac{U_2 - U_1}{I_c}$$

$$R_{f1n} = 0.45 \frac{U_n - U_{n-1}}{I_c}$$

式中  $U_1, U_2, \dots, U_n$ ——分别为第 1、2、 $\dots$ 、 $n$  各量限电压值。

例7-19 有一块  $150\mu\text{A}$  的直流表头，须改装成  $5\text{V}$ 、 $50\text{V}$ 、 $500\text{V}$  的交流电压表，用半波整流电路，如图7-9所示，应如何配制附加电阻。

测得  $U_g = 450\text{mV}$ ， $I_g \approx 150\mu\text{A}$ （没有分流电阻近似等于表头电流）。

$$R_g = \frac{U_g}{I_g} = \frac{450 \times 10^{-3}}{150 \times 10^{-6}} = 3000\Omega = 3\text{k}\Omega$$

各量限附加电阻为

$$R_{f11} = 0.45 \frac{U_1}{I_c} - R_g = 0.45 \times \frac{5}{0.15 \times 10^{-3}} - 3000 = 12\text{k}\Omega$$

$$R_{f12} = 0.45 \frac{U_2 - U_1}{I_c} = 0.45 \times \frac{50 - 5}{0.15 \times 10^{-3}} = 135\text{k}\Omega$$

$$R_{f13} = 0.45 \frac{U_3 - U_2}{I_c} = 0.45 \times \frac{500 - 50}{0.15 \times 10^{-3}} = 1350\text{k}\Omega$$

如果附加电阻的连接如图7-10所示，且电阻可按式计算，

$$R_{f1j} = 0.45 \frac{U_m}{I_c} - R_c - R_s$$

式中  $R_s$ ——整流元件的正向电阻，

$U_m$ ——所需扩大的电压量限。

在计算测量高电压量限的附加电

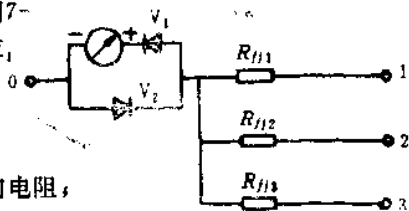


图7-10 另一种半波整流电路及附加电阻

阻时，公式中的后两项可以忽略。

**例7-20** 现有内阻为  $200\Omega$ 、量限为  $100\mu\text{A}$  的表头，用此表头装成量限为  $10\text{V}$ 、 $100\text{V}$ 、 $250\text{V}$ ，试计算各附加电阻。

采用图7-10的半波整流电路，设测得正向电阻为  $400\Omega$ ，则有

$$\begin{aligned} R_{f11} &= 0.45 \times \frac{U_m}{I_c} - R_c - R_s \\ &= 0.45 \times \frac{10}{100 \times 10^{-6}} - 200 - 400 = 45\text{k}\Omega \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} R_{f12} &= 0.45 \frac{U_m}{I_c} - R_c - R_s \\ &= 0.45 \times \frac{100}{100 \times 10^{-6}} - 200 - 400 = 449\text{k}\Omega \end{aligned}$$

$$R_{f13} \approx 0.45 \frac{U_m}{I_c} = 0.45 \times \frac{250}{100 \times 10^{-6}} = 1130\text{k}\Omega$$

## 2. 全波整流电路附加电阻的计算

如图7-11所示。

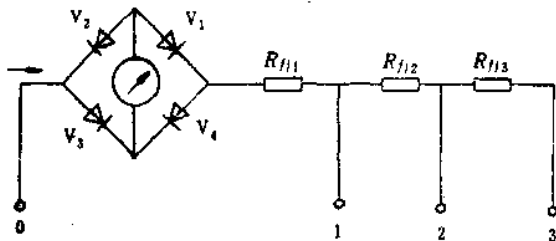


图7-11 全波整流电路及附加电阻

首先测得整流机构的压降  $U_x$ ，电流  $I_x$ （应等于表头电流  $I_c$ ），算出整流机构的等效电阻，即

$$R_x = \frac{U_x}{I_x}$$

各量限附加电阻为



$$R_{f11} = 0.9 \frac{U_1}{I_c} - R_g$$

$$R_{f12} = 0.9 \frac{U_2 - U_1}{I_c}$$

$$R_{f1n} = 0.9 \frac{U_n - U_{n-1}}{I_c}$$

式中  $U_1, U_2, \dots, U_n$  ——分别为第 1、2、 $\dots$ 、 $n$  各量限电压值。

例7-21 用电流为  $200\mu\text{A}$ 、内阻为  $2000\Omega$  的表头的全波桥式整流电路改装为  $10\text{V}$ 、 $100\text{V}$ 、 $250\text{V}$  的交流电压表，应如何配制附加电阻。

采用图7-11全波桥式整流电路，测得整流机构的压降  $U_g$  为  $400\text{mV}$ ，电流  $I_g$  为  $200\mu\text{A}$ ，则有

$$R_g = \frac{U_g}{I_g} = \frac{400 \times 10^{-3}}{0.2 \times 10^{-3}} = 2\text{k}\Omega$$

各量限附加电阻为

$$R_{f11} = 0.9 \times \frac{U_1}{I_c} - R_g = 0.9 \times \frac{10}{200 \times 10^{-6}} - 2000 = 43\text{k}\Omega$$

$$R_{f12} = 0.9 \frac{U_2 - U_1}{I_c} = 0.9 \times \frac{100 - 10}{200 \times 10^{-6}} = 405\text{k}\Omega$$

$$R_{f13} = 0.9 \frac{U_3 - U_2}{I_c} = 0.9 \times \frac{250 - 100}{200 \times 10^{-6}} = 675\text{k}\Omega$$

如果附加电阻采用图7-12的连接方式，电阻可按下列式计算：

$$R_{fj} = 0.9 \frac{U_m}{I_c} - R_c - 2R_s$$

式中  $U_m$  ——所需扩大的电压量限；

$R_s$  ——整流元件的正向电阻。

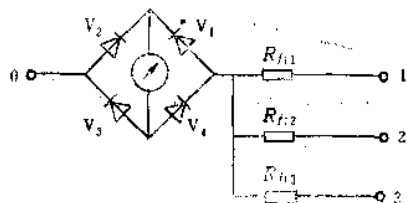


图7-12 另一种全波整流及附加电阻

**例7-22** 现有内阻为 $210\Omega$  量限为 $200\mu\text{A}$  的表头, 用此表头改制成量限为 $10\text{V}$ 、 $100\text{V}$ 、 $250\text{V}$  的交流电压表, 试计算各附加电阻。

采用图 7-12 的全波桥式整流电路, 设测得的正向电阻为 $400\Omega$ , 则有

$$R_{f11} = 0.9 \frac{U_{m1}}{I_c} - R_c - 2R_x = 0.9 \times \frac{10}{200 \times 10^{-6}} - 210 - 2 \times 400 = 44\text{k}\Omega$$

$$R_{f12} = 0.9 \frac{U_{m2}}{I_c} - R_c - 2R_x = 0.9 \times \frac{100}{200 \times 10^{-6}} - 210 - 2 \times 400 = 450\text{k}\Omega$$

$$R_{f13} = 0.9 \frac{U_{m3}}{I_c} - R_c - 2R_x = 0.9 \times \frac{250}{200 \times 10^{-6}} - 210 - 2 \times 400 = 1120\text{k}\Omega$$

### 第三节 功率测量的计算

功率表是测量电路某时刻的功率大小, 即反映电压和电流的乘积。不仅需要测量直流电的功率, 而且更多地需要测量交流电的功率。

交流电路又分为单相和三相的功率测量, 在三相系统里测量功率的方法主要有两种: 一是三功率表法, 适用于三相四线制; 二是二功率表法, 适用于三相三线制。

功率表的选择, 不仅要注意它的功率量程, 而且必须使它的电流量程能允许通过负载电流, 电压量程能承受负载电压。

#### 一、直流电功率的测量

一般测量直流电功率的方法有两种, 一是电压表和电流表, 二是功率表。

用电压表和电流表可以直接由电表读出通过电路的电流和跨接电路两端的电压, 它们两者的乘积即为电功率

$$P = UI$$

在实际测量功率时, 应注意接线, 如在图 7-13a、b 中, 实线的

接法是正确的，虚线的接法是错误的，接错将会引起很大的误差。

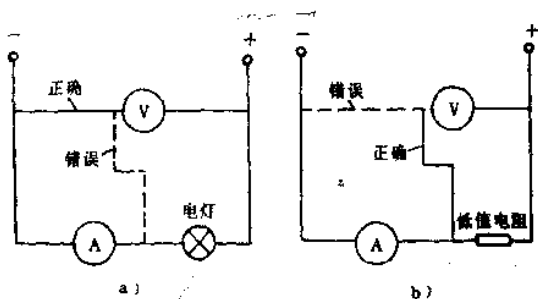


图7-13 直流电功率测量

**例7-23** 由图7-13计算50W灯泡实际消耗的功率和计算所得的功率。假设电压表的内阻为15000Ω，电流表的内阻为0.15Ω，试计算：虚线所示的接法的功率；实线所示的接法的功率。若电表为虚线接法时的读数是 $U = 110V$ ， $I = 0.48A$ 。

虚线所示接法的功率为

$$IU = 0.48 \times 110 = 52.8 \text{ W}$$

电压表消耗的功率为

$$\frac{U^2}{R_v} = \frac{110^2}{15000} = 0.807 \text{ W}$$

灯泡实际消耗功率为

$$52.8 - 0.807 = 51.993 \text{ W}$$

电压表所引起的误差为

$$\frac{52.8 - 51.993}{51.993} \times 100\% = 1.53\%$$

此误差较大，不可忽略。

实线所示接法电流表的读数为

$$0.48 - \frac{110}{15000} = 0.4727 \text{ A}$$

电压表的电压为

$$110 + 0.15 \times 0.4727 = 110.071 \text{ V}$$

计算所得的功率将为

$$110.071 \times 0.4727 = 52.03 \text{ W}$$

此时误差为

$$\frac{52.03 - 51.993}{51.993} \times 100\% = 0.07\%$$

此误差很小，可以忽略不计。

用功率表测量功率虽然可以直接读出功率的大小，但因为将电压表和电流表的读数相乘所得的功率，要比用单独一个功率表所得的读数准确得多，所以在直流电路上很少用功率表来测量电功率。

## 二、交流电功率的测量

### 1. 功率表量程的选择

选择功率表的量程，实际上就是正确选择功率表中的电流量限和电压量限，必须使电流量限能在负载电流允许范围内，电压量限能在负载电压允许范围内，不能只注意测量功率的量限，而忽视负载电压、电流相适应性。

**例7-24** 有一感性负载  $\cos\varphi = 0.85$ ，功率约为  $900 \text{ W}$ ，电压为  $220 \text{ V}$ ，测量负载消耗的功率时，应如何选择功率表的量程。

因负载电压为  $220 \text{ V}$ ，所以应选择额定电压为  $250 \text{ V}$  或  $300 \text{ V}$  的电压量程。

由于负载电流为

$$I = \frac{P}{U \cos\varphi} = \frac{900}{220 \times 0.85} = 4.81 \text{ A}$$

因此功率表的电流量程应选为  $5 \text{ A}$ ，功率表量程则为  $250 \times 5 = 1250 \text{ W}$  或  $300 \times 5 = 1500 \text{ W}$ ，这样才满足测量要求。如果额定电压选为  $150 \text{ V}$ ，额定电流为  $10 \text{ A}$ ，虽然功率量程同样为  $1500 \text{ W}$ ，但由于负载电压  $220 \text{ V}$  超过了电压线圈所能承受的电压，故不能使用。

### 2. 功率表的正确使用

功率表的标度尺只标有分格数，而不标明功率数，这是由于功率表一般是多量限的，在选择不同的电流量限和电压量限时，

每一分格都代表不同的功率数。在测量时读得了功率表的偏转格数后乘以功率表相应的分格常数，就等于被测功率的数值。

$$P = c\alpha$$

式中  $P$ ——被测功率 (W)；  
 $c$ ——功率表分格常数 (W/格)；  
 $\alpha$ ——指针偏转的格数。

如果功率表没有分格常数表格，可按下式计算功率表分格常数，即

$$c = \frac{U_m I_m}{\alpha_m}$$

式中  $U_m$ ——所使用功率表的电压额定值；  
 $I_m$ ——所使用功率表的电流额定值；  
 $\alpha_m$ ——功率表标度尺的满刻度的格数。

**例7-25** 如果选用额定电压为150V，额定电流为10A，具有300分格的功率表去测量功率，现读得功率表的偏转数是200格，问该负载所消耗的功率是多少。

功率表的分格常数为

$$\begin{aligned} c &= \frac{U_m I_m}{\alpha_m} \\ &= \frac{150 \times 10}{300} = 5 \text{ W/格} \end{aligned}$$

被测负载所消耗的功率为

$$P = c\alpha = 5 \times 200 = 1000 \text{ W}$$

### 3. 三功率表法

适用于三相四线制，三相总功率等于三个单相功率表读数之和，即

$$P = P_1 + P_2 + P_3$$

若负载平衡时，三相总功率为一功率表读数的3倍，即

$$P = 3P_1$$

也可用“三元三相功率表”测量，它是把三个单相功率表合

并而成，由一指针指示读数。

#### 4. 二功率表法

适用于三相三线制，三相总功率等于两个功率表读数的代数和，具体应用时，要特别注意每个功率表的读数相应的正负号。

在三相对称电路中，两个功率表的读数与负载的功率因数之间存在着一定的关系：

(1) 当  $\varphi < 60^\circ$  时，即功率因数大于 0.5，两功率表都有读数，总功率等于两个功率表读数之和

$$P = P_1 + P_2$$

(2) 当  $\varphi = 60^\circ$  时，即功率因数等于 0.5，这时将有一个功率表的读数等于零，总功率等于一个功率的读数

$$P = P_1$$

(3) 当  $\varphi > 60^\circ$  时，即功率因数小于 0.5，这时将有一个功率表的读数为负值，总功率等于两个功率的读数之差

$$P = P_1 - P_2$$

(4) 当  $\varphi = 0^\circ$  时，即负载为纯电阻性，这时两个功率表的读数相等。

功率因数角与两功率表读数之间的关系为

$$\operatorname{tg} \varphi = \sqrt{3} \frac{P_1 - P_2}{P_1 + P_2}$$

式中  $\varphi$ ——电流的滞后或超前角；

$P_1$ 、 $P_2$ ——功率表的读数。

例 7-26 由两个功率表测出三相异步电动机的功率读数各为 15kW 与 8kW，若线路电压为 380V，试求电动机的功率和线路电流。

电流的滞后角为

$$\operatorname{tg} \varphi = \sqrt{3} \frac{P_1 - P_2}{P_1 + P_2} = \sqrt{3} \frac{15 - 8}{15 + 8} = 0.527$$

$$\varphi = \arctg 0.527 = 27.8^\circ$$

$$\cos \varphi = \cos 27.8^\circ = 0.885$$

由于 $\varphi < 60^\circ$ ，功率因数大于0.5，故总功率为两个功率表读数之和，即

$$P = P_1 + P_2 = 15 + 8 = 23 \text{ kW}$$

线路电流为

$$I_{\text{线}} = \frac{P}{\sqrt{3} U_{\text{线}} \cos \varphi} = \frac{23 \times 10^3}{\sqrt{3} \times 380 \times 0.885} = 39.5 \text{ A}$$

**例7-27** 用两个功率表接在一平衡三相系统中测量功率，在下列三种情况下：（1）两表读数一样；（1）一表读数为零；（3）一表读数为另一表读数的两倍。问功率因数是多少。

（1）两表读数一样时

$$\operatorname{tg} \varphi = \sqrt{3} \frac{P_1 - P_2}{P_1 + P_2} = \sqrt{3} \frac{0}{2P_1} = 0$$

$$\varphi = \arctg 0 = 0^\circ$$

功率因数为

$$\cos \varphi = \cos 0^\circ = 1$$

（2）一表读数为零时

$$\operatorname{tg} \varphi = \sqrt{3} \frac{P_1}{P_1} = \sqrt{3}$$

$$\varphi = 60^\circ$$

功率因数为

$$\cos \varphi = \cos 60^\circ = 0.5$$

（3）一表读数为另一表读数的两倍时

$$\operatorname{tg} \varphi = \sqrt{3} \frac{2P_2 - P_2}{2P_2 + P_2} = \frac{\sqrt{3}}{3}$$

$$\varphi = 30^\circ$$

功率因数为

$$\cos \varphi = \cos 30^\circ = 0.866$$

**例7-28** 在线电压为380V的三相平衡系统中，线路电流为100A，现用两功率表测量功率，一表的读数是33kW，另一表的

读数是零，问负载的功率因数是多少。如果功率因数是1，线路电流不变，问两个功率表的读数各是多少。

因为一功率表的读数是零则有

$$\cos\varphi = \frac{P}{\sqrt{3}U_{\text{线}}I_{\text{线}}} = \frac{33 \times 10^3}{\sqrt{3} \times 380 \times 100} = 0.5$$

当功率因数是1，线路电流不变时则有

$$\begin{aligned} \operatorname{tg}\varphi &= \sqrt{3} \frac{P_1 - P_2}{P_1 + P_2} = 0 \\ P_1 &= P_2 \end{aligned}$$

$$P_1 + P_2 = \sqrt{3}U_{\text{线}}I_{\text{线}}\cos\varphi = \sqrt{3} \times 380 \times 100 \times 1 = 66\text{kW}$$

故每个功率表读数是 $66/2 = 33\text{kW}$ 。

**例7-29** 用两个功率表测量一平衡三相电路的功率，线路电压是 $380\text{V}$ ，线路电流是 $35\text{A}$ ，功率因数是 $0.75$ ，问两功率表的读数是多少。

因为功率因数是 $0.75$ ，则有

$$\varphi = \arccos 0.75 = 41.4^\circ$$

功率表 $P_1$ 的读数为

$$\begin{aligned} P_1 &= UI\cos(30^\circ - \varphi) \\ &= 380 \times 35 \times \cos(30^\circ + 41.4^\circ) = 13\text{kW} \end{aligned}$$

功率表 $P_2$ 的读数为

$$\begin{aligned} P_2 &= UI\cos(30^\circ + \varphi) \\ &= 380 \times 35 \times \cos(30^\circ - 41.4^\circ) = 4.24\text{kW} \end{aligned}$$

总功率为

$$P = P_1 + P_2 = 13 + 4.24 = 17.2\text{kW}$$

此总功率也可由公式直接求得，即

$$P = \sqrt{3}UI\cos\varphi = \sqrt{3} \times 380 \times 35 \times 0.75 = 17.2\text{kW}$$

**例7-30** 某三相三线电路中的线电压为 $380\text{V}$ ，三相负载平衡，其线电流为 $10\text{A}$ ，如果总功率是 $5500\text{W}$ ，求功率因数和用两功率表法测量功率时，每个功率表读数。

功率因数为



$$\cos\varphi = \frac{P}{\sqrt{3}UI} = \frac{5500}{\sqrt{3} \times 380 \times 10} = 0.836$$

$$\varphi = \arccos 0.836 = 33.3^\circ$$

两个功率表的读数分别为

$$\begin{aligned} P_1 &= UI \cos(30^\circ - \varphi) = 380 \times 10 \times \cos(30^\circ - 33.3^\circ) \\ &= 3790 \text{ W} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} P_2 &= UI \cos(30^\circ + \varphi) = 380 \times 10 \times \cos(30^\circ + 33.3^\circ) \\ &= 2070 \text{ W} \end{aligned}$$

**例7-31** 在测量三相有功功率时，若电流线圈串接于 $U_1$ 相的那只功率表的读数是200W，而串接于 $V_1$ 相的那只功率表的读数是600W，如果三相电路是对称的，求三相电路总功率和平均功率因数。

三相电路总功率为

$$P = P_1 + P_2 = 600 + 200 = 800 \text{ W}$$

平均功率因数为

$$\cos\varphi = \frac{1}{\sqrt{1 + 3 \left( \frac{P_2 - P_1}{P_1 + P_2} \right)^2}}$$

$$= \frac{P_1 + P_2}{2\sqrt{P_1^2 - P_1P_2 + P_2^2}}$$

$$\cos\varphi = \frac{600 + 200}{2\sqrt{600^2 - 600 \times 200 + 200^2}} = 0.756$$

因为三相电路是对称的，且读数 $P_2$ 小于 $P_1$ ，所以负载是容性的。

**例7-32** 利用量程为300V、5A，刻度分格为300的1.0级的有功功率表，接在三相对称电路中测量有功功率时，若 $U_1$ 相功率表读数是280分格， $V_1$ 相功率表读数是220分格，试求三相电路总功率和功率因数。

功率分格常数为

$$\alpha = \frac{U_m I_{m1}}{U_n} = \frac{300 \times 5}{300} = 5 \text{ W/格}$$

三相电路总功率为

$$P = c\alpha = 5 \times (280 + 220) = 2500 \text{ W}$$

功率因数为

$$\begin{aligned} \cos\varphi &= \frac{1}{\sqrt{1 + 3\left(\frac{P_2 - P_1}{P_1 + P_2}\right)^2}} \\ &= \frac{1}{\sqrt{1 + 3 \times \left(\frac{220 - 280}{280 + 220}\right)^2}} \\ &= 0.98 \end{aligned}$$

在测量结果中读数 $P_1$ 大于 $P_2$ ，所以负载是容性的。

**例7-53** 用两个功率表测量供给三相三角形联结的感应电动机的功率，线电压为380V，当电动机带负载运转时，功率表读数为 $P_1 = 400 \text{ W}$ ， $P_2 = 300 \text{ W}$ ，试计算电动机的输入功率和功率因数，并求出线电流。

在电动机空载试验中，功率表的读数为 $P_1 = 800 \text{ W}$ ， $P_2 = -300 \text{ W}$ ，再确定电动机的输入功率、功率因数和线电流。

(1) 当电动机带负载时

$$\begin{aligned} \text{tg}\varphi &= \sqrt{3} \frac{P_1 - P_2}{P_1 + P_2} \\ &= \sqrt{3} \frac{400 - 300}{400 + 300} = 0.247 \end{aligned}$$

$$\varphi = \arctg 0.247 = 13.9^\circ$$

功率因数为

$$\cos\varphi = \cos 13.9^\circ = 0.971$$

总功率为

$$P = P_1 + P_2 = 400 + 300 = 700 \text{ W}$$

线电流为

$$I = \frac{P}{\sqrt{3} U \cos\varphi} = \frac{700}{\sqrt{3} \times 380 \times 0.971} = 1.1 \text{ A}$$

(2) 当电动机空载时

$$\begin{aligned} \operatorname{tg}\varphi' &= \sqrt{3} \frac{P_1' - P_2'}{P_1' + P_2'} \\ &= \sqrt{3} \frac{-800 + 300}{800 - 300} = 3.81 \end{aligned}$$

$$\varphi' = \arctg 3.81 = 75.3^\circ$$

功率因数为

$$\cos\varphi' = \cos 75.3^\circ = 0.254$$

总功率为

$$P' = P_1' + P_2' = 800 - 300 = 500 \text{ W}$$

线电流为

$$\begin{aligned} I' &= \frac{P'}{\sqrt{3} U \cos\varphi'} = \frac{500}{\sqrt{3} \times 380 \times 0.254} \\ &= 2.99 \text{ A} \end{aligned}$$

### 5. 经互感器接入功率表的计算

在测量高电压和大电流电路的功率时，必须通过电压互感器和电流互感器。

(1) 用三表法测量三相四线制有功功率

$$P = K_U K_I (P_1 + P_2 + P_3)$$

式中  $K_U$ ——电压互感器变比；

$K_I$ ——电流互感器变比。

(2) 用二表法测量三相三线制有功功率

$$P = c K_U K_I (\alpha_1 + \alpha_2)$$

式中  $c$ ——功率分格常数 (W/格)；

$\alpha_1, \alpha_2$ ——分别为两只功率表所读分格数。

(3) 用三只单槽功率表测量三相三线制有功功率

$$P = c K_U K_I (\alpha_1 + \alpha_2 + \alpha_3)$$

(4) 互感器变更时有功功率计算

$$P_{x'} = K_U' K_I' P = \frac{K_U' K_I'}{K_U K_I} P_x$$

式中  $P_x$ ——原表满刻度功率值；  
 $P$ ——原表满刻度的二次功率值；  
 $P_{x'}$ ——改制后满刻度一次功率值；  
 $K_U'$ ——改制后电压互感器变比；  
 $K_I'$ ——改制后电流互感器变比。

(5) 空白刻度盘有功功率表改制计算

$$P = \frac{P_x'}{K_U K_I}$$

例7-34 现用三只功率表去测量三相四线制有功功率，其功率表读数分别为95、100、105W所配的电压互感器为1000V/100V，电流互感器为300A/5A，求三相有功功率。

$$\begin{aligned} P &= K_U K_I (P_1 + P_2 + P_3) \\ &= \frac{1000}{100} \times \frac{300}{5} \times (95 + 100 + 105) \\ &= 180000 \text{ W} = 180 \text{ kW} \end{aligned}$$

例7-35 用两只功率表测量三相三线制电路有功功率，其读数分别为30格和80格，已知功率表的电压量程是100V，电流量程是5A，满刻度是100分格，所配用的电压互感器为1000V/100V，电流互感器为300A/5A，问三相有功功率是多少。

功率分格常数为

$$c = \frac{U_m I_m}{\alpha_m} = \frac{100 \times 5}{100} = 5 \text{ W/格}$$

三相有功功率为

$$\begin{aligned} P &= c K_U K_I (\alpha_1 + \alpha_2) \\ &= 5 \times \frac{1000}{100} \times \frac{300}{5} \times (30 + 80) \end{aligned}$$

$$= 330000 \text{ W} = 330 \text{ kW}$$

**例7-36** 现有一只三相有功功率表，其满刻度为30M W，原表的电压互感器和电流互感器的变比分别为35000V/100V和25A/5A，今拟改成变比为1000V/100V和300A/5A的三相有功功率表，问应如何改法。

原表满刻度时二次功率值为

$$P = \frac{P_x}{K_U K_I} = \frac{30 \times 10^6}{\frac{35000}{100} \times \frac{25}{5}} = 22900 \text{ W}$$

改制后满刻度一次功率值为

$$P_{x'} = K_U K_I P = \frac{1000}{100} \times \frac{300}{5} \times 22900 = 10.3 \text{ MW}$$

所以新刻度可以定为10MW。

**例7-37** 现有有功功率表所配的电压互感器变比是3000V/100V，电流互感器变比300A/5A，满刻度拟定为5MW，问如何选用改制的有功功率表。

三相有功功率表的二次功率为

$$P = \frac{P_{x'}}{K_U K_I} = \frac{5 \times 10^6}{\frac{3000}{100} \times \frac{300}{5}} = 2780 \text{ W}$$

所以应该选用二次功率与2780W相近的功率表改制。

### 6. 低功率因数的功率计算

在功率因数很低的电路中测量功率时（如测量铁磁材料损耗、变压器空载损耗及介质损耗等），如果用普通功率表进行测量，其精确度很低，原因是：

(1) 普通功率表用在功率因数很低的电路中，其角误差可能很大。

(2) 当在功率因数很低的电路用普通功率表测量时，在电压和电流不超过仪表额定值的条件下，仪表指针的偏转角将很小，不便读数，引起误差很大。

(3) 由于功率因数低，测量的功率很小，而普通功率表本身

的功率损耗却较大，造成测量误差很大。

所以在测量低功率因数（一般 $\cos\varphi = 0.1$ 或 $\cos\varphi = 0.2$ ）时，必须采用低功率因数表，其低功率因数表的分格常数为

$$c = \frac{U_m I_m \cos\varphi_m}{\alpha_m}$$

式中  $U_m$ ——额定电压(V)；

$I_m$ ——额定电流(A)；

$\cos\varphi_m$ ——额定功率因数；

$\alpha_m$ ——满刻度的格数。

被测功率为

$$P = c\alpha$$

式中  $P$ ——被测功率(W)；

$c$ ——分格常数(W/格)；

$\alpha$ ——指针偏转格数。

应当指出：仪表上标明的额定功率因数 $\cos\varphi_m$ 并非测量时的负载功率因数，而是在额定电压、额定电流时能使指针作全偏转（满刻度）的额定功率因数。

**例7-38** 用 $\cos\varphi_m = 0.1$ ，电压量限为600V，电流量限为5A的具有100分格的低功率因数表，测量某一负载所消耗的功率，功率表读数为50分格，问该负载所消耗的功率为多少，若此时又测得负载的电压为500V，负载电流为4A，问该负载的实际功率因数是多少。

低功率因数表的分格常数为

$$c = \frac{U_m I_m \cos\varphi_m}{\alpha_m} = \frac{600 \times 5 \times 0.1}{100} = 3\text{W/格}$$

负载所消耗的功率为

$$P = c\alpha = 3 \times 50 = 150\text{W}$$

负载的实际功率因数为

$$\cos\varphi = \frac{P}{UI} = \frac{150}{500 \times 4} = 0.075$$

#### 第四节 功率因数校正的计算

在单相和三相对称电路中，电流和电压矢量间的相位差可用电流表、电压表和功率表间接测定。

##### 一、基本公式

若测得的电流为  $I$ ，电压为  $U$ ，有功功率为  $P$ ，可按下列公式计算出  $\cos\varphi$ 。

单相电路为

$$\cos\varphi = \frac{P}{UI}$$

三相电路为

$$\cos\varphi = \frac{P}{\sqrt{3} UI}$$

式中  $U$ ——线电压；

$I$ ——线电流。

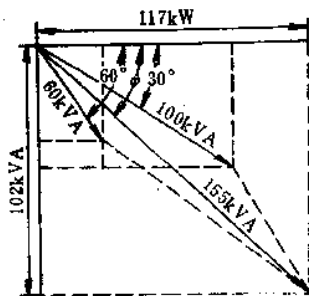


图7-14 交流电路功率相量图

在对称三相电路中，还广泛采用两功率表法测量功率因数，即

$$\cos\varphi = \frac{1}{\sqrt{1 + 3\left(\frac{P_2 - P_1}{P_2 + P_1}\right)^2}}$$

##### 二、计算实例

例7-39 某负载的视在功率  $S_1 = 60\text{kVA}$ ，功率因数  $\cos\varphi_1 = 0.5$ ，接在同一电源的另一负载的视在功率  $S_2 = 100\text{kVA}$ ，功率因数  $\cos\varphi_2 = 0.866$ ，求总有功功率、总无功功率、功率因数及视在功率。

图7-14表示以电压为参考轴时各负载的视在功率。

因  $\cos\varphi_1 = 0.5$   $\varphi_1 = 60^\circ$

$\cos\varphi_2 = 0.866$   $\varphi_2 = 30^\circ$

作平行四边形求出两负载的合成量。

总有功功率为

$$P = P_1 + P_2 = S_1 \cos \varphi_1 + S_2 \cos \varphi_2$$

$$= 60 \times 0.5 + 100 \times 0.866 = 117 \text{ kW}$$

总无功功率为

$$Q = Q_1 + Q_2 = S_1 \sin \varphi_1 + S_2 \sin \varphi_2$$

$$= 60 \times 0.866 + 100 \times 0.5 = 102 \text{ kvar}$$

功率因数为

$$\tan \varphi = \frac{Q}{P} = \frac{102}{117} = 0.872$$

$$\varphi = 41.1^\circ$$

$$\cos \varphi = \cos 41.1^\circ = 0.754$$

视在功率为

$$S = \frac{P}{\cos \varphi} = \frac{117}{0.754} = 88.2 \text{ kVA}$$

**例7-40** 两台并联运行的三相交流发电机，输出的线路电压为380V，现供应功率为60kW，功率因数为0.85的电感性负载，如果两台发电机的电流相等，一台发电机所运行的功率因数为1，问每台发电机供应到负载的功率各为多少。

图7-15为两台交流发电机供应的电流相量图。

两台发电机供应的总电流较电压滞后的角为

$$\varphi = \arccos 0.85 = 31.8^\circ$$

总电流为

$$I = \frac{P}{\sqrt{3} U \cos \varphi}$$

$$= \frac{60 \times 10^3}{\sqrt{3} \times 380 \times 0.85}$$

$$= 107 \text{ A}$$

每台发电机供应的电流为

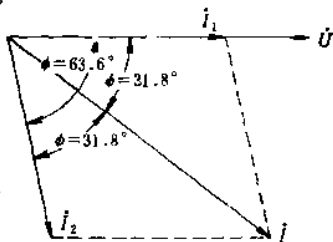


图7-15 由两台交流发电机供应的电流相量图

$$I_1 = I_2 = \frac{I}{2 \times \cos \varphi} = \frac{107}{2 \times 0.85} = 62.9 \text{ A}$$



运行功率因数为 1 的发电机所供应的功率为

$$P_1 = \sqrt{3} UI \cos \varphi_1 = \sqrt{3} \times 380 \times 62.9 \\ = 41.4 \text{ kW}$$

运行功率因数  $\cos \varphi = \cos 63.6 = 0.445$  的发电机所供应的功率为

$$P_2 = \sqrt{3} UI \cos \varphi_2 \\ = \sqrt{3} \times 380 \times 62.9 \times 0.445 = 18.4 \text{ kW}$$

验证

$$P_1 + P_2 = 41.4 + 18.4 = 59.8 \text{ kW}$$

例7-41 如图7-16所示的单相电动机接到 220V、50Hz 的电源上，线路电流为 10A，电动机的功率因数为 0.8，问若使功率因数为 1，并联在电路的电容器的电容量应为多少。

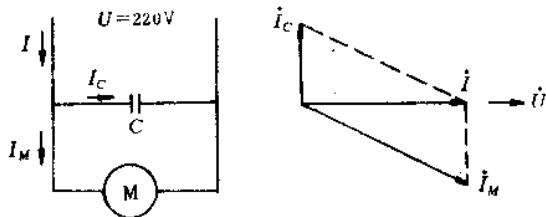


图7-16 校正单相电动机功率因数的电路及相量图  
 由相量得：

$$I_C = I_M \sin \varphi$$

$$\sin \varphi = \sqrt{1 - \cos^2 \varphi} = \sqrt{1 - 0.8^2} = 0.527$$

$$I_C = 10 \times 0.527 = 5.27 \text{ A}$$

$$X_C = \frac{U}{I_C} = \frac{220}{5.27} = 41.7 \Omega$$

电容器的电容量为

$$C = \frac{1}{2\pi f X_C} = \frac{1}{2 \times 3.14 \times 50 \times 41.7} = 76.4 \times 10^{-6} \text{ F} \\ = 76.4 \mu\text{F}$$

例7-42 多台电动机供给负载 120kW，其功率因数  $\cos \varphi_1 =$

0.8, 而功率因数角 $\varphi_1$ 滞后, 接在同一线路上的同步电动机供给负载70kW, 其功率因数 $\cos\varphi_2 = 0.707$ , 而功率因数角 $\varphi_2$ 超前, 求总有功功率、无功功率、功率因数和视在功率。

因为同步电动机有一超前的功率因数, 相量应绘在适当的方向, 即在参考轴或电压相量的上方 $45^\circ$  (因 $\cos\varphi = 0.707$ ), 由图7-17可得:

总有功功率为

$$P = 120 \times 0.8 + 70 \times 0.707 = 141 \text{ kW}$$

总无功功率为

$$Q = 120 \times 0.6 - 70 \times 0.707 = 22.5 \text{ kvar}$$

功率因数为

$$\operatorname{tg}\varphi = \frac{22.5}{145} = 0.155$$

$$\varphi = \arctg 0.155 = 8.81^\circ$$

$$\cos\varphi = \cos 8.81^\circ = 0.988$$

视在功率为

$$S = \frac{145}{\cos\varphi} = \frac{145}{0.988} = 147 \text{ kVA}$$

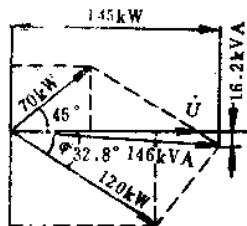


图7-17 求超前和滞后负荷的相量图

**例7-43** 有一生产车间, 单相220V、50Hz的交流电源供给并联的两条电路, 第一条支路消耗50kW, 功率因数为滞后的0.85; 第二条支路消耗25kW, 功率因数为超前的0.92, 求供给的总有功功率和视在功率、总负载的功率因数。

供给的总有功功率为

$$P = P_1 + P_2 = 50 + 25 = 75 \text{ kW}$$

供给第一条支路的无功功率为

$$Q_1 = P_1 \frac{\sin\varphi_1}{\cos\varphi_1} = P_1 \operatorname{tg}\varphi_1 = P_1 \operatorname{tg}31.8^\circ$$

$$= 50 \times 0.62 = 31 \text{ kvar}$$

供给第二条支路的无功功率为

$$Q_2 = P_2 \frac{\sin \varphi_2}{\cos \varphi_2} = P_2 \operatorname{tg} \varphi_2 = P_2 \operatorname{tg} 23.1^\circ$$

$$= 25 \times 0.426 = 10.6 \text{ kvar}$$

总无功功率为

$$Q = Q_1 - Q_2 = 31 - 10.6 = 20.4 \text{ kvar}$$

总视在功率为

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2} = \sqrt{75^2 + 20.4^2} = 77.7 \text{ kVA}$$

功率因数为

$$\cos \varphi = \frac{P}{S} = \frac{75}{77.7} = 0.965$$

**例7-44** 现有一负载为500kW，其功率因数为0.6，如用同步调相机来校正低功率因数，问它的定额是多少kvar才能使功率因数升高到0.9。

因为电压是常数，所以有功功率及无功功率分别与有功电流及无功电流成正比，这里，视在功率部分为

$$S = \frac{P}{\cos \varphi} = \frac{500}{0.6} = 833 \text{ kVA}$$

无功功率部分为

$$Q = \sqrt{S^2 - P^2} = \sqrt{833^2 - 500^2} = 666 \text{ kvar}$$

将功率因数升高到0.9，视在功率变为

$$S' = \frac{P}{\cos \varphi'} = \frac{500}{0.9} = 556 \text{ kVA}$$

无功功率变为

$$Q' = \sqrt{556^2 - 500^2} = 243 \text{ kvar}$$

显然，同步调相机应补给

$$Q - Q' = 666 - 243 = 423 \text{ kvar}$$

故定额为420kvar的同步调相机可满足要求。

### 第五节 有功电度数计算

电度表是用来测量某一段时间内发电机发出电能或负载消耗

电能的仪表，它不仅要反映出功率的大小，还要能反映出电能随时间增长积累的总和。

### 一、不经互感器的电度表

可以直接接入线路，从电度表直接读得实际电度数。

### 二、经互感器接入时电度数计算

(1) 电度表与电流互感器配合使用时，本月实际用电为

$$\text{kW}\cdot\text{h} = (\text{本月读数} - \text{上月读数}) \times \text{变流比}$$

(2) 电度表盘上注有倍率时，本月实际用电

$$\text{kW}\cdot\text{h} = (\text{本月读数} - \text{上月读数}) \times \text{倍率}$$

(3) 电度表与电压、电流互感器配合使用时，本月实际用电为

$$\text{kW}\cdot\text{h} = (\text{本月读数} - \text{上月读数}) \times \text{变压比} \times \text{变流比}$$

(4) 电度表盘上注有倍率与电压、电流互感器配合使用时，本月实际用电为

$$\text{kW}\cdot\text{h} = (\text{本月读数} - \text{上月读数}) \times \text{变压比} \\ \times \text{变流比} \times \text{倍率}$$

(5) 电度表上注明电流比值和电压比值，这是成套表计，如注明变流比为100A/5A，变压比为10000V/100V，是指电度表所配备的电流互感器应为100A/5A，电压互感器应为10000V/100V，所以成套配用的电度表的读数就是实际用电，不需再乘变流比、变压比。

(6) 如果电度表盘上标注的变比与电压、电流互感器的变比不符时，本月实际用电为

$$\text{kW}\cdot\text{h} = (\text{本月读数} - \text{上月读数})$$

$$\times \frac{\text{所配互感器变压比} \times \text{变流比} \times \text{倍率}}{\text{表盘上标注的变压比} \times \text{变流比}}$$

**例7-45** 某单位使用的电度表，表盘上注明5 A，380 V，接到变流比为200A/5A的电流互感器上使用，上月读数是2657.6，本月读数是3725.8，求本月实际用电数。

$$(3725.8 - 2657.6) \times \frac{200}{5} = 42728 \text{ kW}\cdot\text{h}$$

**例7-46** 某车间使用的电度表，表盘上注明 5 A，380 V，接到变流比为 300 A/5 A 的电流互感器和变压比为 10000 V/380 V 的电压互感器上使用，上月读数是 469.5，本月读数是 627.3，求本月实际用电数。

$$(627.3 - 469.5) \times \frac{300}{5} \times \frac{10000}{380} = 249158 \text{ kW}\cdot\text{h}$$

**例7-47** 某工厂使用的三相三线制电度表，表盘上注明电压为 380 V，电流为 5 A，乘倍率 20，实际接到变流比为 500 A/5 A 的电流互感器和变压比为 10000 V/380 V 的电压互感器上使用，上月读数是 576.5，本月读数是 602.9，求本月实际用电数。

$$(602.9 - 576.5) \times \frac{500}{5} \times \frac{10000}{380} \times 20 = 1389474 \text{ kW}\cdot\text{h}$$

**例7-48** 某车间使用的三相三线制电度表，表盘上注明配用电压互感器变压比为 10000 V/380 V，电流互感器变流比为 200 A/5 A，乘倍率 50，实际配用的电压互感器变压比为 6000 V/380 V，电流互感器变流比为 50 A/5 A，上月读数是 563.5，本月读数是 649.5，求本月实际用电数。

$$(649.5 - 563.5) \times \frac{6000}{380} \times \frac{50}{5} \times 50 = 645 \text{ kW}\cdot\text{h}$$

## 第六节 电阻的测量计算

被测量的电阻一般分为三大类：

(1) 低值电阻 (小于 5 Ω) 可用电流表和电压表或用比较法 (有时称为代替法) 来测量，也可用各种电桥来测量。

(2) 中值电阻 (5 Ω ~ 50 kΩ) 可用惠斯登电桥和欧姆表来测量。

(3) 高值电阻 (大于50kΩ), 如测量电机和绝缘材料的绝缘电阻, 可用高电阻电压表和兆欧表来测量。

### 一、用电压表和电流表测量电阻

如图7-18所示, 选择适当量程的电压表和电流表, 并记录两电表的读数, 根据欧姆定律计算出未知电阻 $R_x$ 的值, 即

$$R_x = \frac{U}{I}$$

式中  $U$ ——跨接未知电阻两端的电压;

$I$ ——通过未知电阻的电流。

**例7-49** 在图7-18中, 电源电压是220V, 电压表读数是70V, 电流表读数是15A, 问未知电阻 $R_x$ 为多少。

被测电阻为

$$R_x = \frac{U}{I} = \frac{70}{15} = 4.67\Omega$$

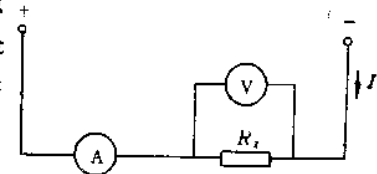


图7-18 用电压表和电流表测量电阻

电压表的电阻与被测量的电阻的比值 $R_V/R_x$ 的大小, 可以影响到测量结果的准确度, 若比值很大 (在2000以上), 可用V-A法测量, 由欧姆定律算出; 若比值很小, 必须进行修正, 因为电流表读出的电流数值也包括流经电压表的一部分电流 $I_V$

在内。

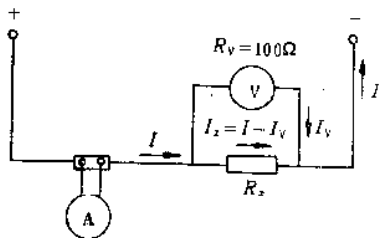


图7-19 电阻的测量

**例7-50** 用图7-19的方法来测量未知电阻 $R_x$ 的大小, 两电表的同时读数分别是50A和0.3V, 已知电压表的电阻是 $R_V = 100\Omega$ , 问未知电阻 $R_x$ 为多少。

由欧姆定律可知:

$$R_x = \frac{U}{I} = \frac{0.3}{50} = 0.006\Omega$$

若是考虑到流过电压表的分路电流的影响,而得到的  $R_x$  是 0.00500036, 误差只有 0.006%, 可以忽略不计。

流过电压表的电流为

$$I_V = \frac{U}{R_V} = \frac{0.3}{100} = 0.003 \text{ A}$$

流过未知电阻  $R_x$  的电流为

$$I_x = I - I_V = 50 - 0.003 = 49.997 \text{ A}$$

$$R_x = \frac{U}{I_x} = \frac{0.3}{49.997} = 0.00600036 \Omega$$

计算结果同上。

若是电压表的电阻只有  $2 \Omega$ , 则用同样的方法可算得:

$$I_V = \frac{0.3}{2} = 0.15 \text{ A}$$

$$I_x = 50 - 0.15 = 49.85 \text{ A}$$

$$R_x = \frac{0.3}{49.85} = 0.006018 \Omega$$

误差为 0.3%, 这样大的误差就不能再忽视了。

## 二、用比较法测量电阻

### 1. 用可变电阻测量电阻

如图 7-20 所示,  $R$  是可变电阻箱, 其全部电阻值应大于  $R_x$ , 首先调节  $R$ , 使电流表的指针偏转到某一适当位置, 此时记录电流表的读数, 然后将  $R_x$  短路重新调节  $R$ , 使电流表的读数恢复到原来的大小, 这时  $R$  所增加的电阻值即是  $R_x$  的电阻值。

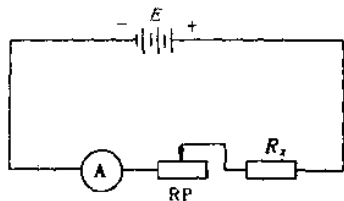


图 7-20 用可变电阻测量电阻

例 7-51 在图 7-20 中, 电源电压为 24V, 当可变电阻箱  $R = 100 \Omega$  时, 电流表读数为 0.1A。若将被测电阻  $R_x$  短路时, 调节电阻  $R = 240 \Omega$ , 电流表读数仍为 0.1A, 问  $R_x$  为多大。

被测电阻为

$$R_x = 240 - 100 = 140\Omega$$

### 2. 用已知固定电阻测量电阻

若已知电阻  $R$  是不能调节的, 如图7-21a所示, 应先记录  $R_x$  与  $R$  串联时的电流  $I_1$ , 再记录仅有  $R$  时的电流  $I_2$ , 如图7-21 b所示。

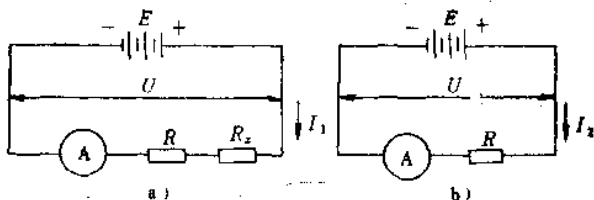


图7-21 用已知固定电阻测量电阻

若  $I_1$  和  $I_2$  比电池组的额定电流小得多, 而电池组的内阻很小, 对  $R$  的影响可忽略不计, 则有

$$I_1 = \frac{U}{R + R_x}$$

$$I_2 = \frac{U}{R}$$

$$R_x = R \left( \frac{I_2 - I_1}{I_1} \right)$$

当电流表的内阻很大时, 计算时应将电流表的内阻包括在  $R$  内。

**例7-52** 在图7-21中, 已知电源电压为24V, 固定电阻  $R$  为  $100\Omega$ , 当  $R_x$  与  $R$  串联时电流表读数  $I_1 = 0.3\text{A}$ , 仅有  $R$  时电流表读数  $I_2 = 0.5\text{A}$ , 求被测电阻  $R_x$  为多少。

被测电阻为

$$R_x = R \left( \frac{I_2 - I_1}{I_1} \right) = 100 \times \frac{0.5 - 0.3}{0.3} = 66.7\Omega$$

### 3. 用已知内电阻的电压表测量电阻

把电压表 (内电阻为  $R_V$ ) 与未知电阻  $R_x$  串联后接到电源电压  $U_1$  上, 如图7-22所示。



设串联电压表的读数为 $U_2$ ，流经电压表的电流为

$$I = \frac{U_2}{R_V}$$

$$I = \frac{U_1}{R_V + R_x}$$

$$\frac{U_2}{R_V} = \frac{U_1}{R_V + R_x}$$

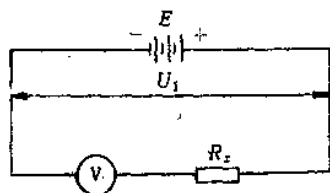


图7-22 用已知内电阻的电压表测量电阻

未知电阻为

$$R_x = R_V \left( \frac{U_1 - U_2}{U_2} \right)$$

**例7-53** 在图7-22中，已知电源电压为24V，电压表内电阻 $R_V = 1000\Omega$ ，测得电压表 $U_2$ 读数为10V，问未知电阻 $R_x$ 是多少。

未知电阻为

$$R_x = R_V \left( \frac{U_1 - U_2}{U_2} \right) = 1000 \times \frac{24 - 10}{10} = 1400 \Omega$$

#### 4. 用已知电阻比较法测量电阻

将已知电阻与未知电阻串联接在电源上，然后比较这两个电阻上的电压降，如图7-23所示， $R_x$ 是未知电阻， $R$ 是标准电阻， $R$ 的大小最好约等于 $R_x$ ，当适当大小的不变电流通过电路时，迅速读出跨接在 $R$ 和 $R_x$ 上的两电压，若电流保持不变则有

$$U_1 = IR$$

$$U_2 = IR_x$$

$$R_x = R \frac{U_2}{U_1}$$

式中  $U_1$ —— $R$  两端的电压，

$U_2$ —— $R_x$ 两端的电压。

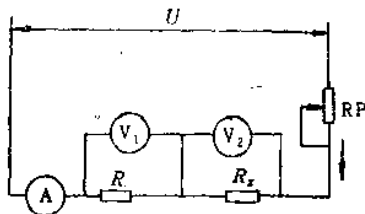


图7-23 用已知电阻比较法测量电阻

**例7-54** 在图7-23中，已知电源电压是24V，电阻 $R = 50\Omega$ ，测得 $R$ 两端的电压 $U_1$ 为5V， $R_x$ 两端的电压 $U_2$ 为10V，求被测电阻

$R_x$ 为多少。

被测电阻为

$$R_x = R \frac{U_2}{U_1} = 50 \times \frac{10}{5} = 100\Omega$$

### 三、用欧姆表测量电阻

在测量准确性要求不十分高的情况下，可用欧姆表来测量未知电阻，从欧姆表的指针可直接读出所测电阻，使用十分方便。

串联式欧姆表，如图7-24所示。

图中  $E$ ——欧姆表的电源电动势，电源常用于干电池；

$R_x$ ——被测电阻；

$R$ ——限流电阻；

$RP_0$ ——零欧姆调整电阻；

$R_c$ ——电表内电阻。

当被测电阻 $R_x$ 接入 $a$ 、 $b$ 两端时，忽略电源的微小内电阻，电路内的电流为

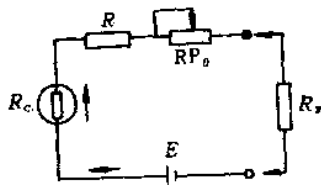


图7-24 串联式欧姆表

$$I = \frac{E}{(R_c + R + RP_0) + R_x}$$

当 $R_x = 0$ ，电路电流 $I$ 等于电表满偏电流 $I_{m\text{满}}$ 为

$$I_{m\text{满}} = \frac{E}{R_c + R + RP_0}$$

欧姆表常用一节或数节1.5V的干电池作电源，一般干电池的端电压降到 $E$ 的90%~85%后就不能再用了，所以 $s$ 值可取0.9~0.85之间，则有

$$R = \frac{sE}{I_{m\text{满}}} - R_c$$

$$RP_0 = \frac{E}{I_{m\text{满}}} (1-s)$$

在实际使用时，首先将 $a$ 、 $b$ 两端短路，调节 $RP_0$ ，使电表指针

指到满偏电流，即  $R_x = 0$  的刻度上，然后使  $a$ 、 $b$  两端开路，将被测电阻  $R_x$  接入  $a$ 、 $b$  两端，在表上读出  $R_x$  值。

例7-55 某动圈式电表的内电阻是  $800\Omega$ ，满偏电流是  $200\mu\text{A}$ ，现用这只电表改制成一只串联式欧姆表，设电源是一节  $1.5\text{V}$  干电池，问这只欧姆表应如何改装。

电路图如图7-24所示，则有

$$E = 1.5\text{V}$$

$$I_{m\text{满}} = 200 \times 10^{-6}\text{A}$$

$$R_c = 800\Omega$$

$$s \text{ 取 } 0.875$$

限流电阻为

$$R = \frac{SE}{I_{m\text{满}}} - R_c = \frac{0.875 \times 1.5}{200 \times 10^{-6}} - 800$$

$$= 5760\Omega$$

零欧姆调整电阻为

$$R_0 = \frac{E}{I_{m\text{满}}} (1 - s) = \frac{1.5}{200 \times 10^{-6}} \times (1 - 0.875)$$

$$= 938\Omega$$

验算：用  $R_x = 0$ ， $E = 1.5\text{V}$  求得满偏电流为

$$I = \frac{E}{R_c + R + R_0} = \frac{1.5}{800 + 5760 + 938}$$

$$= 200\mu\text{A}$$

用  $R_x = 0$ ， $R_0 = 0$ ，并用  $sE$  代替  $E$ ，求得满偏电流为

$$I = \frac{sE}{R_c + R} = \frac{0.875 \times 1.5}{800 + 5760} = 200\mu\text{A}$$

由两次计算所得结果均与  $I_{m\text{满}} = 200\mu\text{A}$  一样，符合要求。

#### 四、用电压表测量绝缘电阻

测量高值电阻，如电机和电缆的绝缘等，常用电压表来测量，如图7-25所示，将电压表直接跨接在电源两端，其电压表读

数为  $U_1$ ，再将另一只电压表与被测的绝缘电阻串联后接到电源上，其电压表读数为  $U_2$ ，绝缘电阻为

$$R_x = R_V \left( \frac{U_1 - U_2}{U_2} \right)$$

式中  $R_x$ ——被测的绝缘电阻；

$R_V$ ——电压表的内电阻；

$U_1$ ——当电压表直接接到电源上的读数；

$U_2$ ——当电压表与绝缘电阻串联后接到电源上的读数。

使用中选择电压表的测量范围应大于电源电压，以防止绝缘电阻未串联接入时，电表被烧坏。若电源电压不稳定，可取 2 ~ 3 次的平均值。

另外还可用兆欧表（摇表）直接测量。

**例7-56** 用一只  $100000\Omega$  的电压表测量电动机的绝缘电阻，若电压表与绝缘电阻串联后接到  $220V$  的电源上时，电压表的读数是  $1.5V$ ，试计算电动机的绝缘电阻是多少。

电动机的绝缘电阻为

$$\begin{aligned} R_x &= R_V \left( \frac{U_1 - U_2}{U_2} \right) \\ &= 100000 \times \frac{220 - 1.5}{1.5} \\ &= 14.6M\Omega \end{aligned}$$

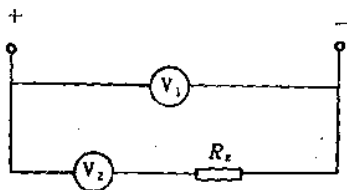


图7-25 用电压表测量绝缘电阻

**例7-57** 用一只内电阻为  $100000\Omega$  的电压表来测量 电缆的绝缘电阻，若电压表与绝缘电阻串联后接到  $380V$  的电源上时，电压表的读数是  $2V$ ，问电缆的绝缘电阻是多少。

电缆的绝缘电阻为

$$\begin{aligned} R_x &= R_V \left( \frac{U_1 - U_2}{U_2} \right) = 100000 \times \frac{380 - 2}{2} \\ &= 18.9M\Omega \end{aligned}$$

**例7-58** 图7-26是带电测量绝缘电阻的电路，如果电压表内电阻 $R_V = 5000\Omega$ ，电源电压 $U = 220V$ ，测得 $R_1$ 和 $R_2$ 两端的电压分别为 $6V$ 和 $4V$ ，试求电阻 $R_1$ 和 $R_2$ 。

电阻 $R_1$ 为

$$R_1 = R_V \frac{U - U_1 - U_2}{U_2}$$

$$= 5000 \times \frac{220 - 6 - 4}{4}$$

$$= 263 \text{ k}\Omega$$

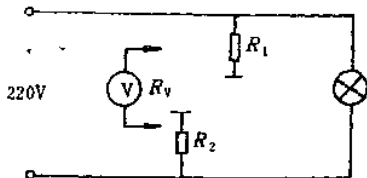


图7-26 带电测量绝缘电阻

电阻 $R_2$ 为

$$R_2 = R_V \frac{U - U_1 - U_2}{U_1} = 500 \times \frac{220 - 6 - 4}{6}$$

$$\approx 175 \text{ k}\Omega$$

**例7-59** 在图7-27中， $R_1$ 和 $R_2$ 表示输电线对地绝缘电阻，电源电压 $U = 400V$ ，当开关 $S$ 接至1时，电压表读数为 $200V$ ，而当开关 $S$ 接至2时，电压表读数为 $80V$ ，若电压表的内电阻为 $100\text{k}\Omega$ ，求输电线对地绝缘电阻 $R_1$ 和 $R_2$ 各为多少。

当开关 $S$ 接至1时，电压表内电阻 $R_V$ 与 $R_1$ 并联后再与 $R_2$ 串联，然后接至电源，根据分压公式，求出电压表所测量的电压 $U_1$ 为

$$U_1 = U \frac{\frac{R_V R_1}{R_V + R_1}}{\frac{R_V R_1}{R_V + R_1} + R_2}$$

$$= 200V$$

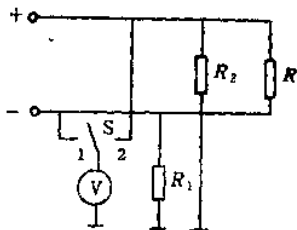


图7-27 对地绝缘电阻

当开关 $S$ 接至2时，电压表内电阻 $R_V$ 与 $R_2$ 并联后再与 $R_1$ 串联，然后接至电源，根据分压公式，求出电压表所测量的电压 $U_2$ 为

$$U_2 = U \frac{\frac{R_V R_2}{R_V + R_2}}{\frac{R_V R_2}{R_V + R_2} + R_1} = 80V$$

整理上面方程式得：

$$R_1 = \frac{400R_2}{100 + R_2}$$

$$R_2 = \frac{100R_1}{100 + R_1}$$

解出 $R_1$ 和 $R_2$ 方程式得：

$$R_1 = 150k\Omega$$

$$R_2 = 60k\Omega$$

### 五、用电桥测量电阻

直流电桥主要是用来测量电阻，最常用的是惠斯登电桥，其测量范围一般为 $1 \sim 10^6\Omega$ ，原理电路如图7-28所示。

四条支路称为电桥的四个臂，其中 $R_1$ 、 $R_3$ 称为比例臂， $R_4$ 是可变电阻， $R_x$ 是被测电阻，P是检流计。

当电桥平衡时，P内的电流是零，则有

$$I_1 = I_3$$

$$I_2 = I_4$$

$$I_1 R_1 = I_2 R_x$$

$$I_3 R_3 = I_4 R_4$$

将两式相除得

$$\frac{I_1 R_1}{I_3 R_3} = \frac{I_2 R_x}{I_4 R_4}$$

电桥的平衡条件为

$$R_1 R_4 = R_x R_3$$

在电桥平衡时，两相对桥臂上的电阻的乘积等于另外两相对桥臂上电阻的乘积，在已知三个臂电阻的情况，可求出被测电阻，即

$$R_x = R_4 \frac{R_1}{R_3}$$

例7-60 在图7-28所示的电桥处于平衡时, 其中  $R_1 = 100\Omega$ ,  $R_3 = 150\Omega$ ,  $R_4 = 75\Omega$ , 求被测电阻  $R_x$ 。

根据电桥平衡条件, 被测电阻为

$$R_x = R_4 \frac{R_1}{R_3} = 75 \times \frac{100}{150} = 50\Omega$$

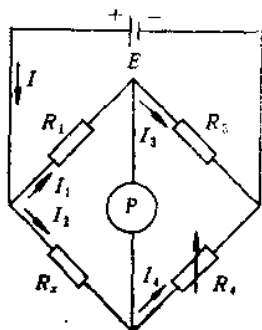


图7-28 用电桥测量电阻

例7-61 若图7-28中的可变电阻  $R_4$  可从1变到1000 $\Omega$ , 要使得测得的未知电阻为87500 $\Omega$ 时, 问其他两个电阻应为多少。

由电桥平衡条件可知:

$$R_x = R_4 \frac{R_1}{R_3}$$

或

$$\frac{R_x}{R_4} = \frac{R_1}{R_3}$$

若选定  $R_4 = 875\Omega$ , 得:

$$\frac{R_x}{R_4} = \frac{87500}{875} = \frac{100}{1}$$

由电桥平衡条件可知电阻  $R_1 = 100\Omega$ ,  $R_3 = 1\Omega$ 。

例7-62 若选用比例臂的比率为0.01, 当电桥平衡时, 可变电阻箱的读数为2439, 问未知电阻是多少。

未知电阻为

$$R_x = R_4 \frac{R_1}{R_3} = 2439 \times 0.01 = 24.39\Omega$$

例7-63 图7-29所示是用来测定电缆的接地故障发生地点的电路, 调节电阻  $R_M$  与  $R_N$ , 当阻值  $R_M/R_N = 3$  时电桥平衡, 如果A处与B处之间的距离为  $l = 10$

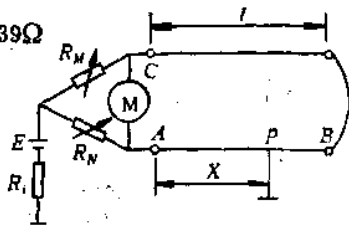


图7-29 电缆接地故障发生点测量

km, 求故障地点  $P$  距  $A$  处多远。(测试时,  $B$  处将两根电缆芯线人为短路, 短路线的电阻忽略不计)

由于电缆芯线的材料和截面积都一样, 所以一根芯线的电阻与长度成正比,  $R_L = KL$ , 其中  $L$  是芯线的长度,  $K$  是比例常数。设  $P$  点距  $A$  处的距离为  $X$ ,  $AP$  段的电阻为  $R_x$ , 显然,  $P$  点距  $C$  点的距离为  $2l - X$ ,  $PC$  段的电阻为  $R_{(2l-X)} = R_L + R_L - R_x$ 。图中四个臂的电阻分别为  $R_M$ 、 $R_N$ 、 $R_x$ 、 $R_{(2l-X)}$ 。

电桥的平衡条件为

$$R_M R_N = R_x (R_L + R_L - R_x)$$

将  $R_x = KX$ ,  $R_L = KL$  代入上式得,

$$R_M X = R_N (2l - X)$$

$$X = \frac{R_N}{R_M} (2l - X) = \frac{1}{3} (2 \times 10 - X)$$

$$X = 5 \text{ km}$$

所以接地故障地点距  $A$  处  $5 \text{ km}$ 。

### 第七节 交流电参数的测量

#### 一、用三表法测量交流阻抗

此法可在被测参数的工作状态下进行测量, 多用来测量非线性元件的参数, 如测量铁心线圈的参数, 但准确度不高, 原理电路如图7-30所示。如果忽略仪表本身损耗, 被测电阻  $r_z$  和电抗  $X_z$  为

$$r_z' = \frac{P}{I^2}$$

$$X_z' = \sqrt{\left(\frac{U}{I}\right)^2 - \left(\frac{P}{I^2}\right)^2}$$

式中  $U$  —— 电压表读数;

$I$  —— 电流表读数;

$P$  —— 功率表读数。

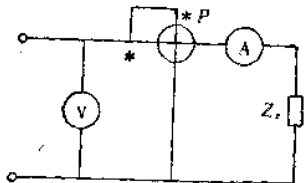


图7-30 用三表法测量交流阻抗

由此得出的测量结果显然存在有方法误差。如果要得出可靠



结果，必须将测量结果加以校正。

$$r_x = r_x' - r_c = \frac{P}{I^2} - r_c$$

$$X_x = X_x' - X_c = \sqrt{\left(\frac{U}{I}\right)^2 - \left(\frac{P}{I^2}\right)^2} - X_c$$

式中  $r_c$ ——电流表和功率表的电流线圈的电阻之和；

$X_c$ ——电流表和功率表的电流线圈的电抗之和。

用三表法测量阻抗时，对于  $Z$  和  $r$  数值相差不大时将会造成很大的测量误差，因此不太适用，但对非线性阻抗元件的测量是一种非常重要的方法。

**例7-64** 用电压表、电流表和功率表测量铁心线圈的阻抗，如图7-30所示，三表的读数分别为  $U = 380\text{V}$ ， $I = 0.035\text{A}$ ， $P = 10\text{W}$ ，已知电流表和功率表电流线圈的电阻各为  $500\Omega$ ，电抗各为  $300\Omega$ ，求铁心线圈的交流电阻和电抗。

若忽略仪表本身损耗，则铁心线圈的电阻为

$$r_x' = \frac{P}{I^2} = \frac{10}{0.035^2} = 8.16\text{k}\Omega$$

铁心线圈的电抗为

$$\begin{aligned} X_x' &= \sqrt{\left(\frac{U}{I}\right)^2 - \left(\frac{P}{I^2}\right)^2} = \sqrt{\left(\frac{380}{0.035}\right)^2 - \left(\frac{10}{0.035}\right)^2} \\ &= 7.16\text{k}\Omega \end{aligned}$$

若考虑仪表本身损耗则为

$$r_x = r_x' - r_c = 8160 - (500 + 500) = 7.16\text{k}\Omega$$

$$X_x = X_x' - X_c = 7160 - (300 + 300) = 6.56\text{k}\Omega$$

## 二、用电流表和电压表测量电感

### 1. 电流表和电压表法

接线如图7-31所示，当被测电感线圈中通过适当的电流，用高内阻的电压表测量线圈两端的电压降  $U$ ，线圈阻抗为

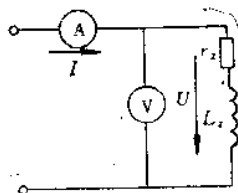


图7-31 用电流表、电压表测量电感

$$Z_x = \frac{U}{I}$$

在频率较低的情况下，线圈的交流等效电阻与直流电阻基本相同，因此再在直流下测量被测电感线圈的电阻 $r_x$ ，可求得电感为

$$L_x = \frac{\sqrt{Z_x^2 - r_x^2}}{2\pi f}$$

**例7-65** 用电流表和电压表测量线圈电感，如图7-31所示，电流表和电压表的读数分别为 $I = 2\text{A}$ ， $U = 50\text{V}$ ，当频率 $f = 50\text{Hz}$ 时，求线圈的电感，设线圈的直流电阻 $r_x = 20\Omega$ 。

线圈的阻抗为

$$Z_x = \frac{U}{I} = \frac{50}{2} = 25\Omega$$

线圈的电感为

$$\begin{aligned} L_x &= \frac{\sqrt{Z_x^2 - r_x^2}}{2\pi f} = \frac{\sqrt{25^2 - 20^2}}{2 \times 3.14 \times 50} = 0.0477\text{H} \\ &= 47.7\text{mH} \end{aligned}$$

## 2. 三个电压表法

在图7-32中， $r_x$ 、 $L_x$ 为被测线圈等效串联电路的参数， $R$ 为无感电阻，当接通电源，通过适当电流时，用电压表分别测量被测线圈和无感电阻的电压，可求得电感为

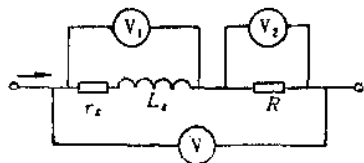


图7-32 三个电压表法

$$L_x = \frac{1}{2\pi f} \sqrt{\frac{4r_x^2 U^2 U_2^4}{(U^2 - U_1^2 - U_2^2)^2} - r_x^2}$$

式中  $U$ ——电源电压；

$U_1$ ——被测线圈等效串联电路的电压；

$U_2$ ——无感电阻的电压；

$r_x$ ——线圈的直流电阻。

**例7-66** 将线圈接到频率为50Hz, 电压为17V的电源上, 如图7-32所示, 用电压表量得线圈和无感电阻两端的电压分别为10V和8V, 当直流电阻 $r_x$ 为5Ω时, 求线圈的电感。

线圈的电感为

$$L_x = \frac{1}{2\pi f} \sqrt{\frac{4r_x^2 U^2 U_1^2}{(U^2 - U_1^2 - U_2^2)^2} - r_x^2}$$

$$= \frac{1}{2 \times 3.14 \times 50} \sqrt{\frac{4 \times 5^2 \times 10^2 \times 8^2}{(17^2 - 10^2 - 8^2)^2} - 5^2}$$

$$= 0.0127\text{H} = 12.7\text{mH}$$

**3. 用三电流表法** 在图7-33中,  $R$ 为无感电阻, 当接通电源时用电流表分别测量各支路电流, 求得电感为

$$L_x = \frac{1}{2\pi f} \sqrt{\frac{4r_x^2 I^2 I_1^2}{(I^2 - I_1^2 - I_2^2)^2} - r_x^2}$$

三个电压表法和三个电流表法, 测量误差较大, 只有在不得已情况下才选用这一方法。

**例7-67** 将线圈接到频率为50Hz的电源上, 如图7-33所示, 用电流表测得各支路的电流分别为 $I = 12\text{A}$ ,  $I_1 = 8\text{A}$ ,  $I_2 = 5\text{A}$ , 当线圈的直流电阻为5Ω时, 问线圈的电感为多少。

线圈的电感为

$$L_x = \frac{1}{2\pi f} \sqrt{\frac{4r_x^2 I^2 I_1^2}{(I^2 - I_1^2 - I_2^2)^2} - r_x^2}$$

$$= \frac{1}{2 \times 3.14 \times 50} \sqrt{\frac{4 \times 5^2 \times 12^2 \times 8^2}{(12^2 - 8^2 - 5^2)^2} - 5^2}$$

$$= 0.0168\text{H} = 16.8\text{mH}$$

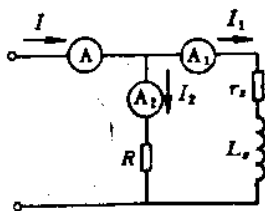


图7-33 三个电流表法

### 三、电感电桥法

#### 1. 高品质因数Q值电感的测量

测量高 $Q$ 值电感电桥的原理电路如图7-34所示。

图中  $L_x$ ——被测电感线圈的电感；  
 $R_x$ ——被测电感线圈的电阻；  
 $C_n$ ——标准电容；  
 $R_n, R_2, R_4$ ——可调电阻。

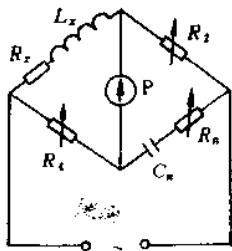


图7-34 电感电桥法

根据电桥平衡条件，测得结果为

$$L_x = \frac{R_2 R_4 C_n}{1 + (\omega C_n R_n)^2}$$

$$R_x = \frac{R_2 R_4 R_n (\omega C_n)^2}{1 + (\omega C_n R_n)^2}$$

$$Q = \frac{\omega L_x}{R_x} = \frac{1}{\omega C_n R_n}$$

品质因数 $Q$ 值高与低的分界，一般是10为界，即 $Q > 10$ 为高 $Q$ 值， $Q < 10$ 为低 $Q$ 值。

**例7-68** 用电感电桥来测量线圈的电感，如图7-34所示，当电桥达到平衡时，可调电阻 $R_2 = 2\Omega$ ， $R_4 = 4\Omega$ ， $R_n = 20\Omega$ ，已知标准电容 $C_n = 10\mu\text{F}$ ，试计算电感线圈的电感、电阻和品质因数，设频率 $f = 50\text{Hz}$ 。

线圈的电感为

$$L_x = \frac{R_2 R_4 C_n}{1 + (\omega C_n R_n)^2} = \frac{2 \times 4 \times 10 \times 10^{-6}}{1 + (2 \times 3.14 \times 50 \times 10 \times 10^{-6} \times 20)^2} = 0.075\text{mH}$$

线圈的电阻为

$$R_x = \frac{R_2 R_4 R_n (\omega C_n)^2}{1 + (\omega C_n R_n)^2} = \frac{2 \times 4 \times 20 (2 \times 3.14 \times 50 \times 10 \times 10^{-6})^2}{1 + (2 \times 3.14 \times 50 \times 10 \times 10^{-6} \times 20)^2} = 0.00148\Omega$$

品质因数为

$$Q = \frac{1}{\omega C_n R_n} = \frac{1}{2 \times 3.14 \times 50 \times 10 \times 10^{-6} \times 20} = 10$$

$$= 15.9$$

2. 低品质因数  $Q$  值电感的测量  
测量低  $Q$  值的电桥原理电路如

图7-35所示。

根据电桥平衡条件，得测结果为

$$L_x = R_2 R_1 C_n$$

$$R_x = \frac{R_2}{R_n} R_4$$

$$Q = \frac{\omega L_x}{R_x} = \omega C_n R_n$$

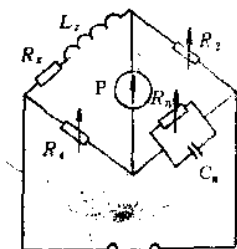


图7-35 低  $Q$  值电感测量

**例7-69** 用电感电桥来测量线圈的电感，如图7-35所示，当电桥平衡时，可调电阻  $R_2 = 1\Omega$ ， $R_4 = 100\Omega$ ， $R_n = 100\Omega$ ，已知标准电容  $C_n = 50\mu\text{F}$ ，频率  $f = 50\text{Hz}$ ，试计算电感线圈的电感、电阻和品质因数。

线圈的电感为

$$L_x = R_2 R_4 C_n = 1 \times 100 \times 50 \times 10^{-6} = 0.5\text{mH}$$

线圈的电阻为

$$R_x = \frac{R_2}{R_n} R_4 = \frac{1}{100} \times 100 = 1\Omega$$

品质因数为

$$Q = \omega C_n R_n = 2 \times 3.14 \times 50 \times 50 \times 10^{-6} \times 100 = 1.57$$

四、用电流表和电压表测量电容

在图7-36中， $L$ 为可变电感， $C_x$ 为待测电容，为了获得足够大的读数，可适当串联一个可变电感，在电路接近谐振时，用内阻比较大的电压表进行测量，被测电容  $C_x$ 可近似用下式计算：

$$C_x = \frac{I}{U\omega}$$

式中  $I$ ——电流表的读数；

$U$ ——电压表的读数。

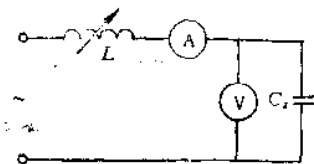


图7-36 电流表和电压表测量电容

实际中可用自耦变压器副边作为可变电感，这一方法可在工频下进行测量。

**例7-70** 电容与可变电感串联后接到频率为50Hz的电源上，如图7-36所示，当电流表的读数为5A，电压表的读数为20V，问被测电容为多少。

被测电容为

$$C_x = \frac{I}{U\omega} = \frac{5}{20 \times 2 \times 3.14 \times 50} = 7.96 \mu\text{F}$$

### 五、用电容电桥法测量电解电容

对于容量不大的电解电容，可以用电容电桥来测量，其方法是在电源支路串联一个直流电源，以供给直流偏压，如图7-37所示。

图中  $C_n$ ——标准电容；

$R_n, R_1, R_2$ ——可调电阻；

$C_x, R_x$ ——被测参数；

$R$ ——保护电阻；

$E$ ——直流偏压电源；

$C$ ——旁路电容。

当电桥达到平衡时，则有

$$C_x = \frac{R_2}{R_1} C_n$$

$$R_x = \frac{R_1}{R_2} R_n$$

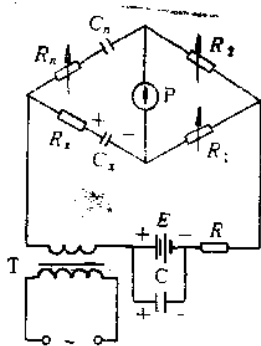


图7-37 用电容电桥测量电解电容

**例7-71** 用电容电桥来测量电解电容，电桥原理线路如图7-37所示，当电桥平衡时，标准电容  $C_n = 30 \mu\text{F}$ ，可调电阻  $R_n = 625 \Omega$ ， $R_1 = 1 \Omega$ ， $R_2 = 10 \Omega$ ，试计算电解电容的参数。

电容的参数为

$$C_x = \frac{R_2}{R_1} C_n = \frac{10}{1} \times 30 \times 10^{-6} = 300 \mu\text{F}$$

$$R_x = \frac{R_1}{R_2} R_n = \frac{1}{10} \times 625 = 62.5 \Omega$$

### 第八节 温度补偿的计算

当电气测量仪表的使用温度偏离其刻度时的温度时，由于其组成元件特性的变化，使仪表产生附加误差。为了使温度的变化所引起的温度附加误差在国家标准规定的允许范围内，必须加温度补偿，而在仪表修理与改装中，常采用的是线路补偿方法。

#### 一、串联温度补偿线路

串联温度补偿线路就是用温度系数很小的锰铜电阻  $r_t$  和动圈电阻（铜线或铝线绕制）相串联，如图7-38所示。

图中  $r_t$ ——锰铜电阻；

$r_c$ ——表头铜电阻部分（动圈电阻  $r_g$ 、游丝电阻  $r_w$ ）。

能满足串联温度补偿条件的附加电阻由下式来决定，即

$$r_t \geq \frac{4 - K_r}{K_r} r_c$$

式中  $r_t$ ——保证不超过允许温度附加误差时的补偿电阻；

$r_c$ ——表头的铜电阻部分（ $r_g + 2r_w$ ）；

$K_r$ ——温度每变化  $10^\circ\text{C}$  时允许的温度附加误差值。对 A 类仪表，相当于仪表精度级别所对应的数字，如 1.5 级， $K_r = 1.5$ ；而对 B 类仪表， $K_r$  约为精度等级的  $4/5$ ，如 1.0 级， $K_r = 0.8$ 。

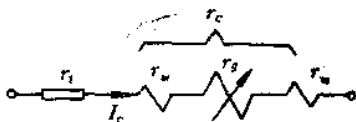


图7-38 串联温度补偿线路

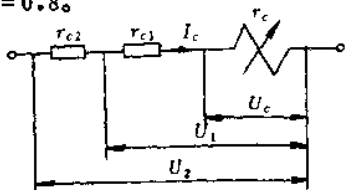


图7-39 电压表的串联温度补偿线路

#### 1. 电压表的串联温度补偿线路的计算步骤

(1) 测量表头内阻  $r_c$ ；

(2) 求出温度补偿电阻  $r_t$ ；

(3) 根据所需要的电压量限值，分别求出附加电阻值，如图

7-39所示。

$$r_{c1} = \frac{U_1 - U_e}{I_e} = \frac{U_1}{I_e} - r_e$$

$$r_{c2} = \frac{U_2 - U_1}{I_e}$$

式中  $r_{c1}$ ——最低量限的附加电阻( $\Omega$ );  
 $r_{c2}$ ——第二个量限的附加电阻( $\Omega$ );  
 $U_e$ ——表头内阻上的电压降(V);  
 $U_1$ ——最低量限的电压(V);  
 $U_2$ ——第二个量限的电压(V);  
 $I_e$ ——表头电流(A)。

(4)用计算求得  $r_c$  值与前面求得的  $r_e$  相比,若  $r_c \geq r_e$ , 则认为已满足补偿条件;反之,此量限不能改装。

例7-72 有一只1.0级1mA的电流表,若采用串联的温度补偿,能否改成250mV、750mV的双量限毫伏表,而附加电阻为多少。

(1)测出内阻 设测得内阻  $r_e = 100\Omega$ 。

(2)计算补偿电阻 其补偿电阻为

$$r_c = \frac{4 - K_r}{K_r} r_e = \frac{4 - 1.0}{1.0} \times 100 = 300\Omega$$

(3)求附加电阻 求250mV量程的附加电阻为

$$r_{c1} = \frac{U_1}{I_e} - r_e = \frac{0.25}{0.001} - 100 = 150\Omega$$

750mV量程的附加电阻为

$$r_{c2} = \frac{U_2 - U_1}{I_e} = \frac{0.75 - 0.25}{0.001} = 500\Omega$$

(4)由求得的  $r_{c1}$  与  $r_e$  比较可知,250mV不能满足温度补偿条件,而750mV量程可以满足温度补偿条件,所以只能改成750mV的毫伏表。



附加电阻（见图7-40）为

$$r_{e1} = \frac{U - U_c}{I_c} = \frac{(750 - 100) \times 10^{-3}}{1 \times 10^{-3}} = 650 \Omega$$

只有把最低量程增大或采用其他的温度补偿方法，才能改成双量程的毫伏表。

2. 电流表的串联温度补偿线路及其补偿电阻、分流电阻的计算方法

- (1) 测出表头内阻  $r_c$ ;
- (2) 计算温度补偿电阻  $r_t$ ;
- (3) 计算分流电阻  $r_s$ 。

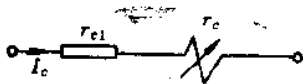


图7-40 温度补偿方法

单量程分流电阻的计算（如图7-41所示）如下：

$$r_s = \frac{(r_c - r_t) I_c}{I - I_c}$$

式中  $I_c$ ——通过动圈的电流；

$I$ ——扩大后的电流。

例7-73 有一只1.0级1mA内阻为50Ω的电流表，要改成10A的电流表，如何改法。

改装的线圈如图7-41所示，温度补偿电阻为

$$r_t \geq \frac{4 - K_r}{K_r} r_c = \frac{4 - 1.0}{1.0} \times 50 = 150 \Omega$$

分流电阻为

$$r_s = \frac{I_c (r_c + r_t)}{I - I_c} = \frac{0.001 (50 + 150)}{10 - 0.001} = 0.02 \Omega$$

例7-74 需要一只1.0级250V的电压表，现在有一只1.0级100μA的微安表，问应如何改装。

改装的线路如图7-41所示。

- (1) 测得表头内阻  $r_c = 700 \Omega$
- (2) 温度补偿电阻为

$$r_t \geq \frac{4 - K_r}{K_r} r_c = \frac{4 - 1.0}{1.0}$$

$$\times 700 = 2100 \Omega$$

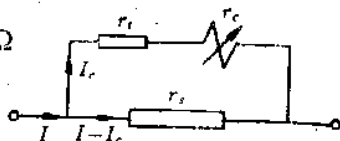


图7-41 电流表的串联温度补偿线路

(3) 把微安表改成  $1\text{mA}$  的毫安表, 求其分流电阻为

$$r_s = \frac{I_c(r_c + r_t)}{I - I_c} = \frac{0.1(700 + 2100)}{1 - 0.1} = 311\Omega$$

(4) 附加电阻为

$$r_{c1} = \frac{U - I_c(r_c + r_t)}{I} = \frac{250 - 0.0001(700 + 2100)}{0.001} = 250\text{k}\Omega$$

最后改成的线路如图7-42所示。

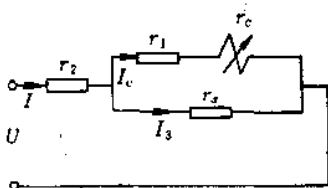


图7-42 改成的线路

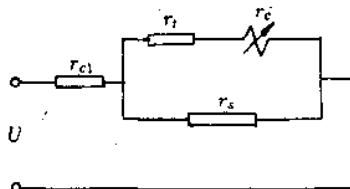


图7-43 串并联温度补偿

## 二、串并联温度补偿

串联温度补偿计算简单, 使用方便, 但在低电压和高精度的仪表中应用, 还是很困难的。对高灵敏度的测量, 在较高等级的仪表中, 常采用串并联温度补偿, 如图7-43所示。

图中  $r_1$ ——锰铜电阻;

$r_t$ ——表头内阻;

$r_s$ ——温度系数较大的电阻;

$r_2$ ——锰铜电阻。

串并联温度补偿线路计算比较复杂, 只知道一个表头参数, 要设法确定  $r_1$ 、 $r_2$ 、 $r_s$  三个未知数, 要求计算尽量简化, 其步骤如下:

(1) 测定表头的电流  $I_c$  和内阻  $r_t$ 。(在近似的计算中, 把游丝的电阻全部看作铜电阻)。

(2) 设定  $r_1 \approx \left( \frac{2}{3} \sim 1 - \frac{1}{2} \right) r_{e0}$

(3) 设定  $r_3 \approx \left( \frac{1}{2} \sim 1 - \frac{1}{2} \right) r_{e0}$

给定  $r_1$ 、 $r_3$  的范围是为了计算方便，所以也可以不在此范围内。

(4) 根据给定的端电压计算  $r_2$ ，即

$$r_2 = \frac{U - I_e(r_1 + r_e)}{I}$$

$$I = I_e + I_3 = I_e + \frac{(r_e + r_1)}{r_3} I_e$$

(5) 根据设定和计算出来的参数，求出测量线路温度误差，即

$$r_t = [\beta_3 r_2 (r_e + r_1) - \beta_e r_e (r_2 + r_3)] \frac{\theta}{r_3 R_e} - [\beta_3 (r_e + r_1) - \beta_e r_e] \frac{\beta_3 \theta^2 r_2}{r_3 (1 + \beta_3 \theta) R_e}$$

式中  $\beta_3$ ——分流支路  $r_3$  的温度系数；

$\beta_e$ ——表头电阻的温度系数；

$\theta$ ——温度的变化，一般取  $10^\circ\text{C}$ 。

$$R_e = r_e + r_1 + r_2 + \frac{r_2}{r_3} (r_e + r_1)$$

式中，第二项一般不大于  $0.05\%/10^\circ\text{C}$ ，对于 0.5 级以下的仪表可以忽略不计，所以温度误差的公式可简化成：

$$r_t = [\beta_3 r_2 (r_e + r_1) - \beta_e r_e (r_2 + r_3)] \frac{\theta}{r_3 R_e}$$

(6) 计算总的温度误差值 总的温度误差，等于线路的温度误差加上测量机构的温度误差，后者大约是  $+0.1\%/10^\circ\text{C}$ 。如果总的温度误差超过允许的数值，只好重新设定  $r_1$ 、 $r_3$ ，求  $r_2$ ，再计算总的温度误差，直到合格为止。

例 7-75 某车间有一只 0、5、10、20、40A，0.5 级电流表的表头坏了，由于生产上的需要打算把 75mV 的外附分流器，

用一只0.5级测量范围为1mA的毫安表改装,问如何改法。

采用串并联温度补偿线路,改造步骤如下:

(1)测得表头内阻  $r_c = 15\Omega$ 。

(2)设  $r_1 = 15\Omega$ 。

(3)设  $r_3 = 20\Omega$ 。

(4)计算  $r_2$

$$I = I_c + \frac{I_c(r_1 + r_c)}{r_3} = 1 + \frac{1(15 + 15)}{20} = 2.5 \text{ mA}$$

$$r_2 = \frac{U - I_c(r_c + r_1)}{I} = \frac{75 - 1(15 + 15)}{2.5} = 18\Omega$$

(5)计算温度误差

$$\begin{aligned} R_c &= r_c + r_1 + r_2 + \frac{r_2}{r_3}(r_c + r_1) \\ &= 15 + 15 + 18 + \frac{18}{20}(15 + 15) = 75\Omega \end{aligned}$$

取  $\theta = 10^\circ\text{C}$

$$\beta_3 = \beta_c = 0.4\%$$

$$\begin{aligned} r_t &= [\beta_3 r_2(r_c + r_1) - \beta_c r_c(r_2 + r_3)] \frac{\theta}{r_3 R_c} \\ &= [0.004 \times 18(15 + 15) - 0.004 \times 15(15 + 20)] \frac{10}{20 \times 75} \\ &= 0.04\% \end{aligned}$$

(6)总的温度附加误差

$$r = (0.04 + 0.1)\% = 0.14\%$$

计算结果满足仪表等级要求,最后改成的线路如图7-44所示。

同样的仪表,将它的线路参数改变一下:

(1)设  $r_1 = r_3 = r_c = 15\Omega$

(2)计算  $r_2$

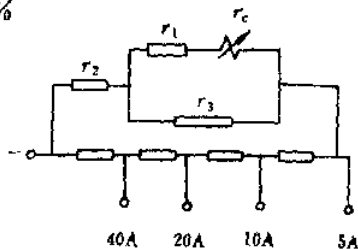


图7-44 改成的线路

$$I = I_c + \frac{I_c(r_1 + r_c)}{r_s} = 1 + \frac{1(15 + 15)}{15} = 3\text{mA}$$

$$r_2 = \frac{U - I_c(r_c + r_1)}{I} = \frac{75 - 1 \times (15 + 15)}{3} = 15\Omega$$

(3) 计算温度附加误差

$$R_c = r_c + r_1 + r_2 + \frac{r_2}{r_s} \times (r_c + r_1)$$

$$= 15 + 15 + 15 + \frac{15}{15} \times (15 + 15) = 75\Omega$$

$$\gamma_t = [\beta_s r_2 (r_c + r_1) - \beta_c r_c (r_2 + r_s)] \frac{\theta}{r_s R_c}$$

$$= [0.004 \times 15(15 + 15) - 0.004 \times 15(15 + 15)] \frac{10}{15 \times 75}$$

$$= 0$$

由此可见，串并联的温度补偿可使线路的温度误差等于零，即达到完全补偿。此时，只有测量机构的温度附加误差未被补偿，约为+0.1%。若设法将线路的温度误差补偿为负值，使总的温度误差等于零也是完全可以的。

## 第九节 电气测量仪表的误差及准确度

### 一、误差的几种表达形式

#### 1. 绝对误差

测量值与被测量的实际值之间的差值称为测量的绝对误差。

$$\Delta = A_x - A_0$$

式中  $\Delta$ ——绝对误差；

$A_x$ ——测量结果；

$A_0$ ——被测量的实际值。

绝对误差的单位与被测量的单位相同。

#### 2. 相对误差

绝对误差 $\Delta$ 与被测量的实际值 $A_0$ 之间的比值的百分数，称为

测量的相对误差，用  $\gamma$  表示。

$$\gamma = \frac{\Delta}{A_0} \times 100\%$$

在相对误差的实际计算中，有时难于求得被测量的实际值，这时也可以用测量结果  $A_x$  代替实际值  $A_0$ ，而近似求得相对误差，即

$$\gamma \approx \frac{\Delta}{A_x} \times 100\%$$

相对误差由于给出了测量误差的清晰概念，便于对不同测量结果的测量误差进行比较，所以它是误差计算最常用的一种表示方法。

### 3. 引用误差

绝对误差  $\Delta$  与仪表测量上限  $A_m$  的比值的百分数，称为引用误差，用  $\gamma_m$  表示。

$$\gamma_m = \frac{\Delta}{A_m} \times 100\%$$

## 二、仪表准确度

当仪表在规定条件（如温度、湿度、放置方式、无外界电场和磁场的影响等）工作时，在它的标度尺的工作部分（指标度尺上仪表指示值误差保证在允许误差以内部分）的全部分度线上，可能出现的最大基本误差的百分数值，称为仪表的准确度等级。

### 1. 仪表基本误差的几种表示方法

(1) 单向标度尺的仪表 以标度尺工作部分上量限（指在标度尺工作部分内仪表所能测量的最大值）的百分数表示；

(2) 双向标度尺的仪表 以标度尺工作部分两个上量限绝对值之和的百分数表示；

(3) 无零位标度尺的仪表 指针式仪表以标度尺工作部分上下量限差的百分数表示，振簧式仪表以指示值的百分数表示；

(4) 标度尺特性为对数的、双曲线的或指数为 3 及 3 以上级数的仪表 以标度尺工作部分长度的百分数表示。

上述各种仪表中，单向标度尺的仪表是最常用的指示仪表，

它的准确度是以标度尺工作部分量限的百分数表示，用 $K$ 表示它的准确度等级

$$\pm K\% = \frac{\Delta_m}{A_m} \times 100\%$$

式中  $\Delta_m$ ——以绝对误差表示的最大基本误差；

$A_m$ ——测量上限。

因此，仪表的准确度等级的百分数也就是表示该仪表在规定的正常工作条件下，使用时所允许的最大引用误差的数值。

### 2. 仪表准确度等级

仪表按准确度等级分为七级，各种仪表的基本误差不应超出表7-1中所规定的值。

表7-1 各级仪表的基本误差

仪表的准确等级	0.1	0.2	0.5	1.0	1.5	2.5	5.0
基本误差 %	$\pm 0.1$	$\pm 0.2$	$\pm 0.5$	$\pm 1.0$	$\pm 1.5$	$\pm 2.5$	$\pm 5.0$

### 3. 应用仪表准确度估计测量误差

设仪表的准确度等级为 $K$ ，由上式可知，仪表在规定条件下进行测量时，测量结果中可能出现的最大绝对误差为

$$\Delta_m = \pm K\% \times A_m$$

用该仪表测量时，若读数为 $A_x$ ，测量结果可能出现的最大相对误差为

$$\gamma = \frac{\Delta_m}{A_x} \times 100\% = \pm \frac{K\% \times A_m}{A_x} \times 100\%$$

**例7-76** 用准确度为0.2级，量限为10A的电流表，在规定的条件下测量某一电流，读数为5A，求测量结果的准确度（即求测量结果的相对误差）是多少。

最大绝对误差为

$$\begin{aligned} \Delta_m &= \pm K\% \times A_m \\ &= (\pm 0.002) \times 10 = \pm 0.02\text{A} \end{aligned}$$

最大相对误差为

$$\gamma = \frac{\Delta_m}{A_x} \times 100\% = \frac{+0.02}{5} \times 100\% = 0.4\%$$

例7-77 用两块电压表测量两个大小不同的电压，一个在测量300V时，绝对误差为3V，另一个在测量20V时，绝对误差为1V，问它们的相对误差分别为多少，哪一块表测量的准确度高一些。

相对误差为

$$\gamma_1 = \frac{\Delta}{A_0} \times 100\% = \frac{3}{300} \times 100\% = 1\%$$

$$\gamma_2 = \frac{\Delta}{A_0} \times 100\% = \frac{1}{20} \times 100\% = 5\%$$

300V的电压表虽然绝对误差比20V电压表大，但它的相对误差只有1%，比20V电压表的相对误差5%小，所以300V电压表测量的准确度高一些。

例7-78 在电阻分压电路中， $E = 100\text{V}$ ， $U_{AB}$ 应等于 $\frac{1}{2}E$ ，但用内阻 $R_c = 50\text{k}\Omega$ 的直流电压表测量时，发现误差很大，问这时电压表的读数是多少。相对误差是多少。

A、B两点间的等效电阻为

$$R_{AB} = \frac{R_c R_1}{R_c + R_2} = \frac{50 \times 20}{50 + 20} = 14.3\text{k}\Omega$$

电压表的读数为

$$U_x = \frac{R_{AB}}{R_1 + R_{AB}} E = \frac{14.3}{20 + 14.3} \times 100 = 41.7\text{V}$$

相对误差为

$$\gamma = \frac{U_x - \frac{E}{2}}{\frac{E}{2}} \times 100\%$$

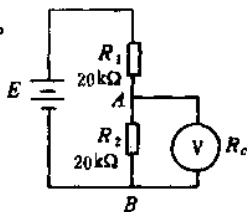


图7-45 电阻分压电路



$$\begin{aligned} &= \frac{41.7 - \frac{100}{2}}{\frac{100}{2}} \times 100\% \\ &= -16.6\% \end{aligned}$$

**例7-79** 准确度为0.5级的电压表有250和500V两个量程，若被测量电压约为220V，问应用哪种量程。

仪表等级是一定的，但由于量程不同，最大绝对误差也不同。

对250V量程的最大绝对误差为

$$\Delta_{m1} = 250 \times 0.5\% = 1.25\text{V}$$

对500V量程的最大绝对误差为

$$\Delta_{m2} = 500 \times 0.5\% = 2.5\text{V}$$

由于250V量程的电压表最大绝对误差较小，所以应采用250V量程的电压表。

**例7-80** 用准确度为2.5级，量程为20V的电压表，测量15V的直流电压，问绝对误差和相对误差各为多少。若采用准确度为1.0级，但量程为100V的电压表，问绝对误差和相对误差又如何。

采用量程为20V电压表则有

$$\Delta_m = \pm K\% \times A_m = \pm 2.5\% \times 20 = \pm 0.5\text{V}$$

测量15V电压的相对误差为

$$\gamma = \frac{\Delta_m}{A} \times 100\% = \frac{\pm 0.5}{15} = 3.33\%$$

采用100V，1.0级电压表则有

$$\Delta_m = \pm K\% \times A_m = \pm 1.0\% \times 100 = \pm 1\text{V}$$

测量15V电压的相对误差为

$$\gamma = \frac{\Delta_m}{A} \times 100\% = \frac{\pm 1}{15} \times 100\% = \pm 6.67\%$$

由计算结果看出，用量程为100V的1.0级电压表测量15V直

流电压比用量限为20V的2.5级电压表测量误差更大些。

**例7-81** 用一块量程为50A, 准确度为1.5级的电流表, 在环境温度为30℃下测量某一电流, 读数为30A, 求测量结果的准确度。

在工程中, 使用仪表测量时, 其测量结果的准确度一般用最大相对误差表示。

$$\begin{aligned} \gamma &= \pm \frac{K\% \times A_m}{A_x} \times 100\% \\ &= \pm \frac{0.015 \times 50}{30} \times 100\% = \pm 2.5\% \end{aligned}$$

考虑到测量时环境温度为30℃, 它已超出规定的温度范围, 但是超出温度小于10℃。根据国家标准 GB776—76《电测量指示仪表通用技术条件》对附加误差的规定, 这时相应的温度附加误差不超过仪表的准确度等级, 即±1.5%。

因此, 测量结果的准确度以最大相对误差表示, 即

$$\gamma_m = \pm (2.5 + 1.5)\% = \pm 4\%$$

**例7-82** 用V-A表法测量电阻, 已知电流表为1.0级、10A, 内阻为0.5Ω, 电压表为1.0级、250V, 内阻为50kΩ, 当仪表读数分别为8A和220V时, 求: (1)根据仪表读数直接计算被测电阻; (2)考虑仪表内阻, 消除方法误差, 再求被测电阻实际值; (3)求方法误差。

(1)根据仪表读数直接计算

$$R_x' = \frac{U}{I} = \frac{220}{8} = 27.5\Omega$$

(2)被测电阻实际值 (如图7-46所示)

$$\begin{aligned} U &= IR_c + IR_x \\ R_x &= \frac{U - IR_c}{I} = \frac{U}{I} - R_c \\ &= 27.5 - 0.5 = 27\Omega \end{aligned}$$

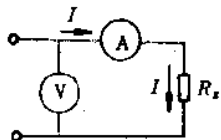


图7-46 V-A表测量电阻

(3)方法误差

$$\gamma = \frac{R'_x - R_x}{R_x} \times 100\% = \frac{R_c}{R_x} \times 100\%$$

$$= \frac{0.5}{27} \times 100\% = 1.85\%$$

**例7-83** 已知被校电度表的准确度为1.5级，电度表常数为2500r/kW·h，在校验时，接入1000W的灯泡，用表记录25r的时间为35s，求相对误差。

铝盘转过25r的理论时间为

$$T = 3600 \times \frac{n}{NP}$$

$$= 3600 \times \frac{25}{2500 \times 1} = 36\text{s}$$

电度表的相对误差为

$$\gamma = \frac{T - t}{t} \times 100\% = \frac{36 - 35}{35} \times 100\%$$

$$= 2.86\%$$

**例7-84** 已知被校电度表的准确度为1.5级，电度表常数2500r/kW·h，标准电度表常数2000r/kW·h，在校验中，当被校表转25r时，标准表转19.7r，求被校电度表的相对误差。

首先应将被校表转数折算成与标准表常数相同的转数，即

$$n'_{\text{被校}} = n_{\text{被校}} \times \frac{N_{\text{标准}}}{N_{\text{被校}}}$$

式中  $N_{\text{标准}}$ ——标准表常数；  
 $N_{\text{被校}}$ ——被校表常数；  
 $n_{\text{被校}}$ ——被校表转数；  
 $n'_{\text{被校}}$ ——折算后的被校表转数。

$$n'_{\text{被校}} = 25 \times \frac{2000}{2500} = 20\text{r}$$

被校表相对误差为

$$\begin{aligned} \gamma &= \frac{n_{\text{被校}} - n_{\text{标准}}}{n_{\text{标准}}} \times 100\% \\ &= \frac{20 - 19.7}{19.7} \times 100\% = 1.52\% \end{aligned}$$

例7-85 用标准表法校验电度表，它们的常数都是3000r/kW·h，若被校表转15r，标准表转14.8r，被校表准确度要求为1.5级，问是否符合要求。

因电度表的准确度用相对误差表示，即

$$\begin{aligned} \gamma &= \frac{n_{\text{被校}} - n_{\text{标准}}}{n_{\text{标准}}} \times 100\% \\ &= \frac{15 - 14.8}{14.8} \times 100\% = 1.35\% \end{aligned}$$

误差未超过规定，即 $\gamma < 1.5\%$ ，符合要求。

例7-86 某电压刻度为0~20V，在18V处计量检定值为17.991V，求在18V处仪表绝对误差，相对误差、引用误差。

绝对误差为

$$\Delta = A_x - A_n = 18 - 17.991 = 0.009\text{V}$$

相对误差为

$$\gamma = \frac{\Delta}{A_x} \times 100\% = \frac{0.009}{18} \times 100\% = 0.05\%$$

引用误差为

$$\gamma_m = \frac{\Delta}{A_m} \times 100\% = \frac{0.009}{20} \times 100\% = 0.045\%$$

## 第八章 电子电路计算

### 第一节 整流电路计算

#### 一、单相整流电路

##### 1. 单相半波电阻负载整流电路

它是由电源  $u_1$ ，变压器 T，整流元件 V 和负载  $R_{Lz}$  组成，如图 8-1 所示。电源  $u_1 = \sqrt{2} U_1 \sin \omega t$  是一个按正弦规律变化的电压，其中  $U_1$  是电源电压的有效值。变压器二次电压  $u_2 = \sqrt{2} \cdot U_2 \sin \omega t$  也是按正弦规律变化，其中  $U_2$  是变压器二次电压的有效值。

负载直流电压为

$$U_{Lz} = 0.45 U_2$$

在工程实用中，往往是根据负载电压  $U_{Lz}$  的大小来求变压器的二次电压，可将上式写成

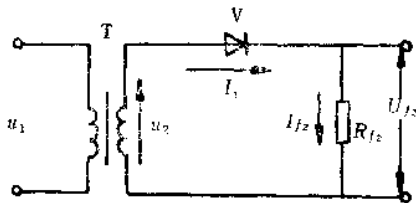


图 8-1 单相半波整流电路

$$U_2 = \frac{U_{Lz}}{0.45} = 2.22 U_{Lz}$$

流过负载  $R_{Lz}$  的直流电流为

$$I_{Lz} = \frac{U_{Lz}}{R_{Lz}} = 0.45 \frac{U_2}{R_{Lz}}$$

**整流二极管的选择** 根据流过整流二极管的平均电流  $I_n$  和最高反向工作电压  $U_{nrm}$  来选择整流元件。

流过整流二极管的平均电流与流过负载的直流电流相等，即

$$I_n = I_{Lz} = 0.45 \frac{U_2}{R_{Lz}}$$

整流元件承受的最大反向电压就是变压器二次电压的最大值，即

$$U_{cfm} = \sqrt{2} U_2$$

整流变压器容量的确定, 即

$$U_2 = 2.22 U_{fz}$$

$$I_2 = 1.57 I_{fz}$$

$$P_2 = U_2 I_2 = 2.22 \times 1.57 U_{fz} I_{fz} \approx 3.49 U_{fz} I_{fz}$$

$$U_1 = \frac{N_1}{N_2} U_2$$

$$I_1 = 1.21 \frac{N_2}{N_1} I_{fz}$$

$$\begin{aligned} P_1 &= U_1 I_1 = \frac{N_1}{N_2} \times 2.22 U_{fz} \times 1.21 \frac{N_2}{N_1} I_{fz} \\ &= 2.69 U_{fz} I_{fz} \end{aligned}$$

设计容量为

$$P = \frac{P_1 + P_2}{2} = \frac{2.69 + 3.49}{2} U_{fz} I_{fz} = 3.09 U_{fz} I_{fz}$$

## 2. 单相全波电阻负载整流电路

单相全波整流电路是由两个单相半波整流电路组成, 如图 8-2 所示。由二次绕组中心具有抽头的变压器 T 和两个整流元件  $V_1$ 、 $V_2$  组成。变压器二次绕组引出的电压  $u_{2a}$ 、 $u_{2b}$  大小相等, 方向相反。

负载上直流电压和直流电流 全波整流电路的直流输出电压和直流电流都比半波整流电路的直流电压和直流电流大一倍, 即

$$U_{fz} = 0.9 U_2$$

$$I_{fz} = \frac{U_{fz}}{R_{fz}} = 0.9 \frac{U_2}{R_{fz}}$$

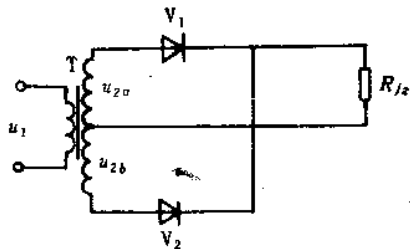


图 8-2 单相全波整流电路

整流二极管的选择, 因两个二极管轮流导电, 所以流过每个整流元件的平均电流就只有负载电流的一半, 即

$$I_u = \frac{1}{2} I_{I_2} = 0.45 \frac{U_2}{R_{I_2}}$$

每个二极管所承受的最大反向电压是变压器二次电压最大值的两倍。

$$U_{v1m} = 2\sqrt{2} U_2$$

整流变压器容量确定如下:

$$U_{2a} = \frac{U_{I_2}}{0.9} = 1.11 U_{I_2}$$

$$U_{2b} = 1.11 U_{I_2}$$

$$I_2 = 0.785 I_{I_2}$$

$$P_2 = (U_{2a} + U_{2b}) I_2 = 2.22 U_{I_2} \times 0.785 I_{I_2} = 1.74 U_{I_2} I_{I_2}$$

$$U_1 = U_{2a} \frac{N_1}{N_2} + U_{2b} \frac{N_1}{N_2} = 2.22 U_{I_2} \frac{N_1}{N_2}$$

$$I_1 = 0.555 I_{I_2} \frac{N_2}{N_1}$$

$$P_1 = I_1 U_1 = 0.555 I_{I_2} \frac{N_2}{N_1} \times 2.22 U_{I_2} \frac{N_1}{N_2} = 1.23 U_{I_2} I_{I_2}$$

设计容量为

$$P = \frac{P_1 + P_2}{2} = \frac{1.23 + 1.74}{2} U_{I_2} I_{I_2} = 1.49 U_{I_2} I_{I_2}$$

### 3. 单相桥式电阻负载整流电路

单相桥式整流电路是四个二极管组成, 电路图如图8-3所示。负载上直流电压和直流电流 计算公式同全波整流一样, 即

$$U_{I_2} = 0.9 U_2$$

$$I_{I_2} = 0.9 \frac{U_2}{R_{I_2}}$$

整流元件的选择 通过整流元件的平均电流与全波整流电路一样, 即

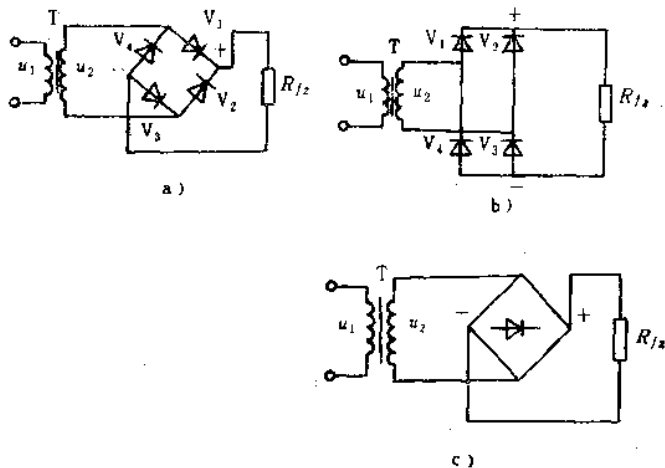


图8-3 单相桥式整流电路

$$I_v = \frac{1}{2} I_{fz} = 0.45 \frac{U_2}{R_{fz}}$$

整流元件所承受的最大反向电压比全波整流电路中二极管承受的最大反向电压小一半，即

$$U_{vfm} = \sqrt{2} U_2$$

整流变压器的容量确定如下：

$$U_2 = \frac{U_{fz}}{0.9} = 1.11 U_{fz}$$

$$I_2 = 1.11 I_{fz}$$

$$P_2 = U_2 I_2 = 1.23 U_{fz} I_{fz}$$

$$U_1 = U_2 \frac{N_1}{N_2} = 1.11 U_{fz} \frac{N_1}{N_2}$$

$$I_1 = 1.11 I_{fz} \frac{N_2}{N_1}$$

$$P_1 = U_1 I_1 = 1.23 U_{fz} I_{fz}$$



$$P = \frac{P_1 + P_2}{2} = 1.23U_{fz}I_{fz}$$

关于电感性负载的情况和电阻性负载不完全一样，现分别说明。

(1) 单相半波整流电路 若为电感性负载，需加续流二极管，各量之间关系如下：

$$U_{fz} \approx 0.45U_2$$

$$U_1 = U_2 \frac{N_1}{N_2}$$

$$I_2 \approx 0.707I_{fz}$$

$$I_1 = \frac{1}{2} I_{fz} \frac{N_2}{N_1}$$

$$P_1 = 1.11U_{fz}I_{fz}$$

$$P_2 = 1.57U_{fz}I_{fz}$$

$$P = 1.34U_{fz}I_{fz}$$

(2) 单相全波整流电路 若为电感性负载，各量之间关系如下：

$$U_{fz} \approx 0.9U_2$$

$$U_{1a} \approx 1.11U_2$$

$$U_{2a} \approx 1.11U_2$$

$$U_1 = U_2 \frac{N_1}{N_2}$$

$$I_2 \approx 0.707I_{fz}$$

$$I_1 = I_{fz} \frac{N_2}{N_1}$$

$$P_1 = 1.11U_{fz}I_{fz}$$

$$P_2 \approx 1.57U_{fz}I_{fz}$$

$$P = 1.34U_{fz}I_{fz}$$

(3) 单相桥式电感负载整流电路

$$U_{fz} \approx 0.9U_2$$

$$I_v = \frac{1}{2} I_{fz}$$

$$U_1 = U_2 \frac{N_1}{N_2}$$

$$I_2 = I_{fz}$$

$$I_1 = I_{fz} \frac{N_2}{N_1}$$

$$P_1 = 1.11 U_{fz} I_{fz}$$

$$P_2 = 1.11 U_{fz} I_{fz}$$

$$P = 1.11 U_{fz} I_{fz}$$

例8-1 输入交流电压  $U_2 = 110\text{V}$ ，负载电阻  $R_{fz} = 8\Omega$  的单相半波整流电路，求负载电流，并选择整流元件。

负载电流为

$$I_{fz} = 0.45 \frac{U_2}{R_{fz}} = 0.45 \frac{200}{8} = 11.3\text{A}$$

二极管承受的最大反向电压为

$$U_{vfm} = \sqrt{2} U_2 = \sqrt{2} \times 200 = 283\text{V}$$

选择额定电流为  $20\text{A}$ 、最高反向电压为  $400\text{V}$  的整流二极管。

例8-2 有一直流负载需要直流电压  $U_{fz} = 100\text{V}$ ，直流电流  $I_{fz} = 15\text{A}$ ，分别用三种单相整流电路，选择整流二极管。

(1) 采用单相半波整流电路，先求变压器二次电压，即

$$U_2 = \frac{U_{fz}}{0.45} = \frac{100}{0.45} = 222\text{V}$$

加在整流元件的最大反向电压为

$$U_{vfm} = \sqrt{2} U_2 = \sqrt{2} \times 222 = 314\text{V}$$

通过整流元件的直流电流为

$$I_v = I_{fz} = 15\text{A}$$

选择额定电流为  $20\text{A}$ ，最高反向电压为  $400\text{V}$  的整流二极管

(2) 采用单相全波整流电路

$$U_2 = \frac{U_{I_2}}{0.9} = \frac{100}{0.9} = 111\text{V}$$

$$U_{\text{orfm}} = 2\sqrt{2}U_2 = 2\sqrt{2} \times 111 = 314\text{V}$$

$$I_v = \frac{1}{2}I_{I_2} = \frac{1}{2} \times 15 = 7.5\text{A}$$

选择额定电流为10A、最大反向电压为400V的整流二极管。

(3) 采用单相桥式整流电路

$$U_2 = \frac{U_{I_2}}{0.9} = \frac{100}{0.9} = 111\text{V}$$

$$U_{\text{orfm}} = \sqrt{2}U_2 = \sqrt{2} \times 111 = 157\text{V}$$

$$I_v = \frac{1}{2}I_{I_2} = \frac{1}{2} \times 15 = 7.5\text{A}$$

选择额定电流为10A、最大反向电压为200V的整流二极管。

**例8-3** 单相桥式整流电路用于异步电动机能耗制动，用电桥测得电动机相间电阻  $R = 0.3\Omega$ ，用钳形电流表测得电动机空载电流  $I_0 = 10\text{A}$ ，选择整流二极管，并确定变压器的容量。

制动时所需直流电流，一般按3~5倍电动机空载电流选取，即

$$I_{I_2} = 4I_0 = 4 \times 10 = 40\text{A}$$

$$U_{I_2} = I_{I_2}R = 40 \times 0.3 = 12\text{V}$$

变压器二次电压为

$$U_2 = 1.11U_{I_2} = 1.11 \times 12 = 13.3\text{V}$$

变压器二次电流为

$$I_2 = 1.11I_{I_2} = 1.11 \times 40 = 44.4\text{A}$$

整流二极管平均电流为

$$I_v = \frac{1}{2}I_{I_2} = \frac{1}{2} \times 40 = 20\text{A}$$

整流二极管最大反向电压为

$$U_{\text{orfm}} = \sqrt{2}U_2 = \sqrt{2} \times 13.3 = 18.8\text{V}$$

选择额定电流为30A、最大反向电压为30V的整流二极管。  
变压器设计容量为

$$P = 1.23U_{I_z}I_{I_z} = 1.23 \times 12 \times 40 = 590 \text{ VA}$$

所以整流变压器容量可选600VA

例8-4 磨床用电磁吸盘，若线圈的直流电阻  $R_{I_z} = 70\Omega$ ，为了使电磁吸盘能牢靠地吸住工件，通入直流电流为1.5A，采用单相桥式整流电路，选择整流元件，并确定变压器容量。

电磁吸盘线圈两端电压为

$$U_{I_z} = I_{I_z}R_{I_z} = 1.5 \times 70 = 105 \text{ V}$$

$$U_2 = 1.11U_{I_z} = 1.11 \times 105 = 117 \text{ V}$$

$$I_o = \frac{1}{2}I_{I_z} = \frac{1}{2} \times 1.5 = 0.75 \text{ A}$$

$$U_{ofm} = \sqrt{2}U_2 = \sqrt{2} \times 117 = 165 \text{ V}$$

$$P = 1.23U_{I_z}I_{I_z} = 1.23 \times 105 \times 1.5 = 194 \text{ VA}$$

选用额定电流为1A、最大反向电压为200V整流二极管，变压器容量为200VA。

## 二、三相整流电路

### 1. 三相半波电阻性负载整流电路

三相半波整流电路实际上是三个单相半波整流电路组成。一般三相变压器的一次绕组接成三角形，二次绕组接成星形，如图8-4所示。

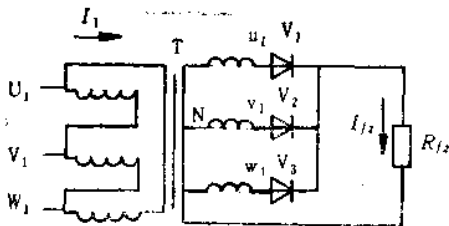


图8-4 三相半波整流电路

负载上直流电压为

$$U_{I_z} = 1.17U_2$$

流过负载的直流电流为

$$I_{t\alpha} = \frac{U_{t\alpha}}{R_{t\alpha}} = 1.17 \frac{U_2}{R_{t\alpha}}$$

整流二极管参数的选择, 即

$$I_v = \frac{1}{3} I_{t\alpha}$$

$$U_{vfm} = \sqrt{3} \sqrt{2} U_2 = \sqrt{6} U_2 \approx 2.09 U_{t\alpha}$$

整流变压器容量确定如下:

$$U_2 = 0.855 U_{t\alpha}$$

$$U_1 = U_2 \frac{N_1}{N_2} = 0.855 U_{t\alpha} \frac{N_1}{N_2}$$

$$I_2 = 0.58 I_{t\alpha}$$

$$I_1 = 0.49 I_{t\alpha} \frac{N_2}{N_1}$$

$$P_1 = 3 U_1 I_1 = 1.58 U_{t\alpha} I_{t\alpha}$$

$$P_2 = 3 U_2 I_2 = 1.49 U_{t\alpha} I_{t\alpha}$$

$$P = \frac{P_1 + P_2}{2} = \frac{1.58 + 1.49}{2} U_{t\alpha} I_{t\alpha} = 1.54 U_{t\alpha} I_{t\alpha}$$

## 2. 三相桥式电阻性负载整流电路

三相桥式整流电路实际上是由两个三相半波整流电路组成, 如图8-6所示。

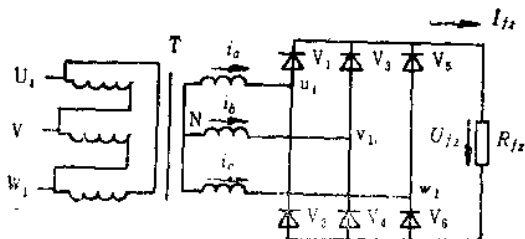


图8-6 三相桥式整流电路

负载上直流电压和电流为

$$U_{fz} = 2.34U_2$$

$$I_{fz} = \frac{U_{fz}}{R_{fz}} = 2.34 \frac{U_2}{R_{fz}}$$

整流二极管参数的选择, 即

$$I_D = \frac{1}{3} I_{fz} = 0.78 \frac{U_2}{R_{fz}}$$

$$U_{DFM} = \sqrt{6} U_2 = 1.05 U_{fz}$$

整流变压器容量确定如下:

$$I_2 = 0.816 I_{fz}$$

$$I_1 = 0.816 I_{fz} \frac{N_2}{N_1}$$

$$U_2 = 0.43 U_{fz}$$

$$U_1 = 0.43 U_{fz} \frac{N_1}{N_2}$$

$$P_1 = 3U_1 I_1 = 1.05 U_{fz} I_{fz}$$

$$P_2 = 3U_2 I_2 = 1.05 U_{fz} I_{fz}$$

$$P = \frac{P_1 + P_2}{2} = 1.05 U_{fz} I_{fz}$$

**例8-5** 某电镀车间需要直流电压  $U_{fz} = 12\text{V}$ , 直流电流  $I_{fz} = 1000\text{A}$ , 采用三相半波整流电路, 选择整流二极管, 并确定整流变压器容量。

选择整流二极管的电流为

$$I_D = \frac{1}{3} I_{fz} = \frac{1}{3} \times 1000 = 333\text{A}$$

$$U_{DFM} = 2.09 U_{fz} = 2.09 \times 12 = 25.1\text{V}$$

选用额定电流为400A、最大反向电压为50V的整流二极管。  
变压器容量为

$$P = 1.37 U_{fz} I_{fz} = 1.37 \times 12 \times 1000 = 16400\text{VA}$$

$$\approx 16.4\text{kVA}$$

**例8-6** 上例中, 若采用三相桥式整流电路, 选择整流二极

管，并确定整流变压器容量。

选择整流二极管的参数，即

$$I_v = \frac{1}{3} I_{Iz} = \frac{1}{3} \times 1000 = 333\text{A}$$

$$U_{v, \text{max}} = 1.05 U_{Iz} = 1.05 \times 12 = 12.6\text{V}$$

选用额定电流为400A、最大反向电压为30V的整流二极管。变压器容量为

$$S = 1.05 U_{Iz} I_{Iz} = 1.05 \times 12 \times 1000 = 12600\text{VA} \\ = 12.6\text{kVA}$$

### 三、整流元件的串联和并联

#### 1. 整流元件的串联

整流元件串联使用，由于各反向电阻不可能完全一样，造成电压分配不均匀，需并联均压电阻，如图8-6所示，其

$R_{\text{均}}$ 均为

$$R_{\text{均}} = \frac{U_p \times 10^3}{K_1 I_p}$$

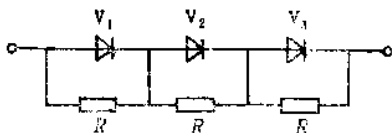


图8-6 整流元件串联

式中  $R_{\text{均}}$ ——均压电阻( $\Omega$ )；

$U_p$ ——整流二极管最高反向电压(V)；

$I_p$ ——整流二极管反向漏电流(mA)；

$K_1$ ——系数，取3~5。

$$P_{\text{均}} = \frac{K_2}{R_{\text{均}}} \left( \frac{U}{n} \right)^2$$

式中  $P_{\text{均}}$ ——均压电阻的功率(W)；

$U$ ——线路上反向峰值电压(V)；

$n$ ——整流元件串联只数；

$K_2$ ——系数，取0.35~0.5。

例8-7 同规格三只整流二极管串联 使用每只整流二极管最高反向电压为200V，电源电压为500V，求均压电阻。

由  $U = 500\text{V}$ ， $U_p = 200\text{V}$ ，查手册知， $I_p = 5\text{mA}$ ，取  $K_1 =$

4,  $K_2 = 0.45$ , 则有

$$R_{均} = \frac{U_F \times 10^3}{K_1 I_F} = \frac{200 \times 10^3}{4 \times 5} = 10 \text{ k}\Omega$$

$$P_{均} = \frac{K_2}{R_{均}} \left( \frac{U}{n} \right)^2 = \frac{0.45}{10 \times 10^3} \left( \frac{500}{3} \right)^2 = 1.25 \text{ W}$$

选用均压电阻为  $10 \text{ k}\Omega$  左右, 功率大于  $1.25 \text{ W}$ , 取  $2 \text{ W}$ 。

## 2. 整流元件的并联

整流元件并联使用,

由于各正向电阻的差异, 流过的电流也不相同, 需串联均流电阻, 如图 8-7 所示, 其  $R_{均}$  为

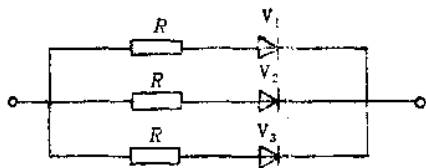


图8-7 整流元件并联

$$R_{均} = K_1 \frac{nU}{I}$$

式中  $R_{均}$ ——均流电阻( $\Omega$ );

$U$ ——整流二极管正向压降(V);

$I$ ——线路总电流(A);

$n$ ——整流元件并联只数;

$K_1$ ——系数, 取  $3 \sim 4$ 。

$$P_{均} = K_2 R_{均} \left( \frac{I}{n} \right)^2$$

式中  $K_2$ ——系数, 取  $1.5 \sim 2.5$ 。

例8-8 将三只  $2\text{CZ}14\text{C}$  并联于电路中, 总电流  $I = 24 \text{ A}$ , 求均流电阻。

查手册  $2\text{CZ}14\text{C}$  正向压降  $U = 0.75 \text{ V}$ , 取  $K_1 = 4$ ,  $K_2 = 2$ , 则有

$$R_{均} = \frac{K_1 nU}{I} = \frac{4 \times 3 \times 0.75}{24} = 0.375 \Omega$$

$$P_{均} = K_2 R_{均} \left( \frac{I}{n} \right)^2 = 2 \times 0.375 \left( \frac{24}{3} \right)^2 = 44.8 \text{ W}$$



选用均流电阻 $0.4\Omega$ 左右，功率应大于 $45W$ 。

## 第二节 晶闸管变流器计算

### 一、晶闸管的选择

晶闸管元件的主要额定参数是正反向重复峰值电压和额定通态平均电流，也就是平时所讲的晶闸管电压和电流值，由于计算繁琐，实际上常用经验公式。

#### 1. 决定晶闸管的工作电流公式

$$I_{T(AV)} = \frac{K_1 I_{Tz}}{1.57 K_2}$$

式中  $I_{T(AV)}$  —— 正向额定电流；

$I_{Tz}$  —— 负载额定电流；

$K_1$  —— 不同整流电路中流过晶闸管的电流波形系数，数值见表8-1；

$K_2$  —— 晶闸管并联导通数（对单相半波电路  $K_2 = 1$ ；单相桥式电路  $K_2 = 2$ ；三相半波电路  $K_2 = 3$ ；三相桥式电路  $K = 3$ ）。

#### 2. 决定晶闸管的工作电压公式

$$U_{DRM} \geq (1.5 \sim 2) U_{Dmax}$$

$$U_{RRM} \geq (1.5 \sim 2) U_{Rmax}$$

式中  $U_{DRM}$  —— 晶闸管断态重复峰值电压；

$U_{RRM}$  —— 晶闸管反向重复峰值电压；

$U_{Dmax}$  —— 实际承受的最大正向电压；

表8-1 晶闸管电流波形系数

线路形式	单相半波可控整流	单相全波晶闸管整流	三相半波可控整流
	单相全波可控整流	用一只晶闸管	三相半控桥式整流
	单相半控桥式整流	单相桥式可控整流	
		用一只晶闸管	
电流波形系数 $K$	1.57	1.11	1.73

$U_{Tmax}$ ——实际承受的最大反向电压。

## 二、单相半波晶闸管整流电路

### 1. 电阻性负载

如图8-8所示，输出电

压平均值为

$$U_D \approx 0.45U_2 \frac{1 + \cos\alpha}{2}$$

输出电压有效值为

$$U = U_2 \sqrt{\frac{1}{4\pi} \sin^2\alpha + \frac{\pi - \alpha}{2\pi}}$$

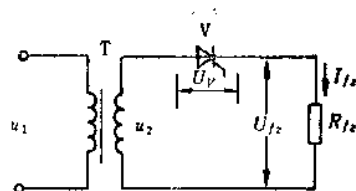


图8-8 单相半波晶闸管整流电路

当晶闸管全导通时，控制角 $\alpha = 0$ ，相当于二极管整流。输出平均直流电压最大，其值为 $0.45U_2$ ，有效值为 $U_2/\sqrt{2}$ ，峰值电压为 $\sqrt{2}U_2$ 。

若控制角 $\alpha$ 不同时，则有

输出电流平均值为

$$I_o = \frac{U_{fz}}{R_{fz}} \approx 0.45 \frac{U_2}{R_{fz}} \frac{1 + \cos\alpha}{2}$$

负载电流有效值为

$$I = \frac{U}{R_{fz}} = \frac{U_2}{R_{fz}} \sqrt{\frac{1}{4\pi} \sin^2\alpha + \frac{\pi - \alpha}{2\pi}}$$

功率因数为

$$\begin{aligned} \cos\varphi &= \frac{P}{S} = \frac{UI}{U_2 I} = \frac{U}{U_2} \\ &= \sqrt{\frac{1}{4\pi} \sin^2\alpha + \frac{\pi - \alpha}{2\pi}} \end{aligned}$$

不同 $\alpha$ 时，负载直流电压平均值与电源电压之比 $U_{fz}/U_2$ 、电流有效值与电流平均值 $I/I_o$ ，功率因数 $\cos\varphi$ ，如表8-2所示。

表8-2  $U_{Tz}/U_2$ 、 $I/I_{Tz}$ 、 $\cos\varphi$ 与控制角 $\alpha$ 关系

$\alpha$	$0^\circ$	$30^\circ$	$60^\circ$	$90^\circ$	$120^\circ$	$150^\circ$	$180^\circ$
$U_{Tz}/U_2$	0.45	0.42	0.338	0.225	0.113	0.03	0
$I/I_{Tz}$	1.57	1.66	1.88	2.22	2.78	3.99	—
$\cos\varphi$	0.707	0.698	0.635	0.508	0.302	0.12	0

**例8-9** 有一单相半波晶闸管整流电路，交流电源电压为220V，负载电阻  $R_{Tz} = 12\Omega$ ，控制角  $\alpha = 30^\circ$ ，求输出电压平均值、电流平均值和有效值，并选择整流元件。

当  $\alpha = 30^\circ$  时，由表8-2查出： $U_{Tz}/U_2 = 0.42$ ， $I/I_{Tz} = 1.66$ ，则有

$$U_{Tz} = 0.42U_2 = 0.42 \times 220 = 92.4V$$

$$I_{Tz} = \frac{U_{Tz}}{R_{Tz}} = \frac{92.4}{12} = 7.7A$$

$$I = 1.66I_{Tz} = 1.66 \times 7.7 = 12.8V$$

晶闸管承受最大正反向电压与电源电压峰值相同，即

$$U_{vfm} = \sqrt{2}U_2 = \sqrt{2} \times 220 = 311V$$

晶闸管的额定电压为

$$\begin{aligned} U_{DRM} &= (1.5 \sim 2)U_{vfm} = (1.5 \sim 2) \times 311 \\ &= (467 \sim 622)V \end{aligned}$$

晶闸管的额定电流为

$$I_{T(AV)} = \frac{K_1 I_{Tz}}{1.57 K_2} = \frac{1.57 \times 7.7}{1.57 \times 1} = 7.7A$$

选用额定电流为10A，正反向重复峰值电压为500V晶闸管。

## 2. 电感性负载与续流二极管

单相半波晶闸管整流电路用于大电感性负载时，需加续流二极管。无续流二极管，负载上得不到应有的电压和电流，如图8-9所示。

当  $\omega L \gg R$  时，流过晶闸管与续流管电流的平均值为

$$I_{I_{\alpha T}} = \frac{\theta}{360^\circ} I_{I_{\alpha}}$$

$$I_{I_{\alpha Z}} = \frac{360^\circ - \theta}{360^\circ} I_{I_{\alpha}}$$

式中  $\theta$ ——晶闸管导通角。

电流的有效值为

$$I_{I_2} = \sqrt{\frac{\theta}{360^\circ} I_{I_{\alpha}}^2}$$

$$I_{I_1} = \sqrt{\frac{360^\circ - \theta}{360} I_{I_{\alpha}}^2}$$

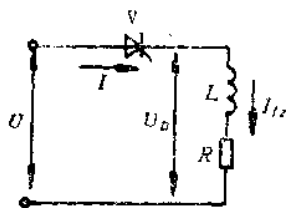


图8-9 电感性负载

**例8-10** 中小型发电机采用单相半波晶闸管自励恒压励磁装置，如图8-10所示。当发电机满载时，相电压为240V，要求励磁电压为50V，若励磁圈线电阻为3Ω，电感为0.25H，求晶闸管的导通角，流过晶闸管和续流二极管的电流平均值和有效值，并选择晶闸管和二极管。

晶闸管的导通角为

$$U_D = 0.45 U_2 \frac{1 + \cos \alpha}{2}$$

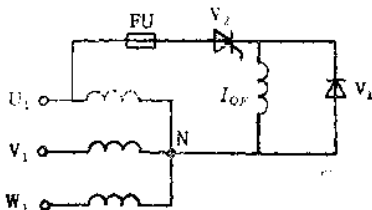


图8-10 自励恒压励磁装置

$$\cos \alpha = \frac{2U_D}{0.45U_2} - 1 = \frac{2 \times 50}{0.45 \times 240} - 1 = -0.074$$

$$\alpha = \arccos(-0.074) = 94.2^\circ$$

$$\theta = 180^\circ - \alpha = 180^\circ - 94.2^\circ = 85.8^\circ$$

负载电流平均值为

$$I_{I_{\alpha}} = \frac{U_D}{R_{I_{\alpha}}} = \frac{50}{3} = 16.7\text{A}$$

晶闸管和续流二极管的电流平均值和有效值为

$$\omega L = 2\pi f L = 2 \times 3.14 \times 50 \times 0.25 = 78.5\Omega \gg R$$

负载电流的波形近似为一条平线。

$$I_{IzT} = \frac{\theta}{360^\circ} I_{Iz} = \frac{85.8^\circ}{360^\circ} \times 16.7 = 3.98 \text{ A}$$

$$I_T = \sqrt{\frac{\theta}{360^\circ}} I_{Iz} = \sqrt{\frac{85.8^\circ}{360^\circ}} \times 16.7 = 8.15 \text{ A}$$

$$I_{Iz\alpha} = \frac{360^\circ - \theta}{360^\circ} I_{Iz} = \frac{360^\circ - 85.8}{360^\circ} \times 16.7 = 12.7 \text{ A}$$

$$I_\alpha = \sqrt{\frac{360^\circ - \theta}{360^\circ}} I_{Iz} = \sqrt{\frac{360^\circ - 85.8}{360^\circ}} \times 16.7 = 14.6 \text{ A}$$

$$U_{vfm} = \sqrt{2} U_2 = \sqrt{2} \times 240 = 339 \text{ V}$$

选用额定电流为10A，正反向重复峰值电压为600V的晶闸管和额定电流为20A，最大反向电压为400V的整流二极管。

### 三、单相全波晶闸管整流电路

单相全波晶闸管整流电路如图8-11所示。

#### 1. 电阻性负载时的主要参数

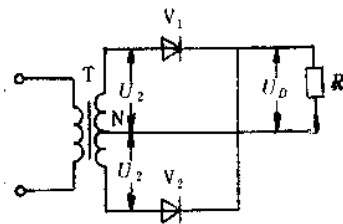


图8-11 单相全波晶闸管整流电路

$$U_{Iz} = 0.9 U_2 \frac{1 + \cos \alpha}{2}$$

$$U = U_2 \sqrt{\frac{1}{2\pi} \sin 2\alpha + \frac{\pi - \alpha}{\pi}}$$

$$I_{Iz} = \frac{U_{Iz}}{R_{Iz}} = 0.9 \frac{U_2}{R_{Iz}} \frac{1 + \cos \alpha}{2}$$

$$I = \frac{U}{R_{fx}} = \frac{U_2}{R_{fx}} \sqrt{\frac{1}{2\pi} \sin 2\alpha + \frac{\pi - \alpha}{\pi}}$$

$$\cos \varphi = \frac{UI}{U_2 I} = \sqrt{\frac{1}{2\pi} \sin 2\alpha + \frac{\pi - \alpha}{\pi}}$$

## 2. 电感性负载时的主要参数

$$U_{fx} = 0.9U_2 \cos \alpha$$

$$U_{\sigma/m} = 2\sqrt{2}U_2$$

若并联续流二极管，计算公式和电阻性负载一样。

## 四、单相桥式晶闸管整流电路

### 1. 单相半控桥式整流

#### (1) 电阻性负载时的主要参数

$$U_{fx} = 0.9U_2 \frac{1 + \cos \alpha}{2}$$

$$I_{fx} = \frac{U_{fx}}{R_{fx}} = 0.9 \frac{U_2}{R_{fx}} \frac{1 + \cos \alpha}{2}$$

$$I = \frac{U_2}{R_{fx}} \sqrt{\frac{1}{2\pi} \sin 2\alpha + \frac{\pi - \alpha}{\pi}}$$

$$U_{\sigma/m} = \sqrt{2}U_2$$

(2) 电感性负载 一般加接续流二极管，流过晶闸管的平均电流为

$$I_{VT} = \frac{\theta}{360^\circ} I_{fx}$$

流过续流二极管平均电流为

$$I_{\sigma} = \frac{180^\circ - \theta}{180^\circ} I_{fx}$$

电流的有效值为

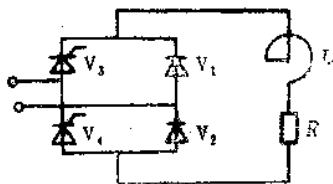
$$I_T = \sqrt{\frac{\theta}{360^\circ}} I_{fx}$$

$$I_\sigma = \sqrt{\frac{180^\circ - \theta}{180^\circ}} I_{fx}$$

(3) 串联式半控桥式全波整流 如图8-12所示, 流过晶闸管的平均电流及有效电流为

$$I_{VT} = \frac{360^\circ - \theta}{360^\circ} I_{t2}$$

$$I_T = \sqrt{\frac{360^\circ - \theta}{360^\circ}} I_{t2}$$



2. 单相全控桥式整流 图8-12 串联式半控桥式全波整流

(1) 电阻性负载时的主要参数 计算公式和半控桥式整流一样。

(2) 电感性负载时的主要参数

$$U_{t2} = 0.9U_2 \cos\alpha$$

$$U_{v1m} = \sqrt{2} U_2$$

其他计算公式和单相全波一样。

例8-11 电感性负载采用单相半控桥式有续流二极管整流电路, 负载电阻为  $10\Omega$ , 输入电压为  $220V$ , 晶闸管控制角  $\alpha = 30^\circ$ , 求流过晶闸管、续流二极管的电流平均值和有效值, 并选择晶闸管和续流二极管。

输出电压平均值为

$$\begin{aligned} U_{t2} &= 0.9U_2 \frac{1 + \cos\alpha}{2} \\ &= 0.9 \times 220 \times \frac{1 + \cos 30^\circ}{2} \\ &= 185V \end{aligned}$$

负载电流平均值为

$$I_{t2} = \frac{U_{t2}}{R_{t2}} = \frac{185}{10} = 18.5A$$

晶闸管及整流管每周期的导电角为

$$\theta = 180^\circ - \alpha = 180^\circ - 30^\circ = 150^\circ$$

续流二极管每周期导电角为

$$360^\circ - 2\theta = 360^\circ - 2 \times 150^\circ = 60^\circ$$

电流的平均值和有效值为

$$I_{VT} = \frac{\theta}{360^\circ} I_{Tz} = \frac{150^\circ}{360^\circ} \times 18.5 = 7.71 \text{ A}$$

$$I_{Vz} = \frac{180^\circ - \theta}{180^\circ} I_{Tz} = \frac{180^\circ - 150^\circ}{180^\circ} \times 18.5 = 3.08 \text{ A}$$

$$I_T = \sqrt{\frac{\theta}{360^\circ}} I_{Tz} = \sqrt{\frac{150^\circ}{360^\circ}} \times 18.5 = 11.9 \text{ A}$$

$$I_z = \sqrt{\frac{180^\circ - \theta}{180^\circ}} I_{Tz} = \sqrt{\frac{180^\circ - 150^\circ}{180^\circ}} \times 18.5 = 7.55 \text{ A}$$

晶闸管承受的最大正反向电压及额定电压为

$$U_{vfm} = \sqrt{2} U_2 = \sqrt{2} \times 220 = 311 \text{ V}$$

$$U_{DKM} = (1.5 \sim 2) U_{vfm} = (1.5 \sim 2) \times 311 \\ = (467 \sim 622) \text{ V}$$

晶闸管的额定电流为

$$I_{T(AV)} = \frac{K_1 I_{Tz}}{1.57 K_2} = \frac{1.57 \times 18.5}{1.57 \times 2} = 9.25$$

续流二极管承受的最大反向电压为

$$U_{vfm} = \sqrt{2} U_2 = \sqrt{2} \times 220 = 311 \text{ V}$$

选用10A、500V的晶闸管及10A、400V的整流二极管。

**例8-12** 电阻性负载单相桥式可控整流电路，需要可调直流电压  $U_{Tz} = 0 \sim 50 \text{ V}$ ， $I_{Tz} = 0 \sim 8 \text{ A}$ ，若晶闸管的导通为  $180^\circ$ ，选择整流元件。

当  $\theta = 180^\circ$  时， $\alpha = 0^\circ$ ， $U_{Tz} = 50 \text{ V}$ ， $I_{Tz} = 8 \text{ A}$ ，则有

$$U_2 = \frac{2U_{Tz}}{0.9(1 + \cos\alpha)} = \frac{2 \times 50}{0.9(1 + \cos 0^\circ)} = 55.6 \text{ V}$$

$$U_{vfm} = \sqrt{2} U_2 = \sqrt{2} \times 55.6 = 786 \text{ V}$$

流过晶闸管及二极管的平均电流都为

$$\frac{1}{2} I_{Tz} = \frac{1}{2} \times 8 = 4 \text{ A}$$

选用5A、200V的整流元件。



### 第三节 放大器电路计算

#### 一、交流放大电路

##### 1. 静态工作点的计算

通过基极电源  $E_b$  和基极电阻  $R_b$ ，给基极回路提供一定的静态基极电流  $I_b$ ，从而通过晶体管放大作用和集电极电阻的作用，使集电极保持一定的静态电流  $I_c$  和静态电压  $U_{ce}$ ，通常称对应某一  $I_b$  的  $I_c$  和  $U_{ce}$  为直流工作点，电路如图8-13所示，其参数为

$$I_b = \frac{E_b - U_{be}}{R_b}$$

$$I_c = \beta I_b$$

$$U_{ce} = E_c - I_c R_c$$

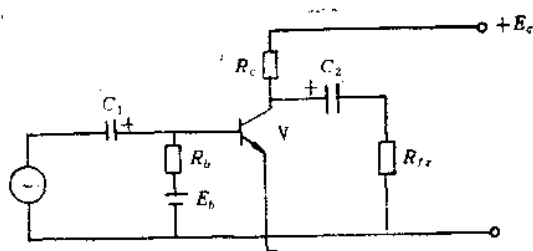


图8-13 交流放大器

- 式中  $I_b$ ——晶体管基极的直流偏置电流；  
 $I_c$ ——晶体管集电极直流电流；  
 $R_c$ ——集电极电阻；  
 $E_c$ ——集电极电源；  
 $R_b$ ——基极偏流电阻；  
 $E_b$ ——基极电源；  
 $U_{be}$ ——基极-发射极之间电压；  
 $U_{ce}$ ——集电极-发射极之间电压；

$\beta$ ——电流放大倍数。

例8-13 在图8-13中, 已知  $E_c = 20\text{V}$ ,  $R_c = 6\text{k}\Omega$ ,  $R_b = 470\text{k}\Omega$ ,  $\beta = 43$ , 计算静态工作点。

$$I_b = \frac{E_c - U_{be}}{R_b} = \frac{20 - 0.7}{470 \times 10^3} = 0.041\text{mA}$$

$$I_c = \beta I_b = 43 \times 0.041 = 1.76\text{mA}$$

$$U_{ce} = E_c - I_c R_c = 20 - 1.76 \times 10^{-3} \times 6 \times 10^3 = 9.4\text{V}$$

## 2. 放大倍数的计算

作为放大器需要比较其输入、输出信号(电压、电流、功率)的关系。

### (1) 电流放大倍数

$$K_i = \frac{I_{ic}}{I_{ir}} \approx -\frac{I_c}{I_b} = -\beta$$

### (2) 电压放大倍数

$$K_u = \frac{U_{ic}}{U_{ir}} = \frac{-I_c R_c}{I_b r_{be}} = -\beta \frac{R_c}{r_{be}}$$

### (3) 功率放大倍数

$$K_p = \frac{I_{ic} U_{ic}}{I_{ir} U_{ir}} = K_i K_u = \beta^2 \frac{R_c}{r_{be}}$$

式中  $U_{ic}$ ——输出电压;

$U_{ir}$ ——输入电压;

$I_{ic}$ ——输出电流;

$I_{ir}$ ——输入电流;

$r_{be}$ ——晶体管输入端的交流等效电阻;

“-”——负号表示输出电压与输入电压反相。

例8-14 在图8-13中, 已知  $r_{be} = 0.8\text{k}\Omega$ ,  $U_{ir} = 10\text{mA}$ , 若负载电阻  $R_{Lc} = 5\text{k}\Omega$ , 求电压放大倍数  $K_u$ 。

$$I_b = \frac{U_{ir}}{r_{be}} = \frac{10 \times 10^{-3}}{0.8 \times 10^3} = 12.5\mu\text{A}$$

$$I_c = \beta I_b = 43 \times 12.5 = 538 \mu\text{A} = 0.538 \text{mA}$$

$$R'_{i_1} = \frac{R_c R_{fz}}{R_c + R_{fz}} = \frac{6 \times 5}{6 + 5} = 2.73 \text{ k}\Omega$$

$$U_{i_c} = -I_c R'_{i_1} = -0.538 \times 10^{-3} \times 2.73 \times 10^3 = -1.47 \text{V}$$

$$K_u = \frac{U_{fz}}{U_{i_c}} = -\frac{1.47}{10 \times 10^{-3}} = -147$$

**例8-15** 晶体管交流放大器 NPN 晶体管 3DG4 的参数  $r_{be} = 0.8 \text{k}\Omega$ ,  $\beta = 45$ , 其他元件如图8-14所示, 求晶体管的静态工作点和电压放大倍数。

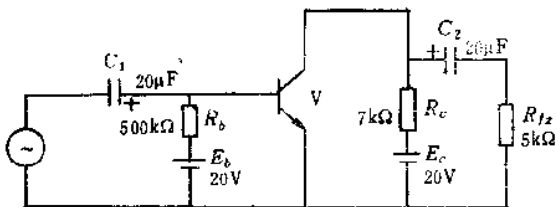


图8-14 NPN晶体管交流放大器

$$I_b = \frac{E_b - U_{be}}{R_b} = \frac{20 - 0.7}{500 \times 10^3} = 0.0386 \text{mA}$$

$$I_c = \beta I_b = 45 \times 0.0386 = 1.74 \text{mA}$$

$$U_{ce} = E_c - I_c R_c = 20 - 1.74 \times 10^{-3} \times 7 \times 10^3 = 9.71 \text{V}$$

$$\begin{aligned} K_u &= -\beta \frac{R'_c}{r_{be}} = -\beta \frac{R_c R_{fz}}{r_{be}(R_c + R_{fz})} \\ &= -45 \frac{5 \times 7}{0.8(5 + 7)} = -164 \end{aligned}$$

**例8-16** 晶体管放大器 PNP 晶体管的参数  $r_{be} = 1.3 \text{k}\Omega$ ,  $\beta = 35$ , 其他元件参数如图8-15所示, 求晶体管静态工作点和电压放大倍数。

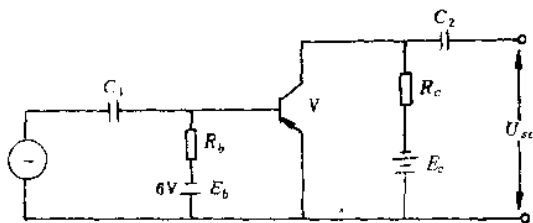


图8-15 PNP晶体管交流放大器

$$I_b = \frac{E_b - U_{be}}{R_b} = \frac{6 - 0.35}{130 \times 10^3} = 43.5 \mu\text{A}$$

$$I_c = \beta I_b = 35 \times 43.5 = 1520 \mu\text{A} = 1.52 \text{ mA}$$

$$U_{ce} = E_c - I_c R_c = 6 - 1.52 \times 10^{-3} \times 2.2 \times 10^3 = 3.34 \text{ V}$$

$$K_u = -\beta \frac{R_c}{r_{be}} = -35 \times \frac{2.2}{1.3} = -59$$

### 3. 单管交流放大器的设计举例

例8-17 要求设计一个电压放大倍数  $K_u \geq 70$  的单管放大电路，已知输入交流电压  $U_{ir} = 20 \text{ mV}$ ，负载电阻  $R_{L'} = 2.2 \text{ k}\Omega$ ，若选用低频小功率晶体管 3AX21， $\beta = 45$ ， $r_{be} = 600 \Omega$ ，电源电压  $E_c = 12 \text{ V}$

(1) 首先选定电路图如图8-16所示。

(2)  $I_b$  的选择 应考虑到不使输入信号因截止而发生失真现象，必须满足  $I_b > I_{bm}$ （交流  $i_b$  的峰值），而

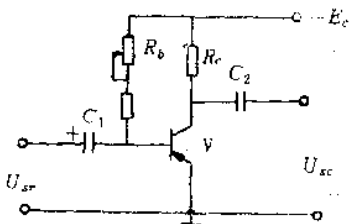


图8-16 单管交流放大器

$$I_{bm} = \frac{U_{ir}}{r_{be}} = \frac{\sqrt{2} U_{ir}}{r_{be}} = \frac{\sqrt{2}}{600} \times 20 \times 10^{-3}$$

$$= 47 \mu\text{A}$$

选择  $I_b = 50\mu\text{A}$

$$R_b = \frac{E_c}{I_b} = \frac{12}{50 \times 10^{-6}} = 240\text{k}\Omega$$

$$I_c = \beta I_b = 45 \times 50 = 2250\mu\text{A} = 2.25\text{mA}$$

(3)  $R_c$  的选择 为保证晶体管不饱和, 最小的管压降  $U_{ce}$  不小于  $0.5\text{V}$ , 即

$$(U_{ce})_{\min} = E_c - I_c R_c - I_{cm} R'_{fs} > 0.5\text{V}$$

由于  $R_c > R'_{fs}$  为简化计算, 则令

$$E_c - (I_c + I_{cm}) R_c > 0.5\text{V}$$

$$E_c - (I_c + I_{cm}) R_c = 1\text{V}$$

$$I_{cm} = \beta I_{bm} = 45 \times 47 = 2120\mu\text{A} \approx 2.12\text{mA}$$

$$R_c = \frac{E_c - 1}{I_c + I_{cm}} = \frac{12 - 1}{(2.25 + 2.12) \times 10^{-3}} = 2.52\text{k}\Omega$$

选择  $R_c = 2.7\text{k}\Omega$

(4) 计算电压放大倍数

$$R'_{fs} = \frac{R_c R_{fs}}{R_c + R_{fs}} = \frac{2.7 \times 2.2}{2.7 + 2.2} = 1.21\text{k}\Omega$$

$$K_u = -\beta \frac{R'_{fs}}{r_{be}} = -45 \frac{1.21}{0.6} = -91$$

$K_u = 91 > 70$ , 满足要求。

#### 4. 晶体管放大器的偏置电路

为了建立放大器的合适的静态工作点, 需要供给一定的基极直流电流  $I_b$ , 这个电流常称为偏流, 而提供偏流的电路称为偏置电路。晶体管放大器的工作点受环境温度变化及晶体管参数不一致性的影响很大, 而实际应用中要求放大器的工作点是稳定的, 因此需要采取稳定工作点的措施。

(1) 固定偏置电路 该电路如图8-17所示, 其基极电流为

$$I_b = \frac{E_c - U_{be}}{R_b} \approx \frac{E_c}{R_b}$$

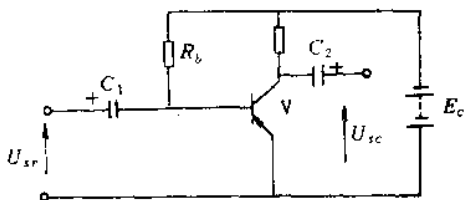


图8-17 固定偏置电路

例8-18 已知  $E_c = 12\text{V}$ ,  $R_c = 2.2\text{k}\Omega$ ,  $I_b = 50\mu\text{A}$ ,  $\beta = 40$ , 求  $R_b$ 、 $U_{ce}$ 。

$$R_b \approx \frac{E_c}{I_b} = \frac{12}{50 \times 10^{-6}} = 240\text{k}\Omega$$

$$I_c = \beta I_b = 40 \times 50 \times 10^{-6} = 2\text{mA}$$

$$U_{ce} = E_c - I_c R_c = 12 - 2 \times 10^{-3} \times 2.2 \times 10^3 = 7.6\text{V}$$

(2) 电压负反馈偏置电路 该电路如图8-18所示, 其基极电流为

$$I_b = \frac{U_{ce} - U_{be}}{R_b} \approx \frac{U_{ce}}{R_b} = \frac{E_c - I_c R_c}{R_b}$$

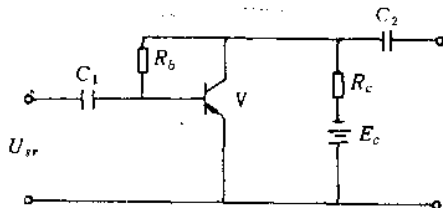


图8-18 电压负反馈偏置电路

例8-19 已知  $E_c = 15\text{V}$ ,  $U_{ce} = 5\text{V}$ ,  $I_c = 2.5\text{mA}$ ,  $\beta = 50$ , 求偏置电阻  $R_b$  和集电极电阻  $R_c$ 。

$$E_c = U_{ce} + I_c R_c$$

$$R_c = \frac{E_c - U_{ce}}{I_c} = \frac{15 - 5}{2.5 \times 10^{-3}} = 4\text{k}\Omega$$

$$I_b = \frac{I_c}{\beta} = \frac{2.5}{50} = 0.05 \text{ mA}$$

$$I_b R_b = U_{ce} - U_{be} \approx U_{ce}$$

$$R_b = \frac{U_{ce}}{I_b} = \frac{5}{0.05 \times 10^{-3}} = 100 \text{ k}\Omega$$

(3) 分压式电流负反馈偏置电路 该电路如图8-19所示, 其分压电流为

$$U_b = E_c - I_1 R_{b1} = E_c - (I_2 + I_b) R_{b1}$$

$$I_1 \approx I_2 \gg I_b$$

锗管

$$I_1 \approx I_2 = (10 \sim 20) I_b$$

硅管

$$I_1 \approx I_2 = (5 \sim 10) I_b$$

$$U_b \approx I_2 R_{b2}$$

$$I_e = \frac{E_c}{R_{b1} + R_{b2}}$$

$$R_{b2} \approx \frac{I_c R_{ce}}{I_2}$$

$$R_{b1} = \frac{E_c - I_2 R_{b2}}{I_2}$$

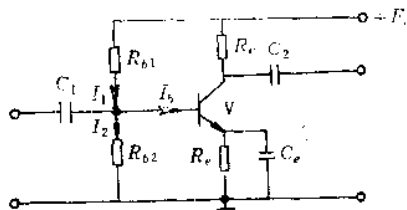


图8-19 分压式电流负反馈偏置电路

$$U_e = (0.1 \sim 0.2) E_c$$

例8-20 已知  $E_c \approx 12\text{V}$ ,  $U_{ce} = 5\text{V}$ ,  $I_c = 1.2\text{mA}$ ,  $\beta = 50$ , 求偏置电阻  $R_{b1}$ 、 $R_{b2}$  及  $R_e$ 、 $R_c$ 。

取  $U_e = 0.7\text{V}$ , 则有

$$R_e = \frac{U_e}{I_e} \approx \frac{U_e}{I_c} = \frac{0.7}{1.2 \times 10^{-3}} = 583 \Omega$$

$$R_c = \frac{E_c - U_{ce} - U_e}{I_c} = \frac{12 - 5 - 0.7}{1.2 \times 10^{-3}} = 6.3 \text{ k}\Omega$$

$$I_b = \frac{I_c}{\beta} = \frac{1.2}{50} = 0.024 \text{ mA}$$

$$I_2 = \frac{E_c}{R_{b1} + R_{b2}} = 10I_b = 10 \times 0.024 = 0.24 \text{ mA}$$

$$R_{c2} = \frac{I_c R_c}{I_2} = \frac{1.2 \times 10^{-3} \times 583}{0.24 \times 10^{-3}} = 2.43 \text{ k}\Omega$$

$$R_{b1} = \frac{E_c - I_2 R_{b2}}{I_2} = \frac{12 - 0.24 \times 10^{-3} \times 2.43 \times 10^3}{0.24 \times 10^{-3}} = 48.4 \text{ k}\Omega$$

例8-21 如果  $E_c = 12\text{V}$ ,  $R_c = 2.2\text{k}\Omega$ ,  $I_c = 1.8\text{mA}$ ,  $\beta = 60$ , 求  $R_{b1}$ 、 $R_{b2}$ 、 $R_{c2}$

取  $U_e = 0.15E_c = 0.15 \times 12 = 1.8\text{V}$ , 则有

$$R_e = \frac{U_e}{I_e} \approx \frac{U_e}{I_c} = \frac{1.8}{1.8 \times 10^{-3}} = 1 \text{ k}\Omega$$

$$I_b = \frac{I_c}{\beta} = \frac{1.8}{60} = 0.03\text{mA}$$

$$I_2 = 10I_b = 10 \times 0.03 = 0.3\text{mA}$$

取  $U_{be} = 0.7\text{V}$ , 则有

$$U_b = U_{be} + U_e = 0.7 + 1.8 = 2.5\text{V}$$

$$I_2 R_{b2} = U_b$$

$$R_{b2} = \frac{U_b}{I_2} = \frac{2.5}{0.3 \times 10^{-3}} = 8.3\text{k}\Omega$$

$$R_{b1} = \frac{E_c - U_b}{I_2 + I_b} = \frac{12 - 2.5}{(0.3 + 0.03) \times 10^{-3}} = 29 \text{ k}\Omega$$

电流反馈另一种计算方法 如图8-20所示, 其各参数如下:

$$I_2 \approx I_1 = \frac{E_c}{R_{b1} + R_{b2}}$$

$$U_{R_{b2}} = I_2 R_{b2} = \frac{E_c}{R_{b1} + R_{b2}} R_{b2}$$

$$U_{R_{b2}} = U_{R_e} + U_{e_b}$$

$$\frac{E_c}{R_{b1} + R_{b2}} = A I_b \quad (\text{其中 } A = 5 \sim 20)$$



$$\frac{E_c R_{b1}}{R_{b1} + R_{b2}} \approx U_{be} + U_{R_e} \approx U_{R_e}$$

$$\approx I_c R_e = \beta I_b R_e$$

$$R_{b1} = \frac{\beta}{A} \left( \frac{E_c}{I_c} - R_e \right)$$

$$R_{b2} = \frac{\beta}{A} R_e$$

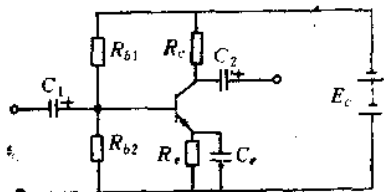


图8-20 另一种电流反馈偏置电路

例8-22 某晶体管交流放大器用3AX31锗管,  $\beta = 60$ ,  $E_c = 6\text{V}$ ,  $R_c = 2.2\text{k}\Omega$ , 设  $I_c = 1.2\text{mA}$ , 试求三种偏置电路的偏置电阻。

(1) 固定偏置电路的电阻

$$R_b = \frac{E_c}{I_c} - \beta = \frac{6}{1.2 \times 10^{-3}} \times 60 = 300\text{k}\Omega$$

(2) 电压负反馈偏置电路的电阻

$$R_b = \frac{E_c - I_c R_c}{I_b} - \beta = \frac{6 - 1.2 \times 10^{-3} \times 2.2 \times 10^3}{1.2 \times 10^{-3}} \times 60$$

$$= 168\text{k}\Omega$$

(3) 电流负反馈偏置电路的电阻 取  $U_{R_e} = 2\text{V}$ , 则有

$$R_e = \frac{U_{R_e}}{I_c} = \frac{2}{1.2 \times 10^{-3}} = 1.67\text{k}\Omega$$

取  $A = 10$

$$R_{b1} = \frac{\beta}{A} \left( \frac{E_c}{I_c} - R_e \right) = \frac{60}{10} \left( \frac{6}{1.2 \times 10^{-3}} - 1.67 \times 10^3 \right)$$

$$= 20\text{k}\Omega$$

$$R_{b2} = \frac{\beta}{A} R_e = \frac{60}{10} \times 1.67 = 10\text{k}\Omega$$

5. 工作点稳定的典型电路

该电路如图8-21所示, 其各参数为

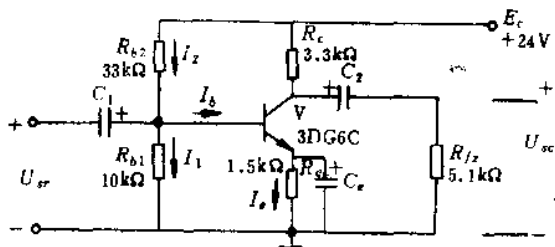


图8-21 工作点稳定的典型电路

$$I_1 \gg I_b$$

$$U_b \approx E_c \frac{R_{b1}}{R_{b1} + R_{b2}}$$

$$U_b \gg U_{be}$$

$$I_e \approx \frac{U_b - U_{be}}{R_e} \approx \frac{U_b}{R_e}$$

$$I_1 \geq (5 \sim 10) I_b$$

$$U_b \geq (5 \sim 10) U_{be}$$

$$I_c \approx I_e$$

$$U_{ce} = E_c - I_c R_c - I_e R_e \approx E_c - I_c (R_c + R_e)$$

$$I_b = \frac{I_c}{\beta}$$

、放大器交流通道等效电路，如图8-22所示。

考虑到  $R_e$  有很大的旁路电容，对交流信号可看成发射极直接接地，该电路参数如下：

$$R_b = \frac{R_{b1} R_{b2}}{R_{b1} + R_{b2}}$$

$$R_{f_e} = \frac{R_c R_{f_e}}{R_c + R_{f_e}}$$

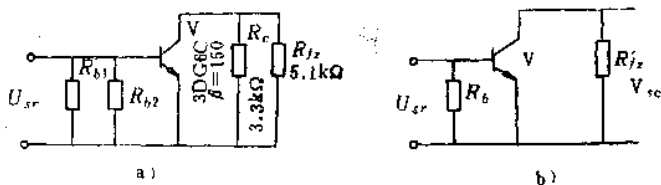


图8-22 放大器交流通道等效电路

$$U_{sr} = I_b r_{be}$$

$$U_{sc} = -I_c R'_L$$

$$K_u = \frac{U_{sc}}{U_{sr}} = -\frac{I_c R'_L}{I_b r_{be}} = -\beta \frac{R'_L}{r_{be}}$$

例8-23 在图8-22中, 已知  $R_{b1} = 10\text{k}\Omega$ ,  $R_{b2} = 33\text{k}\Omega$ ,  $E_c = +24\text{V}$ ,  $R_e = 1.5\text{k}\Omega$ ,  $R_c = 3.3\text{k}\Omega$ , 晶体管3DC6C的  $\beta = 150$ ,  $r_{be} \approx 1.4\text{k}\Omega$ , 当  $R'_L = 5.1\text{k}\Omega$  时, 求晶体管电压放大倍数  $K_u$ 。

$$U_b \approx E_c \frac{R_{b1}}{R_{b1} + R_{b2}} = 24 \times \frac{10}{10 + 33} = 5.6\text{V}$$

$$I_c \approx I_e = \frac{U_b - U_{be}}{R_e} \approx \frac{U_b}{R_e} = \frac{5.6}{1.5 \times 10^3} = 3.7\text{mA}$$

$$U_{ce} = E_c - I_c(R_c + R_e) = 24 - 3.7 \times 10^{-3}(3.3 + 1.5) \times 10^3 = 6\text{V}$$

$$I_b = \frac{I_c}{\beta} = \frac{3.7}{150} = 0.025\text{mA}$$

$$R_b = \frac{R_{b1}R_{b2}}{R_{b1} + R_{b2}} = \frac{10 \times 33}{10 + 33} = 7.7\text{k}\Omega$$

$$R'_L = \frac{R_c R'_L}{R_c + R'_L} = \frac{3.3 \times 5.1}{3.3 + 5.1} = 2\text{k}\Omega$$

$$K_u = -\beta \frac{R'_L}{r_{be}} = -150 \frac{2}{1.4} = -214$$

例8-24 要求设计一个工作点稳定的单管放大器, 已知负载

电阻  $R_{T_s} = 4 \text{ k}\Omega$ ，晶体管的电流放大倍数  $\beta = 50$ ，信号频率  $f = 1 \text{ kHz}$ ，放大器的电压放大倍数  $|K_u| \geq 80$ ，输出端电压有效值  $U_{ic} \geq 2.5 \text{ V}$ 。

(1) 选择电路图，如图8-23所示。

(2) 具体计算

$$U_{icM} = \sqrt{2} U_{ic} = 1.41 \times 2.5 = 3.5 \text{ V}$$

留有余量按  $U_{icM} = 4 \text{ V}$

$$U_{rrM} = \frac{U_{icM}}{|K_u|} = \frac{4}{100} = 0.04 \text{ V}$$

留有余量取  $K = 100$

若选集电极静态电流为  $1 \sim 2 \text{ mA}$ ，输入电阻  $r_{be}$  按  $1 \text{ k}\Omega$  估算，则有

$$I_{bM} = \frac{U_{rrM}}{r_{be}} \approx \frac{0.04}{1 \times 10^3} = 0.04 \text{ mA}$$

$$I_{cM} = \beta I_{bM} = 50 \times 0.04 = 2 \text{ mA}$$

按晶体管特性曲线（如果无特性曲线，可直接在  $U_{ce}-I_c$  坐标上）画出  $2U_{icM}$  和  $2I_{cM}$  所规定的矩形。

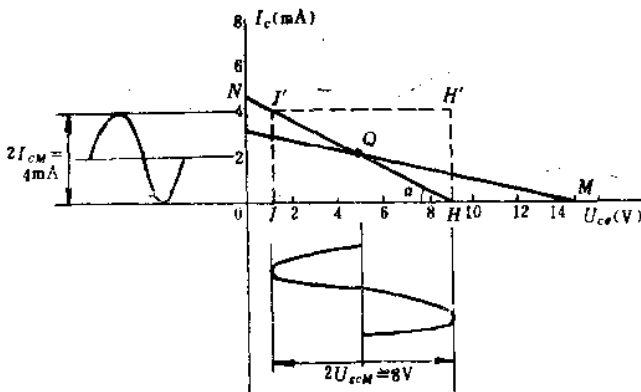


图8-23 晶体管特性曲线

考虑到管饱和压降为  $1\text{V}$  左右,  $JJ'$  选在  $U_{ce} = 1\text{V}$ ,  $JH$  选在  $I_c = 0$

$$\text{tg}\alpha = \frac{JJ'}{HJ} = \frac{2I_{cM}}{2I'_{cM}} = \frac{1}{R'_{iz}}$$

$$R'_{iz} = \frac{U_{icM}}{I_{cM}} = \frac{4}{2 \times 10^{-3}} = 2\text{ k}\Omega$$

$$\frac{1}{R_c} = \frac{1}{R'_{iz}} - \frac{1}{R_{iz}} = \frac{1}{2} - \frac{1}{4} = \frac{1}{4}$$

$$R_c = 4\text{ k}\Omega$$

(3) 根据工作点稳定条件

$$U_b \geq (5 \sim 10)U_{be} = 3 \sim 5\text{ V}$$

选  $U_b = 4\text{ V}$

$$R_s = \frac{U_s}{I_s} \approx \frac{U_b}{I_c} = \frac{4}{2 \times 10^{-3}} = 2\text{ k}\Omega$$

$$E_c \approx U_{ce} + I_c(R_c + R_s) = 5 + 2 \times 10^{-3}(3 + 2) \times 10^3 = 15\text{ V}$$

(4) 按工作点另一稳定条件

$$I_1 \geq (5 \sim 10)I_b$$

$$I_b = \frac{I_c}{\beta} = \frac{2}{50} = 0.04\text{ mA}$$

选  $I_1 = 0.2\text{ mA}$

$$R_{b1} \approx \frac{U_b}{I_1} = \frac{4}{0.2 \times 10^{-3}} = 20\text{ k}\Omega$$

$$R_{b2} = \frac{E_c - U_b}{I_1} = \frac{15 - 4}{0.2 \times 10^{-3}} = 55\text{ k}\Omega$$

$$P_c = U_{ce}I_c = 5 \times 2 \times 10^{-3} = 10\text{ mW}$$

(5) 晶体管选择

选用3DG6A  $P_{cm} = 100\text{ mW}$   $BV_{CEO} = 15\text{ V}$

(6) 耦合电容  $C_1$ 、 $C_2$  一般选几十  $\mu\text{F}$ ,  $C_3$  选  $100\mu\text{F}$ 。

6. 具有电压负反馈工作点稳定的放大电路 该电路如图8-24

所示, 其参数为

$$I_b = \frac{U_c - U_{be}}{R_b} \approx \frac{U_c}{R_b}$$

$$E_c = (I_c + I_b)R_c + I_b R_b + U_{be}$$

由于  $E_c \gg U_{be}$ ,  $I_c = \beta I_b \gg I_b$

$$E_c \approx I_c R_c + I_b R_b$$

$$= I_c \left( R_c + \frac{R_b}{\beta} \right)$$

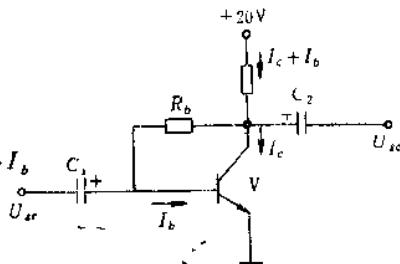


图8-24 电压负反馈放大器

例8-25 已知  $E_c = 20\text{V}$ ,  $\beta = 60$ ,  $R_c = 12\text{k}\Omega$ ,  $R_b = 300\text{k}\Omega$ , 求静态工作点。

$$I_c \approx \frac{E_c}{R_c + \frac{R_b}{\beta}} = \frac{20}{\left(12 + \frac{300}{60}\right) \times 10^3} = 1.18\text{ mA}$$

$$U_{ce} = E_c - I_c R_c = 20 - 1.18 \times 10^{-3} \times 12 \times 10^3 = 5.84\text{ V}$$

$$I_b = \frac{I_c}{\beta} = \frac{1.18}{60} = 0.02\text{ mA} = 20\mu\text{ A}$$

7. 应用晶体管等效电路计算放大器的输入电阻、输出电阻、放大倍数

该电路如图8-25所示, 其参数为

$$r_{ir} = R_{b1} // R_{b2} // r_{be}$$

通常  $r_{be} \ll R_{b1}$ ,  $r_{be} \ll R_{b2}$

$$r_{ir} \approx r_{be}$$

$$r_{ic} \approx R_c$$

$$R'_{is} = R_{i2} // R_c$$

$$K = \frac{U_{ic}}{U_{ir}} = -\beta \frac{R'_{is}}{r_{be}}$$

例8-26 已知工作点稳定的典型放大器, 其  $\beta = 140$ ,  $I_c = 4\text{ mA}$ ,  $r_{be} = 1.2\text{ k}\Omega$ ,  $R_c = 3\text{ k}\Omega$ ,  $R_{i2} = 5\text{ k}\Omega$ , 试计算输入电阻  $r_{ir}$ , 输出电阻  $r_{ic}$ , 放大倍数  $K$ 。

$$r_{ir} = r_{be} // R_{b1} // R_{b2} \approx r_{be} = 1.5\text{ k}\Omega$$

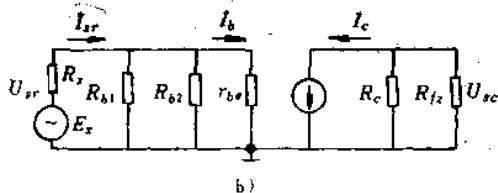
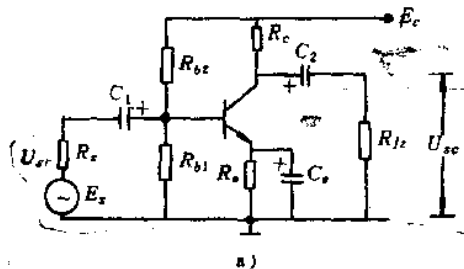


图8-25 放大器及等效电路

$$r_{ic} \approx R_c = 3 \text{ k}\Omega$$

$$R'_{iz} = \frac{R_{Lz} R_c}{R_{Lz} + R_c} = \frac{5 \times 3}{5 + 3} = 1.88 \text{ k}\Omega$$

$$K = \frac{U_{ic}}{U_{ir}} = -\beta \frac{R'_{iz}}{r_{be}} = -140 \frac{1.88}{1.2} = -219$$

若考虑到输入端信号源的内阻  $R_x$  对放大倍数的影响, 则有

$$U_{ir} = E_x \frac{r_{ir}}{R_x + r_{ir}}$$

$$K = \frac{U_{ic}}{E_x} = \frac{U_{ic}}{U_{ir}} \cdot \frac{U_{ir}}{E_x} = \frac{r_{ic}}{R_x + r_{ir}} \cdot \frac{-\beta R'_{iz}}{r_{be}} \approx -\frac{\beta R'_{iz}}{R_x + r_{be}}$$

例8-27 上例中, 如果信号源电压  $E_x = 14 \text{ mV}$ , 信号源内阻  $R_x = 500 \Omega$ , 试求  $K$ ,  $U_{ic}$

$$K = -\frac{\beta R'_{iz}}{R_x + r_{be}} = -\frac{140 \times 1.88 \times 10^3}{500 + 1.2 \times 10^3} = -153$$

$$U_{ic} = K E_x = -153 \times 14 \times 10^{-3} = -2.17 \text{ V}$$

8. 利用输入电阻和输出电阻计算多级放大器的放大倍数  
该电路如图8-26所示, 近似估算公式为

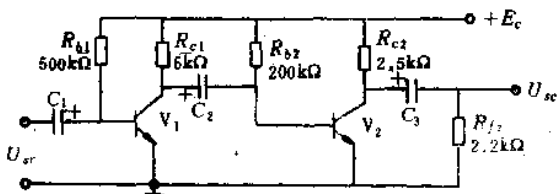


图8-26 两级放大器

$$K = \frac{U_{sc}}{U_{sr}} \approx \frac{U_{sc2}}{U_{sr2}} \cdot \frac{U_{sc1}}{U_{sr1}} = K_1 K_2$$

$$r_{sr2} = r_{be2} // R_{b2} \approx r_{be2}$$

$$R'_{i2} = R_{c1} // r_{sr2} \approx r_{sr2} = r_{be2}$$

$$K = K_1 K_2 \approx \frac{-\beta_1 r_{be2}}{r_{be1}} \cdot \frac{-\beta_2 R'_{i2}}{r_{be2}} = \beta_1 \beta_2 \frac{R'_{i2}}{r_{be1}}$$

例8-28 已知两级放大器的放大倍数  $\beta$  均为 50,  $r_{be1} \approx 1.2 \text{ k}\Omega$ ,  $r_{be2} \approx 0.7 \text{ k}\Omega$ , 计算放大器总的放大倍数  $K$ 。

由于  $R_{b2} \gg r_{be2}$ ,  $r_{sr2} \approx r_{be2}$ , 则有

$$R'_{i2} = \frac{R_{c1} r_{sr2}}{R_{c1} + r_{sr2}} = \frac{5 \times 0.7}{5 + 0.7} = 0.614 \text{ k}\Omega$$

$$K_1 = -\frac{\beta R'_{i2}}{r_{be1}} = \frac{-50 \times 0.614}{1.2} = -26$$

$$R'_{i2} = \frac{R_{c2} R'_{i2}}{R_{c2} + R'_{i2}} = \frac{2.5 \times 2.2}{2.5 + 2.2} = 1.17 \text{ k}\Omega$$

$$K_2 = -\beta \frac{R'_{i2}}{r_{be2}} = -50 \frac{1.17}{0.7} = -84$$

$$K = K_1 K_2 = -26 \times (-84) = 2180$$

估算放大倍数为



$$K = \beta_1 \beta_2 \frac{R_{i2}}{r_{be1}} = 50 \times 50 \frac{1.17}{1.2} = 2440$$

9. 具有电流负反馈的共发射极放大电路

该电路如图8-27所示，其参数为

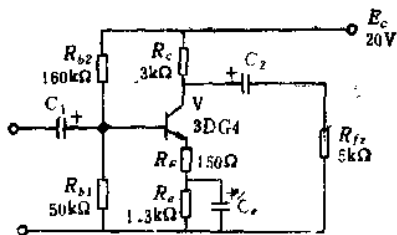


图8-27 电流负反馈共发射极放大电路

$$R_o = \frac{R_{b1} R_{b2}}{R_{b1} + R_{b2}}$$

$$r'_{ie} \approx \frac{U_b}{I_e} = r_{be} + (\beta + 1)R_e$$

由于  $(\beta + 1)R_e \gg r_{be}$ ,  $\beta + 1 \approx \beta$ , 则有

$$r'_{ie} \approx \beta R_e$$

$$r_{ie} = \frac{r'_{ie} R_b}{r'_{ie} + R_b}$$

$$r_{ie} \approx R_e$$

$$K = \frac{U_{ic}}{U_{ir}} = -\beta \frac{R'_{i2}}{r'_{ie}} \approx -\beta \frac{R'_{i2}}{\beta R_e} = -\frac{R'_{i2}}{R_e}$$

例8-2) 已知晶体管的放大倍数  $\beta = 100$ , 其他参数如图8-27所示, 求电压放大倍数  $K$  及  $r_{ie}$ 。

$$R_o = \frac{R_{b1} R_{b2}}{R_{b1} + R_{b2}} = \frac{50 \times 160}{50 + 160} = 38 \text{ k}\Omega$$

$$r'_{ie} \approx \beta R_e = 100 \times 0.15 = 1.5 \text{ k}\Omega$$

$$r_{ie} = \frac{r'_{ie} R_b}{r'_{ie} + R_b} = \frac{1.5 \times 38}{1.5 + 38} = 1.4 \text{ k}\Omega$$

$$R'_{i_z} = \frac{R_c R_{i_z}}{R_c + R_{i_z}} = \frac{3 \times 5}{3 + 5} = 1.9 \text{ k}\Omega$$

$$K = -\frac{R'_{i_z}}{R_F} = -\frac{1.9}{0.15} = -12.5$$

### 10. 射极输出器

射极输出器电路如图8-28所示。

#### (1) 静态工作点

$$E_c = I_b R_b + U_{be} + U_c$$

$$E_c - U_{be} = I_b R_b + I_e R_e = I_b R_b + (\beta + 1) I_b R_e$$

$$I_b = \frac{E_c - U_{be}}{R_b + (\beta + 1) R_e}$$

$$I_e = (\beta + 1) I_b$$

$$U_c = I_e R_e$$

$$U_{ce} = E_c - U_c$$

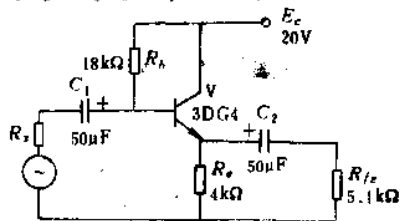


图8-28 射极输出器

#### (2) 输入电阻

$$U_{i_r} = I_b r_{be} + I_e R_e = I_b r_{be} + (\beta + 1) I_b R_e$$

在忽略  $R_b$  的条件下,  $I_{i_r} \approx I_b$ , 则有

$$r'_{i_r} = \frac{U_{i_r}}{I_b} = r_{be} + (\beta + 1) R_e$$

$$r_{be} = r_b + (\beta + 1) \frac{26}{I_e}$$

式中  $r_b$ ——晶体管的基区电阻, 一般小功率管在低频下为  $300\Omega$ ,

对高频管可取  $100 \sim 200\Omega$ 。

若忽略上式  $r_{be}$ ,  $\beta + 1 \approx \beta$ , 则有

$$r'_{i_r} \approx \beta R_e$$

当射极输出有负载时, 则有

$$r'_{i_r} \approx \beta R'_{i_z}$$

再考虑偏流电阻时, 则有

$$r_{i_r} = R_b // r'_{i_r} \approx R_b // \beta R'_{i_z}$$

(3) 输出电阻

$$R'_b = \frac{R'_b R_x}{R_b + R_x}$$

$$r_{ic} = R_s // \frac{R'_b + r_{be}}{\beta + 1} \approx \frac{R_b + r_{be}}{\beta}$$

例8-30 已知晶体管放大倍数  $\beta = 50$ ,  $R_x = 500\Omega$ ,  $U_{be}$  忽略不计, 求静态工作点,  $r_{ic}$ 、 $r_{ic'}$ 、 $r_{be}$ , 其他参数如图8-28所示。

$$I_b \approx \frac{E_c}{R_b + (\beta + 1)R_x} = \frac{20}{[180 + (50 + 1) \times 4] \times 10^3}$$

$$= 0.052 \text{ mA}$$

$$I_e = (\beta + 1)I_b = (50 + 1) \times 0.052 = 2.7 \text{ mA}$$

$$U_e = I_e R_x = 2.7 \times 10^{-3} \times 4 \times 10^3 = 11 \text{ V}$$

$$U_{ce} = E_c - U_e = 20 - 11 = 9 \text{ V}$$

$$r_{be} = r_b + (\beta + 1) \frac{26}{I_e} = 300 + (50 + 1) \frac{26}{2.7} = 790 \Omega$$

$$r_{ic'} \approx R_b // \beta R'_b = R_b // \beta \frac{R_s R_{1r}}{R_s + R_{1r}}$$

$$= 180 // 50 \frac{4 \times 5.1}{4 + 5.1} = 69 \text{ k}\Omega$$

$$R'_b = \frac{R_b R_x}{R_b + R_x} \approx R_x = 500 \Omega$$

$$r_{ic} \approx \frac{R'_b + r_{be}}{\beta} = \frac{500 + 790}{50} = 26 \Omega$$

11. 放大器的低频特性与耦合电容、旁路电容的计算  
该电路如图8-29所示, 其参数为

$$\omega_1 = \frac{1}{(R_x + r_{ic})C_1}$$

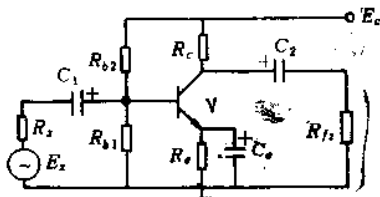


图8-29 低频特性放大器

式中  $\omega_1$ ——输入截止频率;  
 $R_s$ ——信号源内阻。

$$\omega_2 = \frac{1}{(R_{L'} + r_{se})C_2}$$

式中  $\omega_2$ ——输出截止频率。  
 电容一般按下式计算，即

$$C_1 = C_2 = (3 \sim 10) \frac{1}{2\pi f_s R_0}$$

式中  $R_0$ ——与耦合电容  $C_1$ 、 $C_2$  构成回路的电阻值，对输入回路  $R_0 = R_s + R_{i1}$ ，对输出回路  $R_0 = r_{se} + R_{L'}$ 。

$$\omega_s = \frac{1}{R_i' C_s}$$

式中  $\omega_s$ ——下限频率。

$$R_i' = R_c // \frac{R_b' + r_{be}}{1 + \beta}$$

$$R_b' = R_{b1} // R_{b2}$$

例8-31 已知  $R_s = 0.7 \text{ k}\Omega$ ， $r_{se} = 1.5 \text{ k}\Omega$ ，要求放大器的下限频率  $f_s = 2.2 \text{ Hz}$ ，求耦合电容  $C_1$ 。

$$\begin{aligned} C_1 &= \frac{1}{(R_s + r_{se})\omega_s} = \frac{1}{(R_s + r_{se})2\pi f_s} \\ &= \frac{1}{(0.7 + 1.5) \times 10^3 \times 2 \times 3.14 \times 2.2} = 33 \mu\text{F} \end{aligned}$$

例8-32 已知  $R'_b = 0.5\text{k}\Omega$ ,  $R_c = 2.2\text{k}\Omega$ ,  $\beta = 40$ ,  $r_{be} = 1.4\text{k}\Omega$ , 放大器的下限频率  $f_x = 15\text{Hz}$ , 求旁路电容  $C_e$ 。

$$R'_e = \frac{R_c(R'_b + r_{be})}{R'_b + r_{be} + (1 + \beta)R_c} = \frac{2.2(0.5 + 1.4)}{0.5 + 1.4 + (1 + 40) \times 2.2} = 45\Omega$$

$$C_e = \frac{1}{\omega_x R'_e} = \frac{1}{2\pi f_x R'_e} = \frac{1}{2 \times 3.14 \times 15 \times 46} = 236\mu\text{F}$$

## 二、直流放大电路

在直流稳压电源中, 需要将缓慢变化的直流电压信号加以放大, 才能用于自动控制调整元件稳定输出电压, 运用于这种情况下的放大器称为直流放大器。其放大原理、工作点的选择、放大倍数的计算方法等都与交流放大器相似。但是, 也有它的特殊性: 一个是耦合问题, 因为直流放大器不能再使用阻容耦合或变压器耦合, 而只能采用直接耦合等方法; 另一个是零点漂移问题, 当电源电压波动、元件性能变化、温度变化产生的工作点变化, 也会被逐级放大, 在无信号输入时, 就会产生输出信号, 使输出电压严重偏离起始值, 离开原来的额定值而上下波动, 即产生零点漂移现象。为了克服零点漂移, 除了电源稳定、电阻要精选外, 更重要的是采用温度补偿(如电压负反馈、电流负反馈等)电路以稳定放大器的工作点, 而差动放大器电路是克服零点漂移的最有效方法之一。

### 1. 单管放大电路

该电路如图8-30所示, 其参数为

$$I_b \approx I_c = \frac{E_c - U_{be}}{R_c}$$

$$R_E = R_e + r_e$$

$$K_u = \frac{\Delta U_{ce}}{\Delta U_{ie}} = -\frac{\beta R_c}{R_b + \beta R_E}$$

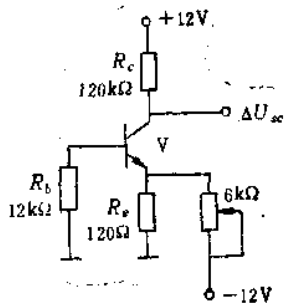


图8-30 单管放大器

例8-33 用单管3DG4C做成的放大器，参数如图8-30所示，当晶体管的放大倍数  $\beta = 50$ ，输出电压  $U_{ce} = 6\text{ V}$  时，试求电压放大倍数。

$$I_{e0} \approx I_c = \frac{E_c - U_{ce}}{R_c} = \frac{12 - 6}{120 \times 10^3} = 0.05\text{ mA}$$

$$R_x = R_e + r_e = 120 + \frac{26}{0.05} = 640\ \Omega$$

$$K_u = \frac{\Delta U_{ce}}{\Delta U_{ir}} = - \frac{\beta R_c}{R_b + \beta R_B} = - \frac{50 \times 120}{12 + 50 \times 0.64} = -136$$

## 2. 典型对称差动式放大电路

该电路如图8-31所示，其参数为

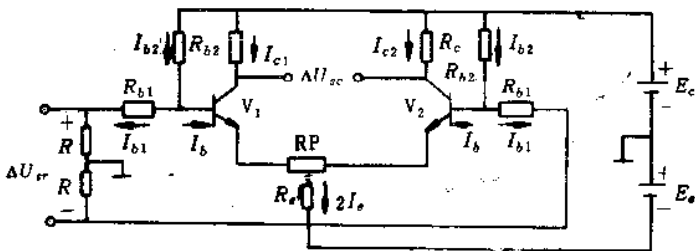


图8-31 典型对称差动式放大电路

$$K = \frac{\Delta U_{ce}}{\Delta U_{ir}} = - \frac{\beta R_c}{R_{b1} + r_{be}} \approx - \frac{\beta R_c}{R_{b1}}$$

若考虑 RP 的作用则有

$$K = - \frac{\beta R_c}{R_{b1} + r_{be} + \frac{1}{2} \beta R_P}$$

输入电阻为

$$r_{rr} = 2 \left( R_{b1} + r_{be} + \frac{1}{2} \beta RP \right) \approx 2(R_B + \beta R_E)$$

式中  $R_B = R_{b1} + r_{b1}$

$$R_E = r_e + \frac{1}{2} RP,$$

$$r_{be} \approx r_b + \beta r_{ee}$$

输出电阻为

$$r_{re} \approx 2R_c$$

例8-34 在图8-31中, 已知  $E_c = E_e = 12V$ ,  $R_{b1} = 20k\Omega$ ,  $R_{b2} = 300k\Omega$ ,  $R_c = 10k\Omega$ ,  $R_e = 10k\Omega$ ,  $RP$  的阻值忽略不计,  $\beta = 50$ , 试求  $U_{rr} = 0$  时的静态工作点和放大倍数。

假设两管子特性完全对称, 当  $U_{rr} = 0$ ,  $U_{e1} = U_{e2}$ ,  $I_{c1} = I_{c2}$ ,  $U_{be} \approx 0.7V$ , 因  $I_b$  不大, 因此  $U_{b1} = U_{b2} \approx 0$ ,  $U_e \approx -0.7V$ , 则有

$$2I_e = \frac{U_e - (-E_e)}{R_e} = \frac{-0.7 + 12}{10 \times 10^3} = 1.13 \text{ mA}$$

$$I_e = I_{c1} = I_{c2} = \frac{1}{2} \times 2 I_e = \frac{1}{2} \times 1.13 = 0.565 \text{ mA}$$

$$U_{e1} = U_{e2} = E_e - I_e R_e = 12 - 10 \times 10^3 \times 0.565 \times 10^{-3} = 6.35 \text{ V}$$

$$I_b = \frac{I_c}{\beta} = \frac{0.565}{50} = 0.0113 \text{ mA}$$

$$I_{b2} \approx \frac{E_c}{R_{b2}} = \frac{12}{300 \times 10^3} = 0.04 \text{ mA}$$

$$I_{b1} = I_{b2} - I_b = 0.04 - 0.0113 = 0.0287 \text{ mA}$$

$$U_b = R_{b1} I_{b1} = 20 \times 10^3 \times 0.0287 \times 10^{-3} = 0.57 \text{ V}$$

由于  $U_b$  不是 0 而是 0.57V, 所以  $U_e$ 、 $I_{b2}$  计算数值可能有误差, 再用等效电路简化输入回路, 如图8-32所示, 简化后的参数为

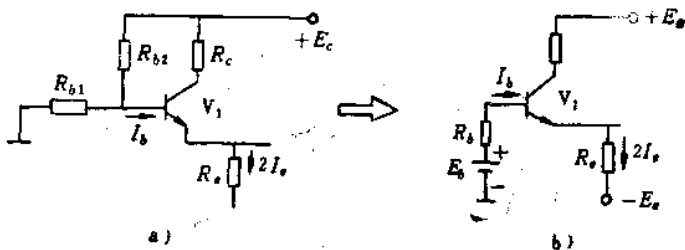


图8-32 等效电路

$$E_b = E_c \frac{R_{b3}}{R_{b1} + R_{b3}} = 12 \times \frac{20}{300 + 20} = 0.75 \text{ V}$$

$$R_b = \frac{R_{b1} R_{b3}}{R_{b1} + R_{b3}} = \frac{20 \times 300}{20 + 300} = 18.8 \text{ k}\Omega$$

$$I_b = \frac{E_b - U_{be} - (-E_s)}{R_b + (\beta + 1)2R_e} = \frac{0.75 - 0.7 + 12}{18.8 + 51 \times 2 \times 10} = 11.6 \text{ mA}$$

$$U_b = E_b - I_b R_b = 0.75 - 0.0116 \times 18.8 \times 10^3 \times 10^{-3} = 0.53 \text{ V}$$

两次估算结果比较  $I_b$  的误差为

$$\frac{11.6 - 11.3}{11.3} = 2.6\%$$

即说明估算可以。

$$r_{be} = 300 + (\beta + 1) \frac{26}{I_e} = 300 + (50 + 1) \times \frac{26}{0.565}$$

$$= 2.6 \text{ k}\Omega$$

$$K = -\frac{\beta R_c}{R_{b1} + r_{be}} = -\frac{50 \times 10}{20 + 2.6} = -22$$

### 3. 单端输出差动式放大电路

该电路如图8-33所示，其参数为

共模放大倍数为



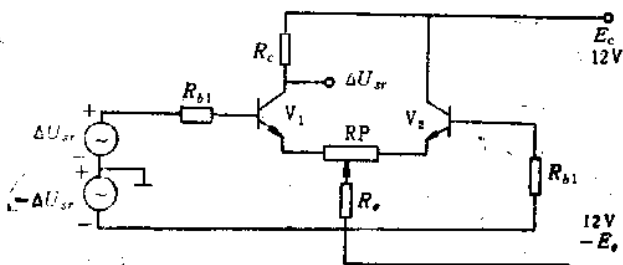


图8-33 单端输出差动式放大电路

$$K_c = \frac{-\beta R_c}{R_{b1} + r_{be} + (\beta + 1) \left( 2R_e + \frac{1}{2} RP \right)} \approx \frac{-R_c}{2R_e}$$

差动放大倍数为

$$K_d = \frac{-\beta R_c}{R_{b1} + r_{be} + (\beta + 1) \frac{1}{2} RP} \approx \frac{-R_c}{\frac{R_{b1} + r_{be}}{\beta} + \frac{RP}{2}}$$

共模抑制比为

$$CMRR = \frac{K_d}{K_c} \approx \frac{2R_e}{\frac{R_{b1} + r_{be}}{\beta} + \frac{RP}{2}}$$

例8-35 在图8-33中, 已知  $R_c = 80\text{k}\Omega$ ,  $R_{b1} = 12\text{k}\Omega$ ,  $R_e = 110\text{k}\Omega$ ,  $RP = 300\Omega$ ,  $\beta = 50$ ,  $r_{be} \approx 16\text{k}\Omega$ , 求  $K_c$ 、 $K_d$ 、 $CMRR$ 。

$$\begin{aligned} K_c &= \frac{-\beta R_c}{R_{b1} + r_{be} + (\beta + 1) \left( 2R_e + \frac{1}{2} RP \right)} \\ &= \frac{-50 \times 80}{12 + 16 + (50 + 1) \left( 2 \times 110 + \frac{1}{2} \times 0.3 \right)} \\ &= -0.36 \end{aligned}$$

$$K_d = \frac{-\beta R_c}{R_{b1} + r_{be} + (\beta + 1) \frac{1}{2} RP}$$

$$= \frac{-50 \times 80}{12 + 16 + (50 + 1) \times \frac{1}{2} \times 0.3} = -112$$

$$CMRR = \frac{K_d}{K_c} = \frac{-112}{0.36} = 311$$

#### 4. 具有恒流源差动式放大电路

该电路如图8-34所示，其参数为

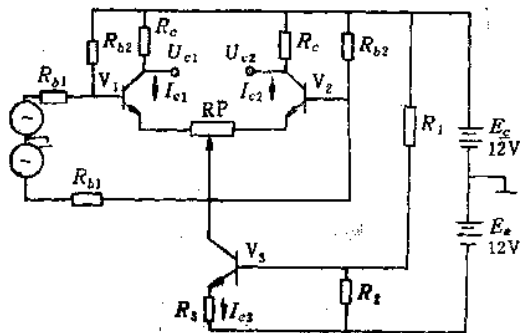


图8-34 具有恒流源差动式放大器

图中  $V_3$ 、 $R_1$ 、 $R_2$ 、 $R_3$  组成恒流源。

放大倍数为

$$|K| = \frac{\beta R_c'}{r_i}$$

式中  $r_i \approx R_i + r_{be} + (\beta + 1) \frac{RP}{2}$

$R_i$  —— 信号源内阻；

$$R'_{i_s} = R_{c1} // \frac{R_{fz}}{2};$$

$$r_{be} = r_b + \beta \frac{26}{I_e}.$$

例8-36 在图8-34中, 已知给定信号  $\Delta U_{sr} = 10\text{mV}$ , 信号源内阻  $R_i = 1\text{k}\Omega$ , 晶体管放大倍数均为 40,  $R_P = 200\Omega$ ,  $I_{c3} = 1.1\text{mA}$ ,  $R_{fz} = 10\text{k}\Omega$ ,  $R_{c1} = 10\text{k}\Omega$ , 求  $R_1$ 、 $R_2$ 、 $R_3$  及放大倍数  $K$ 。

$U_{ce3} \geq 2 \sim 3\text{V}$ , 取  $4\text{V}$

$$U_{R3} \approx E_c - U_{ce3} = 12 - 4 = 8\text{V}$$

$$R_3 = \frac{U_{R3}}{I_{c3}} = \frac{8}{1.1 \times 10^{-3}} = 7.3\text{k}\Omega$$

取  $U_{be3} \approx 0.7\text{V}$ , 则有

$$U_{b3} \approx U_{c3} + U_{be3} = -4 + 0.7 = -3.3\text{V}$$

$$U_{R2} = E_c - U_{b3} = 12 - 3.3 = 8.7\text{V}$$

$$I_{b3} \approx \frac{I_{c3}}{\beta} = \frac{1.1}{40} = 0.028\text{mA}$$

取  $I_{R2} = 10I_{b3} = 10 \times 0.028 = 0.28\text{mA}$

$$R_2 = \frac{U_{R2}}{I_{R2}} = \frac{8.7}{0.28 \times 10^{-3}} = 31\text{k}\Omega$$

设  $I_{R1} \approx I_{R2}$ , 则有

$$R_1 = \frac{E_c + E_c - U_{R2}}{I_{R2}} = \frac{12 + 12 - 8.7}{0.28 \times 10^{-3}} = 55\text{k}\Omega$$

$$R'_{i_s} = \frac{\frac{1}{2} R_{fz} R_{c1}}{\frac{1}{2} R_{fz} + R_{c1}} = \frac{\frac{1}{2} \times 10 \times 10}{\frac{1}{2} \times 10 + 10} = 3.3\text{k}\Omega$$

$$r_{be} = r_b + \beta \frac{26(\text{mV})}{I_e(\text{mA})} = 300 + 40 \times \frac{26}{1.1} = 1.25\text{k}\Omega$$

$$r_i = R_i + r_{be} + (\beta + 1) \frac{R_P}{2}$$

$$= 1 + 1.25 + (40 + 1) \frac{0.2}{2} = 6.35 \text{ k}\Omega$$

$$|K| = \frac{\beta R'_{Lz}}{r_i} = \frac{40 \times 3.3}{6.35} = 21$$

### 5. 具有电流负反馈的直流放大电路

该放大电路如图8-35所示。

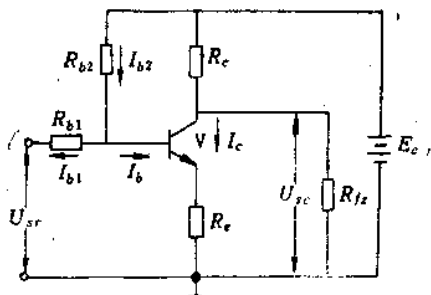


图8-35 电流负反馈的直流放大电路

**例8-37** 设计具有电流负反馈的单管直流放大电路，要求负载电阻  $R_{Lz} = 10 \text{ k}\Omega$ ，输入电压  $U_{sr}$  由  $0 \text{ V}$  变到  $1 \text{ V}$ （即  $\Delta U_{sr} = 1 \text{ V}$ ），输出电压  $U_{ce}$  由  $8 \text{ V}$  变到  $3 \text{ V}$ （即  $\Delta U_{ce} = 5 \text{ V}$ ），放大倍数  $|K| = 5$ ，选择电路如图8-35所示。

(1) 选管型 由于要求不高，而选用普通低频小功率管就可以了。选用3DG4B，主要参数  $\beta = 50$ ， $BV_{ceo} = 15 \text{ V}$ ， $I_{cm} = 20 \text{ mA}$ 。

(2) 电源电压  $E_c$ 。选  $E_c = 12 \text{ V}$ ，大于输出电压的变化范围又小于3DG4B的  $BV_{ceo}$ 。

(3) 集电极电流  $I_c$ 。小功率管的静态  $I_c$ ，一般取  $0.5 \sim 5 \text{ mA}$ ，这里输入电压  $U_{sr} = 0$  时  $I_c = 0.5 \text{ mA}$ 。

(4) 集电极电阻  $R_c$ 。从满足  $U_{ce} = U_{ce\max} = 8 \text{ V}$  出发，则有

$$E_c = (I_c + I_{Lz\max})R_c + U_{ce\max}$$

式中 
$$I_{fs\max} = \frac{U_{sc\max}}{R_{fs}}$$

$$R_c = \frac{E_c - U_{sc\max}}{I_c + I_{fs\max}} = \frac{12 - 8}{0.5 \times 10^{-3} + \frac{8}{10 \times 10^3}} = 3.1 \text{ k}\Omega$$

取  $R_c = 3.3 \text{ k}\Omega$ 。

(5) 射极电阻  $R_e$

$$R'_{fs} = \frac{R_c R_{fs}}{R_c + R_{fs}} = \frac{3.3 \times 10}{3.3 + 10} = 2.5 \text{ k}\Omega$$

$$\Delta I_c = \frac{\Delta U_{jc}}{R'_{fs}} = \frac{5}{2.5 \times 10^{-3}} = 2 \text{ mA}$$

$$I_{c\max} = I_c + \Delta I_c = 0.5 + 2 = 2.5 \text{ mA}$$

从满足  $U_{sc\min} = 3 \text{ V}$  的要求出发, 并设管子的最小压降  $U_{cem\min} = 1 \text{ V}$ , 则有

$$U_{sc\min} = U_{cem\min} + I_{c\max} R_e$$

$$R_e = \frac{U_{sc\min} - U_{cem\min}}{I_{c\max}} = \frac{3 - 1}{2.5 \times 10^{-3}} = 800 \Omega$$

取  $R_e = 820 \Omega$ 。

(6) 电阻  $R_{b1}$ 、 $R_{b2}$

$$I_b = \frac{I_c}{\beta} = \frac{0.5}{50} = 0.01 \text{ mA}$$

$$U_e \approx I_e R_e = 0.5 \times 10^{-3} \times 820 = 0.41 \text{ V}$$

$$U_b = U_{be} + U_e = 0.7 + 0.41 = 1.1 \text{ V}$$

取  $I_{b1} = 10 I_b$ 。

$$I_{b1} = 10 I_b = 10 \times 0.01 = 0.1 \text{ mA}$$

$$R_{b1} = \frac{U_b}{I_{b1}} = \frac{1.1}{0.1 \times 10^{-3}} = 11 \text{ k}\Omega$$

$$R_{b2} = \frac{E_c - U_b}{I_{b1} + I_b} = \frac{12 - 1.1}{(0.1 + 0.01) \times 10^{-3}} = 100 \text{ k}\Omega$$

### 三、反馈放大电路

所谓负反馈就是从放大器的输出电路里，取出其中一部分电流或电压，通过一定的方式馈送到输入电路，并使这一反馈信号与输入信号相位相反，起到了削弱输入信号的作用。如果反馈使输入信号增加，则称为正反馈。

采用适当的负反馈，可改善放大器的性能，如提高放大器增益的稳定性、改善放大器的非线性失真和频率响应、减小噪声和变换放大器的输入、输出电阻等。在输出端，根据反馈信号是正比于输出电压还是输出电流，可分为电压负反馈和电流负反馈，根据连接方式又分为串联反馈和并联反馈。

#### 1. 电流串联型反馈电路

该反馈电路如图8-36所示。

(1) 用等效电路直接计算  
无反馈时电压放大倍数为

$$K_u = \frac{-\beta R'_{Lz}}{r_{be}}$$

有反馈时电压放大倍数为

$$K_{uf} = \frac{-\beta R'_{Lz}}{r_{be} + \beta R_o} = \frac{K_u}{1 + K_u B}$$

式中  $B$ ——反馈系数， $B = \frac{-R'_{Lz}}{R_o}$ ，

$R'_{Lz}$ ——等效负载电阻， $R'_{Lz} = \frac{R_L R_{Lz}}{R_L + R_{Lz}}$ 。

当  $K_u \beta \gg 1$  时，则有

$$K_{uf} \approx \frac{1}{B} = \frac{-R_o}{R'_{Lz}}$$

(2) 用反馈深度计算

1) 无反馈时的  $K_u$ 、 $R_{i1}$ 、 $R_{o1}$

$$K_u = \frac{R'_{Lz}}{R_{i1}} \cdot h_{fe}$$

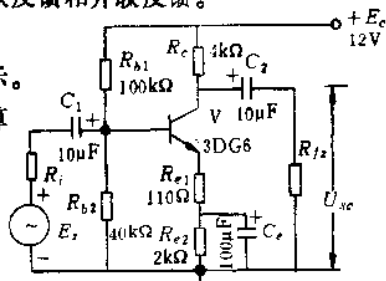


图8-36 电流串联反馈电路

$$R_{i,r} \approx h_{i,e}$$

$$R_{i,c} \approx \frac{1}{h_{o,e}}$$

式中  $h_{i,e}$ ——电流放大系数；  
 $h_{i,e}$ ——交流输入阻抗 ( $\Omega$ )；  
 $h_{o,e}$ ——输出电导 (S)。

2) 有反馈时反馈系数  $B$

$$B = \frac{R_e}{R'_{i,s}}$$

反馈深度为

$$1 + K_u B = \frac{h_{i,e} + R_e h_{i,e}}{h_{i,e}}$$

3) 闭环增益

$$K_{u,f} = \frac{K_u}{1 + K_u B} = \frac{R'_{i,s}}{h_{i,e} + R_e h_{i,e}} h_{i,e}$$

当反馈很深时 ( $h_{i,e} \ll R_e h_{i,e}$ ) 则为

$$K_{u,f} \approx \frac{R'_{i,s}}{R_e}$$

4) 输入电阻

$$R_{i,r,f} = (1 + K_u B) R_{i,r} = h_{i,e} + R_e h_{i,e}$$

当反馈很深时则为

$$R_{i,r,f} \approx h_{i,e} R_e$$

5) 输出电阻

$$R_{i,c,f} = R_{i,c} + R_e (1 + K_{u,o})$$

式中  $K_{u,o}$ ——无反馈时输出端开路电压增益,  $K_{u,o} = \frac{h_{i,e}}{h_{o,e} h_{i,e}}$ 。

例8-38 在图8-36串联反馈放大器中, 已知  $R_e = 90\Omega$ ,  $R_c = 2k\Omega$ ,  $R_{i_1} = 2k\Omega$ ,  $R_{b_1} = 120k\Omega$ ,  $R_{b_2} = 60k\Omega$ ,  $h_{i,e} = 1k\Omega$ ,  $h_{i,r} = 100$ ,  $h_{o,e} = 5 \times 10^{-5}S$ , 计算在无反馈 (用电容  $C_e$  将  $R_e$  旁路) 和有反馈

两种情况下的电压增益、输出和输入电阻。

(1) 无反馈时等效负载电阻

$$R'_{L2} = \frac{R_c R_{L2}}{R_c + R_{L2}} = \frac{2 \times 2}{2 + 2} = 1 \text{ k}\Omega$$

开环增益为

$$K_{uo} = \frac{R'_{L2}}{h_{ie}} h_{fe} = \frac{1}{1} \times 100 = 100$$

输出开路增益为

$$K_{uo0} = \frac{h_{fe}}{h_{oe} h_{ie}} = \frac{100}{5 \times 10^{-6} \times 1 \times 10^3} = 2000$$

输入电阻为

$$R_{i1} \approx h_{ie} = 1 \text{ k}\Omega$$

输出电阻为

$$R_{oc} \approx \frac{1}{h_{oe}} = \frac{1}{5 \times 10^{-6}} = 20 \text{ k}\Omega$$

(2) 有反馈时闭环增益

$$K_{uf} = \frac{R'_{L2}}{h_{ie} + R_c h_{fe}} h_{fe} = \frac{1}{1 + 0.09 \times 100} \times 100 = 10$$

输入电阻为

$$R_{i1f} = h_{ie} + R_c h_{fe} = 1 + 0.09 \times 100 = 10 \text{ k}\Omega$$

考虑到偏置电阻  $R_{b1}$ 、 $R_{b2}$ ，则有

$$R_s = \frac{R_{b1} R_{b2}}{R_{b1} + R_{b2}} = \frac{120 \times 60}{120 + 60} = 40 \text{ k}\Omega$$

$$R'_{i1f} = \frac{R_{i1f} R_s}{R_{i1f} + R_s} = \frac{10 \times 40}{10 + 40} = 8 \text{ k}\Omega$$

输出电阻为

$$R_{ocf} = R_c + R_e (1 + K_{uo}) = 20 + 0.09 \times (1 + 2000) = 200 \text{ k}\Omega$$

若考虑到  $R_c$ ，则有



$$R'_{ict} = \frac{R_c R_{sc1}}{R_c + R_{sc1}} = \frac{2 \times 200}{2 + 200} \approx 2 \text{ k}\Omega$$

例8-39 电流串联负反馈放大电路如图8-37所示，已知三极管的电流放大倍数  $\beta = 50$ ， $r_{be} = 1.8 \text{ k}\Omega$ ，试求放大电路的输入电阻和输出电阻，当信号源电压  $E_s = 15 \text{ mV}$ ，内阻  $R_i = 600 \Omega$  时其输出电压是多少。

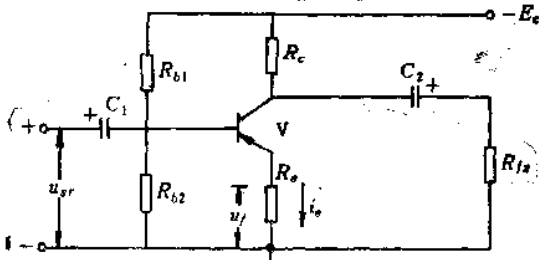


图8-37 另一种电流串联反馈电路

$$\begin{aligned} R_{sr} &= [r_{be} + (1 + \beta)R_{e1}] // R_{b1} // R_{b2} \\ &= [1.8 + (1 + 50) \times 0.11] // 100 // 40 = 5.9 \text{ k}\Omega \\ R_{s2} &\approx R_c = 4 \text{ k}\Omega \end{aligned}$$

将偏置电阻和信号源，用戴维南定理化成等效的信号电压  $E'_s$  和等效电阻  $R'_i$ ，则有

$$\begin{aligned} E'_s &= \frac{R_{b1} // R_{b2}}{R_i + R_{b1} // R_{b2}} E_s = \frac{100 // 40}{0.6 + 100 // 40} \times 0.015 \\ &= 0.0147 \text{ V} \end{aligned}$$

$$R'_i = \frac{R_i (R_{b1} // R_{b2})}{R_i + R_{b1} // R_{b2}} = \frac{0.6 (100 // 40)}{0.6 + 100 // 40} = 0.588 \text{ k}\Omega$$

考虑到信号源内阻时，则有

$$\begin{aligned} K_{uf} &= \frac{-\beta(R_c // R_{L2})}{R'_i + r_{be} + \beta R_{e1}} = \frac{-50(4 // 4)}{0.588 + 1.6 + 50 \times 0.11} \\ &= -12.7 \end{aligned}$$

$$U_{sc} = K_u E'_s = -10.7 \times 0.0147 = -0.187 \text{V}$$

2. 电压并联反馈电路

该电路如图8-38所示。

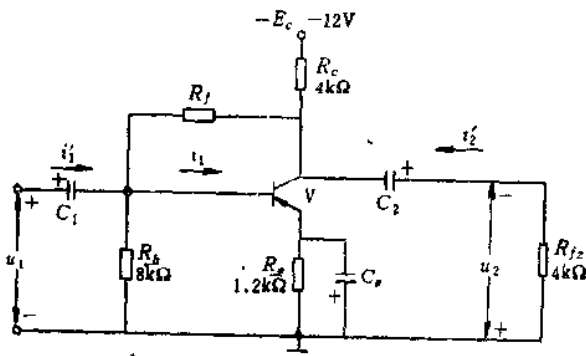


图8-38 电压并联反馈电路

(1) 用等效电路直接计算 无反馈时电流放大倍数为

$$K_i \approx -\beta$$

有反馈时电流放大倍数为

$$K_{i,f} \approx \frac{-\beta}{1 + \beta \frac{R'_{fz}}{R_f}} = \frac{K_i}{1 + K_i B}$$

式中  $B$ ——反馈系数,  $B = -\frac{R'_{fz}}{R_f}$ 。

(2) 用反馈深度计算

1) 无反馈时晶体管的端电流增益

$$K_i = \frac{h_{fe}}{1 + h_{oe} R'_{fz}} \approx h_{fe}$$

总的电流增益为

$$K'_i = \frac{i'_b}{i_i}$$

式中  $i'_s$ ——流入负载电阻  $R_{L'}$  的电流；

$i_i$ ——输入信号电流。

电压增益为

$$K'_u = K_u = K_i \frac{R'_{L'}}{R_{i'}}$$

2) 有反馈时电流增益

$$K'_{i'} = a_i a_o K_i$$

式中  $a_i$ ——输入电路分流电阻 ( $R_b$ 、 $R_{i'}$ ) 使电流增益减小的系数  $a_i < 1$ ；

$a_o$ ——输出电路分流电阻 ( $R_{L'}$ 、 $R_c$ ) 使负载电流减小的系数  $a_o < 1$ 。

电压增益为

$$K'_{u'} = K'_u = K_i \left( \frac{R'_{L'}}{R_{i'}} \right)$$

**例8-40** 在图8-38并联反馈放大器中，已知晶体管3AX21， $h_{fe} = 100$ ， $h_{ie} = 2 \text{ k}\Omega$ ， $h_{re} = 5 \times 10^{-4}$ ， $h_{oe} = 1 \times 10^{-6} \text{ S}$ ，其他参数如图所示，计算电流和电压增益及输入和输出电阻，比较在有反馈和无反馈两种情况下的增益和输入、输出电阻。

(1) 无反馈时

$$K_i = \frac{h_{fe}}{1 + h_{re} R'_{L'}} \approx h_{fe} = 100$$

$$i'_s = i_2 \frac{R_c}{R_c + R_{L'}} = \frac{4}{4 + 4} i_2 = \frac{1}{2} i_2$$

$$i_i = \frac{R_b}{R_b + R_{i'}} i'_i = \frac{8}{8 + 2} i'_i = \frac{4}{5} i'_i$$

$$K'_i = \frac{i'_s}{i'_i} = \frac{\frac{1}{2} i_2}{\frac{4}{5} i'_i} = \frac{4}{5} \times \frac{1}{2} \quad K_i = \frac{2}{5} \times 100 = 40$$

$$R'_{i_x} = R_c // R_{f_x} = 4 // 4 = 2 \text{ k}\Omega$$

$$R_{f_i} \approx h_{i_e} = 2 \text{ k}\Omega$$

$$K'_{u'} = \frac{u'_2}{u'_1} = \frac{u_2}{u_1} = K_u = K_i \frac{R'_{i_x}}{R_{f_i}} = 100 \times \frac{2}{2} = 100$$

$$R'_{i_r} = R_b // R_i = 8 // 2 = 1.6 \text{ k}\Omega$$

$$R'_{i_c} = R_{c_c} // R_c = \frac{1}{\frac{1}{h_{o_e}} + \frac{1}{R_c}} \approx R_c = 4 \text{ k}\Omega$$

(2) 有反馈时

$$R_{f_i} = \frac{R_f}{1 + K_u} = \frac{40}{1 + 100} = 0.396 \text{ k}\Omega$$

$$R_{f_i'} = \frac{R_{f_i} h_{i_e}}{R_{f_i} + h_{i_e}} = \frac{0.397 \times 2}{0.397 + 2} = 0.33 \text{ k}\Omega$$

$$R_{f_{sc}} = \frac{R_f}{1 + \frac{1}{K_u}} \approx R_f = 40 \text{ k}\Omega$$

$$R'_{e_{cf}} = \frac{R_f}{h_{f_e}} = \frac{40}{100} = 0.4 \text{ k}\Omega$$

$$K'_{i_r} = a_i a_o K_f \approx \frac{R_{f_i}}{R_{f_i} + R_i} \times 0.5 \times 100 = \frac{0.396}{0.396 + 2} \times 0.5 \times 100 = 8.26$$

$$K'_{u_f} = K'_u = 100$$

$$R'_{i_{r1}} = R_{f_i} // R_b // R_i = 0.396 // 8 // 2 = 0.317 \text{ k}\Omega$$

$$R'_{e_{cf}} = R'_{e_{cf}} // R_{f_{sc}} = 0.4 // 40 \approx 0.4 \text{ k}\Omega$$

比较计算结果，得出电压并联反馈放大器的特点：

电流增益减小，从40倍减小到8.26倍；

电压增益不变；

输入电阻减小，从1.6 kΩ 减到0.317 kΩ；

输出电阻减小，从4 kΩ 减到0.4 kΩ。

#### 四、功率放大电路

在实际应用中，微弱的信号经过多级放大器的放大后，用来控制某种执行机构，如使喇叭发出声音，推动电动机旋转，使继电器闭合触头，使记录仪表动作等。这就要求放大器有足够大的功率，才能推动负载机构动作，因此多级放大器的最后一级的主要任务是输出一定的功率供给负载使用，所以称为功率放大器。

功率放大器的特点：（1）功率放大器中，为获得最大的功率。因此输入信号较大，三极管的工作电压和电流变化幅度都很大，接近管子极限状态，由三极管的  $U_{CM}$ 、 $I_{CM}$ 、 $P_{CM}$  三个参数来决定；（2）电路应具有较高的效率；（3）采用变压器作阻抗变换，能获得最佳负载匹配。

##### 1. 单管功率放大器

该放大器如图8-39所示。

##### （1）静态工作点参数

$$U_b = \frac{R_{b1}}{R_{b2} + R_{b1}} E_s$$

$$U_e = U_b - U_{be}$$

$$I_c \approx I_e = \frac{U_e}{R_e}$$

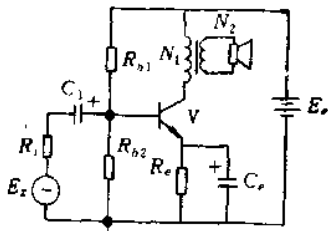


图8-39 单管功率放大器

##### （2）交流负载线与变比

$$\tan \alpha' = \frac{1}{R'_{Lz}} = \frac{1}{n^2 R_{Lz}}$$

$$R'_{Lz} \approx \frac{E_s^2}{2P_{Lc}}$$

$$n = \frac{N_1}{N_2} = \sqrt{\frac{R'_{Lz}}{R_{Lz}}}$$

##### （3）输出功率

$$P_{Lc} < \frac{1}{2} P_{CM}$$

(4) 电源电压

$$E_c = \frac{1}{2} U_{cM}$$

例8-41 在图8-39单管功率放大器中, 已知  $R_{b1} = 1 \text{ k}\Omega$ ,  $R_{b2} = 2.5 \text{ k}\Omega$ ,  $R_r = 83 \Omega$ ,  $R_{Tz} = 10 \Omega$ ,  $E_c = 6 \text{ V}$ , 求静态工作点, 变比及输出功率。

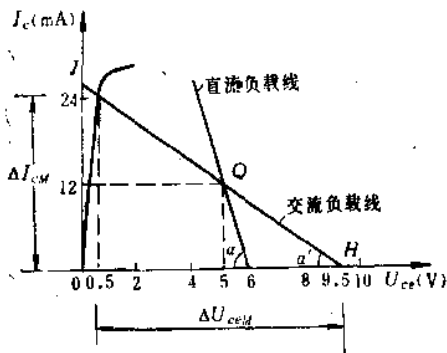


图8-10 求静态工作点

$$U_b = \frac{R_{b1}}{R_{b1} + R_{b2}} E_c$$

$$= \frac{1}{2.5 + 1} \times 6$$

$$= 1.7 \text{ V}$$

$$U_e = U_b - U_{be} = 1.7 - 0.7 = 1 \text{ V}$$

$$I_c \approx I_r = \frac{U_e}{R_r} = \frac{1}{83} = 12 \text{ mA}$$

$$U_{ce} = E_c - U_e = 6 - 1 = 5 \text{ V}$$

找出  $I_{cM} = 12 \text{ mA}$ ,  $U_{ce} = 5 \text{ V}$  的交点, 即为静态工作点为  $Q$ 。

$$\Delta I_{cM} = 24 \text{ mA}$$

$$\Delta U_{cM} = 9.5 - 0.5 = 9 \text{ V}$$

$$R'_{Lz} = \frac{\Delta U_{cM}}{\Delta I_{cM}} = \frac{9}{0.024 \times 10^{-3}} = 375 \ \Omega$$

变比为

$$n = \sqrt{\frac{R'_{Lz}}{R_{Lz}}} = \sqrt{\frac{375}{10}} \approx 6$$

输出功率为

$$\begin{aligned} P_{Lz} &= I_c^2 R'_{Lz} = \left( \frac{24 \times 10^{-3}}{2 \sqrt{2}} \right)^2 \times 375 = 0.027 \text{ W} \\ &= 27 \text{ mW} \end{aligned}$$

式中  $I_c$  —— 交流分量的电流有效值 (A)。

例8-42 变压器耦合的单管甲类功率放大电路如图8-39所示, 输出变压器变比为4:1, 负载为10Ω的扬声器, 输出变压器效率为80%, 要求在静态电流不超过20mA, 扬声器能得到20mW的功率, 选择电源电压应为多少。

$$\begin{aligned} P_{Lz} &= \frac{1}{2} I_{cM}^2 R'_{Lz} = \frac{1}{2} I_{cM}^2 \frac{\left( \frac{N_1}{N_2} \right)^2 R_{Lz}}{\eta} \\ I_{cM} &= \sqrt{\frac{2P}{\left( \frac{N_1}{N_2} \right)^2 R_{Lz} \eta}} = \sqrt{\frac{2 \times 20 \times 10^{-3}}{\frac{4^2 \times 10}{0.80}}} = 14.6 \text{ mA} \end{aligned}$$

满足小于20mA的要求时其输出功率为

$$\begin{aligned} P_{Lz} &= \frac{P_{Lz}}{\eta} = \frac{1}{2} U_{cM} I_{cM} = \frac{1}{2} (E_c - U_{cEz}) I_{cM} \\ E_c &= \frac{2P_{Lz}}{\eta} \frac{1}{I_{cM}} + U_{cEz} = \frac{2 \times 20 \times 10^{-3}}{0.80} \times \frac{1}{14.6 \times 10^{-3}} + 1 \\ &= 4.34 \text{ V} \approx 4.5 \text{ V} \end{aligned}$$

验算:

$$I_{cm} = \frac{U_{cem}}{R'_{L2}} = \frac{E_c - U_{ces}}{\frac{\left(\frac{N_1}{N_2}\right)^2 R_{L2}}{\eta}} = \frac{6 - 1}{\frac{4^2 \times 10}{0.80}} = 17.5 \text{ mA}$$

满足要求。

例8-43 要求甲类功率放大器的输出功率为60mW，电源电压为9V，输出变压器的效率为0.80，负载电阻为8Ω，求变压器的变比。

$$P_{ce} = \frac{P_{L2}}{\eta} = \frac{60}{0.80} = 75 \text{ mW}$$

取  $U_s = U_{ces} = U_w \approx 0.5 \text{ V}$

$$U_{ce} = E_c - U_s - U_{ces} - U_w \approx 9 - 0.5 - 0.5 - 0.5 = 7.5 \text{ V}$$

$$P_{L2} = \frac{(U_{cem}/\sqrt{2})^2}{R'_{L2}} = \frac{U_{cem}^2}{2R'_{L2}}$$

$$R'_{L2} = \frac{U_{cem}^2}{2P_{L2}} \approx \frac{U_{ce}^2}{2P_{ce}} = \frac{7.5^2}{2 \times 75 \times 10^{-3}} = 375 \Omega$$

$$n = \sqrt{\frac{R'_{L2}}{R_{L2}}} = \sqrt{\frac{375}{8}} = 6.85$$

## 2. 乙类推挽功率放大器

该放大器如图8-41所示，其变压器变比为

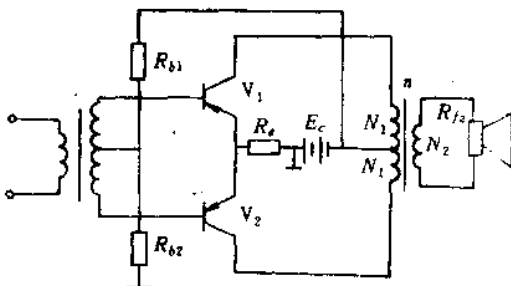


图8-41 变压器耦合单管甲类功率放大器



$$n = \sqrt{\frac{R'_{Lz}}{R_{Lz}}}$$

输出功率为

$$P_{ic} \approx \frac{E_c^2}{2R'_{Lz}}$$

电源电压为

$$E_c \leq \frac{1}{2} U_{cM}$$

例8-44 已知乙类推挽功率放大器的输出功率为75mW，电源电压为24V，输出变压器的效率为0.8，负载电阻为10Ω，试选择晶体管，并确定变压器的变比

$$P_{ic} = \frac{P_{Lz}}{\eta} = \frac{60}{0.8} = 75 \text{ mW}$$

$$U_{cM} = E_c - U_{ce} - U'_e = 24 - 1 - 1 = 22\text{V}$$

$$I_{cM} = \frac{2P_{ic}}{U_{cM}} = \frac{2 \times 75}{22} = 6.82\text{mA}$$

$$P_{cM} > 0.2P_{ic} = 0.2 \times 75 = 15 \text{ mW}$$

$$BV_{ceR} > 2E_c = 2 \times 24 = 48 \text{ V}$$

$$I_{cM} > I_{icM} = 6.82 \text{ mA}$$

选用低频小功率管3AX25A，其极限参数为  $P_{cM} = 200\text{mW}$ ， $BV_{ceR} \geq 60\text{V}$ ， $I_{cM} = 400\text{mA}$  时，则有

$$P_{ic} = \frac{1}{2} I_{cM} U_{cM} = \frac{1}{2} I_{icM}^2 R'_{Lz}$$

$$R'_{Lz} = \frac{2P_{ic}}{I_{icM}^2} = \frac{2 \times 75}{(6.82 \times 10^{-3})^2} = 3220 \Omega$$

$$n = \sqrt{\frac{R'_{Lz}}{R_{Lz}}} = \sqrt{\frac{3220}{10}} = 18$$

例8-45 一个半导体收音机的功率输出级电路如图8-41所示，已知  $E_c = 6\text{V}$ ， $R_e = 5\Omega$ ， $R_{Lz} = 8\Omega$ ， $n = 3.5$ ，3A22管的

参数为  $P_{CM} = 125 \text{ mW}$ ,  $BV_{ceo} \geq 18 \text{ V}$ ,  $I_{CM} = 100 \text{ mA}$ ,  $U_{ces} = 0.5 \text{ V}$ , 设变压器效率  $\eta = 0.8$ , 求: (1) 负载得到的最大输出功率; (2) 在最大输出功率时的电源电流; (3) 校核采用 3A22 管能否满足要求。

(1) 负载电阻  $R_{Lz}$  折合到变压器初级的等效电阻

$$R'_{Lz} = \frac{n^2 R_{Lz}}{\eta} = \frac{3.5^2 \times 8}{0.8} = 123 \Omega$$

考虑到  $R_s$  也是全部负载电阻的一部分, 则有

$$R'_{Lz} = R'_{Lz} + R_s = 123 + 5 = 128 \Omega$$

在输出最大不失真功率  $P_{Lz \text{ max}}$  时, 其输出电压最大值  $U_{Lz \text{ max}} = E_c - U_{ces}$ , 取  $U_{ces} = 0.5 \text{ V}$ , 则有

$$\begin{aligned} P_{Lz \text{ max}} &= \frac{1}{2} \frac{U_{Lz \text{ max}}^2}{R'_{Lz}} = \frac{1}{2} \frac{(E_c - U_{ces})^2}{R'_{Lz}} \\ &= \frac{1}{2} \times \frac{(6 - 0.5)^2}{128} = 118 \text{ mW} \end{aligned}$$

考虑到  $P_{Lz \text{ max}}$  有一小部分要损耗在  $R_s$  上, 而变压器初级的功率减小为

$$\frac{R'_{Lz}}{R'_{Lz} + R_s} = \frac{123}{128} = 0.96$$

再考虑到变压器的效率, 会使功率进一步减小, 即

$$\begin{aligned} P_{Lz \text{ max}} &= P_{Lz \text{ max}} \times 0.96 \eta = 118 \times 0.96 \times 0.8 \\ &= 91 \text{ mW} \end{aligned}$$

(2) 电源供给的平均电流 在最大输出功率时, 每管的峰值电流为

$$I_{Lz \text{ max}} \frac{U_{Lz \text{ max}}}{R'_{Lz}} = \frac{E_c - U_{ces}}{R'_{Lz}} = \frac{6 - 0.5}{128} = 43 \text{ mA}$$

电源供给的平均电流为

$$I_{d \text{ max}} = \frac{2}{\pi} I_{Lz \text{ max}} = \frac{2}{\pi} \times 43 = 27 \text{ mA}$$

(3) 校核

$$P_{ic\max 1,2} = \frac{1}{2} P_{ic\max} \approx 0.101 \frac{E_c^2}{R_{i_s}} = 0.101 \frac{6^2}{128}$$

$$= 28\text{mW} < P_{cM}$$

$$U_{cem\max} > 2E_c = 2 \times 6 = 12\text{V} < BV_{ceo}$$

$$I_{cM} \approx 43\text{mA} < I_{cM}$$

满足要求。

例8-46 设计一个变压器耦合的乙类推挽功率放大器，要求电源电压为12V， $R_{i_s} = 8\Omega$ ，输出功率为5W，变压器效率取0.8。

(1) 集电极输出功率

$$P_{ic} = \frac{P}{\eta} = \frac{5}{0.8} = 6.25\text{W}$$

(2) 集电极电流最大值 由于  $P_{ic} = \frac{1}{2} I_{cM} U_{cem}$ ，考虑到

饱和压降  $U_{ces} \approx 1\text{V}$ ， $R_o$  的压降  $U_{oM} \approx I_{cM} R_o \approx 0.5\text{V}$ ，则有

$$U_{cem} = E_c - U_{ces} - U_{oM} = 12 - 1 - 0.5 = 10.5\text{V}$$

$$I_{cM} = \frac{2P_{ic}}{U_{cem}} = \frac{2 \times 6.25}{10.5} = 1.19\text{A}$$

(3) 选择管子

$$P_{cM} > 0.2P_{ic} = 0.2 \times 6.25 = 1.25\text{W}$$

$$BV_{ceo} > 2E_c = 2 \times 12 = 24\text{V}$$

$$I_{cM} > I_{cM} = 1.19\text{A}$$

选择低频大功率管3AD6C其极限参数为： $P_{cM} = 10\text{W}$ ， $BV_{ceo} = 30\text{V}$ ， $I_{cM} = 2\text{A}$ 。

(4) 输出变压器变比

$$R_{i_s} = \frac{2P_{ic}}{I_{cM}^2} = \frac{2 \times 6.25}{1.19^2} = 8.83\Omega$$

$$n = \sqrt{\frac{R'_{fs}}{R_{fs}}} = \sqrt{\frac{8.83}{8}} = 1.05$$

(5)  $R_e$  的计算

$$R_e = \frac{U_{eM}}{I_{eM}} = \frac{0.5}{1.19} = 0.42\Omega$$

(6)  $R_{b1}$ 、 $R_{b2}$  的确定 一般  $R_{b1}$  约为  $500 \sim 5000\Omega$ ， $R_{b2}$  为  $10 \sim 500\Omega$ ，大功率管通常可取下限值，现取  $R_{b1} = 600\Omega$ ， $R_{b2} = 10\Omega$ ，电路图如图8-41所示。

#### 第四节 晶体管开关电路计算

晶体管开关电路是利用它从饱和到截止或从截止到饱和互相转换的特性所构成的各种电子开关，用来接通或切断电路。

如果晶体管处于饱和状态，则输入端的特征是

$$I_b \geq I_{b_s} \text{ 或 } |V_{be}| \approx 0.7\text{V} \text{ 硅管}$$

$$\text{或 } |V_{be}| \approx 0.3\text{V} \text{ 锗管}$$

输出端特征是

$$I_c = I_{c_s} \text{ 或 } U_{ce} \approx 0.3\text{V}$$

如果晶体管处于截止状态，则输入端的特征是

$$I_b \approx 0 \text{ 或发射结反偏}$$

输出端特征是

$$I_c \approx 0 \text{ 或 } U_{ce} \approx E_c$$

#### 一、单管延时开关

单管延时吸合继电器的电路如图8-42所示，由  $RC$  延时电路及反相器构成。平时电源  $E_c$  经电阻  $R_1$  和  $R_K$  对晶体管  $V$  提供

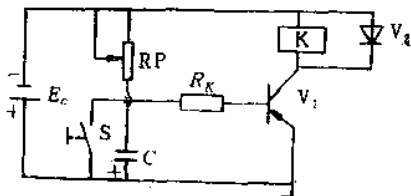


图8-42 单管延时吸合继电器电路

足够大的基极电流，使V处于饱和状态，集电极回路中的继电器K吸合，同时电容C也充满电荷，而电容C的正端电压为

$$U_c = \frac{R_K}{R_P + R_K} (E_c - U_{be}) \approx \frac{R_K}{R_P + R_K} E_c$$

当S接通时，电容C经S短路放电，使 $U_c = 0V$ 截止。继电器K释放；当S断开，C充电， $U_c$ 由零逐渐上升，随着 $U_c$ 的增加，V的基极电流也逐渐增大，经延迟时间 $t_d$ 后， $U_c = U_p$ ，V已导通，使K吸合， $U_p$ 称为门限电压。

$$U_p = U_{be} + I_b R_K = U_{be} + \frac{I_c}{\beta} R_K \approx \frac{I_c}{\beta} R_K$$

时间常数为

$$\tau = RC = \frac{R_P R_K}{R_P + R_K} C$$

充电结束时 $U_c$ 的最终值为

$$E = \frac{R}{R_P + R_K} E_c$$

由充电电压( $U_p$ )与终止电压( $E$ )之比，查表求得延迟时间 $t_d$ 。

**例8-47** 设计一个延迟时间为3s的单管延时继电器，继电器选用JRX-13F，内阻 $R_i = 700\Omega$ ，额定电压为18V，吸合电流不超过13mA，选择电源电压 $E_c = 18V$ ，保护二极管V，选用2CP12，三极管为3AX31B， $BV_{ceo} = 20V$ ， $I_{cm} = 125mA$ ， $\beta = 90$ ，试求 $R_K$ 、 $R_P$ 、门限电压延时时间 $t_d$ 。

选用电路如图8-43所示，根据饱和条件则有

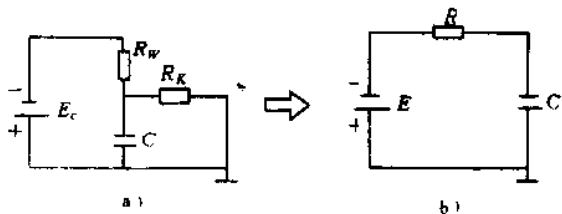


图8-43 RC充电回路等效电路

$$I_b = > \frac{I_{c1}}{\beta} = I_{b1}$$

$$I_b = \frac{E_c}{R_w + R_K} = \frac{I_{c1} R_c}{R_w + R_K}$$

$$R_w + R_K < \beta R_c = 90 \times 0.7 = 63 \text{ k}\Omega$$

选择  $R_K = R_w = 30 \text{ k}\Omega$

$$U_P = U_{b1} + I_b R_K \approx I_b R_K = \frac{I_c}{\beta} R_K = \frac{13}{90} \times 30 = 4.3 \text{ V}$$

RC 充电回路等效电路

$$E = \frac{R_K}{R_w + R_K} E_c$$

$$R = R_K // R_P$$

$$U_P = I_b R_K = \frac{I_{\text{吸}}}{\beta} R_K$$

$$\frac{U_P}{E} = \frac{I_{\text{吸}}}{\beta} \frac{R_w + R_K}{E_c} = \frac{13}{90} \times \frac{30 + 30}{18} = 0.48$$

查有关表:  $t_s = 0.7\tau$ , 取  $C = 300 \mu\text{F}$ , 延时时间为

$$t_s = 0.7RC = 0.7 \times \frac{30}{2} \times 300 = 3.15 \text{ s}$$

## 二、双稳态电路

双稳态电路具有两个稳定的状态, 一管截止, 另一管饱和, 如果外界条件不改变, 它将始终保持在原来所处的稳定状态, 称为双稳态电路, 如图8-44所示。其特点是:

(1) 具有两个稳定状态, 分别称为“0”和“1”状态, 电路总是处于这两个稳定状态中的一个。如果没有外界触发信号, 就始终保持这一稳定状态不变, 即双稳态具有记忆信息的作用。

(2) 触发转换, 在外界触发信号的作用下, 电路能从一个稳态迅速跳变到另一个稳态, 由这一特点使触发器能接收和传递信息, 用于计数等。

(3) 饱和截止条件

截止条件为

$$\text{PNP管 } U_b > 0$$

$$\text{NPN管 } U_b < 0$$

饱和条件为

$$I_b \geq \frac{I_{cs}}{\beta}$$

(4) 参数估算

$$R_c = \frac{E_c}{I_{cm}}$$

$$R_K < (\beta - 1) R_c$$

$$R_b < \frac{E_b}{I_{cbo}}$$

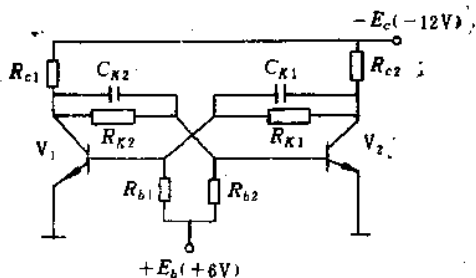


图8-44 双稳态电路

例8-48 现有晶体管3AX31B,  $\beta = 60$ , 要求输出电压幅度为10V, 工作频率为10kHz, 若取  $E_c = 12V$ ,  $I_{cm} = 10mA$ ,  $E_b = 6V$ ,  $I_{cbo} = 100\mu A$ , 试求双稳电路的  $R_c$ 、 $R_b$ 、 $R_K$ 、 $C_K$  值。

(1)  $R_c$  的计算

$$R_c = \frac{E_c}{I_{cm}} = \frac{12}{10} = 1.2k\Omega$$

(2)  $R_K$  的计算 考虑到晶体管的不一致性及老化  $\beta$  取30,

即

$$R_K < (\beta - 1)R_c = (30 - 1) \times 1.2 = 34.8 \text{ k}\Omega$$

(8)  $R_b$  的计算

$$R_b < \frac{E_b}{I_{cbo}} = \frac{6}{100 \times 10^{-6}} = 60 \text{ k}\Omega$$

(4)  $C_K$  的选择 因工作频率仅 10 kHz, 取  $C_K = 200 \text{ pF}$ 。

例 8-49 设计一个双稳态触发电路, 要求工作频率  $f = 60 \text{ kHz}$ , 输出电压幅度  $U_m \leq 5 \text{ V}$ , 取  $E_b = 6 \text{ V}$ ,  $-E_b = -6 \text{ V}$ 。

(1) 选择晶体管 现选取开关管 3DK2B, 其参数为:  $f_T = 200 \text{ MHz}$ ,  $\beta_{\min} = 30$ ,  $I_{cM} = 30 \text{ mA}$ ,  $U_{ces} \leq 0.3 \text{ V}$ , 其中  $f_T < 5f$ , 所以可用。

(2) 确定  $R_c$ , 取  $I_c = 10 \text{ mA} < 50\% I_{cM}$

$$R_c = \frac{E_c}{I_c} = \frac{6}{10 \times 10^{-3}} = 600 \Omega$$

(1) 确定  $R_K$

$$R_K = \frac{(U_{cM} + U_{ces})R_c}{E_c - (U_c + U_{ces})} = \frac{(5 + 0.3) \times 600}{6 - (5 + 0.3)} = 4.5 \text{ k}\Omega$$

验算:

$$U_{cM} \approx \frac{E_c R_K}{R_c + R_K} - U_{ces} = \frac{6 \times 4.5}{0.6 + 4.5} - 0.3 = 5 \text{ V}$$

$$\beta_{\min} R_c = 30 \times 0.6 = 18 \text{ k}\Omega > R_K$$

故输出幅度与转换条件都能满足, 所以选取  $R_K$  及  $R_c$  合适。

(4) 确定  $R_b$

$$R_b > \frac{E_b}{\frac{E_c}{R_c + R_K} - \frac{E_c}{\beta_{\min} R_c}} = \frac{6}{\frac{6}{0.6 + 4.5} - \frac{6}{30 \times 0.6}} = 7.14 \text{ k}\Omega$$

$$R_b \leq \frac{E_b - U_o}{U_{ces} + U_o} R_K = \frac{6 - 1}{0.3 + 1} \times 4.5 = 17.3 \text{ k}\Omega$$



若取  $R_s = 3R_x = 3 \times 4.5 = 13.5 \text{ k}\Omega$ , 取  $R_b = 12 \text{ k}\Omega$ , 满足以上稳态条件。

(5) 选择  $C_s$ , 因工作频率较低, 加速电容可选  $C_s = 500 \text{ pF}$ , 电路如图8-45所示。

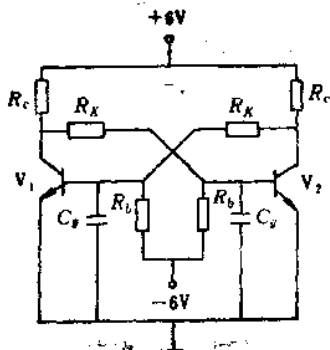


图8-45 双稳态触发电路

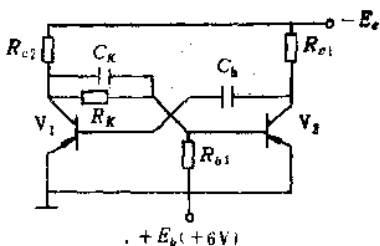


图8-46 集-基耦合单稳态电路

### 三、单稳态电路

单稳态电路只有一个稳定状态, 所以叫做单稳态, 其特点是:

(1) 单稳态电路只有一个稳定状态, 在没有触发信号时, 电路总是处于这个稳定状态。

(2) 有外加触发信号时, 电路迅速翻转, 形成一个暂时稳定状态, 经过固定的延迟时间后, 又自动返回原来的稳定状态。

#### 1. 集-基耦合单稳态电路

该电路如图8-46所示。

饱和条件为

$$R_K < (\beta_1 - 1)R_{c1}$$

$$R_{b1} < \frac{E_b}{I_{cbs}}$$

$$R_{c2} < \beta_2 R_{e2}$$

$$C_1 \approx \frac{T_1}{0.7 R_{b2}}$$

输出脉冲宽度为

$$T_1 \approx 0.7 R_{b2} C_1$$

## 2. 射极耦合单稳态电路

该电路如图8-47所示。

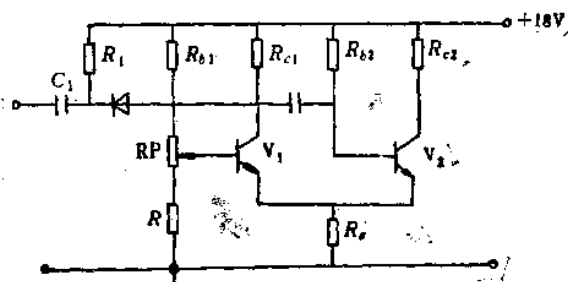


图8-47 射极耦合单稳态电路

稳态条件为

$$R_e = \frac{U_e}{I_{e2}}$$

$$R_{c2} + R_e \approx \frac{E_c}{I_{e2}}$$

如果  $V_1$  设计在饱和状态, 则有

$$R_{c1} + R_e \approx \frac{E_c}{I_{e1}}$$

根据  $V_2$  饱和条件则有

$$R_{b2} < \beta R_{c2}$$

$$C_1 \approx \frac{T_1}{0.7 R_{b2}}$$

例8-50 设计一个集-基耦合单稳延时电路, 其延时时间为

20ms, 输出电压幅度要大于10V, 最高工作温度为45℃。

由于输出电压幅度要求大于10V, 取  $E_c = 12V$ 。

取击穿电压  $BU_{RBO} > 12V$ , 选晶体管3AX31C, 取  $E_b = 6V$ , 3AX31C的  $I_{CBO}$  在25℃时小于6μA, 在45℃时上升4倍,  $I_{CBO} = 4 \times 6 = 24\mu A$

$$R_{b1} < \frac{E_b}{I_{CBO}} = \frac{6}{24 \times 10^{-6}} = 250k\Omega$$

若选  $I_{c1} = I_{c2} = 8mA$

$$R_{c1} = R_{c2} = \frac{E_c}{I_{c1}} = \frac{12}{8 \times 10^{-3}} = 1.5k\Omega$$

选晶体管  $\beta$  值为40, 考虑到使用后老化及参数不一致取  $\beta = 20$ , 则有

$$R_k < (\beta - 1)R_c = (20 - 1) \times 1.5 = 28.5k\Omega$$

$$R_{b2} < \beta R_{c2} = 20 \times 1.5 = 30k\Omega$$

$$C_b \approx \frac{T_1}{0.7R_{b2}} = \frac{20}{0.7 \times 30} = 0.95\mu F$$

电路如图8-46所示。

**例8-51** 设计一个射极耦合单稳态电路, 现有晶体管3DG6B,  $\beta = 60$ , 要求输出高电平不低于16V, 输出低电平8V, 脉冲宽度为0.7ms。

选取  $E_c = 18V$ ,  $U_s \approx I_{c2}R_c = 8V$ , 取  $I_{c2} = 2mA$ , 则有

$$R_c = \frac{U_s}{I_{c2}} = \frac{8}{2 \times 10^{-3}} = 4k\Omega$$

$$R_{c1} \approx \frac{E_c}{I_{c2}} - R_c = \frac{18}{2} - 4 = 5k\Omega$$

$$R_{c2} < R_{c1} = \text{取} 7.9k\Omega$$

$$R_{b2} < \beta R_{c2} = 30 \times 5 = 150k\Omega, \text{取} 91k\Omega$$

$$C_b \approx \frac{T_1}{0.7R_{b2}} = \frac{0.7}{0.7 \times 91} = 0.011\mu F$$

如果取  $R$  与  $R_{b1}$  支路的电流为  $1\text{mA}$ , 则有

$$R + R_{b1} = \frac{18}{1 \times 10^{-3}} = 18\text{k}\Omega$$

为使电路平时  $V_1$  截止, 翻转后  $V_2$  能饱和, 取  $R = 5.1\text{k}\Omega$ ,  $R_{b2} = 7.9\text{k}\Omega$ , 为了调整方便选  $RP = 4.7\text{k}\Omega$  的电位器调节, 电路如图8-47所示。

#### 四、射极耦合双稳态电路

射极耦合双稳态电路, 如图8-48所示, 它具有两个稳定状态, 当输入电压很低时, 电路处于  $V_1$  截止,  $V_2$  饱和的稳定状态; 当输入电压上升到一定数值后, 电路便迅速翻转到  $V_1$  饱和,  $V_2$  截止的另一种稳定状态。此后即使输入电压进一步增加, 电路仍然继续保持在一种状态。当输入电压下降到一定数值时, 电路又重新翻转到初始状态。

饱和条件为

$$R_K < \beta R_{c2}$$

输出低电压为

$$U_{低} \approx \frac{R_c}{R_{c2} + R_c} E_c$$

输出高电压为

$$U_{高} \approx E_c$$

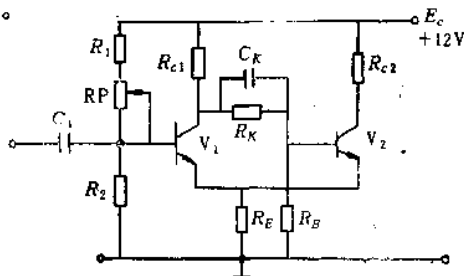


图8-48 射极耦合双稳态电路

例8-52 设计一个重复频率为  $1\text{MHz}$  的射极耦合双稳态电路, 其输出低电压为  $4\text{V}$ , 输出高电压大于  $10\text{V}$ , 要求回差不要太大, 设  $\beta = 40$ 。

取  $U_{E2} = 4\text{V}$ ,  $I_{c2} = 10\text{mA}$ , 则有

$$R_E = \frac{U_E}{I_{c2}} = \frac{4}{10 \times 10^{-3}} = 400\Omega$$

$$R_{c2} \approx \frac{E_c - U_{E2}}{I_{c2}} = \frac{12 - 4}{10 \times 10^{-3}} = 800\Omega$$

取  $R_{c1} = R_{c2} = 800\Omega$

$R_b$  是为保证  $V_2$  更好截止,  $R_b$  越小有利于截止, 但回差较大, 为减小回差,  $R_b$  一般取得较大, 即取  $R_b = 22\text{k}\Omega$ , 则有

$$I_{B2} = \frac{I_{C2}}{\beta} = \frac{10}{40} = 0.25\text{mA}$$

$$I_2 = \frac{U_{E2} - U_{BE2}}{R_b} = \frac{4 - 0.7}{22 \times 10^3} = 0.21\text{mA}$$

$V_2$  的饱和条件为

$$\frac{E_c - (U_E + U_{BE2})}{R_{c1} + R_K} \geq I_2 + I_{B2} = 0.21 + 0.25 = 0.46\text{mA}$$

$$R_{c1} + R_K \leq \frac{7.3}{0.46 \times 10^{-3}} \approx 16\text{k}\Omega$$

$$R_K \leq 16 - 0.8 = 15.2\text{k}\Omega$$

$R_1$ 、 $R_2$  的作用是将  $V_1$  基极偏置到一定电压, 使得没有信号, 即  $V_1$  截止,  $R_1$  取  $4\text{k}\Omega$ ,  $R_2$  取  $2\text{k}\Omega$ ,  $R_P$  用  $10\text{k}\Omega$  的电位器, 耦合电容  $C_1$  取  $1\mu\text{F}$ , 加速电容  $C_K$  取  $300\mu\text{F}$ 。

### 五、无稳态电路

无稳态电路就是能够直接产生矩形脉冲的一种电路, 它不需要外界信号触发, 而由电路内部自行激励, 不断产生矩形脉冲, 故有“自激”之称。又因为它输出的矩形脉冲是由基波和许多高次谐波所组成, 因此又加上“多谐”二字, 所以无稳态电路又叫做自激多谐振荡器。

无稳态电路又分为集-基极耦合和发射极耦合两种无稳态电路, 现以最常用的集-基极耦合无稳态电路为例介绍, 其电路如图8-49所示。

电路参数为

$$R_c = \frac{E_c}{I_c}$$

$$R_b = \frac{E_b}{I_b}$$

饱和条件为

$$R_{b1} < \beta_1 R_{c1}$$

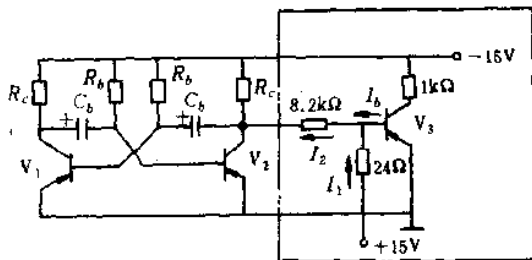


图8-49 无稳态电路

$$R_{b2} < \beta_2 R_{c2}$$

$$I_b > \frac{I_{cs}}{\beta}$$

输出脉冲宽度为

$$V_1 \text{ 截止时间 } T_1 \approx 0.7 C_{b1} R_{b1}$$

$$V_2 \text{ 截止时间 } T_2 \approx 0.7 C_{b2} R_{b2}$$

$$T = T_1 + T_2 \approx 1.4 C_b R_b$$

$$C_b \approx \frac{T}{1.4 R_b} = \frac{1}{1.4 f R_b}$$

例8-53 设计一个自激多谐振荡器，作为闪光报警装置中的振荡信号源，如图8-49所示。要求闪光频率1~2次/s，已知， $\beta_1 = \beta_2 = 60$ ， $\beta_3 = 30$ ，反相器参数如图所示。

$$I_b \geq \frac{I_{cs}}{\beta_3} = \frac{15 \times 10^{-3}}{30} = 0.5 \text{ mA}$$

$$I_1 \approx \frac{I_{cs}}{24} = \frac{15 \times 10^{-3}}{24} = 0.625 \text{ mA}$$

$$I_2 = I_1 + I_b = 0.625 + 0.5 = 1.125 \text{ mA}$$

$$1.125 \times 8.2 = 0.92 \text{ V}$$

$$U_{c2} = E_s \frac{8.2}{8.2 + 1} = 15 \times \frac{8.2}{8.2 + 1} = 13.5 \text{ V}$$

$$R_b < \beta R_c = 60 \times 1 = 60 \text{ k}\Omega$$

$$C_b \approx \frac{T}{1.4R_b} = \frac{1}{1.4fR_b} = \frac{1}{84f \times 10^3} = 6 \sim 12 \mu\text{F}$$

取  $C_b = 9 \mu\text{F}$ , 则有

$$f = \frac{1}{1.4CR_b} = \frac{1}{1.4 \times 9 \times 10^{-6} \times 60 \times 10^3} = 1.3 \text{ 次/s}$$

### 第五节 门电路计算

门电路是一种具有多输入端和一个输出端的开关电路。当输入信号之间满足某一特征关系时, 门电路才有信号输出, 否则就没有信号输出。门电路的作用是控制信号的传送, 即按照一定的条件决定信号能不能通过, 就好像在满足一定条件时才会自动打开的门一样, 故称为门电路。

门电路中最基本的是“与门”、“或门”、“非门”三种, 它们可以由三极管、二极管和电阻或集成电路组成, 广泛应用于自动控制, 自动检测装置中, 它是数字电路、数字计算机中基本单元。

#### 一、二极管与门电路

$A$ 、 $B$ 、 $C$  为输入信号端, 该信号可以是比  $E_0$  低的任何电位, 为了减轻前级的负载, 增加驱动后级的能力, 一般取电源电压与输入高电位之比为 4, 现输入高电位取 3V,  $P$  为输出信号端, 如图 8-50 所示, 其特点如下:

(1)  $A$ 、 $B$ 、 $C$  三端都处在高电位 +3V, 即三管  $V_A = V_B = V_C = +3\text{V}$ , 这时  $V_A$ 、 $V_B$ 、 $V_C$  都处于正向导通状态, 所以输出端  $P$  点的电位  $U_P$  被箝在 +3V。

(2)  $A$ 、 $B$ 、 $C$  中有一个处在低电位 0V, 另外两个处在高电位 +3V, 如  $V_A = 0\text{V}$ ,  $V_B = V_C = +3\text{V}$ , 这时  $V_A$  比  $V_B$ 、 $V_C$  低, 所以  $V_A$  导通,  $P$  点电位  $U_P$  就被箝在 0V, 而  $V_B$ 、 $V_C$  就处在反向偏置, 因此不导通,  $U_P = 0\text{V}$ 。

(3)  $A$ 、 $B$ 、 $C$  中有两端处在低电位 0V, 另外一个处在高

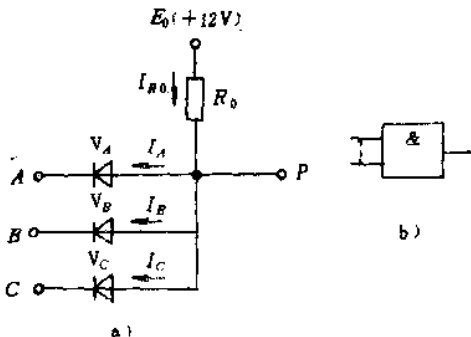


图8-50 二极管与门电路

电位+3V, 如  $V_A = V_B = 0V$ ,  $V_C = 3V$ , 所以只能是  $V_A$ 、 $V_B$  导通,  $V_C$  不导通, 而  $U_P$  被箝在  $0V$ 。

(4)  $A$ 、 $B$ 、 $C$  三端都处在低电位  $0V$ , 即三管  $V_A = V_B = V_C = 0V$ , 这时  $V_A$ 、 $V_B$ 、 $V_C$  都处于正向导通状态, 而  $U_P$  被箝在  $0V$ 。

将上述分析结果, 列表8-3所示。

表8-3 逻辑关系 (V)

	$V_A$	$V_B$	$V_C$	$U_P$
1	+3	+3	+3	+3
2	0	+3	+3	0
3	0	0	+3	0
4	0	0	0	0

由表8-3可见,  $V_A$ 、 $V_B$ 、 $V_C$  三管输入端全为高电位+3V时, 输出端  $P$  才是高电位+3V, 而  $V_A$ 、 $V_B$ 、 $V_C$  中只要有一个或几个管为低电位  $0V$  时,  $U_P$  就为低电位  $0V$ 。所以对于高电位+3V来讲,  $U_P$  和  $V_A$ 、 $V_B$ 、 $V_C$  之间的逻辑关系为“与”逻辑关系。

从上述分析可知门电路的输入、输出不是高位+3V, 就是低电位  $0V$ 。一般为方便起见, 把高位+3V记作“1”状态, 低电



位 0 V 记作“0”状态。若用“1”、“0”表示“与门”逻辑关系，可将表8-3列成表8-4所示的形式。

表8-4 逻辑关系

A	B	C	P
1	1	1	1
0	1	1	0
0	0	1	0
0	0	0	0

由表8-4可见，只有A、B、C都处在“1”状态，P才处在“1”状态。在逻辑电路中，用它来实现逻辑乘法，即

$$P = A \cdot B \cdot C$$

其意义是：当A、B、C都是“1”时，P才等于“1”，其中有一个是“0”时，P就等于“0”。

**例8-54** 三端输入一端输出的与门，在四种输入条件下的输出情况。

(1) A、B、C三点都处在高电位+3V

$$V_A = V_B = V_C = +3V$$

$V_A$ 、 $V_B$ 、 $V_C$ 都处在正向导通状态， $U_P$ 被箝在+3V，即  $U_P = +3V$ ，则有

$$I_{R0} = \frac{E_0 - U_P}{R_0} = \frac{12 - 3}{3.9 \times 10^3} \approx 2.3 \text{ mA}$$

$$I_A = I_B = I_C = \frac{1}{3} I_{R0} = \frac{1}{3} \times 2.3 \approx 0.8 \text{ mA}$$

(2) A、B、C中有一端处在低电位0V，另两个都处在高电位+3V，即  $V_A = 0V$ ， $V_B = V_C = +3V$ 。由于  $V_A$  比  $V_B$ 、 $V_C$  低，所以  $V_A$  两端电位差最大，而优先导通。

$U_P = 0V$ ， $V_B$ 、 $V_C$ 都处于反向接法，不导通此时则有

$$I_{R0} = \frac{E_0 - U_P}{R_0} = \frac{12 - 0}{3.9 \times 10^3} = 3.1 \text{ mA}$$

$$I_A = I_{R0} = 3.1 \text{ mA}$$

$$I_B = I_C = 0$$

(8)  $A$ 、 $B$ 、 $C$  中有两端处在低电位  $0\text{V}$ ，另一个处在高电位  $+3\text{V}$ ，即  $V_A = V_B = 0\text{V}$ ， $V_C = +3\text{V}$

$V_A$ 、 $V_B$  优先导通，则有

$$I_{R0} = \frac{E_0 - U_P}{R_0} = \frac{12 - 0}{3.9 \times 10^3} \approx 3.1 \text{ mA}$$

$$I_A = I_B = \frac{1}{2} I_{R0} = \frac{1}{2} \times 3.1 = 1.55 \text{ mA}$$

$$I_C = 0$$

(4)  $A$ 、 $B$ 、 $C$  三端都处在低电位  $0\text{V}$

$$V_A = V_B = V_C = 0\text{V}$$

$V_A$ 、 $V_B$ 、 $V_C$  都处在正向导通状态， $U_P = 0\text{V}$ ，则有

$$I_{R0} = \frac{E_0 - U_P}{R_0} = \frac{12 - 0}{3.9 \times 10^3} \approx 3.1 \text{ mA}$$

$$I_A = I_B = I_C = \frac{1}{3} I_{R0} = \frac{1}{3} \times 3.1 \approx 1 \text{ mA}$$

与逻辑关系如表 8-4 所示。

## 二、二极管或门电路

或门电路如图 8-51 所示，当  $V_A = +3\text{V}$ ， $V_B = V_C = 0\text{V}$  时，二极管  $V_A$  导通， $P$  点电位被箝在  $+3\text{V}$ ，而  $V_B$ 、 $V_C$  两个二极管都处于反向偏置不导通，所以  $U_P = +3\text{V}$ （同理可分析  $B$ 、 $C$  中任一端为  $+3\text{V}$ ，其余两端为  $0\text{V}$  的情况）。

当  $A$ 、 $B$ 、 $C$  三端中任意两端是  $+3\text{V}$  时，输出端  $P$  为  $+3\text{V}$ ，或者当  $A$ 、 $B$ 、 $C$  三端全是  $+3\text{V}$  时，输出端  $U_P$  也为  $+3\text{V}$ ，只有当  $V_A = V_B = V_C = 0$  时， $U_P = 0\text{V}$ 。

在逻辑电路中，或门常用来实现逻辑加法，记为

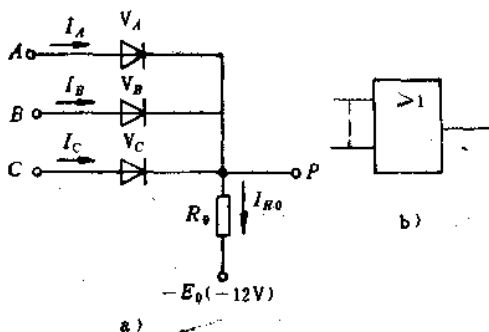


图8-51 二极管或门电路

$$P = A + B + C$$

其意义是， $A$ 、 $B$ 、 $C$ 中只要有一个是“1”， $P$ 就等于“1”。当 $A = B = C = 0$ 时， $P = 0$ 。

“或门”逻辑关系，如表8-5所示。

表8-5 逻辑关系

$A$	$B$	$C$	$P$
0	0	0	0
0	0	1	1
0	1	1	1
1	1	1	1

例8-55 三输入端一输出端的“或门”在四种不同条件下的输出情况。

(1)  $A$ 、 $B$ 、 $C$ 三端都处在低电位 $0V$ ，即

$$V_A = V_B = V_C = 0V$$

$V_A$ 、 $V_B$ 、 $V_C$ 均导通，则有

$$U_P = 0V$$

$$I_{R_0} = \frac{U_P + E_0}{R_0} = \frac{0 + 12}{3.9 \times 10^3} \approx 3 \text{ mA}$$

$$I_A = I_B = I_C = \frac{1}{3} I_{R_0} = \frac{1}{3} \times 3 = 1 \text{ mA}$$

(2) A、B、C中有一端是高电位+3V,另二端是低电位0V,即 $V_A = +3\text{V}$ ,  $V_B = V_C = 0\text{V}$ 。由于 $V_A$ 比 $V_B$ 、 $V_C$ 高, $V_A$ 两端电位差最大, $V_A$ 先导通, $U_P = +3\text{V}$ , $V_B$ 、 $V_C$ 处在反向接法,因此有

$$I_{R_0} = \frac{U_P + E_0}{R_0} = \frac{3 + 12}{3.9 \times 10^3} \approx 3.8 \text{ mA}$$

$$I_B = I_C = 0$$

(3) A、B、C中有二端是高电位+3V,另一端是低电位0V,即 $V_A = V_B = +3\text{V}$ ,  $V_C = 0\text{V}$ , $V_A$ 、 $V_B$ 同时优先导通, $U_P = +3\text{V}$ , $V_C$ 不导通,则有

$$I_{R_0} = \frac{U_P + E_0}{R_0} = \frac{3 + 12}{3.9 \times 10^3} \approx 3.8 \text{ mA}$$

$$I_A = I_B = \frac{1}{2} I_{R_0} = \frac{1}{2} \times 3.8 = 1.9 \text{ mA}$$

(4) A、B、C都是高电位+3V,则有

$$V_A = V_B = V_C = +3\text{V}$$

$V_A$ 、 $V_B$ 、 $V_C$ 都处在导通状态,则有

$$U_P = +3\text{V}$$

$$I_{R_0} = \frac{U_P + E_0}{R_0} = \frac{3 + 12}{3.9 \times 10^3} \approx 3.8 \text{ mA}$$

$$I_A = I_B = I_C = \frac{1}{3} I_{R_0} = \frac{1}{3} \times 3.8 \approx 1.3 \text{ mA}$$

“或门”逻辑关系如表8-5所示。

### 三、非门电路

非门在逻辑上具有“否定”的意思,它把输入端的高电位变

成输出端的低电位，或者把输入端的低电位变成输出端的高电位，如图8-52所示。

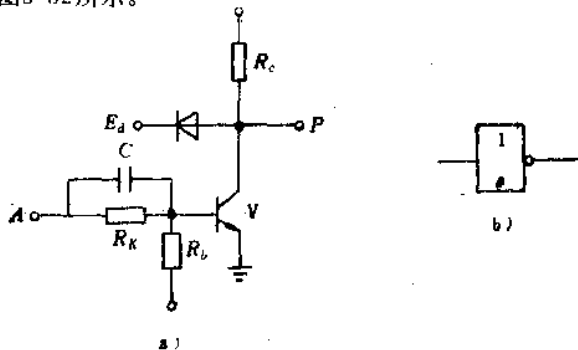


图8-52 非门电路

当输入端无信号，即输入端为低电位 $0V$ 时，通过 $R_E$ 加到基极上，使发射结反偏，晶体管截止，输出近似等于 $+3V$ ，即高电位。当输入端加一正电位（即输入端为高电位 $+3V$ ）时，适当选择 $R_K$ 、 $R_E$ ， $+3V$ 为晶体管提供足够的基极电流，使它饱和导通，输出近似等于 $0V$ ，即低电位，其逻辑式为

$$P = \bar{A}$$

**例8-56** 设计一个非门电路，要求：（1）输出幅度 $U_o = 6V$ ，输出高电平 $U_{oh} = 6V$ ，输出低电平 $U_{ol} \approx 0V$ ，输出波形的上升时间 $t_r$ 和下降时间 $t_f$ 不大于 $0.1\mu s$ ；（2）负载能力，直流负载放流能力 $I_{放} = 4mA$ ，吸收能力 $I_{吸} = 10mA$ ，交流负载的负载电容 $C_L = 100pF$ 。

（1）晶体管的选择 晶体管的开关时间应大大小于电路输出波形的边沿时间（至少小5~10倍），选3DK3A，开关时间 $t_{on} = 0.02\mu s$ ， $t_{off} = 0.03\mu s$ ，满足 $\ll 0.1\mu s$ 的要求。

（2）电源的选择

箝位电源为

$$E_a \approx U_{oh} = 6V \quad (< BU_{ceo} = 9V)$$

集电极电源为

$E_c = 12\text{V}$  (相对  $E_d$ , 尽可能选高些)

基极负偏电源, 一般取基极电位从饱和到截止变化值的 5 ~ 10 倍, 取晶体管饱和时基极电位  $U_{b_{sat}} \approx 0.9\text{V}$ , 截止时  $U_{b_{cut}} \approx -0.9\text{V}$ , 故基极电位变化值为  $1.8\text{V}$ , 取  $-E_b = -12\text{V}$ 。

(3) 电路元件参数的计算

考虑到直流负载要求时则为

$$R_c < \frac{E_c - E_d}{I_{放}} = \frac{12 - 6}{4 \times 10^{-3}} = 1.5\text{k}\Omega$$

考虑到交流负载要求时则为

$$R_c \leq \frac{t_r}{C_d \ln \frac{E_c}{E_c - E_d}} = \frac{0.1 \times 10^{-6}}{100 \ln \frac{12}{12 - 6}} = 1.4\text{k}\Omega$$

$R_c$  的选择决定晶体管的工作电流  $I_c$ , 为了使电路处于最佳工作状态, 保证  $I_c > I_{放}$ , 取  $I_c = 10\text{mA}$ , 则有

$$R_c = \frac{E_c}{I_c} = \frac{12}{10 \times 10^{-3}} = 1.2\text{k}\Omega$$

综合考虑三方面的要求取  $R_c = 1.2\text{k}\Omega$ 。

$R_1$  的计算, 取  $\beta = 50$ , 则有

$$\begin{aligned} R_1 &= \frac{U_{R1}}{I_{R1}} \approx \frac{U_{R1}}{I_b} = \frac{U_{os} - U_{ces}}{I_{RC} + I_{放}} \beta \\ &= \frac{6 - 0.9}{10 \times 10^{-3} + 10 \times 10^{-3}} \times 50 = 12.8\text{k}\Omega \end{aligned}$$

$R_b$  的计算:

$$T_{b_{cut}} = \frac{-E_b}{R_1 + R_c} R_1 = \frac{-12}{12.8 + R_b} \times 12.8 = -0.9\text{V}$$

$$R_b = \frac{-12 \times 12.8}{-0.9} - 12.8 = 158\text{k}\Omega$$

加速电容的确定:

$$C = \frac{(N-1)I_{bH}\Delta t}{\Delta U_i}$$

式中  $N$ ——为电路过驱动倍数，设  $N = 3$ ；

$\Delta t$ ——为晶体管的开启时间  $\Delta t = t_r = 0.1\mu s$ ；

$\Delta U_i$ ——输入信号电平的跳变值  $\Delta U_i = 6V$ ；

$I_{bH}$ ——临界饱和时的基极驱动电流，  $I_{bH} = I_b = \frac{I_{RC} + I_{吸}}{\beta}$

$$= \frac{10 \times 10^{-3} + 10 \times 10^{-3}}{50} = 0.4mA$$

则  $C = \frac{(3-1) \times 0.4 \times 10^{-3} \times 0.1 \times 10^{-6}}{6} = 26pF$

#### 四、与非门电路

在与门电路的后面加一个非门电路，就组成与非门电路，如图8-53所示，逻辑功能与逻辑表达式为

$$P = \overline{ABU}$$

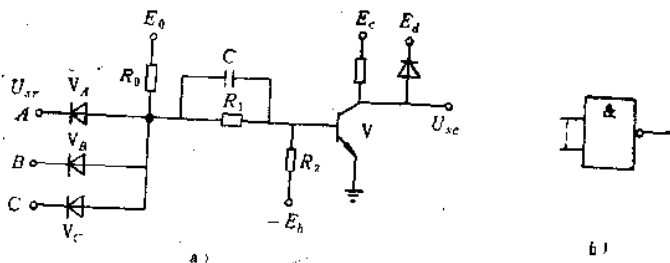


图8-53 与非门电路

逻辑意义是：当输入端全是高电位时，输出端是低电位；当输入端只要有一个或几个是低电位时，输出端是高电位。

例8-57 设计一个与非门电路，要求：(1)信号电平，高电位  $3.5V \pm 0.1V$ ，低电位  $0.3V \pm 0.1V$ ；(2)每级平均延迟时间  $t_d < 50ms$ ；(3)输入端个数  $K_{in} = 3$ ，输出端带同类门个数

$N_{ic} = 2$ ; (4) 电源允许变化  $\pm 10\%$ , 电阻值允许偏差  $\pm 5\%$ ;  
(5) 环境温度为  $0 \sim 50^\circ\text{C}$ 。

(1) 选择管子 根据速度和负载的需要, 速度较高而负载又较大的, 一般选用高速开关管, 对集电极电流  $I_c$  不大的可选用高频开关管 3DK3B, 二极管用 2AK9, 要求:  $30 \leq \beta < 60$ ,  $U_{ces} = 0.3\text{V} \pm 0.1\text{V}$ ,  $I_{cm} = 30\text{mA}$ ,  $U_{bes} = 0.8\text{V} \pm 0.1\text{V}$ 。

(3) 电源电压的确定 根据高电位选箝位电压  $E_o = +3\text{V}$ , 则有

$$E_s = (3 \sim 5)E_o \approx 4E_o = 4 \times 3 = 12\text{V}$$

$$E_o = (4 \sim 8)U_H \approx 12\text{V} \quad \text{与 } E_s \text{ 一致}$$

$$E_b = 12\text{V} \quad \text{与 } E_s \text{ 一致}$$

(3)  $R_c$  的估算 负载电容可按  $100\text{pF}$  估算,  $N_{ic} = 2$ ,  $t_r = 50\text{m}\mu\text{s}$ , 则有

$$R_c \approx \frac{N_{ic} t_r}{C_L} = \frac{2 \times 50 \times 10^{-6}}{100 \times 10^{-12}} = 1\text{k}\Omega$$

(4)  $R_o$  的选择 3DK3B 的  $I_{cm} = 30\text{mA}$ ,  $I_{RCmax} = 12\text{mA}$ ,  $I_{rrm} = 18\text{mA}$ , 为了留有一定余量, 每个与门的  $I_{rrm} = 3.5\text{mA}$ , 根据带 2 个与门电路的需要,  $3.5 \times 2 = 7\text{mA}$ ,  $I_c = 12 + 7 = 19\text{mA}$ ,

则有

$$I_b > \frac{I_c}{\beta} = \frac{19}{30} = 0.63\text{mA}$$

根据对电路的要求不同来确定饱和深度, 一般选  $I_b$  的 2 ~ 4 倍, 即

$$I'_b \approx 2I_b = 2 \times 0.63 \approx 1.3\text{mA}$$

因此要求  $I_{R1} = 2\text{mA}$ , 这样减去  $I_{R2}$  后, 可保证  $I'_b > 1.3\text{mA}$ , 因而有

$$I_{rrm} = \frac{E_o}{R_o} < 3.5\text{mA}$$

$$R_o > \frac{E_o}{I_{rrm}} = \frac{12}{3.5 \times 10^{-3}} \approx 3.4\text{k}\Omega$$



$$I_{ICM} = \frac{E_b - E_c}{R_0} > 2 \text{ mA}$$

$$R_0 < \frac{E_b - E_c}{I_{ICM}} = \frac{12 - 3}{2 \times 10^{-3}} \approx 4.5 \text{ k}\Omega$$

取中间值  $R_0 = 3.9 \text{ k}\Omega$ 。

(5)  $R_1$ 、 $R_2$  的选择  $R_1$ 、 $R_2$  的选择要使管子可靠截止，

即

$$U_b = U_{PD} - \frac{U_{PD} + E_b}{R_1 + R_2} R_1 \leq 0$$

考虑到硅管  $U_p = 0.2 \text{ V}$ ，则有

$$U_b = U_{PD} - \frac{U_{PD} + E_b}{R_1 + R_2} R_1 \leq 0.2 \text{ V}$$

$$R_2 \leq \frac{E_b + 0.2}{V_{PD} - 0.2} R_1$$

按最坏情况考虑： $V_{PD \max} = 0.8 \text{ V}$ ， $E_{b \min} = 12 - 1.2 = 10.8 \text{ V}$ ，这时最不利截止，则

$$R_2 \leq \frac{10.8 + 0.2}{0.8 - 0.2} R_1 = 18.3 R_1$$

可靠饱和的条件为

$$I_b = \frac{U_{PD} - U_{b1}}{R_1} - \frac{U_{b1} + E_b}{R_2} \geq \frac{I_c}{\beta}$$

$$R_2 \geq \frac{(U_{b1} + E_b) R_1}{(U_{PD} - U_{b1}) - \frac{I_c}{\beta} R_1}$$

考虑到各种不利于饱和因素： $U_{b1 \max} = 0.9 \text{ V}$ ， $E_{b \max} = 12 + 1.2 = 13.2 \text{ V}$ ， $U_{PC \min} = 3.6 \text{ V}$ ， $\beta_{\min} = 30$ ，此时则有

$$I_c = I_{RC} + 4I_{r'} = 12 + 4 \times 3.5 = 26 \text{ mA}$$

$$R_2 \geq \frac{(0.9 + 13.2) R_1}{(3.6 - 0.9) - \frac{26}{30} R_1} = \frac{14.1 R_1}{2.7 - 0.87 R_1} = \frac{16.2 R_1}{3.1 - R_1}$$

把两个不等式

$$R_2 \leq 18.3R_1$$

$$R_2 \geq \frac{16.2R_1}{3.1 - R_1}$$

用图解法作出两条曲线，在两条曲线之间，既满足截止条件，又满足饱和条件， $R_1$ 、 $R_2$ 可在当中选取， $R_1$ 还受到 $R_0$ 的约束。当 $U_{rr}$ 为高电位3.5V， $R_0$ 、 $R_1$ 之间的分压值 $U_p$ 要大于 $U_{rr}$ ，以保证输入门二极管V导通，使 $U_p$ 稳定在高电位( $U_{pg} \approx 3.8V$ )，此时则有

$$U_{pg} = E_c - \frac{E_c - U_{bes}}{R_0 + R_1} R_0 \geq U_{rrG}$$

$$R_1 \geq \frac{U_{rrG} - U_{bes}}{E_c - U_{rrG}} R_0$$

考虑到可能失去箝位作用的最坏情况：

$U_{rrG} = 3.6V$ ， $U_{bes} = 0.7V$ ， $E_c = 10.8V$ ， $R_0 = 3.9k\Omega$ ，因此有

$$R_1 \geq \frac{3.6 - 0.7}{10.8 - 3.6} \times 3.9 \approx 1.6k\Omega$$

根据曲线选  $R_2 = 22k\Omega$ 。

(6) 加速电容  $C$  的选择

$$\tau = C \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}$$

$C$  一般取  $30pF$ 。

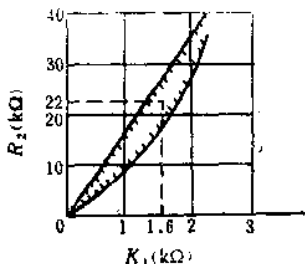


图8-54 图解法

## 第六节 直流稳压电源计算

在电网电压波动或负载变化时，电子设备中的电源电压的变化要限制在一定范围内，否则会造成电路不稳定，甚至使设备不能正常工作，这时就应当采用稳压电源。所谓稳压就是当电网电压或负载变化时，要使输出电压基本不变。目前在中小功率的电子设备中，广泛采用硅稳压管和晶体管组成的负反馈电路。

### 一、硅稳压管稳压电路

该稳压电路如图8-55所示。

图中 VS——稳压管；  
 $R$ ——限流电阻；  
 $R_{Lz}$ ——负载电阻；  
 $I_w$ ——流过稳压管电流；  
 $I_{Lz}$ ——流过负载电流；  
 $U_{rr}$ ——输入直流电压；  
 $U_{sc}$ ——输出稳定电压。

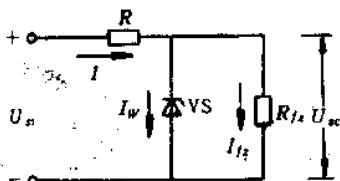


图8-55 硅稳压管稳压电路

#### 1. 稳压管的选择

选择稳压管的原则：稳压管的稳定电压  $U_w$  等于负载需要的稳定电压  $U_{sc}$ ，稳定电流  $I_w$  约等于负载电流  $I_{Lz}$ ，或最大稳定电流  $I_{WM}$  等于负载电流的 2 ~ 3 倍，即

$$U_w = U_{sc}$$

$$I_w \approx I_{Lz}$$

$$I_{WM} = (2 \sim 3) I_{Lz}$$

#### 2. 输入电压的计算

$$U_{rr} = (2 \sim 3) U_{sc}$$

#### 3. 限流电阻的计算

$$\frac{U_{rr \max} - U_{sc}}{I_{w \max}} < R < \frac{U_{rr \min} - U_{sc}}{I_{w \min} + I_{Lz}}$$

#### 4. 稳定度的计算

$$\Delta U_{sc} \approx \Delta U_{rr} \frac{r_w}{R}$$

$$S_u = \left| \frac{\Delta U_{sc}}{U_{sc}} \right| \times 100\%$$

式中  $r_w$ ——稳压管内阻，一般取 12 ~ 18  $\Omega$ 。

例8-58 硅稳压管稳压电路，如果  $U_{rr} = 20V$ ， $U_{sc} = 12V$ ， $I_{Lz} = 6mA$ ，选择硅稳压管和计算限流电阻，若  $U_{rr}$  变化  $\pm 10\%$  时， $U_{sc}$  变化的百分数是多少。

(1) 选稳压管

$$U_w = U_{zc} = 12\text{V}$$

$$I_w = I_{zs} = 6\text{mA}$$

查手册选用 2CW5 其参数  $U_w = 11.5 \sim 14\text{V}$ ,  $I_w = 5\text{mA}$ ,  $P_{w\max} = 280\text{mW}$ ,  $I_{w\max} = 23\text{mA}$ ,  $r_w \leq 18\Omega$ 。

(2) 限流电阻

$$\frac{U_{zc\max} - U_{zc}}{I_{w\max}} < R < \frac{U_{zc\min} - U_{zc}}{I_{w\min} + I_{zs}}$$

因  $U_{zc}$  变化  $\pm 10\%$ , 则有

$$U_{zc\max} = 1.1 \times 20 = 22\text{V}$$

$$U_{zc\min} = 0.9 \times 20 = 18\text{V}$$

$$\frac{22 - 12}{23 \times 10^{-3}} < R < \frac{18 - 12}{(5 + 6) \times 10^{-3}}$$

$$435 < R < 545$$

取  $R = 500\Omega$

(3)  $U_{zc}$  变化的百分数

$$\Delta U_{zc} \approx \Delta U_{zc} \frac{r_w}{R} = \frac{18}{500} \times 10\% = 0.36\%$$

例8-59 要求输出电压  $U_{zc} = 10\text{V}$ , 负载电阻  $R_{Lz}$  由开路变到  $2\text{k}\Omega$ , 选择硅稳压管稳压电路中的元件参数。

(1) 选稳压管

$$U_{zc} = U_w = 10\text{V}$$

$$I_{Lz} = \frac{U_{zc}}{R_{Lz}} = \frac{10}{2 \times 10^3} = 0.005\text{A} = 5\text{mA}$$

查手册选用稳压管 2CW3, 其参数为:  $I_w = 5\text{mA}$ ,  $U_w = 9 \sim 10.5\text{V}$ ,  $P_w = 280\text{mW}$ ,  $I_{w\max} = 26\text{mA}$ ,  $r_w \leq 12\Omega$ 。

(2) 输入电压

$$U_{Lz} = (2 \sim 3)U_{zc} = (2 \sim 3) \times 10 = 20 \sim 30\text{V}$$

选取  $U_{Lz} = 25\text{V}$ 。

(3) 求限流电阻

$$\frac{U_{sr\max} - U_{sc}}{I_{W\max}} < R < \frac{U_{sr\min} - U_{sc}}{I_W + I_{r\max}}$$

假设  $U_{sr}$  变化  $\pm 10\%$ ，则有

$$U_{sr\max} = 1.1 \times 25 = 27.5\text{V}$$

$$U_{sr\min} = 0.9 \times 25 = 22.5\text{V}$$

$$\frac{27.5 - 10}{26 \times 10^{-3}} < R < \frac{22.5 - 10}{(5 + 5) \times 10^{-3}}$$

$$673 < R < 1250$$

取  $R = 1000\Omega = 1\text{k}\Omega$

(4) 计算稳定度

$$\Delta U_{sr} = 27.5 - 22.5 = 5\text{V} (= \pm 2.5\text{V})$$

$$\Delta U_{sc} = \Delta U_{sr} \frac{r_W}{R} = \pm 2.5 \times \frac{12}{1000} = \pm 0.03\text{V} = \pm 30\text{mV}$$

$$S_u = \left| \frac{\Delta U_{sc}}{U_{sc}} \right| \times 100\% = \left| \frac{30 \times 2}{10 \times 10^3} \right| \times 100\% = 0.6\%$$

## 二、串联型晶体管稳压电源

在图8-56中， $V_1$  为调整管，起电压调整作用，电阻  $R_1$ 、 $R_2$  组成的分压电路用来把输出电压  $U_{sc}$  的变动量的一部分取出来加到  $V_2$  的基极上，所以  $R_1$ 、 $R_2$  叫做取样电阻。

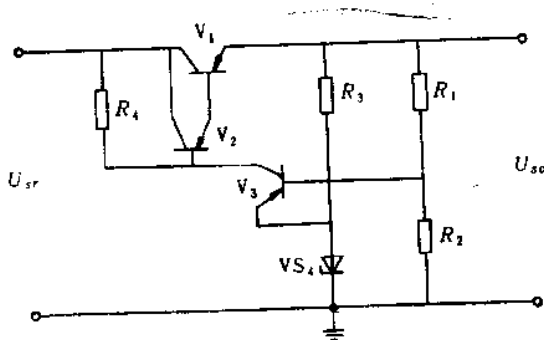


图8-56 串联型晶体管稳压电路

输出电压为

$$U_{sc} = \frac{R_1 + R_2}{R_2} (U_s + U_{be2}) \approx \frac{R_1 + R_2}{R_2} U_s$$

式中  $U_s$ ——稳压管的稳压电压；

$U_{be2}$ ——比较放大管  $V_2$  的基极-发射极电压。

输出电压稳定度为

$$S = \frac{n G_{m2} R_4}{1 + G_{m2} R_N} \frac{U_{sc}}{U_{sc}}$$

式中  $n = \frac{R_2}{R_1 + R_2}$ ——取样电路的分压比；

$G_{m2}$ ——比较放大管的互导；

$R_N$ ——硅稳压管的动态电阻。

输出电阻为

$$R_{sc} \approx \frac{1 + G_{m2} R_N}{n G_{m2} R_4} \left( \frac{1}{G_{m1}} + \frac{R_4}{h_{fe1}} \right)$$

式中  $G_{m1}$ ——调整管的互导；

$h_{fe1}$ ——调整管的电流放大倍数。

**例8-60** 设计一个12V、1A的稳压电源，要求输出电压  $U_{sc} = 12V$ ，负载电流  $I_{Lc} = 0 \sim 1A$ ，稳定系数  $S \geq 10$ ，输出电阻  $R_{sc} = 0.1\Omega$ ，输入电压  $U_{sc} = 18 \pm 2V$ 。

1. 晶体管的选择

(1)  $V_1$  的选择

$$V_{ce1\max} = V_{sc\max} - U_{sc} = 20 - 12 = 8V$$

$$I_{c1\max} = I_{Lc\max} = 1A$$

$$P_{c1\max} = V_{ce1\max} I_{c1\max} = 8 \times 1 = 8W$$

选用低频大功率管3AD6A，其极限参数： $BU_{ceo} = 30V$ ， $I_{cM} = 2A$ ， $P_{cM} = 10W$ 。

若3AD6A的  $h_{FE1} = 25$ ，则  $V_1$  所需最大基极电流为

$$I_{b1\max} = \frac{I_{c1\max}}{h_{FE1}} = \frac{1}{25} = 40mA$$

(2)  $V_2$  的选择

$$U_{ce2\max} = U_{ic\max} - U_{ic} - U_{be1} \approx U_{ce1\max} = 8\text{V}$$

$$I_{c2\max} = I_{b1\max} = 40\text{mA}$$

$$P_{c2\max} = U_{ce2\max} I_{c2\max} = 8 \times 40 \times 10^{-3} = 320\text{mW}$$

选用低频小功率管3AX61, 其极限参数为:  $BU_{ceo} = 30\text{V}$ ,  
 $I_{cM} = 500\text{mA}$ ,  $P_{cM} = 500\text{mW}$

若3AX61的  $h_{FE2} = 40$ , 则  $V_2$  所需最大基极电流为

$$I_{b2\max} = \frac{I_{c2\max}}{h_{FE2}} = \frac{50}{40} = 1.25\text{mA}$$

(3) 基准电压  $V_W$  的确定

$V_W$  一般选6~7V较好, 取  $V_W = 6\text{V}$ , 选用硅稳压管2CW13, 其参数为:  $V_W = 5 \sim 6.5\text{V}$ ,  $I_{W\min} = 10\text{mA}$ ,  $I_{W\max} = 40\text{mA}$ ,  $R_N = 10\Omega$ 。

(4)  $V_2$  的选择

$$V_{ce2\max} = U_{ic} + U_{be1} + U_{be2} - U_W \approx U_{ic} - U_W = 12 - 6 = 6\text{V}$$

选用低频小功率管3AX22, 其参数为:  $BU_{ceo} = 30\text{V}$ ,  $I_{cM} = 100\text{mA}$ ,  $P_{cM} = 150\text{mW}$ 。

## 2. 电路元件的计算

(1) 比较放大器集电极电阻  $R_4$  的计算

$$I_4 = I_{c3} + I_{b2\max} \approx 2I_{b2\max} + I_{b2\max} = 3I_{b2\max} = 3 \times 1 = 3\text{mA}$$

$$R_4 = \frac{U_{ic\min} - U_{be1} - U_{be2} - U_{ic}}{I_4} = \frac{16 - 0.3 - 0.3 - 12}{3 \times 10^{-3}} = 1.1\text{k}\Omega$$

取  $R_4 = 1\text{k}\Omega$ 。

$R_4$  的功率容量为

$$P_4 \geq I_4^2 R_4 = (3 \times 10^{-3})^2 \times 1 \times 10^3 = 0.1\text{W}$$

取  $P_4 = 1/4\text{W}$ 。

(2) 硅稳压管稳压电路串联电阻  $R_3$

$$R_3 = \frac{U_{ic} - U_{W\max}}{I_{I\min}} = \frac{12 - 6.5}{10 \times 10^{-3}} = 550\Omega$$

取  $R_3 = 500\Omega$ 。

$$P_3 = \frac{U_{R_3}^2}{R_3} = \frac{(U_{ic} - U_{Wmin})^2}{R_3} = \frac{(12 - 5)^2}{500} \approx 0.1W$$

取  $P_3 = 1/4W$ 。

(8) 取样电路的计算

$$R_1 + R_2 = \frac{U_{ic}}{I_{zmax} \times 20\%} = \frac{12}{1 \times 0.02} = 600\Omega$$

$$\frac{R_2}{R_1 + R_2} \approx \frac{U_w}{U_{ic}} = \frac{6}{12} = 0.5$$

$$R_2 = 0.5(R_1 + R_2) = 0.5 \times 600 = 300\Omega$$

取  $R_1 = R_2 = 300\Omega$

$$P_1 = P_2 = (I_{R1})^2 R_1 = (0.02 \times 1)^2 \times 300 = 0.12W$$

取  $P_1 = P_2 = 1/4W$ 。

3.  $S$  和  $R_{ic}$  的验算

由晶体管的  $U_{be} - I_c$  曲线求出工作点的互导，即

$$G_{ms} = \frac{\Delta I_c}{\Delta U_{be}} = 80 \text{mA/V}$$

$$G_{m1} = \frac{\Delta I_c}{\Delta U_{be}} = 3 \text{A/V}$$

$$h'_{ie1} \approx h_{ie1} h_{fe2} = 25 \times 40 = 1000$$

$$S = \frac{n G_{ms} R_4 U_{ic}}{1 + G_{ms} R_2 U_{ic}} = \frac{0.5 \times 80 \times 10^{-3} \times 1 \times 10^3}{1 + 80 \times 10^{-3} \times 10} \times \frac{12}{18} = 14.8$$

$$\begin{aligned} R_{ic} &= \frac{1 + G_{ms} R_2}{n G_{ms} R_4} \left( \frac{1}{G_{m1}} + \frac{R_4}{h'_{ie1}} \right) \\ &= \frac{1 + 80 \times 10^{-3} \times 10}{0.5 \times 80 \times 10^{-3} \times 1 \times 10^3} \left( \frac{1}{3} + \frac{1 \times 10^3}{1000} \right) \\ &= 0.06\Omega \end{aligned}$$

$S$  和  $R_{ic}$  满足设计要求。



## 第九章 各种机械设备动力计算

### 第一节 电动机容量的选择方法

为保证生产过程顺利进行，正确选择电动机容量是电力传动系统能否经济和可靠运行的一个极其重要问题。

如果电动机容量选大了，虽然能保证设备正常运行，但是基本投资费用和运转费用增加，而电动机经常不在满负载下运行，使电动机效率和功率因数降低，造成电力浪费，但电动机容量选小了，就不能保证电动机和生产机械正常运行，使电动机长期处于过载运行，造成电动机绝缘过早损坏，寿命缩短，以致设备经常停歇，修理费用也将增加。

决定电动机容量就是正确选择电动机的额定功率，其原则是在电动机能够胜任生产机械负载要求的前提下，最经济、最合理地决定电动机功率。同时要考虑电动机的发热，允许过载能力及起动性能等因素。

因此，在选择电动机的种类、型号、容量、额定电压、额定转速及其各项经济技术指标时，首先应是在各种工作方式下选择电动机的容量。

#### 一、连续工作制电动机容量的选择

##### 1. 恒定负载长期运行时电动机功率计算

(1) 计算负载所需功率  $P_x$ 。

(2) 选择电动机额定功率  $P_N$ ，使  $P_N \geq P_x$ 。

(3) 当选用笼型电动机在重载下起动时，必须校验起动能力。

(4) 如果环境温度  $\theta_0$  离标准值  $40^\circ\text{C}$  较远，应修正电动机额定功率，即

$$P = P_N \sqrt{1 + \frac{40 - \theta_0}{\tau_{\omega}} \cdot (\alpha + 1)}$$

式中  $\tau_{\omega_s}$ ——电动机在额定负载时的稳定温升，即电动机允许温升（℃）；

$\alpha$ ——电动机不变损耗  $P_0$  与额定可变损耗  $P_{cu_s}$  之比，

$$\alpha = \frac{P_0}{P_{cu_s}}, \text{ 一般直流电动机 } \alpha = 1 \sim 1.5, \text{ 冶金}$$

用直流电动机  $\alpha = 0.5 \sim 0.9$ , 笼型电动机  $\alpha = 0.5 \sim$

0.7, 冶金用中小型绕线转子电动机  $\alpha = 0.45 \sim 0.6$ ,

大型绕线转子电动机  $\alpha = 0.9 \sim 1.0$ 。

## 2. 周期性变化负载长期运行时电动机功率计算

### (1) 计算并绘制生产机械负载图

$$P_x = f(t) \quad \text{或} \quad T_x = f(t)$$

(2) 预选电动机功率 利用  $P_x = f(t)$  或  $T_x = f(t)$ , 求出负载的平均功率或平均转矩, 即

$$P_{zd} = \frac{\sum_{i=1}^n P_{zi} t_i}{\sum_{i=1}^n t_i}$$

$$T_{zd} = \frac{\sum_{i=1}^n T_{zi} t_i}{\sum_{i=1}^n t_i}$$

按下式预选电动机额定功率  $P_N$ , 即

$$P_N \geq (1.1 \sim 1.6) P_{zd}$$

$$P_N = (1.1 \sim 1.6) \frac{T_{zd} n_N}{9550}$$

式中  $P_{zd}$ ——负载的平均功率 (kW) ;

$T_{zd}$ ——负载的平均转矩 (N·m) ;

$P_{zi}$ ——第  $i$  段负载的功率 (kW) ;

$T_{zi}$ ——第  $i$  段负载的转矩 (N·m) ;

$t_i$ ——第  $i$  段负载工作时间 (s) ;

$P_N$ ——电动机额定功率 (kW) ;

$n_N$ ——电动机额定转速 (r/min) 。

(3) 作电动机负荷图

$$\Delta P = f(t)、I = f(t)、T = f(t) \text{ 或 } P = f(t)$$

(1) 进行发热、过载能力及必要时的起动能力校验。

如果校验通过, 可确定电动机功率; 若校验未通过或预选过大, 再按以上步骤重选电动机并进行校验, 直至满足要求为止。

二、短期工作制电动机容量的选择

1. 连续工作制电动机功率计算

(1) 计算电动机短时负载功率  $P_g$  和工作时间  $t_g$ 。

(2) 计算电动机额定功率  $P_N$

$$P_N = P_g \sqrt{\frac{1 - e^{-\frac{t_g}{T}}}{1 + \alpha e^{-\frac{t_g}{T}}}}$$

(3) 如果  $\frac{P_g}{P_N} < \lambda_T$ , 电动机允许过载倍数  $\lambda_T$ , 可按  $P_N$  选择电动机功率。

机功率。

(4) 如果  $\frac{P_g}{P_N} > \lambda_T$ , 应按下列式选择电动机功率, 即

$$P_N \geq \frac{P_g}{\lambda_T}$$

式中  $t_g$ ——短期负载工作时间 (s) ;

$T$ ——电动机发热时间常数 (s) ;

$\alpha$ ——同连续工作制一样。

(5) 必要时校验电动机起动能力。

当负载变化时, 按步骤(3)选择电动机功率时,  $P_g$  应由等效功率  $P_{ge}$  来代替, 此时还须用最大负载功率来校验电动机的过载能力; 若按步骤(4)选择电动机功率时,  $P_g$  为最大负载功率。

2. 短时工作制电动机功率计算

(1) 计算电动机短时负载功率  $P_g$  和工作时间  $t_g$ 。

(2) 按  $P_g$ 、 $t_g$  直接选择电动机。

(3) 若电动机实际工作时间  $t_g$  与标准值  $t_{ge}$  不相等时，应将  $t_g$  下的功率  $P_g$  换算到  $t_{ge}$  下的功率  $P_{ge}$ ，再按  $P_{ge}$  选择电动机功率，即

$$P_{ge} = \frac{P_g}{\sqrt{\frac{t_{ge}}{t_g} + \alpha \left( \frac{t_{ge}}{t_g} - 1 \right)}}$$

当  $t_g$  与  $t_{ge}$  相差不大时，则有

$$P_{ge} \approx P_g \sqrt{\frac{t_g}{t_{ge}}}$$

换算时应取  $t_g$  最接近的  $t_{ge}$ 。

当负载变化时，可按算出的等效功率来选择，并进行过载能力及起动能力（对笼型电动机）的校验；若未有合适的短时工作制电动机，可选断续工作制电动机。

### 三、周期性断续工作制电动机容量的选择

#### 1. 连续工作制电动机功率计算

(1) 计算步骤及方法与周期性变化负载长期运行的电动机一样。

(2) 校验发热量按断续工作制公式计算。

#### 2. 断续工作制电动机功率计算

(1) 计算电动机的负载功率，作出生产机械的负载图，初步确定负载持续率  $FC\%$ 。

(2) 根据负载功率的平均值（不包括停歇时间）及  $FC\%$  预选电动机功率  $P_N$ 。

(3) 作电动机负载图。

(4) 根据负载图确定等效功率  $P_{de}$  或等效转矩  $T_{de}$  及实际负载持续率  $FC_e\%$ 。

如果电动机实际持续率  $FC_e\%$  与标准值  $FC\%$  不相同，应将  $P_{de}$  或  $T_{de}$  换算到标准值  $FC\%$  时的等效值，当  $FC_e\%$  与  $FC\%$  相差不大时，其简化换算公式为

$$P = P_{ax} \sqrt{\frac{FC_x\%}{FC\%}}$$

$$T = T_{ax} \sqrt{\frac{FC_x\%}{FC\%}}$$

要求  $P \leq$  预选电动机功率  $P_N$

(5) 校验过载能力及必要时的起动能力 在电动机负载图中, 如果不同工作循环的工作时间  $t_x$  与停歇时间  $t_0$  为变数,  $FC_x\%$  应取平均值, 即

$$FC_x\% = \frac{\sum t_x}{\sum t_x + \sum t_0} \times 100\%$$

当  $FC_x\% < 10\%$ , 可按短时工作制选择电动机, 当  $FC_x\% > 70\%$ , 可按连续工作制选择电动机。

## 第二节 金属切削机床用电动机功率计算

### 一、金属切削机床的主轴、进给和辅助电动机功率计算

#### 1. 主传动电动机功率计算

##### (1) 不调速电动机功率计算

$$P_N \geq \frac{T_x n_N}{9550} \quad (\text{kW})$$

式中  $P_N$  ——电动机额定功率(kW);

$T_x$  ——电动机负载转矩(N·m);

$n_N$  ——电动机额定转速(r/min)。

##### (2) 调速电动机功率计算

###### 1) 交流多速电动机

$$P_N \geq \frac{P_{\max}}{\eta_{\min}} \quad (\text{kW})$$

式中  $P_{\max}$  ——机床最大切削功率(kW);

$\eta_{\min}$  ——传动最低效率。

###### 2) 直流电动机

$$P_N \geq D_n P_z = \frac{1}{D} D_n P_z \quad (\text{kW})$$

- 式中  $P_z$ ——主传动负载功率 (kW) ;  
 $D_n$ ——调电压调速范围, 一般  $D_n = 2 \sim 3$  ;  
 $D_d$ ——调磁场调速范围, 一般  $D_d = 1.75 \sim 2$  ;  
 $D$ ——主传动总调速范围;  
 $Z$ ——机械变速级数, 一般  $Z = 2 \sim 4$  。

## 2. 进给传动电动机功率计算

### (1) 不调速电动机功率计算

$$P_N \geq \frac{F_x U_{\max}}{10^3 \eta} \quad (\text{kW})$$

- 式中  $U_{\max}$ ——最大进给速度 (m/s) ;  
 $F_x$ ——进给运动的总阻力 (N) ;  
 $\eta$ ——进给传动效率。

### (2) 调速电动机功率计算

#### 1) 交流多速电动机

$$T_N \geq T_z \quad (\text{N} \cdot \text{m})$$

- 式中  $T_N$ ——电动机额定转矩 (N·m) ;  
 $T_z$ ——电动机负载转矩 (N·m) 。

#### 2) 直流电动机

$$P_N \geq K \frac{F_x v_{\max}}{10^3 \eta} \quad (\text{kW})$$

- 式中  $F_x$ ——进给运动总阻力 (N) ;  
 $v_{\max}$ ——最大进给速度 (m/s) ;  
 $K$ ——通风散热恶化的修正系数, 当调速范围为 1 : 100 时,  $K = 1.8$  。

### 3. 辅助电动机功率计算 不调速电动机功率计算为

$$P \geq \frac{m \mu v}{10^3 \eta} \quad (\text{kW})$$

$$T_{DS} > T_{ZS}$$

式中  $m$ ——移动件重量 (kg) ;

$v$ ——移动速度 (m/s) ;

$T_{DS}$ ——电动机起动转矩 (N·m) ;

$T_{zs}$ ——负载起动转矩,  $T_{zs} = 9.55 \frac{G\mu_0 v}{n_D \eta}$  (N·m);

$\mu, \mu_0$ ——动、静摩擦系数;

$n_D$ ——电动机转速 (r/min) ;

$\eta$ ——传动效率。

## 二、几种主要金属切削机床用的电动机功率计算

### 1. 车床电动机功率计算

车床的主运动是工件的转动, 进给运动是车刀的直线移动。辅助运转有刀架的快速移动, 工件的夹紧和松开, 尾架移动等。

#### (1) 切削功率

$$P_s = \frac{F_s v}{60} \times 10^{-3} \quad (\text{kW})$$

式中  $P_s$ ——切削功率 (kW) ;

$F_s$ ——切削力 (N) ;

$v$ ——切削速度 (m/min) 。

#### (2) 电动机功率

$$P_N = \frac{P_s}{\eta}$$

式中  $P_N$ ——电动机额定功率 (kW) ;

$\eta$ ——传动效率。

#### (3) 进给功率

$$P_n = \frac{F_n v_n}{60} \times 10^{-3} \quad (\text{kW})$$

或

$$P_n = \frac{F_n S_n}{60} \quad (\text{kW})$$

式中  $P_n$ ——进给功率 (kW) ;

$F_n$ ——刀架在进给方向移动所需总力 (N) ;

$S$ ——走刀量 (进刀量) (mm/r) ;

$n$ ——工件转速 (r/min) ;

$v_n$ ——进给速度 (m/min) 。

一般情况下,进给速度比切削速度小很多,所以进给功率与切削功率相比,就显得非常小,即

$$P_n \approx (0.001 \sim 0.01) P_c$$

例9-1 某车床的切削力是4000N,切削速度是100m/min,选择电动机的功率。

切削功率为

$$P_c = \frac{F_c v}{60} \times 10^{-3} = \frac{4000 \times 100}{60} \times 10^{-3} \\ = 6.67 \text{ kW}$$

电动机的额定功率为

$$P_N = \frac{P_c}{\eta} = \frac{6.67}{0.9} = 7.41 \text{ kW}$$

选择电动机的额定功率为7.5kW。

切削功率也可用单位切削功率来计算,一般在硬质合金外圆车刀切削常用金属时使用,即

$$P_c = P_u a_p S v$$

式中  $P_u$ ——单位切削功率 (kW·min/mm<sup>3</sup>) ;

$a_p$ ——切削深度 (mm) ;

$S$ ——进给量 (mm/r) ;

$v$ ——切削速度 (m/min) 。

立式车床电动机功率计算,在高速重载切削时,需要根据立式车床的主电动机功率来校核切削功率,应先确定切削功率  $P_c$  和电动机输出功率,即

$$P_e = P_u \Sigma Z_{\omega_i} \quad (\text{kW})$$

式中  $P_u$ ——单位切削功率 (kW·min/mm<sup>3</sup>) ;

$\Sigma Z_{\omega_i}$ ——总的金属切削量 (mm<sup>3</sup>/min) ;



$Z_{\omega_i}$ ——一个刀架的金属切削量 ( $\text{mm}^3/\text{min}$ )。

$$Z_{\omega_i} = 1000v a_p f$$

电动机所需输出功率为

$$P_N = \frac{P_z}{\eta} \quad (\text{kW})$$

式中  $\eta$ ——立式车床的传动效率，一般取  $\eta = 0.7 \sim 0.85$ 。

### 2. 铣床电动机功率计算

铣床的主运动是铣刀旋转，进给运动是工件的移动，辅助运动有工作台快速移动等。其铣削功率为

$$P_z = \frac{k_m a b S}{60} \times 10^{-9} \quad (\text{kW})$$

式中  $k_m$ ——单位切削力 ( $\text{N}/\text{mm}^2$ )；

$S$ ——进给量 ( $\text{mm}/\text{min}$ )；

$a$ ——铣削深度 ( $\text{mm}$ )；

$b$ ——铣削宽度 ( $\text{mm}$ )。

也可用下式计算铣削功率，即

$$P_z = \frac{F_z \cdot \frac{d_0}{2} n_0}{9740000} \quad (\text{kW})$$

式中  $F_z$ ——铣削力 ( $\text{N}$ )；

$d_0$ ——铣刀直径 ( $\text{mm}$ )；

$n_0$ ——铣刀转速 ( $\text{r}/\text{min}$ )。

**例9-2** 某铣床的铣削力为3000N，铣刀转速为1000r/min，当铣刀直径为63mm时，求铣削功率。

铣削功率为

$$\begin{aligned} P_z &= \frac{F_z \cdot \frac{d_0}{2} n_0}{9740000} = \frac{3000 \times \frac{63}{2} \times 1000}{9740000} \\ &= 9.7 \text{ kW} \end{aligned}$$

### 3. 钻床电动机功率计算

钻床的刀具同时作两种运动：主运动（钻头的旋转）和进给运动（钻头的纵向移动）。以摇臂钻床为例，辅助运动是横臂快速移动、立柱的夹紧、主轴箱的移动等。其切削功率为

$$P_s = \frac{2\pi n T_r}{60} \times 10^{-5} \quad (\text{kW})$$

式中  $T_r$ ——钻头转矩 (N·cm)；

$n$ ——钻头转速 (r/min)。

例9-3 某钻床的转速为1420r/min，当钻头转矩为1200N·cm时，求钻削功率。

钻削功率为

$$\begin{aligned} P &= \frac{2\pi n T_r}{60} \times 10^{-5} = \frac{2 \times 3.14 \times 1420 \times 1200}{60} \times 10^{-5} \\ &= 1.78 \text{ kW} \end{aligned}$$

#### 4. 磨床电动机功率计算

磨床的砂轮作主运动，它的往复运动是进给运动，辅助运动有砂轮架的快速移动、工作台的移动等。磨床的磨削功率为

$$P_s = \frac{v S t k}{60} \times 10^{-3} \quad (\text{kW})$$

式中  $v$ ——工件的圆周速度(m/min)；

$S$ ——磨头进给量(mm)；

$t$ ——吃刀深度(mm)；

$k$ ——磨削系数(N/mm<sup>2</sup>)。

高速磨削时砂轮电动机功率计算，由于砂轮线速度提高和磨削进给量增大，所以砂轮电动机功率的消耗也相应增加75%~100%，高速磨削时电动机功率一般按下式估算，即

$$P_N = \left( \frac{1}{6} \sim \frac{1}{5} \right) b \quad (\text{kW})$$

式中  $b$ ——砂轮宽度 (mm)。

宽砂轮磨削时电动机功率可按下式计算，即

$$P_N \approx \frac{1}{10} b \quad (\text{kW})$$

式中  $b$ ——砂轮宽度 (mm)。

磨削功率也可用单位宽度金属切除率  $Z'_s$  即单位时间内, 单位时间内, 单位宽度砂轮所切除的金属体积表示, 该体积可用图解法粗略确定, 如图9-1所示。

图中  $P'_s$ ——单位宽度磨削功率 ( $\text{kW}/\text{mm}$ );

$Z'_s$ ——单位宽度金属切除率 [ $\text{mm}^3/(\text{mm}\cdot\text{s})$ ];

$F'_p$ ——单位宽度法向磨削力 ( $\text{N}/\text{mm}$ )。

例9-4 若单位宽度金属切除率  $Z'_s = 10 \text{mm}^3/(\text{mm}\cdot\text{s})$ , 砂轮速度  $v = 45 \text{m/s}$ , 砂轮宽度  $b = 25 \text{mm}$ , 确定磨削功率。

由图 9-1 金属切除率与磨削功率的关系曲线求得单位宽度磨削功率为

$$P'_s = 0.3 \text{kW}/\text{mm}$$

磨削功率为

$$P_s = bP'_s = 25 \times 0.3 = 7.5 \text{kW}$$

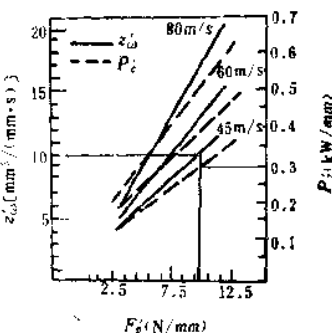


图9-1 用图解确定切削功率

例9-5 某高速外圆磨床, 最大的砂轮线速度  $V_{\max} = 45 \text{m/s}$ , 砂轮的最大宽度  $b_{\max} = 63 \text{mm}$ , 确定磨削时电动机功率

磨削时电动机功率为

$$P_s = \left( \frac{1}{6} \sim \frac{1}{5} \right) b \approx \frac{1}{6} \times 63 = 10.5 \text{kW}$$

例9-6 某宽砂轮外圆磨床, 最大磨削直径为  $170 \text{mm}$ , 砂轮最大宽度为  $100 \text{mm}$ , 确定砂轮电动机功率。

砂轮电动机功率为

$$P \approx \frac{1}{10} b = \frac{1}{10} \times 100 = 10 \text{kW}$$

### 5. 刨床电动机功率计算

刨床的主运动是工作台在工作行程时的纵向移动，进给运动是每一双行程间刀具垂直于主运动的位移，辅助运动有横梁和刀架的快速移动、返回行程时的抬刀运动及调整工序时的工作台缓慢移动等。

(1) 切削功率

$$P_z = \frac{[nF_x + \mu(F_x + F_d)]v_1}{60} \times 10^{-3} \quad (\text{kW})$$

式中  $n$ ——刀具数；

$F_x$ ——刀具切削力 (N)；

$\mu$ ——工作台与导轨间摩擦系数；

铸铁与铸铁  $\mu = 0.15 \sim 0.17$

塑料与铸铁  $\mu = 0.12 \sim 0.2$

$F_x$ ——工件受的力 (N)；

$F_d$ ——工作台受的力 (N)；

$v_1$ ——切削速度 (m/min)。

(2) 电动机的额定功率

$$P_N = \frac{P_z v_2}{\eta v_1} \quad (\text{kW})$$

式中  $v_2$ ——工作台返回速度 (m/min)；

$\eta$ ——满负载时传动效率。

**例9-7** 预选龙门刨床工作台电动机，原始数据为：最大切削力  $F_x = 20000\text{N}$ ，对应于最大切削力的工作台行程速度  $v_1 = 20\text{m/min}$ ，工作台返回行程速度  $v_2 = 40\text{m/min}$ ，工件所受的力  $F_x = 12000\text{N}$ ，工作台所受的力  $F_d = 20000\text{N}$ ，满负载时传动效率  $\eta = 0.82$ ，导轨摩擦系数  $\mu = 0.15$ ，刀具数  $n = 1$ 。

切削功率为

$$\begin{aligned} P_z &= \frac{[nF_x + \mu(F_x + F_d)]v_1}{60} \times 10^{-3} \\ &= \frac{[1 \times 20000 + 0.15(12000 + 20000)] \times 20}{60} \times 10^{-3} \end{aligned}$$

$$= 8.27 \text{ kW}$$

电动机的额定功率为

$$P = \frac{P_z}{\eta} \frac{v_2}{v_1} = \frac{8.27}{0.82} \times \frac{40}{20}$$

$$= 20.2 \text{ kW}$$

选择22kW的电动机。

### 6. 拉床电动机功率计算

拉床的主轴运动是刀具进给，拉削时的切削功率为

$$P_s = \frac{Fv}{60} \times 10^{-3} \quad (\text{kW})$$

拉床所需电动机的功率为

$$P = \frac{P_s}{\eta} = \frac{Fv}{60\eta} \times 10^{-3} \quad (\text{kW})$$

式中  $F$ ——最大拉削力 (N)；

$v$ ——拉削速度 (m/min)；

$\eta$ ——拉床效率，对卧式内拉床和双油缸立式内拉床为0.8~0.9，对其他拉床为0.6~0.8。

**例9-8** 某卧式拉床的最大纵向切削力为100000N，拉削速度为5 m/min，拉削效率 $\eta=0.85$ ，计算拉床所需电动机的功率。

切削功率为

$$P_s = \frac{Fv}{60} \times 10^{-3} = \frac{100000 \times 5}{60} \times 10^{-3}$$

$$= 8.33 \text{ kW}$$

电动机的功率为

$$P = \frac{P_s}{\eta} = \frac{8.33}{0.85} = 9.8 \text{ kW}$$

### 三、用统计法计算电动机功率

统计法就是对各种不同类型的机械设备的主传动电动机，分别进行统计、分析，找出电动机容量与机械设备的主要数据间的

关系，将这个关系用数学表达式表示，作为设计制造新的机械设备时选择电动机容量的主要依据。

1. 车床电动机功率计算

$$P = 36.5D^{1.54} \quad (\text{kW})$$

式中  $D$ ——工件最大直径 (m)。

2. 立式车床电动机功率计算

$$P = 20D^{0.88} \quad (\text{kW})$$

式中  $D$ ——工件最大直径 (m)。

3. 摇臂钻床电动机功率计算

$$P = 0.0648D_s^{1.10} \quad (\text{kW})$$

式中  $D_s$ ——最大钻孔直径 (mm)。

4. 外圆磨床电动机功率计算

$$P = 0.1KB_0 \quad (\text{kW})$$

式中  $B_0$ ——砂轮宽度 (mm)；

$K$ ——砂轮主轴采用不同轴承的系数，滚动轴承  $K = 0.8 \sim 1.1$ ，滑动轴承  $K = 1.0 \sim 1.3$ 。

5. 卧式镗床电动机功率计算

$$P = 0.04D_s^{1.7} \quad (\text{kW})$$

式中  $D_s$ ——镗杆直径 (mm)。

6. 龙门铣床电动机功率计算

$$P = \frac{B^{1.16}}{166} \quad (\text{kW})$$

式中  $B$ ——工作台宽度 (mm)。

例9-9 某车床需要加工工件最大直径为400mm，计算主轴电动机的功率。

主轴电动机的功率为

$$\begin{aligned} P &= 36.5D^{1.54} = 36.5 \times 0.4^{1.54} \\ &= 8.9 \text{ kW} \end{aligned}$$

例9-10 若在立式车床上加工工件最大直径为1m，计算主传动电动机的功率。

主传动电动机功率为

$$P = 20D^{0.88} = 20 \times 1^{0.88} \\ = 20 \text{ kW}$$

例9-11 某摇臂钻床的最大钻孔直径为40mm，确定主电动机的功率。

主电动机的功率为

$$P = 0.0646D_d^{1.18} = 0.0646 \times 40^{1.18} \\ = 5.21 \text{ kW}$$

例9-12 已知卧式镗床的镗杆直径为110mm，计算电动机的功率。

电动机的功率为

$$P = 0.004D_d^{1.7} = 0.004 \times 110^{1.7} \\ = 11.8 \text{ kW}$$

例9-13 某外圆磨床的砂轮宽度为75mm，试计算砂轮电动机的功率，取  $K = 1.0$ 。

砂轮电动机的功率为

$$P = 0.1KB_0 = 0.1 \times 1.0 \times 75 = 7.5 \text{ kW}$$

例9-14 龙门铣床的工作台宽度为1000mm，选择电动机的容量。

电动机的功率为

$$P = \frac{B^{1.15}}{166} = \frac{1000^{1.15}}{166} = 17 \text{ kW}$$

### 第三节 起重机电动机功率计算

起重机是搬运物料的机械设备，一般有多种动作，分别由起升、运行、变幅、回转等机构来完成。

#### 一、起重机各机构所需电动机功率计算

##### 1. 起升用电动机功率

$$P_1 = \frac{mgv_1}{\eta_1} \times 10^{-3} \quad (\text{kW})$$

式中  $m$ ——起重量 (kg) ;  
 $v_1$ ——起升速度 (m/s) ;  
 $\eta_1$ ——起升机构总效率;  
 $g$ ——重力加速度, 取  $g = 9.8 \text{ m/s}^2$ 。

### 2. 小车运行电动机功率

$$P_2 = \frac{m_2 g v_2 c_2}{\eta_2} \times 10^{-3} \quad (\text{kW})$$

式中  $m_2$ —— $m$  与起重小车自重 (t) ;  
 $v_2$ ——小车运行速度 (m/s) ;  
 $\eta_2$ ——小车运行机构机械效率;  
 $c_2$ ——小车运行阻力系数。

### 3. 大车运行电动机功率

$$P_3 = \frac{m_3 g v_3 c_3}{\eta_3} \times 10^{-3} \quad (\text{kW})$$

式中  $m_3$ —— $m_2$  与桥架重量之和 (t) ;  
 $v_3$ ——大车运行速度 (m/s) ;  
 $\eta_3$ ——大车运行机构机械效率;  
 $c_3$ ——大车运行阻力系数。

阻力系数  $c_2$ 、 $c_3$  当用滚动轴承时取 10~12, 当用滑动轴承时取 20~25。

机构总效率的近似值见表 9-1。

运行机构电动机的功率还可以用下列公式计算:

横行小车电动机功率为

$$P = \frac{m_x g (c + 7v)v}{\eta} \times 10^{-3} \quad (\text{kW})$$

式中  $m_x$ ——运动部分总重量 (t) 。

走行大车电动机功率为

$$P = \frac{m_x g (c + 7v)v}{\eta} \times 10^{-3} \quad (\text{kW})$$

式中  $m_x$ ——运动部分总重量 (t) 。



表9-1 机构总效率的近似值

机 构	传 动 型 式	机 械 总 效 率 $\eta$	
		用滚动轴承	用滑动轴承
起升机构	圆柱正齿轮传动	0.80~0.85	0.70~0.80
	蜗轮蜗杆传动	0.65~0.70	0.65~0.70
运行机构	圆柱正齿轮传动	0.80~0.90	0.75~0.85
	蜗轮蜗杆传动	0.65~0.75	0.65~0.75
回转机构	齿 轮 传 动	0.75~0.85	0.70~0.80
	蜗轮蜗杆传动	0.50~0.70	0.50~0.70

## 二、起重机用吊车电动机功率计算

$$P = \frac{(m + m_0)gv}{\eta} \times 10^{-3} \quad (\text{kW})$$

式中  $m$ ——起重量 (kg) ;  
 $m_0$ ——吊钩及钢索重量 (kg) ;  
 $v$ ——起重速度 (m/s) ;  
 $\eta$ ——传动效率。

例9-15 某车间使用桥式起重机,起升重量30t,起升速度3m/min,横行速度20m/min,走行速度30m/min,已知横行小车重10t,桥重20t,横行阻力系数10,走行阻力系数12,机械传动效率取0.75,求提升、横行、走行各电动机的功率。

起升电动机功率为

$$P_1 = \frac{mgv_1}{\eta} \times 10^{-3} = \frac{30 \times 10^3 \times 9.8 \times 3}{0.75 \times 60} \times 10^{-3}$$

$$= 20 \text{ kW}$$

横行小车电动机功率为

$$P_2 = \frac{m_2 g v_2 c_2}{\eta} \times 10^{-3} = \frac{(30 + 10) \times 9.8 \times 20 \times 10}{0.75 \times 60} \times 10^{-3}$$

$$= 1.78 \text{ kW}$$

走行大车电动机功率为

$$P_3 = \frac{m_3 g v_3 c_3}{\eta} \times 10^{-3} = \frac{(30 + 10 + 20) \times 9.8 \times 30 \times 12}{0.75 \times 60} \times 10^{-3}$$

$$= 4.8 \text{ kW}$$

**例9-16** 用另一种方法，再计算上例中各运行机构电动机的功率。

横行小车电动机功率为

$$P = \frac{m_x g (c + 7v)v}{\eta} \times 10^{-3}$$

$$= \frac{(30 + 10) \times 9.8 \left( 10 + 7 \times \frac{20}{60} \right) \times \frac{20}{60}}{0.75} \times 10^{-3}$$

$$= 2.19 \text{ kW}$$

走行大车电动机功率为

$$P = \frac{m_x g (c + 7v)v}{\eta} \times 10^{-3}$$

$$= \frac{(30 + 10 + 20) \times 9.8 \left( 12 + 7 \times \frac{30}{60} \right) \times \frac{30}{60}}{0.75} \times 10^{-3}$$

$$= 6.2 \text{ kW}$$

**例9-17** 有一台起重吊车，起重量3t，吊钩及钢索重量0.2t，起重速度0.2m/s，计算提升电动机功率，取传动效率为0.75。

提升电动机功率为

$$P = \frac{(m + m_0) g v}{\eta} \times 10^{-3} = \frac{(3000 + 200) \times 9.8 \times 0.2}{0.75} \times 10^{-3}$$

$$= 8.53 \text{ kW}$$

#### 第四节 输送机电动机功率计算

##### 一、普通带式输送机

普通带式输送机是连续运输机中最常见的一种形式，这种输

送机是在钢结构机架的两端装置滚筒，滚筒上卷着环形封闭输送带，输送带是输送机的牵引构件，同时又是承载构件。驱动滚筒和输送带之间依靠摩擦传动。

计算驱动功率可用近似计算法或逐点张力法。近似计算法用于初步设计；逐点张力法可求出各点张力值，用于技术设计。

### 1. 近似计算法

#### (1) 传动滚筒轴功率

$$P = (k_0 L_0 V + k_2 L_0 Q \pm 0.00273QH) k_f \quad (\text{kW})$$

式中  $k_0$ ——空载运行功率系数；

$k_2$ ——水平满载运行功率系数；

$k_f$ ——附加功率系数；

$L_0$ ——输送机水平投影长度 (m)；

$H$ ——输送机倾斜段提升高度 (m)；

$Q$ ——输送能力 (kN/h)。

向上输送取10，向下输送取1。

#### (2) 电动机功率

$$P \geq k_q \frac{P}{\eta} \quad (\text{kW})$$

式中  $k_q$ ——满载起动系数， $k_q = 1.0 \sim 1.4$ ；

$\eta$ ——传动效率，光面传动滚筒取  $\eta = 0.88$ ，胶面传动滚筒取  $\eta = 0.9$ 。

### 2. 逐点张力法

传动滚筒轴功率为

$$P = \frac{(F_1 - F_2)v}{1000} \quad (\text{kW})$$

式中  $F_1$ ——传动滚筒入端张力 (N)；

$F_2$ ——传动滚筒出端张力 (N)；

$v$ ——输送带速度 (m/s)。

空载运行功率系数  $k_0$ 、水平满载运行功率系数  $k_2$ 、附加功

率系数  $k$ , 见表9-2、表9-3、表9-4。

表9-2 空载运行功率系数  $k_0$  值

$B$ ① (mm)	300	400	500	650	800	1000	1200	1400	1600	
$\omega_r$ ②	0.018	0.0036	0.0048	0.0061	0.0074	0.0100	0.0138	0.0191	0.0230	0.0258
	0.020	0.0040	0.0053	0.0067	0.0082	0.0110	0.0153	0.0212	0.0255	0.0286
	0.025	0.0050	0.0066	0.0084	0.0103	0.0137	0.0191	0.0265	0.0319	0.0358
	0.030	0.0060	0.0080	0.0100	0.0124	0.0165	0.0229	0.0318	0.0383	0.0429
	0.035	0.0070	0.0093	0.0117	0.0144	0.0192	0.0268	0.0371	0.0446	0.0500
	0.040	0.0080	0.0106	0.0134	0.0165	0.0220	0.0306	0.0424	0.0510	0.0527

①  $B$ —输送带宽度; ②  $\omega_r$ —上托辊阻力系数, 当用于平形上托辊时  $\omega_r = \omega_x$ 。

表9-3 水平满载运行功率系数  $k_x$  值

$\omega_r$	0.018	0.020	0.025	0.030	0.035	0.040
$k_x$	$4.91 \times 10^{-5}$	$6.45 \times 10^{-5}$	$6.8 \times 10^{-5}$	$8.17 \times 10^{-5}$	$9.55 \times 10^{-5}$	$10.9 \times 10^{-5}$

表9-4 附加功率系数  $k_f$  值

$\beta$ ① (°)	$L_n$ ② (m)	15	30	45	60	100	150	200	300	>300
	0	2.28	2.10	1.80	1.60	1.55	1.50	1.40	1.30	1.20
6	1.70	1.40	1.30	1.25	1.25	1.20	1.20	1.15	1.15	
12	1.45	1.25	1.25	1.20	1.20	1.15	1.15	1.14	1.14	
20	1.30	1.20	1.15	1.15	1.15	1.13	1.13	1.10	1.10	

①  $\beta$ —倾角; ②  $L_n$ —输送机水平投影长度。

## 二、钢绳牵引带式输送机

钢绳牵引带式输送机的牵引件与承载件是分开的, 它用钢绳作牵引件, 胶带作承载件, 胶带承托在牵引钢绳上。驱动轮驱动钢绳, 从而带动胶带, 将物料从一端输送到另一端。

功率概算为

$$P_z = (k_k L_n v + k_z L_n Q \pm 0.00273QH) k_f \quad (\text{kW})$$

电动机功率为

$$P \geq k_a \frac{P_z}{\eta}$$

式中  $k_k$ ——空载功率系数,  $k_k = \frac{c_f}{500}(m_1 + 2m_2)g + \frac{c_f}{10.2}$ ;

$k_z$ ——水平满载运行功率系数,  $k_z = \frac{c_f}{367}$ ;

$k_f$ ——附加功率系数,  $k_f = 1.03$ ;

$\eta$ ——传动效率, 用差速器时  $\eta = 0.8 \sim 0.9$ , 不用差速器时  $\eta = 0.85 \sim 0.95$ ;

$k_a$ ——满载起动系数, 用JR、JS、JRQ、YR型电动机时  $k_a = 1.15 \sim 1.25$ ;

$m_1$ ——牵引钢绳每米长重 (kg/m) ;

$m_2$ ——钢绳牵引式胶带每米重 (kg/m) ;

$c_f$ ——上托辊阻力系数,  $c_f = 0.01 \sim 0.025$ 。

其他参数与普通带式输送机一样。

托辊阻力系数见表9-5。

表9-5 托辊阻力系数

工作环境	槽形托辊 $\omega_1$	平形托辊 $\omega_2$
清洁、干燥	0.02	0.018
少量灰尘、正常温度	0.03	0.025
大量灰尘、温度高	0.04	0.035

### 三、带式输送机

电动机的功率为

$$P = \frac{1}{\eta} (5.5KLv + 1.5QL + 27.6H) \times 10^{-4} \quad (\text{kW})$$

式中  $\eta$ ——传动效率，一般取  $\eta = 0.88$ ；

$L$ ——胶带长度 (m)；

$v$ ——胶带前进速度 (m/s)；

$Q$ ——输送量 (t/h)；

$H$ ——垂直高度 (m)；

$K$ ——与胶带宽度有关的系数。

与胶带宽度有关系数见表9-6。

表9-6 与胶带宽度有关系数

胶带宽度 (mm)	500	650	800	1000	1200	1400
$K$	26	32	40	52	70	85

#### 四、悬挂输送机

悬挂输送机是把物品悬挂在空间轨道上运行的连续输送机，悬挂输送机电动机的功率计算有以下两种方法。

##### 1. 近似概算法

电动机的功率为

$$P = \frac{(F_{\max} - F_0)v_{\max}}{1000\eta} \quad (\text{kW})$$

式中  $F_{\max}$ ——最大张力 (N)；

$F_0$ ——初张力 (N)；提式输送机  $F_0 = 490 \sim 980$ (N)，

推式输送机  $F_0 = 1470 \sim 2940$ (N)；

$F_{\max} - F_0$ ——驱动链轮上的圆周力 (N)；

$v_{\max}$ ——输送机最大速度 (m/s)；

$\eta$ ——传动机构效率， $\eta = 0.7 \sim 0.8$ 。

##### 2. 逐点张力计算法

电动机的功率为

$$P = \frac{(F_r - F_e)v_{\max}}{1000\eta} \quad (\text{kW})$$

式中  $F_r$ ——驱动链轮绕入端张力 (N)；

$F_c$ ——驱动链轮绕出端张力 (N) ;

$F_r - F_c$ ——驱动链轮上的圆周力 (N) 。

### 五、螺旋输送机

螺旋输送机是一种不带挠性件的输送设备, 通过螺旋叶片向一定方向输送散状物料。螺旋轴所需功率为

$$P_z = \frac{Q}{367} (cL_n \pm H) \quad (\text{kW})$$

电动机功率为

$$P = k \frac{P_z}{\eta}$$

式中  $Q$ ——输送量 (t/h) ;

$L_n$ ——螺旋输送机水平投影高度 (m) ;

$H$ ——螺旋输送机垂直投影高度 (m) ;

向上输送取10, 向下输送取1。

$k$ ——功率备用系数,  $k = 1.2 \sim 1.4$ ;

$\eta$ ——传动总效率  $\eta < 0.9$ ;

$c$ ——物料阻力系数。

物料阻力系数见表9-7。

表9-7 物料阻力系数  $c$

物料特性	典型物料	$c$
干的、无磨琢性	粮食、谷物、锯木屑、煤粉、面粉	1.2
湿的、无磨琢性	棉子、麦芽、糟块	1.5
磨琢性较小的	苏打、块煤、食盐	2.5
磨琢性大的	卵石、砂、水泥	3.2
强烈磨琢性或粘性	炉灰、造型土、石灰、焦炭、矿砂	4.0

### 六、气力输送装置

气力输送装置是在管道内利用具有一定能量的气流将粉粒状

物料从一处输送到另一处的管道输送设备。

风机的电动机功率为

$$P = \frac{q_v F}{367 \eta_z \eta_c} \times 10^{-2} \quad (\text{kW})$$

式中  $q_v$ ——所需风机风量 ( $\text{m}^3/\text{h}$ ) ;

$F$ ——所需风机风压 (Pa) ,  $F = (1.1 \sim 1.2) \Delta F$  ;

$\Delta F$ ——整个系统总的压力损失 (Pa) ;

$\eta_z$ ——机械传动效率,  $\eta_z = 0.5 \sim 0.7$  ;

$\eta_c$ ——风机的流体效率。

### 七、卷扬机

卷扬机是由电动机带动卷筒转动, 钢丝绳绕在卷筒上, 利用卷筒的正、反转, 由钢绳牵引货架上下移动, 是建筑部门常用的运输机械。

卷扬机的电动机因起停频繁的关系, 它的负载曲线不是直线负载曲线而是斜形负载曲线, 如图9-2所示。

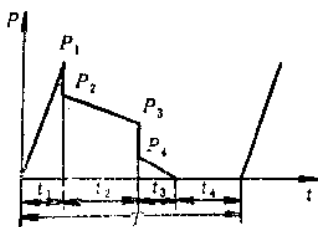


图9-2 卷扬机容量曲线

电动机功率计算公式如下:

$$P = \frac{1}{\eta} \sqrt{\frac{P_1^2 t_1 + (P_2^2 + P_2 P_3 + P_3^2) \frac{t_2}{3} + P_4^2 t_3}{t_1 + t_2 + t_3 + \frac{t_4}{3}}} \quad (\text{kW})$$

式中  $t_1, t_2, t_3, t_4$ ——电动机负载变化一个周期各间隔的时间 (s) ;

$P_1, P_2, P_3, P_4$ ——电动机负载变化一个周期各段负载功率 (kW) ;

$\eta$ ——传动效率。

### 八、埋刮板输送机

埋刮板输送机是输送粉尘状、小颗粒及小块状等散料的连续



输送设备，可以水平、倾斜和垂直输送。输送物料时，刮板链条全埋在物料之中，故称为埋刮板输送机。

### 1. 输送机轴功率

$$P_z = \frac{(F_r - F_c)v}{1000} \quad (\text{kW})$$

### 2. 电动机功率

$$P \geq k_f \frac{P_z}{\eta} \quad (\text{kW})$$

式中  $F_r$ ——刮板链条入端张力 (N)；

$F_c$ ——刮板链条出端张力 (N)；

$v$ ——刮板链条的速度 (m/s)；

$k_f$ ——功率备用系数， $k_f = 1.1 \sim 1.3$ ；

$\eta$ ——传动总效率， $\eta = 0.85 \sim 0.90$ 。

## 九、架空索道

架空索道是用架空的钢索输送货物或人员的运输机械。

### 1. 正常运行电动机功率计算

#### (1) 动力运行

$$P_d = \frac{F_d v}{1000 \eta} \quad (\text{kW})$$

#### (2) 制动运行

$$P_z = \frac{F_z v}{1000 \eta} \quad (\text{kW})$$

式中  $F_d$ ——动力运行时驱动轮的圆周力， $F_d = F_r - F_c + \Delta F$  (N)；

$F_z$ ——制动运行时驱动轮的圆周力， $F_z = F_c - F_r - \Delta F$  (N)；

$F_r$ ——驱动轮入侧张力 (N)；

$F_c$ ——驱动轮出侧张力 (N)；

$\Delta F$ ——牵引索在驱动轮上的阻力损失 (N)；

$v$ ——牵引索的速度 (m/s)；

$\eta$ ——传动效率，动力运行取  $\eta = 0.85$ ，制动运行取  $\eta = 0.95$ 。

### 2. 在不利状态运行时电动机功率计算

动力运行的索道需按线路下坡区段缺货车时计算，制动运行的索道需按上坡区段缺货车时计算。介于两者之间的索道要同时计算上述两种情况。

#### (1) 动力运行功率

$$P'_d = \frac{(F_d + \Delta F)v}{1000\eta} \quad (\text{kW})$$

#### (2) 制动运行功率

$$P'_z = \frac{(F_z + \Delta F)v}{1000\eta} \quad (\text{kW})$$

式中  $\Delta F$ ——不利状态运行时增加的圆周力， $\Delta F = (m + m_g)g(h' \pm cl')$  (N)；

$m_g$ ——牵引索每米重 (kg/m)；

$m$ ——线路均布载荷 (kg/m)；

$h'$ ——缺车区段的高差 (m)；

$l'$ ——缺车区段的水平距，按连续五个车距计算，或根据实际地形得出的最不利缺车区段 (m)；

$c$ ——货车运行阻力系数，动力运行取 1，制动运行取 10。

### 3. 不利状态运行时电动机起动或制动功率的计算

#### (1) 动力运行时起动功率计算

$$P'_d = \frac{(F_d + \Delta F + J)v}{1000\eta} \quad (\text{kW})$$

#### (2) 制动运行时制动功率计算

$$P'_z = \frac{(F_z + \Delta F + J)v}{1000\eta} \quad (\text{kW})$$

式中  $J$ ——惯性力(N)。

#### (3) 电动机过载验算

$$P \geq \frac{P'_z}{k_g} \quad (\text{kW})$$

$$P \geq \frac{P''_z}{k_g} \quad (\text{kW})$$

式中  $P$ ——根据  $P'_z$ 、 $P''_z$  选定的电动机功率 (kW)；  
 $k_g$ ——电动机过载系数。

### 十、叉车

叉车是实现货物机械化装卸、堆垛和短距离运输的高效搬运机械。

#### 1. 发电机功率计算

$$P = \frac{k_d(m + m_c)gv}{3.67\eta_N\eta_z\alpha\beta_s} \quad (\text{kW})$$

式中  $m$ ——起重量 (t)；  
 $m_c$ ——叉车自重 (t)；  
 $v$ ——最高速度 (km/h)；  
 $\eta_z$ ——传动总效率；  
 $\eta_N$ ——附件损耗系数， $\eta_N = 0.8 \sim 0.85$ ；  
 $\alpha$ ——发动机适应性系数，汽油机、液态石油气发动机  $\alpha = 1.25$ ，柴油机  $\alpha = 1.1$ ；  
 $\beta_s$ ——叉车高速档运行时发动机转速与发动机额定转速之比， $\beta_s = 1.1 \sim 1.25$ ，装限速器时， $\beta_s = 0.8 \sim 0.9$ ；  
 $k_d$ ——叉车最高速度运行时的动力因数，2t 以下叉车  $k_d = 0.09 \sim 0.1$ ，3 ~ 5t 叉车， $k_d = 0.05 \sim 0.07$ ，10t 以上叉车， $k_d \geq 0.04$ 。

#### 2. 牵引电动机功率计算

$$P = \frac{c(G + G_c)v\beta}{0.367\eta_z} \quad (\text{kW})$$

式中  $\beta$ ——与爬坡有关系数，坡度小时取小值， $\beta = 1.4 \sim 1.8$ ；  
 $\eta_z$ ——传动总效率， $\eta_z = 0.85 \sim 0.92$ ；  
 $c$ ——运行阻力系数，充分轮胎取  $c = 0.035$ ，实芯轮胎取

$$c = 0.02,$$

### 3. 油泵电动机功率计算

$$P_b = \frac{pq_v}{60\eta_b} \times 10^{-3} \quad (\text{kW})$$

式中  $p$ ——液体压力 (Pa) ;

$q_v$ ——流量 (L/min) ;

$\eta_b$ ——油泵总效率。

液压泵总效率见表9-8。

表9-8 液压泵总效率

类型	齿轮泵	螺杆泵	叶片泵	柱塞泵
总效率 $\eta_b$	0.60~0.70	0.65~0.80	0.80~0.75	0.80~0.85

例9-18 某卷扬机容量曲线如图9-2所示,已知 $t_1 = 10\text{s}$ ,  $t_2 = 20\text{s}$ ,  $t_3 = 5\text{s}$ ,  $t_4 = 15\text{s}$ ,  $P_1 = 40\text{kW}$ ,  $P_2 = 25\text{kW}$ ,  $P_3 = 20\text{kW}$ ,  $P_4 = 5\text{kW}$ , 求电动机的容量, 取传动效率 $\eta = 0.95$ 。

电动机的容量为

$$P = \frac{1}{\eta} \sqrt{\frac{P_1^2 t_1 + (P_2^2 + P_2 P_3 + P_3^2) \frac{t_2}{3} + P_4^2 t_4}{t_1 + t_2 + t_3 + \frac{t_4}{3}}}$$

$$= \frac{1}{0.95} \sqrt{\frac{40^2 \times 10 + (25^2 + 25 \times 20 + 20^2) \frac{20}{3} + 5^2 \times 5}{10 + 20 + 5 + \frac{15}{3}}}$$

$$= 27\text{kW}$$

例9-19 移动式运输输送带, 已知带宽500mm, 输送带长度5m, 带速1.6m/s, 输送能力145t/h, 提升高度1.6m, 试计算电动机功率。

由输送带宽度500mm, 查表9-6知  $K = 26$ 。

电动机功率为

$$\begin{aligned}
 P &= \frac{1}{\eta} (5.5KLv + 1.5QL + 27.6H) \times 10^{-4} \\
 &= \frac{1}{0.88} (55 \times 26 \times 5 \times 1.6 + 1.5 \times 145 \times 5 + 27.6 \times 1.6) \times 10^{-4} \\
 &= 2.28 \text{ kW}
 \end{aligned}$$

## 第五节 电梯及自动扶梯电动机功率计算

### 一、电梯用电动机功率计算

电梯是固定的电气升降机，要求平稳方便、安全迅速地载运旅客和货物，并使升降室能准确地停在给定的水平上。

曳引电动机运行情况比较复杂，不仅是重复短时工作、频繁起、制动和正、反转，而且负载变化很大，经常工作在电动状态或再生制动状态，因此电动机功率计算比较复杂，可用下列经验公式粗算电动机功率，即

$$P = \frac{mgv(1 - K_p)}{\eta} \times 10^{-3} \quad (\text{kW})$$

式中  $m$ ——额定载重量(kg)；

$v$ ——额定速度(m/s)；

$K_p$ ——对重平衡系数，一般  $K_p = 0.4 \sim 0.5$ ；

$\eta$ ——机械总效率，蜗轮蜗杆传动时  $\eta = 0.5 \sim 0.55$ ，无齿轮传动时  $\eta = 0.75 \sim 0.8$ 。

### 二、自动扶梯用电动机功率计算

自动扶梯是一种客运工具，输送能力大，运送客流均匀，能连续运送乘客。所需功率为

$$P = \frac{m_1 g H v}{1000} K_f \quad (\text{kW})$$

式中  $m_1$ ——乘客的线载荷(kg/m)；

$H$ ——提升高度(m)；

$v$ ——运送速度(m/s)；

$K_f$ ——附加功率系数， $K_f = 1.25 \sim 1.4$ ，高度大时取大值。

$$m_j = \frac{n_n m_n g}{l_j / 1000} k_m \quad (\text{kg/m})$$

式中  $n_n$ ——一个梯级上的乘客数，单人梯取1，双人梯取2；

$m_n$ ——单人重量取60(kg)；

$l_j$ ——梯级节距，一般取400(mm)；

$k_m$ ——满载系数。

自动扶梯的满载系数  $k_m$  见表9-9。

表9-9 自动扶梯的满载系数

$v(\text{m/s})$	0.4	0.5	0.6	0.75	0.9	1.0
$k_m$	0.96	0.9	0.84	0.75	0.66	0.6

例9-20 某交流住宅电梯TZJ500-1.0，若额定载重量为490 kg，额定速度为1m/s，计算电动机的功率，取  $K_p = 0.4$ ， $\eta = 0.5$ 。

电动机的功率为

$$P = \frac{mgv(1-K_p)}{\eta} \times 10^{-3} = \frac{490 \times 9.8 \times 1 \times (1-0.4)}{0.5} \times 10^{-3} = 5.88 \text{ kW}$$

例9-21 某商场安装单人自动扶梯，提升高度为5m，电梯速度为0.5m/s，设梯级节距  $l_j = 400 \text{ mm}$ ，求所需功率。

乘客的线载荷为

$$m_j = \frac{n_n m_n g}{l_j / 1000} k_m = \frac{1 \times 60 \times 9.8}{400 / 1000} \times 0.9 = 1350 \text{ kg/m}$$

所需功率为

$$P = \frac{m_j H v}{1000} K_f = \frac{1350 \times 5 \times 0.5}{1000} \times 1.3 = 4.39 \text{ kW}$$

### 第六节 风机及空气压缩机电动机功率计算

#### 一、风机用电机的功率计算

风机包括通风机和鼓风机，主要用于输送气体，其电动机功率计算如下：

$$P = \frac{pq_v K}{60\eta\eta_N} \times 10^{-3} \quad (\text{kW})$$

式中  $p$ ——全风压 (Pa)；  
 $q_v$ ——风量 ( $\text{m}^3/\text{min}$ )；  
 $K$ ——余量系数；  
 $\eta$ ——风机效率；  
 $\eta_N$ ——传动效率。

风机的机械传动效率见表9-10。

表9-10 风机的机械传动效率 $\eta_N$

传动形式	电机直联	联轴器	减速器	三角传送带
$\eta_N$	1.0	0.98	0.95	0.92

风机的效率与功率储备系数见表9-11。

表9-11 风机的效率与功率储备系数

通风机的种类	$\eta$	K
螺旋桨式通风机	0.5~0.75	1.3
圆盘式通风机	0.3~0.5	1.5
多叶通风机	0.45~0.55	1.2~1.3
透平式通风机 ( $\geq 400\text{kW}$ )	0.65~0.75	1.15~1.25
透平式通风机 ( $< 400\text{kW}$ )	0.6~0.7	1.15~1.25
板式通风机	0.5~0.6	1.15~1.25
单级透平式通风机	0.6~0.75	1.1~1.2
多级透平式通风机	1.55~0.7	1.1~1.2

#### 二、空气压缩机用电动机功率计算

##### 1. 活塞式压缩机

活塞式压缩机由曲柄连杆机构将驱动机的回转运动变为活塞的往复运动，气缸和活塞共同组成压缩容积。

(1) 指示功率计算

$$P_{id} = 1.674 p_{i,i} V_{ih,i} \lambda_{vi} \frac{K_i}{K_i - 1} \left[ \left( \frac{p_{di}}{p_{ii}} \right)^{\frac{K_i - 1}{K_i}} - 1 \right] \times 10^{-5} \quad (\text{kW})$$

式中  $P_{id}$ ——实际循环消耗的功率(kW)；

$p_{i,i}$ —— $i$ 级的进气压力(Pa)；

$p_{ii}$ ——气缸内实际进气压力(Pa)；

$p_{di}$ ——气缸内实际排气压力(Pa)；

$V_{ih,i}$ ——多级压缩机中间级的行程容积 ( $\text{m}^3/\text{min}$ )；

$\lambda_{vi}$ ——气缸行程容积系数；

$K_i$ ——绝热指数。

(2) 驱动器输入压缩机主轴的实际功率

$$P_{id} = \frac{P_{id}}{\eta_m} \quad (\text{kW})$$

式中  $\eta_m$ ——压缩机的机械效率，大中型空压机  $\eta_m = 0.90 \sim 0.95$ ，小型空压机  $\eta_m = 0.85 \sim 0.90$ ，微型空压机  $\eta_m = 0.80 \sim 0.87$ 。

驱动器与压缩机间若有传动装置，驱动机的输出功率为

$$P_d = K \frac{P_{id}}{\eta}$$

式中  $\eta$ ——传动效率，胶带传动时  $\eta = 0.93 \sim 0.99$ ，齿轮传动时  $\eta = 0.97 \sim 0.99$ ；

$K$ ——功率储备系数， $K = 1.05 \sim 1.15$ 。

## 2. 回转式压缩机

回转式压缩机是靠转子作回转运动改变工作容积而提高气体压力的机械。

(1) 罗茨式鼓风机

1) 轴功率



$$P_{is} = 1.67 \frac{V(p_d - p_i)}{\lambda \eta_m} \times 10^{-3} \quad (\text{kW})$$

式中  $\eta_m$ ——机械效率,  $\eta_m = 0.87 \sim 0.94$ ;

$\lambda$ ——排气系数,  $\lambda = 0.6 \sim 0.9$ ;

$p_d$ ——进气压力(Pa);

$p_i$ ——排气压力(Pa)。

## 2) 绝热功率

$$P_{ad} = 1.67 p_i V \frac{K}{K-1} \left[ \left( \frac{p_d}{p_i} \right)^{\frac{K-1}{K}} - 1 \right] \times 10^{-3} \quad (\text{kW})$$

式中  $V$ ——排气量( $\text{m}^3/\text{min}$ );

$K$ ——绝热指数。

## (2) 螺杆式压缩机

1) 指示功率 当内压力比和外压力比相等时的指示功率, 对干式螺杆压缩机则有

$$P_{id} = 1.67 \frac{p_i V}{\lambda} \left[ \frac{n_1}{n_1 - 1} \left( e^{\frac{n_1 - 1}{n_1}} - 1 \right) + \left( \frac{K}{K-1} - \frac{n_1}{n_1 - 1} \right) \left( e^{\frac{n_1 - 1}{n_1}} - 1 \right) \right] \times 10^{-3} \quad (\text{kW})$$

式中  $n_1$ ——多变压缩指数, 空气  $n_1 = 1.5 \sim 1.6$ ;

$e$ ——压力比,  $e = \frac{p_d}{p_i}$ 。

对喷油螺杆式压缩机则有

$$P_{id} = 1.67 \frac{p_i V}{\lambda} \left[ \frac{n_2}{n_2 - 1} \left( e^{\frac{n_2 - 1}{n_2}} - 1 \right) + \left( \frac{K}{K-1} - \frac{n_1}{n_1 - 1} \right) \left( e^{\frac{n_1 - 1}{n_2}} - 1 \right) \right] \times 10^{-3} \quad (\text{kW})$$

式中  $n_2$ ——喷油冷却的多变压缩指数, 空气  $n_2 = 1.05 \sim 1.1$ 。

## 2) 轴功率

$$P_{is} = \frac{P_{id}}{\eta_m} \quad (\text{kW})$$

式中  $\eta_m$ ——机械效率,  $\eta_m = 0.95 \sim 0.98$ 。

3) 绝热功率

$$P_{ad} = 1.67 p_1 V \frac{K}{K-1} \left( s^{\frac{K-1}{K}} - 1 \right) \times 10^{-5} \quad (\text{kW})$$

(3) 滑片式压缩机

1) 指示功率

$$P_{i,d} = 1.67 \frac{p_1 V}{\lambda} \frac{n}{n-1} \left[ \left( \frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{n-1}{n}} - 1 \right] \times 10^{-5} \quad (\text{kW})$$

2) 轴功率

$$P_{sh} = \frac{P_{i,d}}{\eta_m} \quad (\text{kW})$$

式中  $\eta_m$ ——机械效率,  $\eta_m = 0.70 \sim 0.75$ 。

3. 离心式压缩机

电动机功率为

$$P = \frac{Q(A_d + A_r)}{2\eta} \times 10^{-3} \quad (\text{kW})$$

式中  $Q$ ——压缩机生产率( $\text{m}^3/\text{s}$ );

$\eta$ ——压缩机总效率, 一般取 $0.62 \sim 0.82$ ;

$A_d$ ——压缩 $1\text{m}^3$ 空气至绝对压力 $p_2$ 的等温功( $\text{N} \cdot \text{m}/\text{m}^3$ );

$A_r$ ——压缩 $1\text{m}^3$ 空气至绝对压力 $p_2$ 的等热功( $\text{N} \cdot \text{m}/\text{m}^3$ )。

$A_d$ 、 $A_r$ 与终点压力 $p_2$ 的关系见表9-12。

表9-12  $A_d$ 、 $A_r$ 与终点压力 $p_2$ 的关系

$p_1$ (MPa)	0.1520	0.2027	0.3049	0.4053	0.5066
$A_d$ ( $\text{N} \cdot \text{m}/\text{m}^3$ )	39713	67666	107373	136312	157887
$A_r$ ( $\text{N} \cdot \text{m}/\text{m}^3$ )	42169	75511	126506	167694	201036
$p_2$ (MPa)	0.6080	0.7093	0.8106	0.9119	1.0113
$A_d$ ( $\text{N} \cdot \text{m}/\text{m}^3$ )	175539	191230	203978	215746	222553
$A_r$ ( $\text{N} \cdot \text{m}/\text{m}^3$ )	230456	255954	280470	301064	320677

**例9-22** 求通风量  $Q = 1200 \text{ m}^3/\text{min}$ , 全风压  $p = 500 \text{ Pa}$  的鼓风机传动电动机的容量。取风机效率  $\eta = 0.65$ , 机械为直接传动式,  $\eta_s = 1$ , 余量系数  $K = 1.15$ 。

电动机所需容量为

$$P = \frac{pQK}{60\eta\eta_s} \times 10^{-3} = \frac{500 \times 1200 \times 1.15}{60 \times 0.65 \times 1} \times 10^{-3} \\ = 17.7 \text{ kW}$$

**例9-23** 某工业锅炉用通风机(电机直联), 全风压  $p = 7180 \text{ Pa}$ , 风量  $q_v = 2095 \text{ m}^3/\text{h}$ , 取风机效率  $\eta = 0.65$ , 余量系数  $K = 1.15$ , 求电动机容量。

电动机容量为

$$P = \frac{pq_v K}{3600\eta\eta_s} \times 10^{-3} = \frac{7180 \times 2095 \times 1.15}{3600 \times 1 \times 0.65} \times 10^{-3} \\ = 7.39 \text{ kW}$$

**例9-24** 当离心式压缩机终点压力  $p = 0.152 \text{ MPa}$  时, 要求压缩机生产率  $q_v = 1 \text{ m}^3/\text{s}$ , 取机械总效率  $\eta = 0.65$ , 求电动机的容量。

由终点压力  $p_1 = 0.152 \text{ MPa}$ , 查表9-12得:  $A_d = 39713 \text{ N} \cdot \text{m}/\text{m}^3$ ,  $A_r = 42169 \text{ N} \cdot \text{m}/\text{m}^3$ , 故电动机的容量为

$$P = \frac{q_v(A_d + A_r)}{2\eta} \times 10^{-3} = \frac{1 \times (39713 + 42169)}{2 \times 0.65} \times 10^{-3} \\ = 63 \text{ kW}$$

**例9-25** 计算一台氮氢气压缩机的电动机容量。已知主要参数为:

进气压力  $p_{1i} = 1.38 \times 10^5 \text{ Pa}$ ;

气缸内实际进气压力  $p'_{1i} = 1.32 \times 10^5 \text{ Pa}$ ;

气缸内实际排气压力  $p'_{2i} = 6.52 \times 10^5 \text{ Pa}$ ;

气缸行程容积  $V_{Vi} = 12.9 \text{ m}^3/\text{min}$ ;

气缸行程容积指数  $\lambda_{Vi} = 0.695$ ;

绝热指数  $K = 1.4$ 。

指示功率为

$$\begin{aligned}
 P_{id} &= 1.67 p_{ii} V_{ih} \lambda v_i \frac{K_i}{K_i - 1} \left[ \left( \frac{p'_{ii}}{p_{ii}} \right)^{\frac{K_i - 1}{K_i}} - 1 \right] \times 10^{-5} \\
 &= 1.67 \times 1.38 \times 10^5 \times 12.9 \times 0.695 \frac{1.4}{1.4 - 1} \\
 &\quad \times \left[ \left( \frac{6.52}{1.32} \right)^{\frac{1.4 - 1}{1.4}} - 1 \right] \times 10^{-5} \\
 &= 40.4 \text{ kW}
 \end{aligned}$$

轴功率为

$$P_{ih} = \frac{P_{id}}{\eta_m} = \frac{40.4}{0.92} = 43.9 \text{ kW}$$

电动机功率为

$$P = K P_{ih} = 1.15 \times 43.9 = 50.5 \text{ kW}$$

## 第七节 制冷设备电动机功率计算

从低于环境温度的物体中吸收热量，并将其转移给环境介质的过程，称为制冷，制冷设备是指完成制冷循环所需要的各种设备的总称，简称为制冷机。

### 一、活塞式制冷压缩机

活塞式制冷压缩机是用曲柄连杆机构带动活塞作往复运动进行工作的，是应用最广泛的制冷设备。

#### 1. 压缩机消耗的理论功率

$$P_{ih} = \frac{(h_2 - h_1) R_{ih}}{3600 v_i} \times 10^{-3} \quad (\text{kW})$$

式中  $h_1$  —— 绝热压缩初始状态时气体的焓值 (J/kg)；

$h_2$  —— 绝热压缩初始状态时气体的焓值 (J/kg)；

$V_{ih}$  —— 理论输气量对单作用式压缩机

$$V_{ih} = \frac{\pi}{4} \times 60 D^2 S n z \quad (\text{m}^3/\text{h})$$

式中  $D$  —— 气缸直径 (m)；

$S$ ——活塞行程(m);

$z$ ——气缸数;

$n$ ——转速(r/min)。

$v_1$ ——吸气状态的比容( $\text{m}^3/\text{kg}$ )。

## 2. 制冷压缩机消耗的轴功率

$$P_a = P_i + P_m = \frac{q_m (h_2 - h_1)}{3600 \eta_i} \times 10^{-3} + \frac{V_{ik} p_m}{3600} \times 10^{-3} \quad (\text{kW})$$

式中  $P_i$ ——指示功率(kW);

$P_m$ ——摩擦功率(kW);

$q_m$ ——压缩机的质量流量(kg/h);

$p_m$ ——平均摩擦压力; 氨压缩机  $p_m = 0.35 \sim 0.7 \text{Pa}$ , 氟利昂压缩机  $p_m = 0.35 \sim 0.65 \text{Pa}$ ;

$\eta_i$ ——指示效率, 可用经验公式近似确定

$$\eta_i = 1 - 0.6 \left[ 1 - \left( \frac{p_k}{p_0} \right)^{1.3} \right]$$

式中  $p_k$ ——冷凝压力(Pa);

$p_0$ ——蒸发压力(Pa)。

## 3. 电动机的功率

$$P_N = \frac{P_a}{\eta_N} \quad (\text{kW})$$

式中  $\eta_N$ ——压缩机的总效率, 取  $\eta_N = 0.65 \sim 0.78$ 。

## 二、离心式制冷机

离心式制冷机是通过高速旋转的叶轮把能量传递给连续流动的气体, 使气体的压力和速度提高, 再在扩压过程中把动能转变成压力, 是一种转速高、制冷量大的透平机械, 用于各种制冷装置。

压缩机的多变功率计算如下:

$$P_{pol} = \frac{q_m \Delta I_{pol}}{3600} \times 10^{-3} (\text{kW})$$

式中  $q_m$ ——质量流量(kg/h);  
 $\Delta I_{pol}$ ——多变压缩功(J/kg)。

在两级压缩中间抽气循环中,若以两级的能量头相等来选定中间压力,则用下式计算,即

$$P_{pol} = \frac{(q_{m1} + q_{m2})(\Delta I_{pol}/2)}{3600} \times 10^{-3} (\text{kW})$$

式中  $q_{m1}$ ——从蒸发器来的质量流量,即第一级叶轮的吸入流量(kg/h);

$q_{m2}$ ——在  $G_1$  上增加的从省功器来的质量流量,即第二级叶轮吸入流量(kg/h)。

考虑到多变效率  $\eta_{pol}$  和机械效率  $\eta_m$ , 压缩机轴功率为

$$P_z = \frac{P_{pol}}{\eta_{pol} \eta_m} (\text{kW})$$

选择电动机功率要留有一定余量,即

$$P = K P_z = K \frac{P_{pol}}{\eta_{pol} \eta_m} (\text{kW})$$

式中  $K$ ——余量系数,  $K = 1.05 \sim 1.15$ 。

### 三、螺杆式制冷机

螺杆式制冷压缩机是一种容积式回动压缩机,是利用一对设置于机壳内的螺旋形阴阳转子的啮合转动,来改变齿槽的位置和容积,完成吸收压缩和排气过程。

#### 1. 指示功率

$$P_i = \frac{q_m \Delta I_{nd}}{3600 \eta_i} \times 10^{-3} (\text{kW})$$

#### 2. 轴功率

$$P_s = \frac{P_i}{\eta_m} (\text{kW})$$

式中  $q_m$ ——质量流量(kg/h);  
 $Al_{绝}$ ——单位绝热压缩功(J/kg)。

例9-26 有一台离心式制冷机, 已知质量流量 20kg/h, 压缩功为600000J/kg, 设制冷机总效率为0.75, 余量系数为1.15, 试计算所需电动机的功率。

电动机功率为

$$P = K \cdot \frac{q_m Al_{绝}}{3600\eta} \times 10^{-3} = 1.15 \frac{20 \times 600000}{3600 \times 0.75} \times 10^{-3} \\ = 56.8 \text{ kW}$$

### 第八节 离心机电动机功率计算

离心机是利用离心力把悬浮液和乳浊液中的固体和液体组分或轻重相组分分离开来的机械。

#### 一、功率消耗的计算

##### 1. 起动时消耗的功率

克服转鼓的惯性力所需的功率

$$P_1 = \frac{mgR_0^2\omega^2}{2gt_0} \times 10^{-3} \quad (\text{kW})$$

式中  $m$ ——转鼓重量(kg);  
 $R_0$ ——转鼓筒壁外半径(m);  
 $\omega$ ——转鼓的回转角速度(rad/s);  
 $t_0$ ——起动时间, 离心机一般取  $t_0 = 30 \sim 240\text{s}$ , 分离机一般取  $t_0 = 120 \sim 360\text{s}$ ;  
 $g$ ——重力加速度,  $g = 9.8\text{m/s}^2$ 。

##### 2. 悬浮液物料所消耗的功率

###### (1) 间歇加料离心机的功率

$$P_2 = \frac{\omega^2 \lambda}{z t_j} \left[ \frac{m_1 (R^2 + r_1^2)}{2} + m_2 R_2^2 \right] \times 10^{-3} \quad (\text{kW})$$

###### (2) 连续加料离心机的功率

$$P_2 = \frac{\omega^2 \lambda}{2} (m_3 R_1^2 + m_4 R_2^2) \times 10^{-3} \quad (\text{kW})$$

- 式中  $m_1$ ——每次加料所得湿滤渣的重量 (kg) ;  
 $m_2$ ——每次加料所得滤液 (分离液) 的重量 (kg) ;  
 $m_3$ ——按滤渣 (沉渣) 计的最大生产能力 (kg/s) ;  
 $m_4$ ——按滤液 (分离液) 计的最大生产能力;  
 $t_i$ ——每次加料的时间 (s) ;  
 $R_2$ ——滤液推出口位置的半径, 对圆筒形过滤转鼓  $R_2 =$

$$R, \text{ 对圆锥形过滤转鼓 } R_2 = \frac{R+r}{2}, \text{ 对沉降转鼓,}$$

$R_2$  为分离液溢流半径 (m);

$R$ ——转鼓最大内半径 (m);

$R_1$ ——滤渣 (沉渣) 卸出口位置半径 (m);

$r$ ——锥形转鼓小端的半径 (m);

$r_1$ ——转鼓中滤渣层内表面半径 (m);

$\lambda_3$ ——考虑到物料搅动和流体阻力损耗能量的系数, 一般取  $\lambda_3 = 1.1 \sim 1.2$ 。

### 3. 轴承摩擦消耗的功率

$$P_3 = \frac{\omega f (p_1 d_1 + p_2 d_2)}{2} \times 10^{-3} \quad (\text{kW})$$

式中  $f$ ——轴承的摩擦系数, 对滑动轴承  $f = 0.05 \sim 0.1$ , 对滚动轴承  $f = 0.005 \sim 0.02$ ;

$d_1, d_2$ ——轴颈的直径 (m);

$p_1, p_2$ ——受静载荷与动载荷作用的离心机主轴承上的载荷力 (N)。

### 4. 机械密封摩擦消耗的功率

$$P = \pi D_m b_m f_0 p_0 v \times 10^{-7} \quad (\text{kW})$$

式中  $D_m$ ——摩擦副容环端面内直径 (cm);

$b_m$ ——摩擦副容环端面宽度 (cm);

$f_0$ ——密封端面的摩擦系数, 取  $f_0 = 0.02 \sim 0.2$ ;



$p_b$ ——密封端面比压力( $P_a$ );

$v$ ——动环的线速度( $m/s$ )。

5. 转鼓及物料层与空气摩擦消耗的功率

$$P_5 = 1.11 P_k H \omega^3 (R_1^4 + r_2^4) \times 10^{-7} (\text{kW})$$

式中  $P_k$ ——空气的密度, 取  $\rho_k = 13.3 \text{ kg/m}^3$ ;

$r_2$ ——转鼓中自由液层内表面半径( $m$ )。

6. 刮刀卸出滤渣消耗功率

$$P_6 = \frac{\pi B \delta_2 K_2 \left( R + \frac{\delta_2}{2} \right)}{500 t_2}$$

式中  $t_2$ ——刮削滤渣的时间( $s$ );

$\delta_2$ ——转鼓中滤渣层的厚度( $m$ );

$K_2$ ——刮刀刮削滤渣的比阻力, 一般取  $K_2 = 4 \times 10^8 \text{ N/m}^2$ ;

$B$ ——刮刀刃长度( $m$ );

$R$ ——转鼓最大半径( $m$ )。

二、轴功率计算

1. 间歇运转的三足式上悬式离心机

(1) 起动阶段功率

$$P = P_1 + P_3 + P_5$$

(2) 加料阶段功率

$$P = P_2 + P_3 + P_5$$

(3) 分离阶段功率

$$P = P_3 + P_5$$

(4) 洗涤阶段功率

$$P = 0.5 P_2 + P_3 + P_5$$

这类离心机运转周期短, 起动停车频繁, 可按起动阶段消耗的功率选择电动机。当离心机固定应用于分离某物料时, 可用均方功率估算电动机功率, 即

$$P = \sqrt{\frac{\sum P_i^2 t_i}{\sum t_i + 0.33 t_0}} \quad (\text{kW})$$

式中  $P_i$ ——一个操作周期中各阶段功率消耗的最大值( $\text{kW}$ );

$t_i$ ——一个操作周期中各阶段的持续时间(s)；

$t_0$ ——两个操作周期之间的停车时间(s)。

## 2. 自动控制的刮刀卸料离心机

### (1) 起动阶段功率

$$P = P_1 + P_3 + P_5$$

### (2) 加料阶段功率

$$P = P_2 + P_3 + P_5$$

### (3) 分离阶段功率

$$P = P_3 + P_5$$

### (4) 洗涤阶段功率

$$P = 0.5P_2 + P_3 + P_5$$

### (5) 刮卸滤渣阶段功率

$$P = 1.5P_3 + P_5 + P_6$$

这类分离机为连续运转的间歇作用离心机，可按每一周期内各阶段的功率消耗及持续时间，用均方功率确定电动机功率，即

$$P = \sqrt{\frac{\sum P_i^2 t_i}{\sum t_i}} \quad (\text{kW})$$

## 3. 活塞推料离心机

### (1) 起动阶段功率

$$P = P_1 + P'_1 + P_3 + P_4 + P_5$$

式中  $P'_1$ ——起动时克服其惯性力所需功率(kW)。

### (2) 运转阶段功率

$$P = P'_1 + P_3 + P_4 + P_5$$

这类离心机为连续加料、连续卸料，运转中功率消耗恒定不变，主电动机可按运转阶段消耗的总功率选择。

## 4. 螺旋卸料离心机

### (1) 起动阶段功率

$$P = P_1 + P'_1 + P_3 + P_5$$

### (2) 运转阶段功率

$$P = P'_1 + P_3 + P_5 + P_n$$

这类离心机为连续加料、连续卸料，主电动机可按运转阶段消耗的总功率选择。

### 5. 离心力卸料离心机

#### (1) 起动阶段功率

$$P = P_1 + P_3 + P_5$$

#### (2) 运转阶段功率

$$P = P_3 + P_5 + K_3 P'_3$$

式中  $K_3$ ——考虑滤渣沿锥形的滤网表面移动而消耗能量的系数，取  $K_3 = 1.25 \sim 1.43$ 。

主电动机按运转阶段消耗总功率选择。

### 6. 离心机

#### (1) 起动阶段功率

$$P = P_1 + P'_1 + P_2 + P_3 + P_5$$

#### (2) 运转阶段功率

$$P = P_7 + P_3 + P_5 + P_7$$

式中  $P_7$ ——附在机座上的，由电动机带动的进液、出液泵消耗的功率(kW)。

主电动机按运转阶段消耗总功率选择。

### 三、电动机功率计算

$$P_N = \frac{P}{\eta} K \text{ (kW)}$$

式中  $\eta$ ——传动系统的效率，三角带传动  $\eta = 0.94 \sim 0.96$ ；平带传动  $\eta = 0.92 \sim 0.98$ ；离心式摩擦离合器传动  $\eta = 0.97 \sim 0.99$ ，液力联轴传动  $\eta = 0.95 \sim 0.96$ ，液压系统传动  $\eta = 0.5$ ，油马达传动  $\eta = 0.7 \sim 0.85$ ，圆柱齿轮传动  $\eta = 0.95 \sim 0.99$ ；

$K$ ——安全裕度量系数， $P \leq 100 \text{ kW}$  时  $K = 1.5$ ， $P > 100 \text{ kW}$  时  $K = 1.1$ 。

### 第九节 泵用电动机功率计算

泵是一种输送液体的流体机械，它把原动机的机械能或其他能源的能量传递给液体，使液体的能量增加。

#### 一、离心泵用电动机功率计算

离心泵依靠旋转叶轮，利用离心力对液体的作用，把原动机的机械能传递给液体。

电动机的功率为

$$P = K \frac{\rho g q_v (H + \Delta H)}{\eta \eta_c} \times 10^{-3} \quad (\text{kW})$$

式中  $q_v$ ——流量( $\text{m}^3/\text{s}$ )；

$H$ ——扬程( $\text{m}$ )；

$\Delta H$ ——主管损失水头( $\text{m}$ )；

$\rho$ ——液体密度( $\text{kg}/\text{m}^3$ )；

$\eta$ ——泵的效率，一般取  $\eta = 0.6 \sim 0.84$ ，高压离心水泵  $\eta = 0.5 \sim 0.8$ ，低压离心水泵  $\eta = 0.3 \sim 0.6$ ；

$\eta_c$ ——传动效率，直接传动  $\eta_c = 1$ ，联轴器传动  $\eta_c = 0.95 \sim 1$ ，皮带传动  $\eta_c = 0.9$ ；

$K$ ——余量系数。

离心泵余量系数见表9-13。

表9-13 离心泵余量系数

功率 (kW)	<2	2~5	5~50	50~100	>100
$K$	1.7	1.5~1.3	1.15~1.10	1.08~1.05	1.05

#### 二、往复泵用电动机功率计算

往复泵的工作过程包括交替进行的吸入和排出两个过程，活塞往复一次完成一个工作循环。

泵轴功率为

$$P = \frac{pq_v}{\eta} \times 10^{-7} (\text{kW})$$

式中  $q_v$ ——流量( $\text{m}^3/\text{h}$ );  
 $p$ ——全压力(Pa);

$$p = p_2 - p_1$$

$p_2$ ——排出压力(Pa);

$p_1$ ——吸入压力(Pa);

$\eta$ ——泵的总效率, 电动泵 $\eta = 0.6 \sim 0.9$ , 蒸气泵 $\eta = 0.8 \sim 0.95$ 。

### 三、齿轮泵用电动机功率计算

齿轮泵依靠齿轮在相互啮合过程中所引起的工作空间容积变化来输送液体。

轴功率为

$$P = \frac{pq_v}{60\eta} \times 10^{-6} (\text{kW})$$

式中  $q_v$ ——流量(L/min);

$p$ ——全压力(Pa);

$\eta$ ——总效率, 轴向间隙固定的齿轮泵 $\eta = 0.6 \sim 0.8$ , 轴向间隙补偿泵 $\eta = 0.8$ 。

### 四、螺杆泵用电动机功率计算

螺杆泵依靠螺杆相互啮合空间的容积变化来输送液体。

轴功率为

$$P = 2.07 \frac{nTpd_1^2}{\eta} \times 10^{-10} (\text{kW})$$

式中  $p$ ——进出口压力差(Pa);

$n$ ——转速(r/min);

$T$ ——螺杆导程(cm);

$d_1$ ——节圆直径(cm);

$\eta$ ——总效率,  $\eta = \eta_m \eta_v$ 。

$\eta_m$ ——机械效率,  $\eta_m = 0.65 \sim 0.97$ , 压力低转速高时取小

值；

$\eta_v$ ——容积效率， $\eta_v = 0.75 \sim 0.95$ ，压力低、 $d_i$  值大时取大值。

### 五、液环泵用电动机功率计算

液环泵是一种输送气体的流体机械。

轴功率为

$$P = 3.84 \times \frac{p_2 q_v \frac{1}{\eta}}{p_1} \times 10^{-3} (\text{kW})$$

式中  $p_1$ ——吸入绝对压力 (Pa)；

$p_2$ ——排出绝对压力 (Pa)；

$q_v$ ——气体量 ( $\text{m}^3/\text{min}$ )；

$\eta$ ——等温总效率， $\eta = 0.3 \sim 0.5$ 。

### 六、水轮泵用电动机功率计算

水轮泵是由水轮机与水泵组成的提水机械，水轮机是水泵的动力部分，它将水能转换为机械能，把水由低处扬到高处。

水轮机的轴功率为

$$P = \frac{q_v H \rho g}{\eta} \times 10^{-3} (\text{kW})$$

式中  $q_v$ ——通过水轮机的流量 ( $\text{m}^3/\text{s}$ )；

$H$ ——扬程 (m)；

$\rho$ ——水的密度 ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )；

$\eta$ ——水轮机的效率。

### 七、射流深井泵用电动机功率计算

射流深井泵是在加压的条件下把井水提升到地面，如供水或喷灌等。

轴功率为

$$P = \frac{q_v H \rho g}{\eta} \quad (\text{kW})$$

式中  $q_v$ ——装置流量 ( $\text{m}^3/\text{min}$ )；

$H$ ——装置工作扬程 (m) ;

$\rho$ ——工作液体密度 ( $\text{kg}/\text{m}^3$ ) ;

$\eta$ ——泵的效率。

### 八、射流式泥浆泵用电动机功率计算

沉井施工、井下排泥和洗井等采用该类装置。

轴功率为

$$P = \frac{q_v H \rho g}{\eta} \quad (\text{kW})$$

式中  $q_v$ ——吸入流量 ( $\text{m}^3/\text{min}$ ) ;

$H$ ——射流泵几何扬程 (m) ;

$\rho$ ——被吸入流体密度 ( $\text{kg}/\text{m}^3$ ) ;

$\eta$ ——泵的效率。

### 九、真空泵用电动机功率计算

利用机械、物理、化学或物理化学方法对容器进行抽气，以获得真空的机器或器械，都叫做真空泵。

#### 1. 旋片真空泵

泵所需最大功率为

$$P_{\max} = \frac{S_i}{\eta} \frac{p}{m^{\frac{1}{m-1}}} \times 10^{-6} \quad (\text{kW})$$

式中  $p$ ——泵排气口处的排气压力 (Pa) ;

$m$ ——多变指数，对空气， $1 < m < 1.4$ ;

$\eta$ ——泵的最大机械效率，单级泵  $\eta = 0.45 \sim 0.5$ ，双级泵  $\eta = 0.4 \sim 0.45$ ;

$S_i$ ——几何抽速 (L/s) ;

$$S_i = \frac{1}{24 \times 10^{-4}} \pi (D^2 - d^2) L Z n K_v$$

$D$ ——泵腔直径 (cm) ;

$d$ ——转子直径 (cm) ;

$L$ ——泵腔长度 (cm) ;

$Z$ ——旋片数目；

$n$ ——泵轴转速( $r/min$ );

$K_v$ ——泵容积利用系数,  $K_v = 0.84 \sim 0.86$ 。

## 2. 机械增压泵

泵所需最大功率为

$$P_{\max} = (p_{\max} - p) S_j \times 10^{-6} \quad (\text{kW})$$

式中  $p_{\max}$ ——泵正常工作时最大排气压力(Pa);

$p$ ——泵在  $p_{\max}$  下的吸气口压力(Pa)。

**例9-27** 一台离心式水泵与电动机直接联结, 流量  $q_v = 80 \text{ m}^3/\text{h}$ , 总扬程  $30 \text{ m}$ , 转速  $n = 2900 \text{ r/min}$ , 泵的效率  $\eta = 0.76$ , 试选择电动机。

取水的密度  $\rho = 1000 \text{ kg/m}^3$ , 传动效率  $\eta_c = 1$ , 余量系数  $K = 1.1$ , 则轴功率为

$$P_z = K \frac{\rho g q_v H}{\eta \eta_c} \times 10^{-3} = 1.1 \times \frac{1000 \times 9.8 \times 80 \times 30}{3600 \times 0.76 \times 1} \times 10^{-3}$$

$$= 9.65 \text{ kW}$$

使电动机的额定功率  $P_N > P_z$ , 额定转速与水泵对应的转速必须配合, 选择Y160M-1型异步电动机,  $P_N = 11 \text{ kW}$ ,  $n = 3000 \text{ r/min}$ ,  $U_N = 380 \text{ V}$ 。

**例9-28** 现有一台齿轮泵, 已知流量  $q_v = 1500 \text{ L/min}$ , 全压  $p = 1 \text{ MPa}$ , 设传动效率  $\eta = 0.7$ , 试求电动机轴功率。

电动机轴功率为

$$P = \frac{p q_v}{60 \eta} \times 10^{-3} = \frac{1 \times 10^6 \times 1500}{60 \times 0.7} \times 10^{-6}$$

$$= 35.7 \text{ kW}$$

## 第十节 农业机械电动机功率计算

### 一、旋耕机电动机功率计算

卧式旋耕机是由动力驱动装有旋耕刀的刀滚, 旋转切削土壤的一种耕作机械。

旋耕功率可按式估算, 即



$$P = k a v B \times 10^{-5} \quad (\text{kW})$$

式中  $B$ ——耕幅 (m) ;  
 $v$ ——机组前进速度 (m/s) ;  
 $a$ ——耕深 (cm) ;  
 $k$ ——旋耕比阻,  $k = k_g k_1 k_2 k_3 k_4$  (Pa)。

旋耕比阻  $k$  见表9-14。

表9-14 旋耕比阻 $k$

切土节距 (cm)		6~9	12~15	18~21
$k_g$ (粘土, 麦茬耕深15cm, 土壤含水率20%)		1.3~1.6	11~1.3	0.5~1
修正系数	耕深修正系数 $k_1$	12cm	0.8~1	
		18cm	1.0~1.2	
	土壤含水率修正系数 $k_2$	30%	0.95	
		40%	0.92	
	残茬植被修正系数 $k_3$	稻 茬	1.0~1.2	
		绿 肥	0.8~1.0	
	作业方式修正系数 $k_4$	旱耕后旋耕	0.66~0.71	
		灌水旋耕	0.66~0.73	
	水耕后旋耕	0.3~0.5		

$\times 10^4 \text{Pa}$

## 二、收获机械电动机功率计算

### 1. 稻麦收获机械

(1) 拨禾扶禾装置——拨禾轮 用于卧式和前倾式收割机上, 其作用是将割台前面的作物拨向切割器, 并把割下的禾株拨倒在割台上, 拨禾轮消耗功率为

$$P = (0.044 \sim 0.088) B \quad (\text{kW})$$

式中  $B$ ——割幅 (m)。

(2) 往复式切割器 往复式切割器动刀的运动近似为简谐运动, 其切割器需用功率为

$$P = L \left[ (q + fmg)v + \frac{m}{Z} r^2 \omega^2 \right] \times 10^{-4} \quad (\text{kW})$$

- 式中  $L$ ——动刀的长度(m)；  
 $q$ ——每米动刀切割禾株的阻力， $q = 300 \sim 400 \text{N/m}$ ；  
 $f$ ——动刀的摩擦阻力系数，在调整和润滑条件良好的情况下为 $0.2 \sim 0.4$ ；  
 $m$ ——每米长动刀的重量， $m = 1.9 \sim 2.3 \text{kg/m}$ ；  
 $v$ ——割刀平均切割速度(m/s)；  
 $r$ ——曲柄半径(m)；  
 $\omega$ ——曲柄运转的角速度(rad/s)。

(3) 卧带式输送机 需用功率按经验数据取，即

$$P = (0.22 \sim 0.48)B \quad (\text{kW})$$

式中  $B$ ——割台的割幅(m)。

(4) 联收机 轮式行走装置需用功率为

$$P = \frac{f_g mgv}{\eta} \times 10^{-3} \quad (\text{kW})$$

- 式中  $m$ ——联收机的总重量(kg)；  
 $v$ ——联收机的作业速度(m/s)；  
 $f_g$ ——驱动轮的滚动阻力系数，普通轮胎在较干的田地上  
 $f_g = 0.08 \sim 0.13$ ，在湿软地上  $f_g = 0.3$ 左右；  
 $\eta$ ——行走装置的传动效率， $\eta = 0.85 \sim 0.9$ 。

## 2. 玉米收获机械

(1) 摘穗剥皮机所需功率

$$P = (13 \sim 16)n \quad (\text{kW})$$

式中  $n$ ——一次收获的行数。

(2) 摘穗机的功率

$$P = (7.5 \sim 9)n \quad (\text{kW})$$

(3) 剥皮机的功率

$$P = (0.7 \sim 0.8)Z \quad (\text{kW})$$

式中  $Z$ ——剥皮辊的对数。

(4) 脱粒机所需功率

$$P = \frac{Wm}{t m_1} \quad (\text{kW})$$

式中  $W$ ——脱粒所需要的电能(kW·h);

$m_1$ ——每kW·h可脱粒的重量,  $m_1$ 一般取600~1000kg;

$m$ ——脱粒的总重量(kg);

$t$ ——脱粒的时间(h)。

### 三、喷灌设备电动机功率计算

#### 1. 喷雾机

喷雾机用活塞泵将工作液体压送到喷嘴部件, 并供给液体雾化喷射能量的装置。

活塞系的功率消耗为

$$P = 1.67 \frac{q_v H \rho}{\eta} \times 10^{-4} (\text{kW})$$

式中  $q_v$ ——泵的流量(L/min);

$H$ ——泵的总水头高(m);

$\rho$ ——液体密度(kg/L);

$\eta$ ——泵的效率,  $\eta = 0.7$ 。

#### 2. 射流式喷头

射流式喷头是利用压力通过一个断面缩小的喷嘴, 形成高速水流射入空中。

单喷头消耗的功率为

$$P = 3.78 q_v p \times 10^{-4} (\text{kW})$$

式中  $q_v$ ——工作流量(m<sup>3</sup>/h);

$p$ ——喷头工作压力(Pa)。

### 四、畜牧机械电动机功率计算

#### 1. 往复切割器式割草机

可用经验公式计算功率, 即

$$P = 7.35 K S n \times 10^{-6} + 0.0125 h a_1 a_2 \quad (\text{kW})$$

式中  $K$ ——功率消耗系数,  $K = 0.2$ ;

$S$ ——切割器割刀的行程(mm),

$n$ ——曲柄转速(r/min),

$h$ ——割刀的进距(mm),

$a_1$ ——切割器类型系数, 标准 I 型  $a_1 = 1.35$ , 短行程 I 型  $a_1 = 1.0$ ;

$a_2$ ——切割锐利程度系数, 当动刀片为光刃, 刃口厚度为 0.13~0.14mm 时  $a_2 = 1.4 \sim 1.5$ , 如为齿刃时  $a_2$  可增大 50%;

$B$ ——切割器的割幅(m)。

## 2. 干草压捆机

干草机所需功率为

$$P = \frac{Tn}{60} \times 10^{-3} \quad (\text{kW})$$

式中  $n$ ——压缩器工作行程数, 一般取  $n = 70 \sim 80$ (次/min),

$T$ ——压缩器每走一个工作行程时, 压缩每份干草所需的功, 每份干草摄入量 2.5~3 kg 时所需的功为 54000~78000J。

## 3. 滚刀式铡草机

所需功率

$$P = \frac{Wmg}{t} \times 10^{-2} \quad (\text{kW})$$

式中  $W$ ——切一顿草料消耗的电能(kW·h),

$t$ ——切草的时间(h),

$m$ ——铡草的总重量(kg)。

以上是切断长度为 12~13mm 时, 如切断长度减半则能量消耗加倍, 而用盘刀式铡草机时功率增大 15%~25%。

## 4. 绵羊剪毛机

剪毛机所需功率为

$$P = 1.05 \frac{(F_1 + F_2 + F_3)rn}{\eta_p} \times 10^{-4} \quad (\text{kW})$$

式中  $F_1$ ——剪切羊毛的阻力,  $F_1 \approx 8 \sim 12\text{N}$ ;  
 $F_2$ ——动、定刀片间的摩擦阻力,  $F_2 \approx 30 \sim 35\text{N}$ ;  
 $F_3$ ——摆杆运动时的惯性力(N);

$$F_1 + F_2 + F_3 = 46 \sim 55\text{N}$$

$r$ ——曲柄半径(m);  
 $n$ ——曲柄转速(r/min);  
 $\eta$ ——传动效率, 取0.85。

### 五、钻机电动机功率计算

#### 1. 回转式钻机在钻进时所需总功率

$$P = \frac{P_1 + P_2}{\eta} + P_3 + P_4 \quad (\text{kW})$$

(1) 破碎岩层和克服钻头摩擦力所需功率

$$P_1 = 1.84\pi D^2 \times 10^{-3} \quad (\text{kW})$$

(2) 钻具回转和克服泥浆阻力所需功率

$$P_2 = n^{\frac{3}{4}} (2.2 + 0.016d^2 L\rho) \times 10^{-2} \quad (\text{kW})$$

(3) 驱动泥浆泵所需功率

$$P = \frac{q_v p}{\eta_c} \times 10^{-3} \quad (\text{kW})$$

(4) 泥浆搅拌机和照明等所需功率

$$P_4 = (2.2 \sim 3.7) \quad \text{kW}$$

式中  $D$ ——钻头直径(cm);  
 $n$ ——转盘转速(r/min);  
 $d$ ——转杆外径(m);  
 $L$ ——钻具总长度(m);  
 $\rho$ ——泥浆密度( $\text{kg}/\text{cm}^3$ ), 一般取1.15;  
 $q_v$ ——泥浆泵流量(L/s);  
 $p$ ——泥浆泵压力(Pa);  
 $\eta_c$ ——传动效率, 取0.8~0.85;  
 $\eta_d$ ——由动力至转盘的传动效率, 取0.8~0.85。

### 2. 冲击式钻机钻进时所需功率

$$P = \frac{mgSf}{60} \times 10^{-3} \quad (\text{kW})$$

式中  $m$ ——钻具及钢绳总重量(kg);  
 $S$ ——钻具的冲程(m);  
 $f$ ——钻具的冲击频率(次/min)。

## 六、拖拉机电动机功率计算

### 1. 农用拖拉机发动机功率

$$P = \frac{2.78Fv}{\eta} \times 10^{-3} (\text{kW})$$

式中  $F$ ——在基本耕作档下发挥出额定牵引力(N);  
 $v$ ——在牵引力  $F$  时的实际速度(km/h);  
 $\eta$ ——牵引效率。

确定发动机功率时所用的  $v$  和  $\eta$  值见表9-15。

表9-15 确定发动机功率时所用的  $v$  和  $\eta$  值

形 式	手 扶 式	轮 式		四轮驱动 (旱地)	履 带 式
		旱 地	水 田		
$v(\text{km/h})$	3~4	6~7	5~6	6~7	4~5
$\eta$	0.3~0.4	0.5~0.6	0.35~0.45	0.6~0.7	0.65~0.75

### 2. 油泵驱动功率

$$P = 1.67 \times \frac{q_v p}{\eta} \times 10^{-3} (\text{kW})$$

式中  $p$ ——油泵实际最大工作压力(Pa);  
 $q_v$ ——油泵在  $p$  压力下的实际流量(L/min);  
 $\eta$ ——油泵总效率, 对齿轮泵  $\eta = 0.8 \sim 0.9$ 。

例9-28 有一台卧式旋耕机, 要求耕深  $a = 25\text{cm}$ , 机组前进速度  $v = 1\text{m/s}$ , 耕幅  $B = 0.8\text{m}$ , 设旋耕比阻  $k = 0.78$ , 试估算旋耕功率。

旋耕功率为

$$P = k a v B \times 10^{-3} = 0.78 \times 25 \times 1 \times 0.8 \times 10^{-3} \\ = 15.6 \text{ kW}$$

**例9-30** 稻麦收割机采用的往复式切割器，如果每米长动刀切割禾株的阻力  $q = 350 \text{ N/m}$ ，动刀的摩擦阻力系数  $f = 0.3$ ，每米长动刀的重量  $m = 2 \text{ kg/m}$ ，切割速度  $v = 1 \text{ m/s}$ ，曲柄半径  $r = 0.4 \text{ m}$ ，曲柄旋转角速度  $\omega = 3.14 \text{ rad/s}$ ，动刀的长度  $L = 2 \text{ m}$ ，试计算切割器所需功率。

切割器功率为

$$P = L \left[ (q + f m g) v + \frac{m}{2} r^2 \omega^2 \right] \times 10^{-3} \\ = 2 \left[ (350 + 0.3 \times 2 \times 9.8) \times 1 + \frac{2}{2} \times 0.4^2 \times 3.14^2 \right] \times 10^{-3} \\ = 0.716 \text{ kW}$$

**例9-31** 一台往复式割草机，要求切割器割刀行程  $S = 101 \text{ mm}$ ，曲柄转速  $n = 60 \text{ r/min}$ ，割刀的进距  $h = 74 \text{ mm}$ ，当切割器为短行程Ⅰ型时， $a_1 = 1.0$ ， $a_2 = 1.45$ ，取功率消耗系数  $K = 0.2$ ，试计算割草机的功率。

割草机功率为

$$P = 7.35 K S n \times 10^{-5} + 0.0125 h a_1 a_2 \\ = 7.35 \times 0.2 \times 101 \times 60 \times 10^{-5} + 0.0125 \times 74 \times 1 \times 1.45 \\ = 1.43 \text{ kW}$$

**例9-32** 现有一台干草压捆机，已知压缩机每走一个工作行程，每份干草所需功  $6000 \text{ J}$ ，压缩机工作行程数为  $75 \text{ 次/min}$ ，试计算压捆机所需功率。

所需功率为

$$P = \frac{T n}{60} \times 10^{-3} = \frac{6000 \times 75}{60} \times 10^{-3} \\ = 7.5 \text{ kW}$$

## 第十一节 矿山机械电动机功率计算

### 一、凿岩机电动机功率计算

凿岩机是把高压流体的动能、电能或热能转换成机械冲击能，通过钻具对岩石进行冲击破碎而形成炮孔的钻孔机械。

风动凿岩机冲击功率为

$$P = \frac{Wf}{60} \times 10^{-4} \quad (\text{kW})$$

式中  $W$ ——冲击功(J)；

$f$ ——冲击频率(次/min)。

### 二、井下装载机电动机功率计算

井下装载机是用于井下把矿石和岩石装入运输机械或装卸到卸货点的机械。

#### 1. 正装后卸轨轮式装载机

##### (1) 行走功率

$$P_x = 2.25mg \times 10^{-4} \quad (\text{kW})$$

式中  $m$ ——装载机自重(kg)。

##### (2) 提升功率

$$P_z = 46.7V \quad (\text{kW})$$

式中  $V$ ——铲斗容积( $\text{m}^3$ )。

#### 2. 无储仓装载机

发动机飞轮功率为

$$P = P_1 + P_2$$

##### (1) 行走传动系统消耗功率

牵引时

$$P_1 = \frac{F_{\max} v_{\min} (\eta - \delta_F)}{195\eta} \quad (\text{kW})$$

运输时

$$P_1 = \frac{F_{\min} v_{\max}}{105\eta} \quad (\text{kW})$$



(2) 液压系统油泵消耗功率

$$P_2 = 1.67 \frac{q_v \Delta p}{\eta_s} \quad (\text{kW})$$

- 式中  $F_{\max}$  —— 最大驱动功率时牵引力(N);  
 $v_{\min}$  ——  $F_{\max}$  时的行驶速度, 一般取  $v_{\min} = 2 \sim 4$  (km/h);  
 $F_{\min}$  —— 在水平良好路面时牵引力(N);  
 $v_{\max}$  ——  $F_{\min}$  时的行驶速度(km/h);  
 $\delta_p$  —— 车轮滑转率, 一般取  $\delta_p = 0.2$ ;  
 $q_v$  —— 油泵排量(L/min);  
 $\Delta p$  —— 液压系统压差, 工作和旋转机构油泵空载时  $\Delta p = 5 \times 10^6 \text{Pa}$ , 变速泵满载时  $\Delta p = (8 \sim 12) \times 10^6 \text{Pa}$ ;  
 $\eta$  —— 传动效率, 机械传动  $\eta = 0.85 \sim 0.88$ , 液压机械传动  $\eta = 0.6 \sim 0.75$ ;  
 $\eta_s$  —— 油泵效率,  $\eta_s = 0.75 \sim 0.85$ 。

3. 双臂式装载机

(1) 工作机构的功率

$$P_v = 1.23 \frac{Q \rho g r K_s}{K_s \eta} \times 10^{-3} (\text{kW})$$

- 式中  $Q$  —— 生产率 ( $\text{m}^3/\text{min}$ );  
 $\rho$  —— 物料密度 ( $\text{kg}/\text{m}^3$ );  
 $r$  —— 曲柄圆盘半径 (m);  
 $K_s$  —— 耙爪负载变化系数,  $K_s = 1.23 \sim 1.6$ ;  
 $K_s$  —— 制动系数, 机器有制动装置时  $K_s = 1$ , 机器无制动装置时  $K_s = 0.8$ ;  
 $\eta$  —— 减速器效率。

(2) 行走机构的功率

$$P_s = \frac{Fv}{\eta} \times 10^{-3} (\text{kW})$$

式中  $p$ ——履带牵引力(N);  
 $v$ ——装载作业时履带运行速度,一般取  $v = 0.17 \sim 0.3$  m/s;  
 $\eta$ ——履带行走机械传动效率。

### 三、潜孔钻机电动机功率计算

潜孔钻机是由紧随钻头一起潜入孔底的冲击器,将冲击能经钻头作用在矿岩上,加之回转机构的作用,对矿岩产生冲击破碎而完成炮孔钻凿的钻孔机械。

#### 1. 回转功率

$$P_1 = 1.05 \frac{T_{\max} n}{\eta} \times 10^{-4} \quad (\text{kW})$$

式中  $T_{\max}$ ——回转机构的最大回转转矩(N·m);  
 $n$ ——回转机构的最大转速(r/min);  
 $\eta$ ——回转机构的传动效率。

#### 2. 提升功率

$$P_2 = \frac{Fv}{60\eta} \times 10^{-3} (\text{kW})$$

式中  $F$ ——提升力(N);  
 $v$ ——提升速度,一般取  $v = 8 \sim 20$  m/min;  
 $\eta$ ——提升传动效率。

### 四、牙轮钻机电动机功率计算

牙轮钻机是用牙轮钻头,连续破岩、压气排渣的自行式钻孔机械。

用经验公式计算回转功率,即

$$P = KnD^{2.6} n^{1.6} \times 10^{-5} (\text{kW})$$

式中  $K$ ——矿岩特征常数,  $K = (4 \sim 14) \times 10^{-5}$ ;  
 $n$ ——钻头转速(r/min);  
 $D$ ——钻头直径(cm);

$p$ ——钻头直径单位长度上轴压(Pa)。

### 五、矿用挖掘机电动机功率计算

矿用挖掘机是露天矿进行剥离、开采和装载等使用的主要机械设备。

#### 1. 机械传动正铲挖掘机

##### (1) 推动机构功率

$$P_r = \frac{F_r v_r}{\eta} \times 10^{-3} \quad (\text{kW})$$

式中  $F_r$ ——推力(N)；

$v_r$ ——推压速度(m/s)；

$\eta$ ——推压机构效率。

##### (2) 提升机构功率

$$P_r = \frac{F_r v_r}{\eta} \times 10^{-3} \quad (\text{kW})$$

式中  $F_r$ ——提升力(N)；

$v_r$ ——提升钢丝绳在卷筒上圆周速度(m/s)；

$\eta$ ——提升机构效率。

#### 2. 步行式拉铲挖掘机

步行机构功率为

$$P = \frac{nmg(h + t \sin \alpha + \varphi \mu t)}{3.6 \times 10^6} \quad (\text{kW})$$

式中  $n$ ——每小时步行次数；

$m$ ——机器重量(kg)；

$h$ ——每行一步机器上升高度(m)；

$t$ ——每步距离(m)；

$\alpha$ ——地面坡角(°)；

$\varphi$ ——机重在土中的拖拉系数， $\varphi = 0.15 \sim 0.2$ ；

$\mu$ ——机尾在土中拖拉时的摩擦系数， $\mu = 0.5 \sim 0.8$ ；

$\eta$ ——传动机构效率。

### 3. 单斗液压挖掘机

液压功率为

$$P = \frac{pq_v}{60\eta K} \times 10^{-6} \quad (\text{kW})$$

式中  $p$ ——油泵工作压力(Pa);

$q_v$ ——油泵在额定压力下的流量(L/min);

$K$ ——变量系数,在变量系统中若发动机功率有多余,尽量取小值,  $K = 1.1 \sim 1.2$ ;

$\eta$ ——油泵总效率。

## 六、采煤设备电动机功率计算

采煤机械是将煤从煤壁上进行剥落、破碎、装入运输机,把煤运出采区的机械设备。

### 1. 刨煤机功率计算

刨煤机所需功率为

$$P = \frac{Fv}{\eta} \times 10^{-3} \quad (\text{kW})$$

式中  $F$ ——牵引力(N);

$v$ ——牵引速度,  $v = 0.42 \sim 2$  (m/s);

$\eta$ ——传动效率,  $\eta = 0.8 \sim 0.85$ 。

### 2. 弯曲刮板运输机功率计算

#### (1) 空载时功率

$$P_k = \frac{1.1F_k v}{\eta} \times 10^{-3} \quad (\text{kW})$$

式中  $F_k$ ——运输机空载运行阻力(N);

$v$ ——张紧链的速度(m/s);

$\eta$ ——传动效率,  $\eta = 0.8 \sim 0.85$ 。

#### (2) 满载功率

$$P_m = \frac{1.1(F_g + F_k)v}{\eta} \times 10^{-3} \quad (\text{kW})$$

式中  $P_0$ ——空段刮板链运行阻力(N);

$P_1$ ——重段刮板链运行阻力(N)。

(3) 平均功率

$$P_p = 0.6\sqrt{P_0^2 + P_1^2} \quad (\text{kW})$$

(4) 额定功率

$$P_e \geq (1.15 \sim 1.2)P_p \quad (\text{kW})$$

### 七、矿井提升机电动机功率计算

矿井提升机是采矿时联系井下与地面的主要运输机械。

所需电动机功率为

$$P = \frac{K_1 K_2 m g v}{\eta} \times 10^{-3} \quad (\text{kW})$$

式中  $m$ ——运载重量(kg);

$v$ ——额定提升速度(m/s);

$K_1$ ——载荷系数,箕斗,提升  $K = 1.15$ ,罐笼提升  $K = 1.2$ ;

$\eta$ ——减速器效率;

$K_2$ ——动力系数,一般  $K_2 = 1.2$ 。

### 八、破碎机电动机功率计算

破碎机是将原矿或一定块度的物料破碎到所要求粒度的一种机械设备。

#### 1. 简单摆动颚式破碎机

电动机功率为

$$P = \frac{\sigma_p^2 n L \lambda \mu (B^2 - e^2)}{2.45 E \eta \tan \alpha} \times 10^{-11} \quad (\text{kW})$$

式中  $\sigma_p$ ——矿石的压碎强度( $\text{Pa}$ );

$n$ ——主轴转速( $\text{r/min}$ );

$L$ ——给矿口长度(cm);

$\mu$ ——充满系数;

$\lambda$ ——预筛分系数;

$B$ ——给矿口宽度(cm);

- $e$ ——排矿口宽度(cm);  
 $E$ ——矿石的弹性模数(Pa);  
 $\alpha$ ——啞角( $^{\circ}$ );  
 $\eta$ ——传动效率,  $\eta = 0.6 \sim 0.75$ 。

### 2. 复摆颚式破碎机

按下列经验公式计算所需功率, 即

$$P = \left( \frac{1}{80} \sim \frac{1}{60} \right) BL \quad (\text{kW})$$

- 式中  $B$ ——给矿口宽度(cm);  
 $L$ ——给矿口长度(cm)。

### 3. 旋回破碎机

破碎机功率按下列经验公式计算功率, 即

$$P = 16D^{2.5}rn \quad (\text{kW})$$

- 式中  $D$ ——动锥底部最大直径(m);  
 $r$ ——动锥在排矿处的偏心距(m);  
 $n$ ——破碎锥转速(r/min)。

### 4. 圆锥破碎机

$$P = 65D^{1.9} \quad (\text{kW})$$

- 式中  $D$ ——破碎锥大端直径(m)。

### 5. 锤式破碎机

$$P = (0.1 \sim 0.15) D^2 LnK \quad (\text{kW})$$

- 式中  $D$ ——转子外直径(m);  
 $L$ ——转子长度(m);  
 $n$ ——转子转速(r/min);  
 $K$ ——过载系数,  $K = 1.15 \sim 1.35$ 。

### 6. 反击式破碎机

$$P = KQi^{1.2} \quad (\text{kW})$$

- 式中  $Q$ ——生产率(t/h);  
 $i$ ——破碎比;  
 $K$ ——系数,  $K = 0.026$ 。

### 7. 辊式破碎机

#### (1) 光辊破碎机

$$P = 0.8 K L v \quad (\text{kW})$$

式中  $L$ ——辊子长度(m);

$v$ ——辊子圆周速度(m/s);

$K$ ——系数,  $K \leq 0.6 \frac{D}{d} + 0.15$ ,  $D$ 与 $d$ 分别为给矿与

排矿粒度。

#### (2) 齿辊破碎机

$$P = K L D n \quad (\text{kW})$$

式中  $L$ ——辊子长度(m);

$D$ ——辊子直径(m);

$n$ ——辊子转速(r/min);

$K$ ——系数, 破煤时 $K = 0.95$ 。

### 8. 破选机

$$P = P_1 + P_2 = M \omega \times 10^{-3} + \frac{R n g (m + 13 m_0)}{2.864} \times 10^{-3} \quad (\text{kW})$$

式中  $P_1$ ——物料在筒体中完成破碎过程时提升跌落所耗功率;

$P_2$ ——完成筛分过程时按滚筒筛计算的功率;

$M$ ——阻力矩(N·m);

$\omega$ ——筒筛角速度(rad/s);

$R$ ——筒筛半径(m);

$n$ ——筒筛转速(r/min);

$m_0$ ——筒体内被筛物重量(kg);

$m$ ——回转筒体自重(kg);

$\eta$ ——传动效率,  $\eta = 0.7$ 。

也可以按经验公式计算功率, 即

$$P = \frac{D(75 + \pi L)}{59} \quad (\text{kW})$$

式中  $D$ ——筒筛直径(m);

$L$  ——筒筛长度(m)。

### 九、磨碎机电动机功率计算

磨碎机是对矿石或其他物料进行粉碎的机械设备。

#### 1. 磨碎机经验计算公式

$$P = 7.5cmg\sqrt{D} \times 10^{-5} \quad (\text{kW})$$

式中  $m$  ——磨碎机总装重量(kg)；

$D$  ——筒体有效内径(m)；

$c$  ——研磨介质系数； $c = 6.8 \sim 13.3$ 。

上式在工作转速  $n = 32/\sqrt{D}$  条件下进行试验，如果  $n$  与  $32/\sqrt{D}$  比值相比相差较大时，可近似认为功率增长与转速成正比，即

$$P = 7.5cmg\sqrt{D} \frac{n}{32} \times 10^{-5} = 7.5cmgD \frac{n}{32} \times 10^{-5} \quad (\text{kW})$$

或 
$$P = 1.42VDn \left( \frac{mg}{V} \right)^{0.5} \times 10^{-4} \quad (\text{kW})$$

式中  $V$  ——磨碎机有效容积( $\text{m}^3$ )；

$n$  ——工作转速(r/min)。

#### 2. 自磨机功率计算

$$P = \frac{D^y LP_e}{D_e^y L_e} \quad (\text{kW})$$

式中  $D$  ——自磨机筒径(m)；

$D_e$  ——已使用的自磨机筒径(m)；

$L$  ——自磨机筒长(m)；

$L_e$  ——已使用过的自磨机筒长(m)；

$P_e$  ——已使用过的自磨机功率(kW)；

$y$  ——指数， $y = 2.5 \sim 2.6$ 。

### 十、振动筛电动机功率计算

振动筛是利用不平衡重激振使筛箱振动的筛分机械。

振动筛电动机功率为



$$P = \frac{P_1 + P_2}{\eta} = \frac{mA n^3 (cA + fd)}{1.78\eta} \times 10^{-6} \quad (\text{kW})$$

- 式中  $m$ ——振动筛的参振重量(kg);  
 $A$ ——振幅, 单轴振动筛,  $A = 2.5 \sim 4$ , 双轴振动筛,  
 $A = 5 \sim 6$  mm;  
 $n$ ——振动次数(r/min);  
 $c$ ——阻力系数,  $c = 0.2 \sim 0.3$ ;  
 $f$ ——滚动轴承摩擦系数,  $f = 0.005$ ;  
 $d$ ——轴颈的直径(m);  
 $\eta$ ——传动效率,  $\eta = 0.9 \sim 0.95$ ;  
 $P_1$ ——振动筛为克服运动阻力而消耗的功率(kW);  
 $P_2$ ——振动筛为克服轴承中的摩擦力而消耗的功率(kW)。

### 十一、重力选矿电动机功率计算

重力选矿是矿物粒群在运动的介质中按密度或粒度进行分选的一种选矿方法。

重介质振动溜槽的电动机功率

#### 1. 刚性连接时起动功率

$$P = \frac{K_1 e^2 n}{1.95\eta} \times 10^{-6} \quad (\text{kW})$$

#### 2. 弹性连接时起动功率

$$P = \frac{K_1 K_2 e^2 f}{1.95(K_1 + K_2)\eta} \times 10^{-6} \quad (\text{kW})$$

- 式中  $e$ ——曲柄连杆机构的偏心距(mm);  
 $f$ ——槽体频率(次/min);  
 $K_1$ ——工作弹簧刚度;  
 $K_2$ ——连杆弹簧刚度;  
 $\eta$ ——传动效率,  $\eta = 0.95$ 。

例9-33 一台有平衡绳的矿井提升机, 由电动机带动摩擦轮同速旋转, 靠摩擦力使钢绳和运转矿石的罐笼提升或下降, 已知运载量  $m = 6000$  kg, 额定提升速度  $v = 15$  m/s, 若取载荷系数

$K_1 = 1.2$ , 动力系数  $K_2 = 1.2$ , 传动效率  $\eta = 0.9$ , 试计算电动机功率。

电动机功率为

$$P = \frac{K_1 K_2 m g v}{\eta} \times 10^{-3} = \frac{1.2 \times 1.2 \times 6000 \times 9.8 \times 15}{0.9} \times 10^{-3}$$

$$= 1440 \text{ kW}$$

例9-34 有一台潜孔钻机, 如果回转机构最大回转转矩  $T_{\max} = 1000 \text{ N}\cdot\text{m}$ , 回转机构的最大转速  $n = 30 \text{ r}/\text{min}$ , 提升力  $F = 6000 \text{ N}$ , 提升速度  $v = 15 \text{ m}/\text{min}$ , 试计算回转和提升功率, 取  $\eta = 0.7$ 。

(1) 回转功率

$$P = 1.05 \frac{T_{\max} n}{\eta} \times 10^{-4} = 1.05 \frac{1000 \times 30}{0.7} \times 10^{-4}$$

$$= 4.5 \text{ kW}$$

(2) 提升功率

$$P = \frac{F v}{60 \eta} \times 10^{-3} = \frac{6000 \times 15}{60 \times 0.7} \times 10^{-3}$$

$$= 2.14 \text{ kW}$$

例9-35 现有矿用挖掘机, 已知推力  $F_t = 850 \text{ kN}$ , 推压速度  $v_t = 0.2 \text{ m}/\text{s}$ , 最大提升力  $F_l = 500 \text{ kN}$ , 提升机构的圆周速度  $v_l = 0.15 \text{ m}/\text{s}$ , 试求机械传动正铲挖掘机的推压和提升机构功率。

(1) 推压机构功率(取  $\eta = 0.7$ )

$$P_t = \frac{F_t v_t}{\eta} \times 10^{-3} = \frac{850 \times 10^3 \times 0.2}{0.7} \times 10^{-3}$$

$$= 243 \text{ kW}$$

(2) 提升机构功率

$$P_l = \frac{F_l v_l}{\eta} \times 10^{-3} = \frac{500 \times 10^3 \times 0.15}{0.7} \times 10^{-3}$$

$$= 107 \text{ kW}$$

例9-36 要求刨煤机的牵引力  $F = 180 \text{ kN}$ , 牵引速度  $v = 1$

m/s, 传动效率  $\eta = 0.8$ , 试计算刨煤机所需功率。

刨煤机所需功率为

$$P = \frac{Fv}{\eta} \times 10^{-3} = \frac{180 \times 10^3 \times 1}{0.8} \times 10^{-3} \\ = 225 \text{ kW}$$

例9-37 现有一台  $\phi = 600$  的圆锥破碎机, 已知水平摆动行程  $S = 20 \text{ mm}$  试计算所需功率。

破碎锥大端直径的经验计算公式为

$$D = 58S = 58 \times 20 = 1160 \text{ mm} = 1.16 \text{ m}$$

所需功率为

$$P = 65D^{1.9} = 65 \times 1.16^{1.9} = 86.2 \text{ kW}$$

[ G e n e r a l I n f o r m a t  
i o n ]

书名 = 实用电工计算手册

作者 = B E X P

S S 号 =

加密地址 =

页数 = 9 7 6

下载位置 = h t t p : / / 2 0 2 . 1  
1 8 . 1 8 0 . 1 2 1 / e b o o k /  
s j y 0 1 / d i s k d l / d l 1 9  
/ 1 2 / ! 0 0 0 0 1 . p d g

# 目录

## 正文