安装与维修电工技术

（第 2 版）

龚顺镒
施启达 编著

机械工业出版社

ISBN 7－111－04132－1/TM・515

WWW.PLCWORLD.CN

ISBN 7-111-04132-1

定价：24.00元

安装与维修电工技术

（第2版）

龚顺镒　施启达　编著

WWW.PLCWORLD.CN

机 械 工 业 出 版 社

本书较全面系统地介绍了工厂安装与维修电工应知的工厂供电系统和常用电气设备的基本知识及其施工、安装、使用、维护与检修等具体技术知识。本书系根据有关工人技术等级标准编写的，适合于具有初中以上文化程度的初级至中级电工自学，并可供工厂作为业余培训教材使用及有关人员参考。

图书在版编目（CIP）数据

安装与维修电工技术/龚顺镒，施启达编著．第2版．
－北京：机械工业出版社，1999
ISBN 7-111-04132-1

Ⅰ．安…
Ⅱ．①龚…　②施…
Ⅲ．电工技术－基本知识
Ⅳ．TM05

机械工业出版社（北京市百万庄大街22号　邮政编码100037）
责任编辑：边　萌　版式设计：王　颖　责任校对：陈立耘
封面设计：郭景云　责任印制：路　琳
中国建筑工业出版社密云印刷厂印刷·新华书店北京发行所发行
2002年2月第2版第12次印刷
787mm×1092mm 1/32·16.5印张·364千字
155951—158450册
定价：24.00元

凡购本书，如有缺页、倒页、脱页，由本社发行部调换
本社购书热线电话(010)68993821、68326677－2527

WWW.PLCWORLD.CN

前　言

为了适应广大工人技术学习的需要，我们根据原第一机械工业部1978年颁发的《工人技术等级标准》（电工）“应知”“应会”的要求和水电部颁发的《安装工人技术等级标准》（电工）“应知”“应会”的要求，编写了这本供安装和维修电工学习的通用读物《安装与维修电工技术》。本书较全面系统地介绍了工厂电气设备结构及原理基本知识，阐述了有关电器的使用、安装、维护与检修的具体实践技术知识。内容包括：电工操作工艺基础；工厂供电线路的施工与维修；电机原理、安装与维修；电力拖动控制线路及维修；工厂变电所主要电气设备及其安装等五章。

本书适合于二级到五级电工自学。为了便于自学，叙述力求深入浅出，通俗易懂，结合实际，并附有练习题，以培养学员分析问题和解决问题的能力。通过本书的学习，能掌握二级到五级电工应知的基本理论知识和应会的基本技能，达到技术考核标准。

本书第一章第三、四两节、第二章第七节和第五章由施启达同志编写，其余部分由龚顺镒同志编写。

由于编者的业务知识有限，书中错误和不足之处难免，恳切希望广大读者批评指正。

编　者

第 2 版 前 言

本书自1985年第1版发行以来，受到了广大读者的欢迎。由于近年来电工技术发展很快，不论在设备、施工技术方面，还是在操作工艺和材料等方面，都有很大进展。1987年我国颁发了电气图形符号最新标准，原有图形符号已被淘汰，且电气施工及验收规范全部重编。因此有必要对本书加以修订。

这次修订的主要内容有：增加一些新内容，例如第六章电工安全技术；动力照明线路的最新安装，电缆头的最新制作；晶闸管直流电动机的调速等。第三章充实了电机、变压器的维修；第二章增加了工厂节电措施等。另外删去了一些过时的内容。通过修改，反映了电工专业的新技术、新工艺、新标准、新设备和新材料，扩大了该书的知识面，使其更具有实用性。

这次修订仍保留原书的特点，着重讲述了初、中级（2～5级）电工应知的基本理论知识和应会的基本技能，突出针对性和实用性。内容包括了工厂供电系统和常用电气设备的基本原理及其安装、使用、维护、选择设计和安全用电等，努力做到理论联系实际。

本书仍由龚顺镒和施启达同志修订，由龚顺镒统编。全书由南京高等动力专科学校副教授韩廷臣主审。在修订过程中，得到南京大方股份有限公司龚天兵同志的帮助，谨此一并表示深切谢意。

编 者

WWW.PLCWORLD.CN

目　录

前言
第2版前言
第一章　电工操作工艺基础 ……1
§1-1　常用电工工具的使用与维护 ……1
§1-2　基本操作工艺 ……4
§1-3　电气施工识图 ……18
§1-4　照明线路安装 ……32
§1-5　电工安全（防护）用具的使用与维护 ……47
§1-6　绝缘材料的性能指标 ……50
练习题 ……51
第二章　工厂供电线路的施工与维修 ……52
§2-1　工厂供电系统的接线方式 ……52
§2-2　供电线路上的电压损失及功率损失 ……55
§2-3　工厂供电线路及其选择 ……58
§2-4　供电变压器容量的选择 ……73
§2-5　架空输电线路的架设 ……76
§2-6　电力电缆线路的施工 ……94
§2-7　电缆头的制作与安装 ……101
§2-8　车间（低压）配电线路的安装与车间电力负荷的计算 ……122
§2-9　供电线路的运行与维护 ……149
§2-10　工厂节约用电 ……154
练习题 ……163
第三章　变压器与电机原理、安装与维修 ……166
§3-1　变压器的工作原理与构造 ……166

WWW.PLCWORLD.CN

§3-2 三相变压器 ……173
§3-3 电力变压器的抽心检查与安装 ……182
§3-4 几种特殊用途的变压器 ……193
§3-5 异步电动机 ……201
§3-6 电动机的安装与接线 ……221
§3-7 电动机常见故障及维修 ……226
§3-8 同步电机 ……235
§3-9 直流电机 ……246
§3-10 单相串励电动机 ……264
§3-11 直流弧焊机——硅整流弧焊机 ……266
练习题 ……270
第四章 电力拖动控制线路与维修 ……275
§4-1 常用低压电路控制设备 ……275
§4-2 电器元件的维修 ……297
§4-3 异步电动机的拖动控制线路 ……301
§4-4 机床电气控制线路举例 ……341
§4-5 高压电动机的控制电路 ……350
§4-6 直流电动机的自动控制概述 ……354
§4-7 直流电动机控制线路举例 ……361
§4-8 晶闸管-直流电动机的调速 ……365
§4-9 机床电气线路的维护与检修 ……368
练习题 ……369
第五章 工厂变电所主要电气设备及其安装与调整 ……373
§5-1 工厂供电概述 ……373
§5-2 工厂变电所的类型与主接线 ……375
§5-3 工厂变电所的主要电气设备 ……381
§5-4 工厂变电所的继电保护装置 ……398
§5-5 继电保护装置的运行和维修 ……414
§5-6 工厂变电所的过电压保护 ……417

WWW.PLCWORLD.CN

§5-7 电气设备的安装与调整 ……424
练习题 ……448
第六章 电工安全技术 ……450
§6-1 电气安全技术基础 ……450
§6-2 电气设备的接地与接零 ……457
§6-3 漏电保护装置 ……477
§6-4 防雷保护 ……487
§6-5 电气防火与防爆 ……495
§6-6 静电安全技术 ……500
练习题 ……510
附录 ……512
附录A 500V铝芯绝缘导线长期连续负荷允许载流量表 ……512
附录B 500V铜芯绝缘导线长期连续负荷允许载流量表 ……514
附录C 500V橡皮与塑料绝缘电力电缆及裸导线载流量表 ……516
附录D 500V塑料绝缘塑料护套线（BVV、BLVV）在空气中敷设长期连续负荷允许载流量表 ……517
附录E 电力电缆及高压架空线载流量表 ……517
附录F 熔断器的熔体电流 ……518

www.hcworld.cn

第一章　电工操作工艺基础

§1-1　常用电工工具的使用与维护

工具是电气安装与维修工人的武器，正确使用工具是提高工作效率、保证施工质量的重要条件，因此，必须十分重视对工具正确使用和正常维护。由于工具种类繁多，这里仅对常用的电工工具作简单的介绍，但对于一般的通用工具如钳子、螺钉旋具等就不作介绍了。

常用电工工具除了携带的工具如试电笔、钢丝钳、电工刀、螺钉旋具、钢卷尺、尖嘴钳、剥线钳及活动扳手等外，还有电工公用工具如喷灯、紧线器、安全带、脚扣、人梯、压接钳、弯管器、割管器、手电钻、拉拔器、钢锯、手锤、台钻、砂轮、各种规格的扳手、锉刀、电烙铁、长卷尺、转速表和小型起重吊链、叉杆等。

电工工具的设置要看电工的工作性质和范围，并非所有工具都要备全，有时还可能超出上述范围。下面介绍几种常用电工工具（安全用具见本章第五节）。

一、试电笔

试电笔是电工常用的一种辅助安全用具。用于检查500 V以下导体或各种用电设备外壳是否带电。试电笔外形像钢笔，前端有金属探头，后端有金属挂勾，使用时手接触金属挂勾。将探头触及检查部位，若是带电，试电笔中的氖气管就会发出红光。

只要我们善于使用，可以用试电笔进行许多电气检查工

作。如区别相线和零线：相线发亮，零线一般不发亮；区别交流电和直流电：在直流电通过试电笔时，氖灯里的两个极只有一个发亮；区别直流电正极和负极：把试电笔联接在直流电的正负极之间，发亮的一端为负极，不发亮的一端为正极；区别电压高低：电压越高，发光越亮；检查相线接地：接地一相的亮度较弱；接触中性点，若发亮，说明各相负载不平衡，或有匝间短路现象；检查接线头，若接触不良，或有干扰，则氖灯出现闪烁现象；等等。

二、手电钻

手电钻是装配电工的常用工具，其基本结构由电动机、减速机构、夹头、开关和手柄等组成。6mm电钻一般采用手枪式；10mm电钻采用环式后手柄结构；13～23mm电钻采用双侧手柄及后托架。

用电钻钻孔时，必须亲自察看电线和插销是否完好，接地线联接是否正确。初次使用时，不要手握电钻去插电源，应先将其放在绝缘物上，再插上电源，用试电笔检查外壳是否带电，然后再使用。

三、弯管器和切管器

弯管器和切管器是钢管配线中常用的工具。弯管器的种类有手弯管器、液压弯管器和电动弯管器。手弯管器体积小、轻便，适于工地现场使用，它是靠人力弯曲管子，只适用于弯直径50mm以下的管子。为使管子不被弯扁，在弯曲时，弯管器须逐点移动，使管子弯成所需的弯曲半径。

液压弯管器所弯曲的电线管，能到直径100mm以上，最适于弯曲半径相同的成批管弯。弯曲较粗的管子时，可采用电动弯管机或灌砂火弯法（煨弯）。

电线管一般是用钢锯切断。也可用切管器切断。

四、压接钳

压接钳是联接导线的一种工具。导线与导线的联接采用压接法。压接可靠，施工方便、灵活。根据联接管截面大小的不同，选用不同规格的压接钳。各种压接钳使用范围，见表1-1。

表1-1 各种压接钳使用范围

名　称	型　号	使　用　范　围
单股导线压接钳	—	可压接 2.5～10mm² 单股铝线
手动油压钳	SLY-240型 SYQ-12A型	可压接16～240mm²的钢铝绞线
导线机械压接钳	QYQ-12型 SXQ-16(X)型	可压接 16～180mm² 铝绞线，25～300mm²钢芯铝绞线

使用压接钳时，应根据导线截面选择适当规格的压模，不能混用。

五、喷灯

喷灯是作为导线局部或电缆封端加热的工具。使用前要检查所用的油，禁止在煤油或酒精喷灯内注入汽油使用；检查油量是否合适，油量不应超过油筒容量的 3/4；检查油筒是否漏油，喷油嘴有无堵塞，螺纹处是否漏气；检查加油的螺塞是否拧紧。

禁止使用打气筒上没有保险套的喷灯。

使用时及点火前不要打气，先在点火碗内注入汽油，油量不可太满，点火将喷嘴加热，其目的是加热汽化管，使汽油变成蒸气。点火后，待碗内汽油快烧尽时，将节油阀拧开，少量汽油就会喷出燃烧，稍待一会即可打气使用，但打气不

WWW.PLCWORLD.CN

可过分。

§1-2 基本操作工艺

一、导线的联接与封端

在电气安装与线路维护工作中，常常因为导线太短和线路分支，需要把一根导线与另一根导线联接起来，再把终端出线与用电设备的端子联接，这些联接处通常称为接头。但应尽量避免出现不必要的接头，因为常常由于接头的质量不好而发生故障。因此，导线的联接是一道非常重要的工序，必须重视联接质量。

导线的联接方法很多，有绞接、焊接、压接和用螺钉联接等。各种联接方法适用于不同导线（铜线，铝线）及不同的工作地点。导线联接的基本要求是：导线接头处的电阻，不得大于导线本身的电阻值；接头处的机械强度，不得低于原导线强度的80%；在接头处不得使绝缘降低；保证接头处在运行后不受腐蚀。

（一）线头的剖削

导线联接前，必须把导线端头的绝缘层剥削掉，并将裸露的导体表面清理干净，削切绝缘层的方法要正确，对橡胶绝缘线，应采用分段削剥，如图1-1所示。对塑料绝缘线，适用单层削法。剖切绝缘时，不应损伤线芯，剖去绝缘的长度一段在50～150mm，截面小的剖短些，截面大的剖长些。

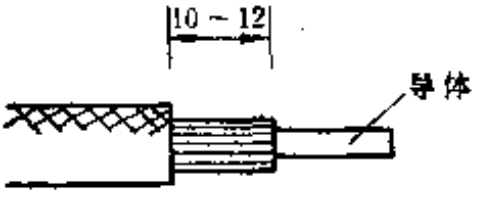


图1-1 橡胶绝缘线分段剖法

（二）铝导线的接法

由于铝在空气中极易氧化，因此铝导线的联接工艺比铜

导线复杂，稍不注意就会影响接头质量。铝导线的联接方法很多，有压接、电焊、钎焊、气焊。在铝线联接方法上禁止采用绞接和绑接。

1．管压接

（1）对内线工程用的10mm²以上的单股小截面铝导线，多用铝套管进行局部压接，如图1-2所示。压接前，先把导线两端的绝缘层各剥去50～55mm，用电工刀把导线表面的氧化膜及油垢刮掉，再涂上凡士林锌粉膏，把线芯从两端插入事先选好的铝套管内，有圆形和椭圆形两种套管，然后用压钳进行压接。压接尺寸见表1-2。

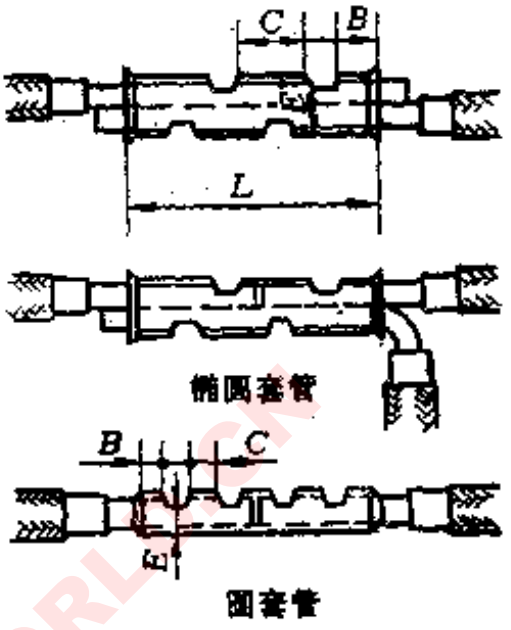


图1-2　单线压接

表1-2　铝套管压接规格表

套管形式	导线截面 (mm²)	铝芯外径 (mm)	管压接尺寸（mm） B	管压接尺寸（mm） C	压后尺寸 E（mm）	铝套管长 L（mm）
圆形	2.5	1.76	2	2	1.4	31
	4	2.24	2	2	2.1	31
	6	2.73	2	1.5	3.3	31
	10	3.55	2	1.5	4.1	31
椭圆形	2.5	1.76	2	8.8	3.0	31
	4	2.24	2	8.4	4.5	31
	6	2.73	2	8.4	4.8	31
	10	3.55	2	8	5.5	31

WWW.PLCWORLD.CN

压接时，要按规定压接，使压钳压到必要的极限尺寸，并使所有压坑的中心线处于同一条直线上。

单股铝导线需要分支或需要并头联接时，也可以用管压接头方式联接。

（2）多股铝绞线的压接。截面在16～240mm²的铝导线可采用手提式油压钳进行局部压接，如图1-3所示。压接前，先把两根导线端部的绝缘层剥去，每端剥去长度为联接管长度的一半加5mm。为确保压接质量，应使用钢丝刷除去导线表面的氧化膜，并涂上凡士林锌粉膏。然后把线芯从两端插入已清除氧化膜和油垢的联接管内，插入长度各占联接管的一半，并相应地划好压坑的标记。根据联接导线截面的大小，选好压模，装到钳口内进行压接。压坑尺寸及深度见图1-3，所注工艺尺寸见表1-3。

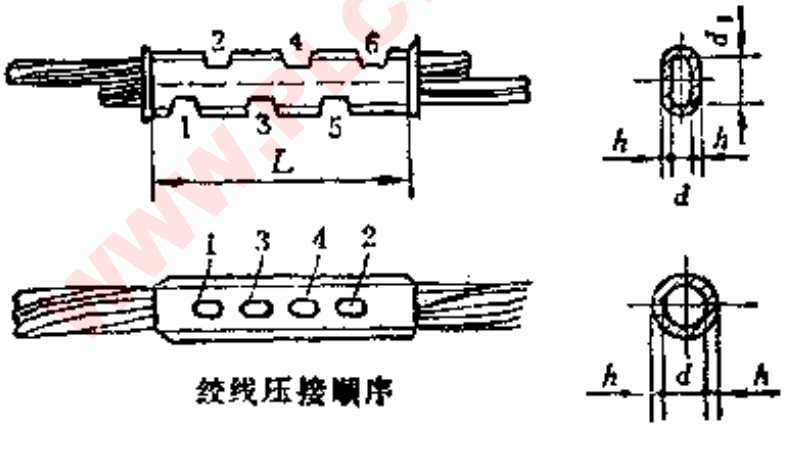


图1-3　铝导线压接

表1-3　铝导线压接的压坑间距及深度尺寸　　（mm）

联接管规格（圆形）	压坑间距			压坑深度 h_t	剩余厚度 h	铝接管长 L
	b_1	b_2	b_3			
GL-16	3	3	4	5.4	4.6	66
GL-25	3	3	4	5.9	6.1	68
GL-35	3	5	4	7.0	7.0	72
GL-50	3	5	6	8.3	7.7	78
GL-70	3	5	6	9.2	8.8	82
GL-95	3	5	6	11.4	9.4	86
GL-120	4	5	7	12.5	10.5	92
GL-150	4	5	7	12.8	12.2	95
GL-185	5	5	7	13.7	13.2	100
GL-240	5	6	7	16.1	14.9	110

压接顺序见图1-3，压完后，用细纹锉刀锉去压坑边沿的棱角，并用砂布打光，再用浸汽油的抹布擦净。最后恢复绝缘。

有关外线工程导线的联接见第二章。

2. 焊接

焊接法可以采用电阻焊、气焊、药包焊或钎焊等方法。

对于单股导线的并接（如接线盒），可用电阻焊，即用低电压炭极焊。焊接时，先把联接的铝导线的线头剥去20～30 mm，把线芯头并绞剪齐，在端头涂上少量的焊药，即可进行焊接，使线头熔化为球状，见图1-4。焊药配方为氯化钾粉50%，氯化钠粉30%，冰晶石

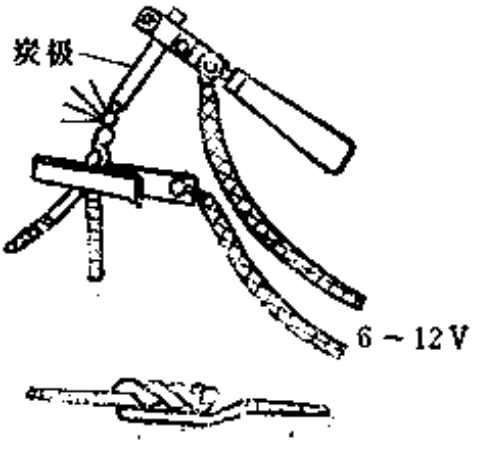
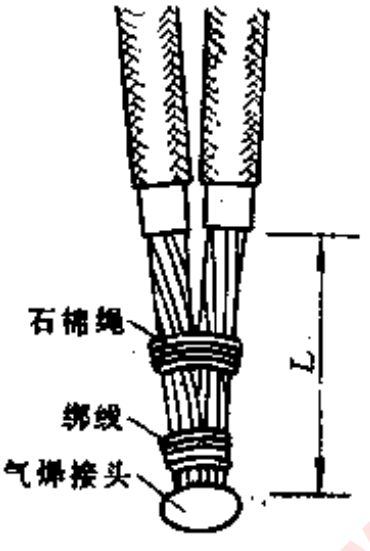


图1-4　单股导线电阻焊

WWW.DLCWORLD.CN

粉20%。

气焊法是多股铝导线在接线盒内并头联接时采用的，如图1-5所示。一般由气焊工直接操作，而由电工配合完成。焊接时先加热焊点，到熔化时再加入铝焊粉（焊药），借助焊粉的填充和搅动，使端面的金属芯线熔合并接起来。接头焊好后，要立即清除残渣和焊粉，因为施焊后残留的焊粉会对铝本身产生腐蚀作用。可趁热用棉纱沾水把线头擦干净。



多股导线气焊联接长度表

导线截面 (mm^2)	L (mm)
16	60
25	70
35	80
50	90
70	100
95	120

图1-5　多股导线气焊接头

（三）铜导线的联接

铜导线的联接工艺比铝导线要简单一些，可采用绞接、焊接或压接等方法。铜导线的焊接通常采用锡焊、气焊，单股铜线也可采用电阻焊（见图1-4）。铜导线的压接与铝导线的压接工艺基本相同，不同点仅是铜联接管内壁必须镀锡，以加大导线接触面积。此外，铜线的联接还可采用绞接和绑接。

1. 绞接法

WWW.PLCWORLD.CN

小截面（6mm²）单芯直接联接和分支联接，常采用绞接法联接，见图1-6。

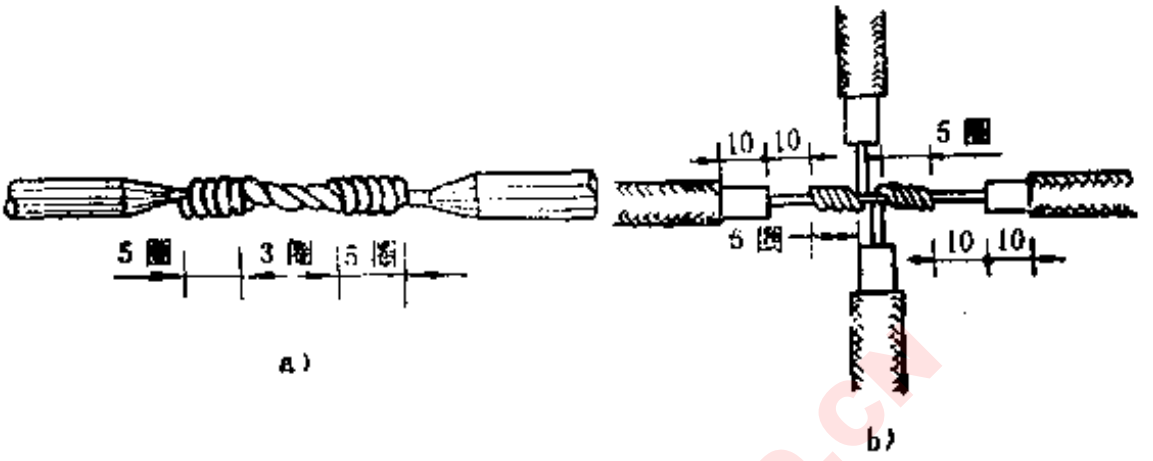


图1-6 单芯导线绞接联接

a）直接联接 b）十字分支联接

2. 缠绕绑接

对于较大截面（10mm²以上）的单芯直接联接和分支联接，是用联接线缠绕绑接，填一根1.5mm²铜线作辅助线，然后再用1.5mm²的裸铜线从中部开始向左右两端展开缠绕，见图1-7。

对多芯铜线直接联接和分支联接也可采用缠绕绑线联接。先把导线两端剥去线皮，然后把多芯线打开，把中心线切短，再把两头多芯线顺序交叉插进去成为一体，加辅助线一根，用1.5mm²的铜线从中央开始绑缠，接法与单芯直接缠绑法相同，见图1-8。

3. 单卷或复卷联接

首先把多芯线拧开，把中心线切短，把两头线芯插成一体，利用导线本身单卷联接，见图1-9。任取两股同时缠绕成圈后，另换两股缠绕，余线头压在里头或剪掉，再绕至5圈

WWW.FLEWORLD.CN

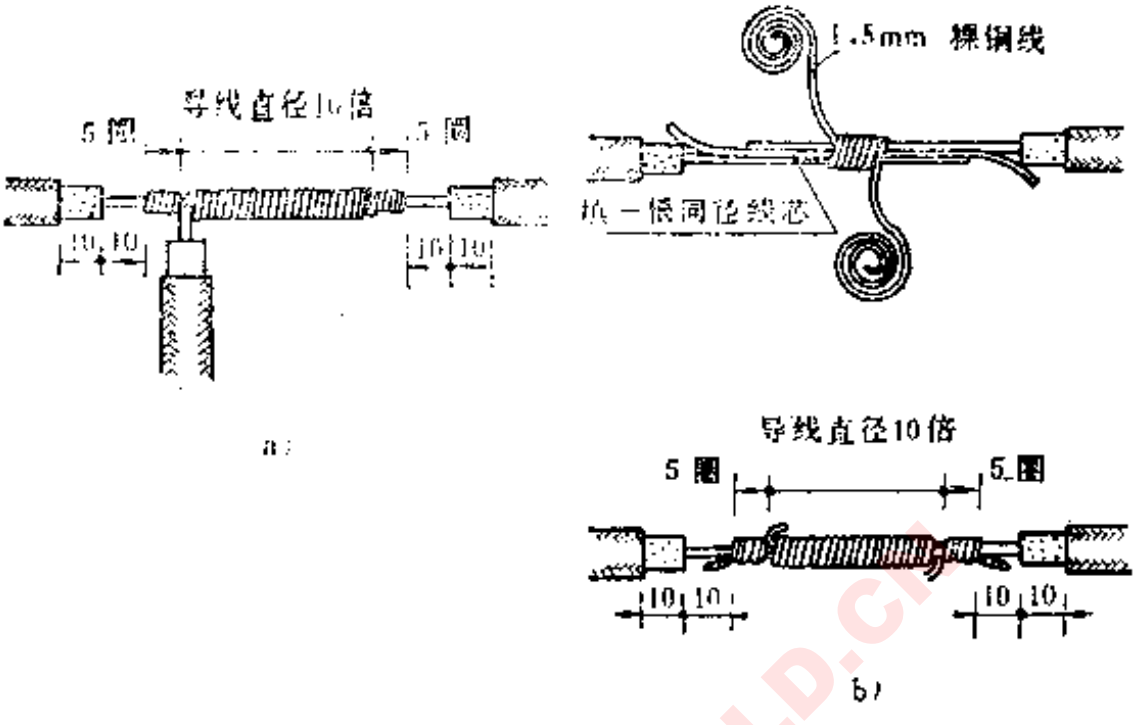


图1-7　单芯导线缠绕绑接法

a）大截面分支联接　b）大截面直接联接

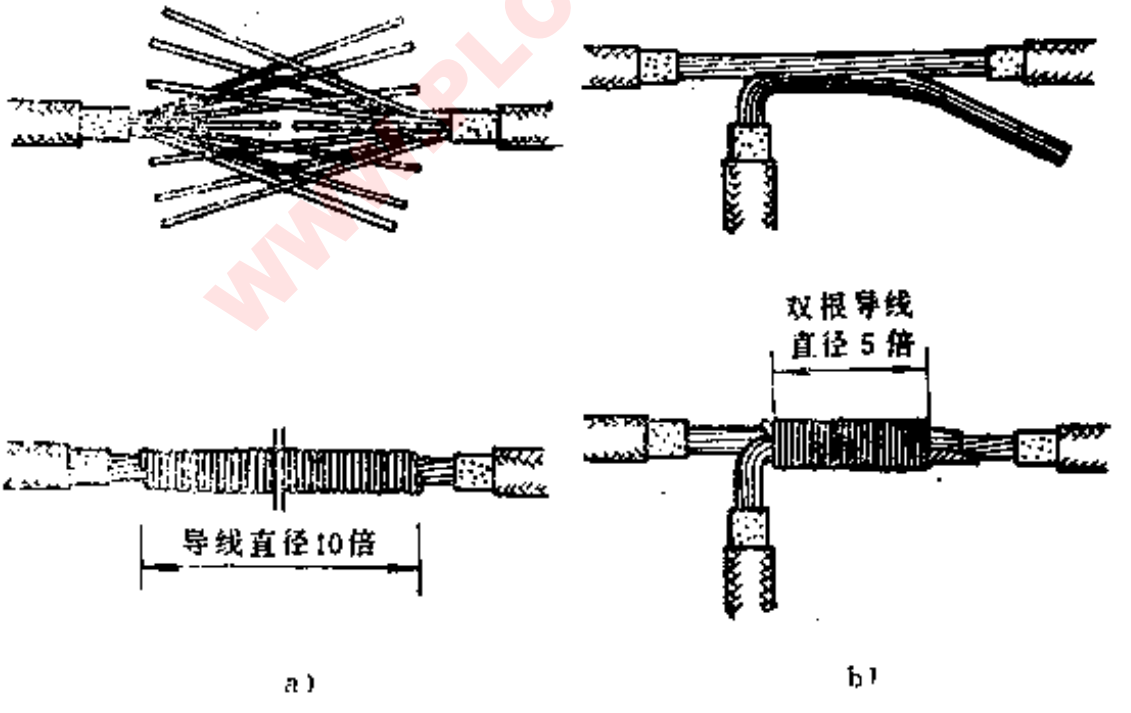


图1-8　多芯导线缠绑接法

a）直接联接　b）分支联接

WWW.PLCWORLD.CN

后，另换两股缠绕，依此类推，缠到边线为止，选双股拧三转，余线头剪掉，用钳子拍打平即可。另一端作法相同。

图1-9　多芯导线单卷直线联接

多芯铜芯导线分支联接同样可以采用单卷或复卷联接，见图1-10。

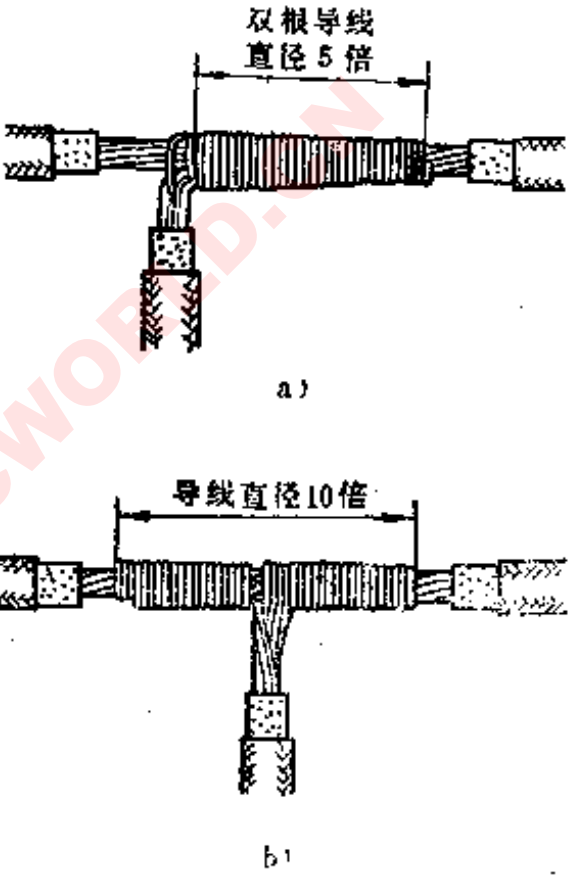


图1-10　多芯导线分支单卷和复卷联接

a）分支联接（单卷）

b）分支联接（复卷）

（四）导线接头的包扎

导线联接以后，有时需要恢复绝缘，恢复后的绝缘强度不应低于原有绝缘层。

导线接头绝缘层的恢复，采用绝缘带包缠法。常用的绝缘带有橡胶带、黄蜡布、带粘性的黑胶带、塑料带以及粘性的塑料带或聚酯带等，电压较高的可选用涤纶薄膜或玻璃纤维带等。缠绕时绝缘带与导线保持约55°的倾斜角，每周包缠压叠带宽的一半，先在绝缘层上包扎一定长度（约两根带宽），再将裸露部分包紧缠绕，一般情况需要缠两层绝缘带，必要时再用纱带包封一层，要求平整美观。包缠完毕的末端用纱线绑扎牢固，或用绝缘带自身

WWW.PLCWORLD.CN

套结扎紧，或用带粘性的黑胶带包封。在室外，一般用自粘性塑料带包缠，以增加防水防潮性能。

（五）封端联接

封端联接是导线终端出线与用电设备的端子相联接。对于导线截面大于10mm²的多股铜线或铝线，由于线粗，载流大，必须先在导线端头作好接线端子（俗称线鼻子、接线耳），再与设备相联。

铝导线用端子封端时，一般用压接法，压接工艺多为六边形围压截面。此外采用气焊方式进行端子封端，也是可行的，但明敷导线不得采用。铝导线封端联接，严禁拧接，因为拧接接触不良，接触电阻大；又因铝易受震动腐蚀，增加接触电阻，致使接线端子过热，发生故障。铝接线端子压接见图1-11和表1-4。

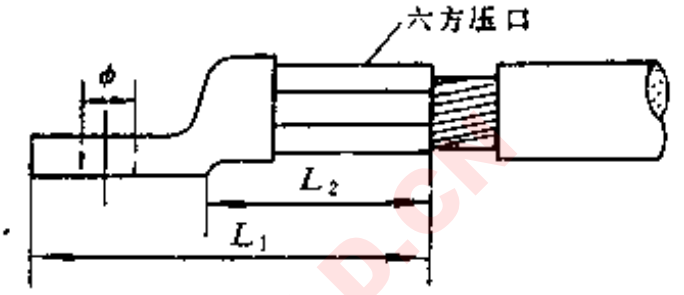


图1-11 铝接线端子压接图

表1-4 铝接线端子规格表 （mm）

导线截面（mm²）	L_1	φ	L_2	压接深度
16	65	6.5	32	六方压口
25	70	6.5	34	
35	80	8.5	36	
50	86	8.5	40	
70	96	10.5	42	
95	106	10.5	45	
120	116	13.0	50	
150	120	13.0	52	
185	130	13.0	55	
240	140	17.0	60	

WWW.ELECWORLD.CN

铜导线用接线端子时，有锡焊和压接两种方式。锡焊时，一般用喷灯火焰加热焊接。

若是铝导线出线端与设备铜端子直接联接，则会发生电化学腐蚀，因此，需采用预制的铜铝过渡接线端子，使接线端上铜与铜、铝与铝联接，压接方法同上所述。

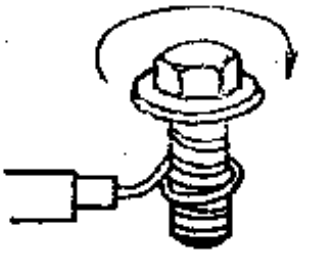


图1-12 单股线与电器设备联接

对于10mm² 以下的单股铜、铝导线，可直接与电器设备联接，但要注意线头弯圆的方向应与螺母拧入方向一致，一般均为顺时针方向，如图1-12所示。

二、钳工知识

安装与维修电工，在进行安装和维修电气设备时，除了要精通电工技术外，还要掌握钳工的操作技能，才能全面地完成工作任务。

电工常用的钳工基本操作有划线、凿削、矫正、弯形、锉削、锯削、钻孔、攻螺纹套螺纹等。请参阅有关书籍，掌握常用钳工工具的使用方法、操作技术及安全注意事项。

三、设备固定件的埋设

电气设备需要固定，一般用螺栓或焊接固定在基础、墙、柱、梁或构架上，根据不同情况，采用不同的方法，常用的方法有以下几种。

1. 预埋铁件

在混凝土结构或砖结构上，预先埋设带有弯钩圆钢脚的铁板或开尾叉的角钢，统称之为预埋铁件。预埋铁件的制作和埋设通常由土建部门根据设计图施工，电工配合进行。

2. 留孔埋设

WWW.PLCWORLD.CN

安装于混凝土基础上的设备，要在设计图上画出预留孔位置，浇灌基础时留出孔洞，安装时地脚螺栓悬挂于设备底座上，用细石混凝土灌浆，最后再二次灌浆抹平基础。

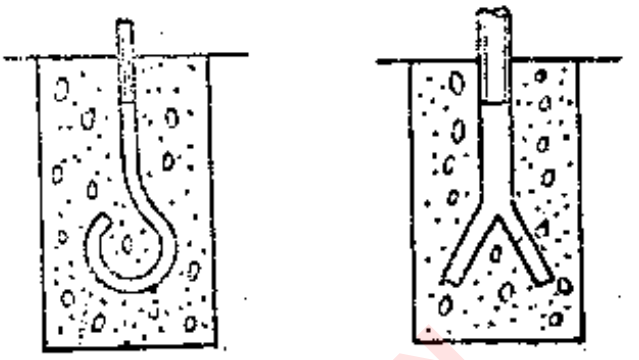


图1-13　地脚埋入部分形式

要在砖墙上安装支架槽钢、角钢或螺栓时，由砌砖人员在需要位置上留出方形或长方形孔洞，再用水泥砂浆填塞固定。固定构件的地脚埋入部分应做成弯钩、开尾、焊钢筋钩等，以增强抗拉力，见图1-13所示。

3．打孔埋设

是在砖结构上或混凝土上，人工凿孔，然后埋设地脚或木榫，供安装线路或电气装置之用。具体作法如下。

（1）先弹粉线，然后在标划的位置上凿洞，洞的大小、深浅由地脚形式而定。

（2）用在砖墙上的木榫孔，应凿成矩形，并把孔凿打在砖与砖之间的夹缝中；用在混凝土墙、柱上和楼板上的木榫孔，应凿打成圆形。

（3）木榫孔应略小于木榫，一般约小1～2mm；孔深应大于木榫的长度约5mm。

（4）木榫孔应打得与墙面保持垂直，不可歪斜；孔径的口底应一致，切不可出现口大底小的喇叭状。

木榫的削制要求榫体一样粗细，头部倒角；把木榫头部塞入木榫孔，先用手锤轻击几下，待木榫进入孔内约1/3后，

WWW.DLCWORLD.CN

检查木榫是否与墙面垂直，松紧是否适合。如过紧或过松，应更换木榫。安装时，木榫尾部不得打烂；尾部应打得与墙面齐平，不可突起或陷进过多。在安装工程中已较少使用。

4. 膨胀螺栓

采用膨胀螺栓是一种先进的施工方法，施工简单、方便，免去了在土建施工中预埋件的工序。

采用膨胀螺栓施工，先用冲击电钻在现场就地打洞，孔洞大小应与膨胀管粗细相同，孔深略长于膨胀管，洞内应清扫干净，轻轻打入膨胀栓，再用扳手拧紧，然后用膨胀螺栓将支架管卡固定在混凝土构件上。冲击电钻的种类比较多，常用的规格见表1-5。

表1-5 常用冲击电钻

名　　称	规　　格	生产厂
双速电动冲击电钻 ZIJS-16型	电压，220V，电流1.6A，功率320W，转速1500/700r/min	上海电动工具厂等
电动冲击电钻JLZC-20型	电压：220V，钻孔直径 ϕ 11～22mm	长春电动工具厂等
电动冲击电钻VTP-13型	电压220V，功率600W 转速1050～1800r/min	日　　立

当冲击电钻在混凝土构件上打孔时，往往容易碰到钢筋，冲击电钻打断钢筋会影响土建结构的强度，故要用钢筋探测器放在要打孔的地方试探，若是有钢筋时，会发出声响，这样就可以避开钢筋打孔了。

膨胀螺栓的安装方法如图1-14所示。使用膨胀螺栓紧固设备时，其规格应与被紧固的设备荷重相适应。用于易震动的设备时，均应加垫弹簧垫圈。膨胀螺栓的规格列于表1-6

中。线路及电具等的固定应采用膨胀螺栓、膨胀螺钉、预埋铁件及预下木砖等方法，禁止用木塞法。3kg以上的灯 具，须采用预埋铁件的方法。膨胀管的安装方法与膨胀螺栓相同。图1-15是各种膨胀管的造形和配件组合示意图。

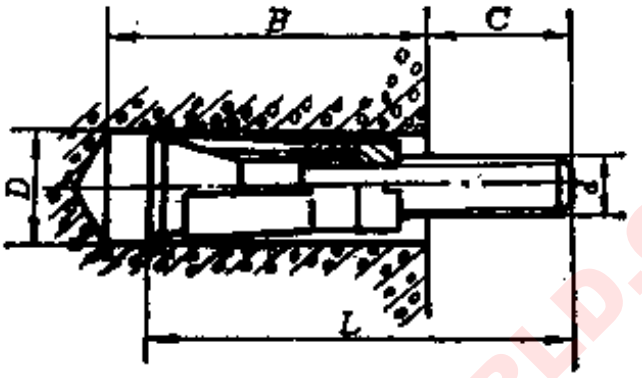


图1-14　膨胀螺栓的安装方法

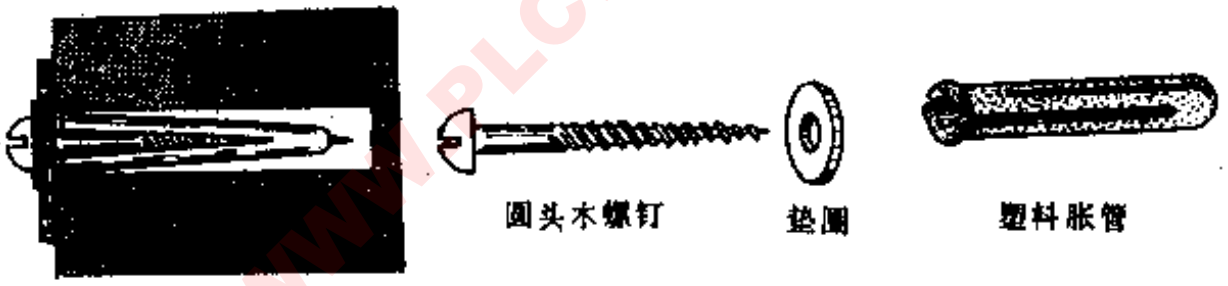
表1-6　膨胀螺栓规格

型号	a	L	C	B	D	重量 (kg)	拉力（N）		
							150*混凝土	砌体砖缝	75*红砖
QJ-PS6	M6	65	20	55	φ10	0.038	4000	3500	3000
QJ-PS8	M8	75	25	55	φ12	0.078	5000	4500	4000
QJ-PSC8	M8	105	55	55	φ12	0.128			
QJ-PS10	M10	85	30	55	φ16.5	0.136	7000	6500	5000
QJ-PSC10	M10	115	60	55	φ16.5	0.186			
QJ-PS12	M12	95	35	65	φ20.5	0.220	10000	8500	6000
QJ-PSC12	M12	125	65	65	φ20.5	0.27			

WWW.PLCWORLD.CN

a)

b)



c)

d)

图1-15　膨胀管的造形和配件组合示意图

WWW.PLCWORLD.CN

§1-3 电气施工识图

在工业生产中为了设计、施工、运行、维修的方便，必须使用统一的图形符号与文字符号组成完整的工程图，以表达电气设备的安装位置、配线方式和其他一些特征。工程图是工程技术的“语言”，了解这些符号的意义，有助于掌握线路的相互联系、工作原理、元件的工作过程，能够指导安装与维修工作。

在生产实践中经常遇到的电气工程图有系统图和框图、接线图和接线表等，还有变配电工程、照明及动力装置等施工图。

一、电气系统图

系统图和框图用于概略表示系统、分系统、成套装置或设备的基本组成部分的主要特征及其译功能关系。

（一）一次回路系统图

表示变配电系统、动力装置、电力拖动和照明系统中电气设备的基本组成及其联接方式。有多线图和单线图两种。多线图按实际电路联接绘制；而单线图将通常的三相电路用一根粗线表示，图形简捷明了，一般都使用单线图。图1-16是变电所和低压电动机一次回路系统图。

（二）动力系统图

图中绘出动力配电的情况、配电的系统和配电线路所用的导线型号与截面、采用管径以及总的设备容量等。参看图2-43。

二、二次原理图和接线图

接线图和接线表主要用于安装接线、线路检查、线路维修和故障处理。在实际应用中，接线图通常需要与电路图和

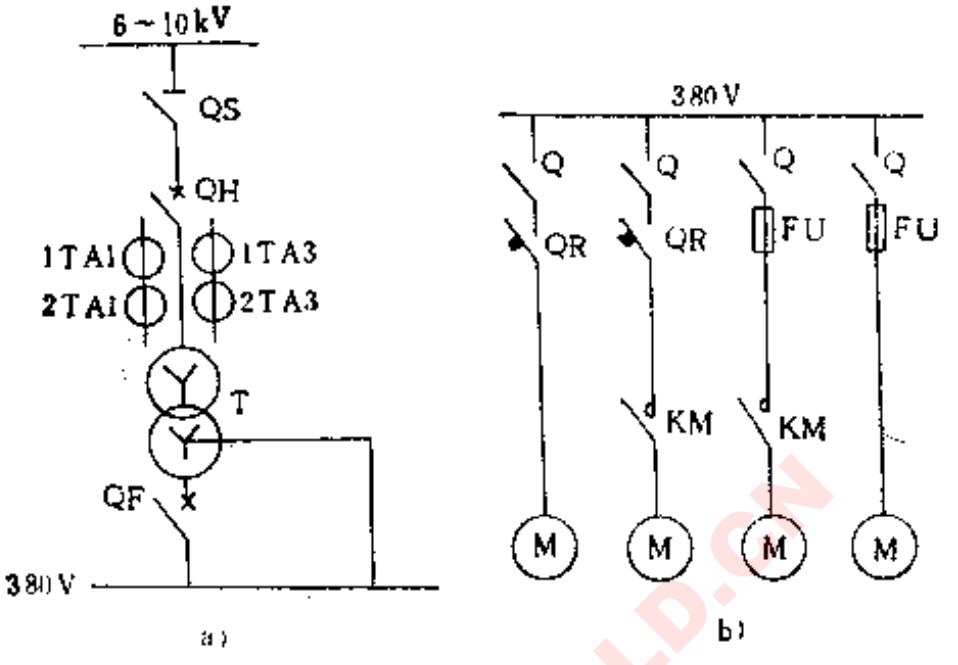


图1-16　变电所一次回路系统图和低压电动机系统图

a）变电所一次回路系统图　b）低压电动机系统图

位置（布局）图一起使用。二次接线图是二次设备按照一定次序联接起来以表示某一特定工作原理的电路图。

高、低压开关柜、控制柜、继电保护信号盘和其他控制设备内的操作、保护、信号、测量回路，称为二次线路（回路），二次线路中的设备称为二次设备。由于用途的不同，又分为原理图、展开图和二次配线图。在工作中往往同时使用这三种图，以全面反映二次线路的全部情况。

（一）原理图

表示各回路的工作原理和相互作用，用于反映各电气元件的工作过程的图叫原理图。这种线路图通常包括主电路和辅助线路两部分。主电路一般是大电流部分，且电压较高（用粗线描绘），辅助线路是弱电流部分，为控制、保护部分（用细线描绘）。图1-17是电气原理图的一个例子。

WWW.PLCWORLD.CN

（二）展开图

将原理图上的控制、保护部分单独取出，按每个设备的作用，把同一动作回路画在一起，这样就会把一个电气设备的线圈和接点分画在几处。尽管如此，由于展开图简单，容易看清各回路的动作顺序，因此在生产实践中使用最为广泛。为了便于读图，在回路边上注明动作回路的性质，并在每个元件上标有文字，以说明该元件属于哪个设备及该元件的性质。见图1-18。

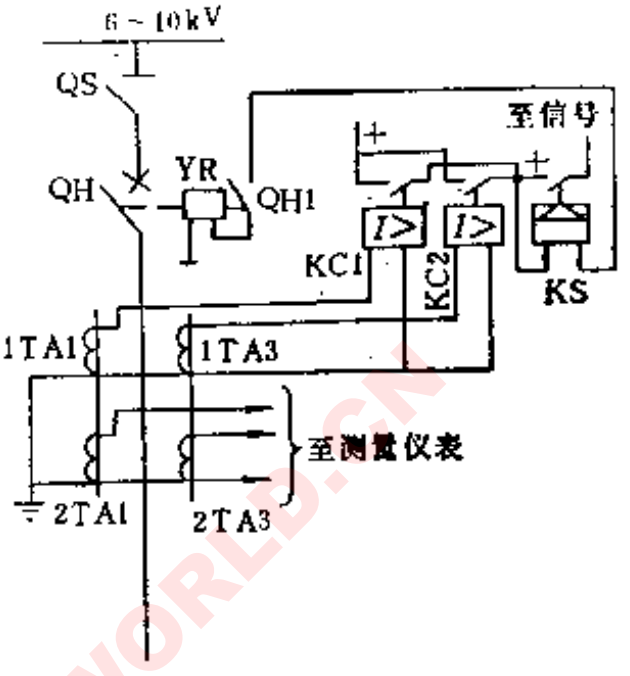


图1-17　过电流保护二次接线原理图（半集中表示）

KC—过电流继电器　KS—信号继电器

（三）二次配线图

表示各电气设备的实际接线的图叫二次配线图。这种图多反映由盘后看过去的设备位置和配线，所以往往又称之为背面接线图。图1-19表示二次电流回路的配线图。

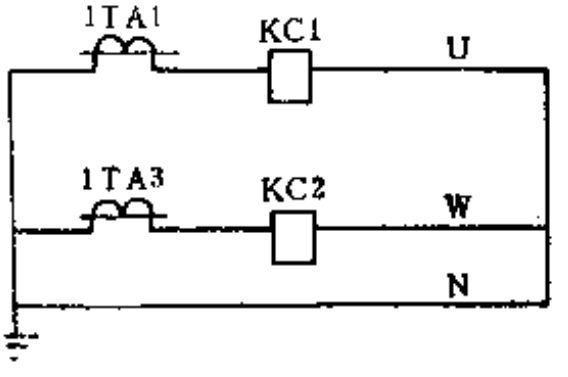


图1-18　二次电流回路展开图（分开表示）

三、电气平面图

电气平面图表示电气设备与联接线路的具体位置，线路的规格与敷设方式，电气设备的型号规格，各支路的编号及要求。它包括动力平面图、照明平面图、防雷平面图、电话

WWW.PLCWORLD.CN

和广播平面图等。图1-20、图1-21分别为动力及照明平面图示例。

在生产实践中还有些电气图，如电气装置图、外线平面图及电缆敷设图等。

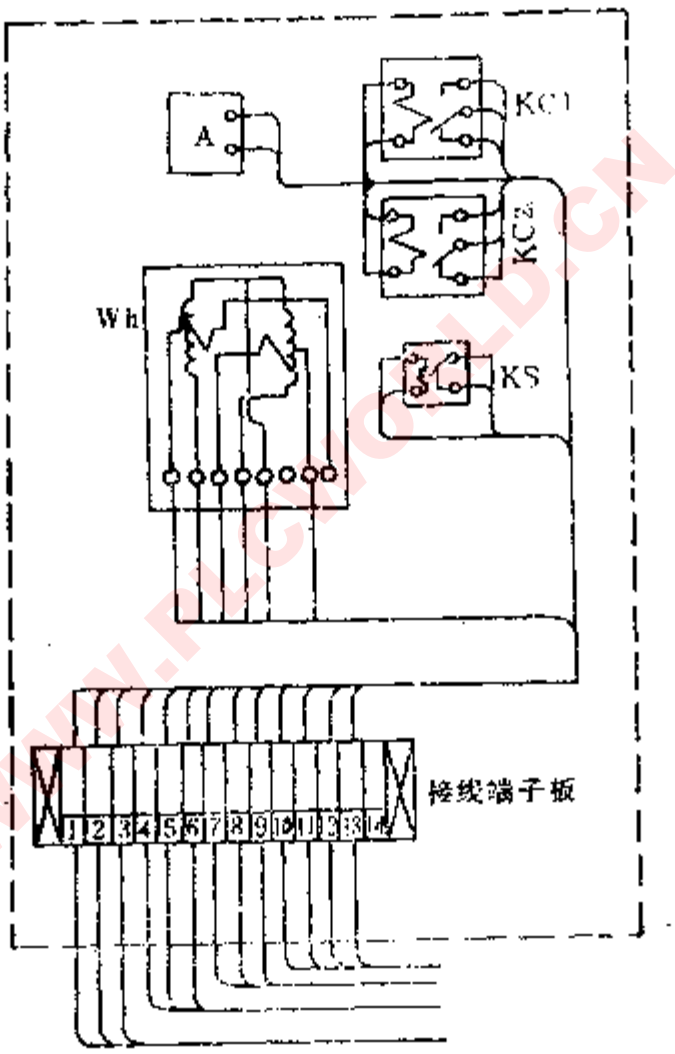


图1-19　二次电流回路的配线图

（集中表示）

KC—电流继电器　KS—信号继电器

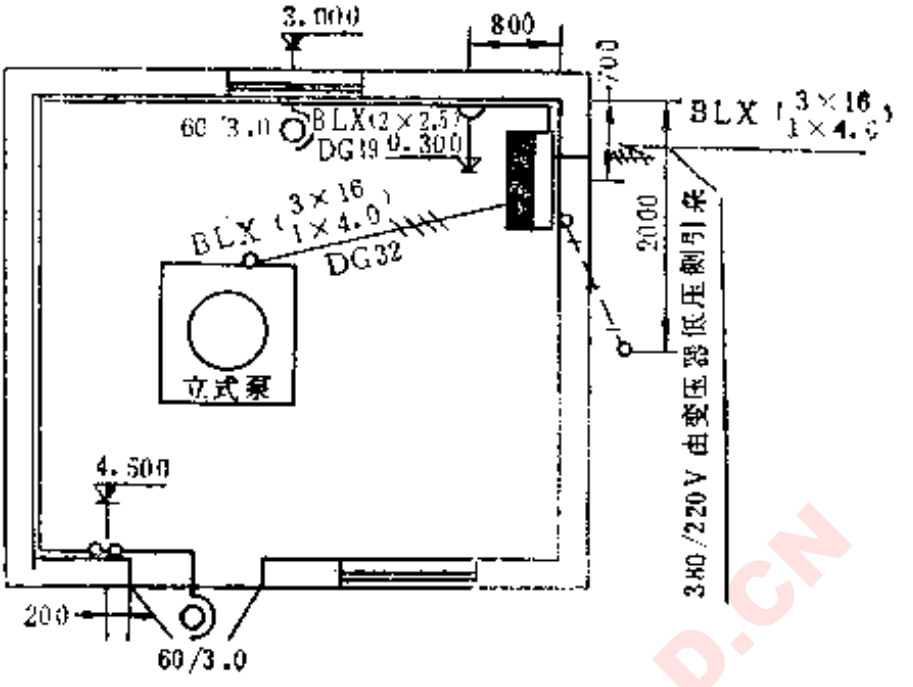


图1-20　动力平面图

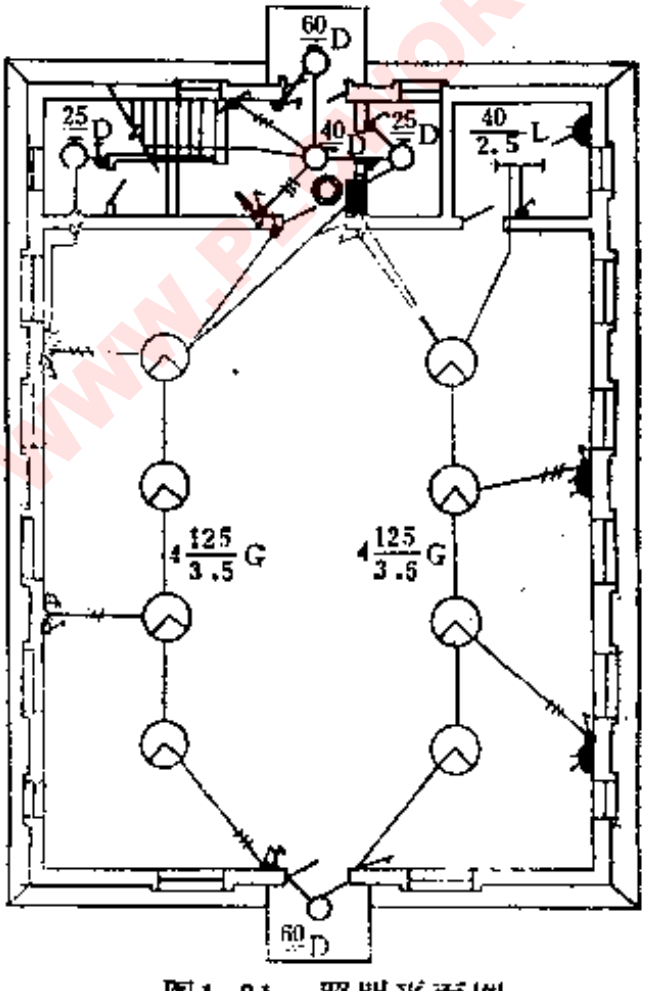


图1-21　照明平面图

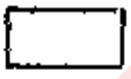
WWW.PDFWORLD.CN

四、电力及照明布置图图形符号及文字符号

（一）图形符号

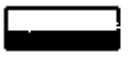
图形符号见表1-7。

表1-7　常用电力及照明布置图形符号

序号	图形符号	名称及图形符号说明
1	V/V (1)　V/V (2)	变电所(示出改变电压)、配电所(不示出V/V) （1）规划的 （2）运行的
2		变压器（双绕组变压器）
3		屏、台、箱、柜一般符号
4		信号板、信号箱（屏）
5		照明配电箱（屏）
6		事故照明配电箱（屏）
7		多种电源配电箱（屏）

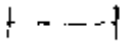
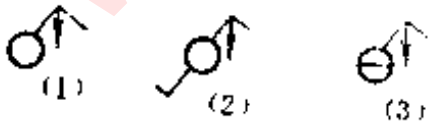
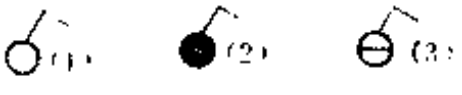
WWW.PLCWORLD.CN

（续）

序号	图形符号	名称及图形符号说明
8		交流配电盘（屏）
9		走线架、电缆走道
10		动力或动力-照明配电箱（屏）
11		灯具的一般符号或信号灯
12		深照型灯
13		带磨砂玻璃罩的万能型灯
14	(1) (2)	（1）花灯 （2）防水防尘灯
15	(1) (2)	（1）配照型工厂灯 （2）安全型灯
16		隔爆灯

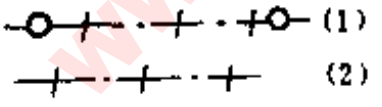
WWW.PLCWORLD.CN

（续）

序号	图形符号	名称及图形符号说明
17		壁灯
18		局部照明灯
19		弯灯
20		荧光灯
21		单相插座 （1）普通型（2）密闭型 （3）防爆型
22		三相插座（带接地插孔） （1）普通型（2）密闭型 （3）防爆型
23		拉线开关 （1）普通型（2）单极双控 （3）瓷质防水
24		吊式风扇
25		单极开关 （1）明装（2）暗装 （3）保护或密闭

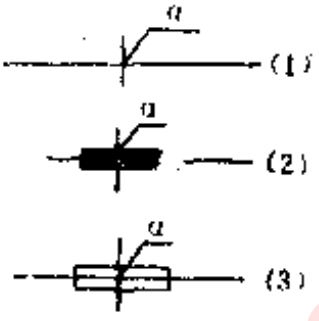
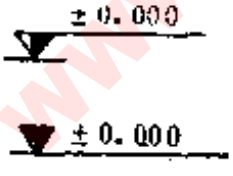
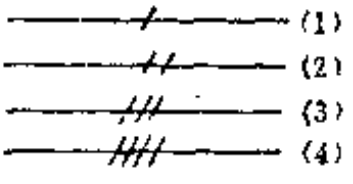
WWW.PLCWORLD.CN

（续）

序号	图形符号	名称及图形符号说明
26		蜂鸣器
27		电铃、报警器
28		电话机
29		控制及信号线路（电力及照明用）
30		滑触线
31		50 V 及其以下电力及照明线路
32		接地装置 （1）有接地极（2）无接地极
33		事故照明线
34		配线 （1）导线向上，导线向下 （2）导线由上引来，导线由下引来 （3）导线向上和向下 （4）导线由上引下，导线由下引上

WWW.PLCWORLD.CN

（续）

序号	图形符号	名称及图形符号说明
35		电缆终端头
36		接地
37		（1）无保护电力电缆与其他设施交叉点，a—交叉点编号 （2）电缆穿钢管保护 （3）电缆穿（非金属）保护管
38		安装或敷设标高 （1）用于室内平面、剖面图上，m （2）用于总平面图上的室外地坪，m
39		导线根数 （1）单根 （2）2根 （3）3根 （4）4根

WWW.PLCWORLD.CN

（二）常用电力及照明配电线路图的标注

标注的简字及符号见表1-8。

表1-8　电力及照明配电常用简字及符号

文字符号		名称及文字符号说明
相序	L1 L2 L3	1相、2相、3相交流系统电源名称与标记
	N	中性线
	U V W	1相、2相、3相交流系统设备接线端子的名称与标记
照明灯具安装方式	X	线吊式
	L	链吊式
	G	管吊式
	B	壁装式
	D	吸顶式
线路敷设方式	M	明配
	A	暗配
	S	钢索敷设
	CP	瓷瓶、瓷珠敷设
	CJ	瓷夹、瓷卡敷设
	QD	卡钉（扎头）敷设
	VJ	塑料线夹配线
	G	穿焊接钢管敷设
	DG	穿电线管敷设
	VG	穿硬塑料管敷设
	RVG	软塑料管配线

WWW.PLCWORLD.CN

（续）

文字符号		名称及文字符号说明
线路敷设部位	L	沿梁
	Z	沿柱
	J	沿屋架
	Q	沿墙
	DA	在地板下或地面下暗配
	PA	在天棚或屋面内暗配
电力设备标注方式及说明	$\frac{a}{b}$	电力设备 a—设备编号，b—额定容量
	$a/b-c$	变压器，a——一次电压，b—二次电压 c—设备容量（kVA）
	$a\frac{b}{c}$或$a-b-c$ $a\frac{b-c}{d(e\times f)-g}$	电力或照明配电设备，a—设备编号 b—型号，c—设备容量（kVA） d—导线型号，e—导线根数，f—导线截面mm²，g—导线敷设方式
	$a\frac{b}{c/I}$ 或$a-b-c/I$	开关箱及熔断器 a—设备编号，I—整定电流（A） b—型号，c—额定电流（A）
	$a-b\frac{c\times d\times l}{e}f$ 吸顶式$a-b\frac{c\times d\times l}{-}$	照明灯具 a—灯数，b—型号，c—每盏灯的灯泡数或灯管数，d—灯泡容量(W)，l—光源种类，e—安装高度（m），f—安装方式
	（1）$\frac{a-b/c-I}{n[d(e\times f)gh]}$ （2）$d(e\times f)gh$	（1）配电干线；（2）配电支线。a—干线编号，b—总容量（kW），c—计算电流，d—导线型号，e—导线根数，f—截面，g—管径，h—敷设方法，I—干线熔丝电流，n—并列根数

WWW.PLCWORLD.CN

五、识图方法

（一）识图要求

1. 要熟记会用电气图形符号

图形符号和文字符号很多，如何才能熟记会用？可从个人专业出发熟读背画各专业共用的和本专业专用的图形符号，然后逐步扩大，以掌握更多的符号，能识更多的电气图。符号掌握得越多，记得越牢，读图就越方便，越省时间。

2. 掌握各类电气图的绘制特点

各类电气图都有各自的绘制方法和绘制特点，掌握了这些特点，并利用它就能提高识图效率。特别是由于电气图不像机械图、建筑图那样直观、形象和比较集中，因此识图时应将各种有关的图联系起来，对照阅读。如通过系统图、电路图找联系，通过接线图、位置图找位置，交错阅读，即可收到事半功倍之效。

3. 把电气图与土建图、管路图等对应起来识图

电气施工往往与主体工程（土建工程）及其他工程、工艺管道、蒸汽管道、给排水管道、采暖通风管道、通信线路、机械设备等项安装工程配合进行。例如，电气设备的布置与土建平面布置及立面布置有关，线路走向与建筑结构的梁、柱、门窗、楼板的位置及走向有关，还与管道的规格、用途及走向有关．安装方法与墙体结构和楼板材料有关，特别有一些暗敷线路、电气设备基础及各种电气预埋件，更与土建工程密切相关。所以阅读某些电气图时，还要与有关的土建图、管路图等对应起来识图。

4. 了解涉及电气图的有关标准和规程

识图的主要目的是用来指导施工、安装、运行、维修和管理。而有些技术要求不可能在图面上反映出来，也不可能

一一标注清楚，因为这些技术要求在有关的国家标准和技术规程、技术规范中已作了明确的规定。因而在读电气图时，还必须了解这些有关标准、规程、规范，这样才算真正识图。

（二）识图步骤

1．详看图样说明

拿到图样后，首先要仔细阅读图样说明，如图样目录、技术说明、元件明细表、施工说明书等，这样有助于从整体上理解图样的概况和所要表述的重点。

2．看系统图和框图

由于系统图和框图只是概略表示系统或分系统的基本组成、相互关系及其主要特征，因此紧接着就要详细看电路图，才能搞清楚它们的工作原理。系统图和框图多用单线图，只有某些380/220V低压配电系统图才部分地采用多线图表示。

3．阅读电路图是识图的重点和难点

电路图是电气图的核心，它详细表示了电路、设备或成套装置的基本组成部分和联接关系。是最难读的电气图样。

看电路图时，首先要分清主电路和辅助电路、交流回路和直流回路，其次按照先看主电路再看辅助电路的顺序进行识图。

看主电路时，通常要从下往上看，即从用电设备开始，经控制元件，顺次往电源端看；看辅助电路时，则应自上而下、从左向右看，即先看电源，再顺次看各条回路，分析各条回路元件的工作情况及其对主电路的控制关系。

通过看主电路，要搞清电气负载是怎样获取电能的，电源线都经过哪些元件到达到负载和为什么要通过这些元件。通过看辅助电路，则应搞清辅助电路的回路构成、各元件之间的相互联系和控制关系及其动作情况等。同时还要了解辅

WWW.LGWORLD.CN

助电路和主电路之间的相互关系，进而搞清整个电路的工作原理和来龙去脉。

4．电路图与接线图对照看

接线图与电路图互相对照识图，可以帮助搞清楚接线图。看接线图时，要根据端子标志、回路标号，从电源端顺次查下去，搞清线路走向和电路的联接方法，搞清每个回路是怎样通过各个元件构成闭合回路的。

配电盘内外线路相互联接必须通过接线端子板。一般来说，配电盘内有几号线，端子板上就有几号线的接点，外部电路的几号线只要在端子板的同号接点接出即可。因此，看接线图时，要想把配电盘（屏）内外的线路走向搞清楚，就必须注意搞清端子板的接线情况。

§1-4 照明线路安装

一、照明线路的配线

工厂车间的照明线路，应根据生产车间的工艺操作条件、周围环境和经济技术的合理性，确定适应环境、比较经济、安装维修比较方便的配线方式。

正常的工作照明可以和车间的其他电力负载共用变压器供电，但是，最好不要与冲击性电力负载共用变压器，以免影响照明的效果。生产厂房的正常照明线路要与电力线路分开，照明供电干线要装设带保护的总开关，并根据节电要求，照明线路和动力线路分线装设电度表，以便加强经济核算，节约能源。

下面分别介绍几种常用配线方式的施工方法。

（一）明配线路

1．线槽配线

过去曾使用过槽板配线，多用于办公室、生活室等干燥的房屋内。绝缘导线敷设在槽板的线槽内，上部用盖板将导线盖住。常用的槽板有两种，一种是木槽板，另一种是塑料槽板。由于塑料槽板壁薄且细长，容易变形，而木槽板则耗用大量木材，因此这种配线方式已被淘汰。目前，已由槽板配线演化为线槽配线。线槽比槽板体积大，可以容纳较多的绝缘导线。线槽有金属线槽与塑料线槽两种，可以固定在建筑物的表面，也可以用吊挂金具将线槽吊挂。这种配线方式结构简单、组合方便，可以随生产工艺条件、设备位置的变化而改变路径，因此，在各种开发区的标准厂房内使用较多。

2．塑料护套线配线

塑料护套线是一种具有塑料防护层的多芯绝缘导线，有防化学腐蚀和防潮的优点。利用铝皮卡子（俗称钢精轧头）或塑料卡作为导线的支持固定件，可以直接将导线敷设在预制楼板、砖墙及其他建筑物的表面。

将塑料护套线的固定支持件固定在墙上或建筑物表面，可使用粘接法和钉入法等方式。在混凝土结构、砖墙尚未喷浆刷白时，用专门的粘接剂将铝皮卡子或塑料卡固定在建筑物表面，然后再敷设导线，称之粘接法塑料护套线布线，如图1-22所示。粘接剂配方见表1-9。过去曾用过一种环氧树脂石棉粉粘接剂，其中含有能致癌的石棉粉，现在已停止使用这种配方。

粘接铝皮卡子或塑料卡座以前，先用钢丝刷将建筑物表面刷干净，再用湿布擦干净。将粘接面处理干净后，再将粘接剂涂在固定卡子下面，涂抹应均匀，切勿涂抹太厚。粘接时，用手按压，使粘接面接触良好。粘接后1～2天，粘接剂充分硬化，再敷设护套线。

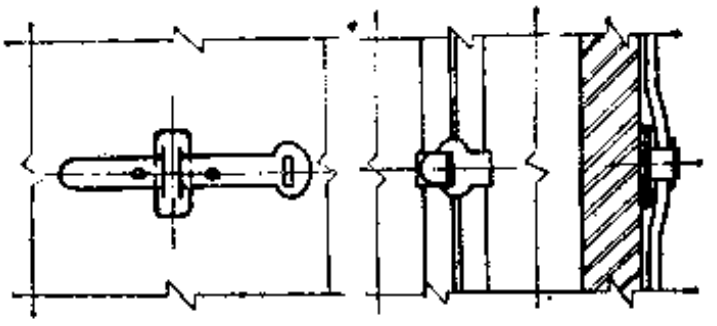


图1-22　粘接法施工时铝皮卡子安装图

表1-9　粘接剂配比（重量比）

505熊猫牌树脂胶	1号胶（黄色）	2号胶（黑色）	水泥
	1.0C	50	200～400

环氧树脂水泥粘剂	6101*环氧树脂	苯二甲酸二丁酯	二乙烯三胺	水泥
	100	30	13～15	200
	100	40	13～15	300
	100	50	13～15	400

注：1.1:2配方环氧水泥适用于冬天施工。

2.1:4配方环氧水泥适用于夏天施工。

粘接法固定塑料护套线工序较多，费工费时，近几年，开始推广使用水泥钢钉护套线夹，它使线夹在建筑物表面上的固定大为简化。只需使用水泥钢钉将护套线夹、钉牢在建筑物表面即可，这种方法可以大大提高工效。水泥钢钉塑料线夹见图1-23。

塑料护套线布线时，要注意导线转弯处弯曲半径和固定点的间距，见图1-24。

塑料护套线的接头应放在开关、灯头和插座处。如果不能放在这些部位，则需加设接线盒，把接头放在接线盒内。

WWW.ELCWORLD.CN

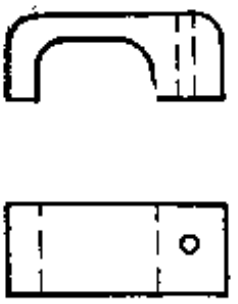


图1-23　水泥钢钉线夹

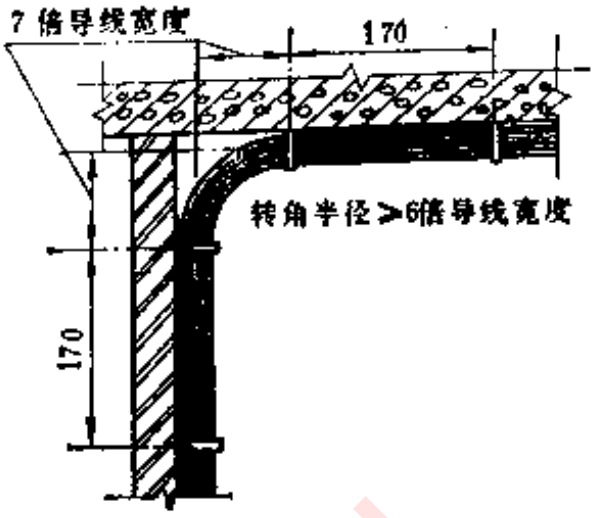


图1-24　塑料护套线敷设的转角间距

塑料护套线敷设后，要认真检查是否横平竖直，对不整齐处要予以整理，务必做到线路整齐美观。

对于预制结构的建筑物，不少施工人员将塑料护套线穿入预制空心楼板内暗敷，其优点是表面看不到导线，比较美观。这样做时要注意以下几点：

穿入导线前，应将楼板空心孔内的积水、杂物清除干净；

穿入护套线时，不得损伤导线的护套层，并保证便于更换导线，在导线进入楼板处应有软塑料保护管；

导线在板孔内不得有接头，分支接头应放在接线盒内联接。

3．绝缘子配线

绝缘子(瓷柱及瓷瓶)配线适用于室内、外配线。瓷柱配线用于用电量较小，跨距较小的场合；瓷瓶配线则适用于用电量较大，跨距大的车间内，即使在潮湿的场所也可应用。

瓷瓶可以直接固定在建筑物表面，也可固定在支架上。钢

铁支架多数固定在墙上、柱上以及房架上，如图1-25所示。

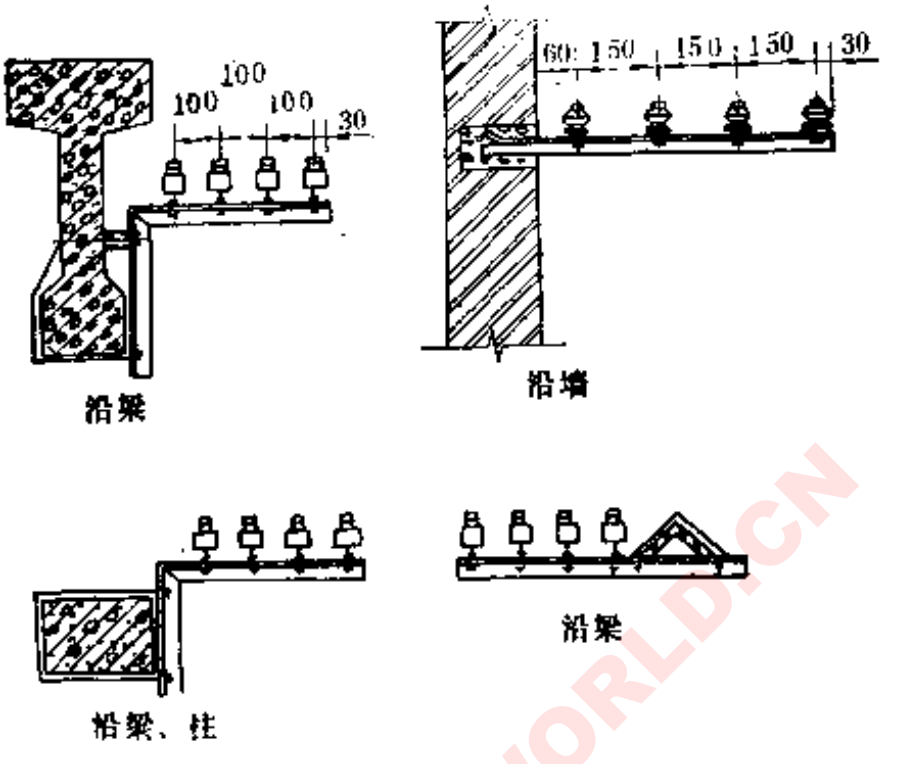


图1-25　瓷瓶配线的几种支架固定方式

瓷瓶配线要力求整齐、美观，尽可能沿房屋边线及墙角敷设，要平行或垂直于房架、梁、柱。相邻固定点的间距不要太大，应符合安装规范要求，且排列要均匀。导线穿墙和楼板时，要设置保护套，以保护导线。

近年来，在安装工程中推广应用冲击电钻（电锤）和膨胀螺栓的施工方法，根据膨胀螺栓或塑料膨胀套管的直径选择冲击电钻的钻头，直接在混凝土结构和砖墙上钻孔，然后埋入膨胀螺栓以固定瓷瓶或支架。这种方法大大减少了建筑安装工程中配合的工作量，提高了工效。

4．明管配线

把绝缘导线穿在金属或塑料导管内，而将穿线导管整齐地敷设在墙(柱)上、混凝土楼板下，这种配线方式称为明管配线。此种配线方式可防止外部机械损伤并避免腐蚀性气体

的侵蚀。采取适当措施后，也能用于有爆炸性和火灾危险的场所。

通常使用的穿线导管有水煤气钢管，电线管和硬聚氯乙烯管(塑料管)。硬质塑料管防腐蚀性能好，可适用于腐蚀性较大及潮湿的场所。电线管管壁较薄，多用于干燥场所。钢管管壁较厚，可用于潮湿场所。为延长钢管使用寿命，还应经常作防腐处理。当条件许可时，应尽可能采用镀锌钢管。

明配管线应力求整齐美观，通常将管线沿建筑物水平或垂直敷设。每隔一定距离用管卡固定。施工方法可参考动力线路敷设。

车间内的明配线路还有沿钢索配线。在实际选用时，要根据车间用电设备的位置、要求以及周围环境，确定一种适宜的配线方式。

（二）暗配线路

车间内的暗配线路是预先将穿线导管敷设在地坪、墙壁、楼板或顶棚内，然后将导线穿入管内，并完成接头、联接等工作。使用的穿线导管有水、煤气钢管、硬质塑料管、半硬塑料管及波纹塑料管等。为了节省工程投资，减少金属消耗量，在一般民用建筑中，近来较多地使用半硬塑料管配合预制空心楼板的孔眼暗配线。

暗配线路敷设后，在建筑物表面看不到配电线路，又不损坏建筑物。暗配线路的特点是美观、能防水防潮、导线不受有害气体的侵蚀和外部机械性损伤、使用年限长及容易更换导线。对于一些要求较高的建筑物，为了美观和安全，经常选用暗设开关、暗配钢管线路以及铜芯绝缘导线，在各种接线盒、插座盒、开关盒内有接线用的接线端子，电源控制开关多为有漏电保护的低压断路器。

暗配线路的缺点是造价高、金属消耗量大，在施工过程中与土建工程的配合工作量大。暗设管线的施工方法也可参考动力线路的施工方法。

二、电气照明设计知识

电气照明设计的基本任务，是根据生产和生活的实际需要和国家照明标准规定，为达到工作和生活场所的照度要求以及经济技术的合理性，以良好的照明条件，保证有效的工作环境和舒适的生活环境。

对照明设计的主要要求是：①照明质量要满足要求；②投资省，电能消耗少；③容易维护和管理；④使用安全可靠。

根据照明方式分，有一般照明、局部照明和两者共同组成的混合照明。一般照明是供整个场所或场所的一部分的照明，在这个范围内，照度基本上是均匀的。局部照明是仅供某个工作部位的照明，如机床照明、锅炉及容器液位计照明、设备窥视孔照明等。人们常用的工作台灯即为局部照明的一个例子。

按照明种类可分为正常照明和事故照明。正常照明是在正常工作时使用的室内、室外照明；事故照明，则是在正常照明因故障而熄灭时，供给不能间断生产的工作场地或紧急疏散人员时的照明。一般在有爆炸、火灾危险的生产车间、工作中断将造成严重经济损失的场所和人员密集的公共场所，均要设置事故照明。

（一）关于照明的几个术语

（1）光通量：光源在单位时间内，向周围空间辐射出的、使人眼产生光感觉的能量，用 F 表示，单位是流明(lm)。

（2）照度：单位面积上接收到的光通量称为照度，用 E 表示，单位是勒克司(lx)。

被光均匀照明的平面，其照度计算公式为

$$E = \frac{F}{r^2} \cdot \cos\alpha \qquad (1\text{-}1)$$

式中 F——被照面积上接收到的光通量(lm)；

r——距离(cm)；

α——入射角。

例如，晴天中午，太阳光直射时的照度为20000～100000lx；晴朗的满月夜晚，地面照度为0.2lx。

（3）发光效率：电光源每消耗1W电功率所发出的光通量，单位为lm/W。它通常作为评价光源的主要功能指标之一。

例如，白炽灯的发光效率10～15lm/W，荧光灯的光效25～67lm/W，而高压钠灯的光效可达90～120lm/W。由此看出，高压钠灯的光效是白炽灯的8～10倍，为达到同样的照明效果，使用高压钠灯就比使用白炽灯节能。

（二）照明设计的步骤和方法

照明设计的一般步骤如下。

（1）根据生产工艺条件和周围环境确定照明方式，并选择照度。

表1-10为通用生产车间和工作场所的一般照明的照度参考值。工业企业的照度可参照所列参考值选用。

照明条件的改善对于人们创造舒适的生活条件、提高工作效率、提高产品质量及减少事故有明显作用，但它又受经济条件的限制，因而在不同时期，对于各类场所的照度要求是不同的。随着我国综合国力的提高，可以预见，各类场所的照度参考值将会修订，并趋于增加。

（2）确定灯具类型，并按车间结构进行布置。

表1-10　通用生产车间一般照度参考值

序号	建筑物名称	最低照度（lx）	
		混合照明中的一般照明	单独使用的一般照明
1	机械加工车间：加工区	30	—
	装配区	50	—
2	锻工车间	—	30
3	焊接车间	—	50
4	热处理车间	—	30
5	电镀车间：镀槽区	—	50
	酸洗区	—	30
	抛光区	30	—
6	电修车间：一般	30	—
	精密装配	50	—
7	变配电所：配电室	—	30
	控制室	—	75
8	热工仪表控制室	—	100

灯具类型的选择与使用环境和灯具的特性有关。在一般的工业厂房中多采用开启型灯具。在光源的选择上，无论家庭还是工厂都应尽可能选择高光效的电光源。

灯具的悬挂高度可按下述原则选择：

1）配照型灯具一般为4～6 m。

2）配照型壁灯一般为3～5 m。

3）搪瓷深照型灯具为 6 ～20 m；若采用高压汞灯时，悬挂高度可以适当提高。

4）沿操作平台布置的灯具，悬挂高度为2～3 m。

为获得车间内的均匀照度，可将灯具均匀布置。在要求较高照度的场所，可以适当加密灯具，也可加大光源的功率或选择高亮度光源。

WWW.PLCWORLD.CN

在布置灯具时，应注意建筑物的结构形式，还要考虑到工艺设备、动力管道布置状况以及安全维修等要求。一般照明的灯具应尽量考虑安装在屋架上。在高大的厂房内，为了提高照度，采用灯具立体配置，高位灯用较大容量的高压汞灯、高压钠灯或碘钨灯，低位灯用较小容量的白炽灯。在石油化工厂的塔类容器、管廊内，则大量选用荧光灯。

（3）进行照度计算，并确定灯具的安装功率。

（4）确定照明配电系统，计算线路的参数，确定导线型号，选择控制设备。

（三）电气照明的简单设计方法

正规的电气照明的设计计算方法很复杂，为使具有中等技术水平的人员便于掌握，本节介绍两种简便的设计图表，通过查表与简单的计算，就可完成照明设计，也可对别人的设计工作进行粗略的核算。

1．灯具选择

表1-11列出不同类型灯具的单位面积安装功率(W/m²)。已知灯具类型、悬挂高度、房间面积以及要求的照度，即可求出单位面积安装功率。用房间面积乘以单位面积安装功率得到房间的总安装功率。确定一个适当的灯具数，总安装功率除以灯具数就得到每个灯具的功率数。

例1-1 某车间热工仪表控制室，面积22m²，要求照度100lx，需安装几套带反射罩的荧光灯？

解：（1）灯具安装高度2～3m，查表1-11得：单位面积安装功率为8.9W/m²。该控制室的总安装功率为 $22\times8.9=195.8$W，若安装220V 40W日光灯，需$195.8\div4\approx5$套。

（2）灯具安装高度3～4m。

查表得：单位面积安装功率为10.6W/m²。该控制室

表1-11　各种灯型单位面积安装功率　　(W/m²)

灯型	计算高度 (m)	房间面积 (m²)	照度 (lx) 5	10	15	20	30	40	50	75	100	150
配照型工厂灯	3～4	20～30	3.1	5.5	7.2	8.9	12.4	15.2				
		30～50	2.5	4.5	6.0	7.3	10.0	12.4				
		50～120	2.1	3.8	5.1	6.3	8.3	10.3				
		120～300	1.8	3.3	4.4	5.5	7.3	9.3				
		300以上	1.7	2.9	4.0	5.0	6.8	8.6				
	4～6	25～35	3.4	5.8	7.7	9.5	13.3	17.4				
		35～50	3.0	5.0	6.8	8.3	11.4	14.7				
		50～80	2.4	4.1	5.6	6.8	9.5	11.9				
		80～150	2.0	3.3	4.6	5.8	8.3	10.0				
		150～400	1.7	2.8	3.9	5.0	6.8	8.6				
		400以上	1.5	2.5	3.5	4.5	6.3	8.0				
	6～8	65～90	2.5	4.3	6.2	7.8	10.9	13.8				
		90～135	2.2	3.7	5.1	6.5	8.6	11.2				
		135～250	1.8	3.0	4.2	5.4	7.3	9.3				
		250～500	1.5	2.6	3.6	4.6	6.5	8.3				
		500以上	1.4	2.4	3.2	4.0	5.5	7.3				
带反射罩荧光灯（铁皮罩）	2～3	10～15					3.2		5.2	7.8	10.4	15.6
		15～25					2.7		4.5	6.7	8.9	13.4
		25～50					2.4		3.9	5.8	7.7	11.6
		50～150					2.1		3.4	5.1	6.8	10.2
		150～300					1.9		3.2	4.7	6.3	9.4
		300以上					1.8		3.0	4.5	5.9	8.9
	3～4	10～15					4.5		7.5	11.3	15	23
		15～20					3.8		6.2	9.3	12.4	19
		20～30					3.2		5.9	8.0	10.6	15.9
		30～50					2.7		4.5	6.8	9	13.6
		50～120					2.4		3.9	5.8	7.7	11.6
		120～300					2.1		3.4	5.1	6.8	10.2
		300以上					1.9		3.2	4.8	6.3	9.5

WWW.ECWORLD.CN

的总安装功率为22×10.6＝233.2W，若安装220 V 40W日光灯，需233.2＋40≈6套。

2. 照明线路的计算

设计照明线路一般采用需要系数法计算，先求出该线路的计算功率，查表得计算电流及熔断器的熔片电流。

照明线路的导线截面应满足机械强度、载流量及电压损失的要求。

照明支线计算功率：$P_C = P_D(kW)$

式中 P_D——支线装灯功率。

照明干线计算功率：$P_C = K_D P_D(kW)$

式中 K_D——需要系数，见表1-12。

表1-12 照明需要系数K_D值

类 别	K_D
小型生产建筑物	1.0
大跨间生产厂房	0.95
办公楼	0.90
变、配电所	0.6

当采用荧光灯照明时，由于镇流器的功率损耗，计算功率应增加20%。各种照明线路的功率、电流及熔丝额定电流之间的关系如表1-13所示。

（四）电气照明基本线路

电气照明线路通常由电源、联接线路、控制开关和照明灯具构成。无论灯具如何复杂，从控制形式来看都是比较简单的。本节介绍工厂经常采用的基本照明线路。

（1）单联开关控制：用一个单联开关控制一盏灯或多

WWW.PLCWORLD.CN

表1-13　照明线路各参数之间关系表

照明线路形式	功率因数	计算电流	熔片电流
220V二线白炽灯线路	1.0	$I_C=4.55P_C$	$I_{FU}\geqslant I_C$
380V四线白炽灯线路	1.0	$I_C=1.52P_C$	$I_{FU}\geqslant I_C$
220V二线荧光灯线路	0.6	$I_C=7.6P_C$	$I_{FU}\geqslant I_C$
380V四线白炽灯、高压汞灯混合照明		$I_C\approx 2P_C$	$I_{FU}\geqslant I_C$

注：混合照明线路按白炽灯与高压汞灯容量比1:1计算。

盏灯，如图1-26所示。一定要将开关接在相线上，当开关断开后，灯头上不带电，从而保证人身安全。

（2）两只双联开关在两个地方控制一盏灯：如图1-27

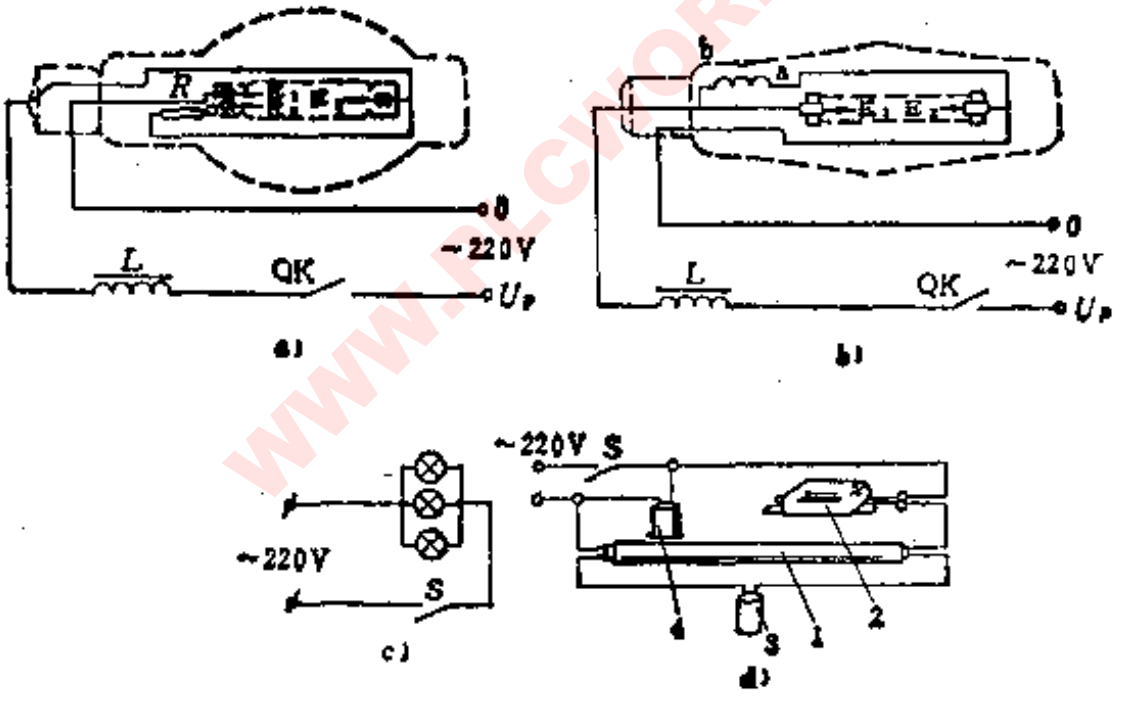


图1-26　单联开关控制线路图

a）高压汞灯　E_1、E_2—主电极　E_3—辅助电极（起动电极）

b）高压钠灯　E_1、E_2—电极　a、b—芯柱线

c）控制多盏灯

d）控制日光灯　1—荧光灯管　2—镇流器　3—起辉器　4—电容器

WWW.PLCWORLD.CN

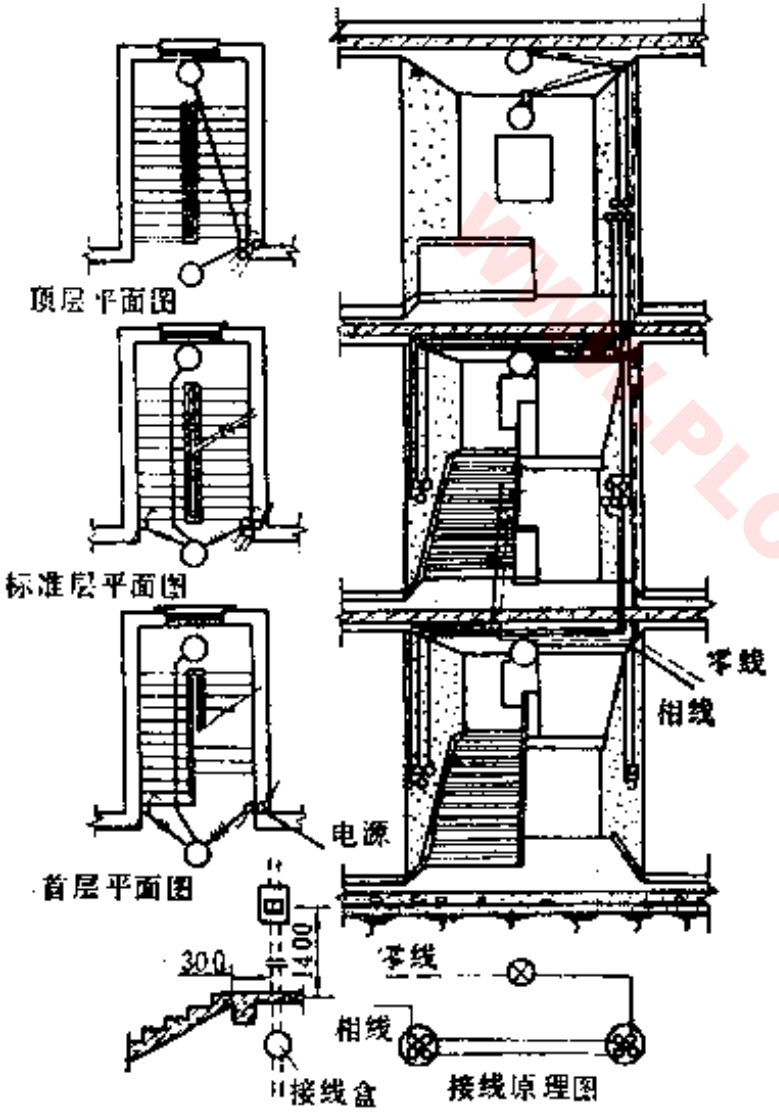


图1-27　预制楼板明敷楼梯灯线路图

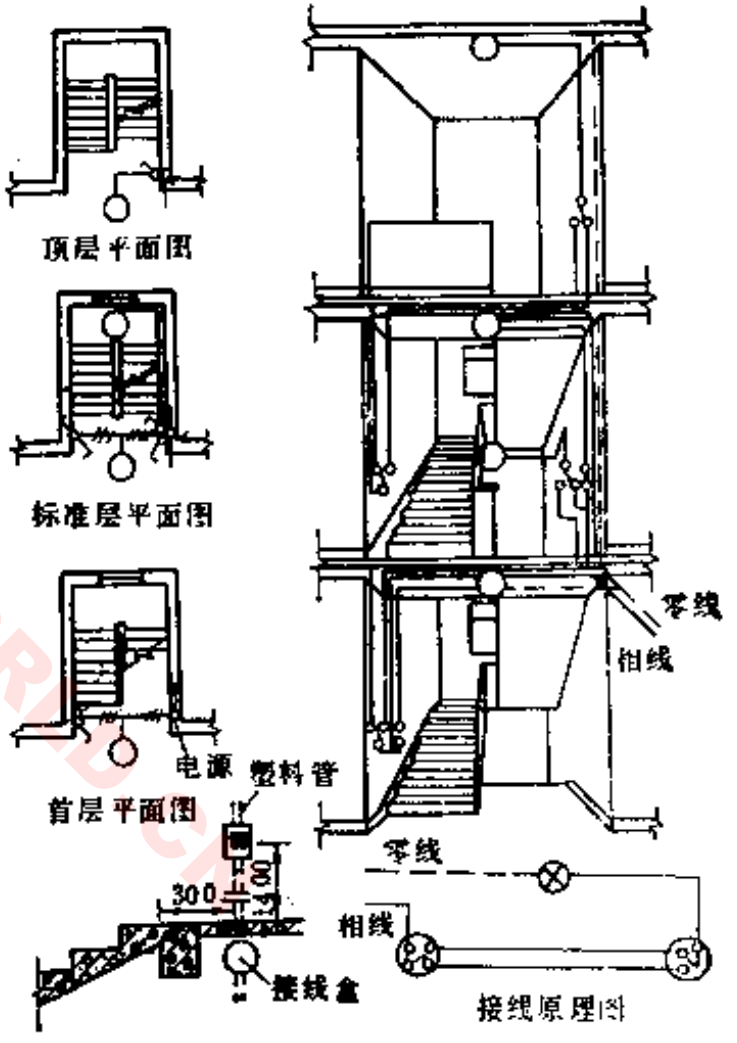


图1-28　现浇楼板暗设楼梯灯线路

WWW.PLCWORLD.CN

所示，这种控制方式可用于楼梯口的电灯，楼上楼下均可控制。也可用于走廊上的电灯，以便在走廊两端控制电灯。图1-27和图1-28分别为预制楼板明敷楼梯灯线路和现浇楼板暗设楼梯灯线路。

三、特殊照明线路的布线与安装

特殊照明线路指的是有爆炸危险、有火灾危险、潮湿以及有腐蚀性气体环境和某些局部照明的线路。特定的生产条件和环境，对照明线路的布线与安装提出了特殊的要求。

（一）有爆炸、火灾危险场所的照明线路

在工厂的某些车间和仓库内，正常情况或在不正常工作情况下（如事故、泄漏等），散发出蒸汽及各种气体（如氢、氨、甲烷、汽油）、粉尘、纤维……。当它们与空气混合并达到一定浓度时，就形成了爆炸性的混合物。若此时电气设备因操作和事故出现电火花，就有可能发生爆炸和引起火灾。因而对这类环境下的电气设备（包括照明线路）就要切实按有关设计规范的规定进行选择。

有火灾危险的环境，可采用钢管暗敷设穿铝线；而有爆炸危险的环境，一定要选用钢管明设或电缆明设，一般要使用不小于2.5mm²的铜芯导线或电缆。接线盒要选择特殊结构（如隔爆型、增安型等）。

图1-29所示为防爆灯具的安装形式。它主要通过防爆外壳和防火花电路等来达到其防爆性能。

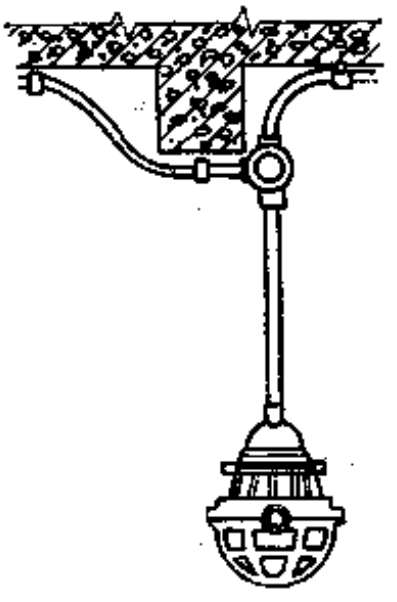


图1-29　防爆灯具的安装图

安装防爆灯具时，钢管与灯具、开关、接线盒等采用螺

纹联接，且螺纹的配合应很严密，以防爆炸性气体侵入。螺纹一般在五扣以上，且螺纹处应涂上不干性防锈油、电力复合脂，不允许在螺纹上缠绕绝缘胶带、麻及涂其他油漆。若是电缆明设，则电缆引入灯具、接线盒、开关处，橡胶密封压垫应紧密。

（二）潮湿和有腐蚀性气体场所的照明

室内相对湿度经常超过80%的场所，如深井泵房、地下室等称为潮湿场所。相对湿度经常超过90%者为特别潮湿场所，如浴室、水力清砂室等。

在潮湿的场所，一般采用密闭型防水防尘灯。布线方式为针式绝缘子布线，钢管明、暗敷设及硬塑料管明设等。

在腐蚀性气体的环境，如电镀车间的酸洗工段、硫酸生产车间、化学品仓库等，要根据生产车间产生的腐蚀性气体性质，选择相应的耐腐蚀材料制成的灯具和附件。

在有腐蚀性气体的场所，最好采用硬塑料管明敷和暗敷，虽然可使用钢管明敷和暗敷，但其耐腐蚀性能不如塑料管。

在潮湿和有腐蚀性气体的场所，灯具、配电箱和金属支架应予以防腐处理，如热镀锌，涂氯磺化聚乙烯漆、环氧树脂漆、酚醛树脂漆，电镀锌镍、喷涂静电环氧粉末等镀层、涂层。配电箱的门、盖上要有密封橡胶条，进出线处要有密封措施，导线的联接应可靠，在联接处要尽量采用自粘性塑料带、橡胶带包扎，并外涂防腐漆密封。

§1-5 电工安全（防护）用具的使用与维护

为防止触电、灼伤和坠落等工伤事故，电工作业时，均应采用适当的安全用具。

电工安全用具包括绝缘安全用具、验电器、登高安全工具、检修工作中的接地线、遮栏和指示牌以及防灼伤的护目镜等。

一、绝缘安全用具的使用

绝缘安全用具，分基本安全用具和辅助安全用具。基本安全用具即带电工作的工具，安全用具的绝缘强度足以承受电气设备的运行电压。

高压绝缘基本安全用具有：高压绝缘棒（令克棒）、绝缘钳及接地用的绝缘棒等。

低压绝缘基本安全用具有：绝缘的长手套及短手套，装有绝缘套的手工具、试电笔等。

高压辅助安全用具有：绝缘长手套及短手套、绝缘靴、绝缘垫及绝缘台等。

绝缘棒又称操作杆，主要用来操作高压跌落熔断器、高压刀开关，安装和拆除临时接地线以及进行其他测量和试验工作。绝缘钳主要用于装设和拆除熔断器等。使用时应按电压等级选择相应的有试验合格标志的绝缘棒和绝缘钳。

操作高、低压开关板或其他带有传动装置的设备时，需要使用能防止接触电压及跨步电压的辅助安全工具绝缘手套和绝缘靴。除上述操作外，任何操作情况下均必须使用基本安全用具，并同时使用一种辅助安全用具。

二、验电器的使用

验电器分高压、低压两类。高压验电器不直接接触导体，操作时由远至近靠近被测导体至发光（发声）为止。低压验电器不得用于500 V以上电压的导体。

使用安全用具前，必须进行外观检查，看其是否符合规程要求，是否适用于拟使用的电压等级。

使用中，室外操作的安全用具应有特殊防护装置；绝缘手套应内衬一副线手套使用；用高压验电器时，应戴绝缘手套并站在绝缘台上。

三、安全用具的维护与试验

安全用具的保养尤为重要，应有专门存放的地方，“对号入座”，要防潮防热；应有专人负责保管并登记造册；要经常检查其是否齐全完好，严禁他用，并定期进行试验。

绝缘棒的试验周期为两年。使用电压在35kV及以下者，试验电压应为线电压的3倍，但不应低于40kV，试验持续时间为5min。

绝缘靴的试验周期为一年。新品加电压20kV，泄漏电流不大于10mA，耐压持续时间为2min；使用中的加电压15kV，泄漏电流不大于7.5mA，加电压持续时间为1min。

绝缘手套每半年检查一次，试验周期是一年。新品加电压12kV，泄漏电流不大于12mA；使用中的加电压8kV，泄漏电流不大于9mA，耐压持续时间1min。

验电器的试验周期是一年。分三部分进行试验，指示器部分的试验电压为20kV；握柄部分的试验电压等均按绝缘标准；清晰发光电压不得高于设备额定电压的25%，耐压持续时间1min。

绝缘垫在运行中应每年试验一次，1kV以上试验电压为15kV。

绝缘钳每年进行一次试验，试验电压应为线电压的3倍。

带绝缘柄的工具（低压），每年试验一次，试验电压为3kV。

绝缘台试验电压为40kV，每年一次。

§1-6 绝缘材料的性能指标

绝缘材料的性能可用绝缘电阻、击穿强度、泄漏电流、介质损耗等指标来衡量。绝缘电阻是最基本的绝缘性能指标，可用兆欧表测定。绝缘材料的绝缘电阻是外加的直流电压与流经绝缘的电流（称泄漏电流）之比。通过它可以判断绝缘的受潮情况。足够的绝缘电阻能把泄漏电流限制在很小的范围内，从而防止造成漏电触电事故或由泄漏电流引起的绝缘材料温度过分升高而导致击穿（即热击穿）。显然，绝缘受潮以后，绝缘电阻会大大降低。

击穿强度（绝缘强度）是电气设备的绝缘能否承受过电压的性能指标。绝缘材料所承受的电压超过某一程度时，就会在某些地方发生放电而遭到破坏，即发生击穿现象。电气设备的绝缘材料应有足够的击穿强度，并可用耐压试验来检验。耐压试验分工频耐压试验和直流耐压试验两种。工频耐压试验应用较多。电力变压器、电动机、高压配电装置等在投入运行前均需作工频耐压试验；电工安全用具应根据规定，定期作工频耐压试验；绝缘油等也应作工频耐压试验。它能有效地发现绝缘的局部缺陷及绝缘的老化。

泄漏电流是电气设备在外加（直流）高电压作用下经绝缘部分泄漏的电流。作泄漏电流试验时，由于外加电压较高，而且电压稳定，所以比较容易发现绝缘硬伤、脆裂等内部缺陷。

介质损耗通常是指绝缘材料介质损耗角的正切值($tg\delta$)。该值能很好地反映绝缘材料的性能。当绝缘老化、轻微受潮或有局部缺陷时，产生介质损耗的电流有所增加，而总电流只增加很少，很难测出；但在这种情况下，介质损耗角 δ 或

其正切值 $tg\delta$ 却显著增加，因此，测量 $tg\delta$ 能很好地检验绝缘的质量。

练 习 题

1-1 怎样计算照度？在垂直离开 100W 白炽灯泡 4 m 的地方（20m²），照度是多少勒克司？

1-2 画出两种双联开关的接线图，并作一比较。

1-3 荧光灯接电容器起什么作用？

1-4 荧光灯管两端不断闪烁，而无法正常发光，是由哪些故障原因引起？怎样排除？

1-5 临时照明装置怎样管理？安装临时线路要注意些什么？

1-6 多股铝绞线用什么方法进行直线联接？如何进行联接？

1-7 恢复导线绝缘层应掌握哪些基本方法？380V 线路导线绝缘层怎样恢复？

1-8 试述塑料护套线照明配线的一般技术要求。

1-9 试画出荧光灯的接线图，并说明它的工作原理。

1-10 220V 照明灯头的离地高度应符合哪些规定？

1-11 单股导线如何联接？垂直导体怎样包扎胶布或塑料带？

WWW.DGWORLD.CN

第二章　工厂供电线路的施工与维修

§2-1　工厂供电系统的接线方式

电能由工厂的变电所分送给各车间或设备的基本方式有树干式、放射式和环式三种。供电系统采用何种方式，主要根据负荷等级对供电可靠性的要求、用电容量的大小、车间所在的位置及建设投资的高低等原则确定。

一、放射式供电系统

每个车间或独立负荷，均由单独的线路供电。这种供电系统操作方便，当某一线路或设备发生故障时，只需要切断这一线路，而不致影响其他线路的正常运行，故供电可靠性高。这种方式适用于大型设备、位置分散的集中负荷。如水泵、压缩机、电炉及变流设备等。

这种供电方案的缺点是有色金属用量大，配电设备数量多，因而增加了一次投资。

对于Ⅰ类负荷可采用双电源或母线分段的放射式供电系统。（见图2-1）

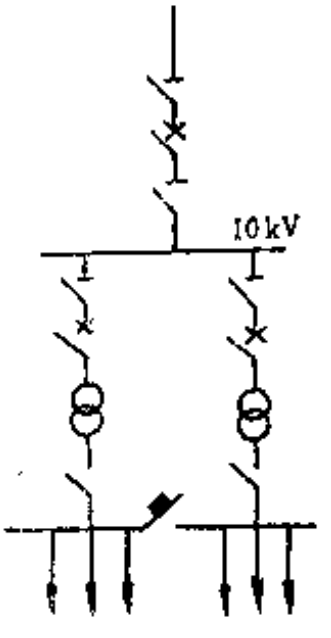


图2-1　放射式供电系统图

二、树干式供电系统

几个相隔不远的独立负荷由一条供电干线供电。这种供电方式可

节省导线，减少配电设备数量，降低一次投资。不过供电可靠性比较差，多用于Ⅲ类负荷。（见图2-2）

三、环式供电系统

环式供电只不过是树干式的另一种形式，它与树干式供电一样，正常时开环运行，环中联接的变压器数目和容量亦与树干式供电系统一样。可以用来供Ⅱ类负荷。（见图2-3）

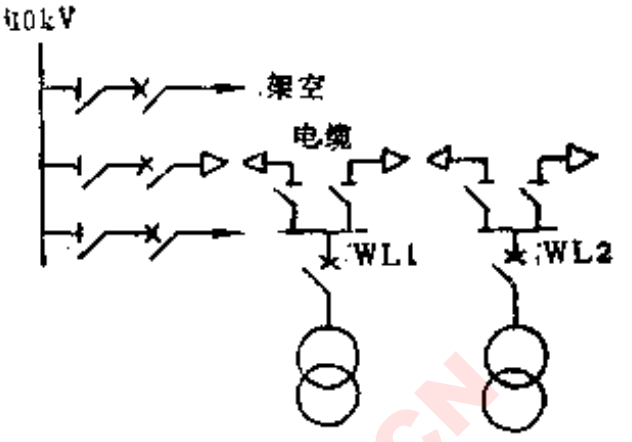


图2-2　树干式供电系统图

WL—线路

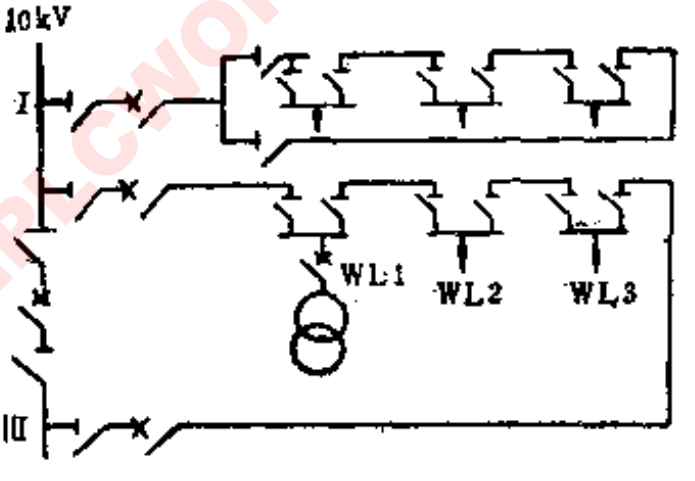


图2-3　环式供电系统图

工厂配电线路是供电系统的组成部分，它的任务是输送与分配电能。配电线路的分类方式：按结构形式分为架空线路和电缆线路；按电压可分为高压和低压线路。

工厂配电线路可采用架空线路和电缆线路。由于电缆本身受到电压等级、敷设环境和投资的限制，因此远距离输送和分配电能，目前采用架空线路较为普遍。但作为工厂电能的输送和分配，若采用电缆线路，厂区没有电杆与架线不仅美观洁净，而且输电运行安全可靠。

输电电压视输电容量和距离远近而定，输电容量愈大、距离愈远，输电电压也就愈高。因为电压升高后，可以减少电力线路上的电压损失和功率损耗。我国现有的交流输电电压有6、10、35、110、220、330、500kV等几个等级。厂区供电电压普遍采用10kV以下，一般大、中型工矿企业应首先考虑使用10kV供电，可使导线截面减少，节省线路投资。其主要输配电方式有：

（1）低压单相二线制：这是电灯用低压配电最普遍的方式。凡是用电量在10kW以下照明用电或10kW以下的单相电动机都可以应用这种方式。

（2）低压三相四线制：这种方式是在Y形接线的中性点（接地）引出一条中性线，三相线间电压为380V，各线和中性线间的电压为220V是我国广泛采用的配电方式。三相线间可接三相负荷，各相线和中性线间可接单相负荷。

（3）高压三相三线制：发电厂、变电所、输电线路和高压配电线路以及高压电动机线路等，采用此方式。

（4）高压两线一地制：在线路的两级变压器之间，只将两相用架空线联通，而第三相分别与接地装置固定联接，两接地装置通过大地联接，作为变压器高压上的第三根导线，如图2-4所示，这仅使用在10kV级电压；低压电力系统则禁止使用。

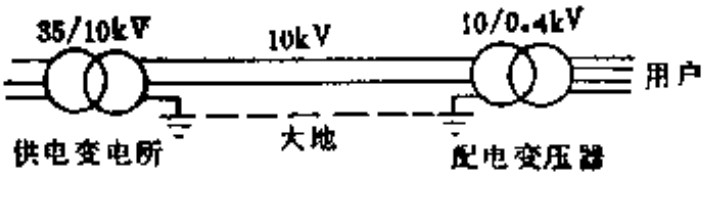


图2-4　两线一地制输电

两线一地制输电的主要特点是：节约投资，但输电容量较小；发生接地故障时跳闸的次数显著增加；对通信线路有严重干扰。目前仅在农村中采用。

我国以及世界各国基本上都采用高压三相三线制和低压三相四线制的输、配电方式。

§2-2 供电线路上的电压损失及功率损失

联接电源和负载的两根导线叫做输电线；电源的一端叫做送电端，负载的一端叫做受电端。当送电端和受电端很近时，输电线很短，因而输电线的电阻很小，可以忽略不计，

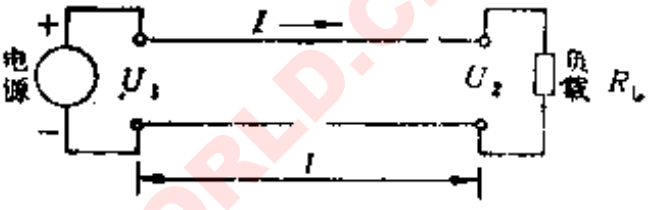


图2-5 发电端和受电端电路

此时送电端与受电端的电压几乎相等。但实际上，送电端与受电端常有相当长的距离，此时因为输电线很长，就必须考虑输电线电阻的电压降，受电端的电压将小于送电端的电压。图2-5绘出了一个远距离输电的电路图，U_1及U_2分别表示送电端及受电端的电压；并且认为送电端的电压U_1恒定不变。l及S分别表示每根输电线的长度及截面积；ρ表示输电线的电阻率（25℃时，铜线的电阻率$\rho=0.0188\ \Omega\cdot mm^2/m$，铝线的电阻率$\rho=0.0312\ \Omega\cdot mm^2/m$）。两根输电线长度相等，电阻相同。用$R_L$表示一根输电线的电阻，当电路电流为$I$安时，则

$$U_1=U_2+2IR_L$$

因此，

$$U_1-U_2=2IR_L \qquad (2\text{-}1)$$

送电端电压U_1与受电端电压U_2的差值叫做输电线的电

压降（电压损失），用 ΔU 表示

$$\Delta U = U_1 - U_2 = 2IR_L$$

代入公式 $R_L = \rho \frac{l}{S}$ 后，得

$$\Delta U = 2I\rho\frac{l}{S} \qquad (2\text{-}2)$$

有时线路上引起的电压损失用电压降 ΔU 的百分数（即相对电压损失）表示

$$V = \frac{\Delta U}{U_N} \times 100\% \qquad (2\text{-}3)$$

式中 U_N——电网的额定电压。

由式（2-2）看出，输电线的电压损失与电路电流成正比，与输电线的截面积成反比。

为了维持负载正常工作，就需要尽可能地维持受电压端的电压 U_2 恒定；特别是对于电灯的负载更是如此。这是因为电压减小时，引起电灯热度的降低以致光线衰减；而电压增大时，引起电灯热度过高而促成其寿命的缩短。但是使 U_2 绝对不变是不可能的，只可以在选择输电线导体的截面时，预先规定 U_2 的降低限度，即输电线的电压损失在某一范围以内。根据国家规定：10kV 以下的电力用户，输电线的相对电压损失为 ±7%；照明用户容许的输电线的相对电压损失为 −10%～5%。

当规定了所容许的最大的输电线电压损失（ΔU）以后，可以根据给出的电路最大电流 I，由式（2-2）求出输电线导线的截面积，即

$$S = \rho \frac{2Il}{\Delta U} \qquad (2\text{-}4)$$

WWW.PLCWORLD.CN

上式为单相系统所用导线的截面。

在实际选用导线时，可采用与式（2-4）算得的截面积相近的标准导线；同时应当注意，导线的额定电流不得小于电路的工作电流。

输电线的电阻在电路内不但引起了电压损失，而且也引起功率损失，$\Delta P = \Delta U\, I = 2I^2 R_L$。

将一定功率（$P = UI\cos\varphi$）的电能从发电厂输送到用户，在输电线路电阻 R_L 上的损耗 ΔP 决定于通过输电线路上的电流 I 的大小，若输电距离 l 和负载的功率因数 $\cos\varphi$ 也一定，则输电线上的功率损耗为

$$\Delta P = I^2 R = \left(\frac{P}{U\cos\varphi}\right)^2 \frac{\rho l}{S} = C_P \frac{1}{U^2 S} \qquad (2\text{-}5)$$

式中 $C_P = \dfrac{P^2 \rho l}{\cos^2\varphi}$ ——一定常数。

上式表明，在远距离送电时，当输送功率一定时，为了减小导线中的电压损失及功率损失，提高输电线路的效率，需要减小输电线上的电流；同时，因为输送功率不变，相应地提高输电电压，功率损失 ΔP 和电压损失的相对值 V 便按电压平方成反比地减小。即由式（2-2）和式（2-3）得

$$V = \rho \frac{2Pl}{SU_N^2} \times 100\% \qquad (2\text{-}6)$$

例如当输电线的电阻不变时，若电压等于 $2U$（增大1倍），电流等于 $I/2$，则每根导线的电压损失的绝对值为 $\Delta U/2$。因相对值为 $\dfrac{\Delta U}{U}$，故

$$V = \frac{1}{4}\ \frac{\Delta U}{U}$$

所以只有原来相对值的1/4了。

在提高电压的同时，由于导线上电流减小，导线的截面也可以减小，可节省导线所用的材料，所以近代输电线都采用高压输电，输送距离愈远和功率愈大时，使用的电压就愈高。

§2-3 工厂供电线路及其选择

供电线路主要包括架空线路和电缆线路。

一、电缆线路

（一）电力电缆的构造

电力电缆按绝缘材料通常可分为油浸纸绝缘铅包（或铝包）电力电缆、橡胶绝缘电力电缆和聚氯乙烯塑料绝缘电力电缆以及纸绝缘充油高压电缆等。前者多用于固定敷设在地下永久性的高压供电干线上，使用电压是35kV及以下。橡皮及塑料绝缘电力电缆通常用于6kV及以下电压，以及需要移动的低压设备上。超过35kV电压的，则需采用纸绝缘充油高压电缆。近几年来，为节约用铜，大量采用铝芯电缆。

电缆一般敷设在地下，为防止机械损伤，多采用钢丝或钢带铠装。

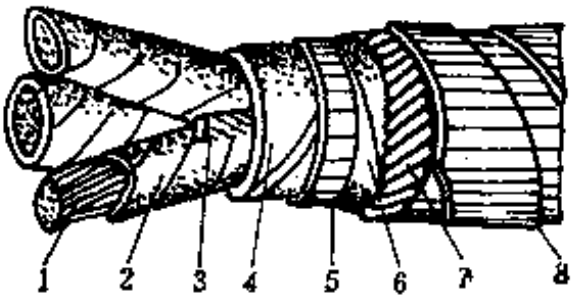


图2-6 铠装电缆构造

1. 油浸纸绝缘电力电缆

构造如图2-6所示。图上1为扇形截面的铜绞线或铝绞线制成的主线芯。2为相间的油浸纸绝缘层，纸带上标以数码1、2、3或用不同颜色以区别不同的相。3为浸渍的麻

绳填料，以保证电缆绞合成缆后能得到圆形的截面。4为统包浸渍纸绝缘层，以增加三相导线对地的绝缘。5是铅包层，防止水汽进入而降低绝缘性能，同时与铠装钢带一起作接地线芯。有一种电缆将相间纸绝缘层和统包纸绝缘层的浸渍剂预先滴干，即成为“干绝缘电缆”；还有一种电缆则采用特殊的浸渍剂，使常温下浸渍剂不会在铝包中流动，即为“不滴油电缆”。这两种电缆适用于高差很大的地方。6为涂沥青的纸防腐带，保护铅包层不受空气和水的腐蚀。7为浸渍的黄麻保护层，其作用是避免铠装和铅包之间互相摩擦而损坏铅包层。8为钢带（或钢丝）的铠装，承受机械压力和抗砸。钢带的铠装不能承受太大的拉力，只能用于水平敷设及轴向拉力不大的场所。钢丝铠装的电缆则适用竖直敷设或需经受拉力的场所。

上述电缆都是带绝缘结构，只能用于10kV及以下的电压。用于20～35kV电压的电缆，应采用分相铅（铝）包结构。

电力电缆的型号表示电缆的结构和电缆的使用场所以及某些特性，见表2-1。

2. 橡胶绝缘电力电缆

这种电缆的主要特点在于柔软。有铅套、橡套和塑料护层以及钢带、钢丝铠装层等品种。使用电压有0.5kV、1kV、3kV及6kV等。

3. 聚氯乙烯塑料绝缘电力电缆

它的结构与橡胶绝缘电力电缆相似，它是用聚氯乙烯代替橡胶或油浸纸作绝缘，以塑料护套代替铅（铝）包内护层。可敷设于化学腐蚀性较大的地方。由于聚氯乙烯塑料属于固体绝缘，故也适用于高差较大的场所。

表2-1　电缆型号字母及数字的意义

字母或数字	代表意义	字母或数字	代表意义
Z	纸绝缘或中型	Y	移动式
X	橡胶绝缘	H	橡套
V	塑料绝缘及护套	1	麻被护套
L	铝包或铝芯	2	钢带铠装护套
T	铜芯（略）	20	裸钢带、铠装层
Q	铅包或轻型	3	细钢丝铠装护层
D	不滴油	30	裸细钢丝铠装护层
P	干绝缘，贫油式	5	粗钢丝铠装护层
F	分相铅色	11	防腐护层
C	船用或重型	12	钢丝铠装有防腐层
HF	非燃性橡套	120	裸钢带铠装有隔离层

4．交联聚乙烯绝缘聚氯乙烯护套电力电缆

它的长期允许工作温度为80℃，绝缘电阻、介质损耗角等电气性能以及力学性能都比油浸纸绝缘电力电缆为好，适宜于高落差和垂直敷设，使用电压在10kV以上，具有广泛的发展前途。

常用电缆的品种及使用场所见表2-2。

（二）通用移动电缆

这种电缆即为橡套电缆。橡套电缆是以硫化橡胶作为绝缘层，以非燃性氯丁橡胶作为护套。橡套起抗砸、抗拉和承受机械应力的作用。线芯采用多股绞线，柔软可弯曲，用作移动设备的拖曳电缆。有的橡套电缆还把橡套分为内护套和外护套，在内、外护套之间夹一层帆布纤维层，甚至用镀锌软钢丝作加强层，这种电缆称为加强型电缆，适用于移动频繁的电气设备上。

橡套电缆的使用电压较低，在1～3kV级。橡套电缆

表2-2　常用电缆的品种及使用场所

型号	电缆结构	芯线截面（mm²）		使用场所
		6kV	10kV	
ZLQ₂（ZQ₂）	铝（铜）芯油浸纸绝缘铅包钢带铠装	10～240	16～240	敷设在土壤中，能承受机械损伤，但不承受拉力
ZLQ₂₀（ZQ₂₀）	铝（铜）芯油浸纸绝缘铅包裸钢带铠装	10～240	16～240	敷设在室内，能承受机械损伤，但不承受拉力
ZLQ₈（ZQ₃）	铝（铜）芯油浸纸绝缘铅包细钢丝铠装	10～240	16～185	敷设在土壤中，能承受机械损伤和相当的拉力
ZLQ₅（ZQ₅）	铝（铜）芯油浸纸绝缘铅包粗钢丝铠装	16～240	16～185	敷设在水中，能承受较大拉力
ZLQP₃₀（ZQP₃₀）	铝（铜）芯干绝缘铅包裸细钢丝铠装	16～240	16～240	敷设在垂直或45°以上的沟道中，垂直高度100m
ZLL₁₂	铝芯纸绝缘铝包钢带铠装一级防腐	10～240	16～240	可以埋地敷设，能承受外力机械作用，但不能受拉力
VLV（VV）	铝（铜）芯聚氯乙烯绝缘及聚氯乙烯护套	10～240		敷设在室内及隧道中，不能承受机械外力作用
XLV	铝芯橡胶绝缘聚氯乙烯护套	10～240		敷设在室内、隧道及管道中，不能承受机械外力作用
XLQ₂	铝芯橡胶绝缘铅包钢带铠装	10～240		敷设在地下，能承受机械外力作用，但不能受拉力
YJLV（YJV）	交联聚乙烯绝缘聚氯乙烯护套电缆	16～500	16～500	敷设在室内、沟道中及管道内，也可埋在土壤中，不能承受机械压力作用，但可经受一定的敷设拉力

WWW.FLCWORLD.CN

的型号及用途见表2-3。

表2-3 橡套电缆的型号和使用场合

型号	名称	截面（mm^2）	使用场合
YQ	轻型橡套电缆	0.3～0.75（二芯、三芯）	交流250V及以下轻型移动电气设备
YQW			同上，具有耐气候和一定的耐油性能（户外型）
YZ	中型橡套电缆	0.75～6（二芯、三芯、四芯）	交流500V及以下各种移动电气设备
YZW			同上，具有耐气候和一定的耐油性能（户外型）
YC	重型橡套电缆	2.5～12.0（单芯～四芯）	交流500V及以下各种移动电气设备能承受较大的机械外力作用
YCW			同上，户外型

二、架空输电线路

35kV及以上的架空线路一般归电业系统管理，工厂所管理的只是10kV及以下的。架空线路是利用绝缘子将导线悬挂在电杆的横担上，其主要组成部分有导线、绝缘子、杆塔和金具。

1. 导线

架空线路的导线要承受很大的机械负荷，经受风、雨、冰、雪等气候条件变化的影响，并且还会受到空气中有害气体的侵蚀与氧化。因此，导线材料除了应有良好的导电率外，还应有一定的机械强度，还要重量轻、耐腐蚀和成本低。常用的材料有铜、铝、铝合金及钢，铜线的电阻率最低，导电性能好，强度也高；但铜是稀有金属，应尽量采用铝线，常用的有铝绞线和钢芯铝绞线。

WWW.PLCWORLD.CN

铝绞线轻而便宜，导电性能也好，但机械强度小，一般用在厂区10kV及以下的电力线路上，用在6～10kV线路上的铝绞线截面不应小于35mm²，档距不应超过100～150m。由于铝合金或钢芯铝线机械强度较高，故可应用于高压电力线路上。铝绞线（LJ型）和钢芯铝绞线（LGJ型）规格见表2-4。

2. 绝缘子

绝缘子又叫瓷瓶，是用来把导线固定在电杆上，并保持架空导线与电杆之间的电气绝缘，同时也承受导线的垂直荷重和水平拉力，因此要求瓷瓶具有足够的绝缘强度和机械强度。架空线路常用的绝缘子有针式、悬式和蝶式。针式绝缘子又分低压和高压的两种。针式绝缘子结构简单，要求杆塔的结构也简单，故在10kV及以下的线路上广泛地采用它。

悬式绝缘子可以根据需要而随意串上几个，就可以提高其耐压水平。每串个数是根据线路额定电压和电杆类型来决定的，一般每个绝缘子额定电压为17～18kV。35kV及以上的高压、超高压输电线路都用它，或用于6～10kV线路的承力杆上。在35kV线路的直线杆上，悬式绝缘子串的个数为3个（铁横担），而耐张杆上的绝缘子串的个数，应比直线杆绝缘子串的个数多一个。

瓷横担绝缘子是一种新品种，它代替绝缘子及横担，绝缘水平较高，节省金属材料，降低线路造价，广泛应用在35kV及以下的电力线路中。

3. 杆塔

电杆或铁塔是用来支持导线的，装上横担及绝缘子，导线就固定在绝缘子上。杆塔按材料分有木杆、铁塔和钢筋混凝土电杆三种。

表2-4 LJ型铝绞线及LGJ型钢芯铝绞线规格表

标称截面 (mm²)	计算截面 (mm²)			结构尺寸 (mm)			电线外径 (mm)		单位重量 (kg/km)	
	LJ	LGJ		LJ	LGJ					
	铝股	铝股	钢芯	铝股	铝股	钢芯	LJ	LGJ	LJ	LGJ
16	15.90	15.30	2.50	7×1.70	6×1.80	1×1.80	5.10	5.40	44	62
25	24.70	22.80	3.80	7×2.12	6×2.20	1×2.20	6.40	6.40	68	92
35	34.40	36.80	6.20	7×2.50	6×2.80	1×2.80	7.50	8.40	95	150
50	49.50	48.30	8.00	7×3.00	6×3.20	7×1.10	9.00	9.60	136	196
70	69.50	68.00	11.30	7×3.55	6×3.80	7×1.30	10.30	11.40	191	275
95	93.30	95.20	19.80	19×2.50	28×2.08	7×1.80	12.50	13.70	257	404
120	117.00	115.00	22.00	19×2.80	28×2.29	7×2.00	14.00	15.20	322	492
150	148.00	148.00	26.60	19×3.25	28×2.59	7×2.00	15.80	17.00	407	617
185	183.00	181.00	34.40	19×3.50	38×2.87	7×2.50	17.50	19.00	503	771
240	239.00	238.00	43.10	19×4.00	28×3.29	7×2.80	20.00	21.60	656	997
300	298.00	295.00	36.30	37×3.20	28×3.66	7×3.20	22.40	24.20	817	1257
400	396.00	395.00	72.20	37×3.69	28×4.24	19×2.00	25.30	28.00	1087	1460

WWW.PLCWORLD.CN

木杆耗用大量木材，又易于腐烂，现已很少采用。

铁塔需用大量钢材，110kV及以上的线路才采用。

钢筋混凝土电杆现在已大量采用，它的寿命长（50年以上）、成本低，节约钢材、木材；缺点是重量大，运输困难。杆长有8、9、10、11、12、15m等规格。

线路金具：金具包括抱箍、线夹、联合金具（挂环、挂板）、接续金具（钳压管）、保护金具（防振锤、铝包带）和接线金具等零件。它们是用来紧固横担、绝缘子、导线的。所有金具应热镀锌，以防锈蚀。

三、供电线路导线和电缆截面的选择

供电线路的计算主要是导线截面的选择，计算电缆和导线截面时应根据以下几个原则。

（一）按机械强度选择

架空线要经受拉力；电缆要经受拖曳不致因一般机械损伤而致折断。导线按机械强度要求允许的最小截面参看表2-5的规定。

（二）按容许电流选择（即发热条件）

导线必须能承受长时间通过负载电流所引起的温升。各类导线都规定有长期允许温度和短时最大温度，从而决定了它的长期允许通过电流值和短路时的热稳定电流值。选择导线时，要根据计算负载电流不超过电缆和导线的长期载流量来选定所用导线的截面（查附录A～E）。即

$$I_C \leqslant I_N$$

式中 I_N——不同截面电缆和导线的额定电流（A）；

I_C——根据计算负载求出来的计算电流（A）。

上述按容许电流选择导线截面，是指在三相线路中每根相线的截面。而在三相四线制线路的中性线仅通过三相不平

衡电流，其值较小，因此规定，中性线截面一般不得小于相线截面的50%。按发热条件选择的方法，多用于低压动力线路上。一般导线的最高允许温度为70℃。

表2-5　导线按机械强度所允许的最小截面

导线用途	导线最小截面（mm²）	
	铜线	铝线（铝绞线）
照明装置用导线：户内用	0.5	2.5
户外用	1.0	2.5
双芯软电线：用于吊灯	0.5	—
用于移动式生活用电设备	0.75	—
多芯软电线及软电缆：用于移动式生产用电设备	1.0	—
绝缘导线：用于固定架设在户内绝缘支持件上，其间距为：2m及以下	1.0	2.5
6m及以下	2.5	4
12m及以下	4	10
裸导线：户内用（厂房内）	2.5	4
户外用1kV以下（6～35kV）	6	16(35)
绝缘导线：穿在管内	1.0	2.5
木槽板内	1.0	2.5
绝缘导线：户外沿墙敷设	2.5	4
户外其他方式	4	10

WWW.PLCWORLD.CN

（三）按容许电压损失选择

导线上引起的电压降必须限制在一定限度以内。按规定，动力线路在正常情况下的电压变动不得超过±5%（临时供电可降低到8%）。

1．有分支负荷时，导线截面的选择

当给定了负载的电功率为P，已知送电距离为l，所允许的电压损失为V时，则配电导线的截面（线路功率因数为

1，即无感线路）可按下式求得（图2-7）

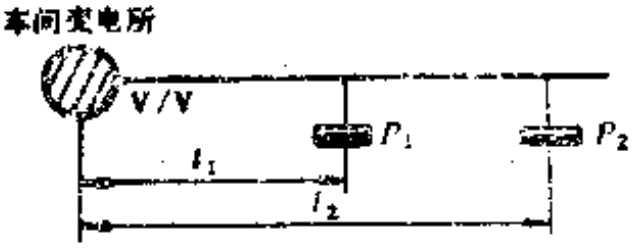


图2-7　配电干线示意图

$$S = K_x \frac{\Sigma(Pl)}{CV}$$

$$= K_x \frac{P_1 l_1 + P_2 l_2}{CV} \quad (\text{mm}^2) \qquad (2\text{-}7)$$

式中　$\Sigma(Pl)$——总负载力矩。

P——负载电功率（kW）；

l——送电线路的距离（m）；

V——允许的相对电压损失（%）；

$C = \frac{10U_N^2}{\rho}$——计算系数，视导线材料、送电电压及线路相数而定，当铝线的线路电压为（380/220 V）时，$C = 46.3$，见表2-6；

U_N——额定电压（kV）；

K_x——需要系数，视负载用电情况而定，见表2-10。

在选择导线截面的问题上，虽然有三个因素要去考虑，但在解决实际问题时，哪个因素是主要的，起决定作用的，就侧重于考虑这一因素，并由此来决定选用导线截面。如在长距离的输电线路中主要考虑电压降，导线截面则由电压降

WWW.DIANGONG.CN

的要求来决定。在配电线路比较短时，可不必计算线路压降，而主要考虑容许电流来决定导线截面，在小负荷的架空线路中往往只考虑机械强度就够了。这样，选择导线截面的问题就可以大为简化了。

表2-6　按容许电压降计算导线截面公式中的系数C值

额定电压（V）	线路系数及电源种类	系数C值	
		铜线	铝线
380/220	三相四线	77	46.3
220	单相或直流	12.8	7.25
110		3.2	1.9
36		0.34	0.21

一般大中型工矿企业的供电线路（厂区）常为几公里至几十公里的长度，所以导线截面应按电压损失条件来选择，并用导线的载流量和机械强度的条件来校验。若供电线路不长，可按载流量（容许电流）来选择。对380V线路虽然不长，但因电流较大，在按载流量选择导线截面的同时，还应考虑到电压损失。

例2-1　已知距配电所变压器550m处有一台水泵，电动机功率为11kW，采用380V三相四线供电，电动机效率$\eta=0.81$，$\cos\varphi=0.83$，$K_d=1$，要求$V=5\%$，应选用多大截面的导线？

解　（1）按导线的机械强度考虑，采用架空敷设，则所选截面不得小于10mm²。

（2）按容许电流选择时，首先要计算出电动机的工作电流（计算电流），即

$$I_t = \frac{P_N}{\sqrt{3}\,U_t\,\eta\cos\varphi}$$

$$= \frac{11}{\sqrt{3}\times 380\times 0.81\times 0.83} \approx 24.8\,\mathrm{A}$$

（为了计算方便，可以粗略地估计380 V的电动机的工作电流每千瓦为2 A）。

查得气温为25℃时，$S = 2.5\mathrm{mm}^2$的橡胶绝缘铝线明设时容许电流为25 A，可满足电动机的要求，即$I_C \leqslant I_N$。

（3）按容许电压降选择，首先应计算出电动机自电源取用的电功率

$$P_{\text{取}} = \frac{P}{\eta} = \frac{11}{0.81} = 13.6\mathrm{kW}$$

选用铝线，$C = 46.3$；如用铜线，$C = 77$。$K_{\text{动}} = 1$，代入式（2-7）得出导线截面积

$$S = \frac{K_{\text{动}}Pl}{CV} = \frac{13.6\times 550}{46.3\times 5\%} = \frac{7480}{231} = 32.4\mathrm{mm}^2$$

最后，为了同时满足以上三个条件，就必须选用$S = 35\mathrm{mm}^2$的BLX型橡胶绝缘铝线。

2. 导线截面估算方法

这是用经验公式估计线路电压降和导线截面，对于临时供电既能满足要求，又使计算大为简便。

对动力用电的铝导线线路来说，有

线路电压降 = 1.73 × 电流 × 线路电阻

其中，电流 = 2 × 电动机千瓦数（A）

$$\text{线路电阻} = \frac{32\times\text{公里数}}{\text{导线截面}\ (\mathrm{mm}^2)}\ (\Omega)$$

因此，线路电压降公式经简化后为

$$\text{线路电压降（V）} = \frac{110}{\text{导线截面}(mm^2)} \times \text{电动机（kW）} \times \text{供电距离（km）}$$

例2-2 已知铝绞线 LJ-16mm²输送2km，电动机容量为2kW，电压380V，估算电压降是多少？

解 线路电压降 $= \frac{110}{16} \times 2 \times 2 = 27.5V$

如变压器输出端电压为380V，则输至电动机处的电压为380－27.5＝352.5V。

如果要求电压损失不超过5%，对于380V线路，选用铝线时，每千瓦·公里采用4mm²的导线。

如有一台4.5kW 的电动机，线路长800m，应选多大截面导线？

每千瓦公里数（负载力矩）为$4.5 \times 0.8 = 3.6kW \cdot km$

导线截面 $S = 4 \times 3.6 = 14.4mm^2$

故可选16mm²铝绞线。

3. 用查表的方法求线路电压损失

当线路的功率因数低于1时，三相平衡负载线路电压损失的计算如下所述。

如果已知导线每公里输送功率1kW 时电压损失的百分数（即导线的单位电压损失），为了简化计算，可按下式算出该线路电压损失的百分数，即

$$\text{线路电压损失（\%）} = \text{单位电压损失} \times \text{负载功率（kW）} \times \text{供电距离（km）}$$

即
$$V = \Delta u\% Pl \qquad (2\text{-}8)$$

式中 $\Delta u\%$——单位电压损失，见表2-7及表2-8。

例2-3 有一台10kW 电动机，$\cos\varphi = 0.8$，线路长800

WWW.PLCWORLD.CN

表2-7　380V三相架空线路铝导线电压损失表

导线型号	当cosφ等于下列数值时单位电压损失（%/kW·km）					
	0.75	0.8	0.85	0.9	0.95	1
LJ-16	1.59	1.56	1.526	1.49	1.45	1.37
LJ-25	1.097	1.064	1.034	1.00	0.965	0.887
LJ-35	0.833	0.812	0.787	0.75	0.713	0.637
LJ-50	0.64	0.611	0.582	0.551	0.517	0.443
LJ-70	0.509	0.480	0.452	0.424	0.390	0.318
LJ-95	0.420	0.392	0.365	0.337	0.304	0.235
LJ-120	0.367	0.340	0.314	0.286	0.254	0.187

表2-8　380V三相铝芯电缆线路电压损失表

导线截面	当cosφ等于下列数值时的电压损失（%/kW·km）				
	0.7	0.75	0.8	0.85	0.9
16	1.55	1.54	1.535	1.53	1.52
25	1.01	1.002	0.996	0.99	0.985
35	0.733	0.726	0.720	0.714	0.704
50	0.596	0.590	0.584	0.579	0.572
70	0.390	0.384	0.378	0.372	0.366
95	0.300	0.293	0.287	0.282	0.275
120	0.247	0.240	0.234	0.228	0.222
150	0.207	0.201	0.194	0.189	0.182
185	0.177	0.170	0.164	0.158	0.152

m，应选多大截面导线？

解　因cosφ＝0.8，从表2-7中查知LJ-16导线单位电压损失为1.56%，代入公式（2-8）

则　　$V = 1.56 \times 10 \times 0.8 = 12.48\%$

超过规范V＝5%的要求，所以用LJ-16截面嫌小。

WWW.PLCWORLD.CN

若选用LJ-50，复算其中电压损失为

$V = 0.611 \times 10 \times 0.8 = 4.8\% < 5\%$，故可用。

（四）按经济电流密度选择

这种方法多使用在高压线路上。因为高压线路电流小，电压降和发热条件易满足，所以先按经济电流密度选择，再按发热和电压降进行校验。我国规定的导线和电缆经济电流密度 J_{ec}（A/mm²）列于表2-9中。

表2-9 经济电流密度J_{ec}值 （A/mm²）

线路类别	导线材料	年最大负荷利用小时数 T_{max}(h)		
		3000以下	3000～5000	5000以上
架空线路	铜 铝	3.00 1.65	2.25 1.15	1.75 0.90
电缆线路	铜 铝	2.50 1.92	2.25 1.73	2.00 1.54

例2-4 有一条用LJ型铝绞线架设的10kV架空线路，计算负荷功率为1380kW，$\cos\varphi = 0.7$，$T_{max} = 4800$ h。试选择其经济截面，并校验其发热条件和机械强度。

解 （1）根据经济电流密度确定导线的截面。

通过线路的计算电流 $I_C = P_C/(\sqrt{3}\,U_N\cos\varphi)$

$= 1380/(\sqrt{3} \times 10 \times 0.7) = 114$ A

查表2-9得 $J_{ec} = 1.15$ A/mm²。

$$\therefore \quad \text{经济截面} \quad S_{ec} = \frac{I_C}{J_{ec}} = \frac{114}{1.15} = 99\text{mm}^2$$

选标准截面为95mm²的绞线。

（2）校验发热条件。查附录E知，LJ-95导线在25℃时载流量为325 A，远远大于线路计算电流 $I_C = 114$ A，故可

以满足发热条件的要求。

（3）由机械强度校验知，95mm² 已合格。因10kV 架空裸铝线最小允许截面为35mm²。

一般用经济电流密度选用的截面，都比其他方法选择偏大一些，所以选标准截面时取下限。

四、架空与电缆线路技术经济比较

架空线与电缆是用得最普遍的两种电力线路。与电缆相比，架空线的主要优点是：①架空线造价便宜（电缆的造价约为架空线的2倍）；②取材方便，施工容易；③架空线露置于空中，容易发现故障点，便于检修和维护。

但大城市和工厂区若采用架空线，影响行人和交通安全；占地面积大，影响城市的美观；又容易遭受自然灾害（风、雨、雷电、冰、雪等）袭击，而且对通信线也有干扰。电缆线路则敷设地下，不用杆塔架线，与其他物件不发生关系，故障机会少，安全可靠。因此电缆线路在城市和工厂区被广泛的采用。

但在山区新建设的工矿企业，大部分均采用架空线路。

§2-4 供电变压器容量的选择

工厂动力与照明用电量都较大，正确地计算电量、选择适当的配电变压器供电，是十分重要的。如果以一台变压器供电给一台电动机，因为电动机的功率因数不为1，再加上有功率损耗等，变压器的容量（即视在功率）必须大于电动机的有功功率。作一个粗略的估算，每1kVA 的变压器大致能带动0.74kW（即1HP 的电动机，或者说1kW 的电动机需1.33kVA 容量的变压器。

以上是一台变压器带一台电动机的简单情况。实际上每

台变压器所带的电动机决不止一台。这时是否也是将所有的电动机额定容量加起来，再考虑增加33%的裕量，就是变压器的容量了呢？不是的。因为工厂电机设备一般情况下不会同时全部都工作，而且每一台设备也不会总是在满负载情况下运行的，所以还要打上一个折扣，这个折扣称为需要系数K_x，需要系数小于1。此系数的大小，要视具体情况而定，可参阅表2-10。

所以动力用电所需变压器容量$S_{动}$可按下式进行估计：

$$S_{动}=K_x\frac{\Sigma P_N}{\eta\cos\varphi}\quad(\text{kVA})\qquad(2\text{-}9)$$

式中 ΣP_N——电动机及用电设备额定容量之和（kW）；

η——各台电动机的平均效率，计算时可采用0.86；

$\cos\varphi$——各台电动机的平均功率因素，电动机的功率因素一般在0.75～0.93之间，计算时可采用0.85。

对施工用电量的估算，采用下列公式较合理，即

$$S_S=K_1\frac{\Sigma P_M}{\eta\cos\varphi}+K_2\Sigma S_h\qquad(2\text{-}10)$$

式中 S_S——施工设备所需容量（kVA）；

ΣP_M——全部电动机额定功率之和（kW）；

ΣS_h——全部电焊机额定容量之和（kVA）；

K_1——电动机需要系数。电动机10台以内时，取$K_1=0.7$，11～30台时，取$K_1=0.6$；

K_2——电焊机需要系数。电焊机3～10台时，取$K_2=0.6$，10台以上时，取$K_2=0.5$；

$\cos\varphi$——电动机平均功率因数，一般建筑工地取0.65～0.75。

WWW.FLCWORLD.CN

表2-10　用电设备的功率因数（cosφ）及需要系数K_x值

用电设备名称	需要系数 K_x	功率因数	用电设备数目
单独传动的金属切削机床（冷加工车间）	0.14～0.16	0.5	10台以下（小批加工）
锻造机械	0.25	0.6	10台以下
轧钢车间的机械	0.3～0.4	0.5～0.6	10台以下
通风机、鼓风机、泵等	0.75～0.85	0.8	10台以下
搅拌机	0.7	0.68	10台以下
空气压缩机、传送带	0.75	0.75	10台以下
提升机、起重机	0.3	0.7	10台以下
维修、装配车间起重机	0.05～0.15	0.5	
电焊机	0.45 0.35	0.45 0.40	10台以下 10台以上
感应电炉（高频） （低频）	0.8 0.8	0.1 0.35	
电阻炉（电热设备）	0.7～0.8	0.98	
电弧炼钢炉变压器	0.9	0.87	
户外照明	1.0	白炽灯为1 荧光灯为0.6	
生产厂房照明	0.8～1.0	白炽灯为1 荧光灯为0.6	
办公室（生活）照明	0.7～0.8	白炽灯为1 荧光灯为0.6	

WWW.PLCWORLD.CN

如果考虑照明用电量，一般在动力用电量以外再加上10%，作为照明用电量即可。

最后，估计出用电总容量为

$$S_C \geqslant 1.10 S_{动} \text{（kVA）}$$

在选择变压器的容量时，必须贯彻节约的原则，既不能选得过大，也不能选得过小，所选变压器的容量应满足$S_N \geqslant S_C$；变压器一次、二次绕组额定电压必须与当地电源的高压和负载需要恰当配合。这是选择变压器必须注意的两个原则。

如果工厂较大，有几个车间，应分别计算出各车间的电力负载，然后将全厂低压侧计算负载总计，即为全厂的计算负载。考虑各车间之间用电设备不会同时运转，且设备容量也不尽相同，故应将全厂的计算负载乘以同期系数$K_\Sigma = 0.9$，即为应选的变压器的容量（见§2-8）。

§2-5 架空输电线路的架设

35kV及以上的架空线路一般由电业系统管理，工厂所管理的只是10kV及以下的线路。线路的布置、导线截面的选择以及杆型选用等，均由设计规定。10kV及以下架空线路的档距（相邻电杆的距离）一般不大于50m。架空线路的施工，主要是线路测量、立杆和架线。立杆、线路架设应尽量使用机械，以加快施工进程，保证工程质量。具体施工方法如下所述。

一、线路测量与线路间距

架空电力线路最大的特点是利用高旷地形，注意障碍物的跨越，如河流、房屋、高地、工业设施、铁路以及高压线的交叉跨越等都必须符合安全规程的要求，见表2-11。

表2-11　架空线路与各种设施接近和交叉时的最小容许距离表　（m）

经过地区及跨越对象	至导线最大地点的垂直距离				导线摆动最大时的水平距离				
	线路至	线路电压（kV）			线路至		线路电压（kV）		
		1以下	1～10	35			1以下	1～10	35
居民区 厂区	地面	6.0	6.5	7.0	杆柱至路基边坑		1.5	3.0	5.0
道路	地面	6.0	7.0	7.0	同上，但路径受地区限制		0.6	0.6～1.5	2.5
	拉线至地面	5.0	7.0	7.0					
铁路	轨顶	7.5(6)	7.5(7.5)	7.5	杆塔任何部分	平行	3.0	3.0	5.0
	车厢或货物外廓	3.0	3.0	3.0	至轨道中心	交叉	3.0	3.0	杆高加3
通航河流	常年最高洪水位	6.0	6.0	6.0	外侧导线至斜坡上缘；步行可以到达的山坡		3.0	4.5	5.0
	船行水位时的最高船桅顶	1.0	1.5	2.0	步行不能到达的山坡、峭壁		1.0	1.5	3.0
通信线路	通信线路	1.0			二线路外侧导线间（通信线）不受路径限制		1.0	2.0	4.0
	有防雷装置	1.0	2.0	3.0					
	无防雷装置		4.0	5.0	受路径限制		1.0	2.0	3.0

WWW.ELCWORD.CN

（续）

经过地区及跨越对象	至导线最大地点的垂直距离				导线摆动最大时的水平距离			
	线路至	线路电压（kV）			线路至	线路电压（kV）		
		1以下	1～10	35		1以下	1～10	35
电力线路	上层导线无屏蔽	4.0	4.0	5.0	二线路外侧导线间（电力线）不受路径限制	2.5	2.5	5.0
1kV以下	上层导线有屏蔽	1.0	2.0	3.0				
10kV		2.0	2.0	3.0				
35kV		3.0	3.0	3.0		5.0	5.0	5.0
特种用途的管道（索道）	位于管道之下	1.5	不允许	不允许	管道任何部分	1.5	2.0	4.0
	位于管道之上	2.5	3.0	4.0				
建筑物	建筑物顶端	2.5	3.0	4.0	外侧导线与建筑物凸出部分	1.0	1.5	3.0
树林	树梢	0.8	1.5	3.0	树枝	1.0	2.0	3.0

WWW.PLCWORLD.CN

二、基础施工

1. 电杆坑与拉线坑的定位

在挖电杆坑之前，应先检查全线路杆位标桩是否符合设计图样的要求，有无发生变位或遗失，以免错误施工。

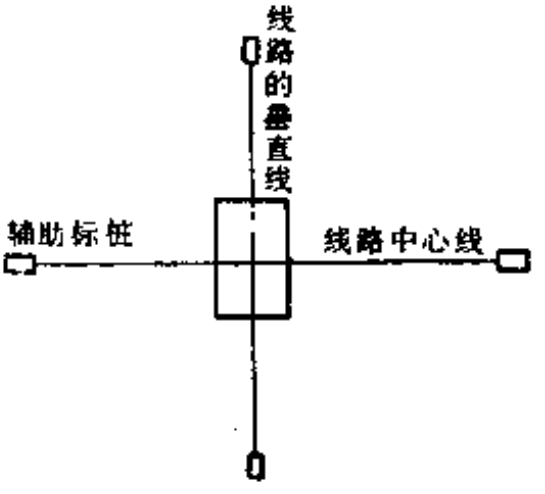


图2-8 直线单杆杆坑定位

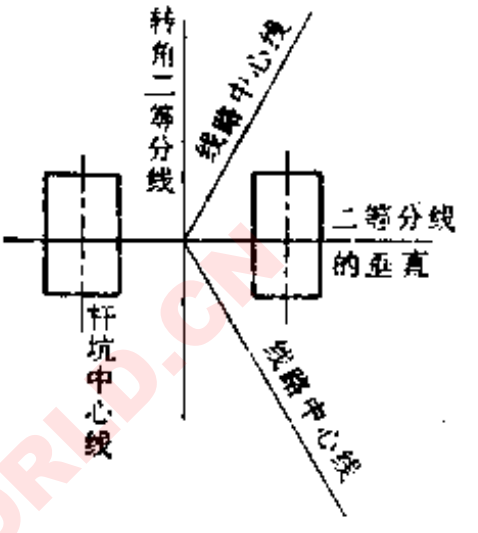


图2-9 转角π形杆杆坑的定位和划线

直线单杆的定位与划线见图2-8，转角π形杆杆坑的定位与划线见图2-9。

2. 挖坑

按照划好的坑口尺寸及所规定的坑底尺寸，使用锹和镐进行挖掘。挖出的土，应堆放在离坑边0.5m以外的地方，以免影响坑内工作和立杆。

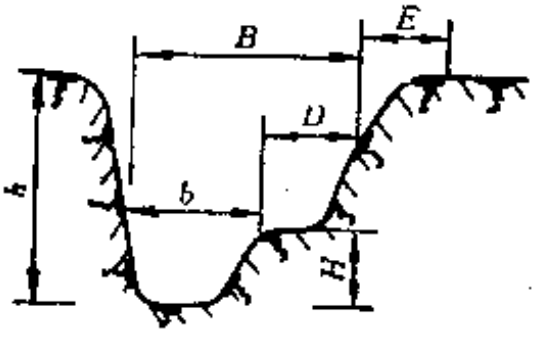


图2-10 电杆坑

$B=1.2h$ $b=$基础底面+(0.2~0.4)m $D=0.7h$ $E=0.2h$ $H=0.3h$

杆坑应在放置电杆侧挖一个阶梯形马道，阶梯可根据电杆的长度挖成二阶和三阶两种，如图2-10所示。

WWW.HLCWORLD.CN

电杆长度在15 m以下时，埋设约为杆长的1／6。如电杆装设底盘时，应加深底盘厚度。

杆坑与拉线坑的深度不得大于或小于规定尺寸的5％。

三、立杆

为了施工方便，一般都在地面上将电杆的全部金具、绝缘子组装完毕，然后整体立杆。在组装前，应检查：电杆高度，电杆梢径是否符合设计要求，电杆有否弯曲和裂纹，混凝土电杆的顶端是否有堵头等。

1．横担、撑角及杆顶支座的安装

排杆完成以后（即将电杆顺线路方向运放到杆坑准备起立的位置），即可进行横担安装。

（1）横担的安装根据导线的布置不同，安装距离也不同。在低压线路中，导线的布置都采用水平排列。在6～10 kV线路中，导线的布置有三角形排列和水平排列两种。为了提高线路的耐雷击性能，多采用三角形排列，但高压线在双回路时多用水平排列。当同杆架空线路为多层排列时，自上而下的顺序是：高压、动力、照明及路灯。高、低压横担间的垂直距离不应小于表2-12中所列数值。

表2-12　10kV及以下线路多层横担间的最小垂直距离（mm）

类　别	直线杆	分支与转角杆
高压与高压线	800	450/600
高压与低压线	1200	1000
低压与低压线	600	300
高压与通信线	2500	2500
低压与通信线	1000～1500	1000～1500

注：表中450/600是指分支线或转角横担距上面的横担取450mm，距下面的横担取600mm。

（2）直线杆横担应装设在受电侧（在电源的另一侧）。终端杆、转角杆、分支杆以及导线张力不平衡的横担，均应装在张力的反方向，如图2-11所示。

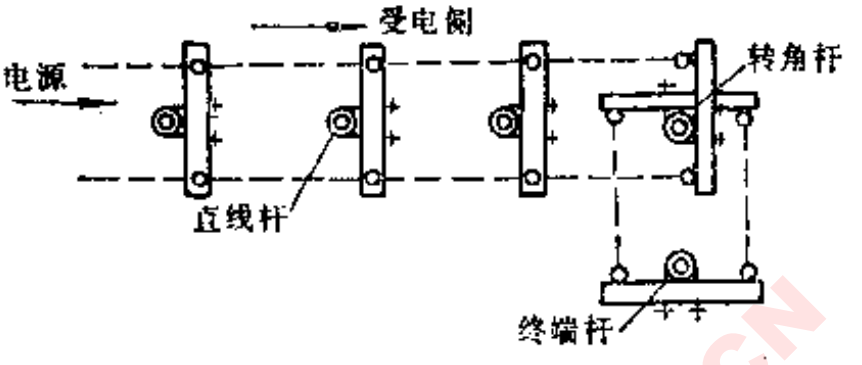


图2-11　横担安装方向

（3）安装杆顶支座和安装针式绝缘子，如图2-12所示。

2．立杆

在线路施工中，要求所有的各种工具都具有足够的机械强度和良好的质量，这对保证安全和顺利立杆，是很重要的。

（1）电杆设立前，须校验基础坑的位置及其深度是否符合设计规定。立杆时常使用“倒落式人字抱杆”。电杆中心应与基础中心相符合。

（2）立杆后调整杆位使电杆在线路的纵、横方向上的倾斜程度为3/1000；横担在立面的歪斜为5/1000；电杆距线路中心线的偏差，不应超过10cm。

（3）转角杆和终端杆，可向张力的反对侧（即拉线侧）倾斜，倾斜距离约等于电杆直径。

（4）坑土夯实。杆身调整后，即进行坑土夯实工作。每填土300mm厚，用夯打实一次。夯实时，应在电杆两侧

WWW.PLCWORLD.CN

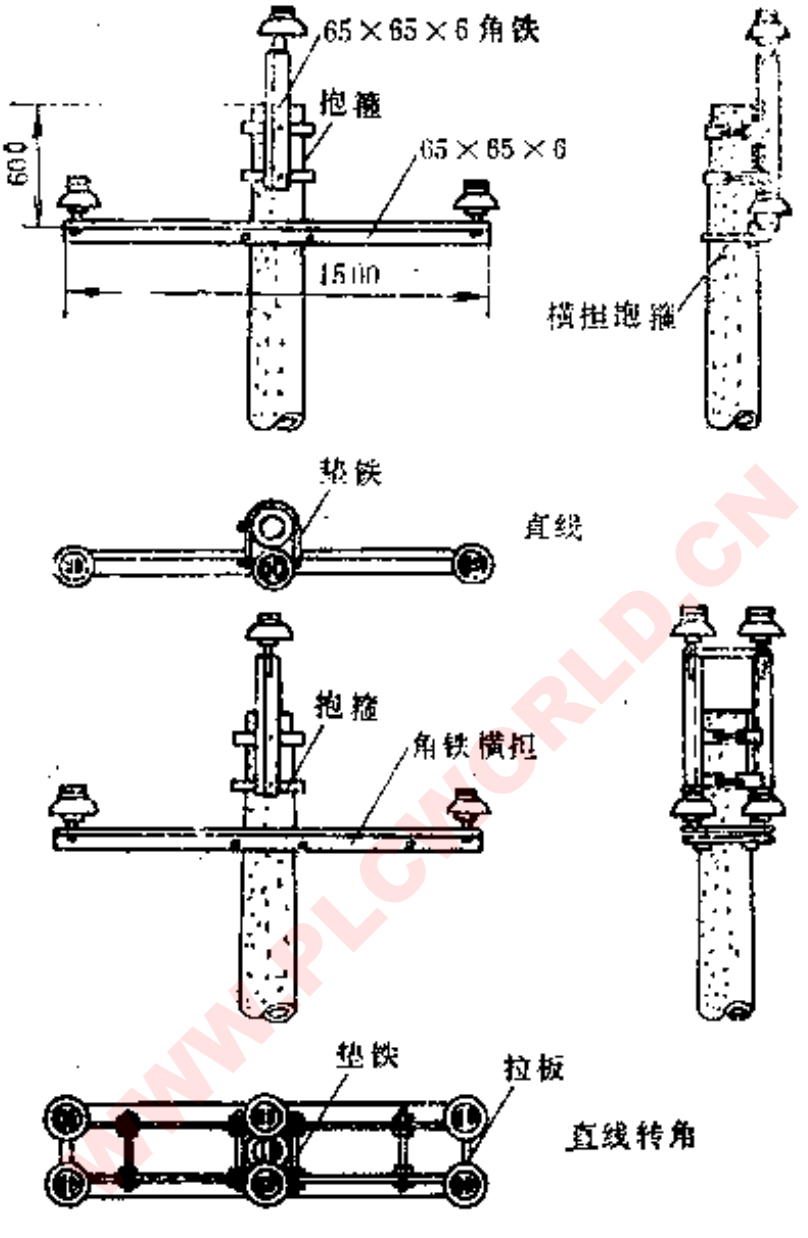


图2-12　杆顶支座和针式绝缘子的安装

交替进行，以防电杆移位。当埋入坑深的 2 / 3 时，转角杆要安装卡盘，填土应高出地面200～300mm，见图 2-13 所示。

四、拉线施工

拉线是平衡电杆各方向的拉力，（如架线拉力、风力）以及防止电杆埋设不牢固时，电杆发生弯曲或倾倒。凡是承受不平衡拉力的电杆上（终端杆、转角杆、跨越杆和分支杆

等），均需装设拉线，以保持平衡。

（一）拉线的用途和结构

（1）普通拉线：用在线路的终端杆、转角杆、耐张杆等处，主要起平衡拉力的作用，见图2-14。

（2）人字拉线（又叫两侧拉线）：用于基础不坚固和交叉跨越加高杆，以增强电杆抗风吹倒的能力。

（3）水平拉线（又叫过道拉线）：用于跨越公路、渠道和交通要道等处，见图2-14。

（4）Y形拉线：分垂直Y形和水平Y形拉线两种，在电杆较高、横担较多时，用垂直Y形拉线；在H形杆上应安装水平Y形拉线，见图2-14。

（5）自身拉线（又叫弓形拉线）：用于受地形限制而不能采用一般拉线之处。

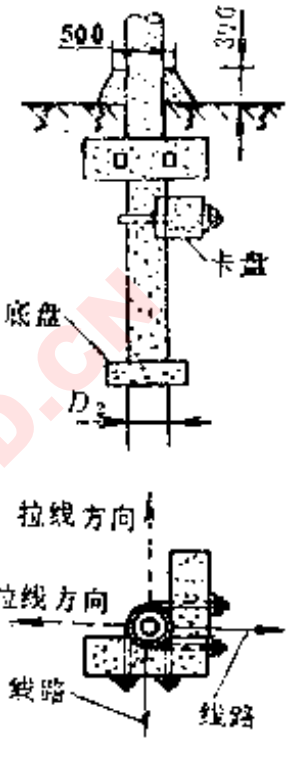


图2-13 转角杆卡盘安装

（二）拉线的要求和制作安装

（1）拉线“拉力”的大小，决定于拉线材料的强度、拉线的角度等。只有拉线的方向、大小和作用点都做对了，电杆才能稳固地竖立。

（2）拉线材料在10kV及以下线路，一般是用ϕ4.0mm镀锌铁线制作。为了施工方便，当铁丝超过7股时应使用镀锌钢绞线，此时拉线下把应改用圆钢拉线棒。

（3）拉线与电杆间的夹角一般应为45°，如受地形限制时，可适当减小，但不得小于30°。

WWW.PLCWORLD.CN

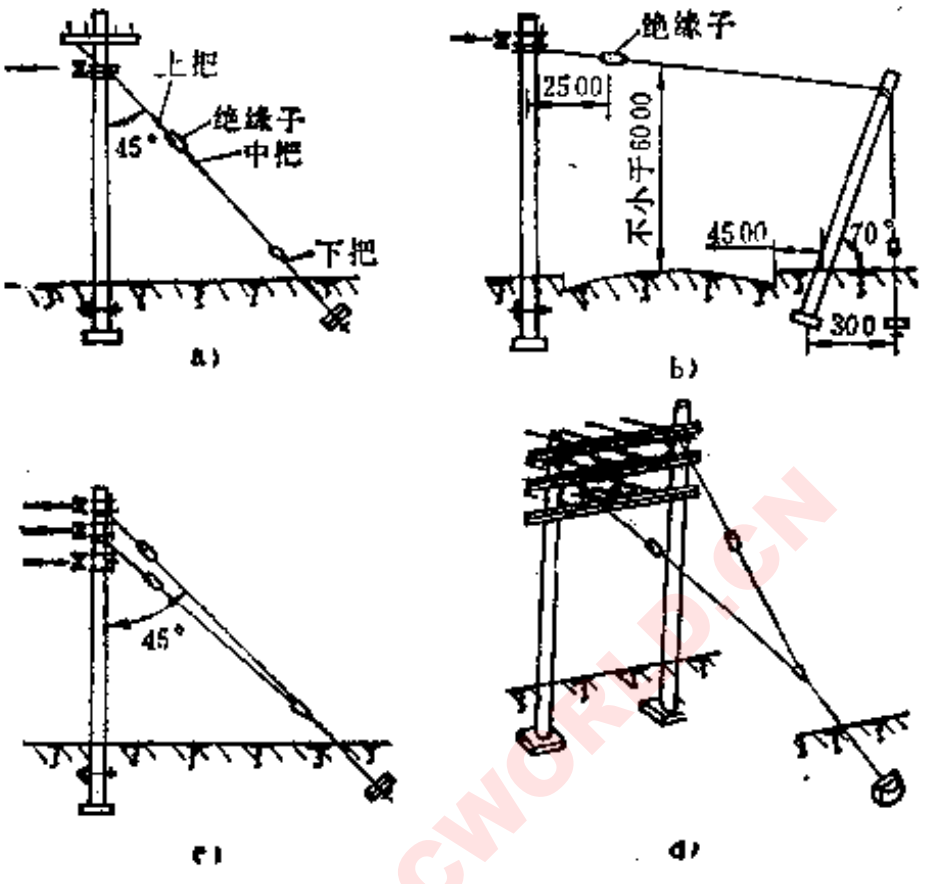


图2-14　拉线安装

a）普通拉线　b）水平拉线　c）Y形上下拉线　d）Y形水平拉线

（4）拉线的各股受力应一致，不得有过松或过紧及全部松弛现象。

（5）拉线应在上把与中把之间加拉紧绝缘子，见图2-14a。混凝土电杆的拉线可以不加绝缘子，但穿越导线的拉线，须装设拉紧绝缘子。

（6）拉线的下把的做法和拉线盘的安装见图2-15（一式）。将拉线的下部的上端折回约1.2m，弯成环形，嵌进拉线环（又叫心形环）内，并使之紧靠拉线环。然后采用自缠法或另缠法缠绕。拉线环距离地面的垂直距离为600mm。

（7）钢筋混凝土电杆采用拉线抱箍固定拉线，将拉线

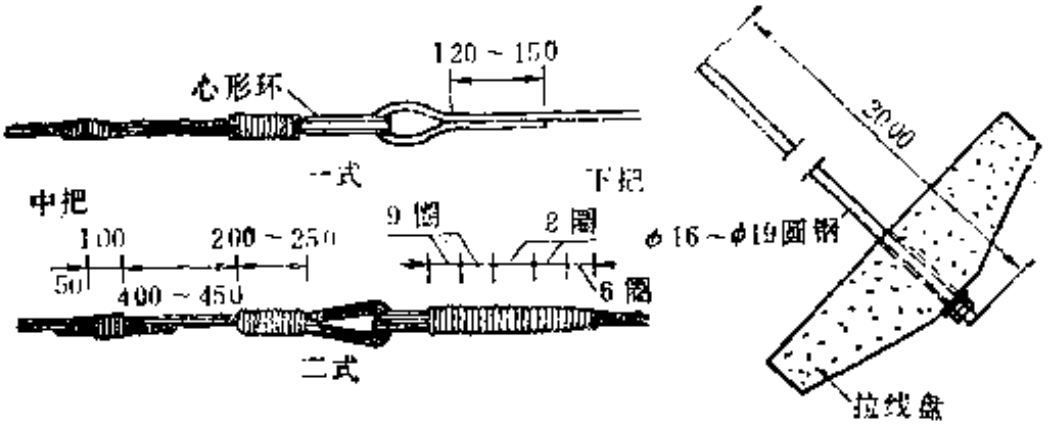


图 2-15

的上部折回约1.5 m，弯成环形，嵌进拉线环内，其上把的制作方法与下把相同。

（8）收紧拉线做中把，拉线的收紧是利用弹簧紧线钳将铁线（中把和下把之间）两端夹紧，并装入花兰螺钉（调节器），将拉线慢慢收紧。如拉线为镀锌钢绞线，用UT型线夹作为拉线调节器较为方便。拉线端头可用钢线夹子紧固。

（9）各种拉线的安装图见图2-14，拉线的“方向”，一定要装在架设导线方面的反面，才能发挥作用，千万不能装偏或装错。拉线盘埋深不得小于1.2 m。拉线所受张力越大，埋深也应增大。

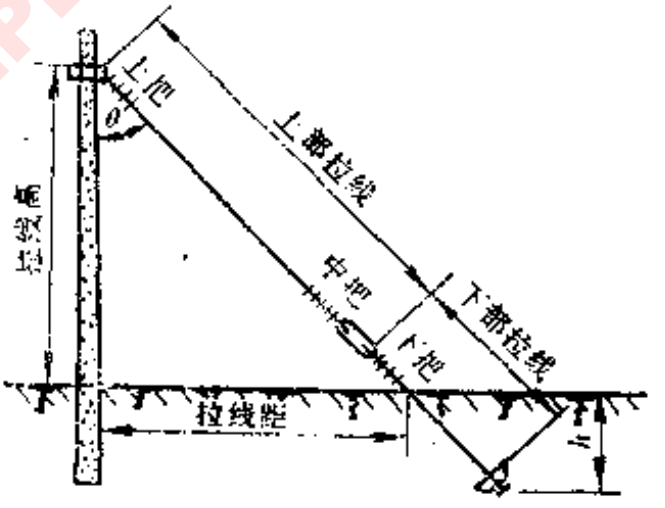


图2-16 拉线装置

（三）拉线长度和截面的计算

一条拉线由上把、中把和下把三部分构成，如图2-16所

示。

拉线上部下料长度

$$L = H\sec\theta + A - s$$

式中 H——拉线高（m）；

θ——拉线与电杆间的夹角（°）；

$\sec\theta$——三角函数，θ 的正割值；

s——拉线下部露出地面的长度（m）；

A——拉线上把和中把附加长度1.5＋1.2＝2.7(m)。

（如装有拉线绝缘子，上、下把应附加长度2.4 m）。

拉线的截面（股数）决定于线路不平衡张力的大小，即决定于线档的长短、线径的粗细、导线的数量、垂度的大小以及导线的材料（铝绞线或钢芯铝线）。

线路不平衡张力应与拉线的拉力相等，才能使电杆受力平衡。导线及拉线的安全拉力即允许拉力，可按下式计算，即

$$P \leqslant \frac{P_K}{K} \qquad (2\text{-}11)$$

式中 P_K——导线及拉线的破断拉力（N）；

K——综合安全系数，见表2-13（厂区线路取大值）。

表2-13 综合安全系数

材　料	牵引钢绳	架空线（LJ、LGJ）	钢绞线（拉线）	麻绳
综合安全系数	4.5～5	大于2～3	≥3～4	3～5

拉线的截面（S）可由计算拉断力求得，即

$$S = \frac{P_K}{\sigma} \quad (mm^2) \qquad (2\text{-}12)$$

WWW.PLCWORLD.CN

式中　σ——拉线（综合）应力（N/mm^2）。

拉线（镀锌钢绞线）最小截面不应小于$25mm^2$。35kV线路的拉线最小截面不应小于$35mm^2$。

五、导线架设

架线工作包括：放线，导线的联接，紧线和导线在绝缘子上的固定。

（一）放线的准备工作

（1）清除放线道路上的可能损伤导线的障碍物，或采取可靠的防护措施，如碎石地段垫以隔离物，以免擦伤导线。

（2）搭设跨越架。线路交叉跨越电力线、房屋建筑、公路、铁路及其他构筑物时，应搭设牢固的跨越架。并要求：

1）搭设跨越架时，其埋深为0.5m。在跨越杆顶部应用麻绳或棕绳绑扎。

2）在垂直跨越架的方向，在架顶上应装设拉线，以加强稳定性。

3）跨越架与跨越物的最小水平与垂直距离如表2-14示。

表2-14　跨越架与跨越物最小间距　（m）

跨越物	铁路	公路	35千伏线路	10kV线路	1kV以下通讯线路
最小水平距离	3.0	0.6	1.5	1.0	0.6
最小垂直距离	7.0	6.0	1.5	1.0	0.6

4）跨越架宽度应稍大于电杆横担的长度，防止掉线。

5）搭设跨越高压输电线的架子时，高压线路应停电后

WWW.PLOWORLD.CN

再进行。

（3）在基础坑填好和夯实完毕、电杆校正完成、固定完成以及拉线施工完成后，才能开始电杆上的架线工作。

（4）还应了解电杆能否承受平侧拉力，若不能则须适当地用拉线拉好承力杆。转角铁塔在放线前也应做好临时拉线。

（5）导线需直接送到放线地点，并将各线轴分别放置在线路上。

（二）放线方法

架线一般采用综合架线方法，即由一个工作组在一个承力档距内顺序进行所有作业。

（1）放线时不允许直接在地面上拖拉导线，以免损伤表面层的线股，应当用滑轮来放线，即在横担上安装滑轮，将导线（用牵引绳）穿入滑轮，使导线沿着滑轮移动，如图2-17所示。

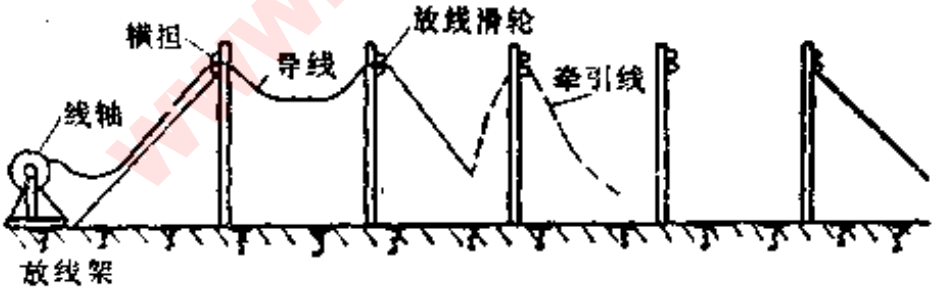


图2-17　放线

（2）用滑轮放线一般用人力或卷扬机作为放线的牵引动力。

（3）带导线的线轴距第一基电杆的距离，应当使导线与挂在横担上的滑轮之间的角度最少取45°。将线轴放在特制

的支架上，注意放线端必须位于线轴上侧。

（4）放铝导线或钢芯铝导线时，应使用铝质滑轮或木滑轮。滑轮直径不应小于导线直径的10倍（即$D \geqslant 10d$）。放钢导线时用铁滑轮。

（5）放线处，应留有经验的人员看守，负责检查导线的质量。对放线轴须有制动装置，如发现导线上有损伤的地方，需中止放线进行处理。如损伤严重（如损伤部分大于全截面的25%），则将这部分割掉，联接好后再放。

（6）放线过程中须有可靠的联络信号，沿线还需要有人看护导线不受损伤，不使导线打环扣等。

（三）导线的联接

导线联接质量的好坏，直接影响导线的机械强度和电气接触，因此应特别重视。

（1）钳压接法：这种方法适用于导线截面在16～240 mm^2的铝绞线、钢芯铝绞线和铜绞线。钳压接是将导线穿入联接管内加压，借着管与线股间的握着力，使两根导线牢靠地联接起来。

压接前必须将导线与联接管内壁仔细的用汽油进行清洗，除掉污垢和氧化膜。然后在导线表面和联接管内壁涂上一层凡士林锌粉膏，再用钢丝刷除净氧化膜。导线从联接管两端插入，使导线端头露出管外20～30mm为止。将联接管放入压接钳的压模中，并使两侧导线平直，按图2-18的顺序进行压接。压坑数和压坑深度应由导线种类和导线截面积决定。

（2）对于截面积较大的钢芯铝绞线（LGJ-300，LGJ-400），常用压榨方法。

对压接质量的要求是：接头的拉伸强度不应小于该导线

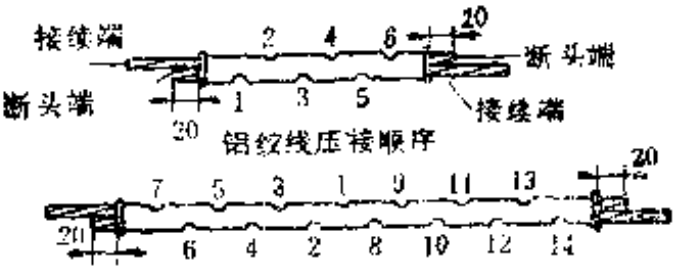


图2-18 钳压次序图

强度的90%；联接点的接触电阻不应大于相同长度导线的电阻值；联接管因压接而发生弯曲时，其弯曲度不应超过其长度的1%。如弯曲度超过3%时，或压接后与压弯校直后的联接管发生裂纹时，必须切断重接。

（四）紧线

紧线一般用弹簧紧线器联接导线与钢绳，用卷扬机进行紧线。

（1）紧线是在一段承力档距（耐张段）内进行，将导线一端固定在紧线段（固定端）耐张杆的悬式绝缘子上，另一端（操作端）通过滑轮组来牵引导线，使导线收紧。

（2）紧线时，在道路上和联接线夹通过的电杆方向，要派人观察，用信号旗（距离较远、有障碍物的地段，可用步话机）进行联络，统一调度。

（3）紧线的垂度（即垂弧，或称弧垂）应根据当天放线时的温度和档距的大小，由设计给出的安装曲线上查得的数值来决定。

在安装曲线查得垂度后，加上绝缘子串的长度而得出一个最终的垂度数值，观测导线的垂度应与紧线工作配合进行。利用专用的水准尺在两个相邻的电杆上标定这个数值。

（4）一般施工中常用平行四边形法观测导线垂度值，在相邻的电杆上挂上垂度板（水准尺），由观测人员在杆上，从一侧垂度板瞄准对侧垂度板，调整导线，使导线正好与瞄准直线相切即调整完成，如图2-19所示。

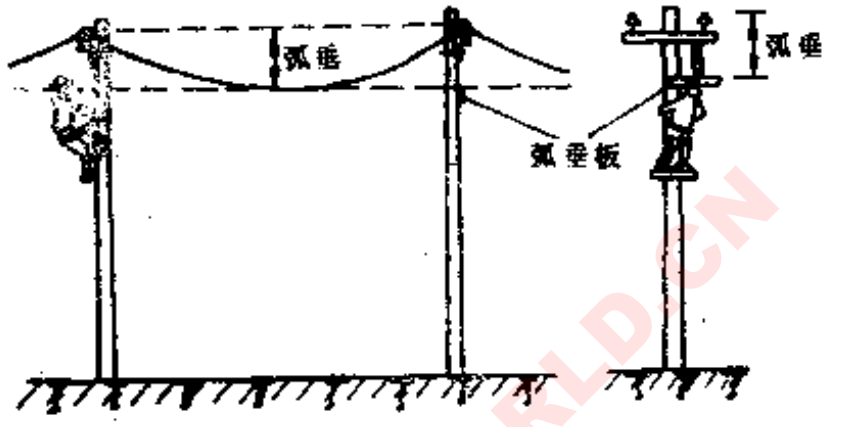


图2-19　平行四边形法观测导线垂度

（5）观测垂度时，必须先将导线拉得稍紧一些，以便于调整整个承力档距段内各档距内的导线张力，使其均匀互等。

（6）架线工作的最后一个作业，是将电杆上放线滑轮取下来，将导线在绝缘子上固定或是换上线夹。

（五）导线在绝缘子上的固定

导线在绝缘子上的固定通常用绑扎法。

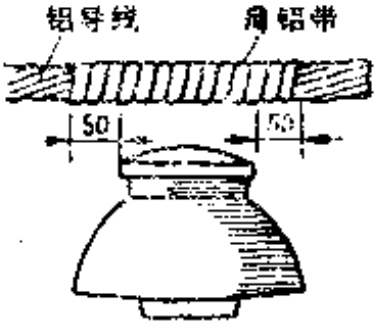


图2-20　裸铝导线在针式绝缘子上包扎铝带示意图（包到中间收尾）

（1）在直线杆针式绝缘子上的固定用顶扎法。对于铝导线，在绑扎处的导线上要包缠铝带200mm，如图2-20所示。然后，将导线放在绝缘子顶槽

内，进行绑扎，见图 2-21。铝绑线直径应在 2.6～3mm 之内。

（2）导线在转角杆针式绝缘子上的绑扎法（颈扎法），如图2-22所示。最后将扎线围绕到导线左上方，并贴近瓷瓶处，紧缠导线 3 圈后，与另一端扎线紧绞 6 圈后，剪去余线。

（3）终端杆蝶式绝缘子的绑扎法，如图 2-23 所示。

（4）导线在耐张杆和终端杆悬式绝缘子的固定，是用耐张线夹固定，如图2-24所示。

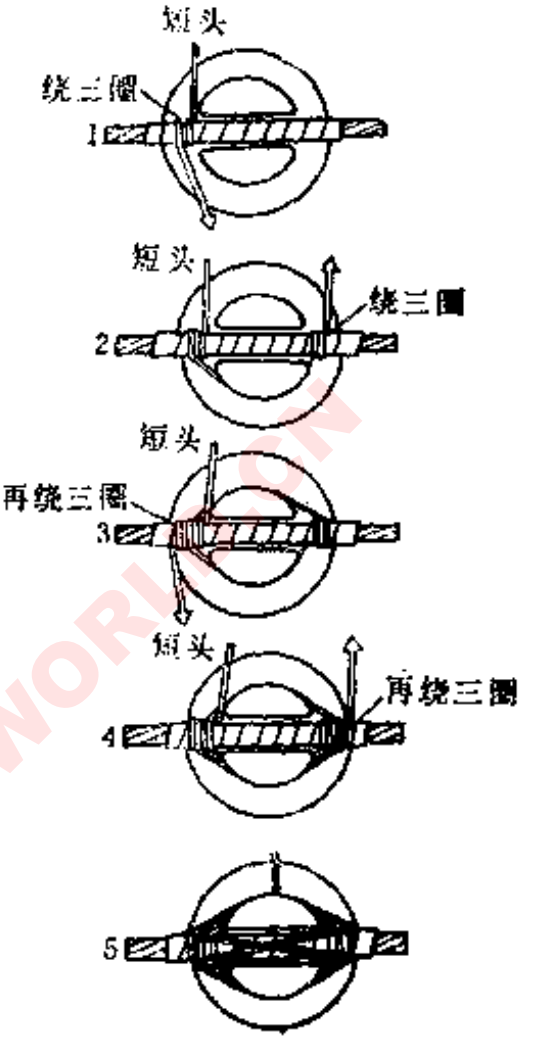


图2-21 顶扎法

（六）检查

架线工作结束时应检查：导线的垂度；导线距地面或其他构筑物的距离；转角杆或耐张杆上的跨越线长度；耐张线夹的压接质量以及在施工中的一切伴随情况，并都应作详细记录，作为移交验收资料。

新架设线路，在运行前须进行测量试验，作为验收的依据，内容包括：

（1）测量导线接头的电阻。

（2）检查导线离地、离建筑物、空气间隙、交叉和跨

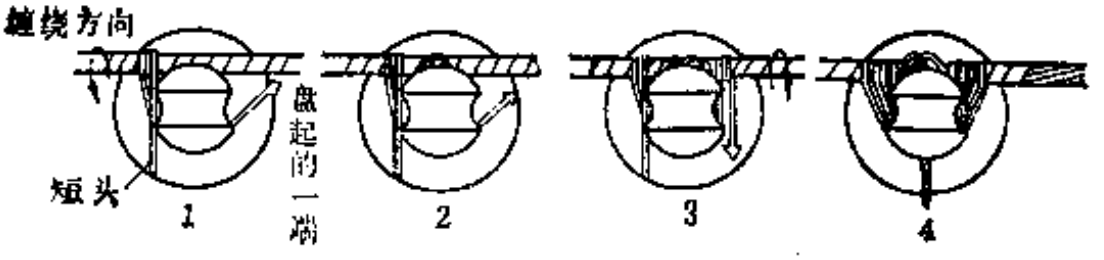


图2-22　颈扎法

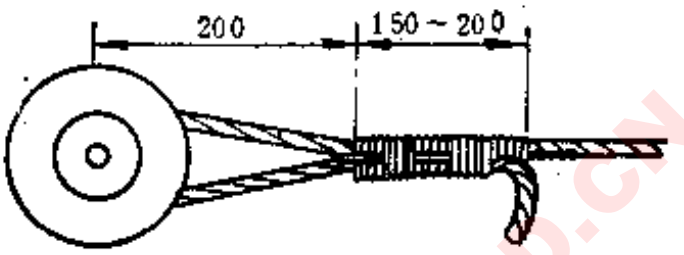


图2-23　铝导线在蝶式绝缘子上的绑扎法

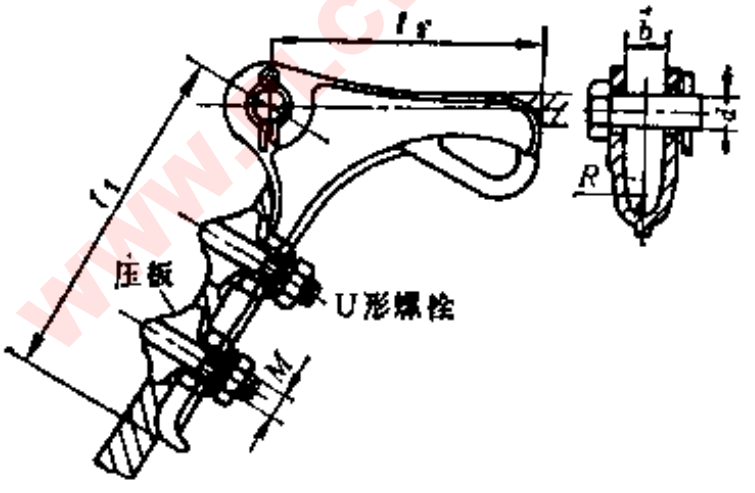


图2-24　耐张线夹（螺栓型）

越等距离。

（3）测量电杆和过电压保护装置的接地电阻。

（4）相位检查。

（5）以额定电压将线路冲击合闸三次。

§2-6 电力电缆线路的施工

一、施工的一般要求

（1）电缆敷设前必须检查电缆表面有无损伤，并测量电缆绝缘电阻，检定是否受潮。低压电缆（1kV）用1000V兆欧表测试绝缘电阻，对于3～10kV的电缆用2500V兆欧表测试绝缘电阻，合格后方可使用。检查潮气方法还可将电缆绝缘纸点燃后，纸的表面有泡沫并发出嘶嘶声，即表明有潮气存在，这叫火燃法。

（2）严格防止电缆扭伤和过分弯曲，电缆弯曲半径与电缆外径的比值不得小于表2-15中的倍数。

表2-15 电缆弯曲半径与电缆外径比的规定

名称	倍数
油浸纸绝缘多芯电缆（铅包铠装）	15
油浸纸绝缘多芯电缆（铅包铠装）	30
油浸纸绝缘多芯电缆（裸铅包或铅包）	20
干绝缘油质铅包多芯电缆	25
塑料、橡胶绝缘电缆（有铠装、无铠装）	10、8
油浸纸绝缘多芯控制电缆	15

（3）垂直或沿陡坡敷设的电缆，在最高与最低点之间的最大允许高差规定见表2-16。

（4）厂房内电缆沿支持物敷设时，其固定点间距离不应大于表2-17的规定。

（5）环境温度低于0℃时，敷设电缆应预先加热周围温度，或对电缆通电流加热。

表2-16　电缆最大允许高度差　（m）

电压等级（kV）		铅包	铝包
1～3	铠　装	25	25
	无铠装	20	25
6～10		15	20
20～35		5	—
干绝缘统铅包		100	—

表2-17　电缆支持点间的最大距离　（m）

电缆类型 / 敷设方式	塑料护套、铅包、铝包、钢带铠装		钢丝铠装电缆
	电力电缆	控制电缆	
水平敷设	1.0	0.8	3.0
垂直敷设	1.5	1.0	6.0

（6）在室内电缆沟及厂房内明敷设电缆时，应将外层麻包去掉，刷上防腐油。

（7）埋设地下各种电缆，均应在回填土前进行隐蔽工程验收，并绘制竣工图，标明具体坐标、部位与走向，以供维修管理之用。

二、敷设方法

敷设电缆一般有四种方法：一为电缆在厂房内沿墙和支架（挂架、桥架）敷设；二为电缆直接埋地敷设；三为电缆在电缆沟内敷设；还有一种是电缆排管敷设。各种方法都有它的优缺点，应根据电缆数量、周围环境条件等具体情况决定敷设方法。

WWW.PECWORLD.CN

（一）直接埋地敷设

这种方法是沿已选定的线路挖掘壕沟，然后把电缆埋在里面。电缆根数较少，敷设距离较长时多采用此法。

将电缆直接埋在地下，不需要其他结构设施，施工简便、造价低、土建材料也省。同时，埋在地下，电缆散热亦好。但挖掘土方量大，尤其冬季挖冻土较为困难，而且电缆还可能受土中酸碱物质的腐蚀等，这是它的缺点。具体施工方法见图2-25。

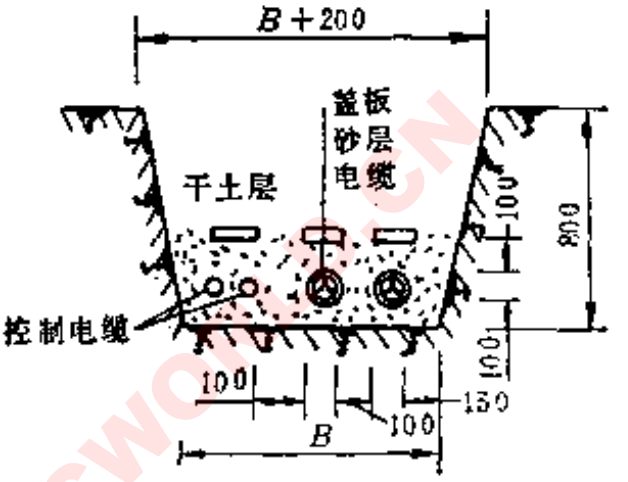


图2-25　10kV及以下电缆沟尺寸

施工注意：

（1）挖电缆沟时，如遇垃圾等有腐蚀性杂物，须清除换土。

（2）沟底须管平夯实，电缆周围砂层须均匀、密实。

（3）盖板采用预制钢筋混凝土板连续覆盖，如电缆数量较少，也可用砖代替。

（4）电缆与电缆交叉、与管道（非热力管道）交叉、与沟道交叉、穿越公路、过墙等均作保护管，保护管的长度应超出交叉点前后1 m，其净距离不应小于250mm。上述要求如图2-26所示。保护管的内径不得小于电缆外径的1.5倍。

（5）电缆与建筑物平行距离应大于0.6 m；与电杆接近时为0.6 m；与排水明沟距离应大于1 m；与管道平行距离为

WWW.PLCWORLD.CN

1 m，与热力管道为 2 m；与树木接近时为1.5 m。

严禁将电缆平行敷设在各种管道的上方或下方。

（6）在无永久性建筑物时，应埋设标示桩，电缆接头与电缆转角处也应埋设电缆标示桩，如图2-27所示。

（7）绘制竣工图。

（二）电缆沟敷设

这种方法是在电缆沟或隧道中敷设电缆，电缆根数较多。一般，敷设距离不长时，多采用此法，如室内电缆工程。

（1）电缆沟内电缆架设的情况如图2-28所示。

支架的地脚螺栓应在电缆沟支模时预先埋好，以免损坏防水层。沟内不应有浸水和油污。支架应刷防腐油漆。

（2）电缆沟两侧安装支架时，控制电缆及1000 V的电力电缆与1000 V以上的电缆，应尽可能在两面分开敷设。电缆沟单面支架时，电力电缆应在控制电缆的上方，并且用石棉水泥板隔开。

（3）用挂架沿墙敷设电缆的做法见图2-29，每个挂架间的距离为 1 m。

（4）电缆沟及隧道中敷设的电缆，应在引出端、终端以及中间接头和走向有变化处挂标示牌，注明电缆规格、型号、回路及用途，以便维修。当电缆进入室内沟道时，应将防腐麻层剥去（穿管保护除外），以防着火。

（三）排管敷设

排管一般用在与其他建筑物、公路或铁路相交叉的处所。此种方法优点是：①当电缆发生故障时，在人孔内即能修理，既方便又迅速；②利用备用的管孔随时可以增设电缆，不需挖开路面；③减少外力破坏和机械损伤。其缺点是：①工程费用高，需要建筑材料较多；②散热不良需降低

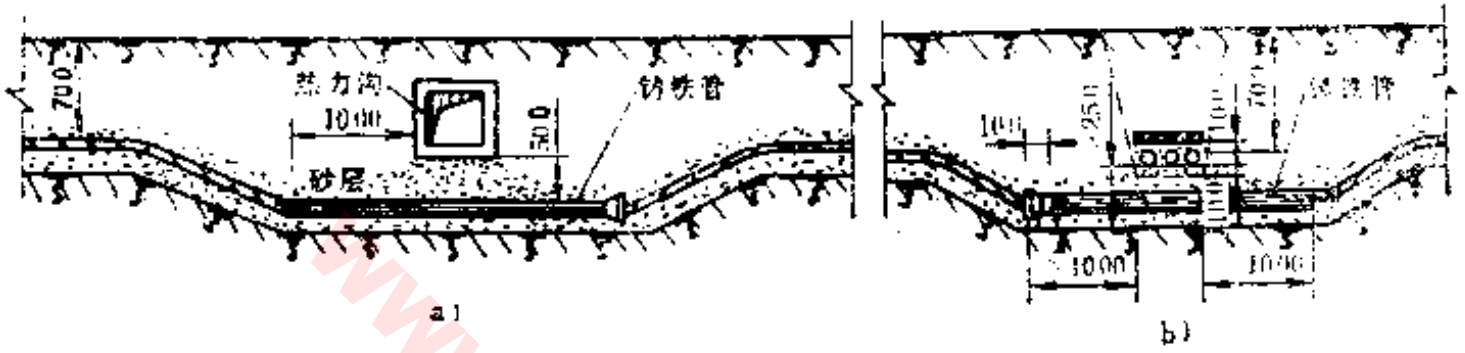


图2-26　电缆与热力管线交叉做法图

a）电缆与热力沟交叉做法图　b）电缆与电缆交叉做法图

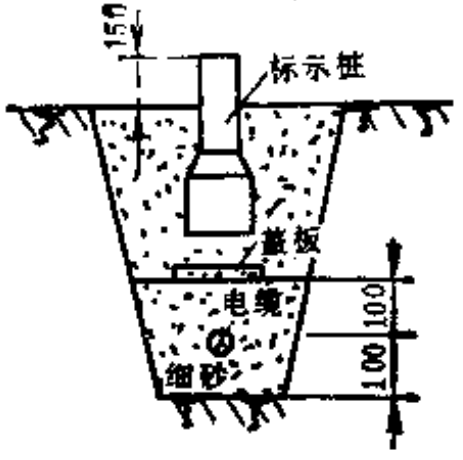


图2-27　标示桩安装图

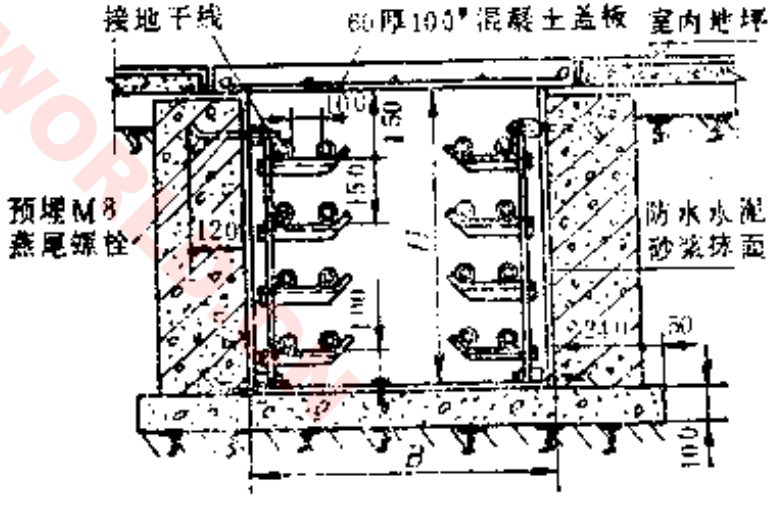


图2-28　8条以上电缆沟剖面

载流量（降低15%）；③施工复杂。具体施工方法如下。

（1）排管可用陶土管、石棉水泥管或混凝土管等，管子的内部必须光滑。将管子按需要的孔数排成一定型式，排列管子接头应错开，用水泥浇成一整体（图2-30），决定排管的孔数时，应考虑到将来发展的需要。可以是2孔、4孔、6孔、9孔等几种形式。

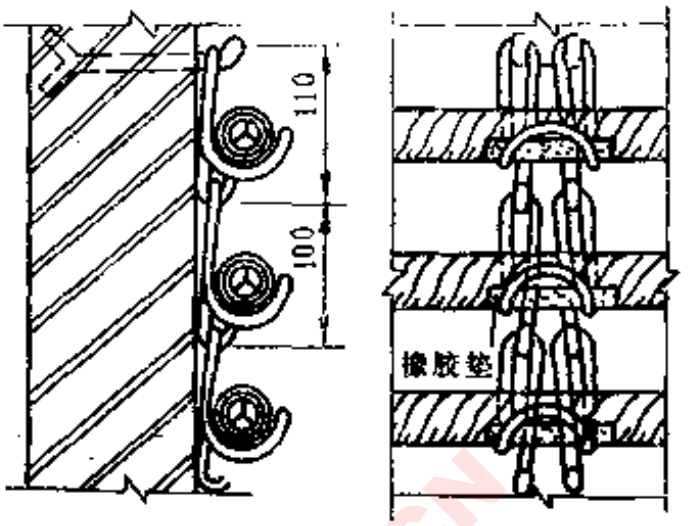


图2-29　圆钢挂架安装做法

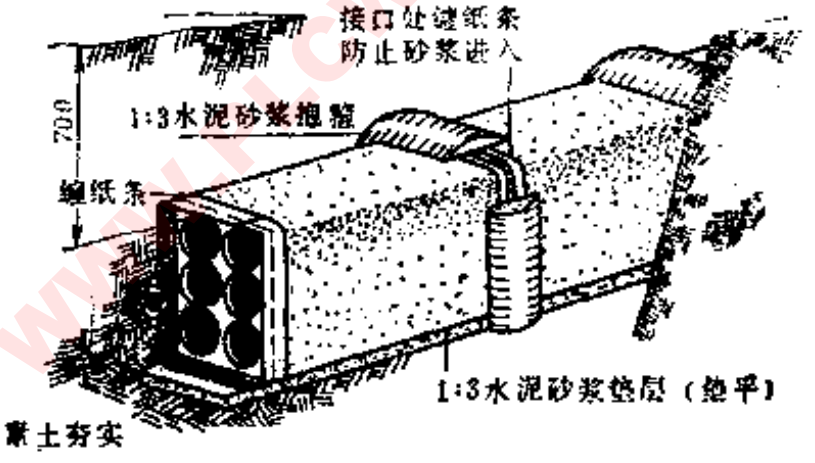


图2-30　电缆管块敷设做法示意图（普通型）

（2）排管孔眼应不小于电缆外径的1.5倍。对电力电缆，排管孔眼应不小于100mm；对控制电缆，排管孔眼应不小于75mm。

（3）排管埋入深度由排管顶部至地面的距离应不小于下列数值：在厂房内为200mm；在人行道下为500mm；在一

般地区为700mm。

（4）为了便于检查、敷设、更换和修理电缆，当直线距离超过100m的地方以及在排管转弯和分支的地方，都应设置排管井坑。井坑深度不应小于1.8m，人孔直径不应小于0.7m。

（5）在排管中敷设电缆时，把电缆盘放在井坑口，然后用预先穿入排管孔眼中的钢丝绳，把电缆拉入管孔内。为了防止电缆受损伤，排管口应套以光滑的喇叭口，井坑口应装设滑轮。电缆表面也可涂上滑石粉或黄油，以减少摩擦力。

三、电缆的试验

电力电缆敷设完工后，应进行电缆试验，并作好竣工图，作为移交验收资料。验收工作主要是检查电气设备的绝缘性能和移交竣工图，并作出技术总结。

电缆试验可分为竣工试验和运行中的定期试验。新敷设的电缆在运行前和运行两个月以后进行一次试验，以后每年试验一次。其内容如下。

1. 测量绝缘电阻

通常是在耐压试验前进行，1000V及以上的用2500V兆欧表来检验电缆的绝缘电阻值是否符合规定。表2-18所列是要求各种电压级的塑料电缆最低绝缘电阻值的参考数字。

表2-18　塑料电缆最低绝缘电阻数值　　（20℃）

电缆额定电压（kV）	1	6	10	20～35
绝缘电阻（MΩ）	40	1000	1200	3000

2. 耐压试验

用直流电压进行试验，试验电压标准见表2-19。

表2-19 直流耐压试验标准

电缆类型及额定电压U_0/U（kV）		直流试验电压标准	
		交接时	运行中
油浸纸绝缘电缆	8.7/10	6倍额定电压U	5倍额定电压
	21/35	5倍额定电压U	4倍额定电压
	6/6	6U	5倍额定电压
橡胶电缆	U=6kV	15kV	12kV
塑料绝缘电缆	U_0=26kV	104kV	84kV
	U_0=8.7kV	35kV	15kV
	U_0=6kV	24kV	15kV

注：U_0——电缆芯线对金属屏蔽层的额定电压。

试验持续时间：交接时，油浸纸绝缘电缆为10min；橡胶电缆为5 min；塑料绝缘电缆为15min。

1 kV电缆，一般不作耐压试验。

3. 测量泄漏电流

在作直流耐压试验的同时，用接在高压侧的微安表测量泄漏电流，油浸纸绝缘电力电缆参考数值如下：

泄漏电流三相最大不对称系数不应大于2。对于10kV及以上电缆的泄漏电流小于20μA。6 kV及以下电缆泄漏电流小于10μA时，其不平衡系数不作规定。

§2-7 电缆头的制作与安装

电力电缆敷设以后，两端要与电气设备或线路联接，长度不够的各段电缆又要相互联接，在这些部位电缆内部电场会发生畸变，产生电应力局部集中。又因为破坏了电缆原有的

密封性，使电缆接头的工作条件比电缆本体苛刻。据统计，电缆线路发生的故障，有70%出现在其接头部位。因此，电缆联接的质量直接影响电力电缆的电气强度、机械强度和密封性能，并对电缆线路的安全运行有重要作用。

电缆线路的末端接头叫终端头，电缆线路相互联接的接头叫做中间接头。由于安装施工是对接头材料和附件质量的最后一关检查，也由于导体联接、绝缘增强和外壳密封性最终取决于安装，因此，电缆接头的制作、安装是确保接头质量的重要一环。

一、电缆接头的基本要求

安装电缆接头必须满足下列基本要求。

1. 导体联接良好

电缆芯线与压接管联接良好，接触电阻要小，而且稳定。接头要与电缆本体一样，长久稳定地传输允许的载流量而不致过热，以避免电缆绝缘性能变坏。

2. 良好的密封性能

既要防止周围环境的潮气和导电介质侵入电缆内部，又要使油纸绝缘内的绝缘油不致漏出来。

3. 足够的机械强度

应能抵御在线路上可能受到的机械应力，以适应各种运行条件。

4. 良好的电气绝缘性能

电缆接头绝缘强度不应低于电缆本身的电气强度，并且要有一定的绝缘裕度，以满足各种运行状态下安全运行的要求。

电力电缆接头有终端头和中间接头两大类。安装在室内或室外的终端头因气候条件不同，在结构上有较大差别，分

WWW.PLCWORLD.CN

为户内型和户外型两种。

中间接头根据所联接电缆的数量，分别有直接式接头、T形接头、Y形接头和十字形接头。具有特殊功能的中间接头，则有隔断两端油浸纸绝缘电缆油路的堵油型（塞止式）接头和联接两端不同绝缘结构电缆的“异种电缆接头”等。

任何一种接头都应首先符合前述的基本性能要求，再符合相应的特殊要求。由于电缆类型差异，工作环境不同，因此，电缆接头的附件及具体操作工艺也是多种多样的。近年来，新技术、新材料不断涌现，国外新工艺陆续引进，使电缆附件出现了百花齐放的景象。在工程中，制作电缆接头应严格按照典型施工工艺或电缆附件制造厂的操作说明书作业，以确保接头的质量。

油浸纸绝缘电力电缆在配电系统中应用已有多年历史，它的制造成本低，工作寿命可达50年以上，电气性能优良，热和电的长期稳定性较好，各地已有丰富的使用经验。然而，油浸纸绝缘电缆容易淌油，电缆及接头要求高度密封，以防潮气侵入。

10kV及以下油纸电缆的户外终端头有鼎足式铸铁终端头、倒挂式铸铁终端头和扇形铸铁终端头。近年来又陆续采用电瓷、铝合金、环氧树脂或玻璃钢作为壳体、壳盖材料。

常见的10kV及以下室内油纸绝缘电缆终端头有预制环氧树脂壳式、现浇环氧树脂式及尼龙外壳式，其次有塑料手套干包式以及铅手套、瓷手套和铁皮漏斗式等品种。中间接头用得较多的是沥青绝缘胶灌注铅套管式和环氧树脂现场浇铸式。

目前，工矿企业配电系统中已广泛使用全塑绝缘电缆。全塑电缆的使用将使电缆敷设、电缆头制作变得更为简单。

全塑电缆终端头除绕包式外，还有模塑式、热收缩式、冷收缩式、浇铸式及预制式等。

根据当前工矿企业配电系统电力电缆的现状，并考虑到新技术不断推广，本书分别介绍常见的油纸绝缘电缆和全塑电缆接头典型工艺。

二、终端头和中间接头制作工艺

油浸纸绝缘电力电缆的终端头和中间接头制作工艺，有下述相同的步骤。

（一）准备工作

1. 接头材料与工具的准备

在接头以前，将所用的绝缘与密封材料及工具准备齐全。接头外壳应符合设计要求并预先组装。

2. 检查电缆是否受潮

检验的方法是，将电缆统包纸绝缘撕下一段，浸入加热的油中，如果油中泛起泡沫或有嘶嘶声，则说明绝缘已受潮。简单的办法是用火柴点燃绝缘纸，若没有嘶嘶声或白色泡沫出现，表明绝缘未受潮。经过检查，若发现电缆受潮，应将受潮部分的电缆逐段割去，直到没有潮气为止。

3. 测量电缆绝缘电阻

用兆欧表测量电缆芯线之间和芯线对地的绝缘电阻。1 kV 及以下电缆用 500 V 或 1000 V 的兆欧表；1 kV 以上电力电缆用 2500 V 的兆欧表或 5000 V 的兆欧表。

4. 核对相序

终端头的相序，应与电源侧一致。中间接头的相序应做记录，并保持两端相序一致。

（二）确定剥切尺寸，剥切钢带与铅包

1. 定位

终端头按其固定的位置和电气设备接线端的相对距离，确定锯钢带和剖铅包的起始点。中间接头应先确定接头的中心点，以中心点为准向两侧定出锯钢带和剖铅的起始点。

2. 绑铜扎线

用 2.5～4mm² 的铜线在锯钢带起始点缠绕 3～4 圈扎线，以防钢带松开。也有用钢带卡子卡紧的。在铜扎线的边缘将钢带锯一环形深痕，深度为钢带厚度的 2/3，锯完后用螺钉旋具在钢带锯痕的尖角处将钢带挑起，从而将钢带折断撕下。

为了可靠，往往要在钢带上缠绕两道铜扎线，两道之间的距离约为 20～30mm。缠绕铜扎线时要同时放置接地线。接地线一端在两道铜扎线间与钢带焊接，另一端则与铅包焊接。接地线的截面积一般为16～25mm²，长度按实际需要确定。

3. 剥除铅包

撕下钢带后，用喷灯稍微加热电缆，使沥青软化，用刀割下黄麻，将已软化的沥青除去，擦净铅包。在剥铅处用电工刀将铅包切一环形深痕，深度约为铅包厚度的一半。在铅包上用剥铅刀沿电缆长度方向切两道直线深痕，先撕下此铅条，再剥除铅包。用铅楔把铅包口胀成喇叭口，喇叭口要胀得圆滑。10kV 及以下电缆的喇叭口直径约为原铅包外径的 1.2 倍。

（三）弯扳电缆芯线

在各相芯线外先用聚氯乙烯带和白布带各包一个来回。然后根据联接的要求扳弯电缆芯线。芯线的弯曲半径应大于芯线直径的10倍，以防损伤电缆绝缘层。

（四）导体联接

电缆终端头在芯线端部套上接线端子。电缆中间接头则套上联接管。用压接钳将电缆芯线与接线端子（联接管）压接而成一个可靠的导电通路。

三、油浸纸绝缘电缆户内环氧树脂终端头

环氧树脂是一种含有环氧基的热塑性高分子化合物。在一定温度下，加入适量的硬化剂后就能成为遇水不溶、加热不熔的热固性树脂。固化后的环氧树脂具有良好的电气性能，机械强度好，成型工艺简单，与电缆的金属护套有较强的粘合力，耐腐蚀，耐老化。因而，环氧树脂终端头在工厂企业中得到了广泛应用。

油浸纸绝缘电力电缆户内环氧树脂终端头有现场浇灌式与预制外壳式两种。现场浇灌式要使用模具浇灌成形，工序较多，操作也麻烦，还要准备模具和各种器具，工效较低。预制外壳式则采用市场上出售的预制外壳浇铸。预制外壳可以是用高温固化剂生产的环氧树脂外壳，也可用整体挤塑成形的聚丙烯外壳。此种方法施工简便，密封性能好。近几年来，市场出售一种冷固化环氧树脂材料，用塑料袋分别盛装硬化剂和环氧树脂复合物（环氧树脂与填充剂的混合物），它们之间用夹子分开。浇灌前抽出夹子，约需揉捏10min。当袋中混合物颜色基本一致，并稍微发热后，剪去袋的一角，将袋内环氧树脂配料浇入预制外壳。这样就使终端头的制作工艺大大简化。下面介绍预制外壳式油浸纸绝缘电缆终端头的操作工艺。

环氧树脂电缆头预制外壳分为四种规格，外形如图2-31所示。预制外壳的尺寸见表2-20。

环氧树脂预制外壳终端头的外形示意图可见图2-32。

1．准备工作

表2-20　环氧树脂预制外壳尺寸表

型号	外　壳　尺　寸　(mm)				
	H	D_1	D_2	D_3	D_4
1号	105	72	55	33	41
2号	115	86	68	43	51
3号	120	100	82	53	62
4号	130	110	90	63	72

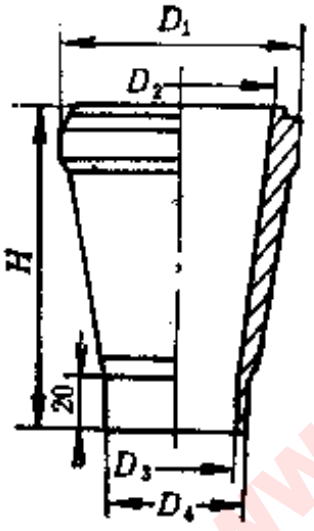


图2-31　户内终端头用环氧预制外壳

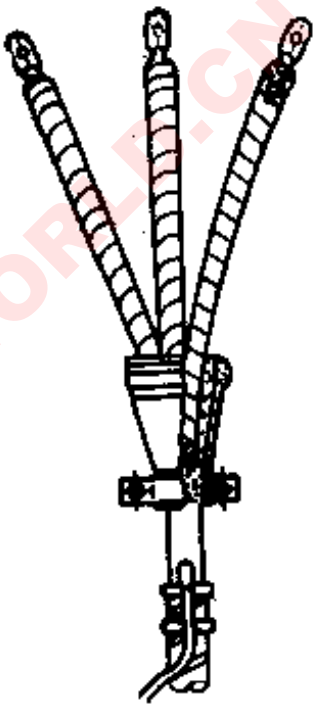


图2-32　环氧树脂预制外壳终端头示意图

准备工具、材料，检验电缆端部绝缘是否受潮，核对相序，剥钢带及铅层，焊接地线等如前已述。

2. 量取所需长度

根据设备接线位置将多余的电缆割去。由割铅口引出的端头线长度不应小于300mm，锯钢带处到割铅口的尺寸--

WWW.PLCWORLD.CN

般约为70～80mm，或取长一些约150mm，由喇叭口向下30mm的铅（铝）包用钢丝刷、木锉或细齿锯条拉出粗糙面，用浸有工业酒精的棉纱头擦去金属护套层上的油污、细屑，再用塑料带临时包扎2～3层，以防弄脏护套。

3. 剥除统包绝缘纸

分开线芯，在喇叭口向上30mm的统包绝缘层上，可用白纱带或聚氯乙烯带临时包扎3～4层，以防碰上油污及弯扳芯线时受伤，再由上而下将统包绝缘纸撕掉。割掉线芯间的填充麻（纸）索，把芯线小心地分开，用沾有汽油的白布把芯线表面的电缆油擦干净，芯线绝缘上包一层聚氯乙烯带（或黑玻璃丝带）。

4. 剥除芯线端部绝缘纸

用电工刀剥绝缘纸，剥开长度为接线端子的套管孔深加5mm。

5. 套耐油橡胶管

耐油橡胶管套至离统包口约10mm处为止。这是为了避免三根芯线的橡胶管在根部相互影响。

6. 压接接线端子

在压接前，应将接线端子的管形部分用木锉拉毛。铜、铝接线端子均用油压钳（或机械压钳）压接。

7. 套预制环氧树脂外壳

预制电缆终端头外壳要擦拭干净后再套入电缆芯线。为防止弄脏电缆头外壳的内壁，要用干净的棉纱头塞满环氧树脂壳的内部。

环氧树脂预制外壳和耐油橡胶管的选用，见表2-21。

8. 包扎芯线

首先，拆除统包纸上的临时包扎带，由喇叭口起，向上

表2-21　环氧树脂壳体和耐油橡胶管的选用

电缆截面 (mm^2)	6kV电缆		10kV电缆	
	壳体号数	橡胶管内径 (mm)	壳体号数	橡胶管内径 (mm)
16	1	11	2	11
25	1	11	2	11
35	2	13	2	13
50	2	15	2	15
70	2	17	3	17
95	3	19	3	19
120	3	21	3	21
150	3	23	3	23
185	3	25	4	25
240	4	27	4	27

约125mm，用烘干并经脱蜡处理过的无碱玻璃丝带半叠法包绕。在包绕的同时，丝带表面要刷环氧树脂涂料，边涂边包共包二层。三叉口用涂环氧树脂的无碱玻璃丝带来回交叉包绕，收紧三次，并在三叉口内填满环氧树脂填料。统包纸外的丝带要包到喇叭口以下约10mm。

芯线部分以无碱玻璃丝带涂环氧树脂涂料包绕两层，接线端子的管形部分与耐油橡胶管接合处要刷环氧涂料，再用无碱玻璃丝带包绕接线端子的管形部分。

环氧树脂涂料的配比（重量比）如下：

环氧树脂（6101#）　　100份

聚酰胺树脂（651#）　　35～45份

9．固定环氧树脂预制外壳、浇灌环氧树脂

用聚氯乙烯带包扎，带住环氧树脂外壳，使外壳平整地固定在电缆上。要求电缆金属护层伸入壳体约30mm。将伸

WWW.DLC.WORLD.CN

出端头线调整好，并尽量将接线端子压在电气设备接线板上，使各相端头线间及各相对环氧树脂外壳的间距相等。

当包扎芯线与统包层的无碱玻璃丝带环氧树脂涂料固化后，就可配置环氧树脂复合物灌注料，一直灌满外壳为止。

环氧树脂复合物的配比（重量比）为：

6101*环氧树脂	100份
651*聚酰胺树脂（硬化剂）	35～45份
石英粉（填充料）	100～150份

配制时，将环氧树脂与烘干的石英粉按比例放入配料罐中加热（可加热至120℃），用搅棒不断搅拌，待粘度均匀后，停止加热。温度降至80℃（夏天为70℃）时，加入聚酰胺树脂，迅速搅拌，均匀后浇灌。

采用冷固化环氧树脂复合物，浇灌方便，对于抢修电缆头故障或在无法加热的场合是非常适宜的。

10. 绕包外护加固层

当浇入外壳的环氧树脂固化后，从环氧树脂外壳平口起至接线端子止，绕包聚氯乙烯带一层，再包玻璃丝带两层。最后按已确定的相位分别在各芯线上包绕一层黄、绿、红色塑料相色带和一层透明聚氯乙烯带。最后按设备的接线位置，再次弯扳芯线。并经耐压试验合格，将电缆端头线上的接线端子固定在电气设备上。

制作一个户内环氧树脂终端头，所需的主要材料可参考表2-22。

其他类型的油浸纸绝缘电力电缆户内环氧树脂终端头的安装工艺，与以上介绍的情况大同小异，制作者可参照电缆附件厂提供的安装说明书进行操作，也可参照本节内容操作。

表2-22　环氧树脂外壳铸终端头需用材料定额

材料名称	规　格	单位	数量
终端头外壳	配合电缆截面	套	1
透明聚氯乙烯带	0.23×25mm	kg	0.5
黑玻璃丝带	50m×0.15×25mm	卷	1
相色带（聚氯乙烯带）	黄、绿、红三色	m	各5
封铅	铅65%，锡35%	kg	0.25
接线端子	配合电缆截面	只	3
汽油	工业用	kg	0.5
接地线	16～25mm²铜绞线	m	1
硬脂酸	1级	kg	0.1
环氧树脂	6101#，E44	kg	0.6
聚酰胺	651#	kg	0.2
石英粉	180目	kg	0.5
耐油橡胶管	氯丁或丁腈橡胶	kg	0.3
玻璃丝带	白色，无碱	卷	1
酒精	工业用	kg	0.25

四、油浸纸绝缘电缆中间接头

在工厂建设工程中，常因电缆长度不够而需将两根电缆联接起来。有时已经投入运行的电缆线路发生故障时，需将故障点切除，再将电缆联接起来，这个接点就是中间接头。

10kV及以下油浸纸绝缘电力电缆的中间接头，主要包括接头盒、绝缘绕包带与绝缘灌注剂。常用的中间接头盒有铅套管、钢套管、铸铁盒、硬聚氯乙烯套管等，绝缘灌注剂则有沥青绝缘胶和环氧树脂。

环氧树脂现场浇注中间接头，操作工艺简单，堵油性能、防水性能、电气和力学性能都很好，体积较小，成本低，因而被广泛应用。

现场浇注式环氧树脂中间接头，使用薄铁皮模具，模具

上下两片，用螺栓固定，如图 2-33 所示。图 2-33 的模具尺寸见表 2-23 。

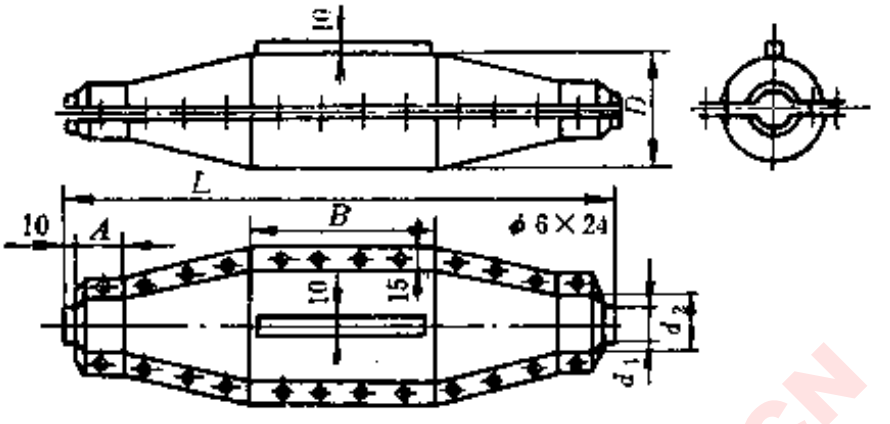


图2-33　环氧树脂中间接头模具

表2-23　环氧树脂中间接头模具尺寸

模具号数	电缆电压等级（kV）	适用电缆截面（mm²）	模具结构尺寸（mm）					
			L	D	A	B	d_1	d_2
1	1～3 6～10	95及以下 50及以下	420	80	30	140	30	40
2	1～3 6～10	120～185 70～120	480	100	30	160	44	52
3	1～3 6～10	240 150～240	520	115	30	170	54	64

环氧树脂中间接头的结构尺寸如图 2-34 所示，图中各字母所表示的尺寸见表 2-23 。它是利用图 2-33 的铁皮模具浇铸环氧树脂复合物，待环氧树脂硬化后，拆去模具而成型。有时因急于抢修来不及准备模具，可以按模具中 D 和 L 的要求，找一根硬聚氯乙烯管或金属管，开两个浇注孔，以代替铁皮模具。浇灌环氧树脂后也用不着拆模。

图 2-34 中，δ_1 为芯线对地绝缘，一般取 10mm 以上。

WWW.PLCWORLD.CN

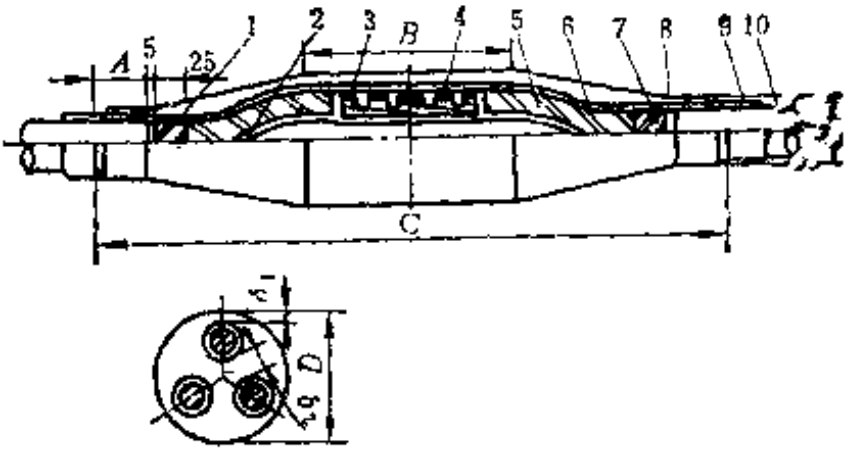


图2-34　环氧树脂中间接头结构尺寸

1—统包涂包绝缘带　2—三叉口涂包层　3—压接管　4—压接管涂包层　5—芯线绝缘纸　6—芯线涂包绝缘带　7—统包绝缘纸　8—半导体纸　9—铅包表面防腐层　10—铅包

表2-24　环氧树脂中间接头尺寸表

接头号数	适用电缆截面（mm²）	各部位尺寸（mm）						
		C	D	A	B	d	δ_1	δ_2
1号	1～3 kV　95及以下 6～10kV　50及以下	420	80	40	140	40	10	18
2号	1～3 kV　120～150 6～10kV　70～120	480	100	40	160	52	10	22
3号	1～3 kV　240 6～10kV　150～240	520	115	40	170	64	12	22

线间距离 δ_2 按绝缘等级应比 δ_1 大，通常取 δ_2 大于17.3mm（因为线电压是相电压的$\sqrt{3}$倍）。

环氧树脂中间接头的制作工艺如下。

1. 准备工作

清理现场，调直电缆末端，将电缆两端部用支架撑起，使之水平。在室外做中间接头要搭好临时帐篷，以防尘土和

雨水。操作前要准备好工具材料，并用干净铁盘盛放，以保持清洁。

2. 锯钢带、剖铅包

确定电缆接头的中心位置，由接头中心向两边各量1/2模具长度加100mm，即在此处锯钢带。剖铅包尺寸需使环氧树脂的粘附长度不小于40mm，按此要求来量尺寸。其余如胀喇叭口、剥切绝缘纸等均与室内终端头的工艺尺寸相同。

3. 临时包扎

喇叭口以外40～50mm的铅包用木锉或钢丝刷打毛，用汽油洗净后，在打毛的铅包上用聚氯乙烯带临时包扎。

4. 芯线联接

剥切统包绝缘后，用聚氯乙烯带临时包扎统包层。扳弯电缆芯线，注意不得弯伤芯线的绝缘，按照压接管长度剥切芯线端部绝缘、压接芯线，使之成为导电通路。压接管表面打毛、洗净。拆去临时包扎带。

5. 包扎堵油包带

用无碱玻璃丝带并涂刷环氧树脂涂料作为堵油包绕层，共包两层。三叉口堵油包带要多次勒压收紧，以形成紧密的堵油绝缘层。沿统包绝缘包扎玻璃丝带时，要一直涂刷涂料至喇叭口以外40～50mm的铅包上，包2～3层。在包玻璃丝带时，用力要均匀，务求扎紧。涂包结束后，要用红外线灯泡或电吹风对准涂包处加热，以加速环氧树脂涂料的固化。

6. 装置铁皮模具

为便于脱模，金属模具内壁涂一层脱模剂（如硅油等）。装模具时要注意把电缆的三根芯线放在模具的中央，模具两

端用聚氯乙烯带和玻璃丝带包衬至与模具端部内径相等。

7. 浇灌环氧树脂复合物

环氧树脂复合物的配比与室内环氧树脂端头相同。环氧树脂的用量与模具大小有关，对于1#、2#、3#模具，环氧树脂的用量分别为1、1.3、1.5 kg。

8. 焊接地线

中间接头两端的铅包与钢带上用多股铜线跨焊接地线，接地线使两段电缆的钢带、铅包联接，使之成为电气通路。

9. 接头防腐和机械保护

埋于地下的电缆中间接头在其表面涂刷沥青。在铅包与环氧树脂复合物接合处，用聚氯乙烯带边包边涂沥青，包绕3～4层。为了防止接头遭受外部机械力损伤，可以预先将中间接头下部的土夯实，并在电缆接头处砌一个电缆井，上面盖预制水泥盖板或钢板，并做好醒目的标志。也可用一根直径比电缆头直径大的钢管对半剖开，在剖开的管子上焊上联接耳，将钢管扣在电缆接头处，再用螺栓固定。

五、10kV交联聚乙烯电缆绕包式终端头

目前，高电压电力电缆多采用交联聚乙烯绝缘聚氯乙烯护套的结构。塑料绝缘电力电缆的绝缘层是一次性热挤出的固态绝缘结构，因而不会像油纸绝缘电力电缆那样渗油，吸潮后的反应也不太灵敏。全塑电缆的接头附件从总体上看，其结构比油浸纸绝缘电缆接头简单，外形尺寸小，接头工艺简化，施工时间可大大缩短，密封的要求相对宽一些。绕包型全塑电缆终端头就是价格便宜而操作又简便的一种终端头形式。

10kV塑料绝缘电力电缆的户外终端头（图2-35）下部结构与户内终端头完全相同，户外终端头上部多加一个防雨

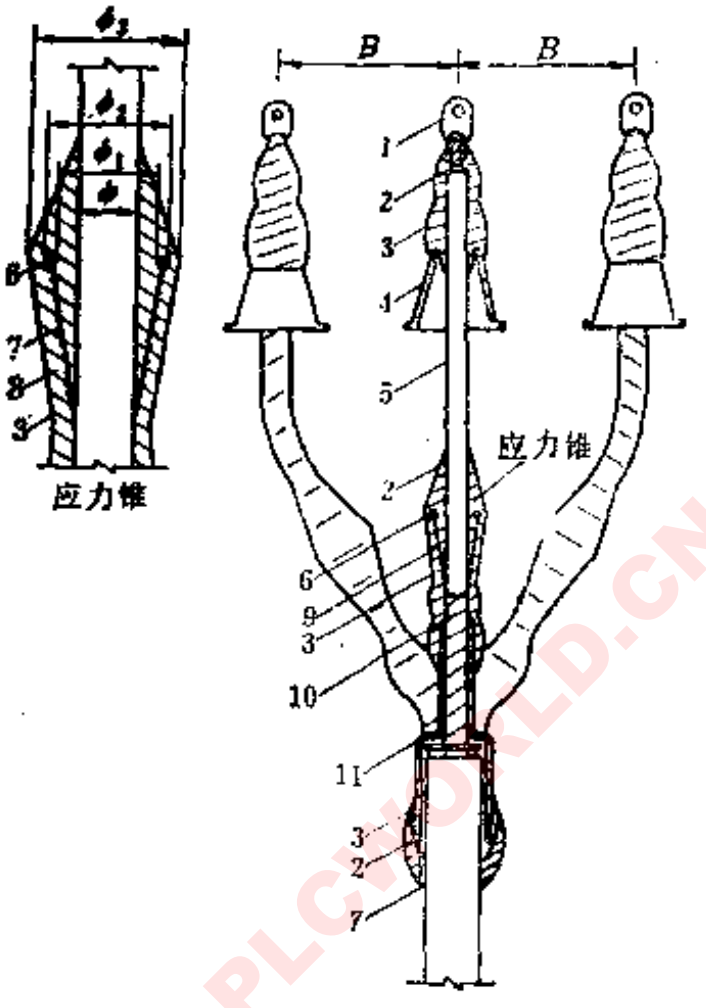


图2-35　高压全塑电缆绕包式终端头结构尺寸

1—接线端子　2—自粘性橡胶带　3—二层半搭盖塑料胶粘带　4—防雨罩（室外用）　5—电缆线芯绝缘　6—软铅丝屏蔽环　7—接地铜线　8—半导体布带　9—铅屏蔽带　10—电缆屏蔽层　11—三芯分支手套

ϕ—电缆绝缘线芯外径　$\phi_1=\phi+16$　ϕ_2—应力锥屏蔽外径　$\phi_3=\phi_2+4$　B—室外安装时≥200mm　室内安装时≥125mm

罩。因此，本节将它们放在一起叙述。

1．固定电缆末端

根据出线的需要留取电缆末端长度，将电缆末端按所定位置固定。

2．剥切电缆

按终端头的结构确定剥切尺寸，依次剥去电缆外护套、钢带、内衬层及填芯、铜屏蔽带、半导电层和各相末端绝缘。

3．焊接地线

将多股镀锡软铜线一端分为三股，分别绑扎在三相线芯分叉处预留铜屏蔽带上，并分别用锡焊焊牢。另一端与钢带锡焊后引出。

4．装上分支手套

选用的分支手套的内径一般略大于电缆外径（可参考电缆附件厂的分支手套选用表）。在测量电缆外径尺寸后，先用自粘性橡胶带在电缆外护套、钢带上和电缆芯线根部、预定装手套的部位包绕，作为手套内部的填充，以提高密封性。

5．切剥铜屏蔽带

将手套指部上端50～70mm的铜屏蔽带用扎线扎紧，将扎线以上的铜屏蔽带切除，切断处的屏蔽铜带尖角应向外翻折。

6．剥去半导电层

在铜屏蔽带以上留10mm半导电层。

7．擦拭绝缘线芯表面

用无水酒精润湿的布擦拭电缆线芯。

8．包绕应力锥

6～10kV的电缆要包绕应力锥。

（1）使用自粘性橡胶带包绕成橄榄形增强绝缘，自粘带应自下而上包绕，下口离电缆本体半导电层5 mm，然后反复上下，按图2-35所示尺寸包绕成型。

（2）应力锥的下半部分外表面应呈内凹形，实际上可

保持直线，切不可外凸。

（3）应力锥成型后，其下半部分包一层半导电橡胶带，仔细地填平电缆外导电层与增绕绝缘带之间的5mm间隙，然后往上包绕，包至应力锥的最大直径处。

（4）半导电层外用直径2mm的软熔丝平绕一层，下端与铜屏蔽带焊接。

（5）以直径5mm的软熔丝圆环构成屏蔽环，并与内部的熔丝焊牢，最高点不允许超过应力锥最大直径处。

（6）用自粘性橡胶带和聚氯乙烯粘胶带在应力锥外包绕，并封住手套指口。

9. 压接接线端子

按常规工艺压接接线端子。并用自粘性橡胶带封住接线端子下口。

10. 线芯绝缘保护

用相色塑料粘胶带分别在各线芯上包绕，从接线端子开始，缠绕至分叉手套指部后，再绕包回接线端子处，以明相别。

11. 加装防雨罩

户外电缆头需装雨罩，在距接线端子端部70～80mm处，绕包一突起的防雨罩座，再套上防雨罩、并做好防潮锥。

12. 固定整个电缆终端头

将电缆终端头固定在支架上，弯好线芯，最后将线芯端子接到电气设备上。

六、塑料绝缘电缆热收缩式终端头

利用高分子材料制作的热收缩电缆附件是近年来开发、推广的一种新型技术。热收缩电缆附件是将已经具有交联特征的材料（如交联聚乙烯，硅橡胶）通过成型加工，制成相

WWW.DLCWORLD.CN

应形状的部件，在热态下予以扩张，然后迅速冷却，使高分子材料分子延伸，在具有弹性的状态下突然结晶成型。当安装时，通过加热使之达到高分子材料结晶熔化点以上的温度，再让它自然冷却，此时，由于网状结构的高分子材料具有分子内应力，因此能收缩到扩张前的尺寸，这就是高分子材料的“弹性记忆”能力。

热收缩式电缆附件是采用制成管状、有孔套筒状（如分支套）和圆盘状（如雨裙）的器件，逐件套到电缆终端头的特定部位，逐次加热收缩，从而使电缆终端达到绝缘、密封的目的，电缆终端头的电气性能明显提高。

热缩电缆附件安装工艺简便、易于施工、省工省时、对操作者要求不高；与其他电缆附件相比，热缩附件体积小、重量轻；热缩附件没有金属壳体和瓷件，材料均系软质橡塑制品，在事故中不会形成危害严重的爆炸；热缩电缆附件对环境的适应能力强，而一套附件能用于多个截面规格的电缆。在电压级别上，热缩终端头附件已达到66kV，热缩中间接头附件一般为35kV及以下。热缩附件不仅适用于橡塑绝缘电缆，也可用于油纸绝缘电缆。

6～10kV交联聚乙烯电力电缆热缩型三芯终端头的制作工艺如下所述。

1．剥切电缆

固定好电缆端部，并按尺寸要求分别剥去电缆外护层、钢带、内衬垫层，铜屏蔽带和半导电层。外形图如2-36所示。

2．焊接地线

将扁平铜编织软线一端拆成三股，分别扎紧在各相铜屏蔽层上，用锡焊焊牢，然后将接地线与裸出的电缆钢带焊牢

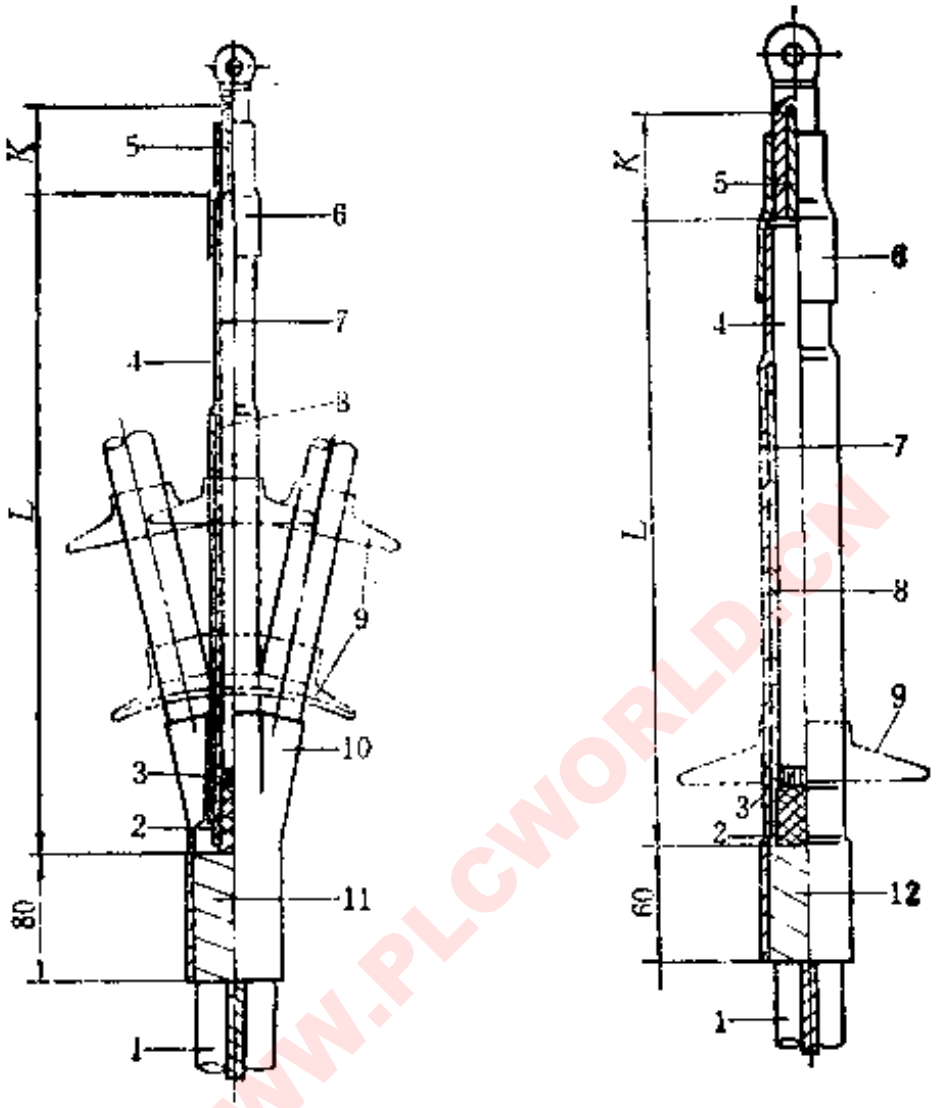


图2-36　6～10kV热缩终端头示意图

1—外护套　2—金属屏蔽带　3—半导电屏蔽层　4—绝缘　5—导体　6—密封套　7—防大气老化套管　8—应力控制管　9—绝缘子　10—三叉分支管(三芯)　11—密封带(三芯)　12—密封带(单芯)

后向下引出。

3．压接接线端子

4．各相芯线安装应力控制管

用清洗溶剂和清洗纸将缆芯绝缘表面清洗干净，将热缩

WWW.PLCWORLD.CN

应力控制管套入电缆芯线，下端盖住预留的电缆芯线外半导电层，并与铜屏蔽层搭接，然后用喷灯加热，控制温度为120～140℃，自下向上收缩，三相先后加热，以完成此工序。

当工厂提供自粘性应力控制带时，亦按上述尺寸绕包，其长度为160mm。

5．安装分支手套

用密封胶带绕包、填平电缆芯线分支处、空隙及内衬垫裸露部分的凹陷处。将分支手套套至电缆芯线三叉口根部，然后从分支手套交叉处开始向下端袖口方向加热收缩，再从三叉处向手指方向加热收缩。

6．安装绝缘护套管

清洗分支手套的手指，并从手指端部向下绕包一层密封胶带。各相分别套上绝缘外护套管，下面套住手指约35～40mm，然后由下向上加热收缩套管。

7．安装接线端子密封套管

用密封胶带填平或包平端子上的压坑和端子下的裸露导线。套上密封套管，从接线端子向缆芯方向加热收缩。

8．安装雨裙（根据室内外环境和电压等级确定）

以溶剂清洗绝缘外护套管的表面，在规定的位置套上雨裙，再加热收缩。

注意：加热热收缩管的热源最好是丙烷喷灯和大功率电吹风机，也可用汽油喷灯。在加热时，要使热源与热收缩管保持一定距离，加热工具要连续移动，不能使热收缩管局部过热，热收缩管经加热后应收缩均匀，并能清晰看到内部结构的轮廓。

§2-8 车间（低压）配电线路的安装与车间电力负荷的计算

一、电气线路安装概述

车间配电线路是从车间变电所到用电设备的线路，它是工厂供电系统的组成部分，它将电能输送给各用电负荷。

（一）车间配电线路的一般要求

（1）要求线路布局合理，整齐美观，安装牢固，操作、维修方便，最重要的是能够安全可靠地输送电能。

（2）配线方式的选择：车间配电线路的敷设方式有明配线和暗配线两种，所使用的导线大多为绝缘线和电缆，也可用母排或裸电线。敷设方式和应用的导线种类要根据生产车间的周围环境和经济技术的合理性来选择。并考虑到安装及维修条件、以及安全要求。参见表2-25。

（3）车间照明线路，每一单相回路的电流不应超过15 A，并应用15 A以下的熔丝保护。除花灯和壁灯等线路外，一个回路灯头和插座总数不超过25个。当照明灯具的负载超过30 A时，应用380/220 V三相四线制供电。照明的回路要考虑工艺流程和线路敷设的特点分组，力求使三相线路的各相负载平衡。三相四线制线路中，相线经过开关接在螺口灯头中心触点的接点上，而将中性线接在灯头螺纹部分的接点上，以保证用电安全。

（4）无论采用哪种配线方式都要尽量避免导线接头，导线接头不好往往是事故的根源。要尽可能将导线接头放在接线盒和灯头盒内。并且不使导线的接头、分支处受到机械力的作用。为了确保安全用电，对导线的机械强度有一定的要求，见表2-5。

表2-25　室内配线方式选择表

敷设方式	周围环境特性（有○者表示适用）						说　　明
	干燥	潮湿	腐蚀	易爆	易燃	多尘	
瓷夹配线	○						适用于电量小的场所
粘接配线 钢钉塑料线夹	○						适用于电量较小的塑料线夹、瓷夹等配线场所，施工简单方便
瓷瓶配线	○	○			○	○	适用于用电量较大，线路较长的场所
塑料扎头配线	○					○	适用于用电量较小，要求整齐、美观的场所。较管配线经济
钢管明配	○			○	○		适用于用电量较大，又容易被碰撞的线路
钢管暗配		○			○	○	
硬塑料管明配	○	○	○			○	适用于用电量较大的场所。配管方便，缩短施工时间，较钢管便宜
半硬塑料管暗配	○					○	
钢索配线	○						适用于厂房较高，要求提高照度的场所，便于灯具布置
铅包电缆配线	○	○	○				适用于用电量较小的场所，如人防工程、地下室及建筑物外露天的地方
塑料护套线配线	○		○				适用于用电量较小的场所，常用铝皮卡固定
电缆配线	○	○	○	○	○	○	用于用电量较大的配电干线及大容量用电设备

WWW.PLCWORLD.CN

（5）为了确保安全用电，车间内部的电气管线和配电装置与其他管线设备间的最小距离应符合要求。当不能满足要求时，则应采取必要的措施。如：电气管线与热力管线距离过近时，应在热力管线外包隔热层。

（6）在采用塑料管和钢管配线时，必须注意管孔的直径和弯曲半径，以及中间接线盒、分支接线盒、拉线盒的布置，均应保证能顺利地向管内拉线和换线，而不会损伤导线绝缘。一般要求管内导线的总面积（包括绝缘层）不应超过线管内总截面积的40%。

（7）对于工作照明回路，在一般环境的厂房内，管配线时一根管内导线的总根数不得超过6根，而在有爆炸、火灾危险的厂房内不得超过4根。

（二）车间照明配线的敷设工序

（1）根据设计图样的要求确定照明灯头、控制开关、插座及照明配电箱的位置。

（2）根据设计图样，结合建筑物的结构特点，以及各电气设备的相对位置，确定线路走向和穿过楼板或梁、墙的位置。

（3）根据建筑物结构特点及敷设方式，在土建施工中，预埋木砖、木条、螺栓，或在粉刷前，将配线的所有固定点打好洞眼，埋没膨胀螺栓，木砖等。

（4）装设配线支持物（如瓷瓶、瓷夹）和管卡，线夹。

（5）敷设导线。

（6）完成导线的联接、分支和封端。

严格地按操作规程和设计图样施工，在生产过程中定期维修，保证车间照明线路的良好工作状态。

WWW.PLCWORLD.CN

二、车间电力负荷的计算与线路设计

车间电力负荷的计算，目的在于按发热条件选择和校验线路电气元件和变压器、计算线路电压损失和选择保护装置等，使电气设备和材料得到合理使用。负荷电流计算太大时，将增大线路和电气设备的容量，浪费有色金属和投资；计算过小时，则温升过高，影响线路及电气设备的正常运行，造成过早损坏。

用电负荷的大小是由工厂工艺特点及专用设备负荷情况等因素决定的，为了计算准确，设计时需要加强调查研究，了解负荷分布情况，并考虑有适当发展的可能。

（一）车间电力负荷计算

1．计算容量的确定

在具体安装与使用一台电动机时，只知道铭牌中的一些技术数据往往是不够的，还需要根据有关的数据经过计算，求出我们所要知道的一些数值。例如我们常常需要知道一台电动机正常工作时占用电源设备多少容量或自电源取用的电功率是多少。

（1）电动机的计算容量分以下两种情况。

1）长期工作制的电动机，计算容量等于其铭牌上的额定功率除以电动机的效率，即

$$P_C = \frac{P_N}{\eta}$$

式中 P_N——电动机铭牌功率（kW）；

η——电动机在额定负荷时的效率。

2）反复短时工作制的电动机，计算容量即为设备容量，是指换算为统一暂载率（ε）的额定功率。换算公式如下（采用需要系数法时，统一换算至 $\varepsilon = 25\%$）

$$P_C = 2P_e\sqrt{\varepsilon_N} \tag{2-13}$$

式中 P_C——用电设备的计算容量（kW）；

P_e——换算前的电动机铭牌功率（kW）；

ε_N——电动机铭牌的暂载率，又叫负载持续率（%），或用符号FS%表示。

（2）电焊机及电焊装置的计算容量，亦为设备容量。这类设备容量是指换算为 $\varepsilon = 100\%$的额定功率，即

$$P_C = S_e\sqrt{\varepsilon_N}\cos\varphi \tag{2-14}$$

式中 S_e——电焊机铭牌容量（kVA）；

$\cos\varphi$——额定功率因数。

（3）电炉变压器的计算容量，亦为设备容量

$$P_C = S_N\cos\varphi \tag{2-15}$$

式中 S_N——变压器的额定视在功率（kVA）。

（4）车间照明设备容量等于其标志上的额定功率。

2．电力负荷计算

计算负荷是采用30min时间间隔的负荷最大值，是按发热条件选择电气设备和元件，确定网路电压损失的数值。

采用需要系数法确定计算负荷，计算方法简单，适用于初步方案的估算，目前已普遍地作为确定车间变电所和全厂负荷的主要计算方法，但不适用于用电设备台数少，容量差别大的分支干线负荷计算。

（1）单组用电设备的负荷计算

$$\left.\begin{aligned} P_{30} &= K_n P_e \\ Q_{30} &= P_{30}\tan\varphi \\ S_{30} &= \sqrt{P_{30}^2 + Q_{30}^2} \end{aligned}\right\} \tag{2-16}$$

式中 P_e——用电设备的计算总容量（kW）；

P_{30}——最大负荷班内，半小时平均负荷中最大有功功

率值（kW）；

Q_{30}——最大负荷班内，半小时平均负荷中最大无功功率值（kvar）；

S_{30}——最大负荷班内，半小时平均负荷中最大视在负荷值（kVA）；

K_n——需要系数（见表2-10）；

$\tan\varphi$——功率因数的正切值。

（2）多组用电设备（确定车间变电所）的负荷计算

$$\left.\begin{aligned}\Sigma P_{30} &= K_\Sigma \Sigma(K_n P)\\ \Sigma Q_{30} &= K_\Sigma \Sigma(K_n P\tan\varphi)\\ S_{30} &= \sqrt{(\Sigma P_{30})^2+(\Sigma Q_{30})^2}\end{aligned}\right\} \qquad (2\text{-}17)$$

式中 K_Σ——最大负荷的同期系数（一般为0.75～0.95），要考虑用电设备台数的影响和设备容量的变化。车间变电所取$K_\Sigma=0.8$。

车间电力负荷计算举例如表2-26。

表2-26 车间电力负荷计算举例（单组）

用电设备组名称	设备容量 P(kW)	K_n	$\tan\varphi$ ($\cos\varphi$)	计算负荷 P_{30} (kW)	计算负荷 Q_{30} (kvar)	计算负荷 S_{30} (kVA)
机床电动机	110	0.14	1.73 (0.5)	15.4	26.6	
电热设备	317	0.7	0.2 (0.98)	222	44.4	
通风机	126	0.75	0.75 (0.8)	94.5	70.1	
吊车	14	0.15	1.73 (0.5)	2.1	3.6	
电焊机	120	0.4	2.86 (0.35)	48	128.6	
照明	25	0.8		20		
共计	712			402	273.3	486

WWW.PLCWORLD.CN

计算全厂电力负荷时，则根据计算结果 S_{30} 逐级相加，要注意乘以各级配电点的不同的同期系数。

（二）车间供电线路的设计

1．车间配电干线截面的选择

根据电力负荷计算，视车间配电干线的线路长度，按允许电压损失或按导线的允许截流量来选择导线截面，或选择其他条件后按导线的截流量来校验，以保证设备正常运行。

（1）按允许截流量选择绝缘电线和电缆。选择导线截面应满足下式

$$I_a \geqslant I_{C1} = \frac{P_{30}}{\sqrt{3}\,U_1 \cos\varphi} \qquad (2\text{-}18)$$

式中 I_a——电线、电缆按发热条件允许的长期工作电流（见附录A～D）（A）；

I_{C1}——线路计算电流（A）；

$\cos\varphi$——各台电动机的平均功率因数，一般在0.75～0.85之间；

U_1——额定线电压（V）。

（2）按允许电压损失选择导线。为了简化计算，可把全部负荷集中在线路的末端来考虑，根据电压损失的计算公式来选择导线的截面。所以

$$S = \frac{\Sigma P_{30} l}{CV} \quad (\mathrm{mm}^2)$$

（3）按环境选择电线、电缆及其敷设方式，见表2-25。

2．车间动力线路的配电方式

在低压配电系统中，配电方式的选择应该根据以下各项进行考虑：用电设备对供电可靠性的要求；是否适应厂房的

WWW.PLCWORLD.CN

生产环境；要求结构简单可靠；便于进行维护；要节约有色金属、降低造价，经济指标要合理等。

常用的低压配电线路的接线方式有以下三种。

（1）放射式配线：这种配电方式适合于负荷点比较分散，而各个负荷点又具有相当大的集中负荷。这样既保障了用电的可靠性，也节约有色金属，如图2-37所示。

（2）树干式配线：这种配线方式适合于负荷集中，并且每个负荷点都在配电盘的同一侧，负荷点相互的距离较短，同时负荷不适于采用放射式配线时。另一种情况是，负荷比较均匀地分布在一条线上，可由干线直接分出支线供电，如图2-38所示。这种配电方式的优点是，节省配电设备，减少线路长度；有条件用负荷中心供电线路代替单端树干式供电方式，能合理地减少单端树干式供电线路的电压损失，降低线路的电能损耗。

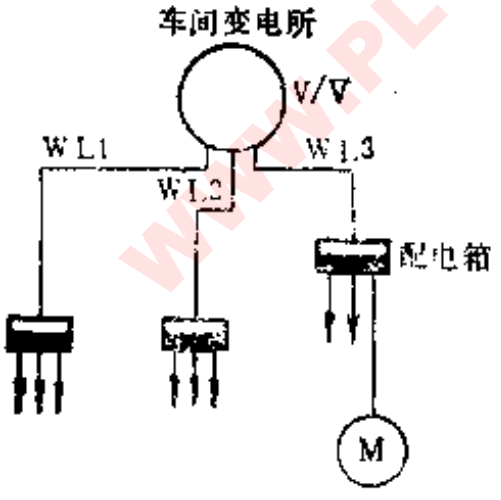


图2-37　放射式配线

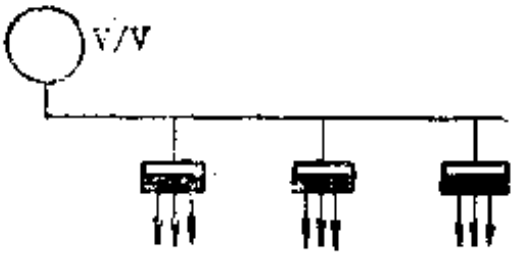


图2-38　树干式配线

在实际应用中，往往采用放射式与树干式的混合式。

（3）链式配线：当容量小的设备彼此距离很近，但距

配电箱很远时，可采用链式配线，这样可节省分支导线。但联接的设备不要过多，一般三四台设备即可，在一台设备接另一个设备时，最好在设备旁边设一联络开关，以便检修某台设备时切断电源，保证安全，如图2-39所示。这种配电方式一般不推广使用。

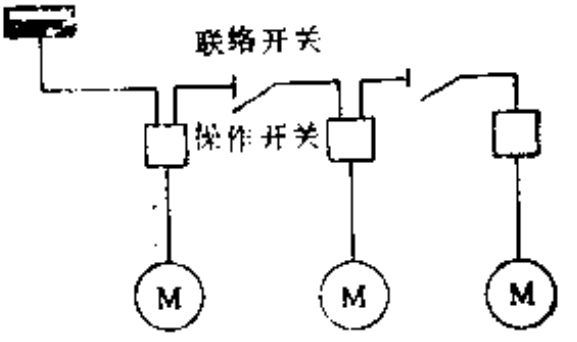


图2-39　链式配线

三、动力配电箱的布置与安装

（一）动力配电箱（盘）

动力配电箱是动力装置的配电和供电中心，其中装有熔断器和开关，但很少装有测量仪表。配电箱为木制和铁制的，有明装与暗装配电箱（盘），有非成套的和成套的配电箱。非成套的配电箱一般为木制的，往往是在施工现场制作。

在工厂车间用电负荷较大时，常采用成套配电箱进行供电。成套配电箱由开关厂或电器厂制造按一定的配电系统方案进行生产，用户可根据厂家所提供的几种方案进行选用。成套配电箱系列很多，常用的有：

XL(F)-15型动力配电箱，适用于发电厂及工业企业中作为交流500V以下三相三线系统动力配电用。配电箱采用钢板结构，有封闭式及防尘式，箱前有门，以便进行检修。

XL-10型动力配电箱适用于一般工矿企业生产车间、交流380/220V三相四线制系统中、控制电动机、电气设备和照明之用。配电箱是户内防护式，钢板结构，该配电箱为墙上悬挂安装。

WWW.LCWKJ.D.CN

型号说明　XL（F）—1 5—0 4 2 0—1 1

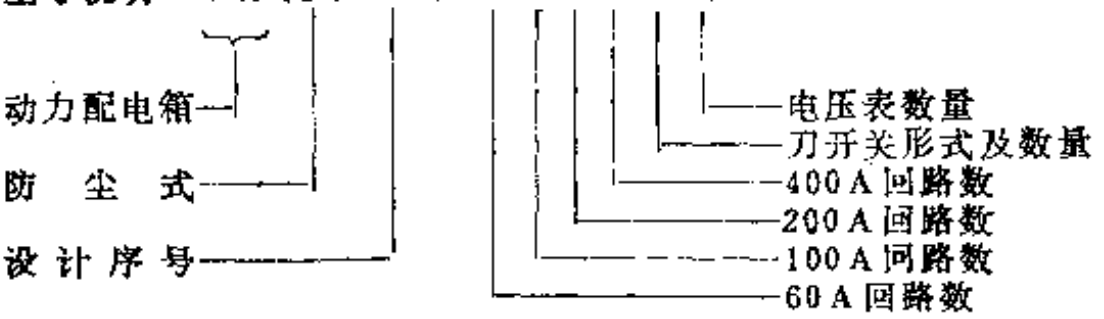


表2-27为XL（F）-15型配电箱技术数据，表2-28为XL-10型配电箱技术数据表。

表2-27　XL（F）-15型动力配电箱技术数据

型　　号	刀开关额定容量（A）	回路数
XL（F）-15-2200	400	4
XL（F）-15-2020	400	4
XL（F）-15-0040	400	4
XL（F）-15-0202	400	4
XL（F）-15-0042	400	6
XL（F）-15-6000	400	6
XL（F）-15-2220	400	6
XL（F）-15-8000	400	8
XL（F）-15-3500	400	8
XL（F）-15-5300	400	8
XL（F）-15-6200	400	8
XL（F）-15-6020	400	8
XL（F）-15-5030	400	8
XL（F）-15-4240	400	8

（二）配电箱的安装和做法

（1）配电箱的安装高度：暗装时，底面距离地面为1.4m；明装时为1.2m；但对明装电度表板应为1.8m。

（2）安装在墙上时，固定配电箱、板所需木砖及铁件

WWW.PLCWORLD.CN

表2-28　XL-10型动力配电箱技术数据

型　　号	组装元件	回路数
XL-10-1/35	HZ1-60/3	1
XL-10-2/35	HZ1-60/3	2
XL-10-2/60	HZ1-100/3	2
XL-10-3/15	HZ1-25/3	3
XL-10-3/35	HZ1-60/3	3
XL-10-3/60	HZ1-100/3	3
XL-10-4/35	HZ1-60/3	4
XL-10-4/60	HZ1-100/3	4

等均需预先随土建砌砖墙时埋入墙内。悬挂式配电箱宜采用膨胀螺栓M10固定。埋设螺栓应使其水平和垂直，并用水平尺和线锤测量校正。

（3）在墙内暗装配电箱时（如图2-40所示）应随土建砌砖墙，埋入墙内为好，配电箱外壁与墙有接触的部分均涂防腐油，箱内壁及盘面均涂灰色油漆两道。箱门油漆颜色一般与工程中门窗的颜色相同。

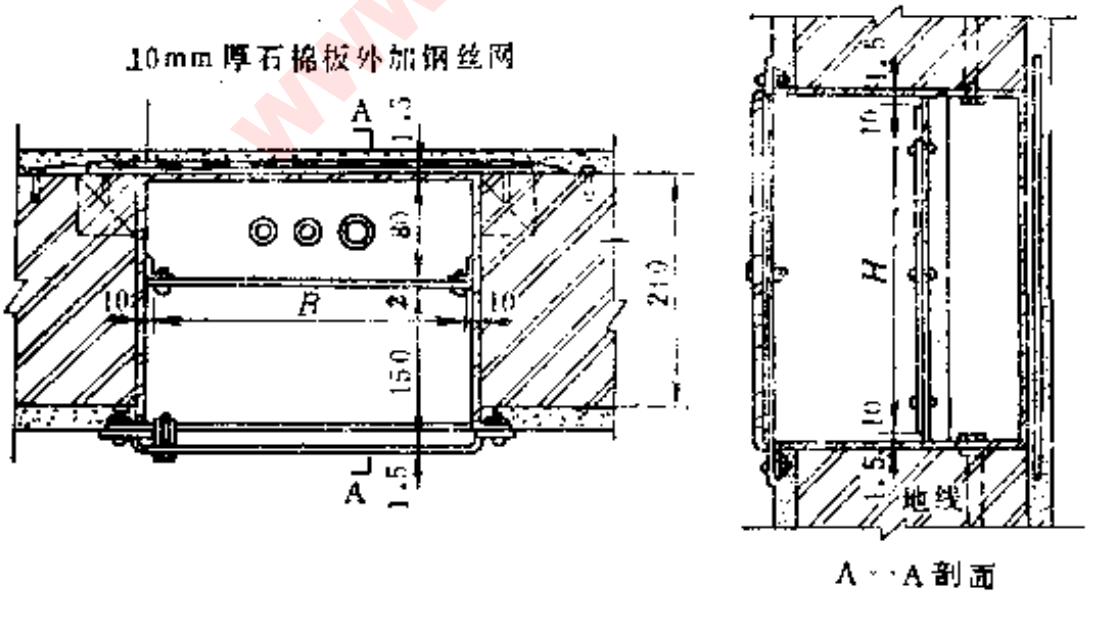
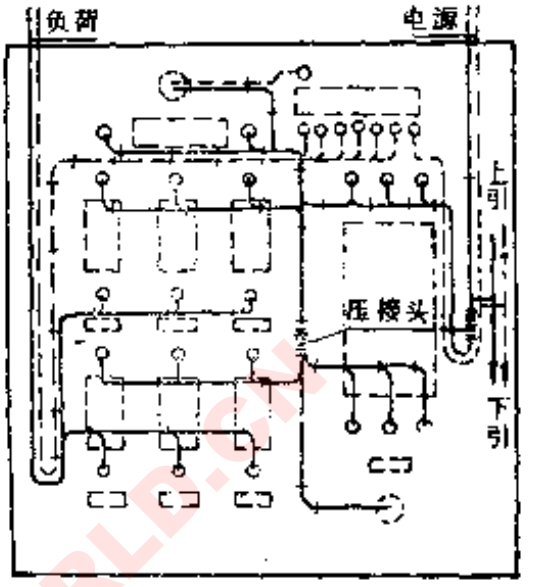


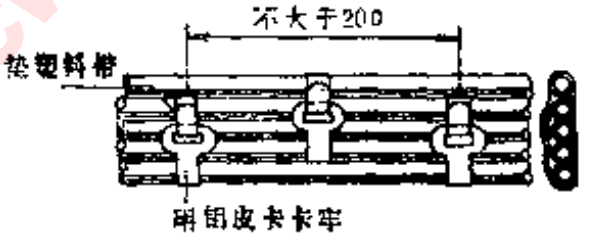
图2-40　暗装铁制配电箱做法

（4）为了防止木制配电盘因电火花烧坏，动力配电盘的额定电流在30A以上者要加包铁皮，在30A以下及盘上装有铁壳开关时，可不包铁皮。

（5）配电盘后面的二次侧配线所用铜芯塑料绝缘线，其截面不应小于1.5mm²。配线时需排列整齐，横平竖直，绑扎成束，并用卡钉固定在盘板上，见图2-41。盘后引出及引入的导线应留出适当余度，以利检修。



盘背面配线示意图



盘板上卡小线做法

图2-41　盘后配线图

（6）为了加强盘后配线的绝缘强度和便于维护管理，二次线最好采用带色的铜芯塑料线，L1相用黄色，L2相用绿色，L3相用红色，零线用黑色。

（7）垂直装设的刀开关及熔断器等设备，上端接电源，下端接负荷。横装者左侧（面对盘面）接电源，右侧接负荷。

（8）导线穿过木板时，应套以瓷管头，穿过铁盘时，需装橡胶护圈。

（9）零线系统中的重复接地应做在引入线处，在配电盘末端上也应做重复接地。

WWW.PLCWORLD.CN

（10）成套配电箱，有墙上悬挂安装和落地安装两种。落地安装见图2-42所示。安装时可预埋地脚螺栓M10固定。

（11）配电箱（盘）的金属构架、铁盘面及电器的金属外壳均应有良好的接地。

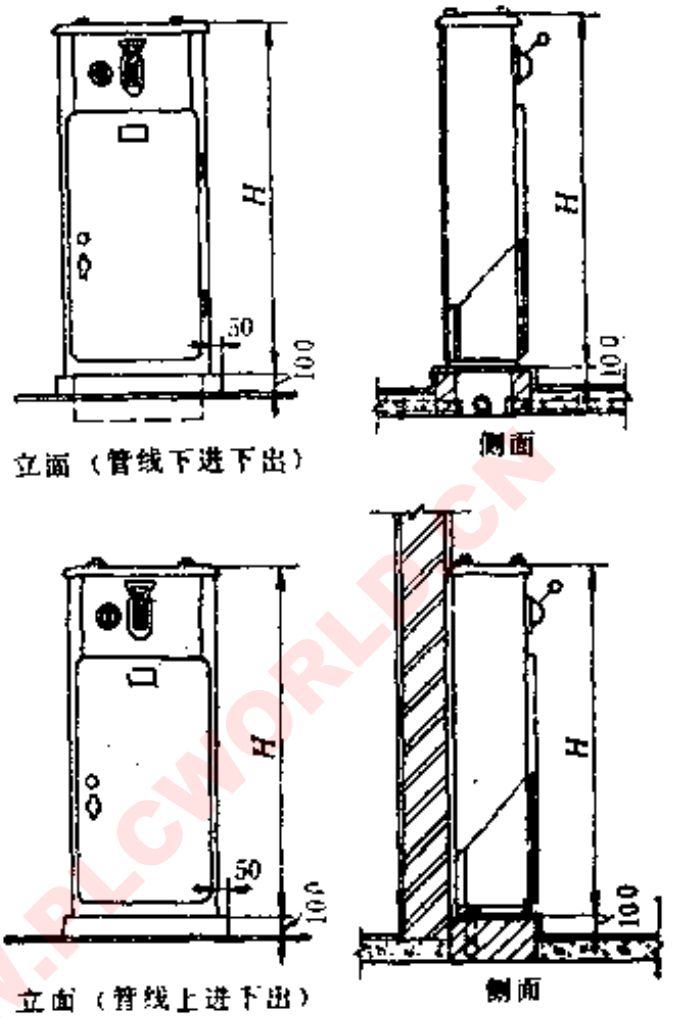


图2-42　XL(F)-15型动力配电箱的安装

四、动力线路的敷设方式与安装技术

车间动力设备的配线结构，是根据设计所确定的配电系统、配电方式和在平面图上的设计进行施工的。配电干线可以是明敷设（如电缆槽配线）和暗敷设（管配线）等。电动机的配线多采用穿管暗配线。

现以某工厂小型车间为例，将电气系统图和动力平面图给出（见图2-43和图2-44），以供学习识图参考。此图为穿钢管暗配线。

施工说明

（1）本车间电源由厂配电室引来，其进户线采用95mm²橡皮绝缘铝芯线，穿钢管暗敷设。

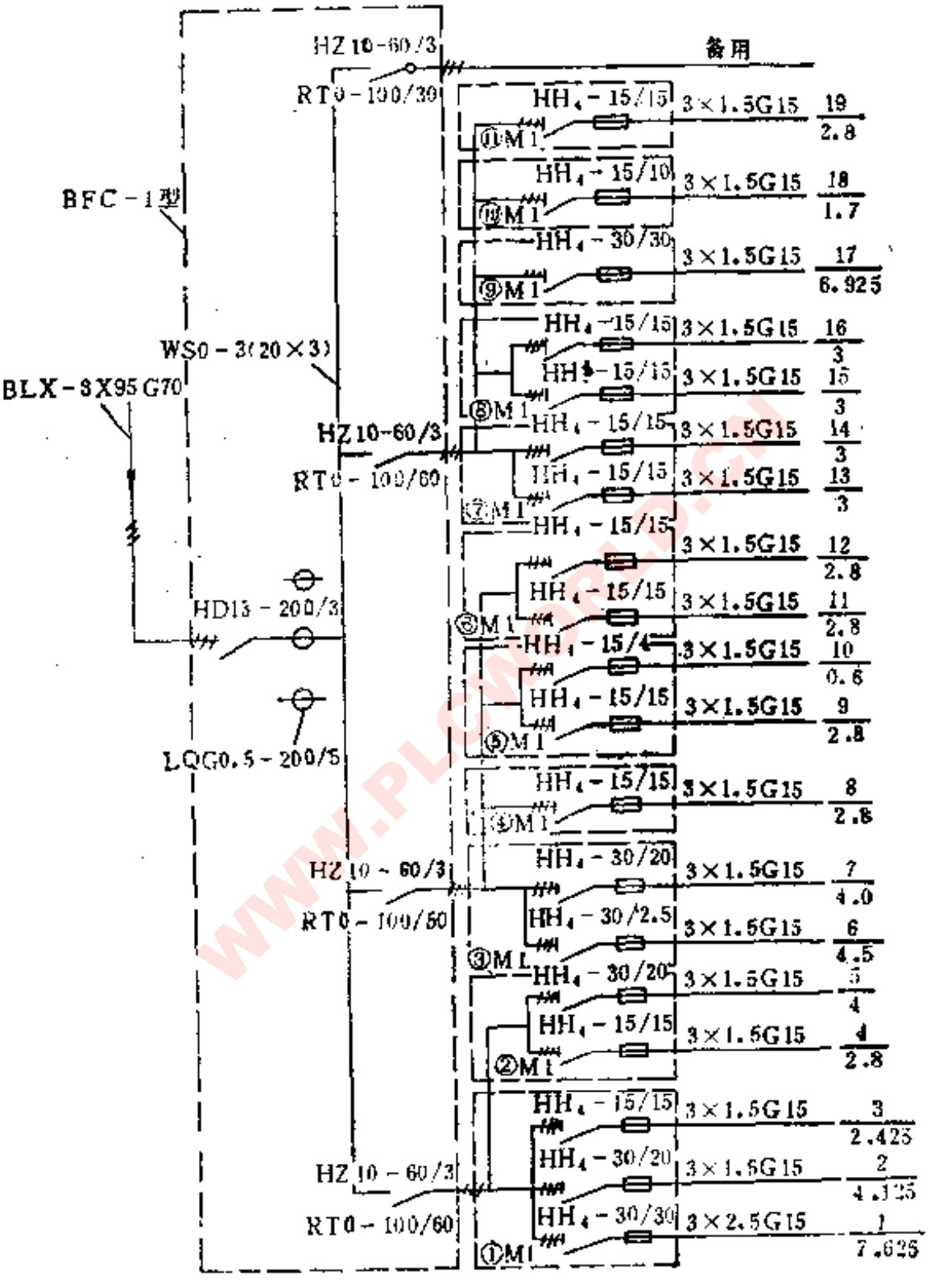

HZ10-60/3
备用
RT0-100/30
HH4-15/15
3×1.5G15
19
2.8
①M1
HH4-15/10
3×1.5G15
18
1.7
⑩M1
HH4-30/30
3×1.5G15
17
6.925
⑨M1
BFC-1型
HH4-15/15
3×1.5G15
16
3
WS0-3(20×3)
HH4-15/15
3×1.5G15
15
3
BLX-3X95 G70
⑧M1
HH4-15/15
3×1.5G15
14
3
HZ10-60/3
RT0-100/60
HH4-15/15
3×1.5G15
13
3
⑦M1
HH4-15/15
3×1.5G15
12
2.8
HD13-200/3
HH4-15/15
3×1.5G15
11
2.8
⑥M1
HH4-15/
3×1.5G15
10
0.6
HH4-15/15
3×1.5G15
9
2.8
⑤M1
LQG0.5-200/5
HH4-15/15
3×1.5G15
8
2.8
④M1
HZ10-60/3
HH4-30/20
3×1.5G15
7
4.0
RT0-100/50
HH4-30/2.5
3×1.5G15
6
4.5
③M1
HH4-30/20
3×1.5G15
5
4
HH4-15/15
3×1.5G15
4
2.8
②M1
HH4-15/15
3×1.5G15
3
2.425
HZ10-60/3
HH4-30/20
3×1.5G15
2
4.125
RT0-100/60
HH4-30/30
3×2.5G15
1
7.625
①M1

图2-43　电气系统图

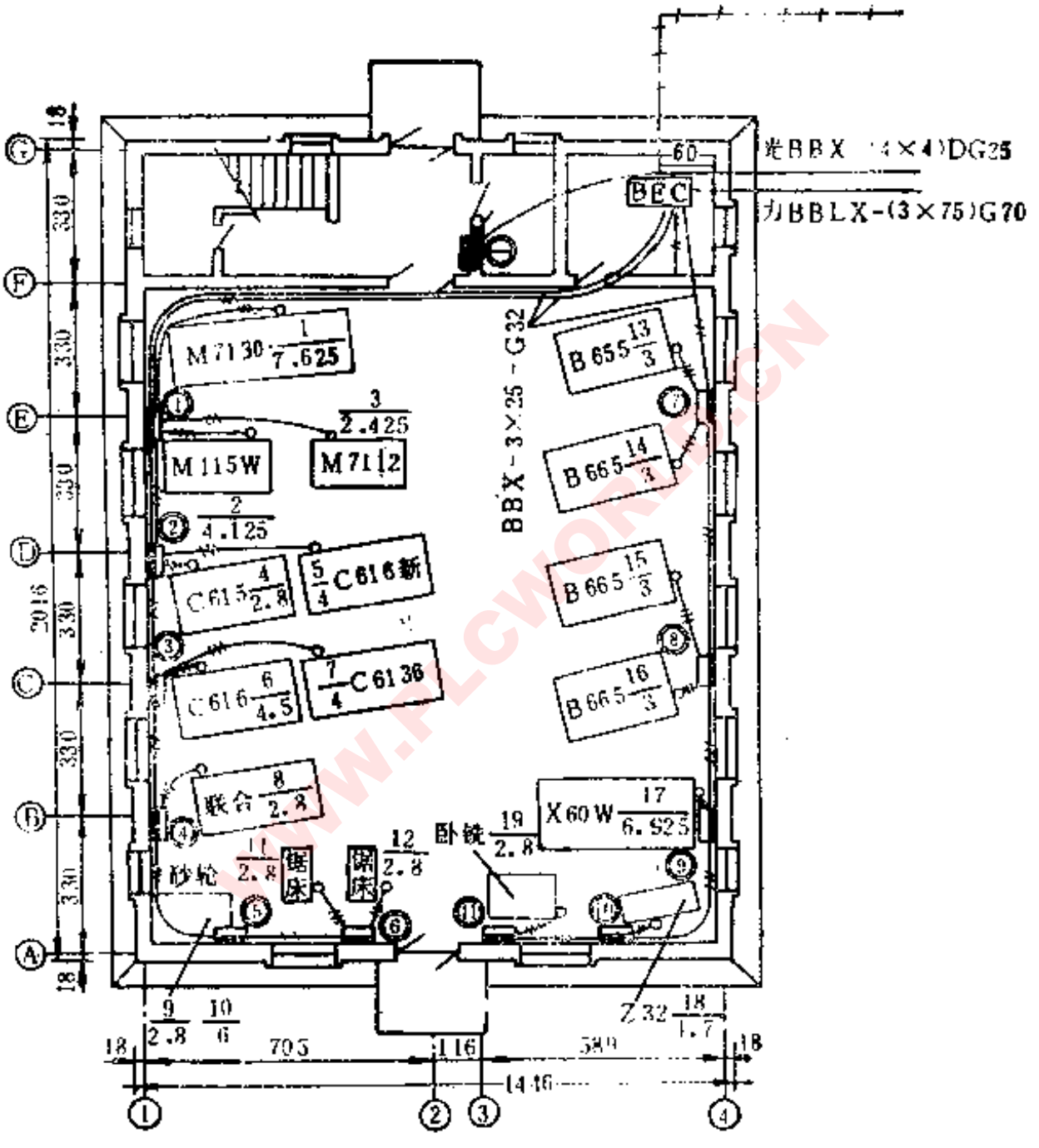


图2-44 动力平面图示例

（2）动力配电线路，均采用橡皮绝缘铝芯线，穿钢管敷设。动力总配电柜采用建设单位原有仿造 BFC-1 型 柜一面。动力设备配电盘均为明装，距地1.2m。其设备配线线径及管径详见系统图注。

（3）本工程为合用变电所供电，故采用接零保护。接地电阻应小于4Ω。

（4）凡本图未注明的有关做法说明及图例，均详见《建筑电气安装施工图册》。

（一）电线管配线

为了防止导线受到机械损伤和高温、潮湿、腐蚀性气体、灰土等的影响，机械装置电气设备的敷线均采用钢管（或电线管、硬塑料管）来保护，敷设的方式可以分明敷设和暗敷设。

管线敷设除须取最短的路径外，还要求美观、安全和减少导线互相交叉等。在施工过程中，敷线的具体问题很多，其中最常碰到的是导线截面的选择、保护管及其内置导线根数的确定以及敷设原则等。

1．保护管及其内置导线根数的确定

通常采用电线管或水煤气钢管作为固定用的导线保护管，在使用前必须经清理，涂沥青作防腐处理。埋设在混凝土、墙壁及泥土中的保护管，直径不容许小于25mm，而在可能受到压力的地方，保护管直径要放大一档或采用加厚的自来水管。

管径选择原则是：①管子内径不应小于内置导线束直径的1.4～1.5倍；②导线总的截面不应大于管内截面的40%。为了方便也可按表2-29选用。

2．车间管线敷设的一些原则

表2-29 管径

导线规格	500V 单芯绝缘导线											
截面	2根单芯			3根单芯			4根单芯			5根单芯		
	DG	G	VG	DG	G	VG	DG	G	VG	DG	G	VG
(mm^2)	相应的最											
1.5	15	15	15	20	15	20	25	20	20	25	20	25
2.5	15	15	15	20	15	20	25	20	25	25	20	25
4	20	15	20	25	20	20	25	20	25	25	25	25
6	20	15	20	25	20	25	25	25	25	32	25	32
10	25	20	25	32	25	32	40	32	40	40	32	40
16	32	25	32	40	32	40	40	32	40	50	40	50
25	40	32	32	50	32	40	50	40	50	50	50	50
35	40	32	40	50	40	50	50	50	50	70	50	70
50	50	40	50	50	40	50	70	50	70	80	70	70
70	70	50	70 (70)	80	70	70 (80)	80	80	80	—	80 (100)	—
95	70 (80)	70	70 (80)	80	(70 (80)	80	—	80 (100)	—	—	100	—
120	80	70	80 (80)	—	80	—	—	100	—	—	100	—
150	80	80	—	—	100	—	—	100	—	—	—	—

注：1.表中代号：DG为电线管，G为焊接钢管，VG为硬塑料管。

（1）管长超过30 m且无弯曲以及管长超过8 m而有三处弯曲时，其中间应装设接线盒，如图2-45所示。接线盒中导线一段用端子板联接，但遇到有蒸汽或潮湿车间，尽量采用电焊联接，以防锈蚀。

（2）保护管的弯曲角度不得小于90°，最小容许弯曲半径：在混凝土中埋设时，为6～10倍管子外径；明管敷设时，为4～6倍管子外径，如图2-46所示。

（3）埋设于地下的保护管（采用水管）离地面高度，一般不应小于200mm，多路保护管可靠近并列敷设。明配管的固定支架最大距离：

当管子直径在15～20mm时，为1000mm（硬塑料管）及

WWW.PLCWORLD.CN

选择数据表

500V多芯绝缘导线											
6根单芯			一根双芯			一根三芯			一根四芯		
DG	G	VG	DG	G	VG	DG	G	VG	DG	G	VG
小管径（mm）											
25	20	25	25	15	20	25	15	20	25	20	25
25	25	25	25	15	20	25	20	20	25	20	25
32	25	32	25	20	20	25	20	25	25	20	25
32	25	32	25	20	25	25	20	25	35	25	35
50	40	40	25	20	25	35	25	25	35	25	35
50	50	50	40	32	40	40	32	40	40	32	40
70	50	70	40	32	40	50	32	40	50	40	50
70	70	70	50	40	50	50	50	50	50	50	50
80	70	75	50	50	50	50	50	50	70	50	70
—	100	—	—	50	70	70	70	70	80	70	80
—	100	—	—	80	—	—	80	—	—	100	—
—	100	—	—	100	—	—	100	—	—	80	—
—	—	—	—	100	—	—	100	—	—	—	—

1500mm（钢管）；

当管子直径在25～32mm时，为1500mm（电线管）及2000mm（钢管）；

当管子直径在40mm以上时，为2000mm（电线管）及3500mm（钢管）。

明配管的做法如图2-47所示。

（4）机械设备本身的导线保护管，如采用钢管时，则在拐角处应采用直弯拐角（见图2-48），钢管可直接焊接在机身上或用卡子固定；采用金属软管时，软管两端必须配以管接头。可固定部分的软管也应以卡子固定。

（5）钢管之间的联接应采用管接头，如图2-49所示。

WWW.PLCWORLD.CN

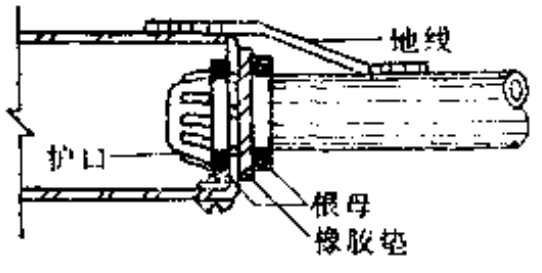


图2-45　钢管与接线盒联接

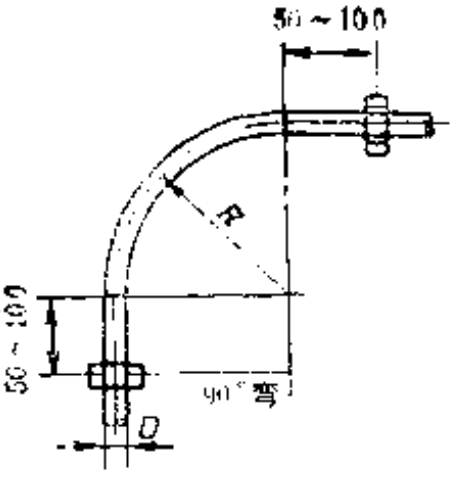


图2-46　明配管直弯

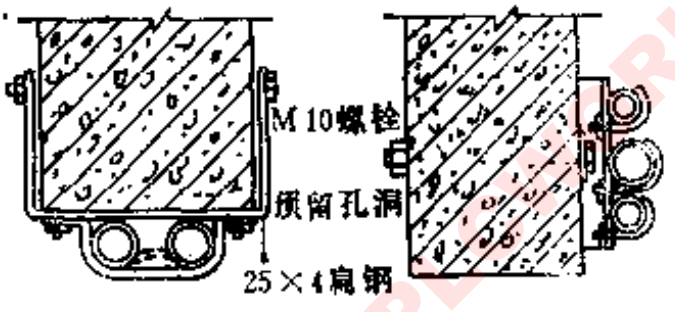


图2-47　钢管沿屋面梁底面及侧面敷设

图2-48　拐角盒

用管箍套螺纹拧紧并涂抹铅油，在潮湿场所须用油麻缠紧。为了防止导线绝缘管口擦伤，管口内壁要锉光滑。管头上应装上用绝缘油处理过的木制管套，保护穿线；穿线后管口还应注以沥青或电缆胶涂封。

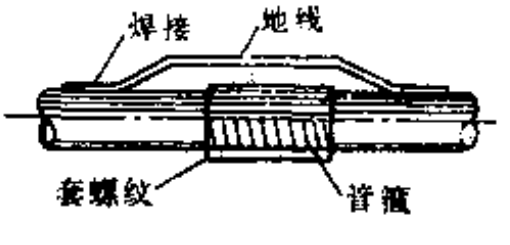


图2-49　铁管联接做法

（6）保护管禁止敷设在高温处。当与热力管道平行敷设时，其净间距须大于800mm；相交敷设时，原则上保护管敷设在热力管道下方，其净间距须大于500mm。如上述距离

无法达到时，应采取隔热措施，则可减少距离至200mm。

（7）在防爆车间中，保护管可采用无缝钢管。管子联接采用密封接头。密封填料的配方（重量比）为：5号沥青40%，石棉灰40%，蓖麻油20%。

目前已大量采用塑料硬管代替钢管、塑料软管代替金属软管。特别在酸碱车间中，采用塑料管作为导线的保护管具有良好防酸碱的效果。

3．穿管配线工程在施工中应注意事项

穿管配线施工方法很多，根据建筑物结构的不同，施工方法也不同，具体做法可参看“建筑电气安装工程图集”。下面综述有关管配线施工应注意事项。

（1）管内导线的绝缘必须良好，其电压等级不应低于交流500V。最小截面为：铜芯线1mm²，铝芯线2.5mm²。控制线例外。

（2）电线管的联接，必须使管子成为良好的导体。管箍（用通螺纹管箍）、接线盒的联接应作跨接线焊接，如图2-45和图2-49所示。

（3）配管必须有保护接地，接地线用圆钢，直径不得小于4mm。

（4）管内不许有电线接头。不同的电源回路、不同电压等级的回路、互为备用的回路、工作照明与事故照明的线路不得装在同一管内。

（5）电线管弯曲时，要符合要求，弯曲半径要大，不能损伤配管，在可能范围内要少作弯曲。接线盒与接线盒间的直角弯不要超过四处（暗管工程不应超过三个）。

（6）电线管被切断后，其管口都应当用锉刀将管口倒角锉光，以免损伤电线。

WWW.PLCWORLD.CN

（7）电线管与接线盒和分电盘铁箱相联接时，应垂直穿入，联接处必须使用护线箍和紧扣环。凡属防潮箱应加橡皮垫。

（8）在施工中，各配管的管口应当使用管头塞或木塞堵塞，以免尘土、湿气侵入。

（9）有发生生锈腐蚀的场所，配管应当涂以防锈漆。

（10）交流回路的往复线，必须装在一个管内。在一个管内所装的电线，不许超过10根。

（11）化工、电镀等有腐蚀性气体的车间及高频车间等，管子宜采用硬塑料管。硬塑料管的管壁厚度至少为2mm，管内允许穿单根导线，管口不需要用护圈。硬塑料管内的联接可以采用套接或插接，套接长度不应少于100mm，接头两侧应有牢固的支撑。

（12）穿线应当在配管完了后、建筑物未全部竣工之前进行。穿线时应当使用引线，常用ϕ1.2mm的钢丝（有弹性）作引线，不可在配管施工的同时，将引线穿进去，必须配管施工完成后再穿引线。

（13）配管遇到土建伸缩缝、沉降缝应作处理。

（14）暗管敷设工程在竣工交付验收时，应将施工中电线管路、弯曲部分等实际敷设部位和走向，在竣工图中订正，并清楚标明，便于维修管理。

（二）裸母线供电干线

机床厂的金属加工车间、机械装配车间按照环境特性分类，是属一般性房屋，即干燥房屋，没有着火及爆炸危险，灰尘较少，没有侵蚀性蒸汽或气体以及不是炽热的房屋。因此，这类车间的低压配电干线可以采用裸母线明配方式。

裸母线一般是采用硬铝母线安装。母线的敷设可以跨工

字形屋面梁（见图2-50）或通过屋面梁洞（见图2-51）或跨钢屋架、跨桁架等根据房屋结构决定。

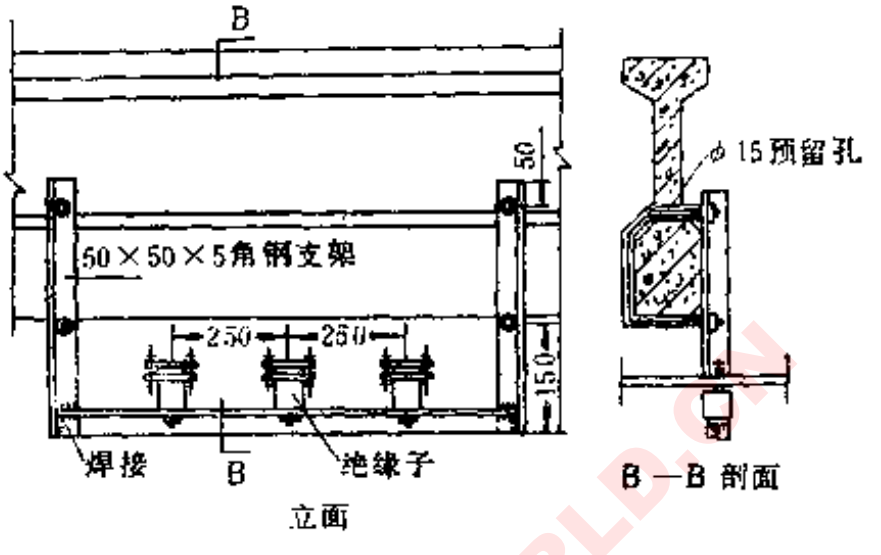


图2-50　跨工字梁中间固定支架做法

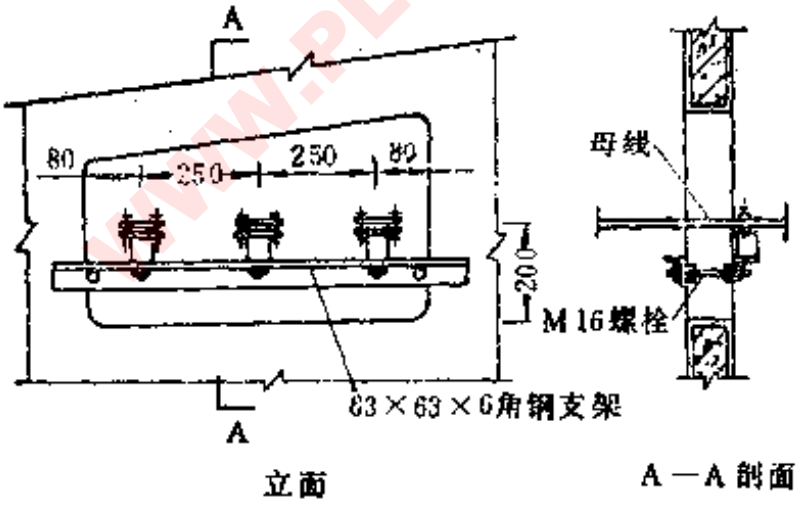


图2-51　通过屋面梁洞中间固定支架做法

明设母线的安装工作，是利用水平仪及铅锤安装好构架，将瓷瓶紧固在构架上；然后将矫直好的母线紧固在瓷瓶上，

用焊接或用螺栓将它的接头联接起来，并刷上相色漆。

安装母线的所有金属部件均应镀锌，夹板与母线接触处应除掉母线表面氧化层，并涂上电力复合脂。

母线沿墙敷设安装时，支架间距不应大于3m，垂直安装，要求每隔2m做一个固定支架。绝缘子采用XW-01型电车绝缘子。

屋面梁的间距较大时，母线应做中间拉紧装置（见图2-52），到端头应做母线终端拉紧装置（见图2-53）。拉紧装置的联接板宽度为母线宽加55mm，母线规格由工程设计决定。

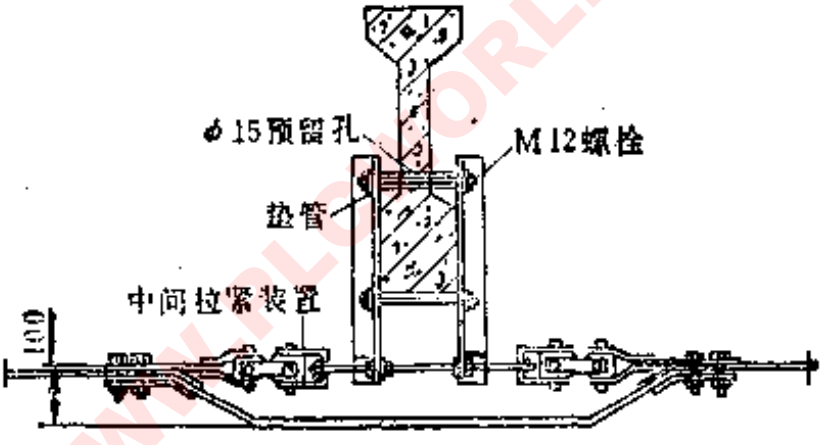
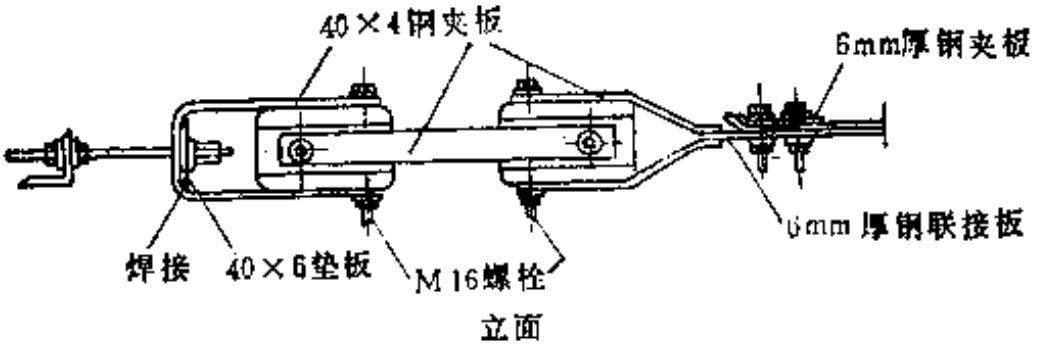


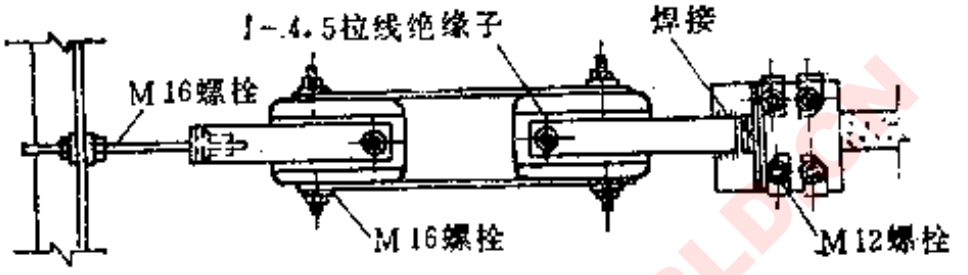
图2-52　中间拉紧固定

（三）插接式母线槽配电方式

以树干式结构为主的变压器——干线式，即将变电所变压器二次侧裸母线直接引入车间，虽然经济效果较高，但只能应用于一般环境厂房。如车间机床很多，又是均匀的沿线路分布时，支干线采用插接式母线槽配电方式比用配电箱供电经济合理。插接式母线槽如图2-54所示，输电能力可达250～1000A，插接式母线槽上装设带有熔断器的分线盒，当



立面



平面

图2-53　终端拉紧装置

合上分线盒，将支线接至母线并打开时，支线与电源脱离，因而接入或切除某一用电设备时，并不影响其他设备工作。插接式母线槽沿柱或墙吊挂，或利用支架敷设，高度为2.5～3.5 m，以不影响车间内运输为原则。

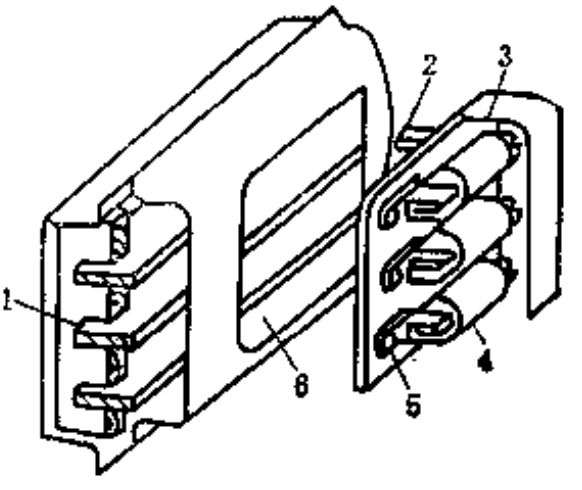


图2-54　插接式母线槽

1—母线　2—插接线　3—装插接线与熔断器的箱子　4—熔断器　5—支线用电端子　6—插接母线上用以接线的小孔

插接式母线槽由工厂成套生产，可向工厂订购。这种配线方式多用在新建大型车间及高层建筑中。对于小容量的母线

槽接头部位用插接式，中大型容量接头采用螺栓联接。近年来，随着外资、合资企业的不断增加，母线槽以其集输配电于一体，并具有配电设计简单、安装方便快速、使用安全灵活、寿命长、外观美等优点日益为用户所接受。其缺点是结构复杂、笨重、价格较贵。但其综合经济效益仍大大高于传统配电方式。

（四）电缆桥架敷设

随着工业的发展，各个工矿企业中用电设备的增多，用电量的增大，电缆用量既多又集中，采用了电缆桥架，即空中走线的方式。由原来的焊接工艺发展到现场组装方式，走向灵活，施工简单，整齐美观。

1. 电缆桥架

电缆桥架是架设电缆、管缆的一种构架。通过电缆桥架把电缆、管缆从配电室（或控制室）送到用电设备，特别适合于全塑电缆的敷设。电缆桥架一般由立柱、托臂和梯架（或托盘、电缆槽）组成（图2-55）。托臂间距一般为2m，桥架荷载每米为125kg。

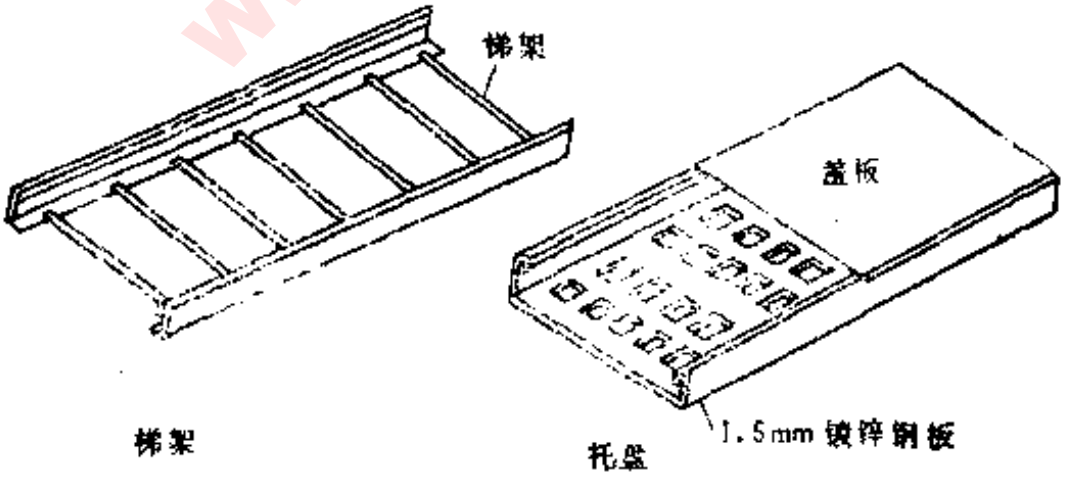


图2-55 电缆桥架梯架和托盘

WWW.DIANGONG.COM

2. 电缆桥架的使用范围

电缆桥架适用于化工、炼油、冶金、军工、机械、轻工、纺织等各个工业企业的厂区及车间敷设电缆。特别是对于象石油化工、钢铁等大型联合企业更显优越。

电缆桥架不仅可以用于敷设动力电缆和控制电缆，同时也可以用于敷设自动控制系统的控制电缆。

电缆桥架不仅适用于室内，而且适用于室外。电缆桥架的各个零部件是镀锌的，可以用于轻腐蚀的环境中，在防爆环境中也可以应用。

3. 关于电缆桥架的形式

电缆桥架的形式是多种多样的：有梯架、托盘、组合式托盘、电缆槽等。

现在电缆桥架的所有零部件都做成标准定型件，由专业化厂生产。这些标准定型件运到现场即可组合安装。

4. 电缆桥架的防腐措施

电缆桥架的防腐措施是电缆桥架能否经久耐用的重要一环。它一方面取决于所用材料；另一方面取决于其零部件的表面处理质量。

桥架表面处理方式有镀锌、镀铬、环氧树脂静电喷涂、刷氯磺化聚乙烯漆或在熔融的聚氯乙烯中浸一下等方法。在重腐蚀环境中采用耐腐蚀的材料：如铝合金、塑料、玻璃钢等。

5. 电缆桥架的敷设

托盘平面布置如图2-56所示。电缆在托盘上敷设是单层布置，用塑料卡带将电缆固定在托盘上。大型电缆可用铁皮卡子固定（图2-57）。桥架的立面图见图2-58所示。

电缆桥架的固定常用膨胀螺栓，这种方法施工简单、方便、省工、准确，省去了在土建施工中预埋件的工作。

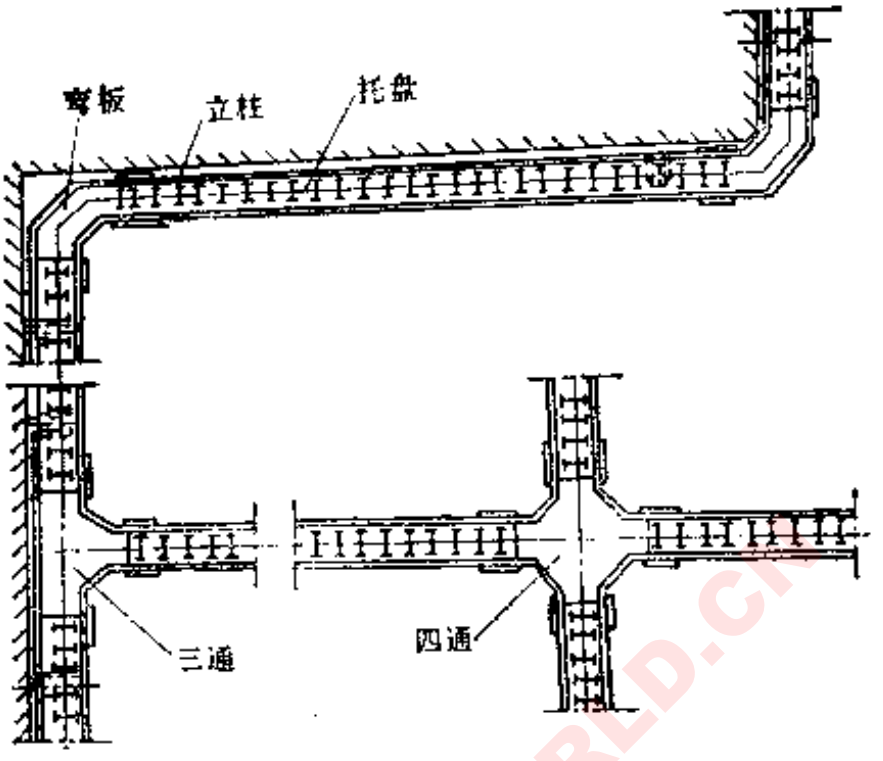


图2-56　托盘平面布置图

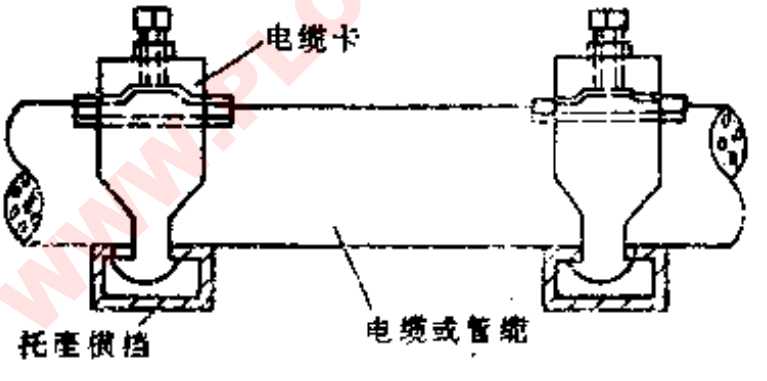


图2-57　铁皮卡子固定电缆图

用膨胀螺栓可以把电缆桥架的立柱、底座、引出管的底座及托臂等部件固定在混凝土构件上或砖墙上。

电缆桥架敷设时所需机具有：滑轮、滚柱及牵引头等，应予备齐。

（五）配线及检验

配线工程结束后，在试送电前必须进行检验，以确定全部配线和线路施工是否正确，确保安全送电。

检验的方法：

首先对整个工程外部进行检查。外部检查主要是靠经验，用目力来判断配线质量和缺陷。检查人员必须是配线工程的直接参加者，或是有一定经验的技术人员与老工人。

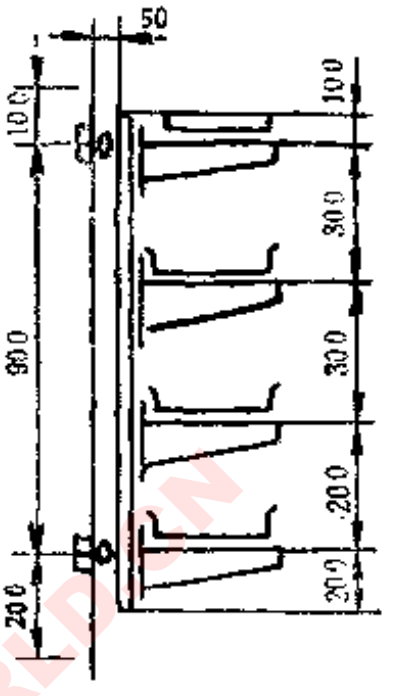


图2-58　电缆桥架的立面图

其次是用仪器进行检验。一般用500 V的兆欧表来测量导线之间的绝缘电阻，以及导线与大地间的绝缘电阻。同时，用兆欧表也可以测定导线是否断线。在测量导线的绝缘电阻时，必须把跨接在线路上的电机、电器和仪表等切除。测量时，摇动兆欧表手柄30 s以后，表针稳定后所指绝缘电阻值，此值不得低于0.5MΩ。

§2-9　供电线路的运行与维护

一、电缆线路的运行维护

为了保证电缆的正常运行，运行人员要定期巡视正在运行的电缆，必须知道电缆的负荷情况，电缆发热温度和散热条件等。

1．运行检查

运行中电缆的允许负荷，可以从配电盘上的电流表指示知道电缆所通过的电流。一般情况下，任何时候，通过电缆的电流均不得超过允许的最大负荷电流。

WWW.DIANGONG.CN

相同的电缆，由于敷设的位置不同，周围环境散热条件不一样，电缆最大允许负荷电流不尽相等。应根据有关规定确定电缆允许负荷电流。

电缆的发热是由电缆芯（功率损失）、电缆铅皮及钢甲（涡流）发热形成的。当电缆温度升高时，由于油温升高产生膨胀油压，电缆铅包伸展；冷却后，便使电缆内部产生空隙，这些空隙在电场的作用下极易产生气体游离，使绝缘性能变坏，导致电缆击穿。因此，为了避免发生此类故障，随电缆的额定电压的增高，电缆芯的允许发热温度要适当降低，见表2-30。

表2-30　电缆芯最高发热温度

电缆额定电压（kV）	3以下	6	10	35
电缆芯允许发热温度（℃）	80	65	60	50

电缆芯的温度无法直接测量，只能由测量电缆外表的温度来推算电缆芯的温度。

根据实践经验，将所测电缆表面温度加上15～20℃的温度差，就是电缆芯大约的发热温度。

如果电缆芯的发热温度高于允许发热温度，那就要减低负荷或加强散热，以减低电缆周围的温度。

电缆的发热温度要在电缆负荷最大和散热条件最不利的线段上检查。例如，在接近热力管道的地方，电缆穿墙（穿保护管）的地方以及电缆头等地方。电缆中间接头和终端头由于本身的缺陷或安装质量是造成电缆事故的主要根源，应该引起重视。

2. 巡线检查

在巡视线路时，对直埋电缆应查看路面是否正常，有无挖土痕迹，有无因雨水冲刷及电缆线路标桩是否完整。电缆线路上不应堆置重物（如矿石、瓦砾等）和腐蚀电缆铅皮钢甲的酸碱性排泄物和石灰等。特别注意电缆线路与排水沟交叉地方，是否被水冲毁。

敷设在沟内的电缆，主要检查地板、墙壁和掩盖的情况，看有无下沉，沟内有无积水和积土现象，以及排水设备和通风是否良好，电缆支架是否结实，人孔是否牢固和有无盖子，照明设备是否完善。检查电缆时，主要看电缆接头有无损坏、放电痕迹和其他损伤，并测量电缆的发热温度。通常检查和维修是同时进行的。

3. 定期试验

电缆通过定期试验即预防性试验，测得技术数据与过去试验数据作比较，确定线路特性变化，及时发现并消除故障，是正确维护电缆线路的最妥善的办法。电缆试验前后均应放电。

二、架空线路的运行与维护

由于架空线路处于空气中，最容易受到外部条件的影响，如大气中的水分、灰尘、大风、积雪等等，都影响线路的运行质量。空气中的水分很容易使金属部分腐蚀，暴风雨常使电杆损坏，和使导线断线。工厂附近的气体、灰尘等，可能造成瓷瓶的损坏。

因此线路的维护人员必须经常地（一般每月应巡视一次），细致地进行检查，使线路所发生的不正常现象和故障，能及时消除，并作详细记录。

巡视检查的内容是：

（1）要特别注意瓷瓶和导线的接头处及它们在电杆上

的紧固程度，因为这些地方最容易损坏。如绑线有松动、破裂，应进行处理。

（2）金属横担有无变形和弯曲，穿钉有无松脱，横担有无偏斜等现象。

（3）绝缘瓷瓶或瓷横担有无破口裂纹，有无放电痕迹及脏污情况，严重者应予更换。

（4）导线弧度松弛否，有无严重锈蚀与断股，当断股根数为原根数的1/6时应剪断重接，未达到上列数值时，可敷线绑接牢固。

（5）导线周围有无其他建筑或树木，导线在最大摆动时与建筑物的水平距离，不得小于1.5m；与树木的距离不得小于2m；对挨近导线的树枝要及时修剪。

（6）杆身是否倾斜，杆基有无下沉、塌陷、被水冲刷等现象，严重的应及时处理。

（7）拉线是否松弛和被腐蚀。

（8）架空线路、避雷线及接地装置有否损坏，严重者应立即更换。

雷电及暴风雨后，应作特殊的巡视检查，发现问题及时处理。巡视记录应填写齐全，存档备查。

三、车间配电线路的维修

掌握车间配电线路的布线情况，是运行维护工作的基本工作。为此，应具备车间电气线路平面布置图，以便全面了解车间电气线路的布线情况、结构型式、导线规格型号和配电箱、配电盘、控制台的位置及用电设备的名称等，并了解用电容量的大小及变电所的有关情况。同时，还要积累历年测量有关电气设备的绝缘电阻记录，建立线路缺陷记录，检修记录等技术资料。

车间配电线路应由专职维修电工进行定期巡视、清扫和检查，巡视周期为每星期一次。

1. 巡视项目

（1）检查导线的负荷情况，有否盲目增加用电装置，或擅自拆卸用电设备，裸母线接头处是否氧化。

（2）测量线路的负荷电流（用钳形电流表）是否超过导线的容许电流，从而判断运行是否正常。

（3）导线距各部分的安全距离有无变化，有否存在受热和受潮的现象，小于安全距离者应加强绝缘或用绝缘瓷瓶等将导线移开并予固定。

（4）导线所穿的钢管、塑料管、槽板等有无被砸坏、碰裂处，钢管的接地线有否断裂。

（5）车间内各设备有否存在带电现象，接地线是否接触完好，接地线截面是否合乎要求。

（6）配电箱、盘内部是否清洁，有否进水，有无其他异物。运行是否正常，控制有否失灵。

（7）导线支持物有否松脱，是否完整、清洁。导线绝缘层有否破坏，联接点导线有否松动、过热现象等。

2. 清扫和检查项目

（1）导线绝缘有否老化、破裂。

（2）导线有否松弛，有无不合于安装标准的线路。

（3）清扫线路上和绝缘子上的灰尘、污垢及杂物。

（4）紧固导线的所有联接点。

（5）铜铝接点有否腐蚀。

（6）测量导线对地、及导线间的绝缘电阻（停电时测量），测量时应将熔断器、用电设备、电器和仪表等断开。线路电压在1kV以下者，绝缘电阻一般不小于0.5MΩ。

（7）清扫检查的周期是每年两次。

§2-10 工厂节约用电

电力能源是工业的动力，在以安全生产为中心的前提下，提高设备的出力，降低线路损耗，降低产品的耗电量节约电能，是工厂企业的一项长期、重要的任务。

在节约电能的工作中，主要途径是：利用工业余热发电供热；改进旧设备，提高效率及性能；采用新技术、新工艺等等。在供电系统中采取措施节约电能也是大有可为的，例如调整负荷，减少线路损耗；提高供电系统功率因素等。

一、工厂电力负荷调整与节约用电

电力经济调度与节约用电的关系。

（一）调整负荷，避让高峰

电力生产的发电和用电是同一时间完成的，因此如用电时间过于集中，就形成电力高峰，影响发电。为了提高设备的利用率降低线路损耗，可通过调整负荷，“移峰填谷”。企业中调整负荷的措施有：调整各车间的生产班次和工作时间，躲开一个或两个用电高峰；调整用电容量大的设备的开车时间，错开高峰负荷用电时间；调整各车间的上下班时间，降低总负荷。

采取这些措施后，其效果是削减高峰负荷，提高低谷负荷，改善经济运行的负荷率$\left(\text{负荷率}\ \alpha=\frac{P_{\text{平均负荷}}}{P_{\text{最大负荷}}}\times 100\%\right)$，缓和电力供应，降低电能损耗，提高供电设备的利用率。

（二）计划用电，加强管理

电力生产是按计划进行的，这就要求用电单位也要按计划用电。企业根据电力系统所分配的用电量，通过全面考

虑，适当安排，合理分配给各车间，保证重点工序和重点设备用电。实行计划用电将促进调整负荷和节约用电等工作使有限的电力发挥更大的作用。同时要加强工厂用电和生活用电的管理，制定节约用电措施，杜绝电力浪费。对非生产用电，都应加装电度表(火表)，监督用户的用电情况，以减少电力浪费。

（三）制定经济运行方案

当企业中有几个变电所或多台变压器时，应制定出一个在不同负荷下的经济调度方案。计算出最经济的运行台数，并给以合理的调配。如并联运行的变压器，在低负荷时，则可解列，以一台变压器供电，另一台停止运行，以减少一台变压器的电能损耗。

几个变电所之间也可以采取敷设低压联络线的方式，以达到经济调度的目的。低压联络线在车间变电所之间敷设，或将各变电所的联络线集中在中心配电所统一调度。这样就能在低负荷时，停用部分变电所的变压器，仅以一台变压器供电，使变压器的电能损耗减少到最低限度。

（四）用远红外加热技术代替其他加热技术

远红外加热是一项新的加热技术，它具有能量消耗少、生产效率高、质量好等优点。尤其在节约用电方面已取得显著成效。是国家重点推广的节能技术。

远红外线加热是利用辐射热，与空间的空气介质无关。加热温度可达800℃。一般高分子物质（例如合成树脂、涂料、油墨、食品、木材等）适用于远红外线辐射干燥。

远红外线加热器有管式、平板式、灯式、插座式等形式已广泛使用于机械（铸造）、电子、电器、塑料、皮革、印刷、木材、纺织、食品等部门。

二、提高功率因数 cosφ 的意义和方法

（一）提高功率因数 cosφ 的意义

在工业生产中广泛使用的交流异步电动机、交流电焊机、交流电磁铁、工频加热器等用电设备都是感性负载，它们的功率因数都是小于1的，其满载时的功率因数约在0.6～0.9之间，但在空载或轻载时，功率因数则很低。从公式 $P=UI\cos\varphi$ 中可以看出，当发电机的电压和电流都达到额定值时，其值为 $S_N=U_NI_N$，则发电机输出的有功功率为：

$$P=U_NI_N\cos\varphi=S_N\cos\varphi$$

与功率因数 cosφ 有关。如果电路的功率因数 $\cos\varphi=0.5$ 时，发电机的输出的有功功率为：$P=0.5S_N$。输出功率仅占额定容量的50%，发电机未能充分利用。即降低了发电机和变压器的出力。

从另一方面可以看出，当电源电压不变，输出的功率 P 固定时，电路的功率因数 cosφ 越大，电路的电流 I 就越小；反之，cosφ 越小，电流 I 就越大，这将使供电线路中由电阻引起的能量损失增大，浪费了电能。

所以一个交流电源，在很坏的功率因数下向外供电时，从经济方面来考虑，是非常不利的。因此，如何提高功率因数，充分发挥电源设备的潜在能力和减少供电线路中能量的损失，对充分利用能源和节约电能，具有十分重要的意义。cosφ是工厂电气设备使用状况和利用程度的具有代表性的重要指标。因此，国家规定线路上的功率因数不得低于0.85。

（二）提高功率因数的方法——用电容器与感性负载并联

为了减小电源给感性负载提供的无功功率，采用并联电容器的方法，叫做并联补偿。即补偿无功功率，并联补偿电

WWW.PLCWORLD.CN

路如图2-59所示。

（三）并联补偿电容的计算

由图2-59，已知电阻、电感串联支路的有功功率 P_1 和功率因数$\cos\varphi_1$，现要求把负载的功率因数提高到 $\cos\varphi$，所需并接的电容量计算如下。

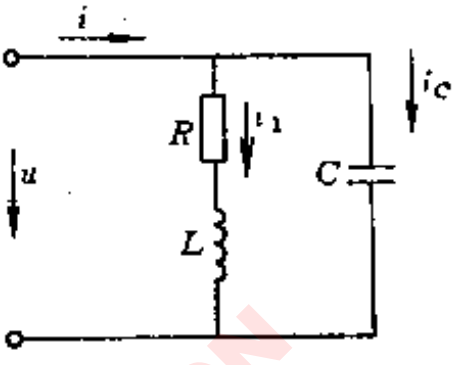


图2-59 并联补偿电路

并联电容器后使总电路中的电流发生了变化，即

并联电容前电路总电流

$$I_1 = \frac{P_1}{U\cos\varphi_1}$$

并联电容后电路总电流

$$I = \frac{P}{U\cos\varphi} \quad (P_1 = P，\text{因电路的有功功率没变})$$

当并联的电容一定时，电容支路中的电流 I_C 为

$$I_C = \frac{U}{X_C} = \omega CU$$

由相量图可知：$I_C = I_{1q} - I_q = I_1\sin\varphi_1 - I\sin\varphi$

把 I、I_1 代入上式得到

$$I_C = \frac{P}{U\cos\varphi_1}\sin\varphi_1 - \frac{P}{U\cos\varphi}\sin\varphi$$

$$= \frac{P}{U}(\mathrm{tg}\varphi_1 - \mathrm{tg}\varphi) \qquad (2\text{-}19)$$

又：$I_C = \omega CU = \frac{P}{U}(\mathrm{tg}\varphi_1 - \mathrm{tg}\varphi)$

所以：

$$C = \frac{P}{U^2\omega}(\mathrm{tg}\varphi_1 - \mathrm{tg}\varphi) \qquad (2\text{-}20)$$

已知被提高的功率因数 $\cos\varphi$ 换算为 $\mathrm{tg}\varphi$，就可以计算出

WWW.RLCWORLD.CN

C 值。

式中 P——电流向感性负载供给的有功功率（W）；

U——负载的额定电压（V）；

f——电源的频率（Hz）；

φ_1——并联电容前的功率因数角；

φ——并联电容后的功率因数角；

C——补偿电容（F）。

在生产实践中，有时要用电容器的无功功率表示电容器的容量 Q_C。

根据式2-19得

$$UI_C = P(\mathrm{tg}\varphi_1 - \mathrm{tg}\varphi)$$

则电容器的无功功率为

$$Q_C = P(\mathrm{tg}\varphi_1 - \mathrm{tg}\varphi)\ (\mathrm{Var}) \qquad (2\text{-}21)$$

故 Q_C 为提高功率因数后供电系统需要装设的电容器组的总容量，即需要补偿的无功功率。

通常将 $\mathrm{tg}\varphi_1 - \mathrm{tg}\varphi$ 称为补偿率，它表示功率因数由 $\cos\varphi_1$ 提高到 $\cos\varphi$ 时每千瓦有功功率所需补偿的无功功率 ΔQ，然后用 $Q = \Delta QP$ 算出应补偿的电容器容量（kvar）。式中 ΔQ 值可查表2-31。

对异步电动机并联电容器进行无功补偿，提高功率因数，装设电容器容量 Q_C，也可按下式计算

$$Q_C \leqslant 1.73U_N I_0$$

即不得超过电动机的空载无功损耗。

式中 U_N——线电压（kV）；

I_0——电动机空载电流（A）。

异步电动机空载电流的计算（10kW以上）对Y系列有

$$I_0 = I_N - 1.34P_N(\mathrm{A})$$

WWW.DGNORLD.CN

表2-31 补偿率ΔQ

补偿前 $\cos\varphi_1$	补偿后功率因数 $\cos\varphi$							
	0.80	0.84	0.86	0.90	0.92	0.94	0.96	1.00
0.50	0.981	1.086	1.138	1.246	1.305	1.368	1.442	1.73
0.55	0.766	0.871	0.923	1.031	1.090	1.153	1.227	1.51
0.60	0.583	0.688	0.740	0.848	0.905	0.970	1.041	1.33
0.62	0.52	0.62	0.67	0.73	0.84	0.90	0.97	1.27
0.64	0.45	0.56	0.61	0.72	0.78	0.84	0.91	1.20
0.68	0.33	0.43	0.49	0.60	0.65	0.72	0.79	1.08
0.70	0.27	0.37	0.43	0.54	0.60	0.66	0.73	1.02
0.72	0.22	0.32	0.37	0.48	0.54	0.60	0.67	0.97
0.74	0.16	0.26	0.32	0.43	0.48	0.55	0.62	0.91
0.76	0.11	0.21	0.26	0.37	0.43	0.50	0.56	0.86
0.78	0.05	0.16	0.21	0.32	0.38	0.44	0.51	0.80
0.80	—	0.10	0.16	0.27	0.33	0.39	0.46	0.75
0.82	—	0.05	0.10	0.22	0.27	0.33	0.40	0.70
0.85	—	—	0.07	0.14	0.20	0.26	0.33	0.61

或实测空载电流。

根据电容器补偿功率因数的原理，电容器应该是和负载并联的。在三相供电系统中，如单相电容器的额定电压与电网额定电压相同时，应将电容器接成三角形。只有当电容器的额定电压低于电网额定电压时，才将电容器接成星形，这是因为将同样的电容器按三角形接线时，其补偿容量将是星形接线的3倍。

星形接法时，电容器容量为

$$Q_{CY}=\sqrt{3}U_N I_C\times10^{-3}=\sqrt{3}U_N\frac{U_N/\sqrt{3}}{X_C}\times10^{-3}$$

$$\approx U_N^2\omega C\times10^{-3}\quad \text{kvar}$$

三角形接法时

$$Q_{C\Delta}=\sqrt{3}U_N I_C\times10^{-3}=\sqrt{3}U_N\sqrt{3}\frac{U_N}{X_C}\times10^{-3}$$

$$=3U_N^2\omega C\times10^{-3}\quad \text{kvar}$$

式中 I_C——三相电容线电流。

在工程上，对6～10kV的单相移相电容器都按三角形接线，而0.5kV以下的电容器大多选用三相式的，其内部已按三角形接线。这样补偿同等的无功功率，按三角形接线的电容器的电容量仅需按星形接法电容量的1/3。

上式也表示了微法（μF）与千乏（kvar）之间的换算关系，式中电容C是每相等效电容（μF）；U_N是线电压（kV）。

从补偿电容器组运行安全角度出发，在短路容量较大的场所，采用星形接线较好。这是因为对三角形接线的电容器组，当电容器内部元件被击穿时易造成相间短路，而且目前还没有保护这种三角形接线的电容器内元件短路的单台熔断器，由此易引起三角形接线的电容器组爆炸着火。所以，目前新建的电容器组都不采用三角形接线。

例2-5 有一个电感性负载，其取用功率$P=10$kW，功率因数$\cos\varphi_1=0.6$，把它接到380V、50Hz的交流电源上，今欲使电路的功率因数提高到0.9，求并联电容器的容量。

解 补偿电容器与电感性负载并联，电路见图2-59。

已知：补偿前的功率因数$\cos\varphi_1=0.6$，$\varphi_1=53°13'$

补偿后的功率因数$\cos\varphi=0.9$，$\varphi=25°84'$

感性负载的有功功率$P=10$kW

将已知条件代入（2-21）式，得

$$Q_C=P(\operatorname{tg}\varphi_1-\operatorname{tg}\varphi)$$

$$=10(\operatorname{tg}53°7'-\operatorname{tg}25°50')$$

$$=10(1.3318-0.484)$$

$$=10\times 0.8478$$

$$=8.478 \quad \text{kvar}$$

例2-6 一台额定容量为100kVA的电源变压器，能供给几个额定功率为5.5kW、$\cos\varphi=0.6$的负载用电？若负载的功率因数为0.9时，该变压器又能供给几个这样的负载用电？

解 （1）首先计算每一个负载占用电源多大容量。已知总的额定容量$S=100\text{kVA}$。

一个负载的有功功率$P_1=5.5\text{kW}$，$\cos\varphi=0.6$，

则它占有电源的容量为

$$S_1=\frac{P_1}{\cos\varphi_1}=\frac{5.5}{0.6}=9.2\text{kVA}$$

能供给负载数为$n_1=\frac{S}{S_1}=\frac{100}{9.2}=10.9$个

所以，能供给10个到11个5.5kW的负载。

（2）若$\cos\varphi=0.9$时

一个负载占有的电源容量为

$$S_2=\frac{P_1}{\cos\varphi_2}=\frac{5.5}{0.9}=6.1\text{kVA}$$

能供给的负载数$n=\frac{S}{S_2}=\frac{100}{6.1}=16.4$个

所以，能供给16个5.5kW的负载。从而提高了电源的利用率。即负载的功率因数越高，它所需要变压器的容量数值越小，或者说，减轻了电源负担。

用于补偿无功功率，改善电力系统中的功率因数的电容器，叫移相电容器。有高压电容器和低压移相电容器。

WWW.DLSWORLD.CN

从以上分析可以看出，提高用户的功率因数，提高发电设备出力，降低线路中的损耗和功率损耗，减少无功负荷，节约用电，是工业企业一项极为重要的任务，是具有重大经济意义的一项措施。用移相电容器改善功率因数是人工调整功率因数的主要手段之一，也是最经济最合理的方法之一。此外，提高用电设备的自然功率因数，也是一种办法。

（四）提高自然功率因数的方法

凡不采用人工补偿装置、而直接提高设备用电的功率因数的方法叫自然提高功率因数，这是最经济的提高功率因数的方法，有以下几种。

（1）正确选择异步电动机的容量，消除“大马拉小车”的现象。感应电动机容量的选择，应根据所要拖动的负载大小来决定，考虑到起动和短时过载的情况，使其尽量接近满载运行。“大马拉小车”非但增加了设备费用，而且降低了线路的功率因数和电动机的效率。

（2）对于平均负荷小于其额定容量30%～40%的轻载电动机，将其定子线圈从三角形接法改为星形接法，或采用三角形-星形自动变换的接线方案，或更换容量较小的电动机。

（3）限制空载，改善感应电动机和电焊变压器运行方式，如采用无载自动停电装置。

（4）根据负荷的变动大小，及时调节电动机的转速，特别是大容量鼓风机及各种泵类，用调节转速的方法来控制流量，可以节约电能约30%～60%。

（5）变压器的合理使用，避免变压器的空载或轻负荷运行，提高负荷率。在长期轻负荷时，可考虑调换或配置小容量变压器，或者以一台变压器带两个车间的负荷。

（6）提高电动机的检修质量。感应电动机的修理质量对工厂自然功率因数的数值影响较大，如重绕绕组的每相匝数减少，空气隙的变动，都会使电动机的功率因数降低。

（7）采用同步电动机提高功率因数。在装有同步电动机的工厂中，可以利用同步电动机来提高电网的功率因数。因为同步电动机的功率因数可由控制励磁电流而加以改变，若是电动机在过励磁情况下，它从电网就取用了导前的电流，而和一般取用滞后电流的感性负载并联运用时，可以改善电网的功率因数，从而提高供电系统的供电能力，降低线路的损耗，达到节约用电的目的。如果工矿企业有搁置不用的同步电动机，应加以充分利用，使其发挥作用。

练 习 题

2-1 放射式和树干式供电系统各有何优点和缺点？

2-2 已知电动机的功率为10kW，供电距离550m容许电压损失5%，$\cos\varphi=0.8$，求导线截面积。

2-3 某动力用电，系采用三相四线制供电，自配电变压器至动力配电盘的距离为230m变压器出口线电压为380V，已知全部动力机械的额定功率为85kW，需要系数$K_x=0.65$，若容许电压损失$\nu=6\%$，试应选多大截面的BLX型导线供电才可以？

2-4 电缆敷设知识（填空）：

直埋电缆沟底深度不得小于____m。

三相纸绝缘电缆的弯曲半径不得小于____倍电缆外径。

橡皮或塑料绝缘电缆的弯曲半径，不得小于____倍电缆外径。

电缆保护管的直径不得小于电缆外径的____倍。

环氧树脂电缆头所用配合比为环氧树脂6101____份，石英砂____份，硬化剂651____份。

2-5 车间电气线路有几种敷设方法？怎样根据车间环境条件选

拌敷设方法？

2-6 （1）今有一外线工程，已知导线拉力为1t，求拉线所受的力（图2-60）。

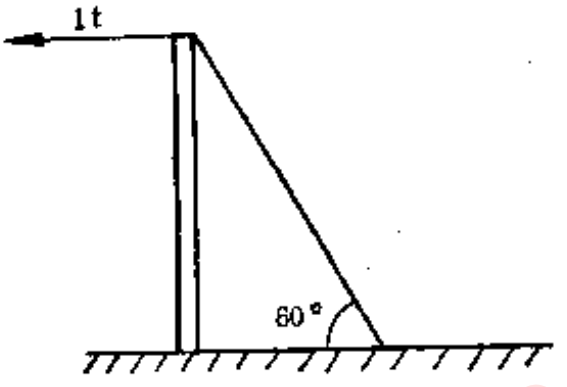


图 2-60

（2）写出钢绞线组装的拉线由哪些器材组成。

2-7 写出下列电线、电缆的正确含义：

ZLQ_2—3×150，LGJQ—300，VLV—2×10，KVV20—4×1.5，BLVV—3×2.5。

2-8 车间穿管配线有哪些基本原则？并提出电线管子的煨弯和套螺纹的方法。

2-9 电缆线路的运行维护有哪些要求？

2-10 怎样维护架空线路？试述巡线检查的内容。

2-11 一般线路完工后应作哪些质量检查？

2-12 如图2-61所示，已知电动机的额定功率为7.5kW（指轴上的输出功率），额定电压为380V，效率为85%，功率因数为0.85（感性），电源电压为380V，频率为50Hz。为了提高电路的功率因数，与电动机并联星形的电容器。若把功率因数提高到0.95，问电容器电容量C应取多大？此时电路的总电流是多大？总功率是否改变？为什么？

WWW.PEOWORLD.CN

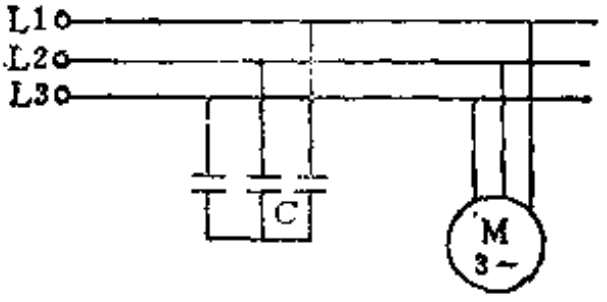


图 2-81

2-13 在电压是220V、$f=50Hz$的交流电路中，接入一台$\cos\varphi=0.65$，取用功率$P=6kW$的电感性负载，为了把电路功率因数提高到0.9，需要用一电容器并联在电感性负载上，试求出并联电容器的电容C，并作出相量图。

2-14 生产机械所需要的功率仅为10kW，如果选用一只40kW的异步电动机来拖动，问会有哪些不良影响？为什么？

2-15 已知Y220L-4型异步电动机，$P_N=30kW$；$I_N=57A$；$U_N=380V$。欲实行无功补偿，需并联补偿电容量是多少（kVar）？

WWW.PLCWORLD.CN

第三章　变压器与电机原理、安装与维修

电机通常是指变压器和电动机，它们是工农业生产和生活中最常用的电气设备。变压器是一种传输能量或传递信号的电气设备；电动机是一种将电能转换成机械能的动力设备。电工除了应了解它们的基本原理、特性和使用方面的知识以外，还应掌握其安装和维修方面的基本技能，为从事于电工实际技术工作打好基础。

§3-1　变压器的工作原理与构造

一、变压器的用途

变压器是一种变换电压（升压或降压）的交流电气设备，它可以把某一数值的交变电压变换成同频率的另一数值的交变电压。还可以变换交流电流、变换阻抗等。

发电厂发出的电能经变压器升高电压后进行远距离输送，到达目的地后，再利用变压器降低电压供用户使用。变压器可以把一种数值的电压变换成不同等级的电压，以满足不同用户的需要。

在输电方面，采用高电压远距离输电最为经济，它大量节约了电能和输电导线。输电线路的能量损失与输送电流的平方成正比，输电电压越高，则线路电流就越小，就可大大减少输电线路上的能量损失，同时，输送电流较小，又可减少输电线的截面，从而大大节省了有色金属（铜、铝等）。我国目前交流输电的电压等级（高压）有6kV、10kV、35kV、

110kV、220kV等几种。

在用电方面，一般都采用较低的电压，一方面是为了使用安全，另一方面对用电气设备的绝缘要求较低，有利于生产。我国现行规定的用电电压等级有：220V、380V及660V等几种，机床照明及维修用灯的安全电压是36V、24V、12V等。

变压器还可以用来改变电流（如变流器）、变换阻抗(如收音机上的输出变压器)、改变相位（如移相器）等，用途十分广泛。

变压器的种类很多，根据用途可分为：电力变压器、电炉变压器、整流变压器、电焊变压器、调压变压器、仪用互感器以及其他特殊变压器等。它们的基本原理和基本结构是一样的。

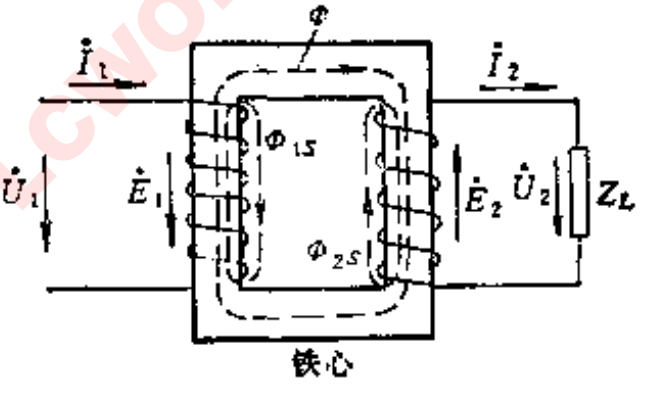


图3-1　变压器的原理示意图

二、变压器的工作原理

变压器是基于电磁感应原理而工作的。如图3-1所示。

当一次绕组N_1接入交流电源U_1时，一次绕组中便有电流I_1通过，从而在闭合的铁心中产生交变磁通Φ。根据电磁感应定律，当穿链线圈的磁通发生变化时，在线圈N_2中就有感应电动势产生，这种现象称为互感现象，由互感引起的电势称为互感电动势。N_1、N_2两线圈是通过磁通来联系的，这种联系叫做磁耦合，与电源相联接的绕组叫做一次绕组（N_1），与负载相联接的绕组叫做二次绕组（N_2）。

WWW.PLCWORLD.CN

1. 主磁通 Φ 与感应电动势 e_1、e_2 的关系

变压器一次绕组接通正弦交流电压 u_1 后，闭合铁心中的主磁通 Φ 也按正弦规律变化。

设 $$\Phi = \Phi_m \sin\omega t$$

根据电磁感应定律可知，Φ 是同时穿过一次、二次两个绕组的磁通。当它变化时，在线圈 N_2 中所产生的互感电动势是

$$e_{2m} = -N_2\frac{d\Phi}{dt}$$

上式表明，互感电动势的大小与互感磁通的变化率成正比，方向由楞次定律确定，如图3-1所示。

在一次绕组 N_1 中产生感应电动势 e_1，在二次绕组 N_2 中产生的感应电动势 e_2，分别为

$$e_1 = -N_1\frac{d\Phi}{dt}$$

$$e_2 = -N_2\frac{d\Phi}{dt}$$

则一次绕组的感应电动势为

$$e_1 = -N_1\frac{d\Phi}{dt} = \omega\Phi_m N_1 \sin\left(\omega t - \frac{\pi}{2}\right)$$

$$= 2\pi f\Phi_m N_1 \sin\left(\omega t - \frac{\pi}{2}\right)$$

式中 $2\pi f\Phi_m N_1$ 为感应电动势的最大值，用 E_{1m} 表示，其有效值为

$$E_1 = \frac{E_{1m}}{\sqrt{2}}$$

即 $$E_1 = \frac{2\pi}{\sqrt{2}}\Phi_m N_1 f = 4.44\Phi_m N_1 f \qquad (3\text{-}1\,a)$$

WWW.PLCWORLD.CN

同理，二次绕组中感应电动势E_2的有效值为

$$E_2 = 4.44N_2\Phi_m f \qquad (3\text{-}1\,b)$$

式中 Φ_m——铁心中磁通的最大值；

f——交流电的频率。

故

$$\frac{E_1}{E_2} = \frac{N_1}{N_2} = k \qquad (3\text{-}2)$$

由上式可知，一次、二次绕组中感应电动势之比等于一次、二次绕组的匝数之比。比值k称为变压器的变比。

由于变压器一次、二次绕组本身的阻抗压降（绕组的电阻和漏抗压降）一般甚小，可忽略不计，在数值上$U_1 \approx E_1$、$U_2 \approx E_2$，同时也说明了主磁通Φ与一、二次侧电压U_1、U_2的关系，

故

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{N_1}{N_2} \qquad (3\text{-}3)$$

上式说明变压器一次、二次电压与其匝数成正比。改变匝数比，就能得到不同数值的二次电压。匝数多的一边电压高，匝数少的一边电压低。如果二次绕组匝数少于一次绕组匝数，则能降压，即降压变压器；反之，如果二次绕组匝数多于一次绕组匝数，则能升压，即升压变压器。

2．一次、二次电流之间的关系

变压器不仅能改变交流电压，而且还能改变电流，所以变压器也是变流器。根据能量守恒定律，一次侧输入的视在功率S_1必定与二次侧输出的视在功率S_2相等，即$S_1 = S_2$，或$U_1I_1 = U_2I_2$，得：$\frac{I_1}{I_2} = \frac{U_2}{U_1}$，又$\frac{U_2}{U_1} = \frac{N_2}{N_1}$

故

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{N_2}{N_1} = \frac{1}{k} \qquad (3\text{-}4)$$

WWW.FLCWORLD.COM

上式结果说明变压器一次、二次电流的大小与其匝数成反比，而一次、二次电流的方向互反。同时还可看出，变压器一次、二次绕组中的电压和电流成反比，即电压高的一边电流小，电压低的一边电流大。

例3-1 一台变压器，一次侧电压$U_1=6000\,V$，二次侧电压$U_2=220\,V$，如果将二次侧接到一台$P=25kW$的电阻炉上，求一次、二次电流各是多少安？

解 二次电流就是这台电阻炉的工作电流，即

$$I_2=\frac{P}{U_2}=\frac{25\times10^3}{220}=114\,A$$

$$\text{一次电流 } I_1\approx\frac{U_2}{U_1}\times I_2=\frac{220}{6000}\times114\approx4.16\,A$$

三、变压器的构造

变压器的主要组成部分是铁心和绕组。

为了减少变压器铁心中的磁滞和涡流损耗，铁心通常是用0.35～0.5mm的硅钢片叠压而成，片与片之间刷涂绝缘层隔开。

变压器的铁心形式可分为心式和壳式两种，心式变压器的绕组套在铁心上，如图3-2所示；而壳式变压器的绕组部分被铁心所围绕，如图3-3所示。大型电力变压器大多用心式，小型变压器多用壳式。

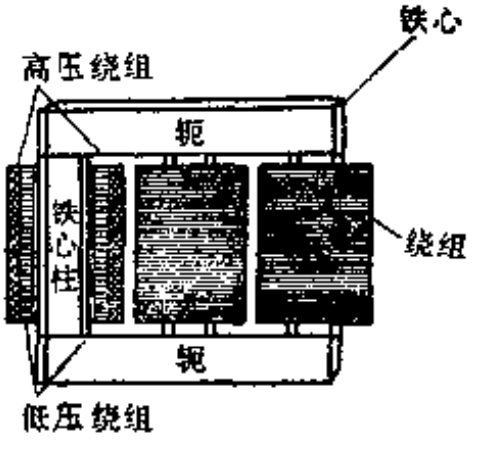


图3-2 心式变压器

此外，三相变压器的铁心，在70年代开始出现新的结构—渐开线式铁心，如图3-4所示。这种结构适合于机械化

流水线生产，而且具有体积小、重量轻、用料省和铁耗小等优点。

变压器的绕组形式分为筒形和交叠式两种。采用筒形绕组时，低压绕组靠近铁心，高压绕组放在低压绕组的外面。大型电炉变压器多采用交叠绕组，低压绕组与高压绕组交替放置（图3-5），各绕组间和铁心间都是互相绝缘的。

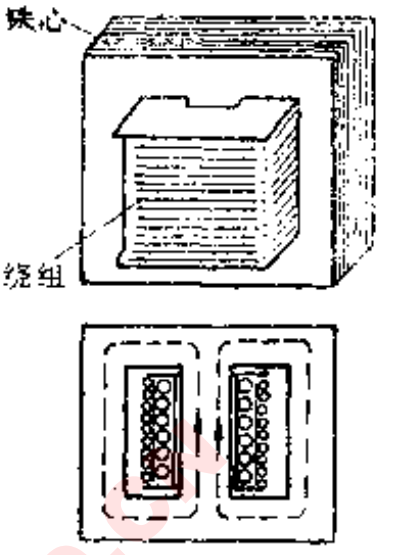


图3-3　壳式变压器

变压器在运行时要产生铁损耗和铜损耗，会使铁心和绕组发热。为了防止变压器过热而烧坏，必须采取适当的冷却措施。小

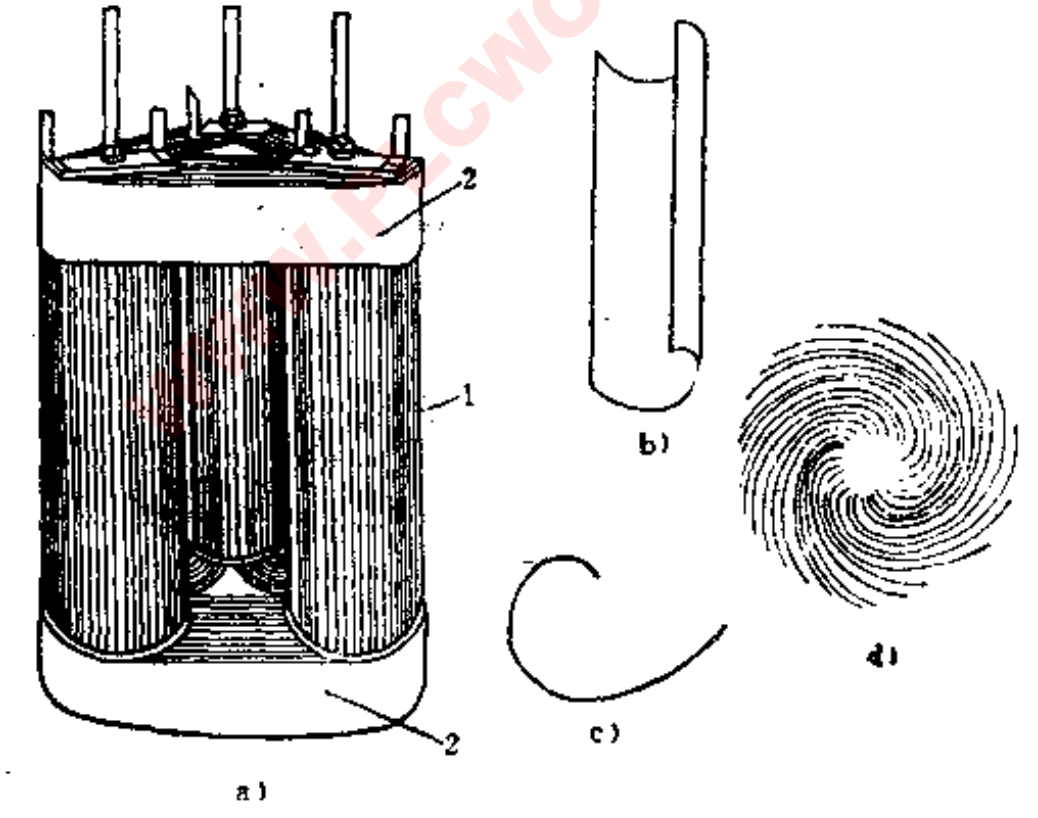


图3-4　渐开线铁心

a）渐开线铁心结构　b）铁心叠片　c）渐开线形状　d）铁心柱断面

1—铁心柱　2—铁轭

容量变压器采用自冷式，热量依靠空气的自然对流和辐射直接散失到周围空气中去。大容量的变压器则采用油冷式，将变压器的铁心和绕组全部浸在油箱内的变压器油中。为了增加散热效应，还在油箱壁上装置散热管，构成自然循环，加强油的对流作用，以加速变压器的冷却。油浸变压器的外形如图3-6所示。

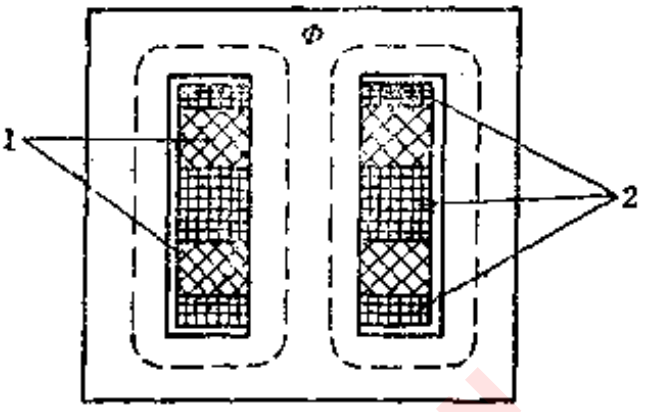
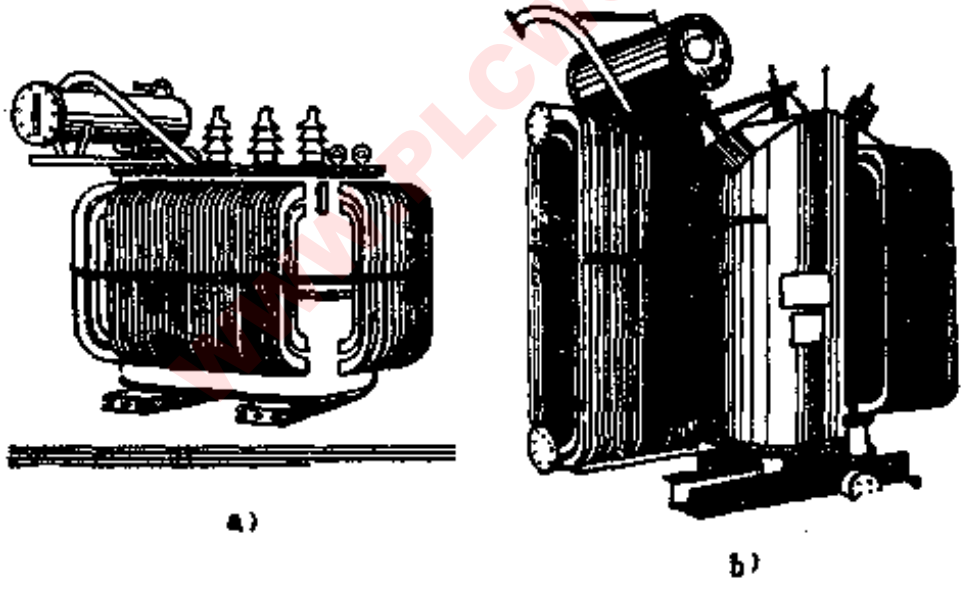


图3-5　交叠绕组

1—高压绕组　2—低压绕组



a)　　b)

图3-6　电力变压器的外形

a）油浸自冷式变压器外形　b）油浸吹风冷却的变压器外形

电力变压器的附件除油箱外，还有油枕、分接开关、安全气道（防爆管）、气体继电器（瓦斯继电器）和绝缘套

管等。

§3-2 三相变压器

一、三相变压器绕组的联接

现代交流电能的产生和输送几乎都采用三相制。如要把某一数值的三相电压转换成另一个数值的三相电压，可用三台相同的单相变压器联接成三相变压器组或用一台三相变压器来实现。

图3-7表示一个三相变压器组。图3-8表示一台三相变压器，它的每个铁心柱上布置着一相的一次绕组和二次绕组。就一相来说，其工作情况和单相变压器完全相同。一次绕组的首端和末端分别用1U1、1V1、1W1和1U2、1V2、1W2表示，二次绕组的首端和末端分别用2u1、2v1、2w1和2u2、2v2、2w2表示。

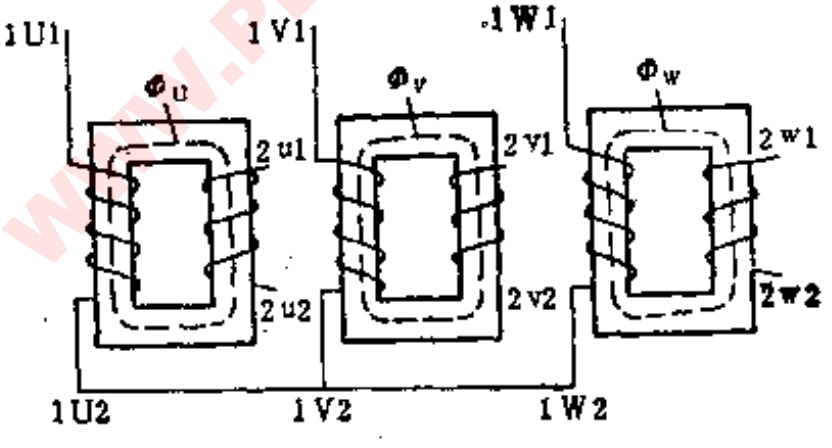


图3-7 单相变压器的三相联接

三相电力变压器绕组的接法，可以接成星形和三角形，表示符号如图3-9所示。

三相变压器的绕组无论按哪一种接法都有一定的要求，

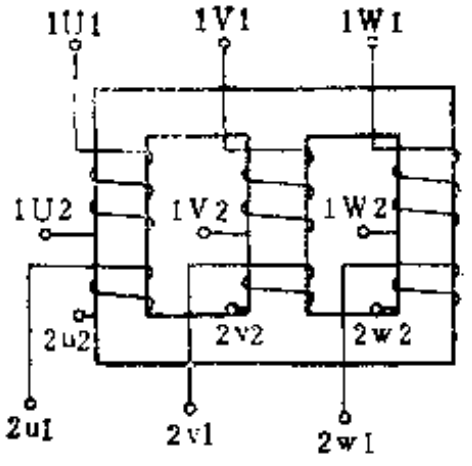


图3-8　三相变压器原理图

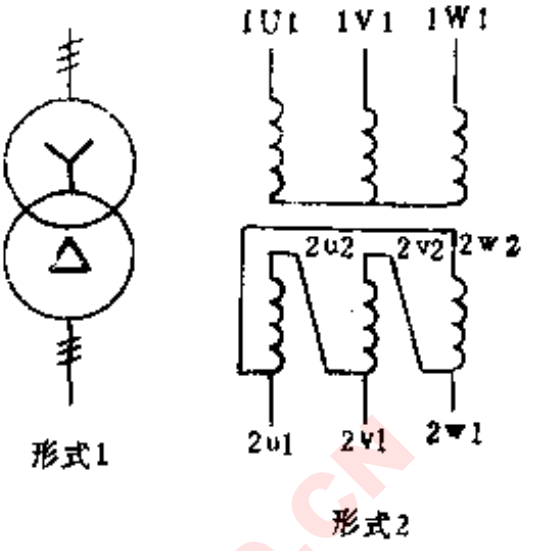


图3-9　三相变压器的图形符号

切不可随意联接。如果其中有一相绕组接反，就会造成不良后果。采用星形接法时，一般是把三相绕组的末端联在一起，构成中性点，而三个首端则接三相电源，如图3-10 a 所示。采用三角形接法，是把绕组的首端和末端相互联接而成闭合的形式，再从三个联接点引出端线接三相电源。三角形接法

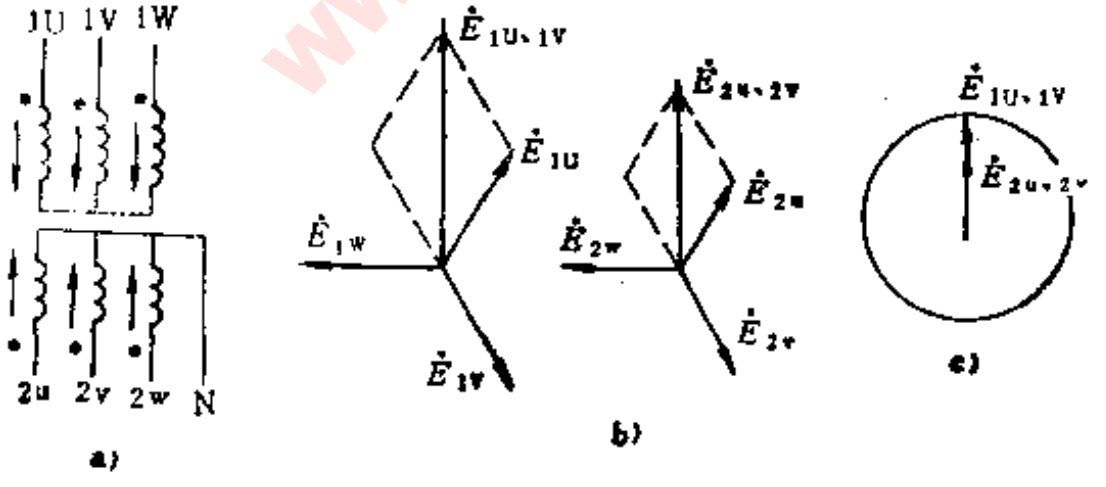


图3-10　Y，yn 0 联结组

a）原理图　b）相量图　c）时钟表示图

又分正相序接法和反相序接法，图3-11 a 所示为正相序接法。

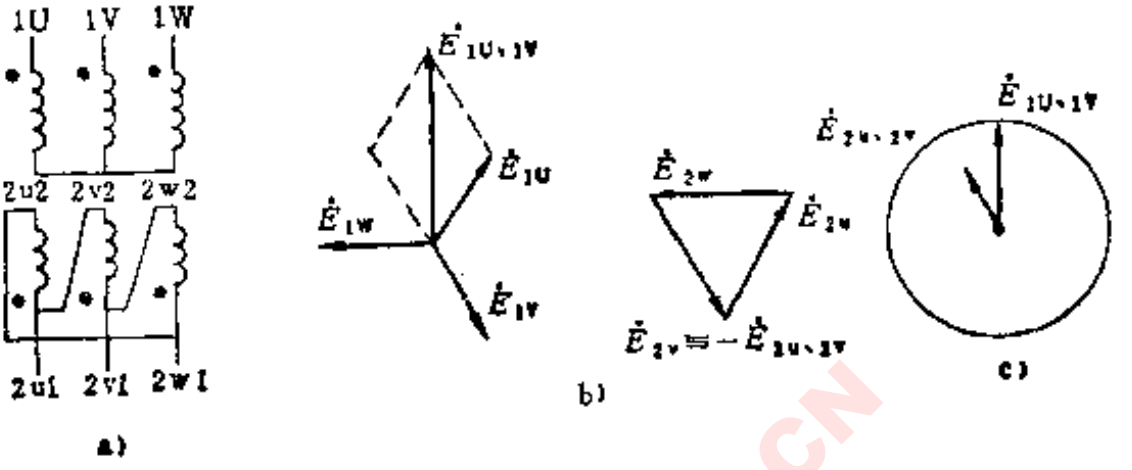


图3-11 Y，d 11联结组

a）原理图 b）相量图 c）时钟表示图

三相变压器的一次绕组和二次绕组都可分别接成星形或三角形，常见的旧的联结组符号有丫/丫$_N$、丫/△和丫$_N$/△三种，新标注为Y，yn0；Y，d11；YN0，d0。在上述符号中，大写字母（分子）表示三相变压器高压绕组的接法，小写字母（分母）表示三相低压绕组的接法。当三相绕组接成星形并具有中心点引出线时，则用YN或yn表示。

若是Y，yn0接法时，如图3-10 a 所示，线电压与相电压的关系为：$U_L=\sqrt{3}U_\phi$；线电流与相电流相等，即$I_L=I_\phi$。

变压器的额定容量：$S_N=\sqrt{3}U_{2N}I_{2N}$VA

或
$$S_N=\frac{\sqrt{3}U_{2N}I_{2N}}{1000}\ \text{kVA}$$

同样Y，d 接法如图3-11 a 所示，对一次绕组有$U_{L1}=\sqrt{3}U_{\phi1}$，$I_{L1}=I_{\phi1}$；对二次绕组有$U_{L2}=U_{\phi2}$，$I_{L2}=\sqrt{3}I_{\phi2}$。

二、三相变压器绕组的极性和接线组别

三相变压器绕组的联接，可以接成丫形和△形两种形式，

在△形接法时，要特别注意绕组的极性。所谓变压器绕组的极性是指变压器一次、二次绕组的感应电动势之间的相位关系。

变压器铁心中的主磁通随时间变化时，变压器一次和二次两个绕组都要产生感应电动势，这两个电动势之间就有一定的极性关系。也就是当一次绕组一端的瞬时电位为正时，二次绕组也必须同时有一个电位为正的对应端。这两个对应端叫做同名端，用符号“•”标出，如图3-12所示。

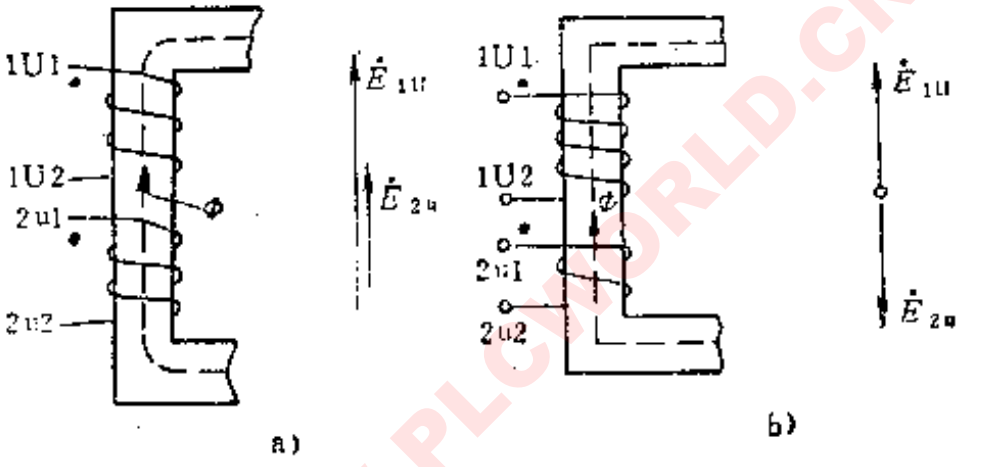


图3-12　单相变压器的极性

当变压器的一次、二次绕组绕向相同时，若把这两个绕组的上端作为始端，分别用字1U1和2u1表示，而下端作为绕组的末端，分别用1U2和2u2，可见一次、二次绕组的同名端（同极性端）都标志为首端，因此一次电动势E_{1u}与二次电动势E_{2u}是同相位的（图3-12a）；如果将一次、二次绕组的不同极性端标志为首端（图3-12b），一次电动势E_{1u}与二次电动势E_{2u}是反相的，相位差为180°。

由上可知，变压器两个绕组的首端1U1和2u1，两个末端1U2和2u2，都不一定是同极性端，而取决于两个绕组的绕

制方向。不难看出，一次、二次绕组中感应电动势之间的相位关系，决定于绕组的绕向和对绕组始末端的规定。

一台变压器，从外面看不到绕组的绕向，如果引出线端上没有注明极性，则可以用试验的方法测定变压器的同极性端。

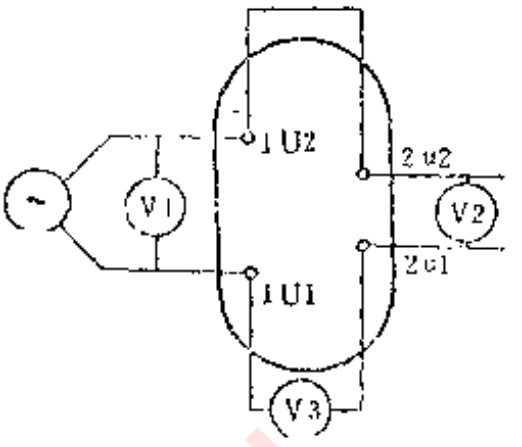


图3-13 用电压表测定极性

通常用电压表法测定绕组极性。图3-13为用电压表测单相变压器，把2u2和1U2点联接起来，在它的高压侧加上一个较低的电压，分别用电压表测出一次、二次侧电压U_1和U_2，再测出1U1-2u1两端电压U_3。若$U_3=U_1+U_2$，则1U2-2u2为异名端相接，1U1和2u1互为异名端，1U1和2u2互为同名端；若$U_3=U_1-U_2$，则1U2-2u2为同名端相接，1U2和2u1互为同名端。因为一次、二次电动势相差180°，它们的联接，在前一种情况下是相加的，在后一情况下则是相减的。

对于三相变压器，不仅各相一次、二次绕组之间应有一致的相对极性，而且各相绕组的始端和末端的标志也应该一致。因为当一相绕组接反后，该相绕组产生的磁动势会与另外两相绕组产生的磁动势相抵消，使得变压器空载阻抗变得很小，接入电源后会产生很大的电流而损坏变压器。

在图3-14 a 中，两个绕组为末端相接时，加电压U_1后，在第三相绕组中几乎不产生感应电动势，即$U_2=0$。这表明，1U1、1V1同时为首端；两绕组为首尾相接，如图 3-14 b 所示，会在第三绕组中感应电动势$E_2=U_2\approx U_1$，这表明，1U1、1V2中一为首端，另一为末端。换一相绕组后，重复上述试

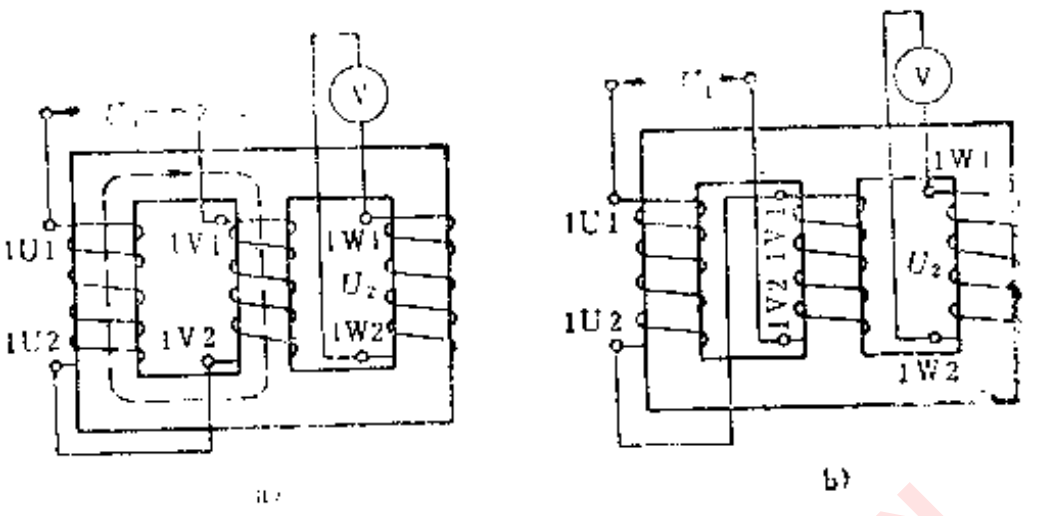


图3-14　绕向测定试验

a）$U_2\approx 0$，1U1、1V1的标志正确

b）$U_1\approx U_2$，U、V相的标志不正确

验，则可决定三相绕组的相对极性。用同样的方法也可决定二次侧各绕组的相对极性。

通过对变压器绕组极性的了解，我们就可以得出这样的结论：三相变压器不论一次侧和二次侧接成什么形式（星形或三角形）、绕在同一铁心柱上的一次、二次两个绕组中的感应电动势是相同的，若一次侧的三个正弦电动势互有120°的相位差，则二次侧的三个感应电动势也互有120°的相位差。在图3-10中，变压器接成Y，yn0，且首端为同名端。从电动势的相量图可以看出，Y，yn0接法一次侧绕组的线电压U_{1U1V}与二次侧绕组的线电压U_{2U2V}相位相同，而且指向"12"，（即时钟的12点位置），叫做0点钟接法，写成Y，yn0。这个"0"叫做变压器的联结组别代号。这种联接法就叫做Y，yn0联结组。

根据这个时钟表示法来说明三相变压器中一次、二次线电压之间的相位关系，把一次侧线电压相量作为时钟的长针，

而把二次侧对应的线电压的相量作为时钟的短针，将长针固定在“12”上，看短针指在几点钟的位置，就以这个钟点作为这个联结组的组别代号。

若三相变压器要求参加并联运行时，除满足变比相等和短路电压相等外，还要有相同的联接相序和相同的联结组别，否则是不允许参加并联运行的。

图3-11为Y，d接法，且一次、二次绕组的首端互为同名端。从相量图可以看出，变压器二次侧对应的线电压 U_{2U2V}（短针）指向“11”，这时的联结组别为“11”点钟，这种接法可写作Y，d11。它只能与Y，d11联结组的变压器并联。

我国电力变压器制造标准中规定通常采用下列三种接线组别。

（1）Y，yn0(Y/Y_N-12)，用于电压为400～230V的配电变压器中，供动力和照明混合负载。

（2）Y，d11($Y/\triangle$-11)，用于低压侧电压高于400V，高压侧电压为35kV以及下的输配电系统中。

（3）Y_N，d11($Y_N/\triangle$-11)，用于高压侧需中心点接零的输电系统中，例如用于110kV及220kV的超高压系统中，此外也可用在低压侧电压高于400V，高压侧电压为35kV及以下的输配电系统中。

三相变压器联结组别的判别，是把变压器各接线端如图3-15所示联接，从1U、1V、1W端加一

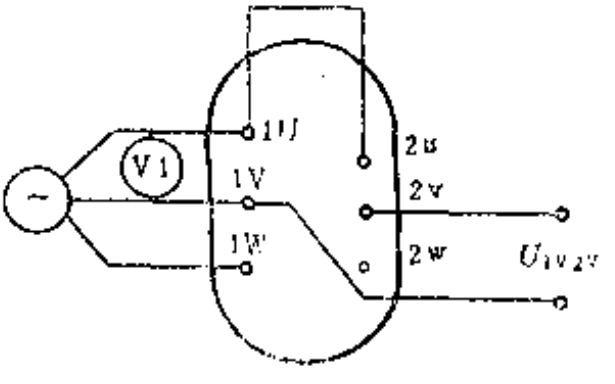


图3-15 三相变压器联结组别判别测定

低电压(如380 V)，用电压表测试电压U_{1V2V}、U_{1V2W}、U_{1W2V}。

若$U_{1V2V}<U_{1V2W}=U_{1W2V}$，即为Y，yn0联结；

$U_{1V2V}=U_{1V2W}<U_{1W2V}$，即为Y，d11联结。

三、变压器的技术数据及铭牌值

型号	容量 (kVA)	额定电压(kV) 高压	额定电压(kV) 低压	二次额定电流(A)	绕组接法	短路电压(%)	空载电流(%)	空载损耗(kW)	负载损耗(kW)	重量(kg) 油重	重量(kg) 总重
SL_{7}-800/10	800	10	0.4	1220	Y，yn0	4.5	1.5	1.54	9.9	820	3206

（1）额定电压和电流：技术数据载于制造厂的产品目录中，所示额定电压、额定电流指线电压、线电流而言。在使用变压器时，要注意它的电压和它的容量。

（2）额定容量：变压器的额定容量用S_N表示，它的单位常用kVA。一台三相变压器容量的大小，由它的输出电压U_{2N}（指变压器一次侧加一额定电压时二次侧的端电压）与输出电流I_{2N}的乘积所决定，即三相变压器的额定容量$S_N=\sqrt{3}U_{2N}I_{2N}$，额定容量用来反映变压器传送最大电功率的能力。

变压器铭牌上标明的额定容量是指变压器二次绕组的额定视在功率，并不等于变压器的实际输出功率。

（3）短路电压：短路电压用u_k表示，系在二次绕组短接后，使二次绕组通有额定电流时，一次绕组所需之外电压，此时二次绕组端电压U_2为零。也可以证明短路电压即为在额定电流下，一次、二次两绕组的总阻抗压降，所以短路电压又叫阻抗压降，故

WWW.NEWWORLD.CN

$$u_n = \frac{I_1 Z_{12}}{U_1} \times 100\% \qquad (3\text{-}5)$$

式中 Z_{12}——一次、二次侧的等效阻抗；

$I_1 Z_{12}$——短路试验时一次侧所加的电压。

短路电压值的大小在变压器运行中有着重要意义，它是考虑短路电流和继电保护特性的依据。

（4）电压调整率：电压调整率是在额定电流下，负载功率因数$\cos\varphi = 1$时，二次电压变化的程度，即二次侧空载电压U_{20}与额定端电压U_2的算术差同U_{20}的比值，称为电压调整率，常用百分数表示：

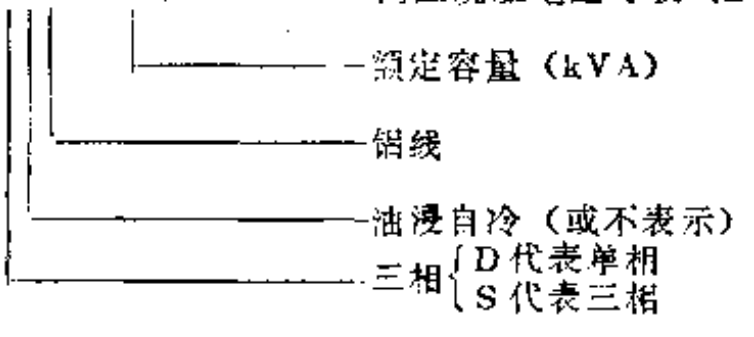
$$\Delta U\% = \frac{U_{20} - U_2}{U_{20}} \times 100\%$$

在一般的电力变压器中，电压调整率约为2%～8%。它反映了变压器的外特性。

（5）变压器的损耗：变压器铭牌上标明的铁损和铜损是额定电压及额定电流下的数值。当负载不等于额定时，铜损可以按与负载电流平方成正比关系求得。例如上例中，当负载电流等于$I_{2N}/2$时，则铜损$P_{Cu} = (1/2)^2 \times 12$，为3kW。而铁损基本不变。

型号——表示变压器的结构、冷却方式、容量、电压等级等。

例如 SJL—800/10



WWW.DLGWORLD.CN

目前低压配电系统多采用节能型三相变压器（如SLZ$_7$型、SZ$_7$型）。

§3-3 电力变压器的抽心检查与安装

在安装容量为1000kVA以上的电力变压器时应吊出心部检查，以便于发现其心部的缺陷并加以检修。

抽心检查可以在室内或室外安装地点进行。在室外露天进行时应搭设工作棚，以防止雨水、灰尘等脏物对心部绝缘的侵蚀。

一、抽心检查前应做好如下工作

（1）绝缘检查：包括油箱密封检查及油样试验。

1）油箱密封检查：观察变压器的外部情况，看是否有渗漏现象，以判定油箱原来的密封是否良好。

2）取油样试验，从油箱中取油样作简化分析，试验内容见表3-1。这项试验的目的仅仅是判断绝缘的需要，实际上一般只做击穿电压试验，查明油中有无水分侵入。试验油样从专门的油样阀门处取出。

取油样试验要特别小心，不能让水分和杂质混入油中，也不能在潮湿天气或油低于周围温度的情况下取样。盛油的容器，使用前用酒精或四氯化碳溶液冲洗干净，加以干燥。取油时，先放出一部分绝缘油，待油中没有脏污，才用盛油容器承接；取完后，用毛玻璃塞子把瓶口塞紧，送往试验。

油样不合格时，要进行加热过滤处理（即干燥和净化），除去油中的水分和污物。

（2）准备好抽油、贮油及注油的装置以及必要的机具。如滤油机、贮油罐、电烘箱、温度计及加热油的设备、起重设备等。

表3-1 变压器油的标准

序号	试验项目	标准	
		新油	运行中的油
1	闪光点（℃）不低于	135	不比新油低5℃以上
2	机械混合物（杂质）	无	无
3	界面张力，不应小于	35mN/m	
4	酸价（KOHmg/g油）不超过	0.03	0.2
5	电气绝缘强度不低于(kV)		
	（1）用于60～220kV的变压器	40	35
	（2）用于20～35kV的变压器	35	30
	（3）用于15kV以下的变压器	25	20
6	水溶性酸（pH值），不应小于	5.4	pH≤4.2
7	介质损耗角正切值tgδ(%)	90℃时不应大于0.5	

（3）抽心应选择环境干净、气候干燥、晴朗无风的天气进行。抽心时，当天的相对湿度不应超过65%，允许暴露的时间为16 h（从抽油开始算起）。

如果铁心上绕组的温度比空气温度高出3～5℃，则铁心在空气中允许停留的时间，可增大2倍。

二、心部检查的程序和方法

待抽心检查的准备工作做好后，才能进行抽心（大型变压器起吊钟罩式壳）。

（1）排放绝缘油：抽油管路直接接到变压器的事故排油阀门上，抽油速度越快越好，尽量在较短时间内把油箱中的绝缘油全部放完。考虑到放出的绝缘油的击穿电压有可能降低，所以在检查心部的同时，还要进行绝缘油的过滤。将绝缘油排入贮油罐内。油罐应清洁无污，用绝缘油冲洗两遍，

方能贮油。

未抽尽的油，由放油堵放出，并用集油盘盛接残油，以减少绝缘油的损耗和保持现场清洁。

（2）绝缘油的处理：在安装现场，选用压力过滤法较为方便，常用的滤油方法有双向滤油和循环滤油两种。双向滤油采用左、右两个油罐，通过滤油机用电动油泵从油罐中抽出陈油，首先经过滤网过滤，除去其中的杂质及水分，送入净油罐。如此进行多遍，绝缘油便得到净化和干燥。在滤油时，应有专人看管。视油的脏污程度，1～2 h 更换一次滤纸。在过滤初期，每次都要把滤纸全部更换，以后只需更换一张滤纸，即取掉进油侧的一张滤纸，在出油侧添加一张滤纸。

滤纸应是中性的，拉伸强度在25N/cm²以上，滤纸的吸水量取决于其干燥程度。所以在使用前，要把滤纸放在80～90℃的烘箱内，干燥约24 h，并保存在干燥而清洁的容器内。使用过的纸，在干净的油中洗净干燥后可以继续使用。为了防止在烘烤滤纸时发生火灾，应在干燥前把滤纸吊起来，尽量把残油漏尽。一张纸一般可以用2～4次。

滤油时，绝缘油在30～40N/cm²的压力下应当能够连续通过滤油器，如果压力增大，必须停下来检查。

如果需要把被处理的油加热过滤，温度最好在50～60℃；加热的方法，可采用蒸气加热，以节约电能。绝缘油经过多次过滤后，重新取样试验，直到合格为止。

（3）吊心时（如图3-16所示），严防外壳与铁心相碰。起吊前打开油箱壁上专为联接引线而设的安装孔，拆去导线引出线才能起吊外壳。

吊心时，必须注意密封衬垫，用工具将法兰盘与胶垫分离，以免把胶垫拉坏或拉长。

心部直接暴露在空气中以后，为了防止杂物和脏污落到心部，应用白布覆盖。

（4）吊心开始前，变压器的心部温度最好不低于10℃，并应稍高于周围温度，否则要将心部适当加热。

（5）机械检查：检查各螺栓、螺母。

1）绕组的轴向压紧。电力变压器机械方面的故障，很多是与绕组的轴向压紧有关。因此必须拧紧绕组的压紧顶丝，应紧顶护环，止回螺母应拧紧。注意每个螺母或压钉要受力均匀，以保持各侧的压紧程度均衡一致。

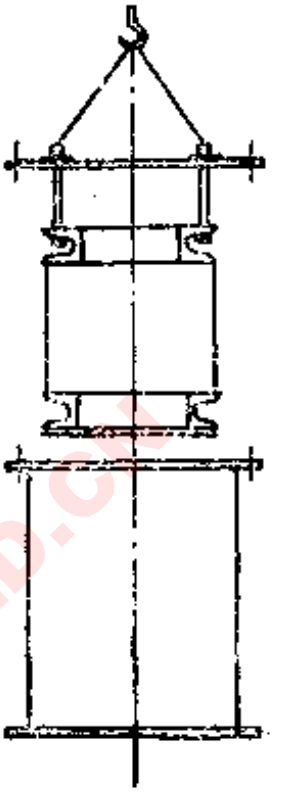


图3-16　变压器吊心

2）检查夹件和垫块有无松动。各钢、木螺栓应玉紧和固定，并应有防松措施。

3）检查引出线及其支持装置。引出端和接线柱的焊接要牢固，接触要良好；导线没有伤痕和局部弯折断裂现象。各种紧固螺栓不得松动，检查时要逐个拧紧，接线正确。其电气距离要符合要求，绝缘包扎要完好。

4）检查分接开关。分接点与绕组的联接应紧固正确，各分接头应清洁，且接触紧密，弹性良好；在各接触位置用0.05mm×10mm塞尺检查，应塞不进去，接触压力为22～50N。

（6）电气测定通常有以下几项。

1）用1000V兆欧表测量每个轭铁的夹紧螺栓与铁心、

铁轭以及铁心与夹铁之间的绝缘电阻。对10kV及以下的变压器，绝缘电阻不应低于2 MΩ，而35kV变压器不低于5MΩ。夹紧螺栓与铁轭间还须作1000 V耐压试验1min。

2）测绕组的直流电阻，与制造厂提供的数据进行比较。

3）测各绕组间的绝缘，记入安装技术记录，供运行中参考，一般不应低于出厂时原始数据的70%。

4）最后冲洗心部表面的脏污，用清洁的绝缘油清洗2～3遍，并从箱底油堵将油放净。冲洗时，喷嘴不要太接近绕组，以免损伤绝缘。

（7）冲洗油箱内部，检查油箱各阀门和油塞的密闭情况，阀门应无缺陷；散热器油门启闭的指示位置应正确，做好注油准备工作。检查完毕后，吊回钟罩式外壳，缓缓落下，严防外壳与心部相碰。

（8）接出各个绕组的引线。吊回外壳时，用白布带把绕组的引线系住，暂时拴在顶盖的相应法兰盘上，以便与套管联结。

（9）安装分接开关的绝缘操作杆，在装回外壳之前，要把分接开关的绝缘传动轴小心地插入分接开关上部的钢套里，把各相应的分接开关都放在位置“Ⅰ”上，配合安装顶盖，予以固定。

（10）在顶盖上安装好低压套管，从安装孔中伸进工具，把低压绕组的引线联好。高压套管等散热器安装完毕以后，再进行安装，但法兰盘接口要暂时用盖板密封好。

（11）向油箱注油：在拧紧外壳与箱底联结法兰之间的螺栓以后（橡胶垫一般压紧至厚度的60%～70%左右为好），这时可开始向变压器注油，并随时检查油箱密封情况。注油

时，由放油阀注入。

注进油箱的油，应当是试验合格的油。对于电压为110kV及以上的变压器，一般采用真空注油。注油时，必须让绝缘油缓慢地流进变压器的油箱，以减少空气混入油中。对大型变压器，注油的全部时间不得少于6 h。注油时，周围空气中的相对湿度不得大于65%。

（12）注油完毕，使绝缘油静止6～10 h后，取油样试验，试验时油温不应低于10℃。

（13）测量绕组的绝缘，包括每个绕组的绝缘电阻R_{60}和吸收比R_{60}/R_{15}（表示摇动兆欧表15 s及60 s时的读数），每个绕组的介质损失角正切值（$tg\delta$）；每个绕组的频率电容比（C_2/C_{50}）（在有条件的情况下进行）。

（14）以上各项检查应作好详细记录。在吊心检查中，如发现暂时不能处理的问题，要按上述步骤尽快把变压器恢复到原来状态。为处理缺陷，可能要再次吊心。

（15）在抽心检查过程中，要做好安全防火工作。准备一定数量的黄砂及灭火器（四氯化碳或CO_2）；泡沫灭火器用于油类防火。

三、变压器的安装

电力变压器的安装方式可以分为室内和室外两种。室内安装需建筑专门的房屋，多为落地式安装。室外安装方式有杆塔式、台墩式和落地式几种。容量在1000kVA及以上的变压器，一般安装在地面的铁轨上，变压器油箱底部设有小车和滚轮。这种变压器往往有气体继电器（瓦斯继电器）。安装时应注意使箱盖和气体继电器均有向上的坡度，如图3-17所示，以使变压器在运行中产生的气体能全部流向气体继电器。

安装时，用垫铁1把变压器的滚轮5垫高。一般要求箱盖对气体继电器侧应抬高1%～1.5%；而对气体继电器的连通管应抬高2%～4%。调整好后，再加上制动铁块3，使变压器不致沿轨道移动。

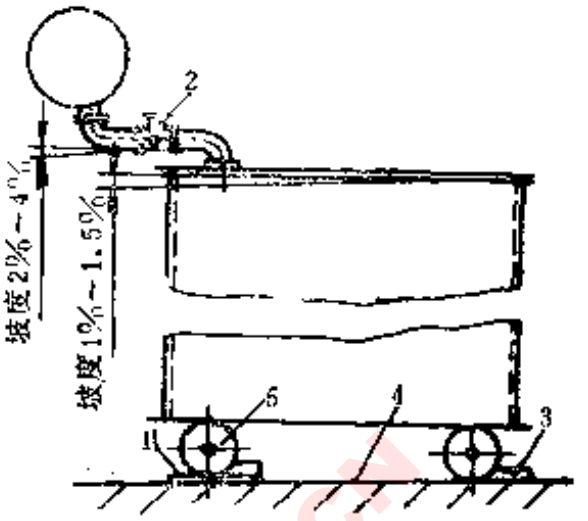


图3-17　箱盖和瓦斯继电器连通管的坡度

1—垫铁　2—气体继电器　3—制动铁块　4—轨道　5—底架上的轮子

变压器就位完毕后，可安装其他的部件，附件装复的顺序与拆开时相反。对大型变压器需要安装的附件包括充油套管、散热器、或强迫油循环的冷油器及潜油泵、热滤油器、防爆管、气体继电器及其连通管、油枕、呼吸器，电接点压力式温度计和遥测温度计的检测元件、各电压等级的导电排（铝排或铝绞线）、运行值班人员巡回检查箱盖时攀登的扶梯、变压器四周的遮栏、粘贴导电接头处的测温蜡片等。在装配前各附件都必须清洗内部，以防将污物带入变压器内。

附件安装完毕，可将气体继电器与油枕间的蝶形阀开通，对变压器继续注油，使油枕的油面上升到油位指示的最高处；然后在油位始终保持在能见到的状态下，逐只打开散热器上的上下蝶形阀，对散热器进行充油。由于散热器的容积与其他附件相比是比较大的，所以为了使油位始终能保持在可见状态，就必须不断地向变压器内注油。为了使散热器内能全部充满油，还要将散热器顶部的放气螺栓塞逐只地打开一些，使散热器内的空气放掉；待放气螺栓塞处有油溢出

时，即可将其拧紧。用同样的方法对热滤油器充油。如为强迫油循环水冷却的变压器，则应对冷油器和潜油泵逐只地进行充油，此时可打开油管的有关阀门，例如潜油泵的进口阀门，冷油器的进出油阀门等。为使冷油器内能全部充满油，同样要放去冷油器顶部的空气。对变压器的下列附件，其顶部和近顶部的放气螺栓塞也都应进行放气，以使油能充满整个容器的内部或达到应该具有的油位。这些附件包括：①入孔门盖板的放气塞；②防爆管顶部的放气塞；③采用套管接头箱时，其顶部的放气塞；④35～40kV套管顶部的放气塞；⑤安装充油套管用的、升高法兰上部侧面的放气塞。变压器所有部件都充满油后，可对冷却系统进行试运转，如散热器的冷却风扇、或潜油泵和冷却水泵等。如果情况都正常，便可交付投入运行。

四、变压器检修和安装后的验收

验收项目主要是进行外观检查和绝缘试验检查。

（1）变压器绝缘试验应合格，无遗漏试验项目（包括测量绕组绝缘电阻和吸收比；测量绕组连同套管一起的直流电阻；绕组连同套管一起的交流耐压试验；密封油压试验；冲击合闸试验三次等）。试验标准见表3-2。

（2）各侧分接开关位置应符合电网运行要求。

（3）变压器本体、冷却装置及所有附件均无缺陷，外壳整洁，无渗漏油和油漆脱落等现象。

（4）各部油位应正常，各阀门的开闭位置应正确。油的简化试验和绝缘强度试验应合格。

（5）变压器顶盖上无遗留杂物，外壳应有良好的接地装置，接地电阻应符合要求。

（6）变压器的基础坚实牢固，轱辘应有可靠的制动装

表3-2 配电变压器新装或大修后验收项目和要求

序号	项目	技术要求	说明
1	测量高、低压绕组绝缘电阻及吸收比（30℃时）	①20～35kV的变压器不低于270MΩ ②3～10kV的变压器不低于200MΩ ③0.5kV以下的变压器不低于10MΩ ④吸收比$R_{60}/R_{15}>1.3$	①用2500V兆欧表测高压绕组对地及相间绝缘电阻、吸收比 ②用1000V兆欧表测低压绕组对地及相间绝缘电阻、吸收比
2	测量变压器绕组连同套管一起的直流电阻	1600kVA以下的三相变压器的三个绕组电阻的偏差应不超过平均值的2%，相间电阻的平均阻值应不超过三相平均值的4%	在所有各分接头上测值
3	油箱作密封试验	对散热管式油箱和平面油箱，油柱高0.6m，经24h后观察，应无渗油现象	封闭油枕呼吸孔，在油枕加油口上装一高0.6m的油管，注入变压器油
4	检查各分接头上的变压比	电压35kV以下，电压比小于3的变压器，变压比允许差为±1%	应在每一分接头下测量变比
5	校定三相变压器联接组	必须与变压器铭牌的标志相符合	方法见图3-15
6	冲击合闸试验	额定电压下，应冲击合闸3次无异常现象	①在使用分接头上进行 ②在变压器高压侧加电压
7	交流耐压试验	交接和预防性试验电压（kV）：2 / 21 / 30 电压级次（kV）：0.4 / 6 / 10 出厂试验电压（kV）：5 / 25 / 35 持续1min	

www.electrolib.cn

置，坡度应合格。

（7）保护装置整定值应符合规定，操作及联动机构动作正确。

（8）校定三相变压器的相位和接线组别应符合并联运行要求，相色要标示正确、明显。

（9）温度表指示正确，整定值符合要求。

（10）变压器的防雷保护应符合规程要求。

（11）事故排油设施完好；消防设施齐全。

（12）在验收时，应移交下列资料和文件：产品说明书、试验记录、合格证件及安装图样等技术文件；安装技术记录；绝缘油化验报告；调整试验记录等。

五、变压器的维修（小修）

变压器的维护包括对变压器的监视、检查及清扫等工作。清扫工作是变压器小修工作的主要内容，每年至少进行一次。清扫工作在停电时进行，在清扫时主要应做好下列工作。

（1）清扫高低压套管积污，检查套管有无裂痕。

（2）检查套管出线接头处有无放电痕迹，接触是否不良，接头是否松动。

（3）检查变压器各油阀及密封衬垫是否漏油，散热器是否堵塞。

（4）检查风扇电机、温度计、气体继电器是否良好；检查高低压熔断器的状况。

（5）检查呼吸器中硅胶是否变色。

（6）检查防爆管及防爆膜状况。

（7）检查变压器的接地装置是否完整良好。

（8）取油样试验并与历年来油化验作比较，检查油位

是否符合标准。

（9）作绝缘预防性试验和继电保护试验。测量绝缘电阻及吸收比：高压绕组每相对地和相间及低压绕组整体对地绝缘电阻和吸收比R_{60}/R_{15}（折算至20℃），并与初试值相比较。

当测量温度与产品出厂试验时的温度不符合时，可按表3-3换算到同一温度时的数值再进行比较。

表3-3　油浸式电力变压器绝缘电阻的温度换算系数

温度差 K	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60
换算系数 A	1.2	1.5	1.8	2.3	2.8	3.4	4.1	5.1	6.2	7.5	9.2	11.2

注：表中K为实测温度减去20℃的绝对值。

当测量绝缘电阻的温度差不是表中所列数值时，其换算系数A可用线性插入法确定，也可按式(3-6)计算，即

$$A = 1.5^{K/10} \tag{3-6}$$

校正到20℃时的绝缘电阻可用式(3-7)、式(3-8)计算，即当实测温度为20℃以上时，有

$$R_{20} = AR_t \tag{3-7}$$

当实测温度为20℃以下时，有

$$R_{20} = R_t / A \tag{3-8}$$

式中　R_{20}——校正到20℃时的绝缘电阻值（MΩ）；

R_t——在测量温度下的绝缘电阻值（MΩ）；

A——换算系数。

变压器电压等级为35kV及以上，且容量在4000 kVA及以上时，应测量吸收比。吸收比与产品出厂值相比应无明显差别，在常温下应不小于1.3。

WWW.PEOWORLD.CN

（10）通过小修找出大修时应该消除及纠正的缺陷。

§3-4 几种特殊用途的变压器

一、自耦变压器

自耦变压器是一种特殊的变压器，它和普通变压器的区别是：普通变压器具有两个绕组，而自耦变压器只有一个绕组。

自耦变压器尽管只有一个绕组，但可分为两部分，如图3-18所示。如自耦变压器用来降压时，将匝数为N_1的一次绕组与电源相接，其电压为U_1；匝数为N_2的二次绕组(实际上是一次绕组的一部分）接负载，其电压为U_2。自耦变压器的绕组也是套在由硅钢片叠压而成的闭合铁心上。

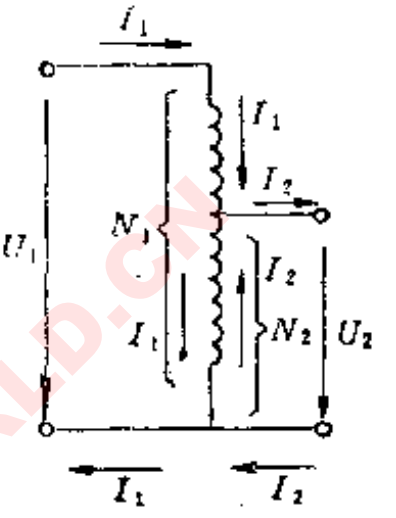


图3-18 自耦变压器

自耦变压器的工作原理与普通变压器一样，一、二次绕组中的电压、电流与匝数的关系仍然为

$$\frac{U_1}{U_2}=\frac{N_1}{N_2},\quad \frac{I_1}{I_2}=\frac{N_2}{N_1}$$

适当选用匝数N_2，在N_2两端就可以得到所需要的电压。

如果在N_2这部分绕组上加一个电压，则在N_1绕组的两端就可得到较高的电压，此时它就起到了升压变压器的作用。

三相自耦变压器一般是接成星形的，如图3-19所示。

自耦变压器的中间出线端，如果做成能沿着整个线圈滑

WWW.ELECWORLD.CN

动的活动触头，那么二次电压就可以在广泛的范围内连续地改变，这种自耦变压器叫做调压器。

小型自耦变压器常用来起动交流电动机。也常在实验室的一些小型仪器上应用。近年来，电力系统也开始应用大型自耦变压器。

自耦变压器的变比不宜过大，因为它的一次、二次绕组有直接的电的联系，一旦公共部分断开，高压会引入低压侧，发生危险。

二、仪用互感器

仪用互感器是电工测量与自动保护装置中使用的特种双绕组变压器。使用仪用互感器的目的有二：一是使测量仪表与高压电路隔离，以保证工作安全；二是扩大测量仪表的量程。根据不同用途，仪用互感器可分为电压互感器与电流互感器两种。

1. 电压互感器

电压互感器的结构和工作原理与小型双绕组电力变压器空载状态相似，如图3-20所示。一次、二次绕组也是绕在一个闭合的铁心上，一次绕组为高压绕组，匝数较多，并联在

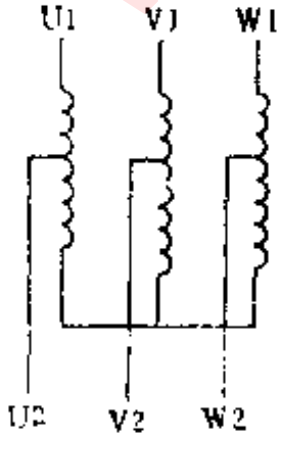


图3-19　三相自耦变压器

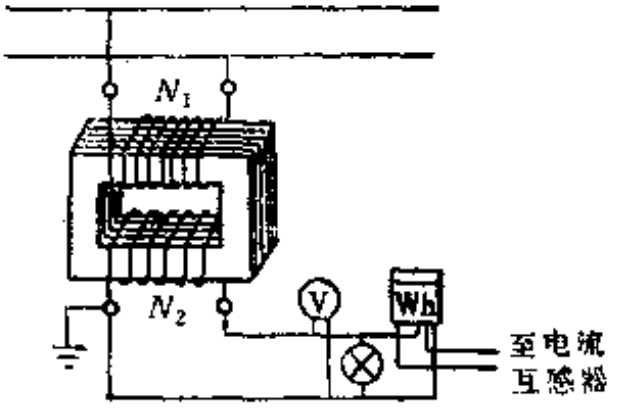


图3-20　电压互感器接线图

被测量的电路中；二次绕组为低压绕组，匝数较少，并联着各种电压仪表，其额定电压一般设计为标准值，为100 V。由于电压互感器二次绕组所接仪表的阻抗很大，相当于一个空载运行的降压变压器。这样，一次、二次绕组的阻抗电压降可忽略不计，则一次、二次电压之比为

$$\frac{U_1}{U_2}=\frac{E_1}{E_2}=\frac{N_1}{N_2}=k_u \quad U_1=k_uU_2 \tag{3-9}$$

式中 k_u——电压互感器的变比。

利用电压互感器，可以将被测量的高电压变换为低电压进行测量，如10kV的高电压，通过10kV/100 V的电压互感器可以直接用电压表进行测量，电压表上的读数U_2乘上倍数k_u，就是被测量的高电压U_1。在电压表的刻度盘上可以直接标出U_1的值。

为了工作安全，电压互感器的铁壳及二次绕组的一端必须接地。这样，当绕组间绝缘损坏时，可以防止与电压互感器联接的测量仪表对地出现一个高电压，而危及工作人员的安全。

图3-21中，是几种电压互感器的外形结构。

2. 电流互感器

电流互感器的结构与原理和电压互感器一样，如图3-22所示：它也有两个互相绝缘的绕组，套在一个闭合的铁心柱上。与电压互感器不同的是，一次绕组与被测电路串联，匝数甚少；二次绕组匝数较多，接仪表的电流线圈（如电流表、功率表的电流线圈等）。在正常情况下，一次侧接上高电压或大电流电路，二次侧电压都很低，大约几伏。操作人员和仪表都很安全。

电流互感器一次、二次电流的关系是

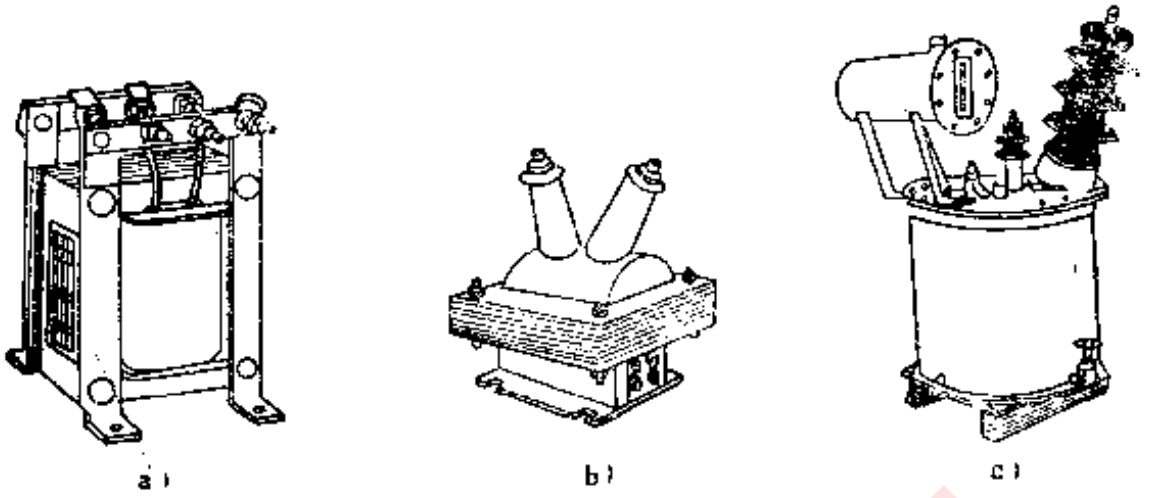


图3-21　几种电压互感器的外形结构

a）JDG-0.5型　b）JDZJ-10型　c）JDJJ-35型

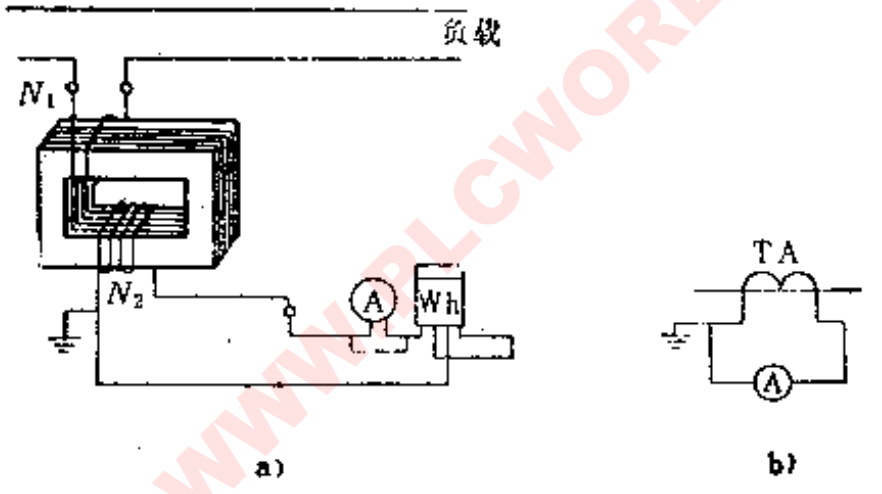


图3-22　电流互感器

a）原理接线图　b）符号图

$$\frac{I_1}{I_2}=\frac{N_2}{N_1}=\frac{1}{k_u}=k_i$$

所以，$I_1=k_iI_2$。式（3-7）中，k_i为电流互感器的变流比。利用电流互感器，可以将被测量的大电流变换为小电流进行测量，二次额定电流一般规定为5 A，因此，在不同电

WWW.PLCWORLD.CN

流的电路中所用的电流互感器，其变流比是不同的，如10/5，20/5，30/5等等。

目前我国生产的电流互感器一次额定电流为5～5000 A，主要特点是采用了环氧树脂或不饱和树脂浇注绝缘和塑料外壳，代替老产品的油浸绝缘和瓷绝缘，同时铁心采用了优质硅钢片，还采用了新结构。因此体积小、性能好。

为了安全起见，电流互感器二次绕组的一端及铁壳必须接地。

必须指出，电流互感器二次侧切不可开路，如开路 $I_2=0$，则一次绕组的磁动势将使铁心的磁通剧增，而二次绕组的匝数较多，所以这时二次绕组的感应电动势很高，会击穿绝缘、损坏设备，并危及人身安全。

图3-23是几种电流互感器的外形结构。

图3-24是钳形电流表，它是电流互感器的另一种形式，用它来测量较大的（20～1000 A）交流电流。钳形电流表是

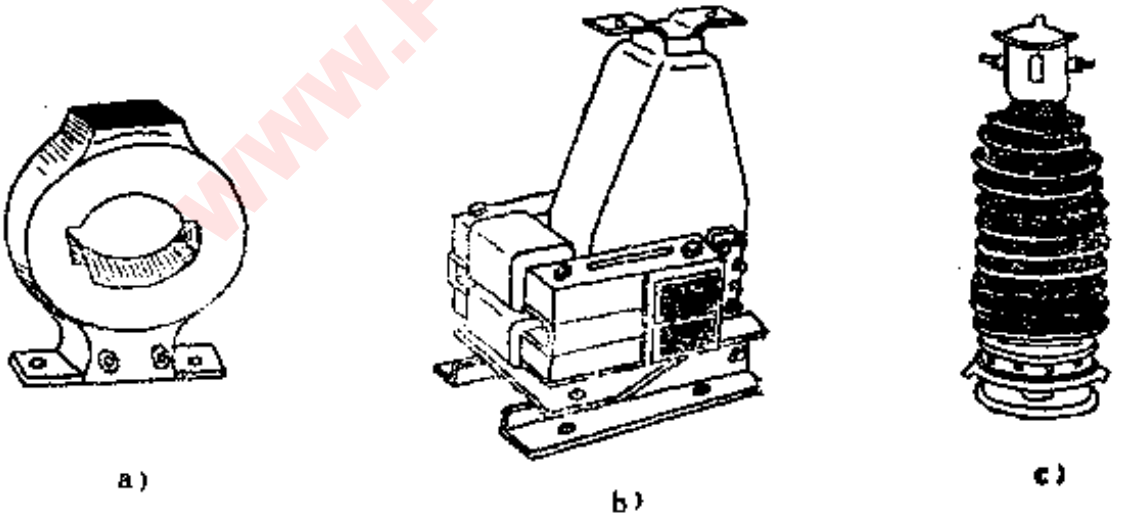


图3-23　几种电流互感器的外形结构

a）LMZJ$_1$-0、5型（500～800/5 A）

b）LQJ-10型　c）LCWD2-110型

由一只同安培表接成闭合回路的二次绕组和一只铁心所构成。其铁心可以开合，把待测电流的导线夹入铁心窗口内，这样，载流导线便成为电流互感器的一次绕组，经过变换，在电流表上就直接指出被测电流的大小。

图3-24　钳形电流表

使用时应该注意的是，每次只能测量一根导线内的电流，而不能同时钳入两根或两根以上的导线，并应把被测导线放在铁心窗口的中心位置上，且使钳口紧密闭合，读数方能准确。

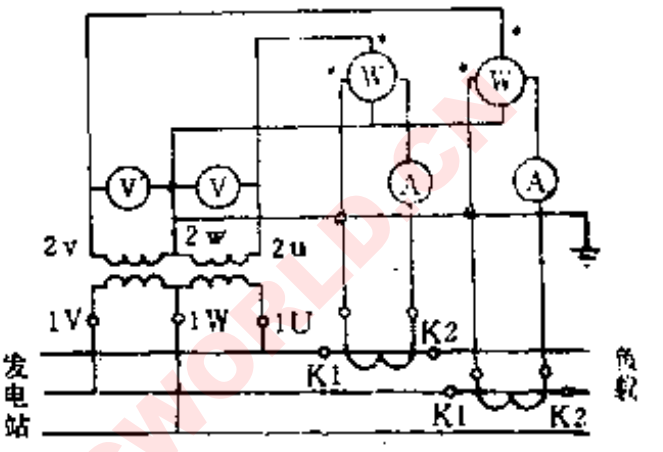


图3-25　接线图

图3-25是安培计、伏特计和一只二元件瓦特表经过仪用电流互感器和电压互感器的接线图。电流互感器为两相式V形接线，电压互感器接成V/V形。

三、电焊变压器

交流电弧焊在生产实际中应用很广泛，从结构上来看，交流弧焊机实际上就是一台特殊的降压变压器，也就是电焊变压器。常用的交流弧焊机有BX_1、BX_2、BX_3等各种系列。

普通变压器在负载电流变化时，二次电压的变化是很少的，如图3-26中外特性曲线Ⅰ所示。因为普通变压器绕组的漏抗很小，负载电流通过时电压降不大。而电焊变压器在焊

接时则要求空载时有足够的引弧电压（约60～70 V），当焊接电流增大时，输出电压就随着迅速下降，输出端即使短路(如焊接时)，二次电流也不致过大。也就是说，电焊变压器的输出电压U_2与输出电流I_2之间，应具有图3-26中外特性曲线Ⅱ所表示的关系，即它必须具有陡降的外特性。为了得到这样的外特性，就要人为地增加它的漏阻抗。因此，电焊变压器的一次、二次绕组不是同心地套在一起，而是分装在两个铁心柱上；有的在二次电路中另外串联一个铁心电抗器，即如图3-27所示BX_2系列电抗式交流弧焊机。

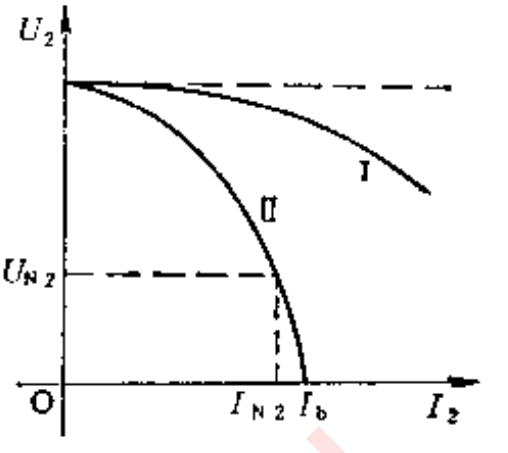


图3-26　普通变压器（Ⅰ）与电焊变压器（Ⅱ）外特性比较

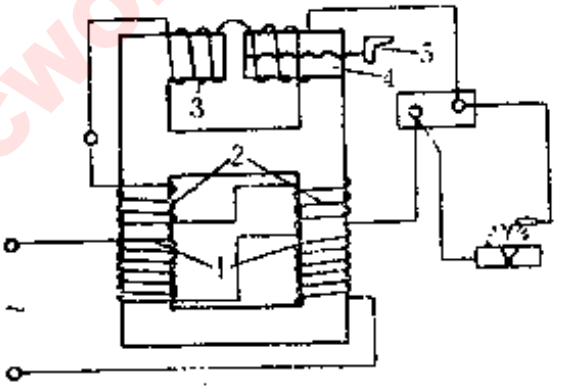


图3-27　电抗式交流弧焊机结构图
1—一次绕组　2—二次绕组　3—电抗线圈　4—动铁心　5—手柄

焊接时，一般是先将焊条与焊件接触，这相当于电焊变压器的输出端短路。这时，因受到线圈漏抗和电抗器的限制，短路电流并不很大(如图3-26中曲线Ⅱ的I_b)；然后，迅速地将焊条提起，焊条与焊件之间就产生电弧。电弧就其性质来说，相当于一个电阻，电弧上的电压降约为30 V左右(图中U_{N2})，相当于电焊变压器的额定负载情况。这时，输

出电流（焊接电流）就是 I_{N2}。当焊条与焊件之间的距离发生变化而使电弧长度变化时，电弧电压也要在U_{N2}上下变化；因此，输出电流也要在 I_{N2} 左右变化。由于焊接变压器的外特性很陡，所以当电弧压降变化时，焊接电流的变化并不显著，电弧比较稳定，这正是焊接时所要求的。

改变与二次绕组串联的电抗器的感抗（调节电抗器的空隙长度或其线圈匝数），可以改变焊接电流。

综上所述，供电弧焊用的电焊变压器应该具有如下特性。

（1）电焊机空载时应具有较高的电弧点火电压（约60～70 V），足以使电弧引燃。

（2）电焊机要能经得起短路电流所产生的热量。为此，电焊电源必须有较大的内部阻抗，以限制它的短路电流。一般短路电流不应超过它的额定电流的1.5倍。

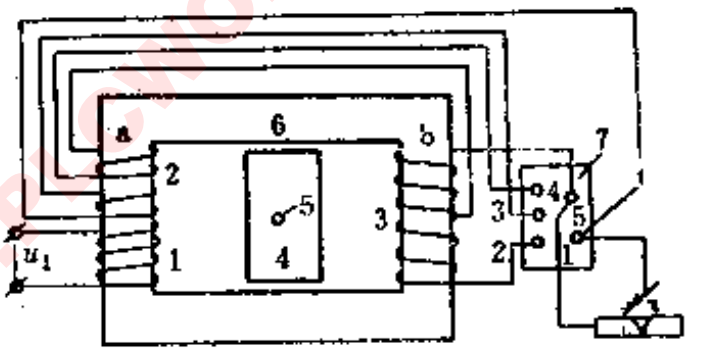


图3-28 磁分路动铁式交流弧焊机结构图
1—一次绕组 2、3—二次绕组 4—动铁心
5—螺杆 6—静铁心 7—接线片

（3）当电弧产生后，作用于电弧的电压应迅速下降。

（4）焊接工作电流应当可调。电弧焊变压器正是按照上述要求设计的。其原理如图3-27所示。

此外，还有一种BX$_1$系列磁分路动铁式电焊变压器，如图3-28所示。它是通过增加变压器本身的漏磁来获得陡降的外特性的。动铁心 4 起磁分路作用。电流的细调，通过移动动铁心 4 改变变压器的漏磁来实现。基本工作原理与串联电

抗器式一样。

§3-5 异步电动机

一、电动机的种类和用途

电动机是应用电能来做功的机器。经过电动机的作用，将从供电线路取得的电能变换为机械能，用以拖动各种生产机械。

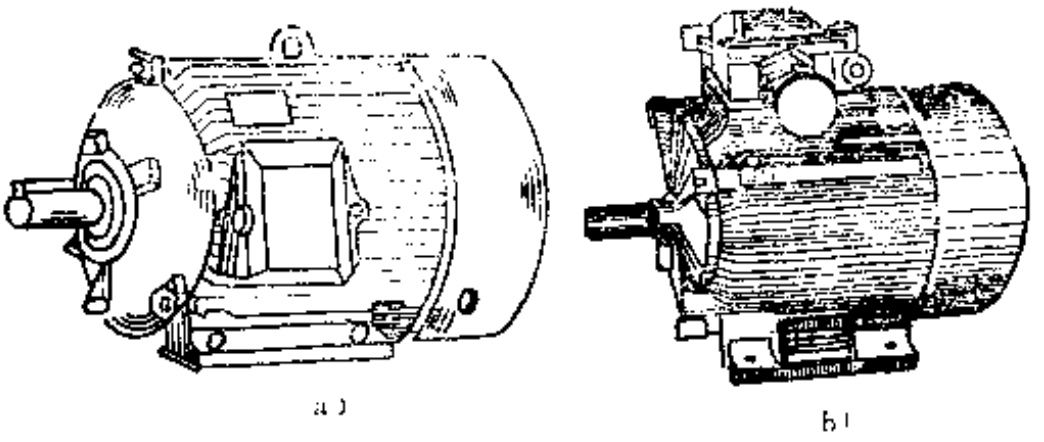
电动机的种类很多，按电动机使用的电源种类分为直流电动机和交流电动机两大类。直流电动机主要用在需要调速和要求起动转矩大的机械上（例如电车）。

交流电动机又可以分为同步电动机和异步电动机（也叫做感应电动机）两大类。同步电动机一般用于功率较大或者转速必须恒定的机械上。

异步电动机按转子型式又分为笼型和绕线转子两种。其中笼型异步电动机具有构造简单、坚固耐用、工作可靠、价格便宜、使用和维护方便等优点，它是所有电动机中应用最广的一种。拖动各种生产机械，如起重机、车床、中小型轧钢机、水泵、通风机、卷扬机、搅拌机、电锯等等。据统计，异步电动机的容量占总动力负载的85%，在工农业生产中具有重大的作用。但其功率因数较低、调速性能差。在一定程度上，使用受到了限制。

为了适应各种不同工作环境的需要，异步电动机的机壳做成不同形式，又分为：开启式、防护式、封闭式、隔爆式、潜水式、防水式等。图3-29为封闭式和隔爆式电动机外形图。

此外还有单相交流电动机（如电风扇、电钻等）和特殊电动机（如交流整流子电机、滑差电动机、自整角机、测速



a)　　b)

图3-29　异步电动机外形图

a）Y系列三相异步电动机　b）YB隔爆型三相异步电动机

发电机等)。下面主要介绍三相异步电动机。

二、三相异步电动机的结构和工作原理

（一）异步电动机的定子和转子

定子是由机座、端盖、铁心、三相绕组等组成，如图3-30所示。转子固定在轴上并装在定子膛孔中，它们不相接触，彼此间保持一定的气隙。中小型电动机的气隙约为0.2～

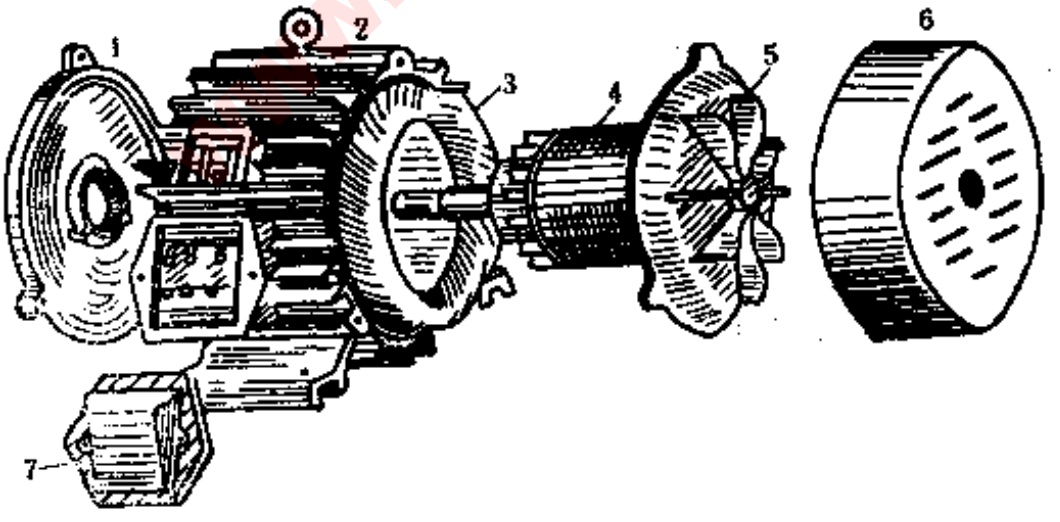


图3-30　笼型电动机的拆散形状

1—端盖　2—定子　3—定子绕组　4—转子
5—风扇　6—风扇罩　7—接线盒盖

1.0mm。定子铁心和转子铁心都是由0.5mm厚硅钢片叠压而成的，见图3-31。定子铁心内圆周上有均匀分布的槽，用来安装定子绕组。定子绕组由绝缘铜线或铝线绕成三相对称绕组，绕组的首末端分别引到电动机出线盒的接线柱上，使用时从接线盒接入三相电源。

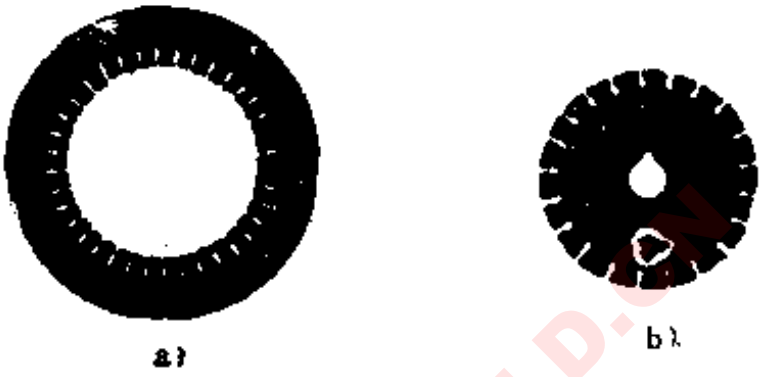


图3-31　定子和转子硅钢片

a）定子的硅钢片　b）转子的硅钢片

定子三相绕组可以联接成星形（Y）或三角形（△），如图3-32所示。使用电机时，要根据电机铭牌上的额定电压和电源电压确定接线方法。目前常用的中小型电动机铭牌上给出有关接线方法的数据有两种。

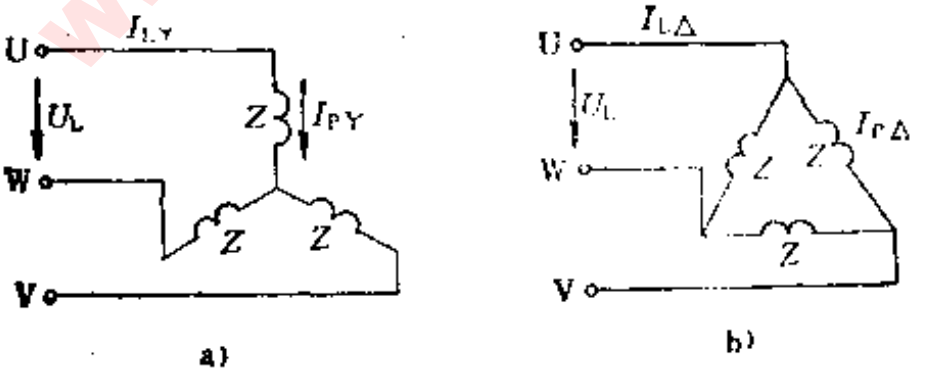


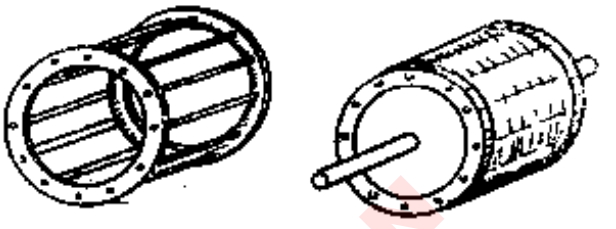
图3-32　定子绕组的联接

a）星形联接　b）三角形联接

一种是额定电压380/220 V，接线Y/△。它表明这种电

动机定子每相绕组的额定电压是220 V。如果电源的线电压是220 V，则采用三角形接法，如电源的线电压是380 V，则采用星形接法。

另一种是，额定电压是380 V，接法三角形。它表明这种电动机每相绕组的额定电压是380 V。若电源的线电压也是380 V，就采用三角形接法。



a)　　b)

图3-33　笼形转子

a）笼形绕组　b）笼形转子

三相异步电动机的转子绕组有两种形式，一种是笼形，一种是绕线式。

笼形转子的结构如图3-33所示，它由安放在转子铁心槽里的铜条组成，铜条的两端各用一个铜环焊接起来，形成一个圆柱形笼子。额定功率在100 kW以下的笼型电动机的转子绕组连同作冷却用的风扇常用铝铸成，称为铸铝转子，如图3-34所示。

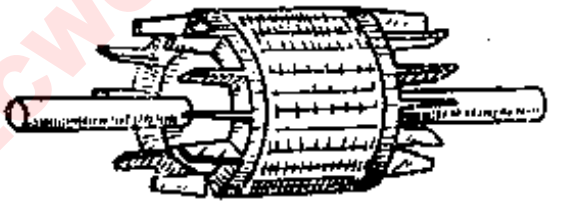


图3-34　铸铝转子

绕线式转子的绕组和定子绕组相似，也是由绝缘导线做成绕组元件，放在转子铁心槽内，然后联接成对称的三相绕组。转子三相绕组通常联接成星形，星形绕组的三根端线，接到装在转轴上的三个滑环上，通过一组电刷引出来与外电路变阻器相联接，以便起动电动机。绕线式转子轴上装有三个滑环，故又叫做滑环式转子，如图3-35所示。

绕线转子异步电动机的结构复杂，价格较贵，用于起重和需要大的起动转矩的设备上（如大型立式车床）以及某些

WWW.PLCWORLD.CN

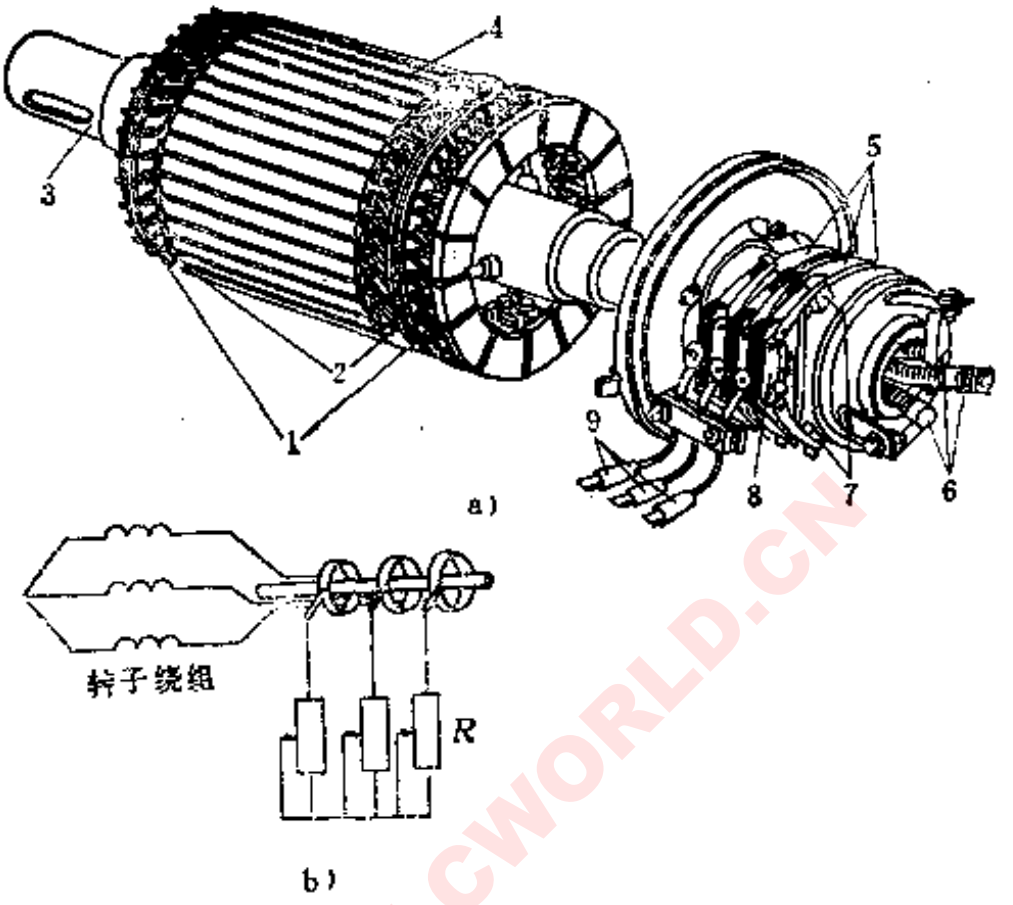


图3-35　绕线式转子结构

a）转子结构　b）外加变阻器的联接

1—镀锌钢丝箍　2—三相转子绕组　3—转轴　4—转子铁心
5—滑环　6—转子绕组出线头　7—电刷　8—刷架　9—电刷外接线

对调速要求不高但容量又较大的场合。

（二）异步电动机的转动原理和转差率

三相异步电动机所以能转动，是基于三相交流电产生的旋转磁场来工作的。

1．旋转磁场的产生

当感应电动机定子三相绕组中通入三相交流电时，在定子空气隙中就产生了旋转磁场。为了分析方便起见，我们把分布在定子周围上的三相绕组用三个相同的单匝线圈代替，

WWW.PLCWORLD.CN

如图3-36所示。三个绕组在定子铁心的圆周上是对称分布的，即在空间相隔120°的位置。联接的方法可以采用Y形或者△形。当三个绕组的始端U1、V1、W1联接于三相对称电源上时，在三个线圈中便产生三相对称电流为

$$i_U = I_m \sin\omega t$$

$$i_V = I_m \sin(\omega t - 120^\circ)$$

$$i_W = I_m \sin(\omega t + 120^\circ)$$

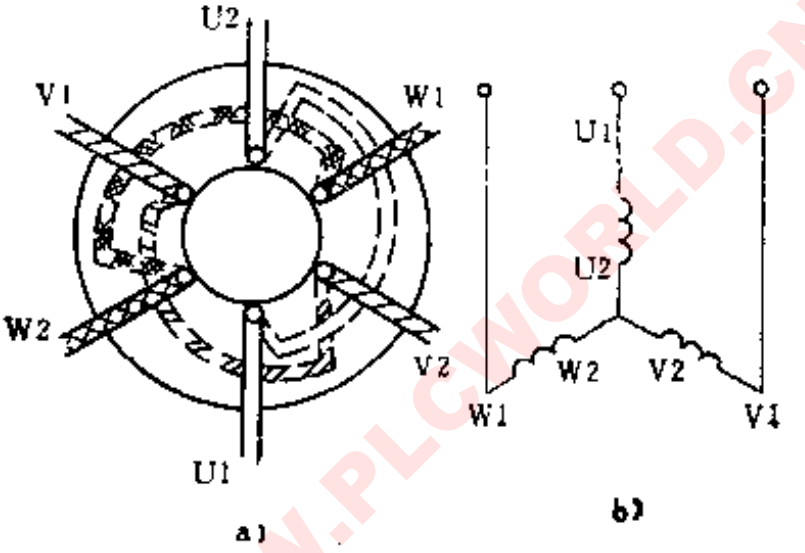


图3-36　简化的三相定子绕组

其波形如图3-37所示。

电流通过各相绕组都产生自己的磁场，磁场的方向与线圈互相垂直。下面选择几个瞬间来分析三相电流所产生的合成磁场。

在 $t = 0$ 的瞬间，定子绕组中的电流方向如图3-37所示。这时$i_U = 0$；i_V是负值，其方向与正方向相反，即从V2到V1；i_W是正值，其方向与正方向相同，即从W1到W2。应用右手螺旋定则，便知合成磁场的方向是由下向上。

WWW.PLCWORLD.CN

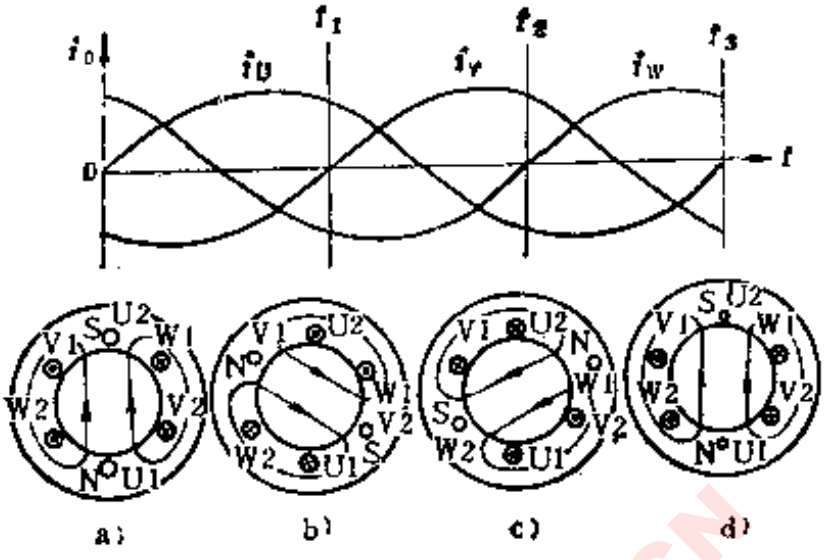


图3-37　三相电流的旋转磁场

在 $t = t_1$ 的瞬间，如图3-37 b 所示。这时 i_U 是正值，其方向从U_1到U_2；$i_V = 0$；i_W是负值，其方向与正方向相反，即从W2到W1。所得合成磁场在空间顺时针方向转了120°。

同样可以作出在 $t = t_2$ 和 $t = t_3$ 时合成磁场（如图 3-37 c、d 所示）。

可见，当定子绕组中通入三相电流时，所形成的合成磁场是随三相电流的变化而在空间不断的旋转着。这就是旋转磁场。

不仅三相交流电可以产生旋转磁场，两相交流电或多相交流电都可以产生旋转磁场。

2. 磁场旋转的方向

从图3-37可以看出，决定于三相定子绕组内电流流过的先后顺序（也叫相序），如三相电流相序为U→V→W，磁场旋转的方向是顺时针方向。

如任意对调其中两根相线，磁场就会按反方向即逆时针方向旋转。

WWW.PLCWORLD.CN

3. 旋转磁场的转速

图3-37中所讨论的磁场是只有两个磁极（即一对磁极）的情况下，当电流变化一周（360°）时，旋转磁场在空间恰好转过一圈。电流按其频率每秒变化 f 周时，则旋转磁场每秒转 f 转，如 $f=50$Hz，每秒钟旋转磁场就在空间旋转50周，所以一分钟内旋转磁场的转数是$50\times60=3000$转。旋转磁场每分钟的转速与电流频率的关系是：$n_1=60f$。

当旋转磁场具有两对磁极（四极）时，电流每交变一周，磁场在空间只旋转半周。由此类推，当旋转磁场具有 p 对磁极时，交变电流每变化一周其旋转磁场就在空间转过1/p转。故旋转磁场旋转的速度与通入定子绕组的电流频率成正比，与旋转磁场的磁极对数成反比。其关系为

$$n_1=\frac{60f}{p} \tag{3-10}$$

式中 n_1——旋转磁场每分钟的转数，即同步转速(r/min)；

f——定子电流频率（$f=50$Hz）；

p——旋转磁场的磁极对数。

如 $p=1$（两极），$n_1=\dfrac{60\times50}{1}=3000$r/min；

$p=2$（四极），$n_1=\dfrac{60\times50}{2}=1500$r/min；

$p=3$（六极），$n_1=\dfrac{60\times50}{3}=1000$r/min；

$p=4$（八极），$n_1=\dfrac{60\times50}{4}=750$r/min。

4. 异步电动机的工作原理和转差率

三相交流电通入定子绕组产生旋转磁场，这时静止的转

子内导体被旋转磁场的磁力线所切割，而感应出电动势 E，电动势的方向可用右手定则来确定，如图3-38所示。

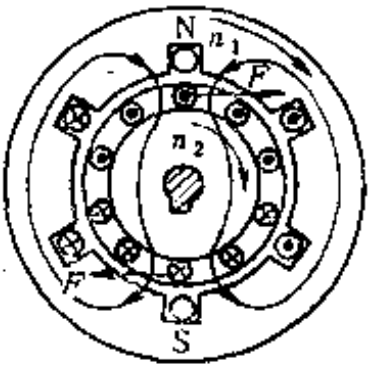


图3-38 异步电动机的工作原理

在感应电动势作用下，闭合的转子导体中就有电流，转子电流与旋转磁场相互作用而产生电磁力 F，力的方向由左手定则决定。电磁力对转轴产生电磁转矩 T，使转子转动。电磁转矩的方向是与旋转磁场的方向一致的。

电动机转子的转速(n_2)是永远小于旋转磁场的转速(n_1)的。如果$n_2=n_1$，则转子与旋转磁场之间没有相对运动，转子导体就不再切割磁力线，因而转子导体中的感应电动势、电流随即消逝，也就不会产生电磁转矩，不再会转动。但是，转子上总是要受到一些风阻和摩擦的，转子速度必将要慢下来，总是低于旋转磁场的转速。转子总是紧跟着旋转磁场以 $n_2<n_1$ 的转速旋转的，所以这种电动机称为异步电动机。这种电动机，因为它的转子电流是由电磁感应产生的，故又称感应电动机。转子转速n_2与旋转磁场的转速n_1相差的程度，用转差率 s 表示

$$s=\frac{n_1-n_2}{n_1}=\frac{\Delta n}{n_1} \tag{3-11}$$

转差率通常用百分数表示。一般电动机在额定负载下的转差率$s_N=1.5\%\sim6\%$，例如一台四极（两对磁极）电动机，它的额定转速 n_N为1440r/min，于是

$$s_N=\frac{1500-1440}{1500}\times100\%=4\%$$

转差率是异步电动机的一个重要参数，在分析异步电动机运行特性时极为重要。例如，当转子转速等于同步转速时，即$n_2=n_1$，则$s=0$；当电动机尚未转动时，转子转速$n_2=0$，则$s=1$。可见异步电动机的转差率的变化范围是从0到1的。

异步电动机的工作原理有许多地方与变压器相似。在变压器中，一次、二次绕组是与同一主磁通相交链；在异步电动机中，定子绕组和转子绕组则与同一旋转磁通相交链，异步电动机的定子绕组和转子绕组分别相当于变压器的一次、二次绕组；异步电动机的旋转磁通相当于变压器中的主磁通。在变压器中一次电流的大小是由二次电流来定的；同样，异步电动机中定子绕组的电流是由转子电流来决定的。

异步电动机与变压器也有其不同之处：变压器是静止的，而异步电动机是旋转的；在变压器的磁路中的空气隙是极小的，而在异步电动机的磁路中却有两个较大的空气隙（定子与转子之间），所以变压器的空载电流极小，而异步电动机在空载时，其定子绕组中通过的电流I_0较大，其值约为定子绕组额定电流I_{1L}的20%～40%。

三、三相异步电动机的机械特性

电动机在工作时，既有电磁运动，又有机械运动。电磁运动表现在电压、电流以及旋转磁场上；机械运动表现在转子转速n_2和轴上的电磁转矩T上。n_2与T的关系〔$n_2=f(T)$〕就是电动机的机械特性。

机械特性可用实验或计算的方法求出，如图3-39所示。图中有三个转矩是在应用中时常要研究的，即起动转矩T_{ST}，最大转矩T_{max}和额定转矩T_N。

电动机在接通电源且刚起动的一瞬间，$n_2=0$。此时的

转矩称为起动转矩T_{ST}。当起动转矩大于电动机轴上的反抗力矩M_f时，转子便开始旋转，并逐渐加速。由机械特性曲线可知，此时电动机的电磁转矩T沿着曲线的CB部分上升，经过最大转矩T_{max}后，又沿曲线BA部分逐渐下降，最后当$T=T_N$时，便以某一定的转速旋转。

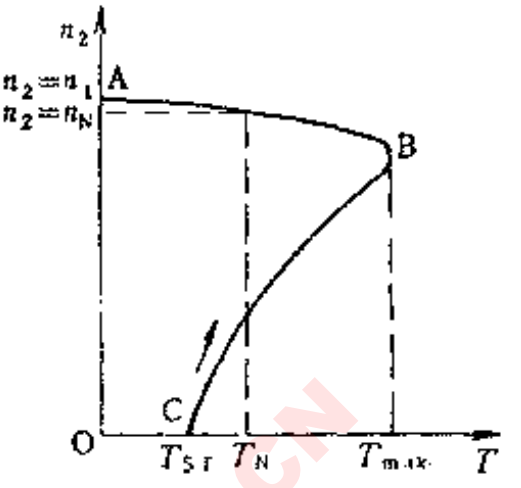


图3-39 三相异步电动机的$n=f(T)$曲线

机械特性曲线即$n_2=f(T)$，曲线中的AB段为电动机的运行范围。与额定转矩T_N相对应的转速n_N为电动机的额定转速。当轴上所拖动的机械负载大于最大转矩时，电动机就无法带动而被迫停转，如不及时切断电源便会烧毁电动机。因此一般电动机的额定转矩T_N要比最大转矩T_{max}小得多。在电动机产品目录中均给出了T_{max}与T_N的比值λ。λ叫做电动机的过载能力，即

$$\lambda=\frac{T_{max}}{T_N} \tag{3-12}$$

一般异步电动机的$\lambda=1.8\sim2.5$。起重、冶金机械用的YZ、YZR系列电动机的过载能力较大，可达2～3。一般用这个数值衡量电动机的短时过载能力和运行的稳定性。

电动机的起动转矩T_{ST}与额定转矩T_N的比值称为电动机的起动能力，即

$$\text{起动能力}=\frac{T_{ST}}{T_N} \tag{3-13}$$

WWW.DIANGONG.CN

笼型异步机的起动能力为1～2.2，起动转矩太小，就不能带负载起动或者使起动时间过长。但是，如果起动转矩过大，则在起动时可能使传动机构受到冲击而损坏。

异步电动机对电源电压的波动有比较大的敏感性。当电源电压有微小的波动时，对异步电动机的转矩影响很大。这是因为异步电动机的转矩T与定子绕组的外接电源电压U的平方成正比，即

$$T \propto U^2$$

这对于异步电动机的工作是很不利的，电源电压低于额定值的85%时，就不允许异步电动机投入运行。

四、三相异步电动机的铭牌和型号

选用电动机主要是由电动机的各种数据来决定。

表3-4列举一台鼠笼式电动机的技术数据。

表3-4　Y 200L$_2$-6电动机技术数据

电动机型号	额定功率 (kW)	满载时					起动电流	起动转矩	最大转矩	总重
		转速 (r/min)	电压 (V)	电流 (A)	效率 (%)	功率因数 cosϕ	满载电流	满载转矩	满载转矩	(kg)
Y 200L$_2$-6	22	970	380	44.6	90.2	0.85	6.5	1.8	2	230

铭牌技术数据的含意如下所述。

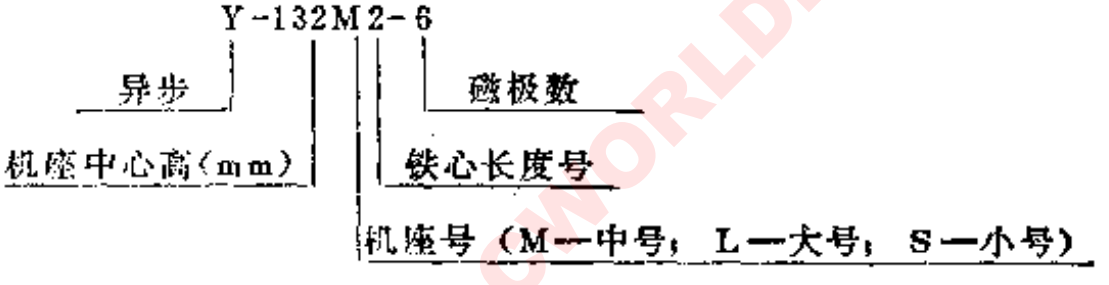
（1）型号：它表示电动机的机座形式和转子类型。国产异步电动机的型号用Y、YR、YZR、YB、YN等汉语拼

表3-5　电动机的铭牌

三　相　异　步　电　动　机			
型　　号	Y160L-4	功率因数	0.85
功　　率	15kW	效　　率	89%
电　　压	380V	防护形式	IP44
电　　流	30.3A	频　　率	50～/■
接　　法	△	温　　升	80℃
转　　速	1450r/min	运行方式	连续(S_1)

音字母来表示。

例如



电机的防护形式由字母IP和两个阿拉伯数字表示，数字代表防护形式（防尘、防溅）的等级。

型号举例如下：

Y——笼型异步电动机（容量为0.55～90kW）；

YR——绕线转子异步电动机(容量为250～2500kW)；

YZR——起重机上用的绕线转子异步电动机；

YB——防爆式异步电动机；

YQB——浅水排灌异步电动机；

YD——多速异步电动机。

上述异步电动机的结构形式主要根据不同的使用环境来选用。

Y系列电动机是我国全国统一设计的新系列产品，是目

WWW.FLOWORLD.CN

前最先进的异步电动机。它具有效率高、起动转矩大、噪声低、振动小、性能优良、外型美观等优点，功率等级和安装尺寸符合国际电工委员会（IEC）标准。

（2）功率（P_N）：表示在额定运行情况下，电动机轴上输出的机械功率，单位是kW。

（3）电压（U_N）：在额定运行情况下，定子绕组端应加的线电压值，一般为220/380 V。大型电机是6 kV或10kV。

（4）电流（I_N）：在额定运行情况下，定子的线电流，A。

（5）接法：指定子的三相绕组接入电源的联接方式。根据电源线电压来决定接法，一般为△/Y。

Y系列中、小型三相异步电动机，功率在3 kW及其以下的，额定电压U_N为380 V，Y接法；功率在4 kW及其以上的，额定电压亦为380 V，但采用△接法。

（6）转速（n_N）：即额定运行时的电动机转速。

（7）功率因数（$\cos\varphi$）：是指电动机输出额定功率时（每相绕组）的功率因数。$\cos\varphi_N = 0.75 \sim 0.9$。

（8）效率（η）：是指电动机满载时输出机械功率P_2（即P_N）与输入的电功率P_1之比，用百分数表示，即

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} \times 100\% \qquad (3\text{-}14)$$

其中，$P_2 = P_1 - \Delta P$。ΔP表示电动机的内部损耗（铜损、铁损和机械损耗）。

（9）温升：是指该电动机在额定负载下运行时，电动机发热高出环境温度的允许值，叫做允许温升。如允许温升为80℃，周围环境温度为35℃，则电动机所允许达到的最高

温度为115℃。

（10）绝缘等级：指电动机内部所用绝缘材料的等级，它规定了电动机绕组和其他绝缘材料可承受的允许温度。目前Y系列电动机采用B级绝缘，最高允许工作温度为130℃；高压和大容量电机采用H级绝缘，最高允许工作温度为180℃。

（11）运行方式：有连续的、短时的、间歇的三种运行方式。同一台电动机在不同的运行情况下，便会得到不同的温升。如水泵、通风机、搅拌机等属于连续运行；快速移动闸门属于短时运行；起重机械等属于间歇运行。三种运行方式用S_1、S_2、S_3表示。

（12）噪声限值：电动机的噪声限值分为N级（普通级）、R级（一级），S级（优等级）和E级（低噪声级）等四个等级，相邻两个等级之间相差5 dB。

五、单相异步电动机

单相异步电动机的结构与通常使用的小型三相异步电动机差不多，转子也是笼型的，定子绕组嵌在定子铁心槽中，只是定子绕组仅有一相。这种电动机结构简单、价格便宜、对电源要求低。由于单相交流电源易于获得，因而在工业、民用等方面得到广泛应用，如用来带动小型机床、电动工具、鼓风机以及洗衣机、电风扇、电唱机等家用电器。

（一）笼型转子在单相脉动磁场中的转矩

单相异步电动机的定子仅有一相绕组，接通单相交流电后，在电机的空气隙中只能建立一个脉动磁场，不能产生旋转磁场，因而单相电动机的转子不能自行转动起来，但只要加一外力，电动机转子就能沿外力作用方向开始转动，在去掉外力之后，电动机便可继续转动。

为了说明上述现象，可运用三相异步电动机的工作原理来分析单相异步电动机。单相脉动磁场可以分解成两个旋转磁场，它们有同样的速度（$n = 60f/P$），磁感应强度 B 的幅值相等，且等于脉动磁场振幅值的一半（$B_m/2$），但是转动方向相反，如图3-40所示。单相异步电动机的电磁转矩可以认为就是由这两个旋转磁场与转子相互作用而产生的电磁转矩。

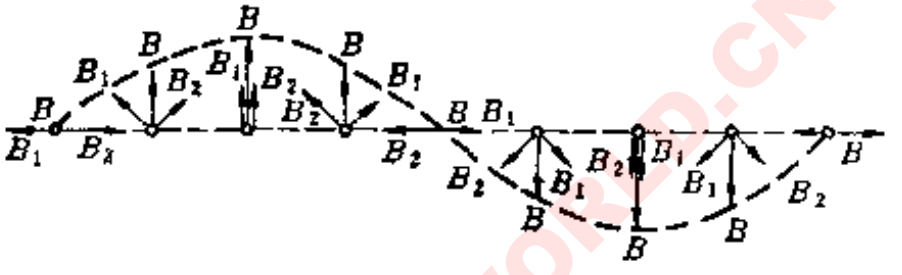


图3-40　脉动磁通分解成两个旋转磁通的图示

当电动机的转子静止时，两个旋转磁场都以速度 n 沿相反方向旋转，这两个旋转磁场在转子中感应出大小相等、方向相反的电动势和电流。定子的两个磁场和转子中电流的相互作用，产生两个大小相等、方向相反的电磁转矩，于是作用在转子上的总转矩等于零。也就是说，单相异步电动机的起动转矩等于零，转子不能转动。要使用单相异步电动机，就必须首先解决它的起动问题。

图3-41是单相异步电动机的转矩特性 $T = f(s)$。图中 T_1 和 T_2 分别为顺转磁场和逆转磁场产生的电磁转矩，T 为合成电磁转矩。从图中可看出：①顺转磁场与逆转磁场对应的转矩特性曲线有相同的形状，但转矩方向是相反的；②转子不动时，转差率 $s = 1$，合成转矩 $T = 0$。当电动机的转动

方向确定后，由于$T_1 \neq T_2$，就有一定的合成转矩值，电动机沿该方向继续转动。因此，当我们施加外力使电动机转子向顺转磁场方向转动时，由于顺转转矩大于逆转转矩，电动机在去掉外力后，仍沿原来的方向转动。如果外力使转子逆时针方向转动，即与逆转磁场方向相同，同样在外力除去后，将继续沿逆时针方向转动。

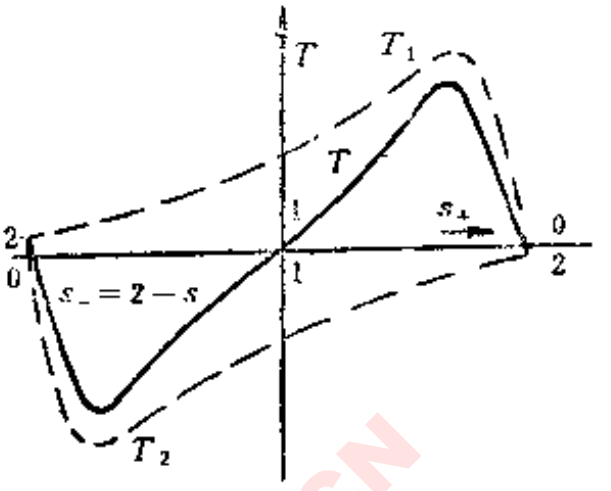


图3-41　单相异步电动机的转矩特性

（二）分相电动机

要使单相异步电动机起动，就要使转子具有一定的起动转矩。要产生起动转矩，可在定子与转子的气隙中加一个圆形的旋转磁场，或是一个椭圆形的旋转磁场。

为了使单相异步电动机能自行起动，通常在电动机的定子铁心上除了主绕组，再安装一个起动绕组，这两个绕组在空间相距90°，然后通入有90°相位差的两相电流，便能产生旋转磁场。其电流波形及几个瞬时的磁场方向如图3-42所示。

可以应用电容器从单相交流电源得到互差90°的两相电流。在起动绕组中串联电容器（如图3-43），就可以使这个线圈中的电流超前，实现了分相。若绕组中电流的相位差接近90°，旋转磁场近似圆形，笼形转子便得到电磁转矩而旋转，这样就有了较大的起动转矩和较小的起动电流。

当电动机转速达到额定转速的75%～80%时，通过起动开关将起动绕组切除，由主绕组单独工作。这种短时接入电

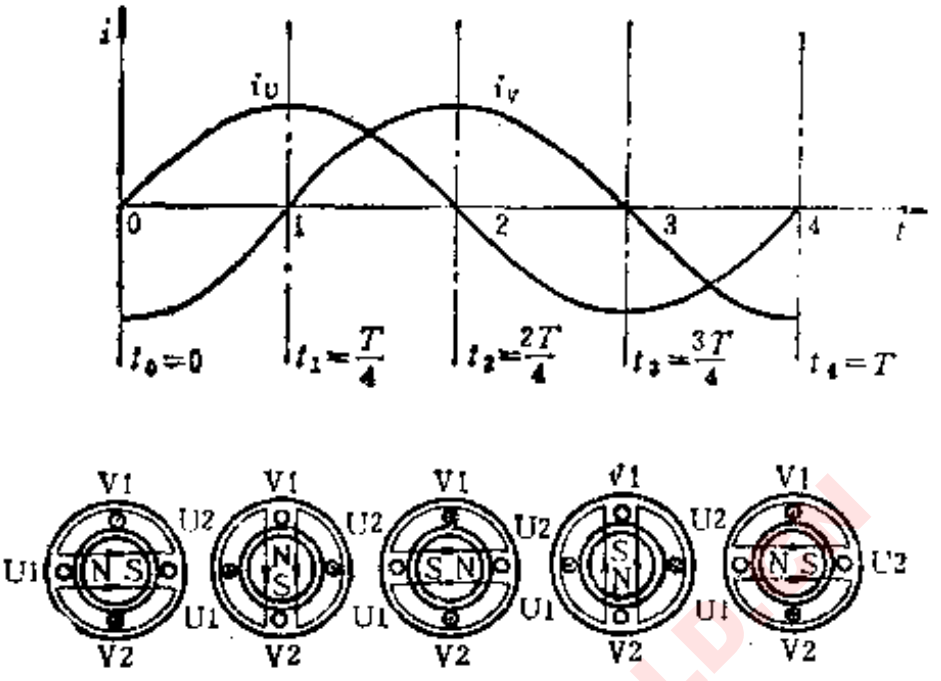


图3-42　互差 $\pi/2$ 的两相电流的旋转磁场

容器的电动机叫做分相电动机。

常见的还有一种，是将一只较小的电容器长期接在电路中，两个绕组同时工作，此时电动机的起动转矩较低，但电动机的效率和功率因数较高，体积小、重量轻，多用于各种轻载起动的机械以及录音机、电风扇等家用电器上。这种长时间接有电容器的电动机叫电容式电动机。图3-44表示利用起动绕组的单相异步电动机四种接线原理图。

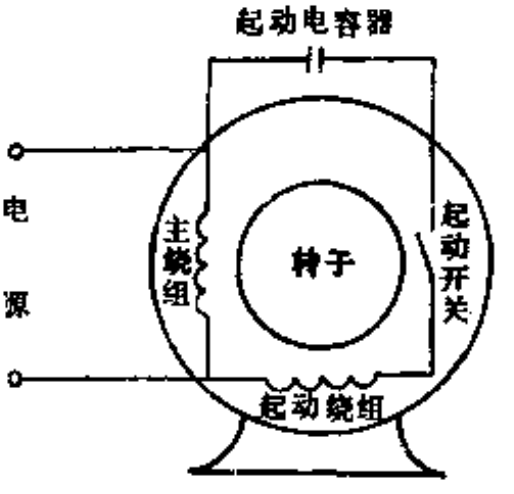


图3-43　电容起动单相异步电动机

利用起动绕组起动的单相异步电动机，只要将起动绕组

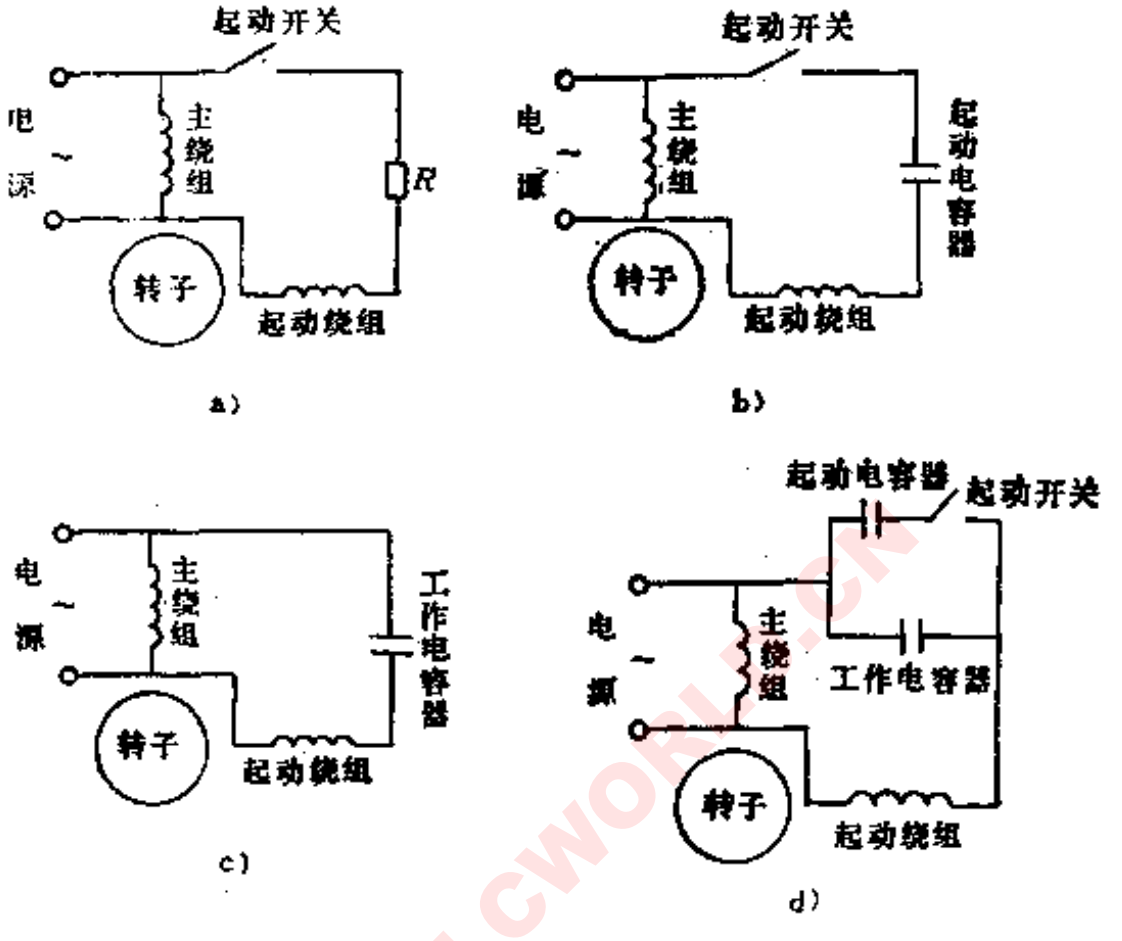


图3-44 单相异步电动机接线原理图

a）电阻起动 b）电容起动 c）电容运转 d）电容起动和运转

的两个端头对调并接入电源，即可改变电动机的旋转方向，洗衣机就是利用这一特点，在定时器内改变起动绕组的接线而变换电动机转向的。

（三）罩极式单相电动机

小容量的单相异步电动机，如小型电风扇和电动模型及电唱机等多利用罩极起动。这种电动机的转子是鼠笼式，而定子则做成凸极的，极上放置单相的集中绕组。定子磁极分成两部分，较小的部分用粗大的短路导体（铜环）“罩住”。图3-45为单相罩极电动机结构示意图。当接通单相电源时，主磁极的磁通脉动时，根据楞次定律，短路导体中感应电压

并产生电流，这一电流产生的磁通将反对被罩部分的磁通变化，磁极上被罩部分的磁通Φ_2滞后于磁极其余部分的磁通Φ_1，这就使磁极下产生了移动磁场，这样两个脉动磁场就构成一个椭圆形旋转磁场，使电动机起动，并沿罩极方向转动，如图3-46所示。

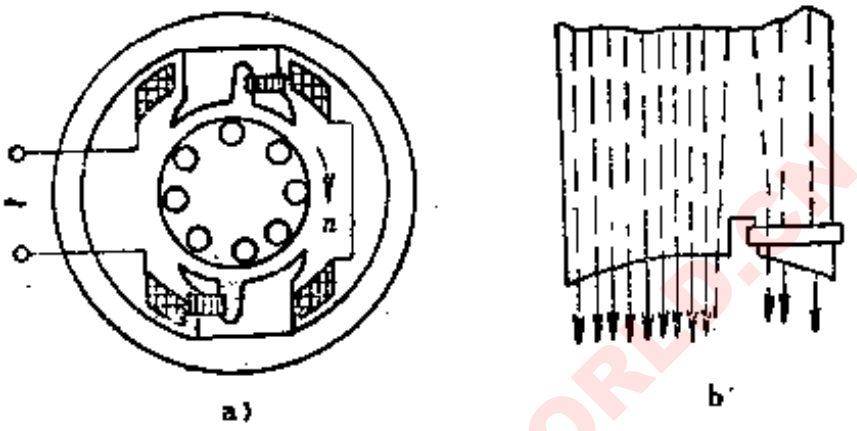


图3-45　单相罩极电动机结构示意图

a）罩极电动机　b）磁极磁场分布

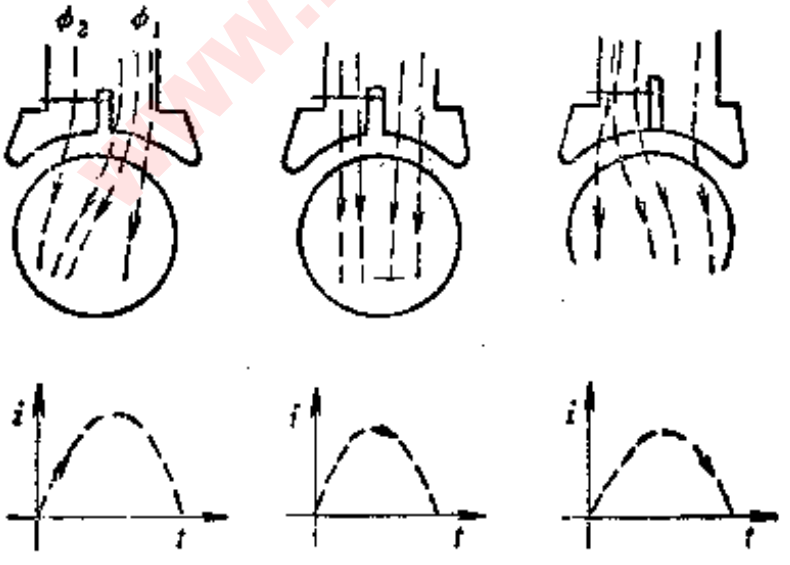


图3-46　单相罩极电动机磁极下磁场移动的情况

i—定子单相交流电流

罩极电动机的转动方向是确定的，即由磁极的未罩部分向罩住部分的方向旋转，它不能通过改变起动绕组出线的接线来变换方向。

§3-6 电动机的安装与接线

一、电动机的安装与校正

一般中小型电动机，可装置在机械本体上或混凝土的机座上。混凝土基础要在电机安装前15天做好；机座尺寸，按电机底盘尺寸，每边外加50～250 mm，通常规定基础深度应为底脚螺栓长度的1.2～2倍。一般在0.5～1.5m左右。基础应留出装底脚螺栓的孔眼，其位置应正确，孔眼要比螺栓大一些，便于灌浆。如果电机重量超过一吨，基础就得加用钢筋。整个基础的重量不应小于机组重量的1.5～2.5倍。

安装电机时，基础面要平整，底脚螺钉的下端要做成叉钩形，以免拧紧螺钉时，螺钉跟着转动。

二、安装电动机时的中心线校准

当电动机安装在机座上以后，就要对电机的纵向、横向水平校正，并对传动装置进行校正。

一般用水平仪进行电动机的水平校正。采用0.5～5mm厚的钢片垫在机座下来校正电机的水平。

传动装置的校正方法分述如下。

（1）皮带传动：用皮带传动时，电机皮带轮的轴与被传动机械皮带轮的轴应平行，还要使得它们的皮带轮的中心线相吻合，校正时可利用一根弦线和重垂，对准图3-47中1、2、3、4四点，调整1、2这根与3、4那根相重合。

（2）靠背轮传动：校正靠背轮最简单的方法是用钢尺校正，如图3-48所示。校正时先取下联接螺钉，用钢尺测量径向的间隙 a 和轴向的间隙 b，测量后把这两个靠背轮转动180°再测，这样重复校正几次，使所测得的 a 值都相等，b 值也都相等，这说明轴心已对准，并且靠背轮的平面也平行。

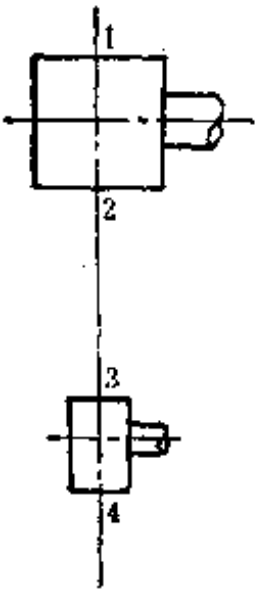


图3-47　带轮校正法

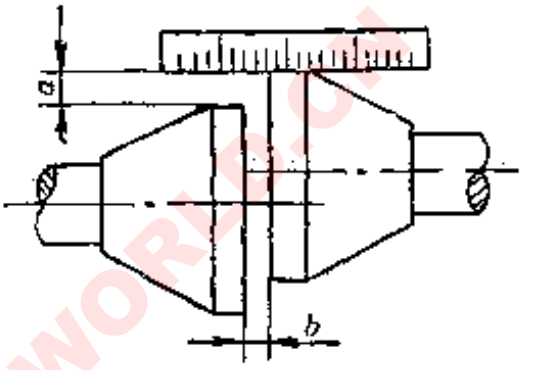


图3-48　用钢直尺校正靠背轮

在精度要求较高的场合，可采用专用的校准工具来校正中心线。例如使用测微规校正中心线。

（3）齿轮传动：齿轮传动时，必须使电动机的轴与被传动的轴保持平行，两齿轮应咬得合适。可用塞尺测量两齿轮间的齿间间隙，如果间隙均匀，说明两轴已平行。

三、电动机的接线

电动机接线前首先要用兆欧表检查电动机的绝缘。对于定子绕组的额定电压为1000 V以下者，常温下绝缘电阻值不应低于0.5MΩ。

WWW.PLCWORLD.CN

其次应查对电动机铭牌上的说明或电动机接线板上接线端子的数量与符号，然后根据接线图接线。如果铭牌电压为220/380V线路电压为380V，则应接成Y使用。若线路电压为220V，则接成△使用。三相感应电动机共有六个端头，各相的始端用1、2、3表示，终端用4、5、6表示；或者始端用U1、V1、W1表示，终端用U2、V2、W2表示（过去始端用A、B、C表示，终端用x、y、z表示），见图3-49。

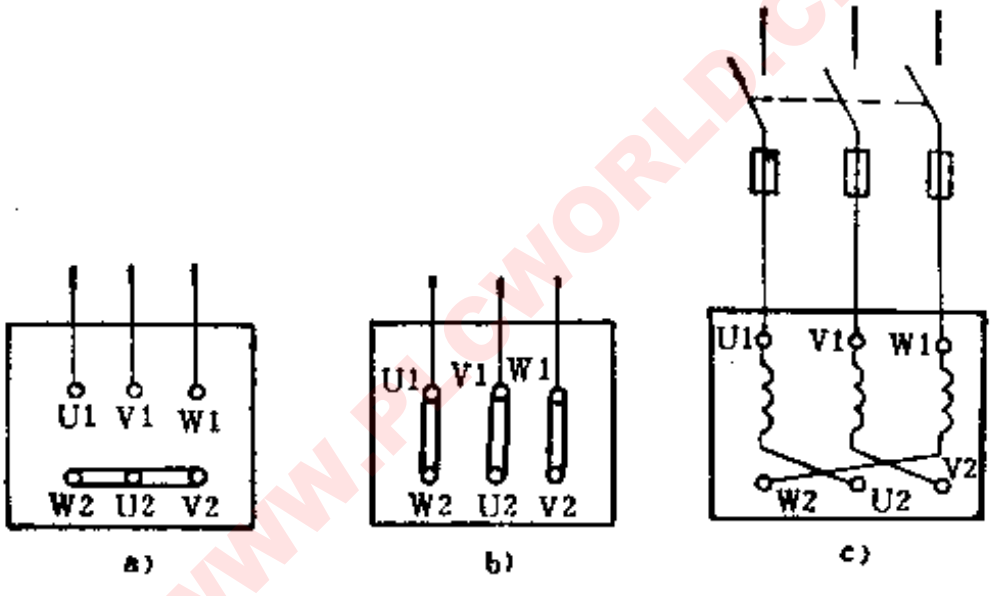


图3-49 定子绕组的接法

当电动机没有铭牌，或端子标号不清时，则应用仪表或其他方法检查，然后再确定接线方法。

常用的辨别电动机定子三相绕组引出线头尾的方法有以下几种。

1. 剩磁电压方法

用一只万用表（500mA以下的），先测被试电动机定子三相绕组的六个引出线头，凡通路的两个引出线头作为一组，

共分成三组。然后，将万用表（作毫安表用）接入三组中任意两组的两个引出线头间，其余四个引入线头可随意串联，如图3-50所示 此时，用手将转子慢慢转动，如果毫安表指数不动或摆动幅度很小，则说明接线准确（即“△”头尾相联），如图3-50 a 所示。如果毫安表指针摆动，则说明接法不准确，如图3-50 b 所示；此时可先将未同毫安表相联的一组的两个引出线头调换后再试，如指针不动，表明头尾调对了；若指针仍摆动，则说明毫安表接入的两组引出线头中，皆为头端或尾端，如图3-50 c 、 d 所示。此时，可调换毫安表接入的两组或另一组的引出线的头尾位置后再试，直至准确为止。

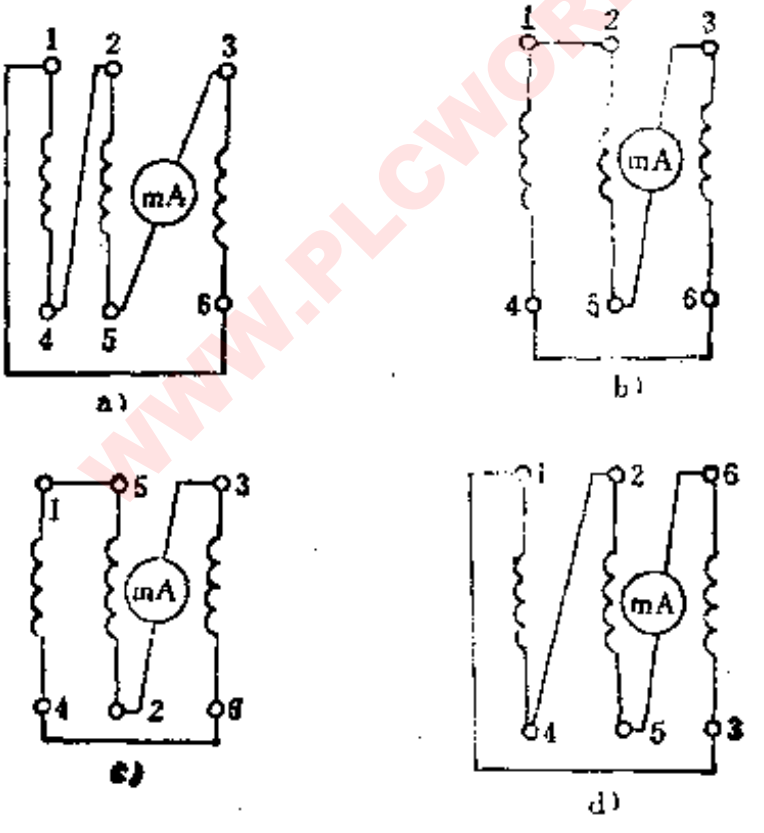


图3-50 剩磁电压法辨别头尾端

WWW.PLCWORLD.CN

这一方法是靠转子旋转时，转子中的剩磁在定子三相绕组内感应出电动势，才能使毫安表辨别出引出线头的头尾来。所以在测量时，必须注意：①电动机转子必须有剩磁，即电动机必须是通过电的或运转过的。②转子转动速度的快慢要均匀，不能相差太大。

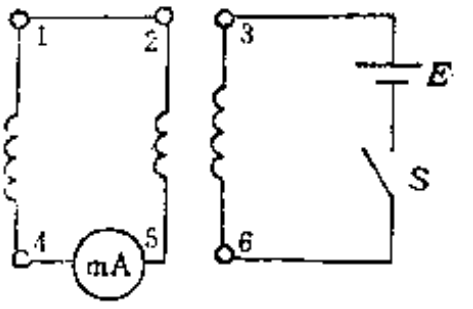


图3-51 万用表法辨别头尾端

2. 万用表法

用一只万用表（mA档）和一节干电池，先将六个引出线头分成三组，挂上标号并接成图3-51所示的线路。当开关S迅速关合时，如在万用表PA上能看到指针向一个方向大幅度摆动时，就表示被测两相绕组头尾相联；如果针颤动或不动，就表示被测两相绕组是头和头或尾和尾相联，两者差异能一目了然。另一绕组的头尾可按同样方法测出。

此方法中所用的万用表可用一副耳机来代替。当迅速关合时，如耳机中有明显的响声，则表示被测的两相绕组是头尾相联，如耳机中无响声，则表示被测两相绕组是头和头或尾和尾相联。但须注意所用耳机的直流电阻应在4000Ω左右，耳机中才能有明显的响声，否则耳机中响声轻微，可能会产生错误。

3. 交流指示灯法

先在电动机定子三相绕组的六个引出线头中，任取一对引出线头，串联一个灯泡后，接于交流电源上。如灯亮，则表示是同相；灯不亮，则表示不是同一相。

然后，将任意两相串联起来，接于交流电源上，另一相

串联一个灯炮，灯炮的电压比电源电压略小，接线图如图3-52所示。如灯亮，表示第一相的尾端接入第二相的头端，如图3-52 a 所示；如灯不亮，则表示第一相的尾端和第二相的尾端相接，如图3-52 b 所示。同样可决定第三相的头端和尾端。此法中用的灯泡可用一只电压表来代替。

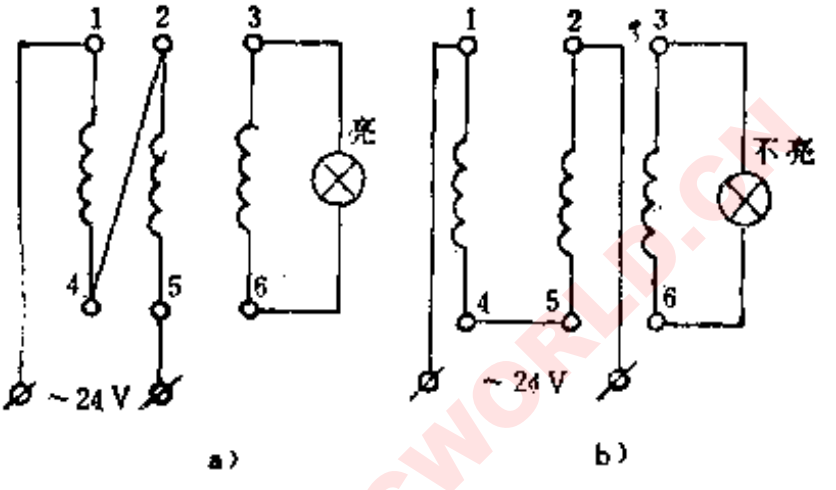


图3-52　交流指示灯法辨别头尾端

§3-7　电动机常见故障及维修

及时发现并迅速消除电气设备的故障，在大多数情况下能预防事故的发生，从而保证正常生产。而只有重视对电气设备的日常维护与经常检查，才能使电气设备完善工作，并预防运行中发生故障。因此，电气设备的维护与检查以及及时发现、判断并消除电气设备的运转故障，是紧密联系、不可分割的两方面工作。

本节主要围绕异步电动机之运行，阐述它所特有的发生故障的原因与排除方法，以及如何加强维护，预防事故的发生。

一、常见故障

异步电动机的故障，一般可分为机械方面的和电气方面的。机械方面的故障大都发生在轴承方面，电气方面的故障主要发生在绕组方面。

电气方面的故障有：不能起动或转动很慢，发生不正常或剧烈的响声；局部发生过热现象，甚至将绝缘烧坏等。

寻找故障的方法除利用仪表进行检查外，有时也可以根据直接观察或靠触觉、听觉、嗅觉来判断。如电机外壳或其中某一部分（如轴承盖）过热，那就很可能发生了故障；如果有烧焦的气味，或发生异常响声，则表示电流过大，可能是过载，也可能是断相运行等等。

电气方面的故障一般检查顺序是先检查电源、熔断器、导线、接头，然后再检查电动机。检查电动机的顺序也是先看外部接线是否正确，然后再看内部有无损伤。电动机的内部故障主要是定子绕组断路或短路。主要故障示于表3-6。

电动机中最常见的故障是断相运行，即三相绕组中有一相断开。造成断相运行的原因很多，如在运行过程中接头接触不良、接线头松动、断线、一相熔体烧断等。为了防止电动机因断相运行而烧毁，应采用适当的保护措施，如选用JR1b-□/3D三相热继电器作断相保护和过载保护，或其他保护措施。

在机械方面的故障有轴承过热损坏、转子扫膛、振动等。

轴承故障常表现在过热与发生异常声响上，轴承的过热可能是由于电动机轴承的歪扭、轴承压力过大、电动机振动、轴承的润滑油过多或过少或变质或不清洁或混入杂物等。如果由于轴承内部滚珠或轴衬破损，除过热外，还会发

表3-6　异步电动机常见故障与可能原因

	故障时的现象	产生故障的原因	寻找故障的方法
起动故障	1.不能起动 2.发响或转得很慢 3.起动电流大而不平衡	1.熔体烧断（断相供电） 2.定子绕组断开或接错 3.转子绕组断开 4.过载，电源电压过低 5.三相电压不平衡	1.检查熔体是否完好 2.用万用表检查定子、转子绕组是否通路 3.用钳形电流表检查三相电路是否平衡 4.测量电源电压
运行故障	1.剧烈响声 2.局部过热 3.冒烟 4.电流过大 5.电流表指针摆动 6.振动较大	1.定子相间短路或断相运行 2.定子绕组相间、匝间短路 3.转子与定子相擦或轴承损坏 4.过载或通风不良 5.绕组接地，缺相运行 6.三相电压不平衡或过高 7.转子电路开路 8.转子不平衡，笼型转子断条	1.拆开各相绕组后，用万用表检查相间是否接通，并测量三相绕组的电压是否平衡 2.用手转动转子，听是否有摩擦声，并检查轴承 3.负载应降低 4.用兆欧表检查接地故障 5.调整电刷压力（绕线式）或修理短路装置 6.对铸铝转子要更换

生异常噪声。

电动机发生振动的原因可能是：电动机传动机构失调、基础不坚固、电动机轴心不正确、转轴弯曲、轴承间隙太小或太大等。因转子动平衡不好而造成振动较为多见。绕组短路，使磁性不对称，也会引起振动。

电动机转子与定子之间气隙太小，容易引起定子与转子

WWW.PLCWORLD.CN

之间相碰（扫膛）。端盖、机座、转子三者不同心也会引起扫膛。大型电动机因定子磁路不对称而产生轴电流现象，也会引起扫膛。

为了消除故障，应当调整和校正电动机安装位置，调整电动机轴心线（校平衡），调整定子与转子之间的气隙，检查轴承有无松动。为了使轴承保持正常间隙，必须刮削轴承衬或重新挂瓦。

二、一般维护

电动机在运行过程中，一般情况下的维护是要经常做好清洁、防尘、防潮和注意温升等工作。现分为三个主要方面介绍，即绝缘绕组、机械和集流装置。

1．绝缘绕组

绝缘材料的绝缘能力视干燥程度和温度而异，所以要保持电机绕组干燥和防止温度过高。

（1）防潮维护：电动机受潮会使电动机的绝缘性能降低，确定电机是否受潮，可用兆欧表测量电机绝缘电阻。如不符要求，则应进行烘干处理，烘干的加热温度最高不应超过85℃，最低为60℃，一般每小时升温 5～8℃。干燥完毕的标志是：吸收比$\frac{R_{60}}{R_{15}}\geqslant 1.3$，绝缘电阻值不小于1MΩ/kV，并在同一温度下经5 h 稳定不变。

绕组受潮的原因很多，可能是长期搁置受潮（如新安装或停运三个月以上），受雨水侵袭或装置地点过低，积水潮湿等。一般采取经常通风措施以保持干燥，在潮湿或寒冬的季节加温烘干，是防潮的普遍方法。

（2）清洁、防尘维护：电机的内部不允许积有灰尘、泥土或其他杂屑侵入。这些杂物侵入后，将严重降低其绝缘

电阻，以至损坏绝缘，产生击穿或闪洛现象，甚至造成接地故障。

在消除内部灰尘时，可用吹风器清除，特别是电刷、滑环和短接机构，更应保持洁净。绕组上沾有油污时，用白布沾四氯化碳擦洗；清洁干燥后，在绕组露出部分，涂上绝缘漆，以加强绝缘。

（3）防热维护：电动机在运行时，不允许超过铭牌上规定的容许温升。因为绝缘的加热温度以及加热时间的长短，对于绝缘强度亦即电机的寿命都有很大影响。

电动机过热的原因有：过载时间长，通风不足，不正常运行（如电压太高），进风温度太高，接线错误，线圈质量不良等。对中小型电动机，常用酒精温度计进行温度测量。测绕组温度时，可旋下吊环，把温度计插入吊环螺孔内（温度计底部用金属箔包住）。读得的温度值为绕组表面温度，再加上15℃就是绕组的实际温度。

（4）高压电动机则应按规定，定期进行绝缘性能试验。

2. 机械方面

以轴承润滑与监视振动为主。

（1）轴承的维护：对于经常运行的电机，应有足够的润滑油，润滑是提高设备使用年限的主要因素。

滑动轴承的维护项目是：

1）保证轴承清洁，不得漏油，要经常检查油位的高度。

2）要定期注油或换油。注油或换油的时间应根据电机的工作条件、周围清洁程度以及润滑油的种类而定。注油时，油量装至油室的2/3为准，不可过少或过多；更换润滑油时，

应先除去旧油，用汽油洗净，再添新油。

3）滑动轴承的油温应尽量不超过60℃，若超过，则应经常换油。

良好的润滑油不应具有腐蚀性或含有沉淀杂质。选择润滑油时，应考虑到电动机的转速、负载和压力等因素。电动机用的润滑油有透平油、锭子油、30号或40号机器油以及专门的电机油。

4）注意轴承衬的磨损，定期检查轴颈和轴承衬间的间隙，并通过检查定子与转子间的间隙来检视轴承的磨损。

滚动轴承的维护要简单得多，润滑脂一般6～12个月更换一次即可。常用润滑脂为钙基润滑脂（黄油），牌号为SYB 1401-62。还有钠基润滑脂和二硫化钼润滑脂（HSY-101）等。

（2）电机振动的检查与处理：电动机振动超过允许值的原因有轴承过度磨损，机座振动太大，电动机耦合失调，螺钉脱落或松动，转子机械不平衡以及电机磁路不对称等。查出振动原因，分别予以处理。

3. 集流装置方面

以电刷调整与刷头监视为主。

集流装置指交流电机的滑环或直流电机的换向器，连同电刷及支持装置。

集流装置最易发生故障，其原因较为复杂。故障主要有电刷下的火花过剧，过度磨损，整流片与绕组脱焊，过热与振动过大等异常现象。

（1）集流装置应当始终保持洁净。换向器绝缘槽内金属屑及碳粉末太多，是引起火花的根源之一。因此，应定期擦净换向器和电刷。电枢绕组内部短路和整流片与绕组脱焊

也会产生严重火花。

（2）打磨与剔槽。换向器与滑环表面应光滑平整，无磨痕与烧毛现象，云母片也不应突出。一经发生，应予打磨，并剔出云母槽。

（3）电刷位置和压力调整。电刷位置不对或压力过小都会引起火花，电刷应能在刷握中自由滑动，并有适当的压力压在换向器或滑环上，接触良好，不应发生振动。必须经常检查滑环有无损伤，电刷是否太短，必要时更换电刷或调整电刷的弹簧压力。电刷压力可用弹簧秤测量。

电刷压力为

$$P = \frac{F}{S} \quad (\mathrm{Pa})$$

式中 F——弹簧秤指示拉力值（N）；

S——电刷截面积（m^2）。

电刷所受压力值应为15～25kPa（折算为旧单位约为150～250 g/cm^2）

（4）电刷配件选择。更换电刷应尽量用原牌号配换。常用电刷见表3-7。

表3-7 电机用电刷

电刷的种类	石墨	电化石墨		金属石墨	
牌号	S-3 S-4 S-6	D104 D172 D202 D207 D213	D214 D252 D308 D373	J 101 J 102 J 103 J 104	J 201 J 204 J 205 J 206
用途（具体用途请查电工手册）	汽轮发电机	各种类型的电机，轧钢电动机、牵引机、励磁机、电焊发电机等		25～80 V的各种电机如充电、电镀直流发电机，汽车拖拉机发电机，滑环电机	

WWW.PLCWORLD.CN

（5）火花监视。在从无负载到额定负载的范围内，不应有火花，短时过载也不应有危险的火花，换向器表面或电刷表面也不应有损坏。

三、电动机的拆装

电动机运行一段时间后，需要进行清扫、加油等维护工作，有时必须将电动机一部分或全部拆开进行维护。

1. 电动机的拆卸

电动机在拆卸之前，应在线头、轴承盖、螺钉、端盖等部件上做好记号，以便在重装时各归原位，避免弄错。

拆卸电动机，一般按下列步骤进行。

（1）断开电源，拆除外部接线和底脚螺钉。拆电源进线时，应看清接法，作好记号，把电源进线用黑胶布包好。如果是带传动，则应取下传动带；如果是联轴器传动，则拆开两联轴器之间的联接螺栓，使电动机与工作机械分开。

（2）拆卸带轮：将带轮上的紧定螺栓或销子松脱，用拉具（也称拉子）把带轮慢慢拉下，如图3-53所示。如果拉不出，可在紧定螺栓孔内注入煤油再拉；如果仍拉不出，可在带轮外侧轴套周围加热，但要注意温度不宜太高，防止轴变形。切不可用铁锤硬敲，以免把带轮和电动机轴敲坏。

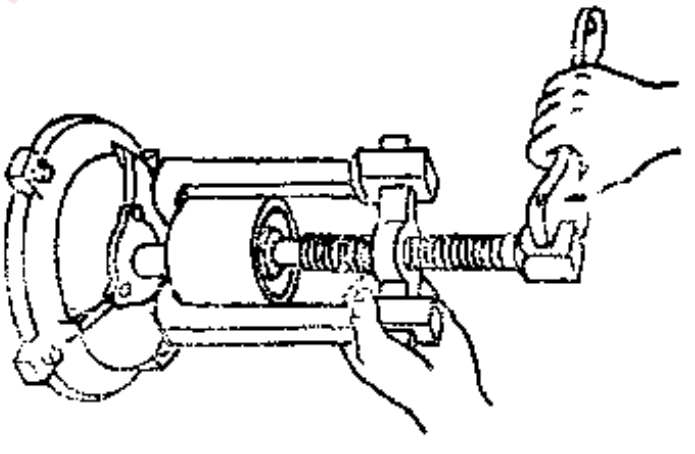


图3-53　电动机带轮的拆卸

（3）卸下风叶罩和端盖，抽出转子：标好端盖与机体之间的对正记号，以便装配时对准。先拆除电动机轴伸端的轴承外盖，用手锤和扁铁轻轻地敲打（向外扳撬）端盖和机盖接缝处（切不可用力猛打），使端盖和机壳分开，取下端盖。然后，用绳子把伸出的轴颈吊在木架上，再松开另一端端盖紧固螺栓。

拆下轴伸端端盖后，在转子和定子中间垫上厚纸，再拆除非轴伸端的风扇罩和端盖螺栓，然后用手将转子带着端盖和风扇一起抽出。在抽转子时，必须仔细，不要碰坏绕组、风扇、铁心、轴颈等。

（4）拆卸轴承：轴承的拆卸一般采用拉具或专用的“轴承拉子”，如图3-54 a所示。要注意拉具的拉钩应钩住轴承的内圈。如果不需要更换轴承，可不用拆下，洗净擦干后加入润滑油。

还有一种拆卸轴承的方法，即在轴承内盖与轴承之间放置一卸胎，如图3-54 b所示，直接与轴承

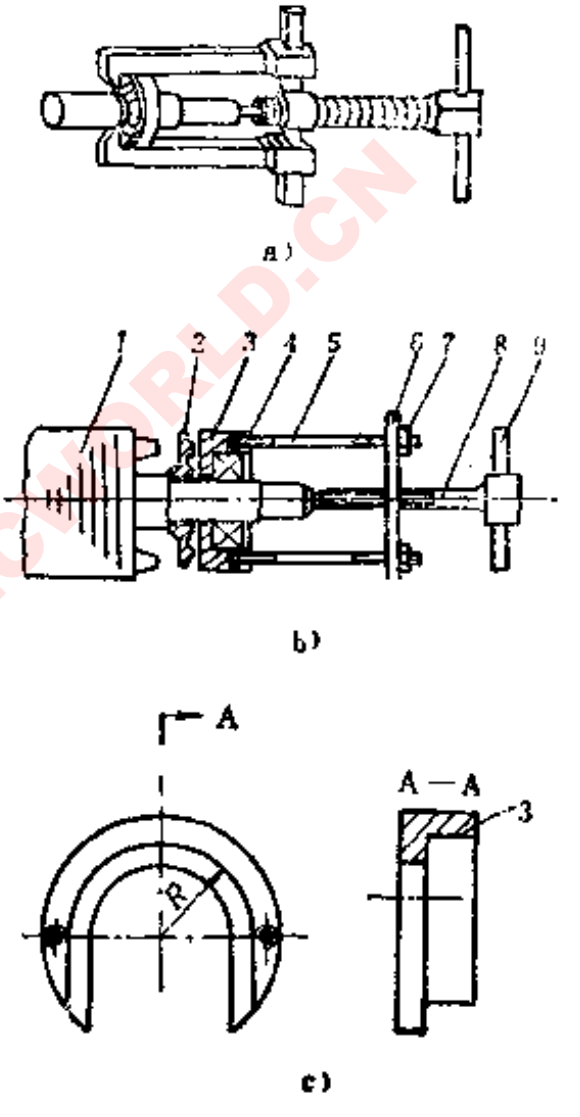


图3-54　用拉具拆卸轴承

1—转子　2—内盖　3—卸胎　4—轴承
5—螺杆　6—卸盘　7—螺母　8—顶杆
9—扳手

WWW.PLCWORLD.CN

进行接触，使其受力比较均匀，保护轴承不受损图c为卸胎。

2．电动机的装配

装配工序大致与拆卸顺序相反。首先将轴承内盖和轴承装于转轴上。检查和清理定子膛内，应无杂物及凸出的绝缘物，并用吹灰器将定子铁心和绕组上的灰尘吹净。装大型电动机时，应在定子膛内垫以厚纸，再将转子吊入定子内。然后将一端的端盖装上。装端盖前，应该用干净的柴油或汽油仔细清洗端盖轴孔。安装时应对准拆下时做的记号，使端盖归复原来的位置，拧入原来螺栓。此时螺栓不要拧紧，取出垫在定子、转子间的厚纸。用同样的方法装上另一端的端盖，然后再交叉对角地将两端盖的紧固螺栓逐渐旋紧。与此同时，用手转动转轴，检查装配情况。

在装轴承外盖时，应事先使用细铁丝穿入轴承内盖的螺孔，装端盖时使细铁丝从端盖上轴承螺栓孔中穿过，这样才能使轴承内外盖的螺孔对准，然后用螺栓使轴承内外盖夹紧轴承。

安装带轮是最后一道工序。安装中小型电机的带轮时，可在它的外侧垫上木块，用锤子把带轮敲到转轴上。为了不伤害轴承和防止电动机移动，可在轴的另一端垫一木块，然后再顶在墙上打入带轮；对于较大型电机的带轮，可用千斤顶将带轮顶入，但要用固定支持物顶住电动机的另一端和千斤顶底部。

§8-8 同步电机

一、同步电机的构造

同步电机是电力工业中的一种很重要的电机。火力、水力和其他发电厂中的交流发电机全部采用三相同步发电机；运行时，它由原动机带动而发出电能。同步电机也可以用作

电动机；运用时，它接入三相电源，产生转矩而带动工作机械运转。在化工、冶金、机械等工业企业中，一些大容量的电力拖动多使用同步电动机，如轧钢机、压缩机、压风机等机械的电力拖动。

同步电动机的构造与异步电动机一样，由两部分构成：一部分为固定电枢叫定子，与三相异步电机的定子完全相同，其绕组也可以接成Y形或△形；另一部分是旋转的磁极，即转子，按结构的不同，转子分为凸极式与隐极式，作为电动机使用时，多采用显极式（凸极）的转子。

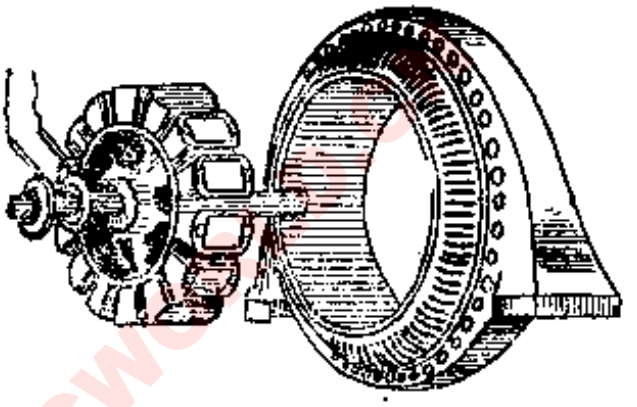


图3-55　凸极同步电（动）机的结构图

图3-55所示为凸极式同步电动机。转子上具有突出的磁极。转子磁极的励磁电流一般是由励磁机（直流发电机）供给的，电流经由电刷和滑环面引入励磁绕组。励磁机的转子通常是和同步电机的转子安装在同一转轴上。励磁电流也可以由其他直流电源供给，如半导体整流器。

图3-56所示为隐极式同步发电机的结构简图，隐极式转子的优点是它没有突出部分，可以高速度转动。

表3-8是我国现在生产的中型和大型同步电机的几个系列产品。

二、同步电动机的工作原理

同步电动机的工作原理如图3-57所示。当三相交流电通入定子后，定子便产生旋转磁场Φ_D，这个旋转磁场的磁极

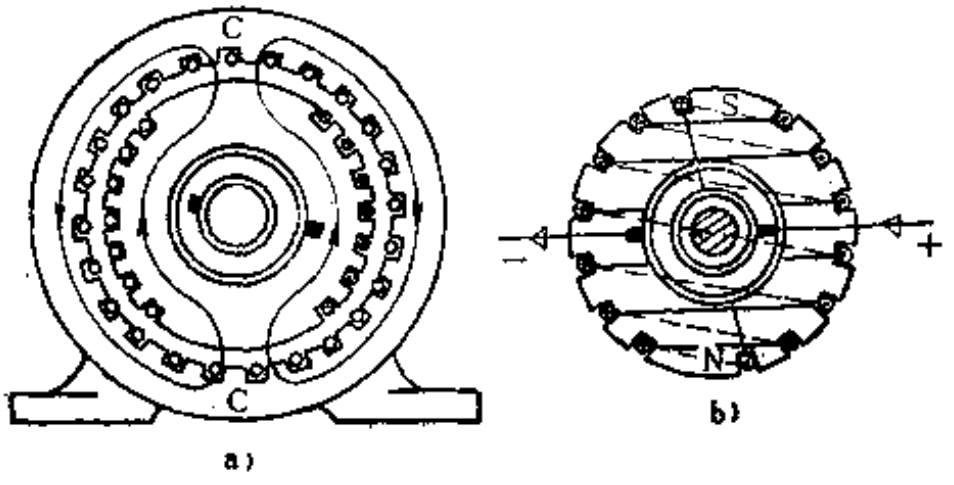


图3-56　隐极式同步发电机的结构简图

a）隐极发电机的磁路　b）隐极励磁绕组及其滑环

表3-8　国产中型和大型同步电动机

系列型号	转速范围 (r/min)	电压等级 (kV)	容量范围 (kW)	应用场合
MS	167～1500	3，6，10	250～10000	传动风机水泵、磨煤机和电动机-发电机组
MSMK	150～187.5	6	400～1250	传动矿山球磨机
MSK	125～500	3，6	250～4000	传动压缩机，压风机
MSZ	500～1000	3，6，10	1000～10900	传动轧钢设备
MSL	150～600	3，6	400～3000	传动立式，轴流式或离心式水泵

对转子上的异性磁极产生吸引力，吸住转子，使转子跟着定子的旋转磁场一起旋转。定子的旋转磁场是以同步转速旋转的，而转子的转速又与旋转磁场的转速相同，步调一致，所以称为同步电动机。

同步电动机转子转速 $n_2 = n_1 = \dfrac{60f}{p}$ r/min，其转速n_2只决定于三相电源的频率f和磁极对数P，而与负载转矩T_2的

WWW.PLCWORLD.CN

大小无关，即具有恒转速的特点。

这时无论同步电动机转轴上的负载增大（但不超过容许值）还是减小，它的转子转速总保持不变。磁力线在这里好像橡皮筋一样，负载越大，两个磁场间的夹角 θ 也越大，橡皮筋就拉得越紧。当负载超过同步电动机的最大转矩时，好像橡皮筋被拉断一样，电动机就会因“失步”而停下来。

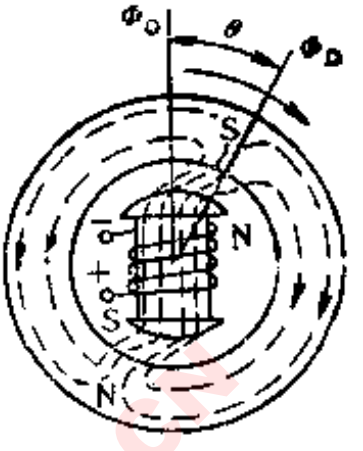


图3-57 同步电动机的转动原理

显然，它和异步电动机的最大差别是转子和定子旋转磁场之间不需要有转差，它不是靠旋转磁场切割转子导体而产生力矩的。如果说，异步电动机的工作原理可比喻为摩擦轮传动或带传动，那么同步电动机的工作原理则可比喻为齿轮传动，所以同步电动机的转速是恒定不变的，是不随负载的大小而作上下波动的，具有绝对硬的机械特性。

负载（转矩）变化时，对电动机运行情况的影响介绍如下：用转矩特性曲线说明，因为电网输入电动机的功率为 $P=3UI\cos\varphi$，由相量图可以证明 $\cos\varphi=\dfrac{E_0\sin\theta}{IX_s}$，$E_0$ 为空载电动势（由励磁电流产生）；θ 叫功率角，是两个磁场轴线之间的夹角，与同步电动机的输出功率大小有关，所以叫做功率角；X_s 叫同步电抗。故得

$$P=3\frac{UE_0}{X_s}\sin\theta \qquad (3\text{-}15)$$

如果忽略电动机中所有的损耗，则 $P=T\omega$，即电动机

的电磁功率等于输出的机械功率。故有

$$T=\frac{P}{\omega}=3\frac{UE_0}{\omega X_s}\sin\theta \qquad (3-16)$$

式中，U 及 ω 是不变的，X_s 是常数（隐极机）。在一定的励磁电流 I_m 的情况下，E_0 也是不变的，故电磁转矩 T 是随功率角 θ 而变化。这个关系叫转矩特性，如图3-58所示。虚线为考虑了同步电动机中的附加损耗（凸极机）。从电动机的转矩 T 和功率角 θ 之间的关系曲线看出，在 $\theta=\frac{\pi}{2}$ 时，电动机的转矩达到最大值，即 $T_m=\frac{3UE_0}{\omega X_s}$。以此为界将曲线分成了两个部分。在0A段 $\left(0^\circ<\theta<\frac{\pi}{2}\right)$，$T$ 随 θ 增加而增加；在AB段 $\left(\frac{\pi}{2}<\theta<\pi\right)$，$T$ 随 θ 增加而减小。因此，和异步电动机的分析情况相类似，0A段为电动机的稳定运转部分；而AB段则不能得到稳定的运转。在负载转矩超过最大转矩时，T 反而变小，故转子转速将继续下降，直到失去同步而停下来。在这种失步的情况下，电枢电路中将引起大的电流变动，影响供电线路的正常工作，这是需要加以防止的。为了使电动机能承受暂时的过载，在设计时通常使在额定电压及额定励磁电流时的最大转矩为额定转矩 T_N 的 λ 倍，λ 叫做过载能力。即

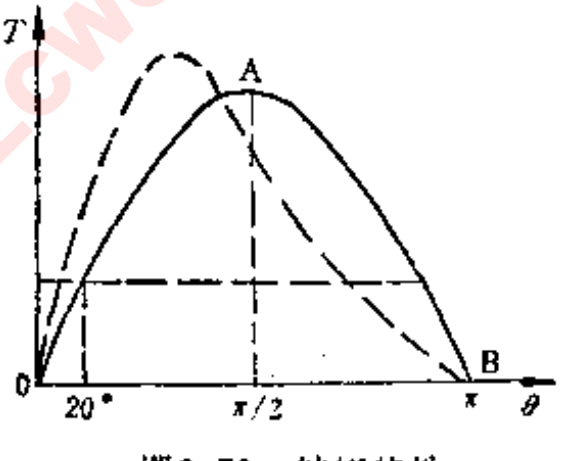


图3-58　转矩特性

WWW.PLCWORLD.CN

$$\lambda = \frac{T_m}{T_N} \approx 2 \sim 3 \qquad (3\text{-}17)$$

因此在额定负载时，$\theta = 20^\circ \sim 30^\circ$。

三、励磁对同步电动机运行的影响

同步电动机还有一个非常可贵的特性，就是当负载不变，改变励磁电流时，可以使定子绕组电流有效值和功率因数$\cos\varphi$发生变化，即电源电压和电流的相位差φ可以用控制励磁电流大小的办法来调节。只要调节励磁电流超过某一基准值，即过励磁状态下，定子绕组电流的相位就会超前电压，这时三相同步电动机好似一个电容性负载，这对于提高整个电网的功率因数十分有利，对节约用电具有很重要的意义。专门用来改善电网功率因数的同步电动机，称为同步补偿机。

当选择同步电动机容量时，要考虑该机拖动多大的机械负载，即自电源取入多大的有功功率，另一方面也要考虑并联该同步机后将提高线路的功率因数至何值，即希望其自电源取入多大的无功功率，然后根据这两个功率求出同步电动机的视在功率，而额定电流也就可以确定。

例3-2 已知某车间原有电气设备之总有功功率为$P = 2000\text{kW}$，总功率因数$\cos\varphi = 0.72$。现添装一台压缩机，在正常负载下，其电机需自电网取得565kW的有功功率，今若以同步机拖动此压缩机，而使线路功率因数提高至0.91，求同步电动机之视在功率（额定容量）。

解 车间原有总的视在功率为

$$S = \frac{P}{\cos\varphi} = \frac{2000}{0.72} = 2780\text{kVA}$$

车间原有之无功功率为

$$Q=\sqrt{S^2-P^2}=\sqrt{2780^2-2000^2}=1930\text{kvar}$$

并联同步电动机后总有功功率应为

$$P'=565+2000=2565\text{kW}$$

提高功率因数至0.91时，总视在功率应为

$$S'=\frac{2565}{0.91}=2825\text{kVA}$$

此时的总无功功率应为

$$Q'=\sqrt{2825^2-2565^2}=1205\text{kvar}$$

因此同步电动机所取无功功率应为

$$Q-Q'=1930-1205=725\text{kvar}$$

故同步机之视在功率（额定容量）应为

$$P_N=\sqrt{565^2+725^2}=920\text{kVA}$$

四、同步电动机的起动

当同步电动机的定子绕组与三相电源接通时，与异步电动机一样，定子绕组中的三相对称电流就产生一个旋转磁场。这时虽然转子已被励磁，但是它转动不起来，其原因可以用图3-59来说明。

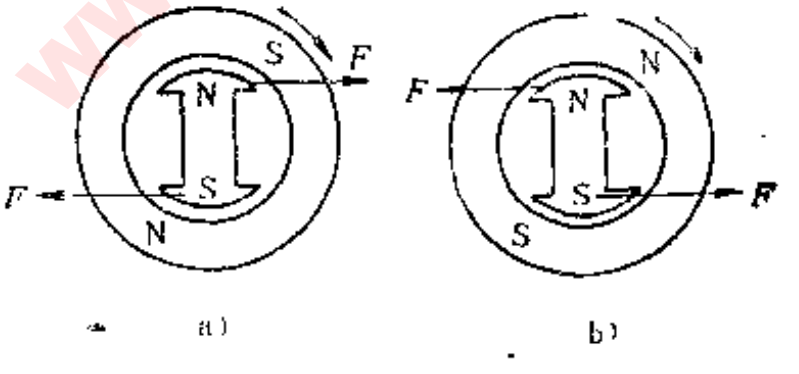


图3-59　同步电动机的起动转矩为零

在起动瞬间，虽然转子是静止的，但是旋转磁场已经按同步转速在旋转了。这样，定子旋转磁场的N极一会儿与转

子的S极相遇（如图3-59 a），一会儿又与转子的N极相遇（如图3-59 b），以致在很短的时间内转子受到两个方向相反的力矩，使平均转矩为零，所以转子转动不起来。

为了让同步机转动起来，可采用下列两种方法：

1．异步起动法

现代同步电动机广泛采用这种方法起动。这种起动方法是利用装在磁极的极掌上的起动绕组来实现的。此绕组与笼型异步电动机的笼体相似，如图3-60所示。起动时与异步电动机一样，在定子绕组上有三相交流电压，转子按异步电动机的原理转动起来。当转子转速接近于同步转速（一般当 $n = 95\%n_0$）时，再通入励磁电流产生转子磁极，这时定子旋转磁场就会把转子拉入同步，这时起动绕组也就不起作用了。

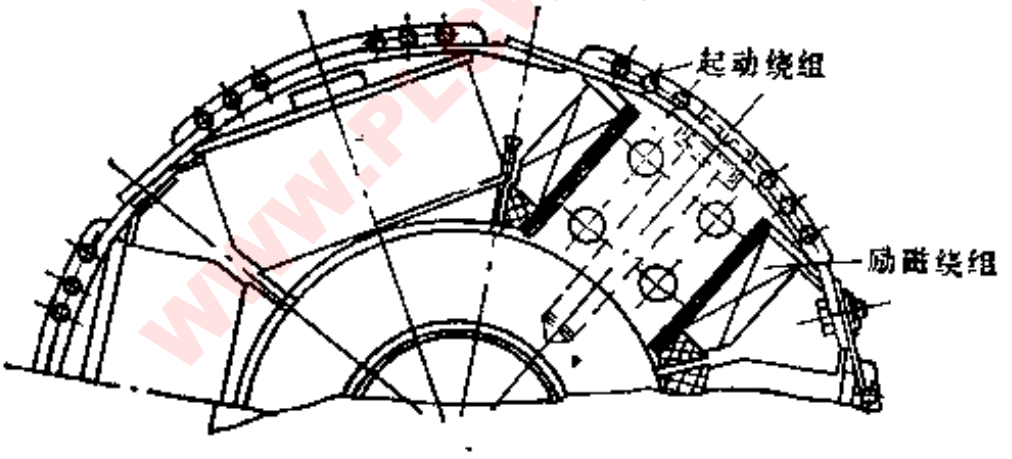


图3-60　具有笼子的转子

尽管装了起动绕组之后同步电动机能有起动力矩了，但是它和异步电动机相比较，起动力矩还是要小得多，所以它只能用在那些可以轻载起动、不需要经常起动、而且也不需要调速的装置中。

同步电动机转子的直流励磁电流是靠装在转子上的两个滑环和定子架上的两组电刷引入的。因为需要的是直流励磁，故还要装一套直流电源。过去旧的设备都是在电动机轴上另装一个电机——直流发电机，现在大都已采用硅整流元件。因为需要装一套整流装置，同步电动机的成本仍然要比同容量的笼型异步电动机为高。

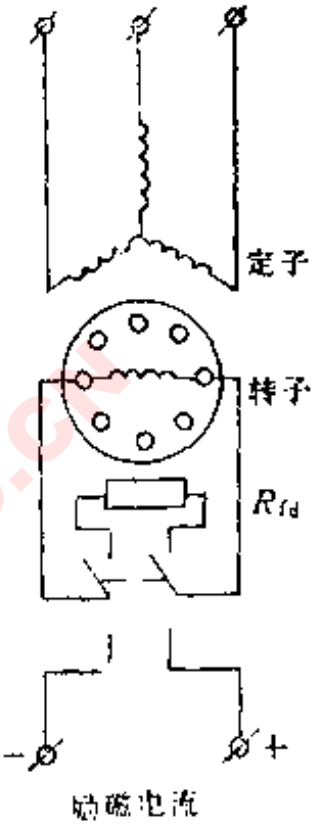


图3-61　同步电机起动电路图

图3-61是同步电动机异步起动时的接线图。起动时，转子励磁绕组要接入一个电阻R_{fd}，因为刚起动时，定子旋转磁场和转子的相对转速很大，励磁绕组的匝数又很多。如果绕组是开路的，就会在励磁绕组中产生一个很高的感应电动势，可能破坏绕组的绝缘，而且对工作人员也很危险。等到转子已加速到接近同步转速时，再投入直流励磁电流。

根据实践经验，当励磁绕组接入的附加电阻等于励磁绕组电阻的10倍时，对于限制转子感应电压，获得较好的起动转矩和牵入转矩，以及当定子各相短路时能使磁场迅速熄灭等方面来看，是一个较好的数值。附加电阻R_{fd}对同步电动机起动特性的影响示于图3-62中。

同步电动机异步起动控制，除了“单轴转矩”问题之外，还有牵入同步的问题。同步机牵入同步的过程，在很大程度上与直流电源输入转子励磁绕组的时刻有关。一般说，在①转差率小一些、接近同步转速时和②转子磁极的N极与定子

磁极的S极正对准时（图3-63）投入励磁最好。

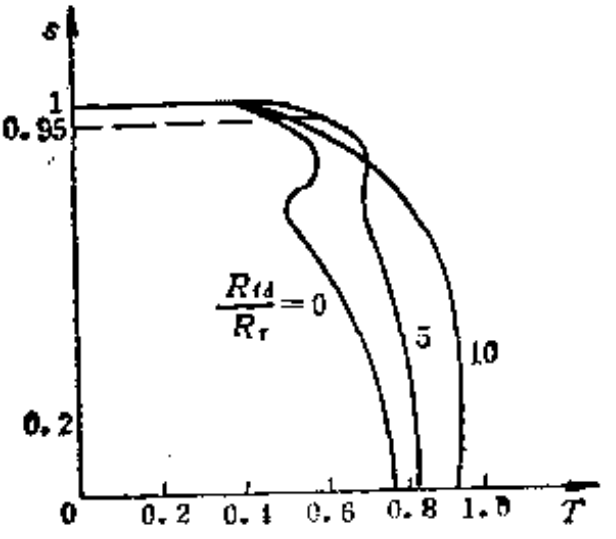


图3-62 R_{fd}对同步机起动特性的影响

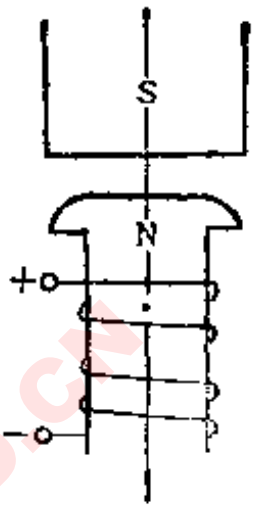


图3-63 转子与定子磁极

对于①是很容易理解的，因为“牵入同步”的意思就是使电机的转差率 $s=0$，s 较小时，当然就容易牵入同步。但 s 过小也不好，因这时转矩可能太小。通常当 $s=0.05\sim0.02$时，牵入同步是不困难的。

对于②的情况时，在励磁绕组中的感应电动势与励磁电源电压是相加的，这就使励磁电流能够迅速上升。异性磁极的作用使定子磁场与转子磁极紧紧牵住。假若当定子与转子磁场同极性的磁极正对准时投入励磁，则励磁电源电压与励磁绕组中的感应电动势是相减的，因而使励磁电流上升的速度减慢，过程加长，就增加了投励时同步机的振荡。

综上所述，同步电动机采用异步起动时，其转子控制需实现下述步骤。

（1）电动机接入电网时，励磁绕组接入附加电阻。

WWW.PLCWORLD.CN

（2）检测转子转差率信号在 $s \leqslant 0.05$ 时，按极性投入励磁电流，将电动机牵入同步，并切除附加电阻。

因此，作为同步电动机电力拖动控制系统，不管采用什么样的控制方法，一般都应实现上述的两个方面的控制。

2. 同步起动法

需要一个辅助电动机拖动转子达到同步转速。这种方法很少应用。

同步电动机在停车时，应先切断定子的交流电源，然后再去掉励磁电流。

五、单相反应式同步电动机

单相同步电动机应用于容量不大而又要保持恒定转速的场合，如驱动钟表机构(电钟)，时间继电器、自动记录仪表、电影机械以及自动化系统中小功率同步驱动装置。单向同步电动机根据产生转矩的方法有三种：即反应式（磁阻）同步电动机、磁滞同步电动机和永磁同步电动机。

本节仅介绍结构简单、制造方便、过载能力较大、运行可靠的反应式同步电动机，这种电动机在自动装置、记录仪器、电钟和录音机设备中得到了广泛使用。

单相反应式同步电动机构造简单，定子与单相异步电动机一样，可以利用起动绕组起动或利用罩极起动。当利用起动绕组起动时也有电容起动、电容运转、电容起动和运转三种。转子必须是凸极式的，其特点是转子上没有激磁绕组，如图3-64所示。

图3-64是反应式同步电动机工作原理图。当在定子绕组中通过交流电时，便产生旋转磁场，这磁场的磁力线通过没有激磁绕组的转子而闭合，于是使转子被磁化而产生磁极。如果磁场的磁力线被转子扭歪（如图3-64 b 所示），由于磁力

线力图缩短所经路径以减小磁阻，在某种意义上讲，可以理解为磁力线变得象拉长了的橡皮筋，有自行缩短的趋势，这样形成的转矩就是磁阻转矩。转子便在旋转磁场的带动下，以同步转速运转。磁阻转矩与负载转矩相平衡，电动机就稳定运行。

图3-65为具有罩极起动的反应式同步电动机原理图。

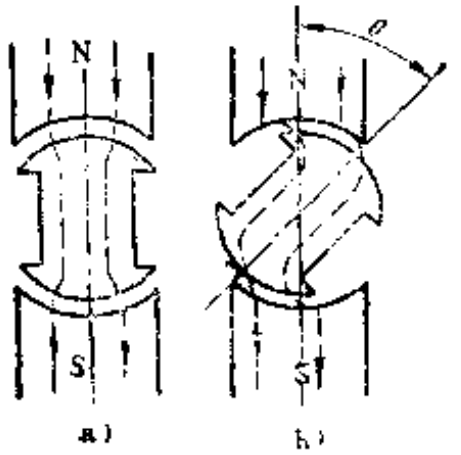


图3-64　反应式同步电动机工作原理图

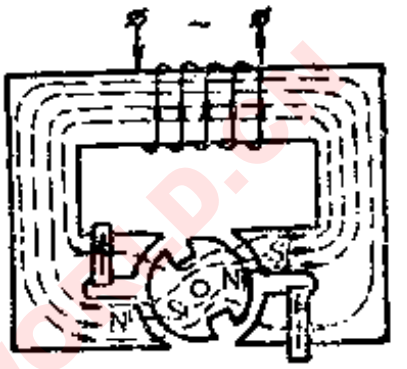


图3-65　罩极起动的反应式同步电动机原理图

§3-9　直流电机

一、直流电机的用途和构造

直流电机是直流发电机和直流电动机的总称。

直流发电机是提供直流负载（电解、直流电动机等）的主要电源，目前，逐渐被晶闸管整流装置所代替。在汽车、火车、飞机等的照明和点火装置以及其他特殊用途上，还继续使用直流发电机。

直流电动机的最大优点是能均匀而又经济地调节转速。在需要均匀调速的拖动中，例如龙门刨床、可调速的轧钢机、高炉装料系统、矿井提升设备以及工作紧张的压延机辅助机

WWW.PLCWORLD.CN

械都广泛采用直流电动机。此外，在电车、电气机车上也以直流电动机作为动力。在控制系统中，直流电机还有其他的用途，例如测速电机、伺服电机等等。

直流发电机及直流电动机在构造上是完全相同的。都是利用电和磁的相互作用来实现电能与机械能的相互转换。

直流电机是由固定的磁极（定子）和旋转的电枢组成的。图3-66所示系四极直流电机的构造。

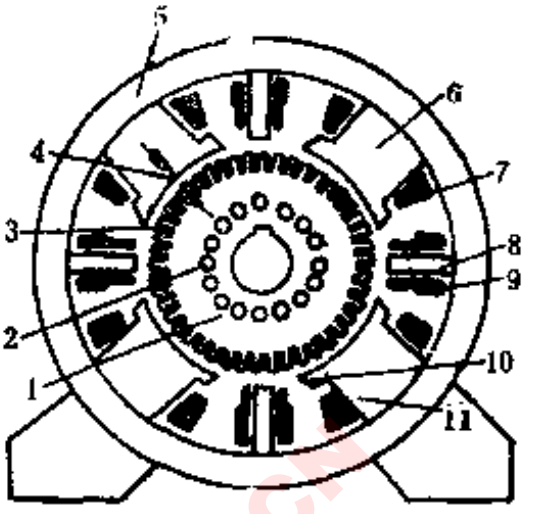


图3-66 直流电机的构造

1—电枢铁心 2—通风沟 3—电枢绕组 4—空气隙 5—磁轭 6—主极 7—励磁绕组 8—换向磁极 9—换向磁极绕组 10—极掌 11—极心

1．定子

由机座、主磁极和电刷装置等部件组成。

直流电机的机座（或称磁轭）由铸钢或铸铁制成，它是磁路的一部分。机座内有固定的主磁极和换向磁极。主磁极用来产生电机的主要磁场，它有极身和极掌，极身上安装励磁绕组，励磁绕组通入直流励磁电流后，就产生了磁场，极掌是用来挡住励磁绕组，并使得电机空气隙内磁感应强度作最有利的分布。磁极是由0.5～1mm厚的钢片叠成，用螺栓固定在机座上。见图3-67。

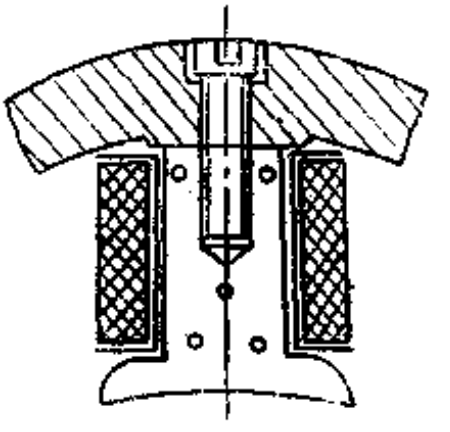


图3-67 具有励磁绕组的磁极

换向磁极是用来改善换向性能

的，也即作补偿电枢反应。

2. 电枢

电枢是由电枢铁心、电枢绕组及换向器所组成。电枢铁心是0.5mm厚的硅钢片叠成，硅钢片相互绝缘，以减小涡流损耗。硅钢片的外圆周上有若干均匀分布的槽，如图3-69，用来安装电枢绕组（图3-68）。在电枢一端的轴上装有换向器，它由许多铜片组成，每两个铜片之间用云母绝缘隔开（图3-70）。

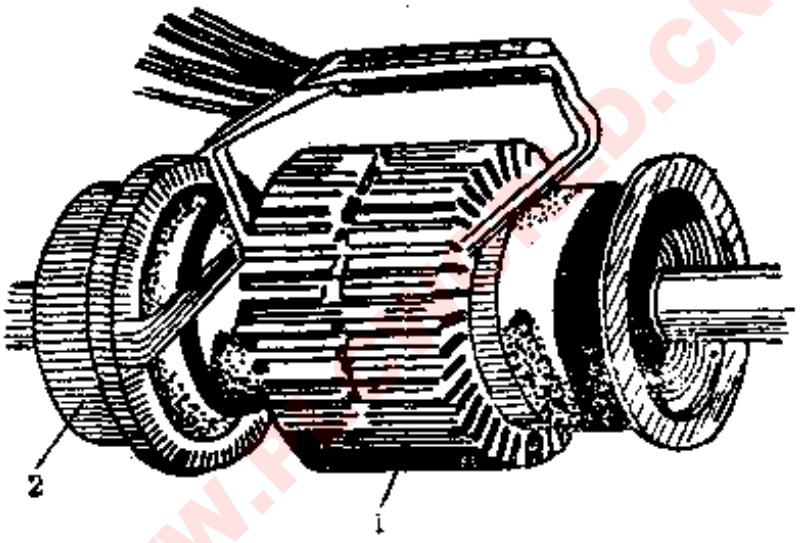


图3-68 鼓形电枢（只绘出两个线圈）
1—铁心 2—换向器

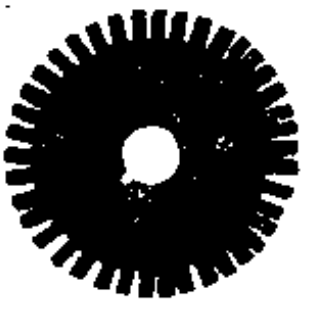


图3-69 电枢铁心中的硅钢片

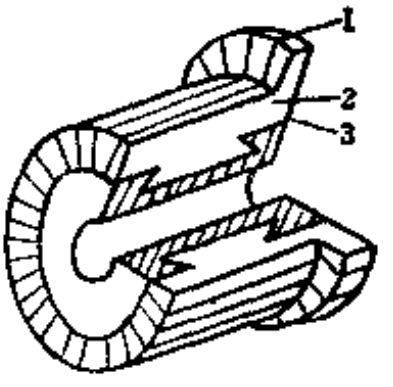


图3-70 换向器
1—云母片 2—换向片 3—云母

换向器表面上放置有固定不动的碳质电刷，借助于弹簧的压力，使其同换向器保持滑动接触，将电枢绕组与外电路联接起来。电刷安放在刷握内，而刷握又通过电刷架固定在端盖上，刷握和电刷架是彼此绝缘的如图3-71所示。

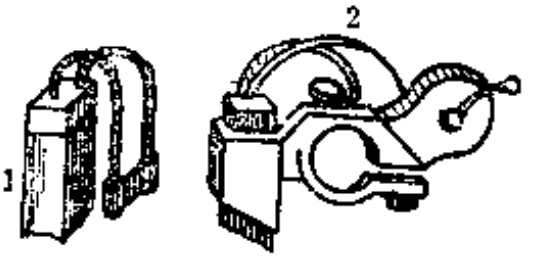


图3-71　带电刷的刷握

1—电刷　2—弹簧

图3-72所示是直流电机拆卸后的情况。

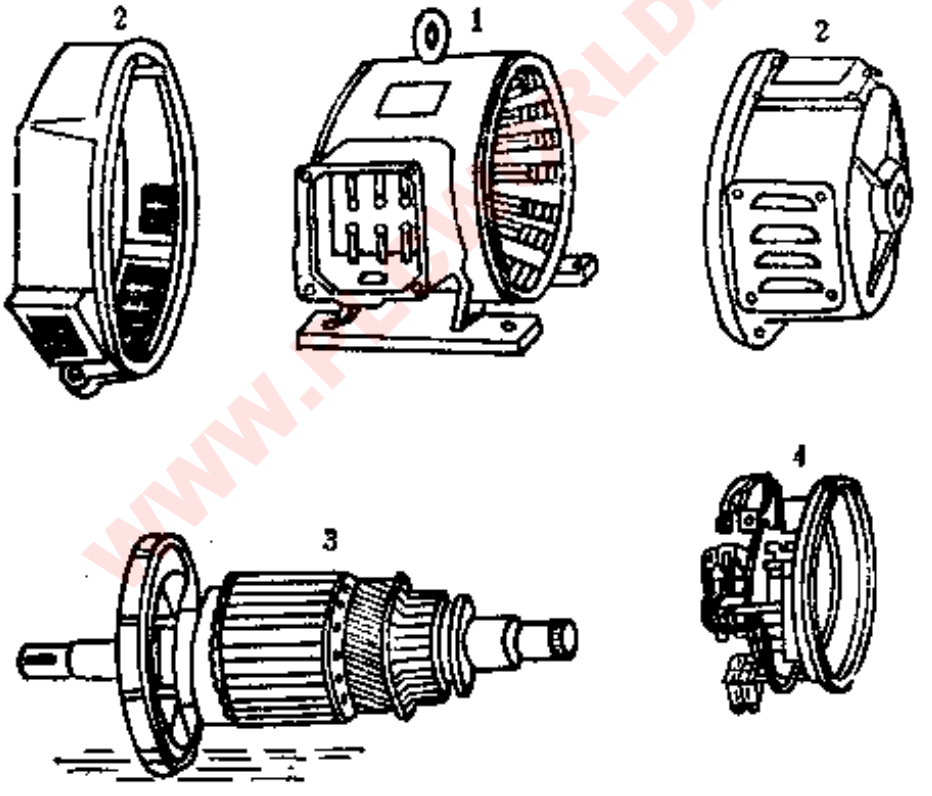


图3-72　拆卸后的直流电机

1—机座　2—由铸铁制成的端盖　3—电枢（左端装有风扇）　4—刷握及电刷架

图3-73表示了两极直流电机的磁路情况。主磁极磁通所

经过的路径如下：从N极出来，经过空气隙进入电枢铁心，再出来经过空气隙进入S极，然后经过磁轭回到N极构成一闭合回路。

在直流电机中有两个电路，一为电枢电路（在转子），一为励磁绕组电路（在定子）。

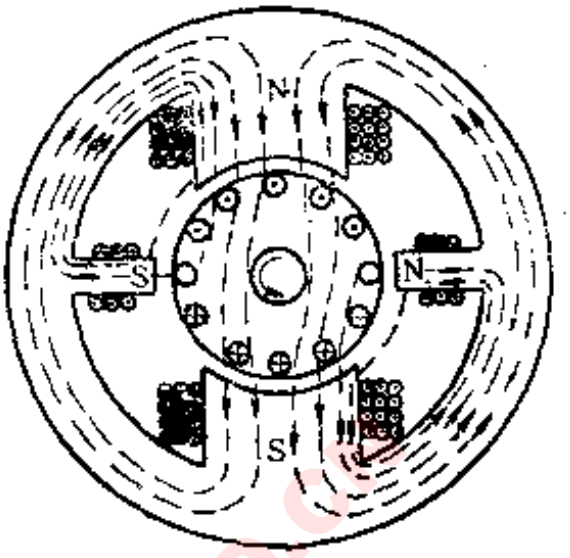


图3-73　直流电机的磁路

二、直流电机的基本原理

图3-74所示是一最简单的直流发电机。在静止的磁极N和S之间，有一个能转动的圆柱形铁心，其上紧绕着一匝线圈，线圈的两端分别接在两个相互绝缘的铜片（换向片）上，换向片上放置着固定不动的炭质电刷。

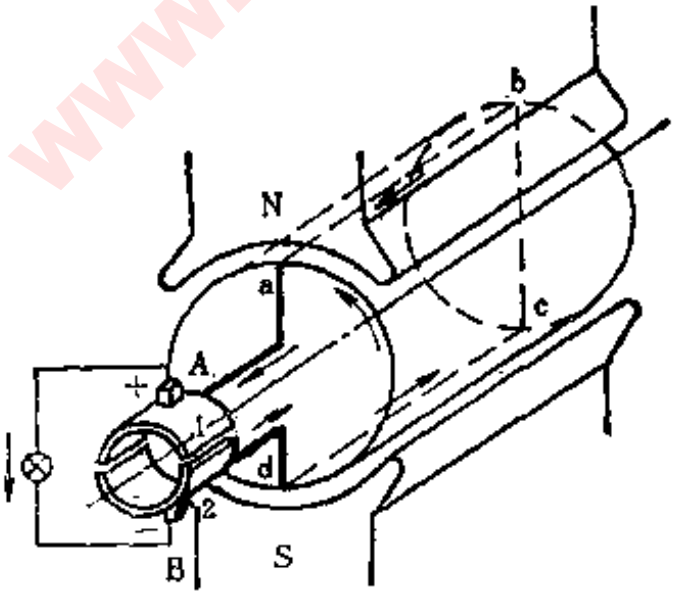


图3-74　最简单的直流发电机

铁心、线圈及换向片所组成的旋转部分为电枢。当电枢被原动机驱动后，导线便切割磁力线产生感应电动势，其方向由右手定则决定，如图3-74所示。此时电流由电刷A流出，流进电刷B；当导线1从N极范围转入S极范围时，线圈中的电动势改变方向。

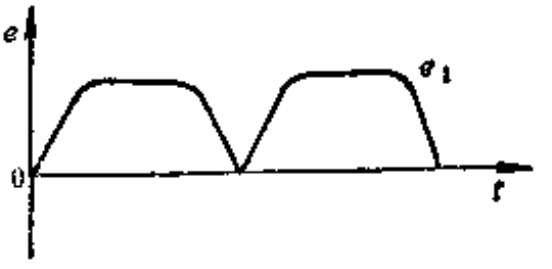


图3-75 最简单直流发电机的外电路中的电流变化曲线

但由于换向片随同电枢一起旋转，使得电刷A总是接通N极下的导线，而电刷B总是接通S极上的导线，故电流仍然由A流出，流进B，即A永为正极，B永为负极，因而外电路中的电流方向不变，如图3-75所示，可以看出，线圈中的交流电经过铜片和电刷整流后，便成为外电路中的直流电了。这两个半圆形的铜片就叫做换向片，它们合在一起叫做换向器。为了使电刷两端所得到的电动势最大，电刷的位置必须安放在磁极中心下面的换向器表面上。

虽然通过换向器的作用，能把线圈内的交变电动势在电刷间变换成方向不变的电动势，但它的大小仍然是脉动的。如要获得在方向上和数值上均为恒定的电动势，则应把电枢铁心上的槽数和线圈数目增多，同时换向器上的换向片数也要相应地增加，如图3-76所示，为一简单的叠形绕组。

直流发电机的电动势是导线切割磁力线而产生的，故两电刷间电动势E的大小就同发电机的转速n和磁极磁通Φ的乘积成正比，即

$$E = C_e \Phi n \qquad (3-18)$$

式中 C_e——电动势常数，它与电机的构造及材料有关，对

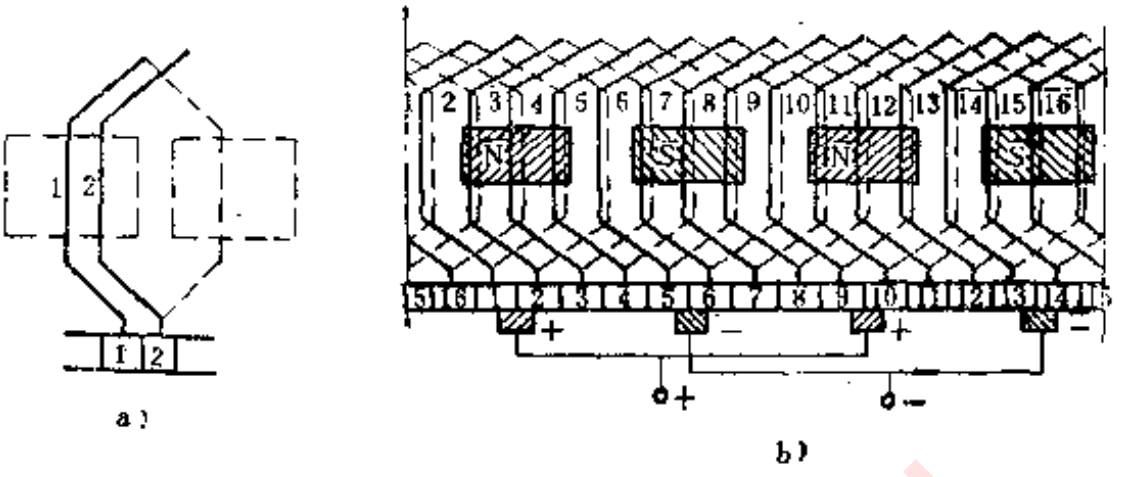


图3-76　单叠绕组

a）叠形绕组的联接　b）叠形绕组展开图

已制好的电机而言，C_e是定值。

直流电动机的构造与直流发电机是相同的，但在使用时，需要把它的电刷与直流供电线相接，如图3-77所示。此时电流由正极A流进，由负极B流出。由于载流导体在磁场中受到电磁力的作用，故电枢产生一电磁转矩。运用左手定则，可以确定出电枢应按反时针方向转动，当导线1从N极范围转入到S极范围时，依靠换向器的作用，使导线1中的电流方向也同时改变，因而电动机的转矩方向不变，所以能连续旋转不停。

直流电动机的电磁转矩T系由电枢电流与磁极磁通相互作用而产生的，故T的大小与电枢绕组所取用的电流I_a和每极磁通Φ的乘积成正比。即

$$T = C_T \Phi I_a \qquad (3\text{-}19)$$

式中　C_T——电机转矩常数，它与电机的构造有关，对已制好的直流电动机而言，C_T为定值。

式（3-18）和式（3-19）是分析直流电机工作原理的两个重要公式。

综上所述，同一直流电机，既可输入机械能而输出电能作为发电机运行，也可输入电能而输出机械能作为电动机运行。在直流发电机中，换向器和电刷的任务是把线圈中的交流电变为直流电向外输出；而在直流电动机中，则用换向器和电刷把输入的直流电变为线圈中的交流电。

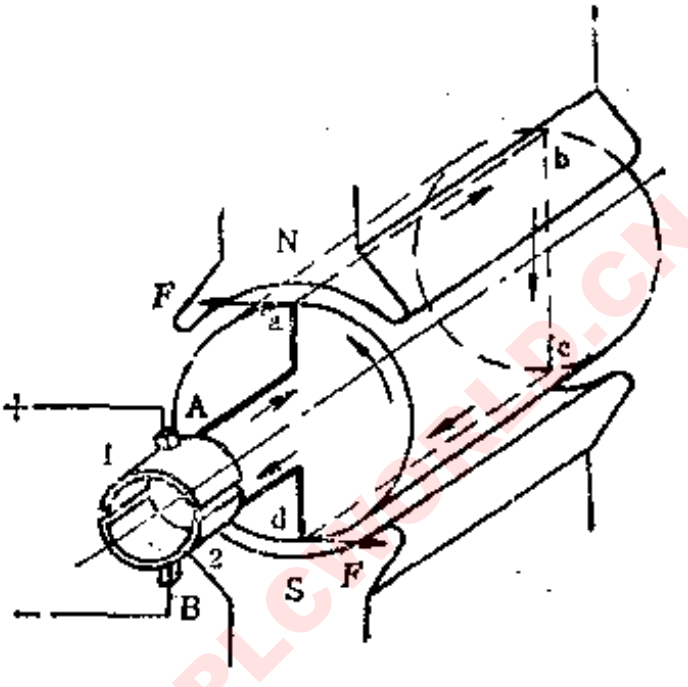


图3-77 最简单的直流电动机

三、直流电机绕组元件中的电流换向问题

直流电机绕组元件中的电流是交变的。电机旋转时，电枢导体不断地从一个磁极下转入另一个异性磁极下，也就是说，电枢绕组元件从一个电刷转入另一个电刷，这时元件中的电流方向要改变。绕组元件中电流方向改变的过程叫换向。

换向不良的直接后果，主要是在电刷与换向片相接触的地方引起火花，电机经长时间工作就会损坏换向器。换向的好坏，关系到直流电机工作的可靠性。找出产生火花的原因，采取措施改善换向，具有十分重要的意义。

电刷下火花产生的原因很复杂，机械的原因有，电刷与换向器接触不良，换向器表面不平滑，换向器偏心，换向器表面的氧化亚铜薄膜受到破坏等等，都会引起火花。另外，工作环境不好（如有尘埃、化学烟气等）、电机过载或负载剧烈变化等，也会引起火花。因此，要加强对直流电机的电刷和换向器的维护。

产生火花的电磁原因，主要是由于进行换向的绕组元件中产生的感应电动势，为了尽量减少火花、改善换向性能，就必须设法消除换向元件中的感应电动势。在功率小于1kW的电机中，可采用移动电刷的位置的方法。对于发电机，则顺着电枢旋转方向向前移动；对于电动机，则反着旋转方向向后移动。对于常须改变旋转方向的电动机，这种移动电刷的方法不适用。

改善换向常用的、有效的办法是在电机内加装换向磁极（或称附加磁极），一般装在主磁极之间的几何中性面上，如图3-73所示。它产生的磁场抵消了换向元件中的感应电势，达到良好的换向。

换向极也是由铁心和套在铁心上的绕组组成的，由于换向元件的感应电动势与电枢电流I_a成正比，而电枢电流I_a的大小又决定于负载的大小，所以换向极绕组必须与电枢绕组相串联，使换向极磁场正比于电枢电流。当电枢电流I_a增大、换向元件的感应电动势增大时，换向极磁场也随着增强，在各种不同负载下，换向极能起到改善换向的作用。

不过当负载大到一定程度后，换向磁极即达到饱和，电流换向便不能正常进行，因而电枢电流的最大值要受到一定的限制，电枢电流的大小决定于电机的负载，所以直流电机瞬时过载能力受换向的限制。直流电机的过载能力用λ来表

示（λ叫过载系数），即

$$\lambda = \frac{I_{max}}{I_e} \tag{3-20}$$

在一般直流电机中，$\lambda = 2 \sim 2.5$。

当激烈改变电机的负载，或者突然短路时，有可能产生环火现象。由于电枢反应所造成的磁场变形，在磁极下有的地方磁感应强度增加很多，当电枢线圈通过这些地方的时候，也要产生很大的感应电动势，这时换向片之间的电压就会很高，可能在换向片间引起电弧，并随着电机转动而蔓延开来，致使在异性电刷之间造成环火。要解决这个问题，就需要沿着整个电枢圆周补偿电枢反应。即利用补偿绕组的作用，把电枢反应补偿掉。例如负载变化很剧烈的轧钢电机中，都要装上补偿绕组。

如图3-78所示，补偿绕组装在主极的极掌里，离电枢很近。在负载变化时，补偿绕组的磁场必须和电枢磁场同样变化，所以补偿绕组与电枢串联，使得通过其中的电流就是电枢电流。

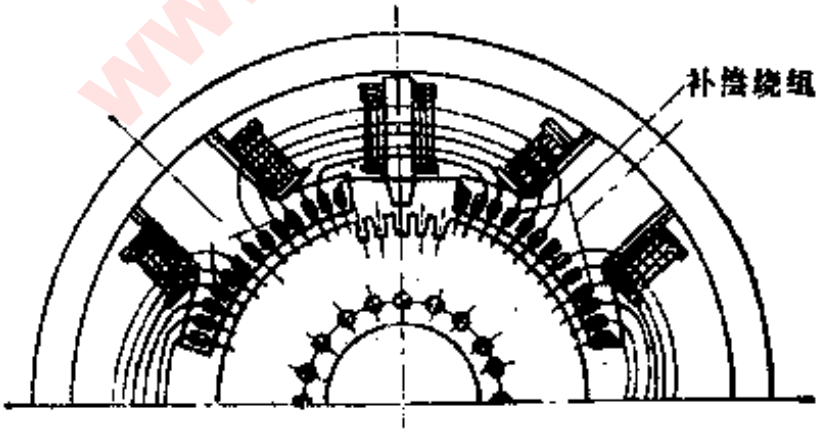


图3-78　改善电枢反应的补偿绕组

四、直流电机按励磁方式分类

一般直流电机的磁场是励磁绕组通以直流电流而产生

的，此电流称为励磁电流。

（一）他励电机

这种电机的励磁电流是由外电源（蓄电池或别的发电机）供给，如图3-79所示。他励电机的励磁电流与电枢的端电压无关。

（二）并励电机

这种电机的励磁绕组同电枢并联，如图3-80所示。由图可见，并励电机的励磁电流与电枢两端的电压有关。同电枢并联的励磁绕组简称并励绕组。由于并励绕组承受着电枢两端的全部电压，其值较高。为了减少它的铜损耗，并励绕组必须具有较大的电阻，以减小励磁电流。因此，并励绕组的匝数较多，且用较细的导线绕成。

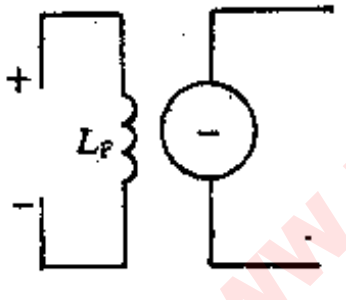


图3-79 他励电机
L_P—他励绕组

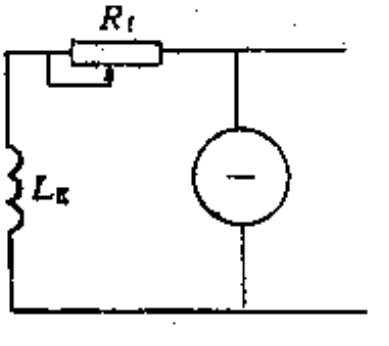


图3-80 并励电机
L_B—并励绕组

（三）串励电机

这种电机的励磁绕组同电枢串联，如图3-81所示，同电枢串联的绕组简称串励绕组。为了减少串励绕组的电压降及铜损耗，串励绕组应具有较小的电阻，因此，它总是用截面较大的导线绕成，且其匝数较少。

（四）复励电机

这种电机的磁极上有两个励磁绕组，一个同电枢并联，

WWW.PLCWORLD.CN

另一个同电枢串联，如图3-82所示。

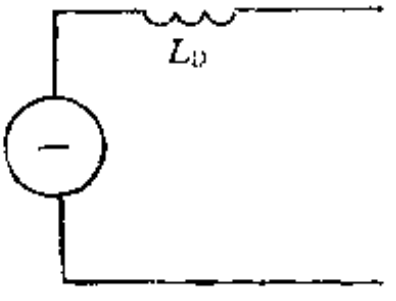


图3-81　串励电机
L_D—串励绕组

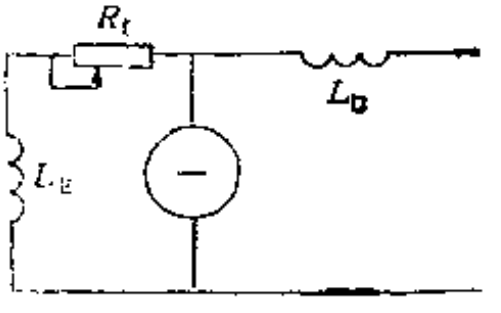


图3-82　复励电机

并励电机、串励电机、复励电机在作发电机时，其励磁电流都是由发电机本身供给，故统称为自励发电机。

各种直流电机的型号表示了它的结构特点和使用范围，我国直流电机的型号是采用大写汉语拼音字母和阿拉伯数字表示，例如 Z_2-72，Z 表示普通直流电机，下角 2 表示第二次设计，7 表示 7 号机座，2 是铁心长度。ZZJ 是起重和冶金工业起重用的电机，运行速度是可调的，有加强的机械结构，一般是封闭式的。

ZY中Y表示中型和大型电机；ZYF 中F表示发电机；ZYD中D表示电动机，容量从几百kW到6000kW，包括轧钢机、卷扬机等冶金用的电机在内。

Z_2Q中Q表示牵引用（电车用）的；ZCH中C表示船舶上用的；H表示防溅式的；ZK中K表示控制用的等等。

五、直流电动机的工作原理

直流电机作为电动机运行时，就是把直流电机的电枢电路和励磁电路都接到直流电源上，也分做并励、串励和复励三种类型，现在先讨论电动机的一般的工作原理。

参看图3-83和图3-84，当电枢和励磁电路分别接入直流

电源后，载流的电枢导体在磁极磁场中将受到电磁力的作用，力的方向由左手定则确定，如图3-84所示。这些力使电枢产生一电磁转矩，其值为 $T = C_T \Phi I_a$，于是电动机便按顺时针方向转动起来。

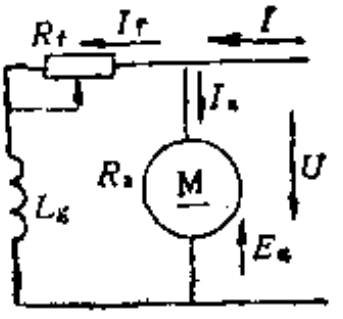


图3-83 并励电动机的线路图

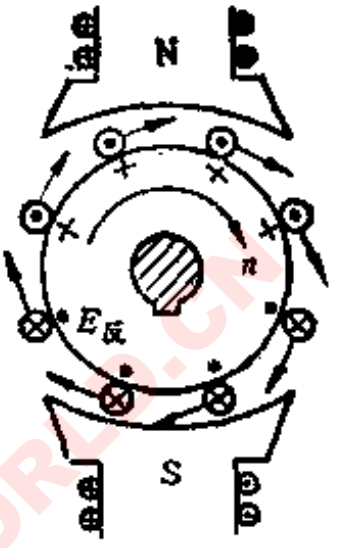


图3-84 磁场对电枢绕组的作用力

当电动机转动后，电枢导线因切割磁力线而产生感应电动势，根据右手定则可知，此电动势的方向与电枢电流(I_a)的方向正好相反，故为一反电动势（E_a）（图3-84），根据式（3-16）可得

$$E_a = C_e \Phi n$$

由于电枢绕组中存在有反电动势，故加在电枢绕组两端的电压应分为两部分：其一用来平衡反电动势；其二为电枢绕组的电阻电压降。因此直流电动机的电压平衡方程式为

$$U = E_a + I_a R_a \tag{3-21}$$

电动机的电枢电流

$$I_a = \frac{U - E_a}{R_a} \tag{3-22}$$

WWW.PLCWORLD.CN

$E_a = U - I_a R_a$，代入式（2-16）得电动机的转速

$$n = \frac{U - I_a R_a}{C_e \Phi} \tag{3-23}$$

当电枢产生的电磁转矩（$T = C_T \Phi I_a$）与作用在电枢轴上的反转矩（T_f）相等时，则电枢以等速旋转；如果增大电动机的负载（即增加轴上的反转矩），则在最初的一瞬间，电枢的电磁转矩小于轴上的反转矩，即 $T < T_f$，电动机减速，随着转速的下降，电枢绕组中的反电动势减小，电流 $I_a = T / C_T \Phi$ 逐渐增加，电磁转矩亦逐渐增加，最后，当 $T = T_f$ 时，电动机就不再减速，而以较低的转速再作等速旋转。由此可见，当电动机输出的机械功率增大时，电动机取用的电流和所消耗的功率均随之增大，但转速要下降。

如果电动机的负载减小，即 $T > T_f$，则转速上升，其过程与上述情况相反。

由此可见，在电源电压和电动机磁场一定时，电动机转速的变化是随轴上负载改变而变化的，其变化的情况，可制成特性曲线来表示，这些特性曲线的形状与电动机的类型有关，下面分别加以讨论。

六、并励电动机的机械特性

在分析电力拖动问题时，经常要研究电动机的转速与转矩的关系，即电动机的机械特性，表示为 $n = f(T)$。分析机械特性的方程如下。

电动机由电源取入的电流等于电枢电流加励磁电流

$$I = I_a + I_f$$

励磁电流

$$I_f = \frac{U}{R_f} \tag{3-24}$$

R_f 为励磁电路的总电阻，包括励磁绕组电阻及串联变阻

器的电阻。如R_t不变，则I_t亦不变，由I_t所产生的磁通Φ也不变。于是式（3-19），可以写成

$$T = C_T \Phi I_a = K I_a \qquad (3-25)$$

即并励电动机的电磁转矩T随电枢电流I_a的增大而增大。上式中，$C_T\Phi = K$（为常数）。

因为电动机的转速 $n = \dfrac{U - I_a R_a}{C_e \Phi}$

把式(3-25)代入上式得机械特性方程

$$n = \frac{U}{C_e \Phi} - \frac{I_a R_a}{C_e \Phi} = \frac{U}{C_e \Phi} - \frac{R_a}{C_e C_T \Phi^2} T$$
$$= n_0 - \Delta n \qquad (3-26)$$

式中 $n_0 = \dfrac{U}{C_e \Phi}$——$T = 0$时的转速，称为理想空载转速；

$\Delta n = \dfrac{R_a}{C_e C_T \Phi^2} T$——转速降。

转速降表示负载转矩增大时，电动机的电磁转矩T亦增大，I_a随之增大，$I_a R_a$电压降增大，在电源电压U保持不变和I_t不变的条件下，转速n就会下降。可见转速降Δn是由电枢绕组电阻R_a引起的。

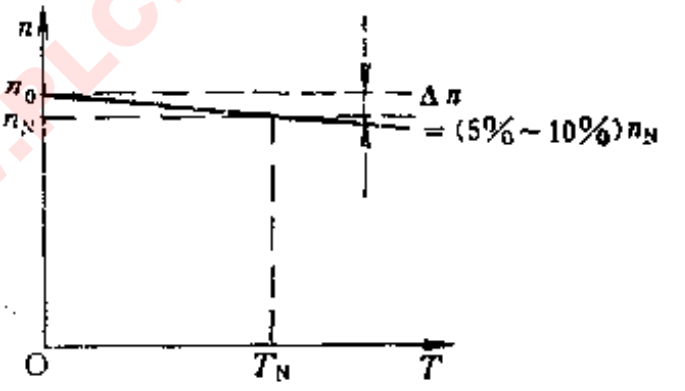


图3-85 并励电动机的机械特性

图3-85所示为并励电动机的机械特性曲线。由于电枢绕组电阻R_a很小，转速降低并不多，由空载到满载，转速降Δn一般只下降5%～10%，所以并励电动机具有硬的机械特性。适用于机械负载转矩变化大，但要求转速基本不变的场

WWW.PLCWORLD.CN

合，例如龙门刨床和某些冶金机械等。

七、串励电动机的机械特性

串励电动机其励磁绕组与电枢串联而接入电源，其线路如图3-86所示，由于是串联电路故励磁电流与电枢电流相等，即

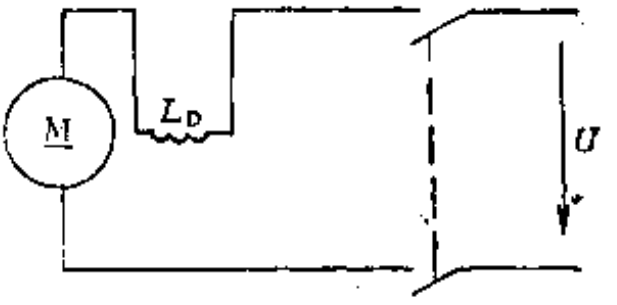


图3-86　串励电动机接线图

$$I_f = I_a = I$$

串励电动机的电压平衡方程式为

$$U = E_a + I_a(R_a + R_f)$$

它的电枢电流为

$$I_a = \frac{U - E_a}{R_a + R_f}$$

将 $E_a = C_e\Phi n$ 代入上式，整理后可得串励电动机的转速为

$$n = \frac{U - I_a(R_a + R_f)}{C_e\Phi} \tag{3-27}$$

串励电动机的磁通 Φ 与电枢电流 I_a 有关，即 $\Phi = KI_a$，将此式代入电动机转矩公式，$T = C_T\Phi I_a$ 后

则得　　$T = C_T K I_a I_a = C' I_a^2$　　(3-28)

根据公式(3-27)、(3-28)可知，当电源电压 U 为定值的条件下，电动机的负载减小时，电枢电流 I_a 减小，主磁通也减小，电动机的转速 n 很快上升。所以通常串励电动机的负载不应小于额定值的25%～30%；反之，若负载增大，则 I_a 也增大，Φ 也成正比增大，转速很快下降。但当电动机的负载很大时，I_a 很大，此时电动机的磁路已接近饱和，磁通 Φ

可以近似认为不变，转速 n 仅由于 I_a 的增加而下降，故下降较少，曲线较为平直。所以串励电动机有软的机械特性，如图3-87所示。

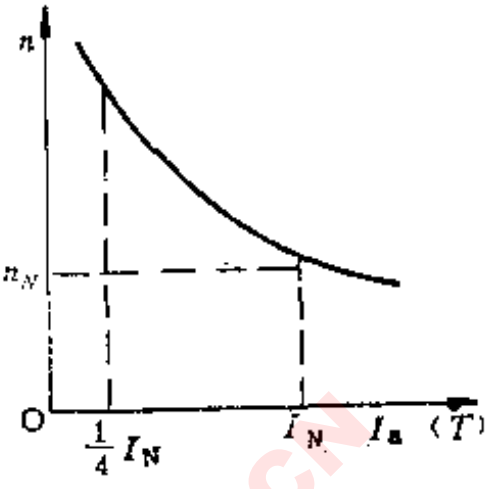


图3-87 串励电动机的机械特性

串励电动机的软特性和可以产生很大的起动转矩，特别适用于电力牵引和起重设备上，例如电车、电力机车及铲车、起重机等。

由于串励电动机不能在空载或轻载下运行，所以串励电动机应与生产机械直接耦合，切不可以采用带传动，因为一旦传送带滑脱或断裂，将使电动机处于空载运行状态而出现“飞车”事故。

综合上述情况，串励电动机的优缺点是：

1）起动转矩比较大，能带较重负载起动。

2）不能空载或轻载运行，否则会引起“飞车”。

八、直流电动机的维修

直流电动机的维护，有许多方面和异步电动机是相似的（见§3-7）。

1．保持电机内外清洁

平时应注意使电机保持清洁，电机内外的灰尘可用带尖嘴的平风扇（皮老虎）或吹风机来清除，绕组和换向器上的油渍、污物要用四氯化碳和汽油的混合物及时地擦洗干净。

2．换向器的维护

直流电动机的换向器最易发生故障，是运行维护的重点。换向器表面应保持清洁光滑，如发现换向器的表面有黑色的

WWW.PLCWORLD.CN

灼痕，应立即用细玻璃砂纸将换向器表面磨光砂平，但不能用金刚砂纸来磨，因为导电的金刚砂屑聚集在换向片之间，会使电动机在工作时产生很大的火花。

经长期运转或车圆后，必须将换向片间的云母片刻低，一般采用将两侧磨平的手工锯条来刻低。刻低时，要使锯片与云母表面垂直，慢慢地向后移动，刻成平坦的沟槽，但不要刻得过深，一般刻到1～1.5mm便可，同时在槽口用锉刀锉出45°倒角，防止换向片的尖角切削电刷。刻完槽的换向器，还需再上车床抛光，并作彻底清洁。

3．电刷的使用及维护

（1）弹簧对电刷的压力应适当、均匀，各电刷的压力相差要在10%以内。若压力太小，电刷易跳动，会引起火花；若压力过大，会使换向器的磨损加快，使电刷发热。

（2）电刷表面磨损或损坏时，要及时更换与原电刷一样的新电刷（见表3-7）。电刷圆弧的处理方法是将电刷嵌入夹子内，再把弹簧压在上面，使砂布麻面朝电刷，背面紧贴在整流子上，然后上下移动，来回研磨电刷，如图3-88所示。研磨电刷应采用较细的“0”号砂纸，磨后应将铜头吹净。磨好后，将电刷装入刷握，起动电动机空载运行几分钟后，取出各电刷检查，接触面一般要占总面积的80%以上才行，否则，要重新研磨直到合格为止。

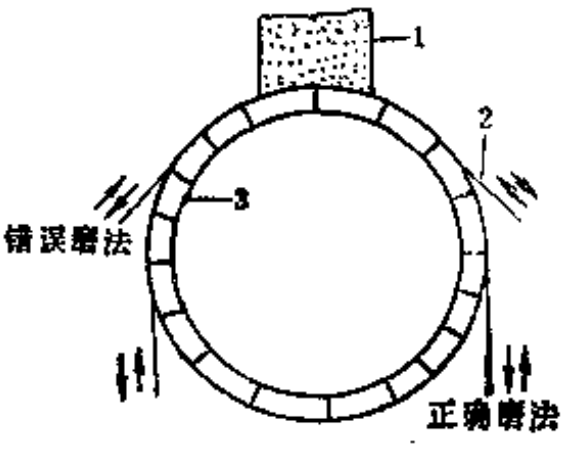


图3-88　电刷的磨法

1—电刷　2—砂布　3—整流子

4. 轴承的维护

中小型电机通常采用滚珠或滚柱轴承，大型电机采用轴瓦。对于滑动轴瓦需要注意维护，轴承应经常保持清洁和润滑。此外，要定期检查，必要时更换新的。

平时应注意不要使电机受潮，否则其绝缘电阻将降低，使电机不能正常工作。长期搁置的电机，在投入运行前，应检验其绝缘电阻是否合格；如不合格，就需要进行烘干处理，然后方可使用。

直流电机维护计划如表3-9所示。

表3-9 直流电机维护计划例

	维护周期	维护内容	记事
日常的检修维护	一天一次至两次	①由视、听、嗅各种感觉进行全盘检查 ②注意各部分的振动和声音 ③轴承、外壳、排风等温度记录检查 ④注意电刷是否发生不正常火花	和前一天比较是否有大差异，并作曲线图
月度检修维护	一至两个月一次	①由各种感觉详细检查 ②各安装螺栓是否松动 ③是否有损坏之处 ④是否被尘埃或油雾污（尤其是进风口） ⑤引线是否老化损伤 ⑥接地是否完好 ⑦和机械的联接是否良好 ⑧测量绝缘电阻 ⑨电刷以及整流子是否正常	
年度检修维护	一至一年半一次	①轴承及润滑脂检查并调换 ②用压缩空气吹扫绕组，测量绝缘电阻 ③拆卸检修 ④整流子火花测定以及整流子表面有否不平现象	绝缘电阻低于规定时，要进行烘干。整流子火花超过规定值以上及换向器表面凹陷不平时，要进行磨削及切削

§3-10 单相串励电动机

单相串励电动机是交、直流两用的，所以又称通用电机，

或称交、直两用串励电动机。由于它转速高、体积小、起动力矩大、转速可调，既可在直流电源上使用，又可在交流电源上使用，因而电动工具中被广泛采用，单相（手）电钻就是采用的这种电动机。

一、工作原理

单相串励电动机的工作原理和串励电动机相似。原理线路如图3-89所示。励磁绕组与电枢绕组串联，接到直流电源上。根据主磁通Φ的方向和电枢电流 I_a 的方向，按左手定则可以决定转子的旋转方向，图3-89 a 表示电动机逆时针旋转。如将电源极性反过来，由于是串励电动机，主磁通方向改变了，电枢电流方向也改变了，而转子的旋转方向不变，仍为逆时针方向。当电源极性按周期性变化时，主磁通和电枢电流也跟随按周期变化，但转子转动方向未变。所以串励电动机可以在交、直流两种电源上使用。

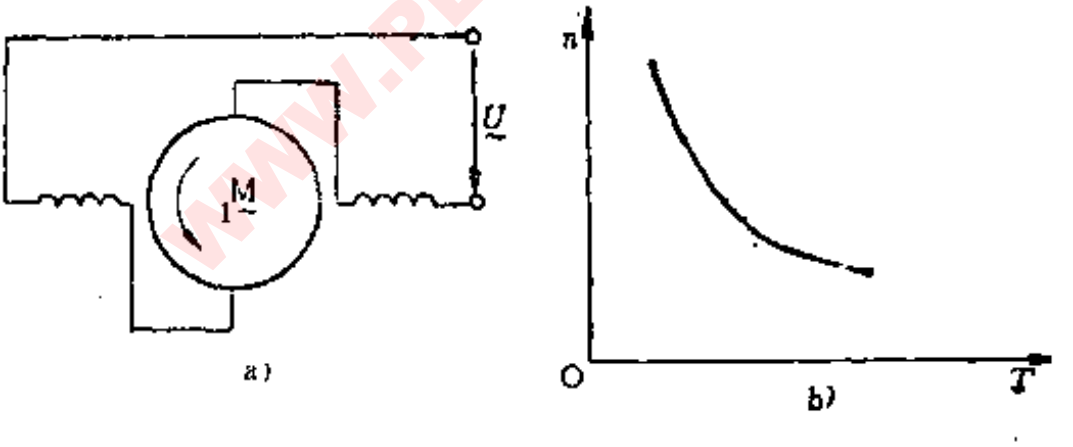


图3-89　单相串励电动机

a）原理线路图　b）机械特性曲线

二、机械特性

单相串励电动机的机械特性，无论采用直流电源或交流电源，都与普通串励直流电动机的机械特性相似，有大的起

动转矩和软的机械特性。因为励磁电流与电枢电流相同，主磁通在磁极未饱和时电枢电流的平方成正比。负载增大时转速减小，转矩很快增大。这种机械特性，最适于电钻之类电动工具的要求。钻小孔时，转矩可以小一些，但希望转速高一些；钻大孔时，要求转矩大一些，但转速宜低一些。

串励电动机轻载时转速会很高，可达20000r/min。所以电钻的电动机在修理后，要带减速机构一同试车，不能把减速机构拆下单独试车。

三、单相串励电动机的维护

单相串励电动机主要用于各种电动工具（如手电钻、吸尘器等），具有起动力矩大、过载能力强、转速高、体积小等优点。但是，它必须依靠换向器来实现其功能。在交流条件下，电动机换向条件比直流换向更不利；同时转速很高，一方面会在转子上形成很大的离心力，另一方面转子导体电流频率随转子转速增加而增高，使转子发热加剧，易于过热。因此，这种电动机与其他电动机相比，故障率较高，常会发生换向器火花大与线圈断路、接地和短路的故障。由于它的换向器、电刷装置在结构、故障种类以及故障的检查处理方法上都与直流电动机类似，故在此不再叙述。

定子绕组短路一般是绕组严重受潮、绝缘下降造成漏电发热而引起。匝间短路（轻微短路）将使线包发热，严重短路一般伴有电弧、火花发生。因此防止电动机受潮是十分重要的。

§3-11 直流弧焊机——硅整流弧焊机

直流弧焊机与交流弧焊机相比，具有容易起弧、电弧稳定、焊接质量可靠、能焊接多种焊条等优点。过去生产的直

流弧焊机都采用三相异步电动机带动直流发电机，组成电机-发电机组，通常叫做旋转式直流电焊机。但因机组庞大、价格昂贵、维修不便，从而限制了它的使用范围。由于半导体元件发展很快，使硅整流直流弧焊机得到很快的发展，从而逐步取代直流弧焊发电机。

一、ZXG系列整流式直流弧焊机

ZXG 系列整流式直流弧焊机是一种将交流电经过二极管整流变成直流电的一种弧焊机。一般都采用硅二极管整流，故又称为硅整流弧焊机。它与旋转式直流弧焊机比较，具有体积小、效率高、工作可靠、使用年限长、维护简单等优点。

ZXG 系列弧焊机，除用作手工操作电弧焊之外，还可作为钨极氩弧焊电源，其中 ZXG-500型焊机除上述用途外，还可作自动或半自动埋弧焊电源及碳弧切割电源。

ZXG 系列弧焊机的电路接线如图3-90所示。它由下列各部分组成。

1. 三相变压器T

用以降低电源电压。

2. 内反馈三相磁放大器(简称磁放大器)

磁放大器是焊机的主要部件，它由六只饱和电抗器（放大元件）AM 与六只硅整流器串联组成内反馈的三相桥式整流电路。它的作用是将交流电变为直流电，并获得陡降的外特性。焊接电流的调节依靠调节 R_{10}，以改变电流的大小。磁放大器的两个主要部分，即自饱和电抗器与硅整流器组。

（1）自饱和电抗器：它由三只三柱铁心组成，每只中间铁心上装有直流控制绕组，两旁的铁心柱上两个交流绕组串联起来，使该相内反馈电流（指整流后的直流分量）产生

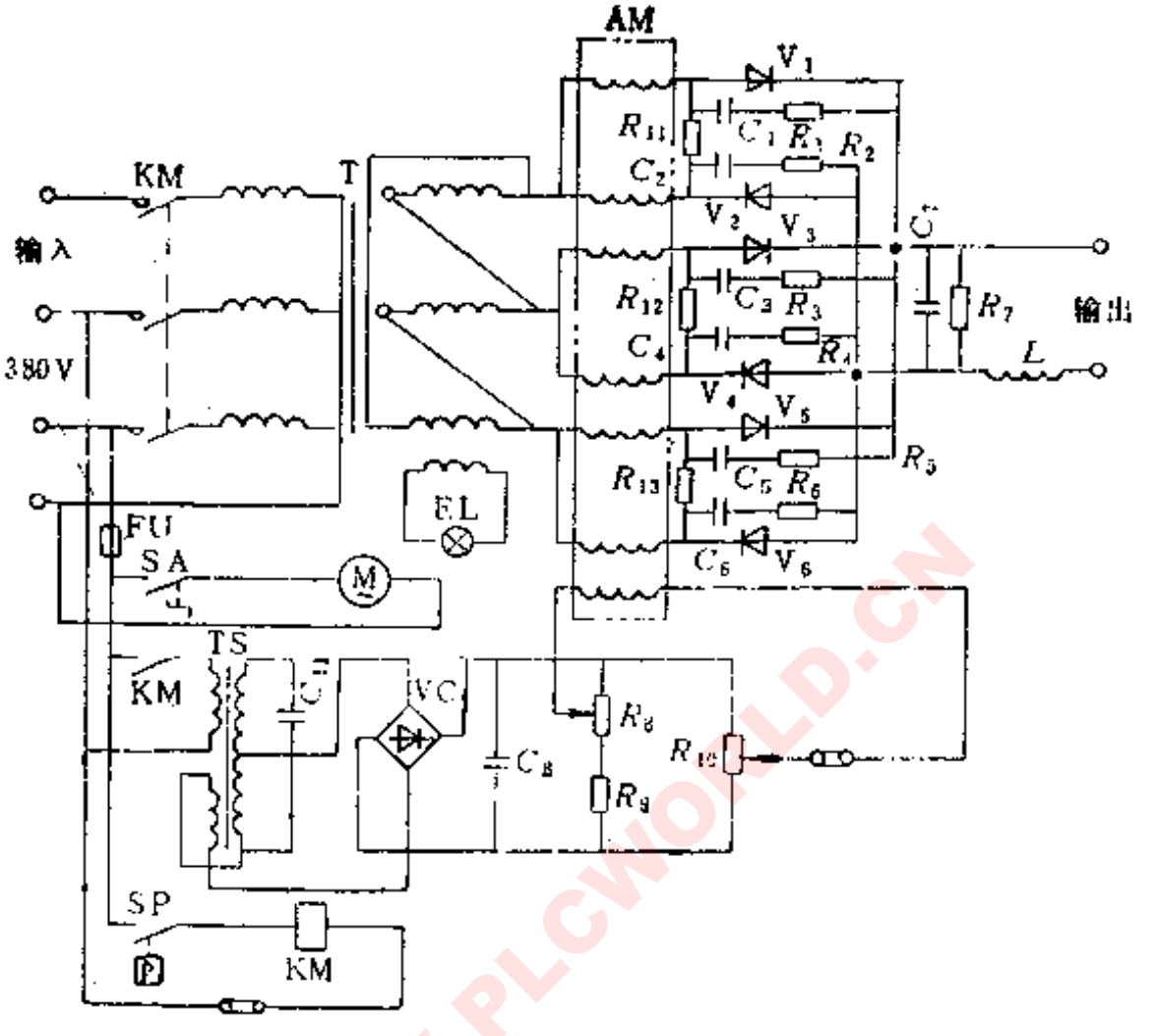


图3-90　ZXG-500型整流式直流弧焊机电路

磁通与控制绕组产生的磁通相叠加。直流控制绕组为六元件所共用，内反馈（指整流后的交流分量）的电流所产生的交流磁通在共用的控制绕组中感生的电动势总和为零。自饱和电抗器的铁心采用冷轧硅钢片，故铁心切忌敲打震动，以免使磁性能变坏。

（2）硅整流组：由六只硅整流元件组成，并分别与六个放大元件串联后，接成三相桥式全波整流电路。由于焊机经常处于空载-负载-短路的相互交替工作状态，它将产生很高的瞬时过电压及过电流的冲击，因此，硅整流元件应有过

WWW.PLCWORLD.CN

电压保护及良好的通风冷却。在硅整流元件侧与输出端并联适当的阻容元件作过电压抑制保护，并采用风压开关SP，保证整流元件在不小于5m/s风速的冷却条件下工作。

3．输出电抗器 L

输出电抗器串联在焊接回路内作滤波用。它除使整流后的直流电更平直外，还可以减少金属飞溅，使电弧稳定。

4．铁磁谐振式稳压器 TS

为了减少电网电压波动对焊接电流的影响，磁放大器的控制绕组的电源采用铁磁谐振式稳压器进行交流稳压，输出25 V交流电压，经单相桥式整流后供给控制绕组，作直流励磁用。

5．通风机组

焊机各部件的安装，应适合不同的冷却要求。风由下部和两侧面板上的进风窗口进入焊机，经过输出电抗器、饱和电抗器、三相变压器后，冷却硅整流器组，最后由背面的面板中部排风窗口排出。特别是硅整流器组应安置在出风口处，确保冷却。在出风口处装有一只风压开关SP，它由一只微动开关及具有杠杆机构的叶片组成。当风扇鼓风时，叶片受风的压力而吹开，使杠杆机构动作，从而触动微动开关，接通电路，于是磁放大器开始工作，即可进行焊接工作。当风扇停止鼓风时，风压消失，叶片复位，由于微动开关的复位使电路断开，即整个焊机停电。以确保硅整流元件及其他电器部件只能在通风情况下进行工作。

二、整流式直流弧焊机的维护保养

（1）应定期检查焊机的绝缘电阻（测量绝缘电阻前应将硅整流元件的正负极用导线短路），阻值不应低于0.5MΩ。

（2）应保持焊机清洁与干燥，定期用低压干燥的压缩

空气进行清理。

（3）不得在不通风情况下用焊机进行焊接工作，以免烧坏硅整流元件，安放焊机应有足够的空间，使排风良好。

（4）焊接时切忌有剧烈振动，更不允许对电焊机敲击，以免损坏饱和电抗器的性能，使焊机性能变坏。

（5）应避免焊条与焊件长时间短路，否则将烧毁焊机。

练 习 题

3-1 变压器是根据什么原理制造的？

3-2 为什么变压器只能改变交流电压而不能用来改变直流电压？如果把变压器绕组误接在直流电源上，会出现什么后果？

3-3 有一台单相变压器，额定容量 $S_N=5000\text{kVA}$，高低压侧额定电压 $U_{1N}/U_{2N}=35/6\text{kV}$，铁心柱的有效截面积 $S=1120\text{mm}^2$，铁心中最大磁通密度 B_m 为 1.45T，求高、低压绕组的匝数及该变压器的变比（题示：$\Phi_m=B_mS$）。

3-4 一台三相变压器一次绕组的每相匝数 $N_1=2080$ 匝，二次绕组每相匝数 $N_2=280$ 匝，如果将一次绕组接在三相电源上，电源电压为10kV，试在Y，yn与Y，d两种接法时，求二次侧的线电压与相电压。

3-5 变压器负载运行时，它的输出电压变动与哪些因素有关？

3-6 一小型变压器共有三个绕组（220V、380V、5V），现因各绕组接线端的标记不清，无法接线，问如何来鉴别它们各为何种电压的绕组？

3-7 某变压器的铭牌数据为：3相，额定容量7500kVA，空载功率15kW，短路功率73.7kW，试求该变压器在额定负载及负载功率因数为1时的功率。

3-8 有一台单相照明变压器，铭牌上标明容量为10kVA，电压为3000/220V。现在要在二次侧接上60W、220V的电灯，如果要求

变压器在额定情况下运行，可以接多少盏电灯？并求一次、二次绕组的额定电流。

3-9 单相变压器一次电压$U_1=3000\,V$，其变压比$K=15$，试求二次电压U_2，当二次电流$I_2=60\,A$时，求一次电流I_1。

3-10 三相变压器的极性如果用时钟表示法来表示，常有几种情况？

3-11 计算一台容量为180kVA，额定电压 10/0.4kV 的变压器安装时所需要的设备和材料。

3-12 有一台100/5A的电流互感器，二次侧接以满量程为5A的电流表，今若电流表的读数为3.5A，问电路中的实际电流是多少？画出测试线路图。

3-13 有一台变压器，一次侧接上380V电压，已知$N_1=570$匝，$U_2=50\,V$，负载为电阻性的，$R_L=2.5\,\Omega$。试求：I_1、I_2和输出功率P_2。

3-14 交流电焊变压器与普通变压器有什么不同？它的主要特点是什么？以BX2系列交流弧焊机为例说明之。

3-15 中小型配电变压器交接验收时，需作哪些电气测定和试验？抽心检查时，主要应检查哪些内容？

3-16 （1）并联运行变压器应具备哪些条件？

（2）某变电所有两台相同容量、同型号的变压器，现已安装完毕，准备送电。请叙述两台变压器并联运行前要做哪些工作。

3-17 已知电动机的额定功率为17kW，电压为380V，电流为35A，三角形接法，如图3-91所示。为了测定该电动机在拖动过程中实际取用的电功率，现选用一只功率（瓦特）表、一只电流互感器和一只单极刀开关，要求：

（1）绘出测定电路的实际接线图。

（2）选择电流互感器的电流比。

（3）如发现功率表的指针反转，应怎样处理？

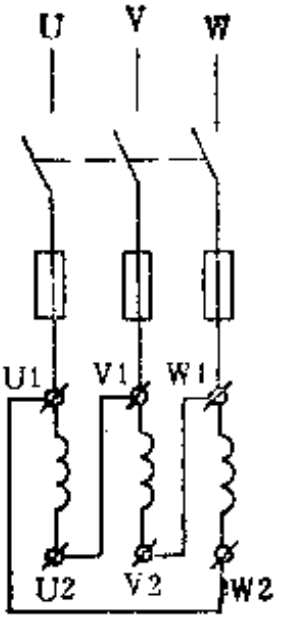


图 3-91

3-18 如何从结构上识别笼型和绕线转子异步电动机？

3-19 异步电动机是怎样转起来的？它的定子绕组电流和转子导体中的电流由什么地方得到？如果转子导体不用短路环联接起来，能否转动？

3-20 说明三相异步电动机在什么情况下，它的转差率是下列数值：（1）$s=1$；（2）$s=0$；（3）$0<s<1$；（4）$s<0$；（5）$s>1$。

3-21 当三相异步电动机的定子绕组与电源接通后，若转子堵住，长时间不转动，对电动机有何危险？如果遇到这种情况，应该如何处理？

3-22 三相异步电动机的起动电流和起动转矩是否与它的负载（重载和满载）有关？当电动机联接成△（电源电压220V）起动时和联接成Y（电源电压380V）起动时，起动电流和转动转矩是否一样？

3-23 某异步电动机的额定电压为220/380V，额定电流为11.25/6.5A，额定功率为$P_N=3$ kW，额定功率因数$\cos\varphi=0.86$，转速$n=1430$ r/min，频率$f_1=50$Hz，求额定效率η_N，额定转矩T_N，

WWW.PLCWORLD.CN

额定转差率 s_N 和定子绕组的磁极对数。

3-24 三相异步电动机未起动时，若有一相断线，就不能起动，为什么？如果在运转中有一相断线，有时电动机仍然继续转动，为什么？

3-25 异步电动机拖动额定负载时，若电压下降过多，往往会使电机发热、烧毁，试说明其原因。

3-26 绕线转子异步电动机如果转子开路，问是否能起动？何故？

3-27 有一台交流电动机容量为30kW，电压为 $U_N=380\,V$，电流 $I_N=56\,A$，有六个出线端（未标明始末端），正常运行时接成△形，写出确定始末端的方法。

3-28 同步电动机的主要特点是什么？与异步电动机的转动原理有何不同？

3-29 同步电动机带额定负载时，$\cos\varphi=1$，如果保持励磁电流不变，而负载降为零（即空载），功率因数是不是会改变？为什么？

3-30 什么叫同步调相机（或同步补偿机）？

3-31 现有一台6000kW发电机组，在试车时发现：

（1）发电机电压为0，升不上去；

（2）经采取措施后，能建立电压，但励磁机有严重的火花。

请问上述现象说明存在什么故障，如何进行处理？

3-32 同步电动机为什么不能自起动？一般采用什么方法起动？

3-33 直流发电机是怎样把电枢绕组元件中的交流电动势变换为外电路的直流电动势？

3-34 如图3-92所示，当发电机与外电路接通时，要求：

（1）画出电枢导线中通过的电流的方向。

（2）画出导线所受电磁力的方向。

（3）说明由上述电磁力所产生的电磁转矩与原动机的转动方向是否相同，怎样才能保持发电机的转速恒定，从而把机械能转换为电能。

3-35 造成换向不良的主要电磁原因是什么？采取什么措施能改善换向？

WWW.FLEWORLD.CN

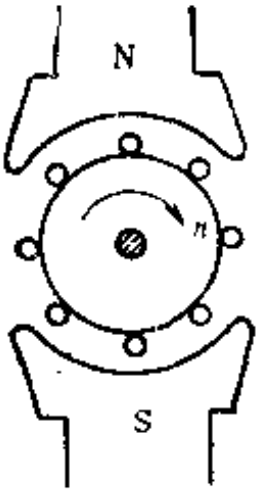


图 3-92

3-36 换向极的绕组应怎样联接？在发电机和电动机中它的极性应怎样安排？试画出接线图。

3-37 如果发现并励发电机不能建立电压，应该从哪几方面找原因？怎样处理？

3-38 直流电动机的机械特性说明什么问题？不同的励磁方式对其机械特性有何影响？

3-39 一并励电动机接在440V的直流供电线上，在某一负载下，电动机取用的电流是70A，其转速 $n=1000$ r/min，$R_a=0.3\Omega$，励磁电路的电阻为500Ω。现把负载减小，电动机的转速升高到1040 r/min，求此时电动机取用的电流是多少？并绘出线路图。

3-40 串励电动机改变转向的方法是不是和并励电动机一样？为什么？

3-41 一并励直流电动机在正转时有一定的转速，现在要把它停下来，仅改变一下磁场电流的方向，其他都不变，重新起动运转，发现这时转速与原来不一样，是什么原因？

3-42 要改变（1）串励电动机；（2）并励电动机；（3）复励电动机的转向，应该怎么办？

3-43 某台直流电动机在运行时换向器的后刷端发生火花，如在换向极根部加装了钢垫片，运行时便无火花了，这是什么原因？

3-44 直流电动机换向器产生火花的主要原因是什么？应采取什么措施消除火花？

第四章　电力拖动控制线路与维修

在现代工业、农业生产中，几乎所有的生产机械都采用电动机来拖动，这种拖动方式称为电力拖动。在生产上采用电力拖动可以提高劳动生产率、改进产品质量、节省劳动力，有利于实现生产过程自动化。

要使电力拖动满足不同生产工艺的要求，必须配备一定的控制设备和采用一定的控制方法才能完成，控制方法有手动控制和自动控制两大类。本章中主要讨论电动机的控制设备、实现电动机的起动、制动、反转和调速的方法以及电动机的基本控制线路——继电器、接触器自动控制系统。这是学习电气控制系统的基础知识。

下面，首先介绍继电器-接触器控制中的各种常用电器。

§4-1　常用低压电路控制设备

低压电器通常指在交流1000V以下、直流1200V及以下的电路中，用来对电路起开关、控制、保护和调节作用的电气设备。

电器的种类很多，我国把电器产品分为十二大类，即刀开关与转换开关、熔断器、低压断路器、控制器、接触器、起动器、控制继电器、主令电器、电阻器、变阻器、调节器、电磁铁等十二类。

一、控制电器和保护电器

电器按照它的职能可分为控制电器和保护电器。刀开

关、接触器、按钮开关等，用来控制电动机的起动和各种运行状态，称为控制电器。熔断器用来保护电源，不让它在短路状态下工作；热继电器用来保护电动机，不让它在过载状态下运行，这些电器称为保护电器。有些电器既有控制作用，又有保护作用，例如，行程开关，既可控制工作台的行程长度，又可作为工作台的极限位置保护。

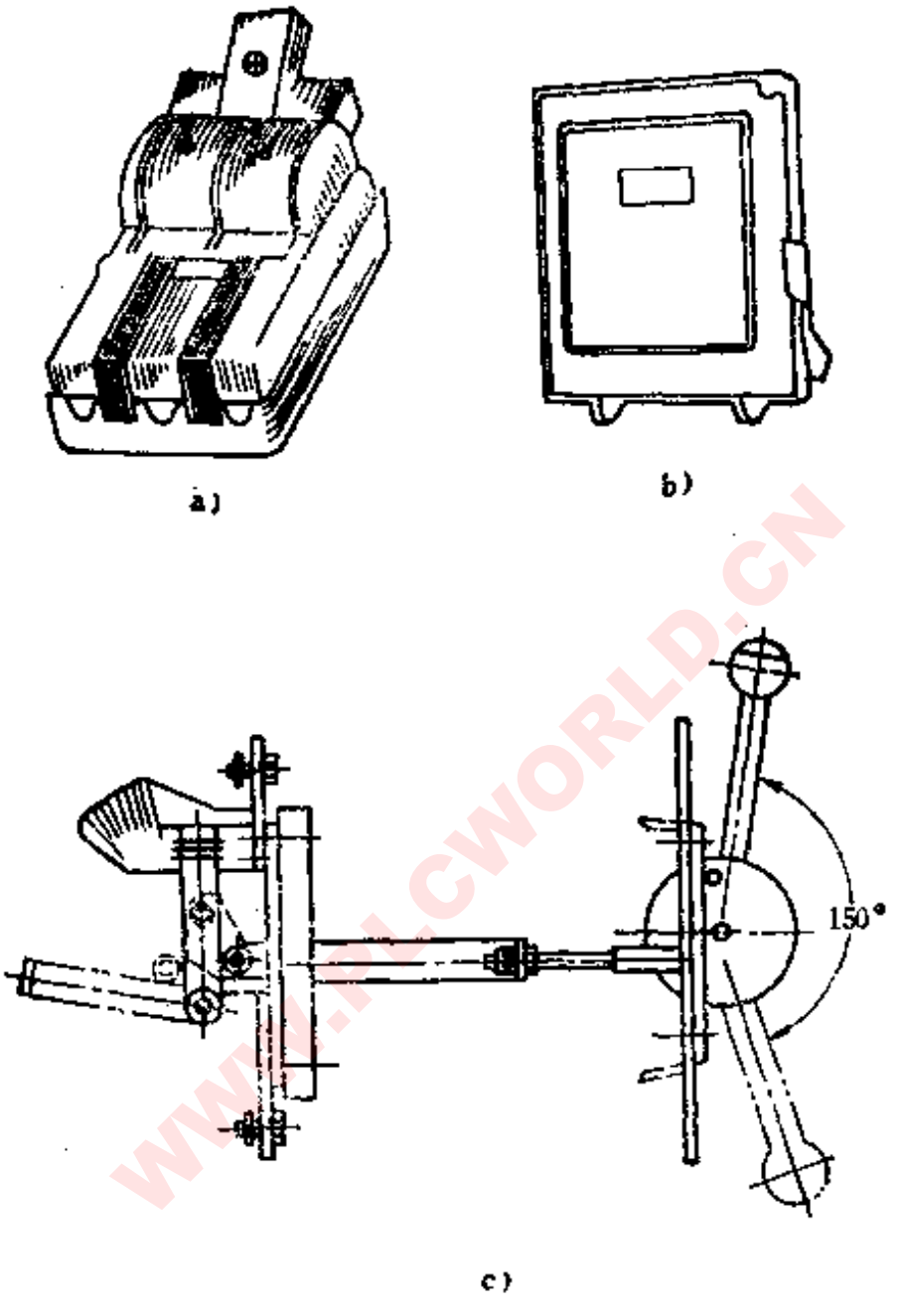
现在把几种常用低压电器的结构、工作原理和使用方法介绍如下。

（一）刀开关

常用的低压刀开关有胶盖瓷底开关、刀开关、铁壳开关等，它们适用额定电压交流500V、直流440V以下，额定电流1500A以下的工矿企业配电设备中，作为不频繁地手动接通和切断或作隔离电源之用。装有灭弧室的刀开关和铁壳开关可以接通和分断电流负载，对过载的故障电流没有分断能力，所以在选择开关时，应对其断流能力给予注意。其他刀开关只能作隔离开关使用。

在操作刀开关时动作应迅速。这样，可使通路时不致有个别接触不良；断路时电弧易于熄灭。在安装时，静触头位于上方，动触头位于下方，这样，在切断电路产生电弧时，热空气上升将电弧拉长而易于熄灭。同时也可避免刀开关处于切断状态时，闸刀动触头因重力或受震动而自由落下，发生误合闸。

几种常用的刀开关外形如图4-1所示。负荷开关(有开启式和封闭式)由刀开关和熔断器组合而成，具有短路保护作用。负荷开关可作为小型异步电动机（4.5kW以下）不频繁直接起动及停止之用，其与电动机容量配合方法示如表4-1，即其额定电流应为电动机额定电流的2～3倍。



WWW.HLCWORLD.CN

图4-1　刀开关外形

a）HK1开启式负荷开关（胶盖刀开关）　b）HH10封闭式负荷开关（铁壳开关）15、30、60A　c）HD17系列

表　4-1

电动机容量（kW）	2.8	4.5	7
负荷开关额定电流（A）	20	30	40

（二）转换开关（又叫组合开关）

由于转换开关的结构紧凑、安装面积小、操作方便，故广泛用于机床上，作为引入电源的开关。

图 4-2 为转换开关的外形和表示符号。它有三对固定接点 1 和三个可动接触片 2，通过手柄 3 可使绝缘体制成的方轴 4 带动可动接触片转动，图中所示为接通位置，转动 90° 即为分断位置。一般为顺时针转动，每转动 90°，就可连续进行电路的接通、分断。

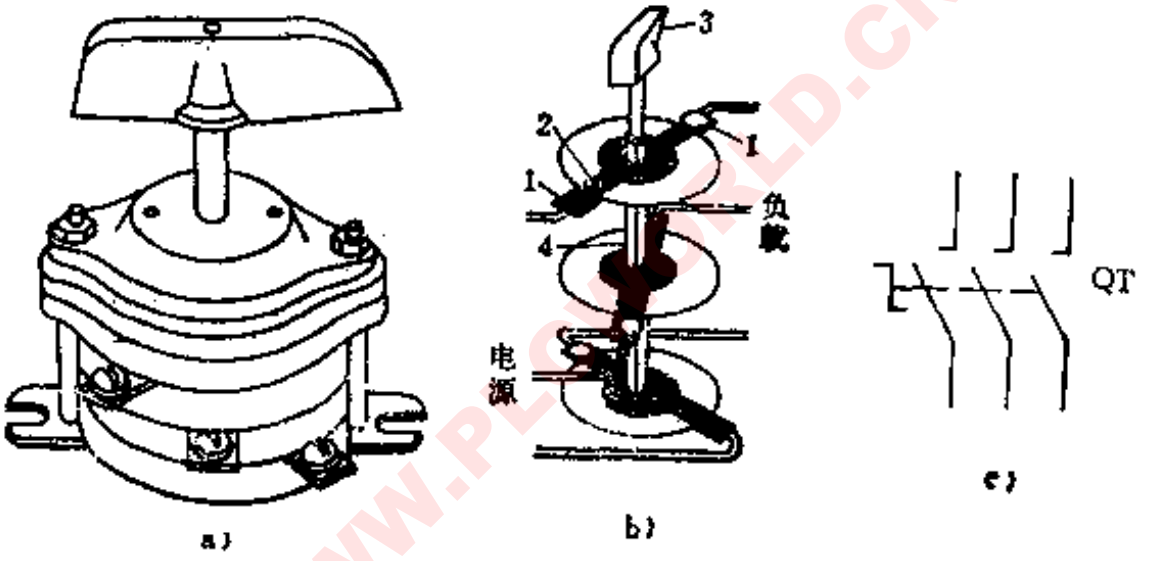


图4-2　HZ15系列转换开关

a）外形　b）接通位置　c）图形符号

通常转换开关是不带负载操作的，仅在电动机停止后用它切断电源引入线，电动机的开停，要另配有其他开关。只有电流很小的负载，例如机床的油泵电机、照明灯，才用它直接控制。

开关的额定电流一般取电动机额定电流的1.5～2.5倍。

（三）交流接触器

交流接触器也是一种开关，主要用于各种电力传动系统

WWW.PLCWORLD.CN

中。在电动机功率较大、起动频繁以及要求远距离操作和自动控制时，需要用接触器来代替手动的开关。它是靠电磁线圈的作用实现接通和断开电路的。它由电磁铁和触头两个主要部分组成。图 4-3 是 CJ 20 系列交流接触器的内部结构和外形图。当吸引线圈未通电时，处于断开状态的触头称为常开（或动合）触头，处于接通状态的触头叫常闭（或动断）触头。

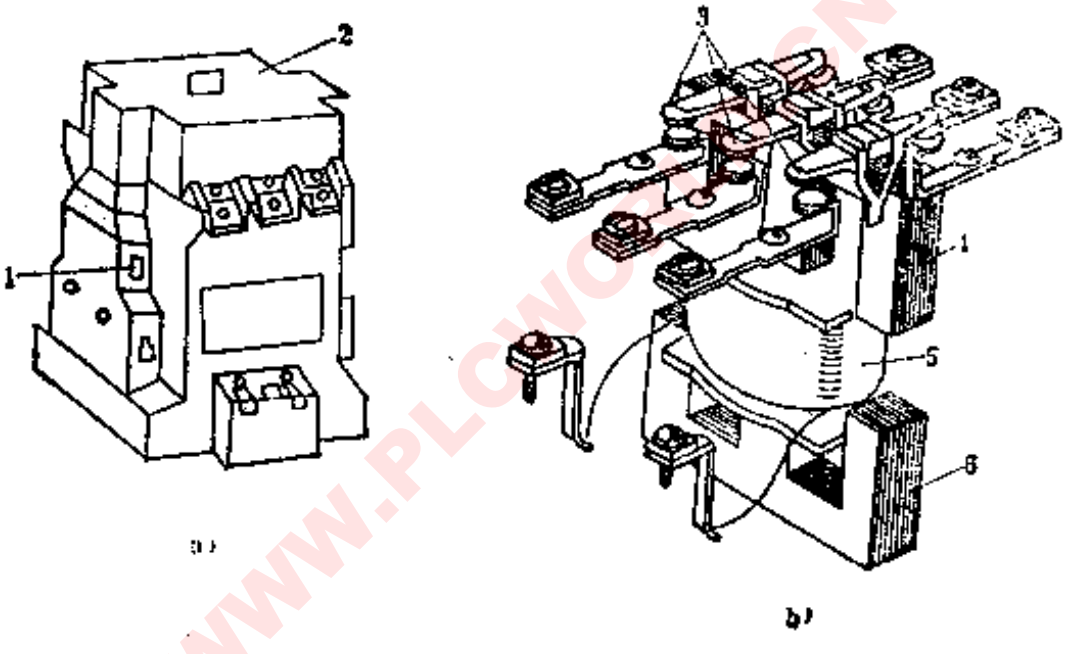


图4-3　CJ20型交流接触器

a）外形图　b）结构图

1—辅助触头　2—灭弧罩　3—主触头　4—上铁心　5—线圈　6—下铁心

吸引线圈通电以后，产生电磁吸力，使动铁心（衔铁）吸合，带动各个常开触头闭合，各个常闭触头断开。它有三对常开主触点用于接通负载电流，同时还有两对常开和两对常闭辅助触点。这些辅助触头随着主触头的接通和断开而同时闭合或断开，接在控制回路中应用。当吸引线圈断电后，

在弹簧的作用下，衔铁和所有的触头都恢复到原来状态。

容量较大（20A以上）的接触器，在主触头上装有灭弧罩，使触头在断开时产生的电弧熄灭。

采用接触器必须配有按钮，把按钮和操作线圈都接在一个控制回路内，便可在远距离来控制电动机。机床上常用的按钮有LA2，LA18，LA25等形式。

接触器的操作线圈一般都用交流控制，也有用直流控制的，叫直流接触器。交流接触器吸引线圈的额定电压为50Hz，36、127、220、380、660V；直流为48、110、220V。

CJ12系列接触器适用于冶金、轧钢和起重设备的控制系统。额定电流100～600A。

CJ20系列适用于机床电器控制设备。额定电流10～630A。

选择接触器时，应使接触器主触头的额定电流大于或等于电动机额定电流。如果起动频繁或用于正、反转控制时，应选择主触头额定电流大一级的等级。

（四）中间继电器

中间继电器也是利用电磁铁作用力的原理制成，所以它的结构和接触器基本相同，但触头容量小（约5A左右）。通常用它来传递信号，把信号同时传给多个有关控制元件或辅助电路。如继电保护装置中需要增加触头数量和提高触头的容量时，就要用到中间继电器；也可直接用它来控制小容量电动机（1kW以下）或其他电动执行元件。

图4-4是常用的JZ-14系列中间继电器的外形、结构示意图和表示符号。选用中间继电器时，主要是考虑电压等级和（常开和常闭）触头的数量。

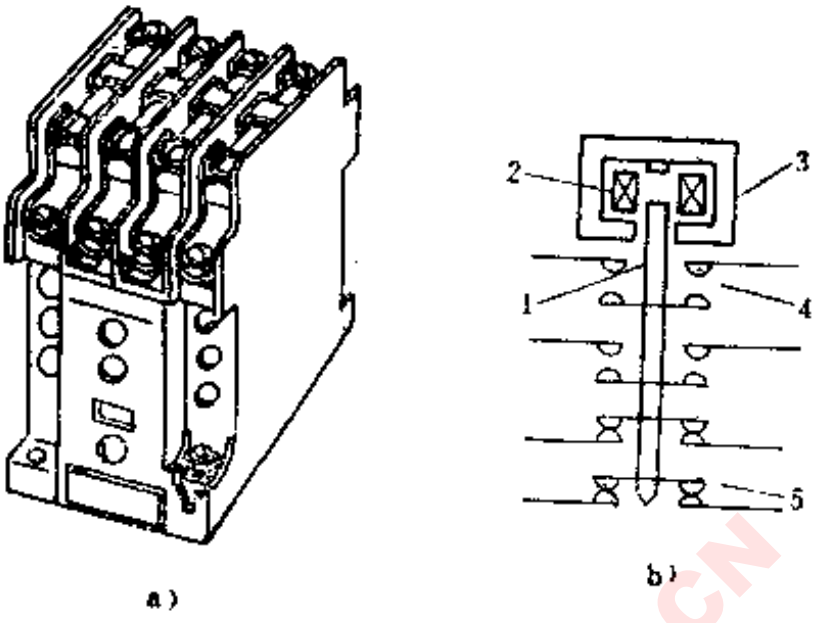


图4-4　中间继电器

a）外形图　b）结构图

1—动铁心　2—线圈　3—静铁心　4—常开触头　5—常闭触头

（五）磁力起动器

磁力起动器是一种组合低压电器，广泛地用于笼型电动机的起动、停止及反向运转。它是由交流接触器和热继电器组成的。因此，它的原理和应用与接触器基本相同。由于它有热继电器，故对用电设备又具有过载保护作用。

现在全国统一设计的QC10系列磁力起动器，是由CJ20系列交流接触器和JR15或JR20、JR16系列热继电器组成的。磁力起动器分保护式和开启式，前者加金属外壳，后者不加外壳。

另外根据不同的用途，磁力起动器分为可逆的和不可逆的。可逆的磁力起动器内装两个相同的交流接触器，这样可以进行电源相序的倒相，实现电动机的正转和反转的要求。

（六）热继电器

热继电器是利用电流热效应而动作的一种保护用继电

WWW.DGWORLD.CN

器，主要用于电动机的过载保护。

图 4-5 为热继电器的示意图。

发热元件串联在主电路中绕在双金属片上，二者之间隔有一绝缘层。双金属片是由两种具有不同热膨胀系数的金属片焊接而成，当电动机过载时，发热元件中通过的电流超过了它的额定值，因而发热量增大，使双金属片的温度升高、受热膨胀而弯曲（图 4-5 b），推动一套动作机构，使热继电器的一对常闭触点断开。切断了控制电路，接触器的主触头也随之分断，电动机停转，起到了过载保护的作用。经过一段时间后（约30 s），双金属片逐渐冷却，才能自动恢复原状，这时要用手按下复位按钮，使常闭触头重新闭合，叫做复位。

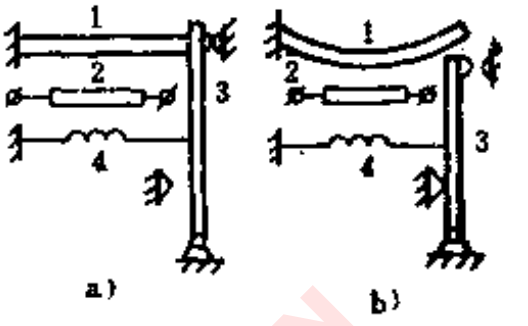


图4-5 热继电器示意图

1—双金属体 2—加热元件

3—触头 4—弹簧

应该注意，由于热惯性，热继电器不能作短路保护。但是这个热惯性对于电动机的起动却是有利的。不过电动机起动太频繁时（如起重机），继电器就不能反映电动机的发热情况，也就不适宜作电动机的过热保护了。所以起动频繁、重复短时工作的电动机是不需要装设过负荷保护的。实际上只装过电流保护。常用的热继电器有 JR 16 和 JR 20 等系列。

（七）低压断路器

低压断路器又叫做自动空气断路器。这种开关比以上介绍的几种开关要完善得多，所以在低压系统中，作为分断和接通电路及作为电气设备的过载、短路欠压保护用。一般在

小型发电站及变电所中作为低压线路的主开关；也可用于40～100kW电动机的全压起动（不频繁地起动）、停止及过载与短路保护用。

图 4-6 为低压断路器的示意图和图形符号。

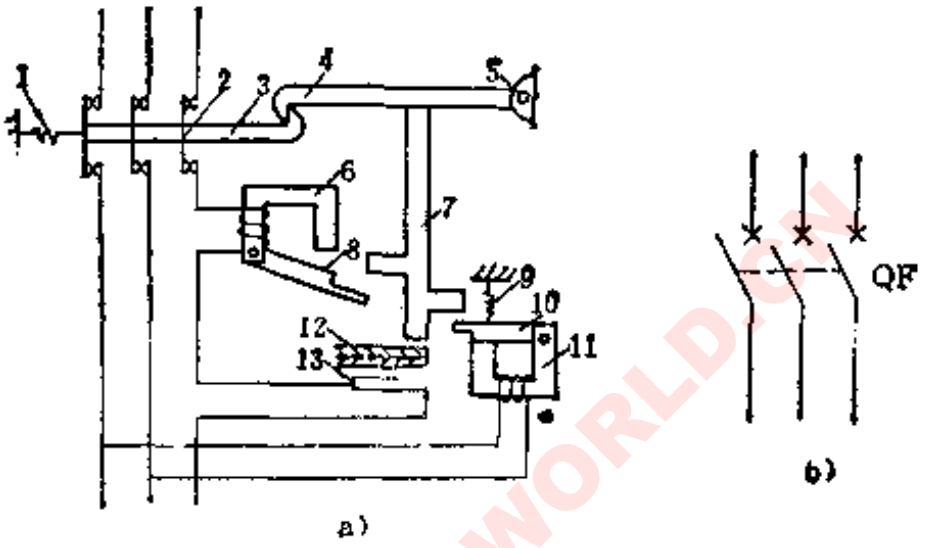


图4-6 低压断路器

a）结构示意图 b）图形符号

1—弹簧 2—触头 3—锁链 4—搭钩 5—轴 6—过电流脱扣器
7—杠杆 8—衔铁 9—弹簧 10—衔铁 11—欠电压脱扣器
12—热继电器双金属片 13—热继电器发热元件

低压断路器具有良好的灭弧室，以熄灭切断电流时所产生的电弧。它既能在正常情况下切断负载电流，又能在发生短路故障时自动切断短路电流。开关中装有电磁脱扣器就是用作短路保护的。当短路电流达到近 10 倍的额定电流时，电磁脱扣器瞬时动作，通过机构迅速分断。一般低压断路器装有复式脱扣，这就是电磁脱扣加上热脱扣。热脱扣主要保护电器的过载，热脱扣也是靠双金属片受热弯曲的原理。

常用的低压断路器有 DZ 20 系列装置式（塑壳式）和

WWW.PLCWORLD.CN

DW15 系列万能式（框架式），图 4-7 为低压断路器的外形及结构图。一般情况，变压器及配电线路选用 DW 系列，保护电机选用 DZ 系列。

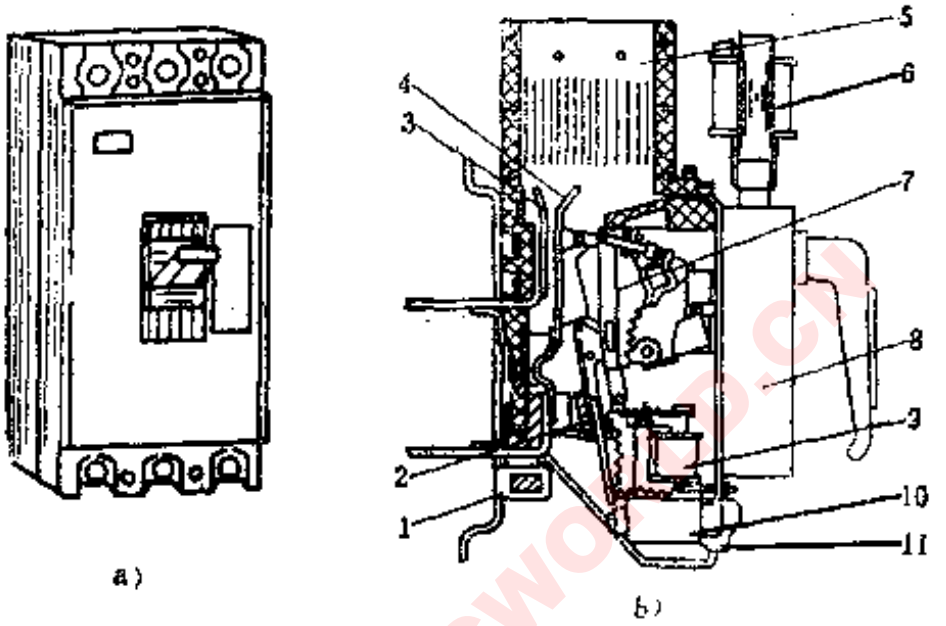


图4-7　低压断路器外形及结构

a）DZ20型塑壳式外形　b）DW15型框架式结构(630A)

1—速饱和互感器　2—过流脱扣器　3—静触头　4—动触头　5—灭弧罩　6—电磁铁　7—杠杆　8—操作机构　9—欠电压脱扣器　10—阻容延时装置　11—热继电器

DZ 20 系列低压断路器，额定电流为 100、200、400、630、1250A；DW 15 系列低压断路器，额定电压为交流 380、660、1140V，50Hz，额定电流等级为 200～4000A 七种，操作方式有手柄直接传动、电磁铁传动和背后杠杆传动。

ME 系列低压断路器也是一种框架式结构，可作为发电机、电动机、变压器、电缆与导线、交流设备中的保护开关，额定电压为交流 380、660V，直流 440V，额定电流为

630～5000A。操作方式分手动和电动两种。

低压断路器用于异步电动机时，低压断路器其额定电压和额定电流都必须大于电动机的额定电压和额定电流。低压断路器热脱扣器的整定电流应选择和电动机额定电流一样大小，电磁脱扣的瞬时动作整定电流 I_{zd} 应大于电动机的起动电流，其数值按下式选取（对一台电动机来说），即

$$I_{zd} \geqslant K_{zd} I_{ST} \tag{4-1}$$

式中 I_{ST}——电动机起动电流；

K_{zd}——安全系数：DZ 型低压断路器取 1.7，DW 型低压断路器取 1.35。

（八）熔体和熔断器

熔断器是电动机或电路中一种最简单而有效的保护电器，应用很广，是低压电路中防止短路故障最常用的电器。

熔断器的主要元件是熔体，它串联在被保护的电路中。当电路发生短路或严重过载时，流过熔体的电流过大就自动熔断，切断电路，起到保护作用。

制造熔体的金属材料有两种：一种是用低熔点材料（如铅锡合金、锌等）作熔体，这种材料作熔体分断能力不高，一般只宜在小电流情况下使用。另一种是高熔点材料如银、铜等，这种材料作熔体分断能力高，一般用在大电流情况下。

熔断器的种类很多，常用的有下列几种形式，它们的用途见表 4-2。

表4-2 熔断器的用途

熔断器		熔体材料	用途
类别	型号		
大热惯性	RC1A（瓷插式）	铅锡合金	小电流用电设备的保护

（续）

熔断器		熔体材料	用途
类别	型号		
热惯性	RL6（螺旋式）	铅	小型电动机保护等
小热惯性	RM10（无填料封闭管式）	锌	具有较高的灭弧能力，用于配电系统中
无热惯性	RTO（有填料封闭管式）	铜或银	具有较高的灭弧能力，用于大电流电力系统和成套配电装置中
无热惯性	RS0，RS3（快速熔断器）	银	用于硅整流器和晶闸管元件

RC 1 A 型插式熔断器，可用于电压 380 V 以下、电流 200 A 以下的场合。

RL 6 螺旋式熔断器，可用于电压 500 V 以下、电流 200 A 以下的场合。

RM10 无填料封闭管式熔断器（外形见图 4-8）。多用于 500 V 以下、电流 1000 A 以下的场合。当熔体在密闭的纤维管中熔断时，电弧的高温使纤维管内壁的部分纤维质气化，纤维管内气压升高，由于高气压下的气体不易电离，所以电弧很快熄灭，因此能用于大电流，很适用于动力配电箱中作

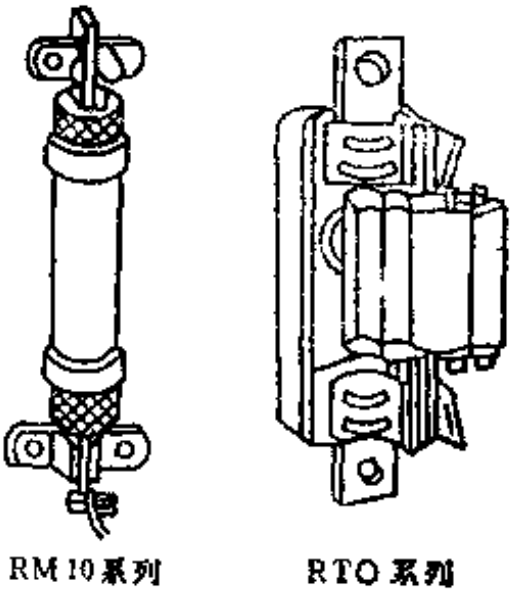


图4-8　管式熔断器

WWW.PLCWORLD.CN

为电气设备的短路保护和防止连续过载之用。

本系列熔断器为可拆换式，具有结构简单、更换熔体方便等优点。

RTO 系列有填料封闭管式熔断器（见图 4-8）。这种熔断器广泛地使用于供电线路或断流能力要求较高的场所，作为电缆、导线及电气设备的短路保护或电缆和导线的过负荷保护用。额定电压为 380 V，额定电流在 1000 A 以下。

RS 0、RS 3 型快速熔断器。额定电压在250 V 及500 V，额定电流在 50～500 A，作为硅元件的短路保护。其结构类似于 RTO 系列，但具有汇流排式固定接头。

关于熔丝的选择，可由电路的工作情况来确定。由于在用电过程中熔丝被熔断是常有的事，为了使熔丝真正起到保护作用，就应当了解它的性质和学会正确地选配熔丝。图 4-9 表示熔丝熔化时间与电流倍数的关系。电流倍数即熔断电流与额定电流的比值（I/I_N）。

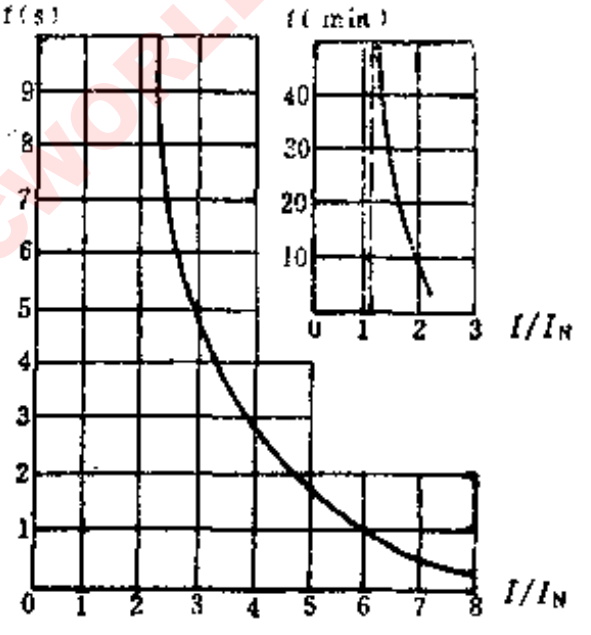


图4-9　熔体的特性

在选用熔体（丝）的规格时，必须注意其额定电流。熔体的额定电流用 I_{NP} 表示，就是能在其中长期通过而不使其熔断的最大电流。如果选用的熔体太粗，超过了导线或负荷的额定电流很多，就不能达到保护的目的。反之，如果熔体选得太细，在电路正常工作电流下也会经常熔断，这将影响正常工作的进行。因

此，正确选用熔体的容量（即额定电流），是十分重要的。

在工厂中使用时，电源侧的熔断器需按以下原则选择：按低压侧在配电系统中可能出现的最大短路电流选择有相应分断能力的熔断器，否则在发生故障时，如熔断器分断能力不足，则熔断器会有爆裂可能。

（1）对电热负载来说，（如照明、电炉），熔体的额定电流可按下式计算，即

$$I_{NF}=(1\sim1.5)I_N \tag{4-2}$$

式中 I_N——负载的额定工作电流。

（2）对电动机（笼型电动机）来说，考虑到电动机一般起动时间小于5 s（中型以上电动机起动时间约5～10 s），根据图4-9在5～10 s内熔体能忍受的电流约为其额定电流的2.5倍。因此，熔体的额定电流应大于（或等于）电动机额定电流的2.5倍。

$$即\quad I_{NF}\geqslant(2\sim2.5)I_N^* \tag{4-3}$$

对频繁起动或降压起动取小值，有大热惯性的熔体还可选取$1.5I_N$。

$I_{NF}\geqslant2.5I_N$是指单台电动机熔体的选择。多台电动机运行时，总熔体的电流为$I_{NF}\geqslant2\sim2.5\times$(最大一台电动机的额定电流)+(其余电动机额定电流的总和)。

（3）对于6～10kV变压器，凡容量在1000kVA及以下者，均可采用熔断器作变压器短路及过载保护，其熔体额定电流I_{NP}可取为变压器一次侧额定电流I_{1N}的1.4～2倍，即

$$I_{NP}=(1.4\sim2)I_{1N}$$

（4）对电焊变压器来说，熔体的额定容量可按下列计算，即

$$I_{NP}\geqslant1.2\sqrt{FS\%}\,I_N \tag{4-4}$$

WWW.PLCWORLD.CN

式中 $FS\%$—电焊变压器的暂态率。

由此可见，在选择熔体时，不仅需要知道负载的额定电流，而且需要知道它的性质，才能正确地选择。

在配电系统中，往往各级都用熔断器保护。熔断器与熔断器之间的配合问题需要注意，为了保证动作的选择性，一般要求前一级熔体电流应比下一级熔体电流大 2～3 级。

熔断器的选择条件是：①熔断器的额定电压必须大于或等于线路的工作电压。②熔断器的额定电流必须大于或等于所装熔体的额定电流。③装置类别和结构根据负载的大小、重要程度、短路电流大小、使用环境及安装条件等综合考虑决定。

RC1A、RM10、RL6 及 RTO 系列熔断器的规格见附录 F。

例4-1 某用户使用 40W 和 25W 白炽灯各一盏，彩色电视机一台（可按 70W 计算），它们由一个闸盒进行控制和保护的。应在此盒内装配何种规格的熔丝（电源的电压为 220 V）？

解 白炽灯与电视机的总功率为

$$P = 40 + 25 + 70 = 135\text{W}$$

总的工作电流为

$$I = \frac{P}{U} = \frac{135}{220} = 0.61\text{ A}$$

故所选熔丝的规格应为

$$I_{NP} = 1 \sim 1.5 I_N = 0.61 \sim 0.915\text{ A}$$

故可选用 1 A 的熔丝。

二、常用电器元件电工符号

任何一个电路都是由许多电器元件组合起来的，它包括

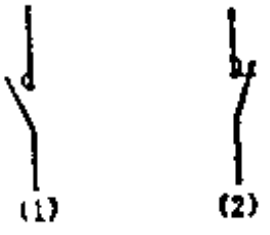
控制电器、保护电器、测量仪表及指示灯等。为了便于设计、施工、安装、调整、使用和维修，必须有统一的符号来表示它们，每种电气元件都用图形符号和文字符号来区分，每个符号都表示一定的意义，理解了这些符号和它们之间的相互关系，看图就很方便了。根据我国最新公布的电气图用图形符号的国家标准，常用的电气（开关、控制和保护装置）图形符号和文字符号见表 4-3 。文字符号分为基本文字符号和辅助文字符号两类。基本文字符号分为单字母符号和双字母符号两种。单字母符号是按拉丁字母顺序将各种电气设备、装置和元器件划分为 23 大类，每大类用一个专用单字母符号表示。如“R”表示电阻器类、“C”表示电容器类等。单字母符号应优先采用。

双字母符号由一个表示种类的单字母符号与另一字母组成，其组合形式应以单字母符号在前，另一字母在后的次序

表4-3　常用的电气图形符号和基本文字符号

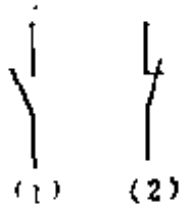
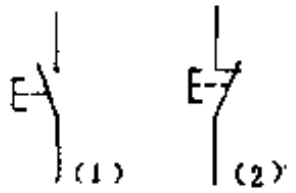
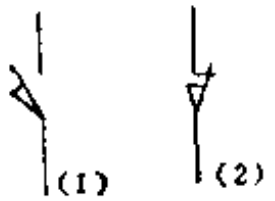
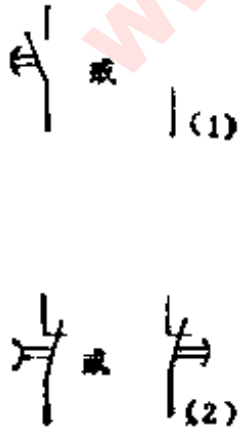
序号	图形符号	单字母符号	双字母符号	代表元件的名称
1		Q	QS QK	刀开关（多级开关）
2		Q	QF 或 QL	三极低压断路器

（续）

序号	图形符号	单字母符号	双字母符号	代表元件的名称
3		Q	QH 或 QF	三极高压断路器
4		Q	QS	三极高压隔离开关
5		Q	QL	三极高压负荷开关
6		Q	QR	漏电保护开关
7		K	KM	（1）接触器动合（常开）触头 （2）接触器动断（常闭）触头

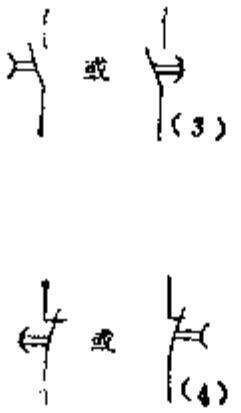
WWW.PLCWORLD.CN

（续）

序号	图形符号	单字母符号	双字母符号	代表元件的名称
8		K	KA	（1）继电器动合（常开）触头 （2）继电器动断（常闭）触头
9		S	SB	按钮开关 （1）起动按钮 （2）停止按钮
10		S	SQ	行程开关（位置开关） （1）动合（常开）触头 （2）动断（常闭）触头
11		K	KT	时间继电器 （1）吸合时延时闭合的动合触头 （2）吸合时延时闭合的动断触头

WWW.PLCWORLD.CN

（续）

序号	图形符号	单字母符号	双字母符号	代表元件的名称
12		K	KT	（3）释放时延时断开的动合触头 （4）释放时延时断开的动断触头
13		F	FR	热继电器动断（常闭）触头
14		F	FU	熔断器
15		F	FQ	熔断器式开关

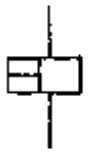
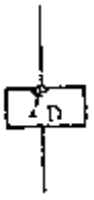
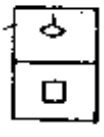
WWW.PLCWORLD.CN

（续）

序号	图形符号	单字母符号	双字母符号	代表元件的名称
16		F	FQ	跌落式熔断器
17		F		避雷器
18		F	FR	热继电器的驱动元件
19		K	KM、KA	接触器、继电器的线圈
20		K	KC	过电流继电器线圈

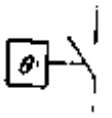
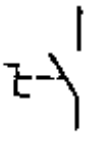
WWW.PLOWORLD.CN

（续）

序号	图形符号	单字母符号	双字母符号	代表元件的名称
21		K	KA	中间继电器（快吸和快放）线圈
22	(1) (2)	K	KT	时间继电器线圈 （1）断电延时释放 （2）通电延时吸合
23		K	KD	差动继电器线圈
24		K	KS	信号继电器线圈
25		F	FV	欠电压继电器线圈
26		K	KG	气体继电器（瓦斯继电器）

WWW.PLCWORLD.CN

（续）

序号	图形符号	单字母符号	双字母符号	代表元件的名称
27		K	KL	液位开关
28		K	KT	温度继电器动合触头
29			SR	速度继电器动合触头
30			SR	速度继电器
31		S	SA	旋转开关（旋扭开关）
32		Y	YR	断路器的跳闸线圈

WWW.PLCWORLD.CN

列出。如“KA”表示交流继电器，其中“K”为继电器的单字母符号。只有当单字母符号不能满足要求，需要将大类进一步划分时，才采用双字母符号，以便较详细和具体地表达电气设备、装置和元件等。

§4-2 电器元件的维修

凡是用来控制、调节与保护电路及电气设备的电工装置都称为电器。

生产的自动化和机械化程度愈高，电器愈显得重要，因此在工业企业中，加强对电器的日常维护与检查，及时对电器进行修理，不仅对电器本身是必须的，而且对整个企业设备安全、可靠、经济的运行也是十分重要的。

电器的故障除一部分是因为磨损过度外，更多是由于管理不周和违反生产工艺过程所造成的电器的及时维护、试验和调整可以有效地预防事故或制止事故的蔓延。

电器的主要组成部分有触头、电磁装置和消弧装置及机械装置。因此电器的维护工作应包括触头、电磁铁及电器机构的维护。

一、触头的维护

触头是电器中极重要的工作部件，电流通过的（触头）接触处不应被氧化物所覆盖，应保持接触良好。所有触头的螺母均应拧紧，并仔细除去氧化物（银或银合金触头氧化膜不影响导电，可不去除）。因为松弛和已氧化的触头接触电阻增大，将会强烈地发热。触头的发热可在带电情况下测得，用带上橡皮手套的手拿着蜡烛（或系在绝缘棒上），触及触点，触点发热厉害时，蜡烛将会熔化。

灰尘和污垢可用汽油或四氯化碳仔细地清洗，因为它们

能增加活动部分（轴承及轴）的磨损，并可能引起闪络和导电部分间绝缘的击穿。特别是当灰尘为良导体（如煤粉）时更甚。

触头不应歪扭和变黑（氧化物）。触头表面如有烧瘤、凹坑、蚀痕，要沿接触面顺一个方向用细锉锉净，但应保持原来形状。不能用砂布打磨，以防砂粒粘附；但过细打磨反会使触头接触面更小，在闭合状态下的触头应相互贴紧。在刀闸中，是通过固定部分的接触夹座得到压紧的；而在接触器和磁力开关中，触头是借弹簧来压紧的。每种形式的接触器的弹簧压力都有一定的值（按产品技术规定）。如果这压力过大，则电磁铁的磁路反而不能全部闭合，交流接触器的线圈就会烧坏，因为磁路气隙过大时交流线圈需要很大的电流。如果压力太小，则触点就会过热。

对于严重磨损的触头，超过厚度1/2以上时，应当及时更换。不可润滑触头，因为润滑是有害的，它只能缩短触头的寿命。

二、铁心噪声

交流接触器发生噪声，这说明磁路铁心接触不良，原因可能是下面几点。

（1）铁心和衔铁的接触面不好，不是落进了污垢，就是螺钉松开了。为了避免故障，必须及时清擦和拧紧螺钉；如果不是这样，则必须用细锉将铁心锉平。接触面完全接触是不需要的，只要铁心大部分接触，而其他地方的间隙不大于0.05mm就够了。另要在铁心表面上涂一定数量的凡士林，以防生锈，减少响声。

（2）铁心小槽中的短路环损坏时，也会发生嗡声。不是短路环断裂，就是短路环脱落。因而，在平时维修时将两

边的扣攀作为维修项目之一，使其牢固地扣住短路环。

（3）机械部分有卡住现象（如衔铁部分的歪斜或卡住现象）。

（4）触头上弹簧压力过大。

（5）合闸线圈电压过低，也会使铁心发生噪声。需要通过检查，排除故障。

三、线圈的检修

线圈的检查主要是测量线圈直流电阻和绝缘电阻。

电器线圈，特别是电磁铁的和交流及直流接触器的吸引线圈很容易损坏。因此电气维修工人必须掌握电器线圈的制造技术。

线圈有带骨架和无骨架两种。它们的制造方法各不相同。

在心轴上绕四层宽 15mm 的绸扎带，扎带的长度应该能够盖得住线圈的轮缘，然后用厚为 0.2～0.3mm 的厚纸板包起。这块纸板的宽度应该等于线圈的高。而长度等于心轴圆周的两倍。

在绕导线时，应注意不要因为拉得太紧而折断；应该随时注意导线的绝缘质量。绝缘破坏的地方以及没有绝缘的地方要用漆布绝缘。在缠绕每一层线圈时，先要用绝缘漆涂上，然后垫上电容器纸做层间绝缘。这个绝缘纸应比线圈宽 5～6mm，将衬垫纸的边沿包裹起来并把它垫在最靠边沿的下面。

离缠绕的端头还剩两三层线时应该紧紧地扎住扎带的端头，然后在它的上面结束缠绕。

在线圈的终端出口焊上较粗的导线（或铜片），并且和前面开始出口端一样地进行绝缘。

修理好的电器应通电检查，保证吸合、断开迅速，并无过热现象和噪声。带灭弧罩的电器在没有装上灭弧罩以前，不能进行操作，以免飞弧造成短路，甚至烧坏触头。

下面列举最常用的接触器常见故障及其消除方法，列于表4-4。

表4-4 接触器的故障及其消除方法

故障类别	故障现象	产生故障的原因	检修方法
空载试运行中的故障	接触器不吸合	1.线圈供电电路断路 2.线圈断路 3.按钮的接头失效	按可能的原因，依次检查判断并消除故障
	接触器不完全吸合	1.按钮的触头不清洁或氧化 2.接触器的可动部分被卡住 3.电源电压低于额定值的85% 4.线圈电压接错 5.接触器触头弹簧反力过大或行程过大	
	接触器吸合过猛或线圈过热、冒烟	线圈电压接错，例如220V线圈接于380V电源	
	接触器不跳开	1.可动部分被卡住 2.反力弹簧反力太小 3.控制回路接线错误 4.电磁铁极面被粘住	
铁心的故障	铁心噪声过大	1.线圈的电压不足 2.铁心极面接触不良（有污垢，压紧螺钉松开或弹簧压力过大） 3.铁心极面下的短路环断裂	1.调整电源电压 2.接触间隙小于0.05 mm 3.更换短路环
	无压释放失灵	1.非磁性垫片装错或未装 2.压力弹簧反力太小 3.山形铁心因过度磨损而使中间极面的气隙过小	

www.cwore.cn

（续）

故障类别	故障现象	产生故障的原因	检修方法
线圈的故障	不吸合或自然打开	1.线圈内部断线 2.线圈的引出线部分断开	1.更换线圈 2.焊接并绝缘
	线圈局部过热或因吸力降低而使铁心发生噪声	线圈匝间短路	1.测量线圈电阻，与线圈铭牌上的电阻比较 2.更换新线圈或重绕

§4-3 异步电动机的拖动控制线路

一、电动机的起动

异步电动机在起动瞬间，由于转子还处在静止状态，这时旋转磁场以同步转速切割转子导体，磁场切割转子的速度很大，因而在转子导体内产生很大的感应电动势和电流。与此相应，定子绕组内的起动电流也很大，约为额定电流的4～7倍。转子转动后，旋转磁场切割转子的相对速度减小，因而电流也下降。这种大起动电流维持的时间并不长，约为几分之一秒到数秒，所以对电动机本身影响并不大。但是过大的起动电流会引起供电线路上电压的降低，以致影响接在同一电网的其他用电设备正常工作。因此，必须设法减小起动电流。

（一）三相笼型异步电动机的起动方法

这种电动机的起动方法有两种，即直接起动和减压起动。

1. 直接起动

三相笼型异步电动机能否进行直接起动，一般除考虑到电动机本身的容量外，还取决于供电电网的容量。按规定，如果电动机需要经常起动和制动，或变压器同时接有照明负载，允许直接起动的电动机容量（kW）≤电源变压器容量（kVA）×7%。或由经验公式来判断电网容量能否允许直接起动，即

$$\frac{I_{ST}}{I_N} \leqslant \frac{3}{4} + \frac{\text{电源变压器容量(kVA)}}{4 \times \text{电动机容量(kW)}}$$

式中 I_{ST}——电动机全压起动电流（A）；

I_N——电动机额定电流（A）。

如果变压器是一个单位专用，允许直接起动的电动机容量可达到变压器容量的30%；如果变压器为某一台电动机专用（如水泵站的变压器）这时允许直接起动的电动机容量可达变压器容量的70%。

直接起动的优点是简单、方便、起动时间短。

2. 减压起动

这种方法是利用起动设备，降低加在定子绕组上的电压，来限制起动电流。这种方法的缺点是在减少起动电流的同时起动转矩也减少了。因此，这种方法仅适用于笼型异步电动机在空载或轻载情况下起动。减压的方法有下列几种。

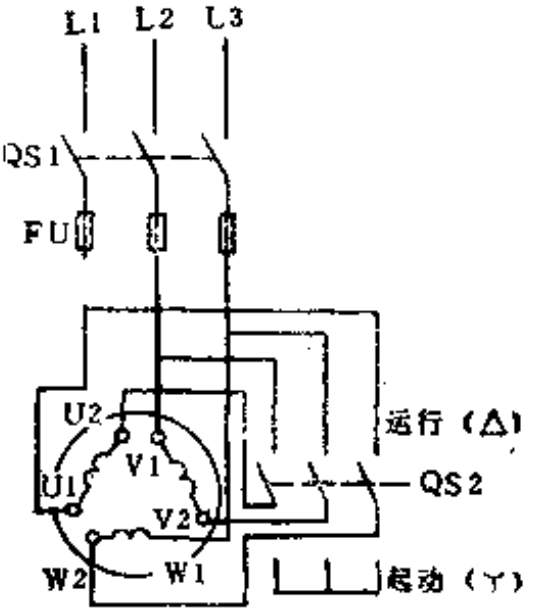


图4-10 Y-△起动接线图

WWW.PLCWORLD.CN

（1）Y-△起动：这种方法只适用于定子绕组在正常工作时作△联接的电动机，它是在起动时先把电动机定子绕组接成Y形，待电动机起动后，再把定子绕组改接成△形，其线路如图4-10所示。

起动时，三相定子绕组因接成Y形，各相绕组承受的电压仅是电源线电压的$1/\sqrt{3}$，这样便减小了起动电流，只有直接起动时的1/3，即$I_{s,Y}=\frac{1}{3}I_{s,\triangle}$。

当转速稳定后，把定子绕组改接为△接法，各相绕组承受的电压便是电源线电压，使电动机在额定电压下工作。由于起动转矩和电动机的电压的平方成正比，所以使起动转矩降低，只有直接起动的1/3。因此这种方法仅适用于轻载或空载起动。常用的Y/△起动器型号为手动QS5型。

这种起动方法的特点是起动设备比较简单，可用Y/△角起动器来实现。现在国家规定4～100kW的电动机，采用380/660V的额定电压，故使Y-△起动方法应用越来越广泛。

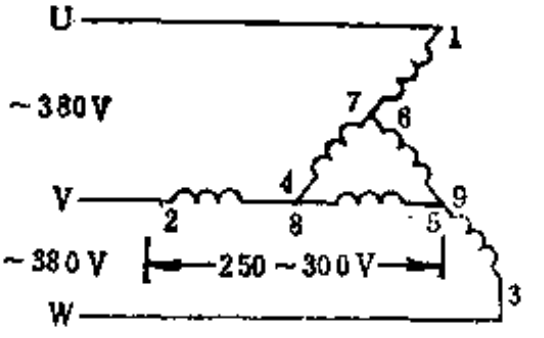


图4-11　延边三角形起动示意图

（2）延边三角形减压起动：这是一个新型的起动方法，电动机定子绕组有九个接线头（每一相绕组有一个中间抽头），起动时将定子绕组一部分接成Y形，另一部分接成△形。从图形上看就好象把一个三角形的三条边延长，所以叫做延边三角形，如图4-11所示。起动完毕后，再将定子绕组接成三角形运行。

当把定子绕组接成延边三角形时，每相绕组所承受的电

压就要比接成三角形时低一些，起动电流也就随着减小。起动时绕组相电压的大小决定于定子绕组抽头的比例。采用不同比例的抽头，可使每相绕组所承受的起动电压低于380V而高于220V（一般在250～300V之间）。这种方法比接成星形起动时绕组相电压要高，因此起动转矩比接成星形起动时大。在不同比例的抽头下，起动电流可降低到三角形联接起动时的1/2～2/3左右。这种起动方法对电动机有特殊要求，即定子绕组有若干个抽头。延边三角形减压起动器型号为XJ1系列，可起动电动机功率从11～132kW。

（3）起动补偿器起动：即用自耦变压器作减压起动。这是一种常用的起动方法，如图4-12所示。

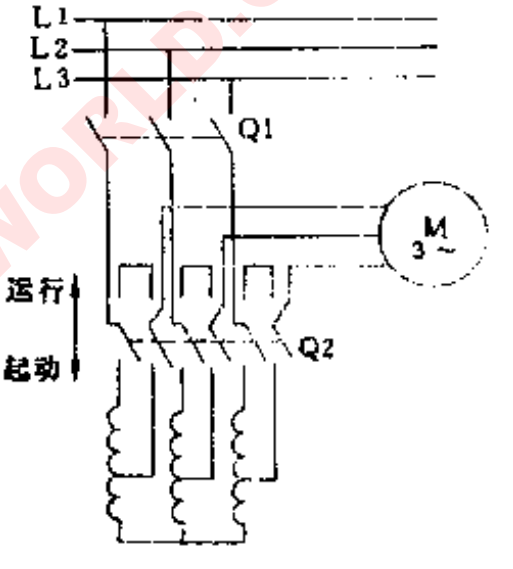


图4-12　自耦减压起动的接线图

起动时，先合上Q1，再把Q2置于起动位置，使电动机的定子绕组接到自耦变压器的二次侧，降低了电压，从而减小了起动电流。当电动机转速接近额定转速时，把Q2接到“运行”位置，切除自耦变压器，使电动机在额定电压下工作。自耦变压器的二次侧常有两个抽头，可以得到不同的输出电压（一般为电源电压的80%和65%），根据对起动转矩的要求选用。

这种起动方法的特点是起动电流小。假设自耦变压器的变压比为$K_a=U_1/U_2$，则减压起动时电动机的电压$U_2=U_1/K_a$，这样，电动机的线电流（起动电流）减小到直接起动时

WWW.PLCWORLD.CN

的 $1/K_a$，故网路上（即变压器一次侧）的起动电流减小到直接起动时的 $1/K_a \times 1/K_a = 1/K_a^2$。

例如 $1/K_a = 65\%$，则起动电流可减小到直接起动时的 $1/K_a^2 = (65\%)^2 = 42.25\%$。与其他起动方法相比，在得到同样起动转矩的情况下，自耦补偿起动时线路上的起动电流较小。这就是所谓补偿。自耦减压起动器有手动的QJ10型和自动的XJ01型两种。适用于功率在75kW以下的三相笼型异步电动机作不频繁减压起动为自耦减压起动器，而GTZ-5302-53B2型可起动最大225kW三相笼型电动机。

为了改善三相笼型电动机的起动特性，功率较大的三相笼型电动机常做成特殊形式，即双笼型或深槽式。这两种电动机的定子与普通笼型电动机的定子一样，仅在于它们的转子结构不同。

（4）晶闸管三相交流调压起动：智能化节电型无触点电动机起动器是电动机起动器的理想换代产品，可以取代各种Y/△起动器及减压起动器，特别适用于起动频繁、负载变化大或长期运行于轻载状态的三相异步电动机的配套使用，完成软起动、电动机保护及节电功能。MS系列10～200kW智能化节能型无触点起动器采用晶闸管作为主回路，而且具有全方位的保护作用，可以广泛应用于风机、水泵、油田抽油机、拔丝机、空压机、剪板机、冲床、车床、起重机、空气锤、粉碎机、龙门刨床、传送带等设备。

（二）绕线转子异步电动机的起动

1．转子串变阻器起动法

这种电机是在转子电路中串联电阻来改善起动性能的。其原理接线图如4-13所示。

起动时，转子绕组电路的电阻调整到最大值，随着电动机转速的不断上升，逐渐减少起动变阻器的电阻，到起动完毕时，起动变阻器全部电阻从电路中被切除，转子上的三个滑环被短接，此时，电动机的工作与笼型电动机并无差别。采用这种起动方法的优点如下。

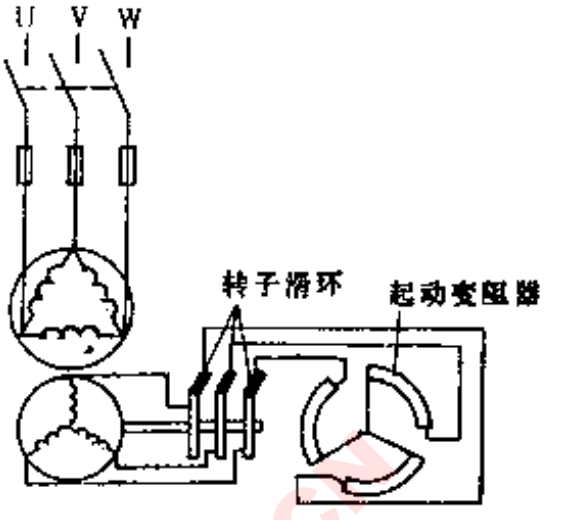


图4-13 绕线转子异步电动机起动的接线图

（1）起动电流小：因为起动时转子电路中串入了电阻，使转子导体中的电流减小，因而定子中电流也随之减小。

（2）起动转矩大，感应电动机的电磁转矩为

$$T = C\Phi I_2 \cos\varphi_2$$

起动时，由于转子电路中串入了电阻，转子电流I_2减少了，但$\cos\varphi_2$却增大了，而且$\cos\varphi_2$增大的程度比I_2减少的程度为大，故总的来说起动转矩增加了。因此绕线转子异步电动机的起动性能好，且允许在重载下起动，故适用于起动频繁、要求起动时间短和要求起动转矩大的生产机械，如吊车等提升设备。

$$\text{起动能力} = \frac{T_{ST}}{T_N} = 2.6 \sim 3.1$$

但是这种起动方式所需要设备多、结构复杂、运行中的维护工作量也较大。

2. 转子回路串频敏变阻器起动法

绕线转子异步电动机还采用转子电路串接频敏变阻器的方法起动。这是一种新型电器，其起动特性好，控制系统设备少，结构简单，运行可靠等优点。目前国内正推广应用。频敏电阻器实际上是一个特殊的三相铁心电抗器，它有一个三柱式铁心，每个柱上有一个绕组。三相绕组一般接成星形。

频敏变阻器的铁心是由厚钢板焊成的，绕组接到交流电源时，交变磁通会在铁心中产生很大的铁损，特别是涡流损耗很大。钢板愈厚，交流磁通频率愈高，磁通愈大，则涡流损耗愈大。

将频敏变阻器用一个等效电路去代替接在绕线转子电路里，如图4-14所示。R是频敏电阻器的绕组电阻，R_P是代表铁心损耗的等效电阻，X_P是代表铁心励磁的等效电抗。在起动过程中，随着转子电流频率的改变，频敏变阻器的等效电阻和等效电抗也自动的改变。起动时，转子电流频率f_2最大，R_P和X_P最大，电动机可以得到较大的起动转矩；起动后，转子电流频率逐渐降低，R_P和X_P都自动减小，所以电动机可以近似地得到恒转矩起动特性，实现了电动机的无级起动。起动完毕后，频敏变阻器便短路切除。

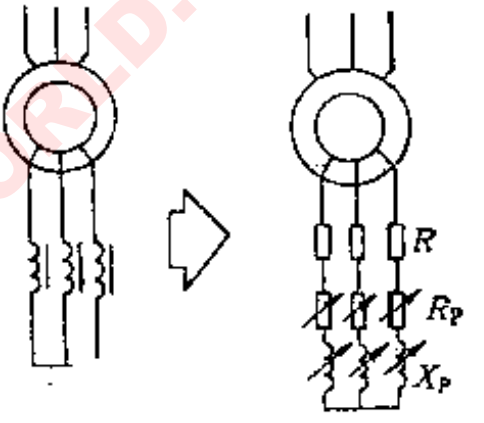


图4-14　绕线转子接入频敏电阻器

频敏变阻器的功率因数较低，起动转矩只能达到最大转矩的50%～60%，有适用于轻载起动、重轻载起动和重载起动的不同型号。GTT6121型控制柜是采用频敏电阻器作为绕

线转子电动机的成套控制设备，可起动20～280kW 的 电 动机。

二、电动机的调速、反转和制动

（一）调速

电动机的调速就是通过改变它的机械特性，使在同一负载下获得不同的转速，以满足生产过程的要求。例如起重机在提放重物时，为了安全需要随时调整转速。电动机在不同负载下具有不同的转速，这种情况称为电动机的转速变化。调速和变速的涵义是不同的，不要混淆。

电动机的转速 n_2 与同步转速 n_1 之间的关系为

$$n_2=(1-s)n_1=(1-s)\frac{60f_1}{p}$$

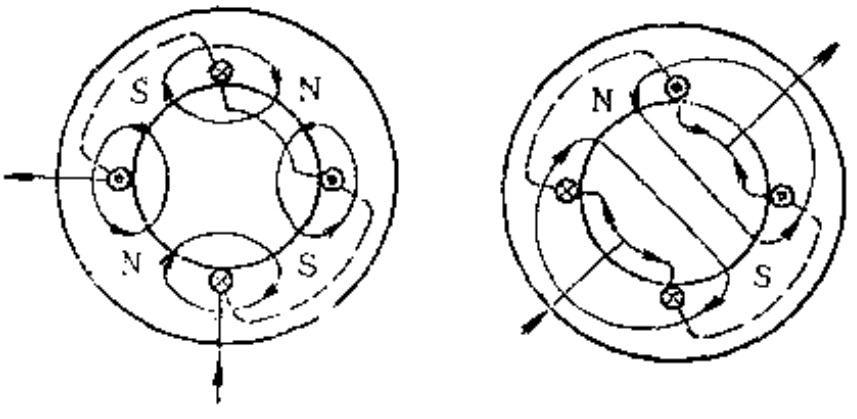
改变电动机的转速有三种方法，即改变电源频率 f_1，磁极对数 p 及转差率 s。

变频调速必须配备复杂的变频设备，目前应用较少。

1．改变磁极对数调速

只有专门制造的笼型多速电动机才能达到。普通的电动机不能这样调速。通过改变定子绕组的联接方式，从而改变电动机的极对数，如图4-15所示。将每相定子绕组中两组线圈串联，就产生四极磁场（$p=2$）；若改成并联就成为两极磁场（$p=1$）。这样，电动机就有两个速度，即3000 r/min（$p=1$）和1500 r/min（$p=2$）。由于定子绕组的磁极对数只能成对地改变，所以转速也只能按级来调节，不能均匀调速。

绕组的磁极对数可以改变的电动机称为多速电动机。最常见的是双速电动机。另一种是定子槽内安装两套独立的绕组；每一绕组又分成两部分，可以并联（双星形）和串联



a)　　b)

图4-15　定子绕组改接成不同极对数的线路图
（只绘出其中一相）
a）串联时　b）并联时

（三角形），这样可以得到4个不同的转速，例如1500、1000、750和500 r/min，这叫做四速电动机。

由于上述调速方法比较经济、简便，故常用在金属切削机床上或其他生产机械上，来代替笨重的变速箱。

2．改变转差率调速

仅适用于绕线转子电动机，在转子电路中，接入一个调速变阻器，便可用它来调速。起动电阻按短时间运行而设计的，如果长期通过电流，则会因过热而损坏，不可用来调速。

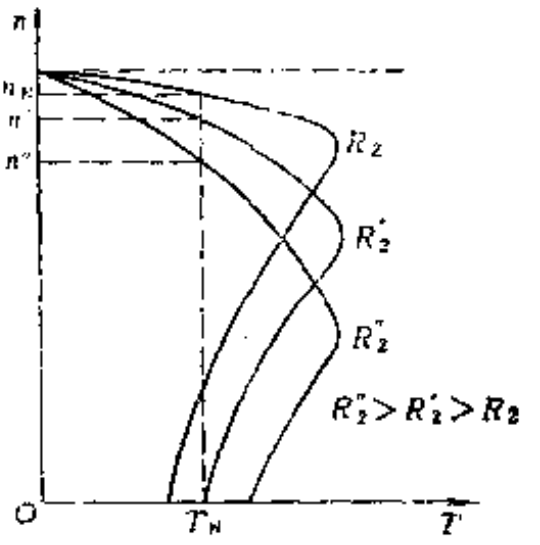


图4-16　转子串联电阻调节电动机的转速

图4-16表示转子电路中串联不同电阻，机械特性曲线也就不同。当负载

转矩一定，增加转子电路的电阻，则对应的转速下降，应用这种调速方法，可使电动机转速从0变化到额定转速n_1。这种调速方法很简单，而且调速平滑，广泛应用于起重设备及绞车等的拖动中。不过增大调速电阻时要消耗大量的电能，不太经济。

从以上三种调速方法可以看出，异步电动机的调速方法是不理想的，所以异步电动机常用于对调速性能要求不高的场合。

异步电动机的转子方向是与旋转磁场一致的，只要把接到定子的三相电源线任意对调两个，旋转磁场的方向就会改变，因而电动机的旋转方向也随着改变，实现了反转。

（二）制动

由于电动机转动部分有转动惯量，所以当电动机脱开电源后，将继续转动相当长的时间才停止下来。为了缩短辅助工时提高生产效率和工作安全，使能迅速停车或反转，为此，需要对电动机进行制动，强迫它立即停车。在制动情况下，使电动机产生与转子旋转方向相反的转矩。

1．能耗制动

能耗制动电路及其原理如图4-17所示。在停车时，拉开S使电动机脱离三相电源，接着接通直流电源，于是在电动机中便产生一个固定的直流磁场，如图4-18所示。此时转子由于机械惯性继续旋转，因而转子导线切割磁力线，产生感应电动势和电流，电流方向由

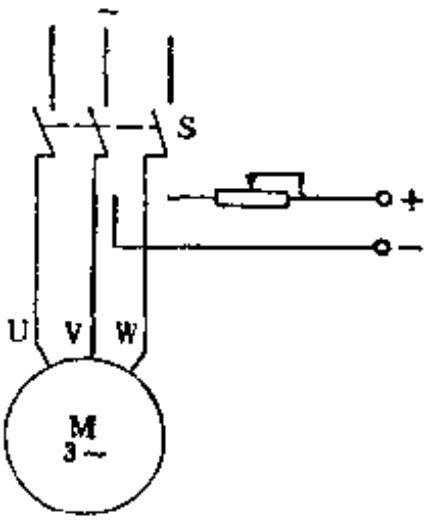


图4-17　能耗制动的线路图

右手定则决定。载有电流的导体在恒定磁场的作用下，受到制动力 F_2，方向由左手定则决定，产生制动转矩 T_2，使转子迅速停止。制动转矩的大小与直流电流大小有关。通入定子绕组中的直流电源必须由降压变压器经整流后供给，若不降压会产生很大电流，就会烧坏定子绕组。一般制动电流为电机空载电流的 3～5 倍。

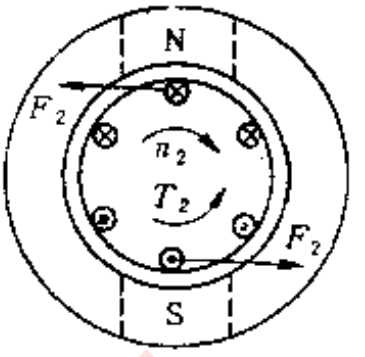


图4-18　能耗制动

这种方法是用消耗转子的动能转换成电能，而后又变成热能，消耗在转子电路中以进行制动，所以称为能耗制动。

这种制动的特点是：制动准确、平稳、能量损耗小，但需要直流电源。

2. 反接制动　($s>1$)

制动方法如图4-19所示。在电动机停车时，利用改变定子电源相序的方法，使旋转磁场反向旋转，而转子仍在原方向转动，这时产生的电磁转矩方向和电动机的转动方向相反，因而起制动作用。当转速接近于零时，利用反接制动继电器及时切断电源，以防止电动机反向旋转。

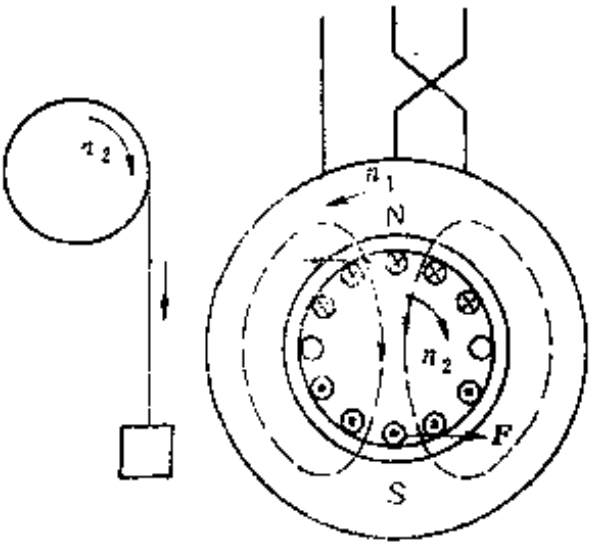


图4-19　异步电动机的反接制动

由于反接制动时旋转磁场与转子的相对转速 (n_1+n_2) 很大，因而电流较大。为了限制电流，对功率较

大的电动机进行制动时，必须在定子电路中接入限流电阻。

这种制动比较简单，效果较好，但能量消耗较大，冲击强烈。例如在起重机卸下重物时往往应用反接制动，来限制重物下降的速度。

3. 再生制动 （$s<0$）

由于重物本身下坠，使转子速度增加，以致超过旋转磁场转速，此时转子将以 n_1-n_2 的转速切割磁力线，转子中感应电动势和电流的方向用右手定则决定，它产生的电磁转矩方向与转子旋转方向相反，因而起到了制动作用。这时电动机工作在发电机状态，这种制动又叫做发电制动。

4. 电磁抱闸制动（机械制动）

机械制动是将电动机切断电源后，利用制动抱闸紧紧抱住电机轴上的制动轮，使电动机迅速停转的方法。机械制动的结构有好几种，使用较普遍的是电磁抱闸。在电动机运转时，电磁抱闸同时被通电吸合，使抱闸松开。当电动机切断电源时，电磁铁同时断电，实现抱闸制动。它可以单独使用，也可以与能耗制动一起使用，以弥补能耗制动的制动转矩的不足。起重机械必须装设电磁抱闸制动器，以确保安全生产。图4-20是制动电

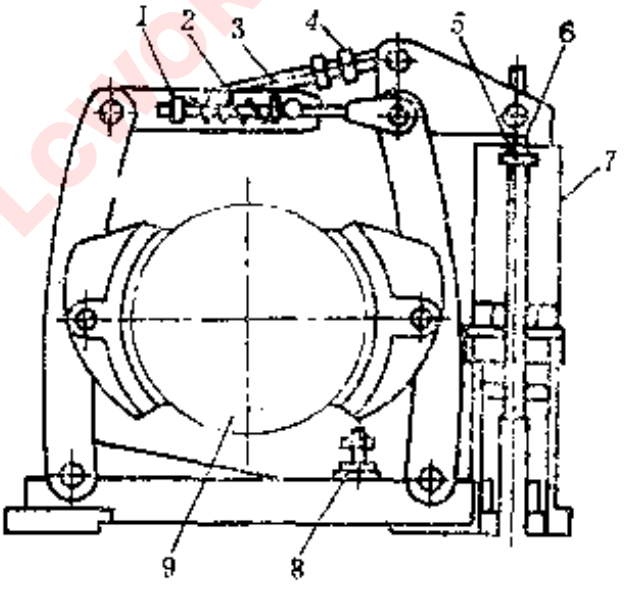


图4-20 电磁制动器结构示意图

1—紧闭螺母 2—主弹簧 3、6—螺杆 4、5—螺母 7—电磁铁 8—螺栓 9—制动轮

WWW.PLCWORLD.CN

磁铁结构示意图。

近来出现了一些新型的电气制动方法，如两级电容制动、感容制动及傍磁制动电动机等。国产YEP傍磁制动电动机主要用于起重设备，作为卷扬机和桥式起重机之用；亦适用于要求快速准确停车的机械中，作为主传动和辅助传动之用。如电动阀门、橡胶化工机械、木工机械以及各种类型机床的进给系统。

三、异步电动机的基本控制线路

（一）控制线路的图示法

控制线路图中全部线路可以分成两部分：主回路和二次回路。主回路是强电流的电路，二次回路包括控制电路、保护电路、信号电路及其他特殊电路。为了便于阅读起见，通常把主回路和二次回路分开来画，主回路用粗线条描画，二次回路用细线条描画。

线路图按不同的用途可以分为两种：即原理图和安装接线图。

1．原理图（展开图）

图4-21中绘出的是笼型异步电动机的控制原理图。它反映了控制电路的工作过程。

绘制原理图的主要原则：

（1）各个元件及其部件在线路中的位置，是根据便于阅读安排的，同一个元件的各部件可以不画在一起，而把它们分别画在工作位置。

（2）二次回路中电源线垂直画于两旁，各分支电路基本上按控制的动作顺序由上到下、由左至右平行或垂直绘制。

（3）全部图形必须按规定画出，所有电器触头都是按

WWW.PLCWORLD.CN

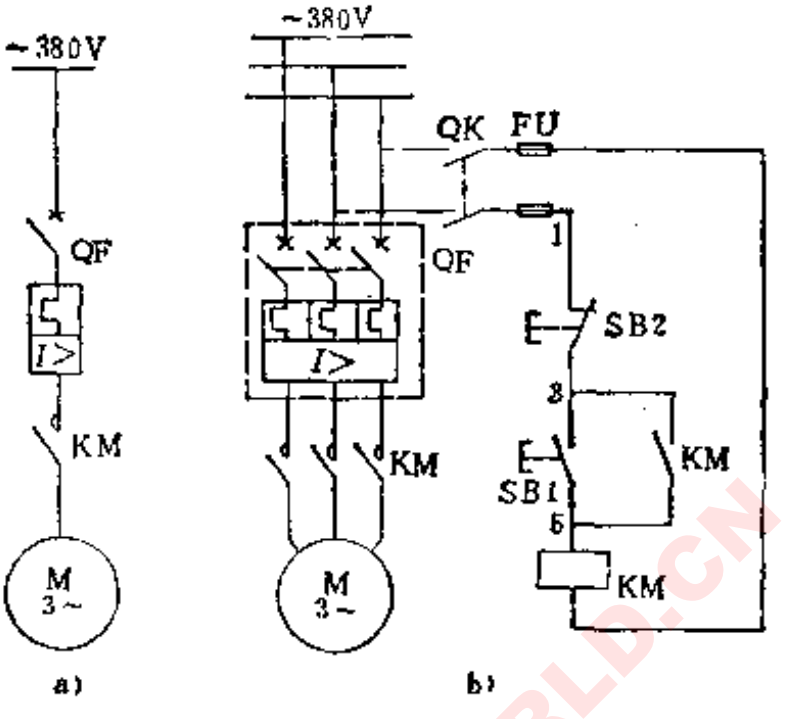


图4-21　笼型电动机的控制原理图

a）主回路的单线图　b）主回路和控制电路图

各种电器的线圈在没有通电时触头所处的状态画出的。

（4）电路中的各个元件，分别用统一的符号及文字表示。同一元件上的各个部件，如：线圈、触头等均用同一的字母及数字编号表示。看图先看线圈，线圈接通时，触头才动作。

（5）在原理图中，两根以上的导线相交处要画一个黑圆点，表示有电的联系。导线相交处无黑点者，表示它们没有电的联系。

（6）为了安装和检修方便，电机及电器的接线端均要标一个编号。编号的原则是：主回路中的电气接头一般用一个字母，二次回路中的电气接点用数字编号。

2. 安装接线图

图4-22是图4-21 b 的安装图。图4-22 a 是板前电器布置

WWW.PLCWORLD.CN

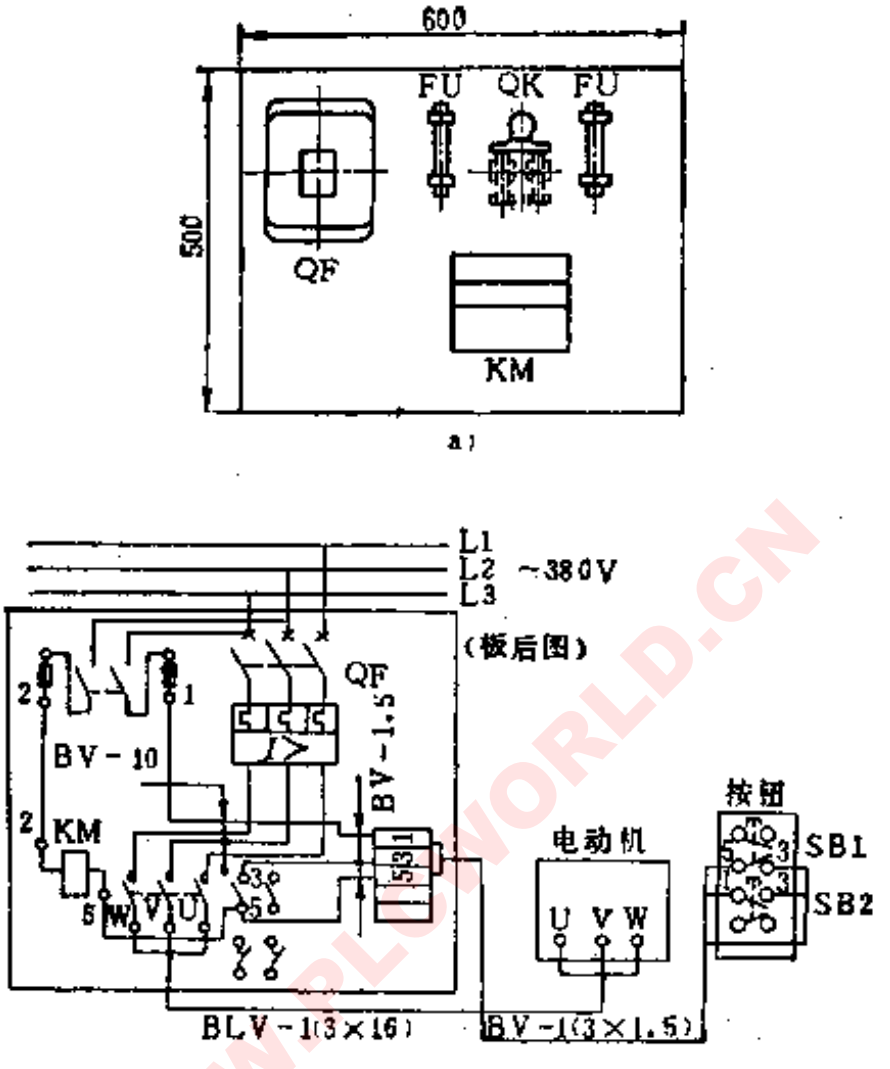


图4-22　接线图

a）电器布置图（正面图）　b）安装接线图（板后图）

图，图4-22 b 是板后安装接线图。图上电机、电器和其他元件都是按照它们的实际空间布置情况绘制的。在安装接线图中，还标明了导线的截面与敷设方法。图中所有图形、符号及编号必须与原理图中一一对应。要从安装接线图来了解线路的动作原理是困难的，但它便于指导安装和检修。

（二）电动机的基本控制电路

一台电动机最基本的控制就是起动与停车，也就是把电

WWW.PLCWORLD.CN

源接通与切断。最常见的是用磁力起动器来控制异步电动机。

控制线路的工作原理与动作过程如下所述。

1. 控制作用

起动：先合上刀开关QK，按下起动按钮SB1，控制电路接通，接触器的电磁线圈KM通电，由接触器控制的常开触头KM1闭合，将主回路接通，电动机M起动。与此同时，接触器的自保触头KM2也闭合，将SB1短接，控制电路自锁，松开起动按钮SB1后，还能保持电动机继续运行。

停车：按下停止按钮SB2，控制电路断电，接触器释放，主电路断电，电动机停车。由于自保持触头也已断开，所以当松开停止按钮SB2后，控制电路仍然断路，电动机不会再自行起动。

2. 保护作用

为了保持电动机安全、可靠地运行，必须采用一些保护措施，以便一旦出现故障能立即自动切断电源，起到保护电动机及供电线路安全的作用。最常用的保护措施有：短路保护、过载保护和失压保护三种。磁力起动器具有这三种保护措施。

（1）短路保护：当电动机因某种原因发生短路时立刻使电动机脱离电源，以防止短路电流烧毁设备及供电线路。最常用的短路保护设备是熔断器（FU）。

（2）过载保护：当电动机长期过载时，过载电流会使电机过分发热而缩短其使用寿命，甚至烧坏电机。过载保护是指当电动机过载到一定程度后便切断电路，使电动机脱离电源，以防烧坏电机。最常用的过载保护是热继电器（FR）。当热继电器的发热元件FR过分发热时，受它控制的热继电

器常闭触头断开，切断控制电路，接触器释放，电动机停车。

（3）失压保护：当电源停电或电压过低时，接触器的电磁铁因吸力消失或不足，衔铁被弹簧拉开，接触器的常开触头KM切断了主回路，电动机停车。同时自保触头也被断开，当电源恢复时，也不会自行起动。

四、电动机的保护线路

在自动控制系统中，电气设备的保护作用是十分重要的，因此，线路中必须有实现各种保护作用的元件和联锁装置，以保证其工作安全可靠。下面介绍最常用的保护线路，主要是用于保护电动机的。

（一）短路电流的保护

短路保护的目的，就是要在电路发生短路的情况下极其迅速地切断电路，使短路部分（电动机或一般电路）脱离电源，以防止短路电流烧毁设备及供电线路。

下面介绍各种短路保护线路。

1．熔断器保护

用熔断器作异步电动机主回路及控制回路短路保护的线路见图4-23。图中控制电路的短路保护是利用主电路的熔断器。熔断器有管式、插入式、螺旋式等几种形式，它们的用途见表4-2。

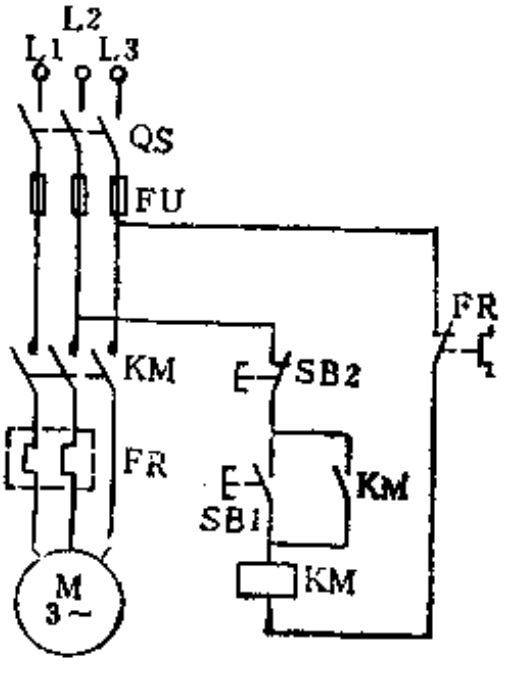


图4-23 磁力起动器控制原理图

这类熔断器用低熔点材料（如：铅锡合金、铅等）作熔体，分断能力不高，一般只适用于容量较小的笼型电动机与直流电动机中。在机床电路中也常用熔断器作线路保护。

2. 低压断路器保护

用低压断路器作短路保护的线路见图4-24。图中低压断路器 QF 的电磁脱扣线圈在过电流时吸引，使低压断路器自动跳闸。

在接触器 KM线圈的自保回路中引入 QF 的辅助触点，保证必须在 QF 先合闸以后，KM 才能自保。

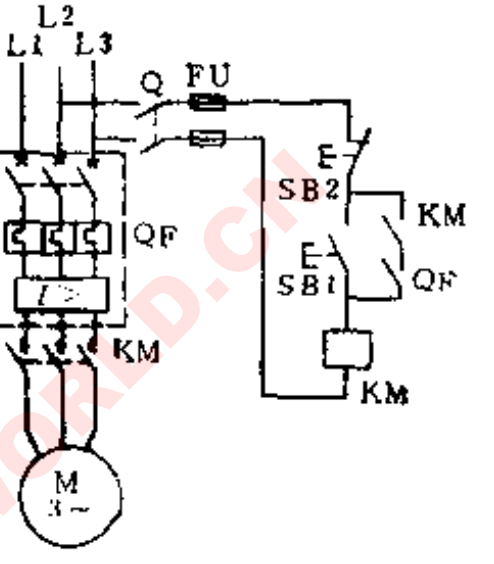


图4-24 用低压断路器保护和控制异步电动机

低压断路器克服了熔断器的缺点，因此广泛应用在要求较高的各种交、直流电动机及其配电线路与控制线路中，用以代替熔断器与刀开关。低压断路器可用于40～100kW电动机的全压起动和过载与短路保护。

3. 过电流继电器保护

过电流一般较短路电流要小。过电流继电器作过流保护，它的保护作用要通过执行元件接触器来完成，亦可兼作短路保护。

电流继电器的基本结构有两种：电磁式和感应式（见第五章）。

由于笼型电动机直接起动的电流很大，如果要使保护元件在起动时不会发生误动作，瞬时动作的过电流保护元件的

整定值必须大于电动机的起动电流，这样，在一般过电流的情况下，它就无法起保护作用，所以过电流保护常用于限流起动的直流电动机与绕线转子异步电动机中。用作保护的过电流继电器的动作值，按120%的起动电流（或反转过程中最大电流）来整定。对于频繁起动的线路，过电流继电器的额定值应大于电动机的额定电流。

（二）过热保护

电动机的过热保护是用热继电器和过电流继电器来完成的。保护电动机绕组，使之不超过允许温升。

1．热继电器保护

通常是用热继电器来作为电动机的过热保护。双金属片热继电器，是利用电流的热效应而动作的。

用热继电器作过热保护的线路见图4-23。

常用的热继电器有JR20-10型和JRO、JR16系列。JR20-10型具有两个热元件的热继电器，适用于电动机为丫接法的电路中，因为丫联接的电动机，当没有热元件的一线电流超过额定值时，其余两根线的电流也至少有一根超过额定值，所以有两个热元件就可以了；如果电动机是△联接，就应当采用具有三个热元件的热继电器，即JRO、JR16系列。

2．过电流继电器保护

瞬时动作过电流继电器的保护特性与小热惯性的熔断器（FU）一样，它不能反映电动机的发热情况。如果过热继电器要整定在起动电流通过时不动作，那它就无法作电动机较小过载时的过热保护了。

如果用时间继电器KT与瞬时动作的过电流继电器KC2配合起来使用，合在一起组成一个有固定延时的过电流继电

器，见图4-25。

电动机起动时，起动电流虽然使KC2吸引，但是KT由于有延时作用，其触头KT还要经过1.5～3 s才断开。如果电动机在负载过大情况下起动，起动时间超过了KT的延时，KT就会释放并切断电动机电源。由此可见，具有固定延时的过电流继电器可用以防止电动机起动时的"堵转"现象，以及运行时过长时间的冲击负载的影响。由于它的延时值与每小时起动次数无关，所以能用在频繁起动的系统，特别是在笼型电动机中。图中KC1、KC3继电器，是作短路保护用的，其动作值整定得要比起动电流大。

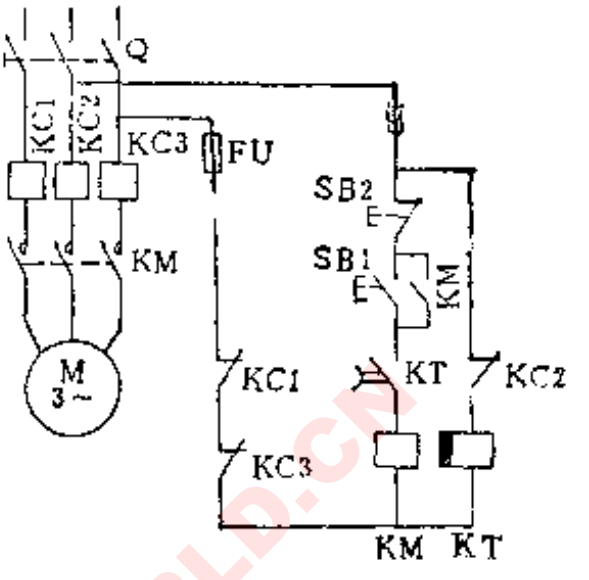


图4-25 用过电流继电器作电动机的起动"堵转"和短路保护

（三）失压及欠电压保护

在电动机正常工作时，如果因为电源停电而电动机停转，那么，电源电压恢复时，电动机就可能自行起动。电动机的"自起动"可能造成人身事故或机件事故。为了防止电压恢复时电动机"自起动"的保护叫失压或（零电压）保护。在电动机运转时，电源电压过分降低会引起电动机转速下降甚至停转，同时，当负载转矩一定时，电流就要增加，可能发生事故。因此需要在电压下降达到最小允许电压值时，将电动机电源切除，这就是欠电压保护。

WWW.PLCWORLD.CN

图4-23、4-24中的接触器KM兼有失压及欠电压的保护作用。

欠电压保护也可以用电压继电器来实现，它的结构和电流继电器差不多，但有两点区别：①电压继电器的线圈匝数多，导线细；②刻度盘上标出来的是动作电压，而不是动作电流。电压继电器有过压继电器和欠压继电器两种。过电压继电器有一对常开触点，当线圈两端电压超过动作值时，电磁转矩大于反作用弹簧力矩，可动舌片转动，常开触头闭合，过电压继电器动作。欠电压继电器具有一对常闭触点，当继电器线圈两端电压等于或大于额定电压时，可动舌片转动，继电器的触头断开。当电压下降到某一数值时，电磁转矩减小，反作用力矩大于电磁转矩，使可动舌片返回，继电器触头闭合，欠电压继电器动作。

电动机的欠电压保护动作以后，一般要经过一段时间（9～10 s），再使断路器跳闸，因为母线电压短时间的降低对电动机的工作影响不大。从电压继电器动作到断路器跳闸的这段时间，一般用时间继电器来控制。时间继电器的结构有电磁型时间继电器，由一电磁起动机构带动一钟表延时机构构成，图4-26是DS系列时间继电器机构。

继电器有零件2、3、4、5、7、14、15、16等构成的时间机构，它们经摩擦离合器6、齿轮5而与主机构联系起来。时间机构的功用，是使继电器转动系统的转速保持恒定。

当线圈1接上电压后，铁心23即被吸入线圈中，弹簧22被压紧，因而放松了附在铁心上的杠杆17。于是在弹簧8的作用下，扇形齿轮13开始顺时针方向转动。与此同时，传动齿轮12向反方向转动，并带动可动触头11，当可动触头转动

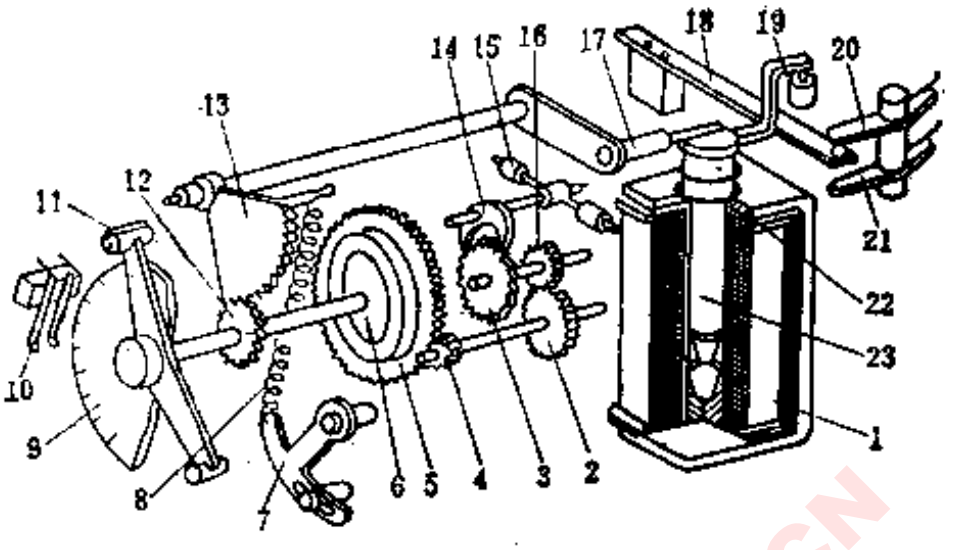


图4-26　时间继电器的机构图

到与固定触头10接通时，继电器动作。线圈中的电流消失以后，在返回弹簧22的作用下，通过杠杆17使可动部分很快恢复原位。改变固定触头10的位置，就可改变了动触头的行程，也就是调整了继电器的动作时间。时间继电器装有接点18、20和21，在个别情况下，它们也可保证继电器能够瞬时动作。

此外还有交流电动式时间继电器JS26系列、晶体管时间继电器JSJ系列和空气式时间继电器JS7-A（B）系列。

一般电动机的欠电压保护可由三个欠电压继电器、一个时间继电器和一个中间继电器组成。它的原理图如图4-27所示。三个电压继电器KV1、KV2和KV3接在母线电压互感器（TV）的二次侧（V/V联接），它们的触头互相串联，只有三相母线电压都降低到规定数值以下（例如三相短路）时，三个继电器同时闭合，才能使时间继电器KT动作。经过一定的时限，如果母线电压还未恢复，时间继电器触头KT闭合，中间继电器KA动作，使断路器QF跳闸。同时

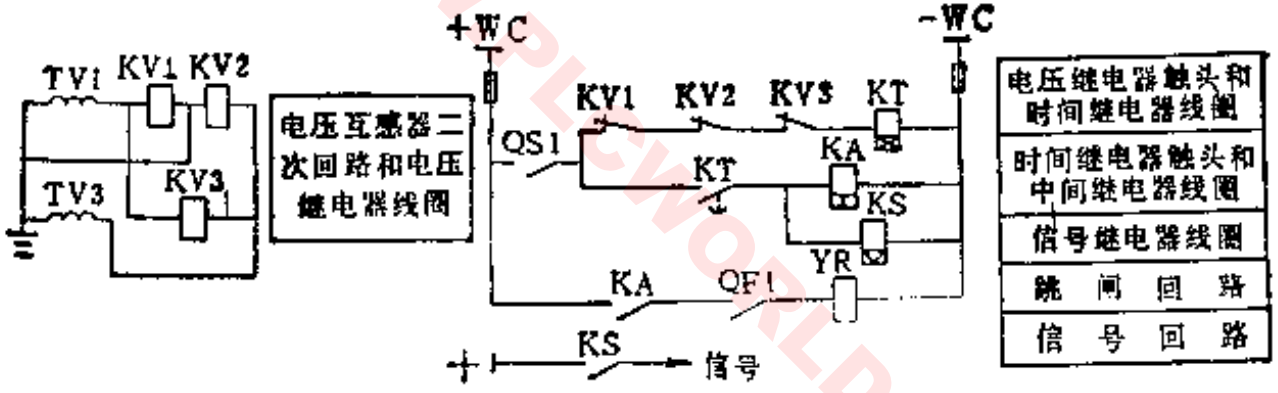


图4-27　低电压保护电路

TV—电压互感器

WWW.PLCWORLD.CN

还使信号继电器KS动作、发出信号。当电压互感器TV某一相熔丝熔断时，只有一相电压继电器动作，而不能起动时间继电器，这可以防止误动作。当更换电压互感器的熔体时，拉开隔离开关QS，它的辅助触点QS1也断开，因而切断了欠电压保护的直流电源，使保护不会发生误动作。

（四）联锁保护

在机床控制线路中，各台电动机、电器之间有时需要联锁，以确保设备和人身的安全。如铣床的主轴未旋转之前，工作台就不应该有进给；龙门刨床的横梁夹紧装置不松开，横梁就不允许上升或下降；可逆起动控制电路也需要联锁。

联锁保护一般都是通过各种继电器、接触器的常开、常闭、延时触头，在电路里的不同联接而组成的。

（五）限位保护

限位保护也叫做行程开关保护，通过行程限位开关，把机械动作限制在一定范围。

行程开关的种类很多，有通用式的，也有特殊用途（如防爆、化工等）的。其型号有LX3型、LX32型（如图4-28）及LX19、LXW2系列等。

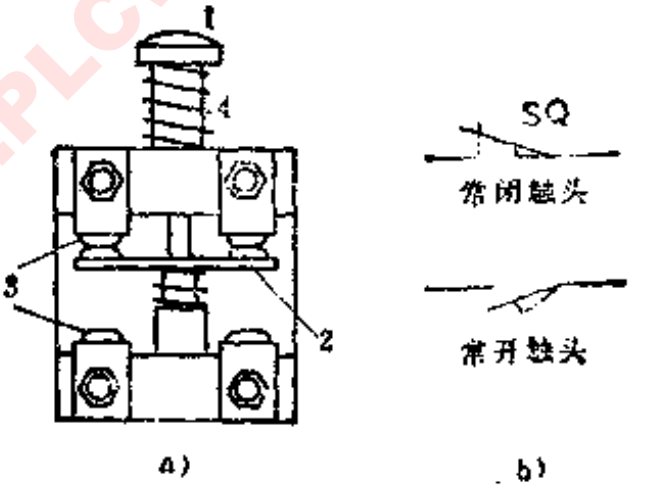


图4-28 LX32型行程开关

a) LX32-11K型行程开关

b) 行程开关的图形符号

1—推杆 2—动触头 3—静触头

4—恢复弹簧

LX19、LXW2系列行程开关触点能瞬时换接，故可用

于机械部件作低速运动的场所。LX19系列有单滚轮和双滚轮两种，其外形如图4-29所示。单滚轮能自动复位，双滚轮不能自动复位，必须由挡铁从反方向碰撞过来，才能使开关复位。

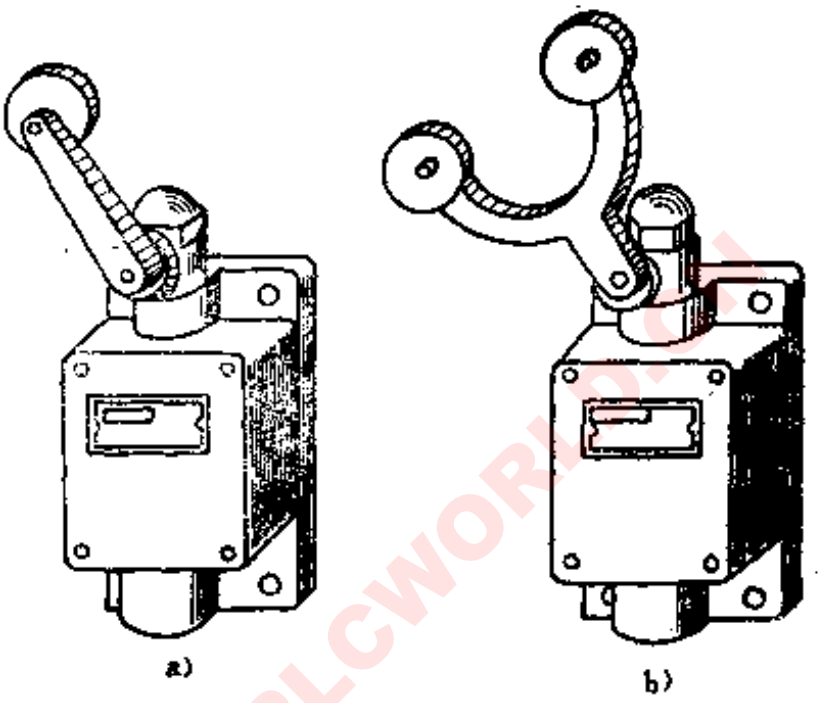


图4-29 LX19型行程开关

a) LX19-111型 b) LX19-222型

五、电动机的起动、制动及反转的控制线路

笼型电动机常用的减压起动控制线路和笼型电动机的制动及反转的控制线路，介绍如下。

（一）Y-△减压起动的控制线路

自动地把电动机从Y接法换接成△接法，以达到降低起动电流的目的。这种方法在机床上的主轴电动机普遍采用，如图4-30所示。

按下“起动”按钮SB1，接通时间继电器KT，它的延时断开的常开触头立即闭合，使接触器KM_Y接通，KM_Y的三

个触头闭合，使电动机定子绕组接成星形。KM_Y的一个辅助触头又使线路接触器KM接通，KM的主触头闭合，电动机便接上电源进行Y形减压起动，其辅助触头自锁。但KM的常闭触头断开，使时间继电器KT断电，经过整定的延时时间后（即起动降压的时间），它的延时断开的常开触头断开，使接触器KM_Y断电，KM_Y的常闭触头闭合，接通接触器KM_Δ，电动机定子绕组便由Y换接成△，进入正常运行状态，控制动作完毕。

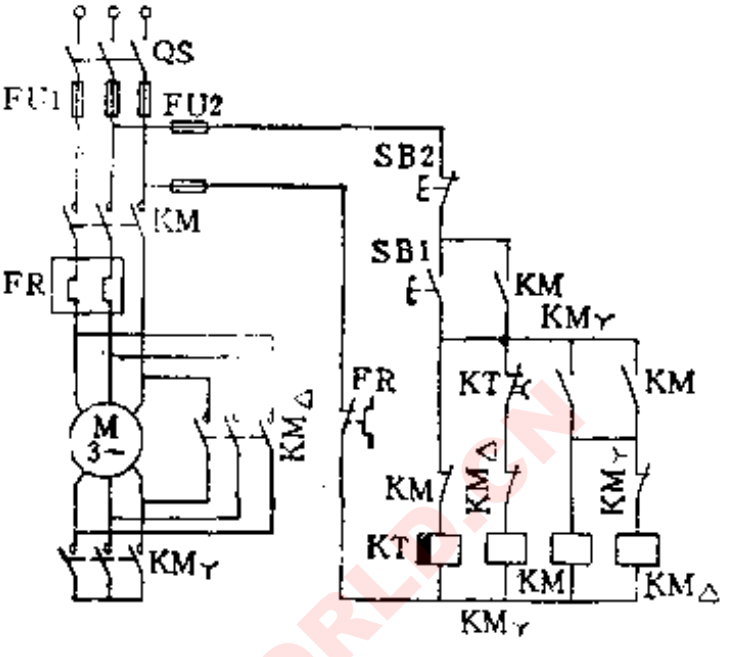


图4-30 笼型电动机Y-△起动电路

（二）自耦减压起动的控制线路

自耦减压起动补偿器是工矿企业中常用电器设备。大、中容量的笼型电动机普遍采用自耦减压起动。在供电变压器容量较小的情况下，这种起动方法显得更加必要了。这种起动方法的特点是起动电流小，又可带负载起动。现以XJ01系列起动14～20kW电动机为例，如图4-31所示。

按下“起动”按钮SB1，接通接触器KM1和时间继电器KT，电动机处于减压起动状态。

与此同时，KM1的辅助动合触头自保，辅助动断触头断开，防止KM2可能接通（起连锁保护作用）。时间继电器KT动合触头延时闭合，使中间继电器KA线圈接通并自

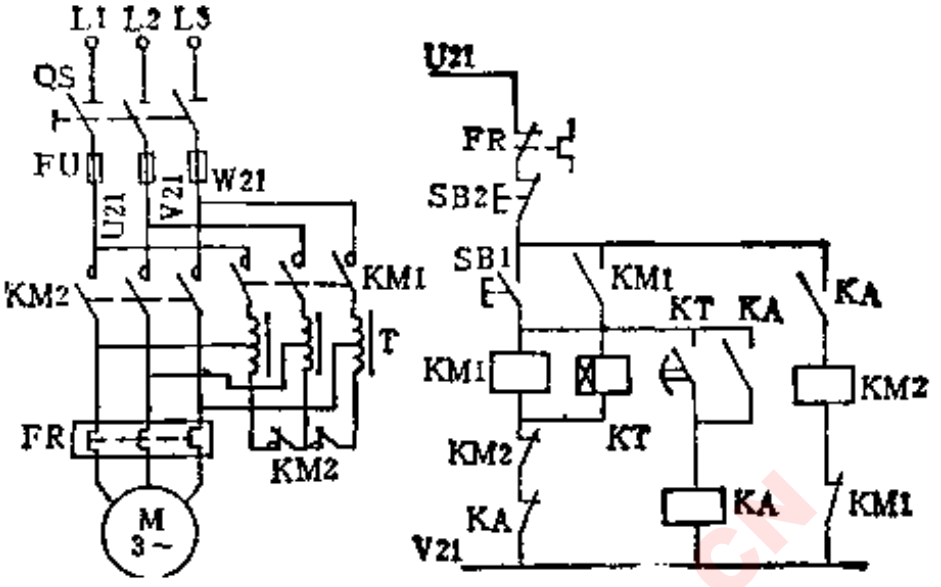


图4-31　自耦减压起动控制线路

锁，接触器KM1和时间继电器KT断电释放，于是KM1失电，自耦变压器T被切除；同时接触器KM2吸合，电动机处于运转状态。交流接触器KM1、KM2选用CJ-150/3型，中间继电器KA选用JZ-44型，时间继电器KT选用JS-23型。

（三）能耗制动的控制电路

图4-32中电动机是通过定子加直流电源进行能耗制动的。图中时间继电器KT用于制动完成时自动地切断直流电源。直流电源由VC单相桥式整流电路供给。

线路工作原理如下。

合上刀开关QS，按下起动按钮SB1，接触器KM1线圈有电，电动机转动。按下停止按钮SB2时，接触器KM1失电，与此同时，接触器KM2和时间继电器KT通电，给电动机两相定子绕组送入直流电源，进行能耗制动。经过一定时间后，KT的动断触头延时断开，切断KM2的通电回路，

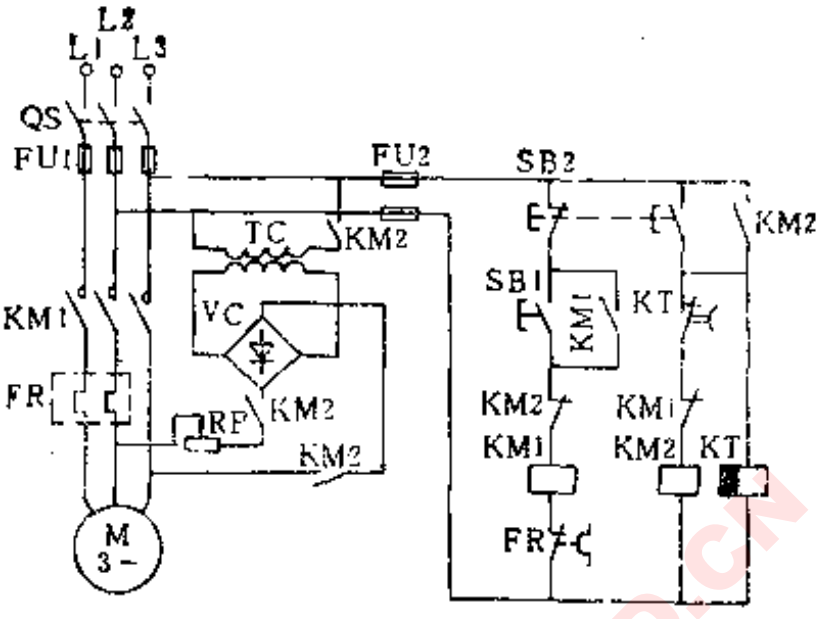


图4-32　能耗制动控制电路

KM2失电，并断开KT通电回路，切断直流电源，制动终止。

电阻RP作用是用来调节制动电流大小的。

（四）正反转的控制线路

很多生产机械的运动部件都需要正反向工作，其中大多数是由电机的正反转来实现的，图4-33所示的正反转控制线路，是生产上经常应用的典型线路。如1336M型六角车

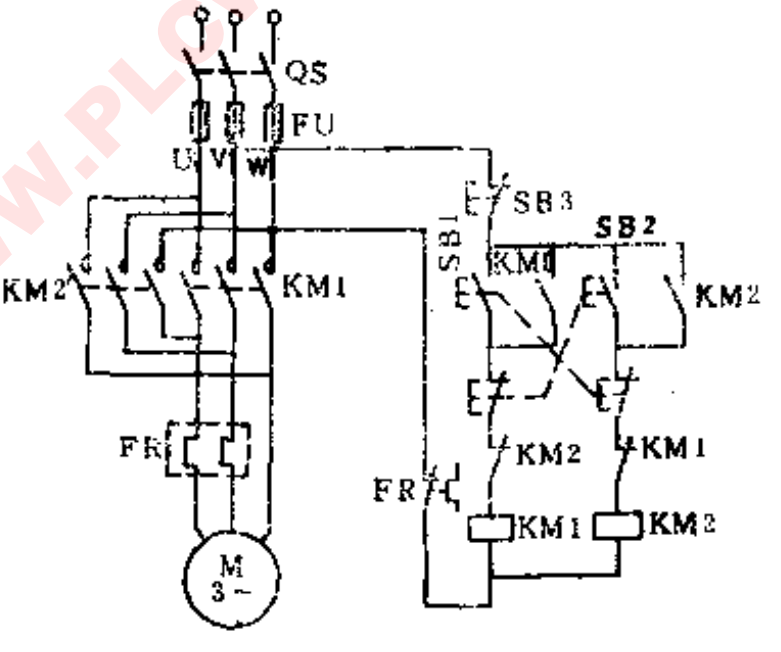


图4-33　双重联锁正反转的控制线路

WWW.PLCWORLD.CN

床主电机就采用这种线路。

要改变电动机的转向，只要任意对调三相电源的相序就可以实现。在实现控制电动机正反转的线路中，是用两个接触器 KM1（正转接触器）和KM2（反转接触器）来实现的。两个接触器因为在主电路中接线的相序不同，所以当两接触器交替动作时，电动机的转向就会相反。

必须指出，主触头 KM1和 KM2决不允许同时接通，否则将造成短路事故。为此，正转接触器 KM1的控制回路中，串联了反转接触器 KM2的一个常闭触头；在反转接触器KM2的控制回路中则串联正转接触器 KM1 的一个常闭触头，保证了两个接触器的线圈不能同时通电。这就是互锁保护，或叫做电气联锁保护。

这种电路的工作原理和动作过程与磁力起动器的控制线路基本上是一样的。

图4-33为既有接触器常闭触头联锁，又有按钮联锁的控制线路，使联锁保护更加可靠。

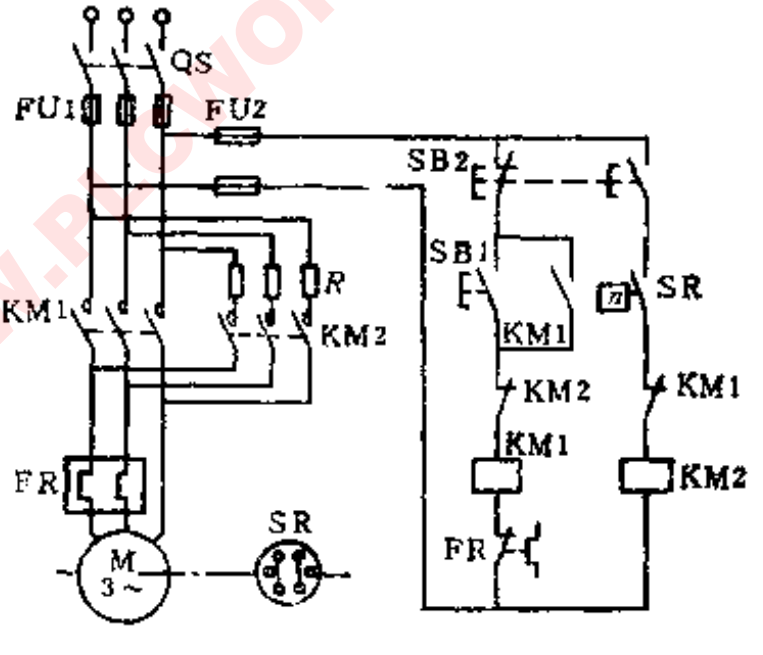


图4-34　异步电动机反接制动控制线路

（五）单向起动反接制动控制线路

图4-34是单方向起动的反接制动控制线路，由于反接制动时的电流比电动机直接起动时的起动电流还要大，所以在

主电路中串接电阻R，以限制反接制动电流。万能铣床的主电机就采用这种方法。

控制线路的工作情况如下。

按下起动按钮SB1，接触器KM1接通，电动机直接起动。电动机转速升高以后，反接制动速度继电器的常开触头SR闭合，为接触器KM2的接通准备好通路。停车时按下停止按钮SB2，SB2的常闭触头断开，常开触头闭合。这时接触器KM1释放，KM1的常闭辅助触头闭合，接触器KM2的线圈通过KM1的常闭辅助触头和SR的常开触头接通电源，KM2接通，将电动机的电源反接，进行反接制动。电动机转速迅速降低，当转速接近零时，反接制动速度继电器的常开触头SR断开，KM2释放，制动结束。

这个控制电路的缺点是在整个反接制动过程中，停止按钮不能放松，如过早放松停止按钮，KM2立刻释放，就不能充分发挥反接制动的作用。

反接制动速度继电器有JFZO-2型和JFZO-1型。

六、两台笼型电动机联锁的控制线路

在生产中有些生产机械要求各电路的接通要有一定的顺序，例如机床上的润滑油泵电动机，在未起动前，

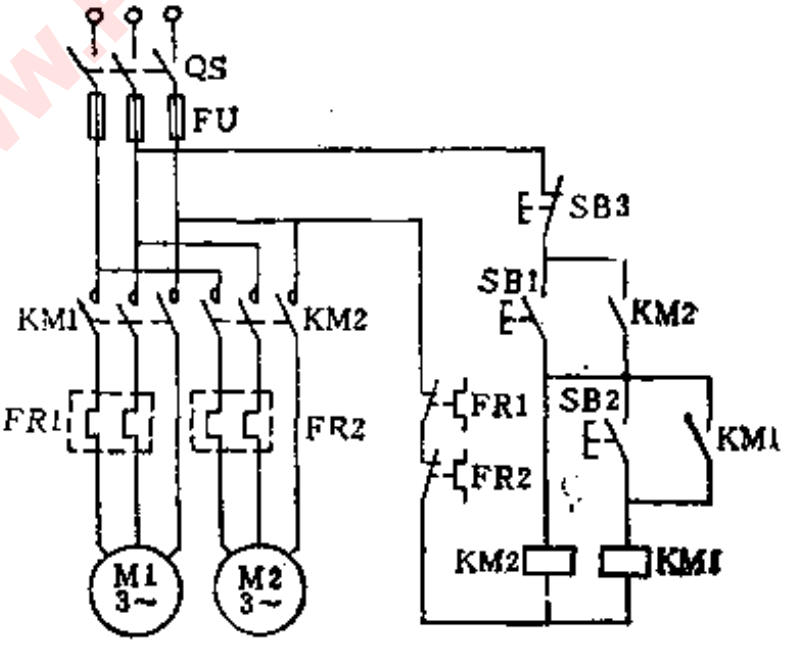


图4-35　电动机联锁的顺序控制电路

就不允许拖动主轴的电动机起动；在油泵电机停车时，主轴电机也必须立即停车。也就是说机床润滑系统在有足够的润滑油以后，方能起动主轴电动机。这种控制方式称为联锁控制。其控制线路的原理如图4-35所示。

图中M2为油泵电动机，M1为主轴电动机。当按下起动按钮SB1时，线圈KM2通电，主触头及自锁触头KM2 闭合，电动机M2起动，当M2起动后，M1才有可能起动。

如果在M2起动以前，误按下起动按钮SB2，M1 也不能起动，这就达到了油泵电动机先工作，主轴电动机后工作的目的。当油泵电动机过载时，热继电器的常闭 触 头 FR2 分断，线圈KM2断电，主触头及自锁触头 KM2 分断，控制电

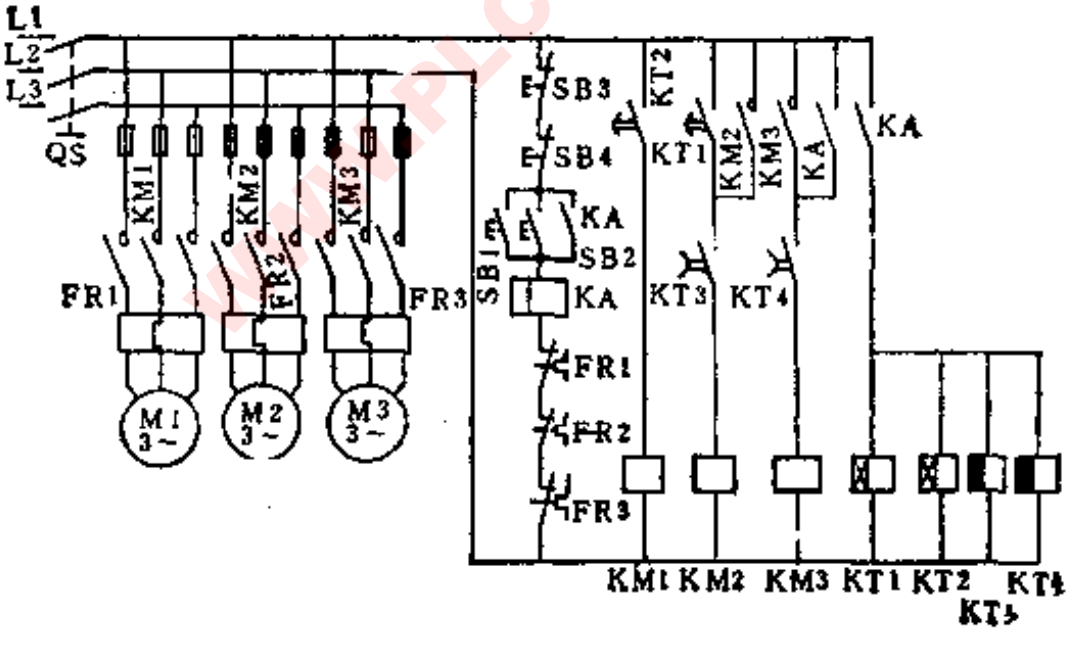


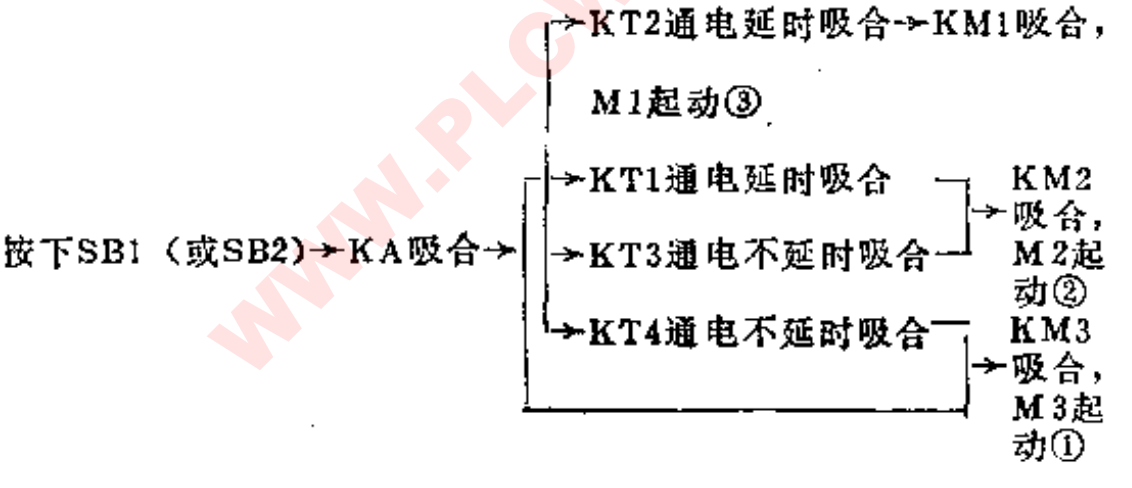
图4-36　具有三条传送带运输机的控制电路图

路断电，主轴电动机随之停转。

必须指出，两台电动机的主电路合用一组熔断器，这是必要的。如果在它们的主电路中分装接各自的熔断器，则不够安全。因为万一油泵电动机的熔丝熔断，油泵便不能工作，而主轴电动机仍可工作，这样将会使机件磨坏。

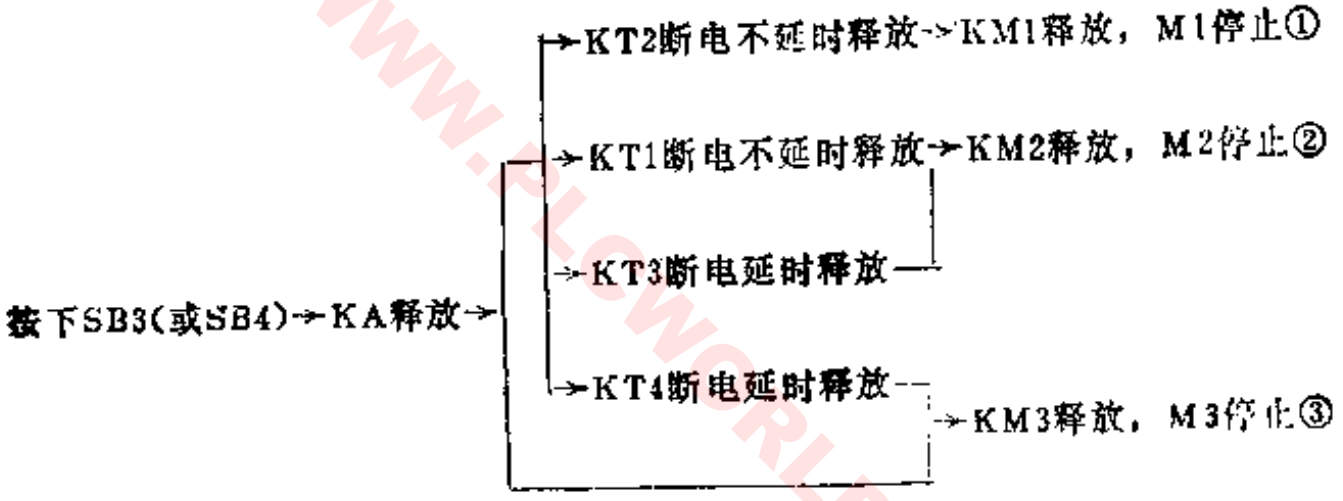
在生产中联锁控制的情况是常有的，例如具有多条传送带运输机组成的运输系统，用笼型异步电动机拖动，电动机就是按次序控制起动和停止的，需要起动1，才能依次起动2、3，控制电路如图4-36所示。电动机停止顺序与起动顺序相反。

三台电动机分别拖动具有三条传送带的运输机，从图中看出起动顺序为M3、M2、M1，而停止顺序为M1、M2、M3。电动机的起动过程是：



三台电动机的停止过程是：按下停止按钮SB3或SB4，继电器KA断电释放，四个时间继电器都断电，KT1和KT2断电不延时，立即断开，KM1失电，电机M1停转。由于KM2自锁，所以只有等KT3断电后，KM2断电，M2才停转，最后KT4断开，KM3释放，M3停转。

过程如下：①、②、③表示停车顺序



WWW.PLCWORLD.CN

若是三个热继电器中有一个过载而动作，则停车顺序为M1、M2、M3。

七、自动往复运动的控制线路

在生产过程中，常需要控制生产机械的某些运动部件的行程，和改变其运动方向或速度。例如龙门刨床，导轨磨床的工作台，需要在一定的行程范围内自动地往复循环。这种动作可由行程开关来控制。

图4-37所示的电动机自动往返控制电路。其工作过程为：若按下按钮SB1，接触器KM1吸合，电动机正转，运动机构的撞块即按照规定方向运动，直至达到预定点时，行程开关SQ1的常闭触头在撞块推动下断开，KM1释放，而3与11之间常开触头SQ1被接通，所以当KM1释放后，接触器KM2立即吸合，并自锁，使电动机向相反方向运转，这时撞块便离开SQ1，于是5与7之间常闭触头SQ1闭合，为下次KM1吸合作好准备。当另一撞块推动另一个行程开关SQ2时，11与13之间常开触头SQ2被断开，3与5之间常开触头

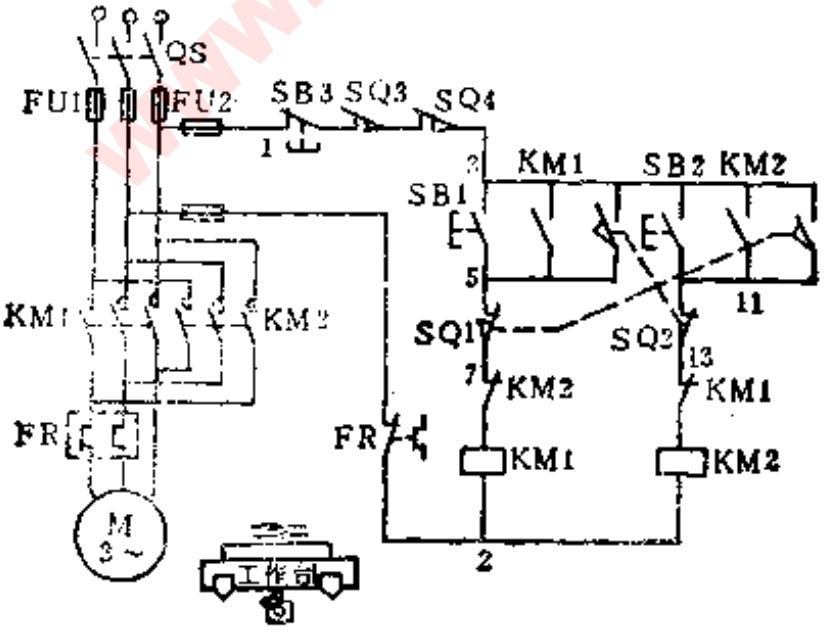


图4-37　电动机自动往返制动电路图

SQ2闭合，KM1吸合，电动机又反向运转。这样利用两个行程开关就可以实现循环不止的自动往返运动。在本电路中的位置开关SQ3和SQ4是起终端保护作用的。

八、四速电动机的控制线路

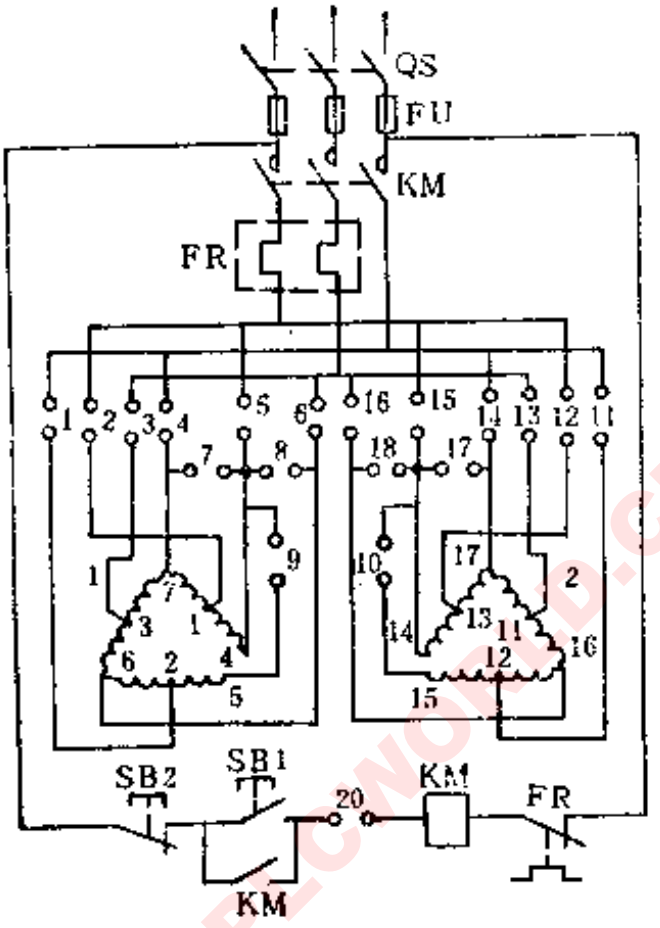
有些生产机械常用多速电动机来拖动，以扩大调速范围。有双速、三速、四速电动机。

图4-38所示为可供较大容量、单向、四速电动机的控制线路。转速为1500、1000、750和500r/min；即4/6/8/12极四速电动机。

这种电路简单实用，用手动转换开关来改变电动机的旋转方向。为减小其尺寸，所用触头并不计入电动机起动时或运转中断开时的大电流。图中的连锁是由转换开关触头20来担任的，每次转换方向时，在主电路触头开断前先行断开。

欲得到第一档转速（低速），可将转换开关放在1的位置，这时闭合了触头4、5、6和9，将线圈接成三角形，触头20即准备把接触器KM线圈接通。按下SB1按钮时，接通了接触器KM，通过它的主触头将电源接入电动机。欲变换电动机转速，再扳动转换开关，触头20断开，线圈KM的电源中断，电动机和电源分开。触头4、5、6和9则在电动机电路断开时分开。相当于转换开关手柄的新位置，另一组触头闭合，将所需电动机的线圈接通。触头20亦被闭合，准备线圈KM下一次的闭合。

在有些转换开关内并不采用触头20，控制线路中5、7两点是利用转换开关手柄与“停止”按钮间的连锁来闭合的。转动转换开关手柄时，必须先沿轴的方向向外拉出，然后再转。就在将转换开关外拉时按下“停止”按钮，将接触器KM断开，并在电动机断开时换接线圈。待转换开关的手



转速级别	转换开关位置	转换开关闭合触头	线圈接头
1 顺转	Ⅰ	4，5，6，9，20	1△
2 顺转	Ⅱ	14，15，16，19，20	2△
3 顺转	Ⅲ	1，2，3，7，8，9，20	1YY
4 顺转	Ⅳ	11，12，13，17，18，19，20	2YY

图4-38　四速电动机的控制线路

WWW.FLOWORLD.CN

柄转过以后，若要起动电动机，必须再按“起动”按钮。在这种情况下欲使电动机停转，只须扳动转换开关的手柄便得。

九、绕线转子异步电动机的自动控制

（一）用频敏变阻器起动的控制线路

绕线转子异步电动机用转子串电阻起动时，使用的电器很多，控制线路复杂，工作不十分可靠，而且起动电阻的体积也很大。近来在工矿企业中广泛采用频敏变阻器代替起动电阻。异步电动机转子电动势的频率决定于旋转磁场与转子的转速差值，也就是决定于转差率 s。频敏变阻器接在异步电动机的转子电路里，其阻抗随转差率 s 变化，起动时转差率 s 最大。频敏变阻器的阻抗也最大，限制了起动电流。控制线路如图4-39所示，可以实现自动和手动控制。

它的工作原理如下。

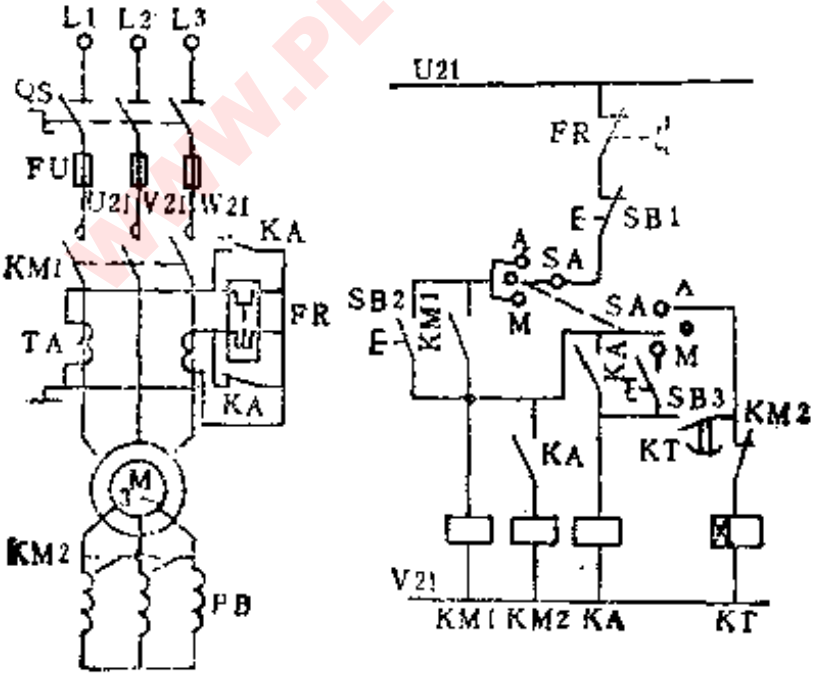


图4-39　用频敏电阻起动的控制线路

转换开关先扳到自动位置“自动”（A），电动式时间继电器KT将起作用，控制中间继电器 KA和接触器 KM2 的动作，在适当的时间将频敏变阻器短接。转换开关SA扳到手动位置“手动”（M)时，时间继电器就不起作用，用按钮SB3手动控制KA和KM2的动作。在起动过程中，KA的常闭触头将热继电器FR的发热元件短接，以免因起动时间较长而使热继电器发出动作。

（二）转子接入电阻器调速的控制线路

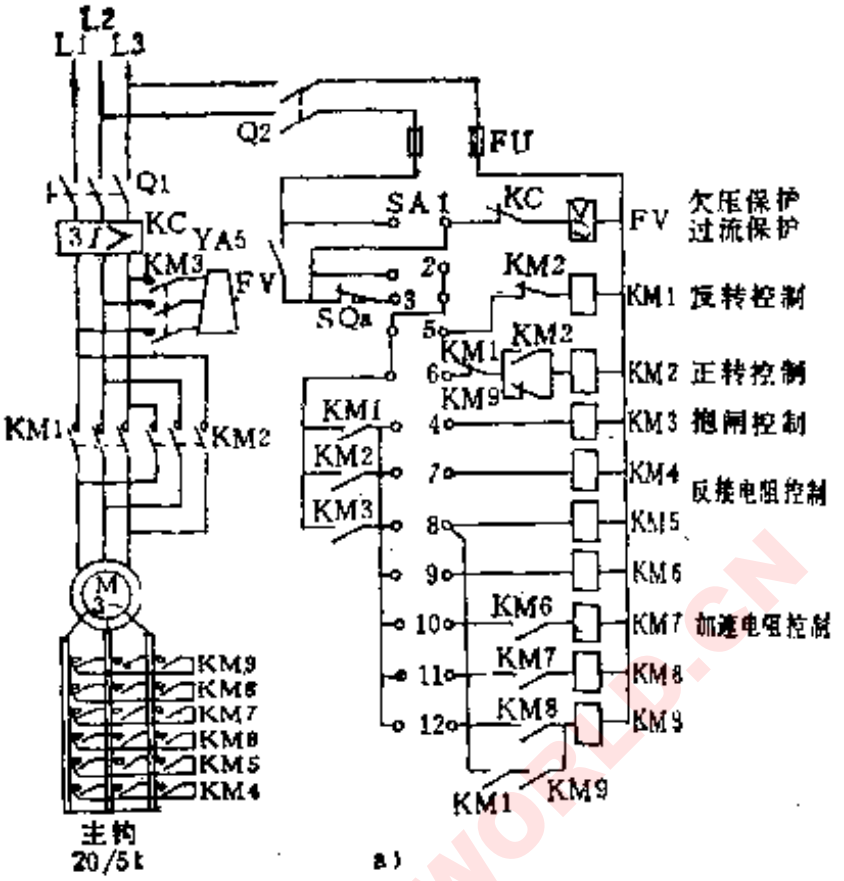
以控制起重机的绕线转子电动机的起动、调速、换向及制动为例来说明绕线转子电动机的自动控制。

PQR10系列磁力控制屏是我国生产的典型控制屏，由主令控制器及磁力控制盘所控制的主钩提升控制电路，见图4-40。主钩的额定起重量为20 t 。

线路用主令控制器频繁操纵电动机起动、调速与反转，每小时操作次数可达1200次。有六级切换电阻。停车时有抱闸制动，反转时有反接制动，一般反接制动电阻按转子感应电动势原则切换。利用转子电阻可作四级调速，电阻按长期工作制选用。线路有过电流保护、零电压保护与终端保护。主令控制器用于15～50 t 起重机。

1．电动机的操纵与元件的动作顺序

起动准备，Q1、Q2合闸，主令控制器SA在“0”位，欠压继电器FV吸引自保。主令控制器SA推向“上升”第一档，SA3、SA4、SA6和SA7接通，接触器线圈KM3、KM2和KM4动作，制动器松闸，电动机起动。同时电动机转子的外接电阻第一段被切除。以此类推，KM5、KM6、KM7、KM8、KM9逐个通电动作，电动机转子的外接电阻就逐段被切除，最后电动机趋向正常运转。



LK18-12/19主令控制器触头关合表

接点序号		下降 强力 5	4	3	下降 制动 2	1	C	0	上升 1	2	3	4	5	6
SA1								×						
SA2		×	×	×										
SA3					×	×	×		×	×	×	×	×	×
SA4	KM3	×	×	×	×	×			×	×	×	×	×	×
SA5	KM1	×	×	×										
SA6	KM2				×	×	×		×	×	×	×	×	×
SA7	KM4	×	×	×		×	×		×	×	×	×	×	×
SA8	KM5	×	×	×			×			×	×	×	×	×
SA9	KM6	×	×								×	×	×	×
SA10	KM7	×										×	×	×
SA11	KM8	×											×	×
SA12	KM9	×												×

b)

图4-40 PQR10交流控制屏操纵原理图

WWW.PLCWORLD.CN

上升限位器开关SQa断开时，使接触器KM2、KM3、KM4、KM6、KM7、KM8、KM9全部断电，电源切断。只有把控制器手柄搬到下降第3、4、5档时，才能重新起动电动机。

主令控制器推向“C”位时，SA3、SA6、SA7和SA8闭合，接触器KM2、KM4、KM5动作，电动机转子的外接电阻一、二段被切除。但KM3没有通电，因此制动电磁铁YA5不工作，而电动机仍在制动状态。这一档主要用来当手柄由下降向“0”位搬动，重物进行下降制动时避免“溜钩”，实现准确停车的。控制手柄继续推至“1”档时，SA3、SA4、SA6和SA7闭合，KM3通电，松闸，外接电阻只一段被切除。此时电动机按重物下降方向慢速转动，电动机在制动情况下运行。至“2”档时，仍是如此，由此可知C、1、2三档，是电动机处于反接制动下降的情况。在3、4、5档时，KM1接通，电动机处于动力下降情况，转子中的外接电阻也逐段被切除。同时，也可以实现重物件在发电情况下的制动下降。空钩下降时的控制手柄，不宜长久地停留在C、1、2档上，应该很快过渡到3、4，并在2、3档间活动，以便使空钩（或轻载）平稳下降。

2. 线路中某些环节分析

接触器KM9动作以后，KM8线圈通过其常开联锁触头而自保，只有触头SA8或KM1断开时，它才会释放。因此，手柄从“5”往回转时，它一直是接通的。这保证电动机当手柄回到“4”或“3”位置时，转速不会改变，以防止重载时电动机进入反馈制动状态。若回到“4”或“3”位置，则下降速度剧增，会发生危险，所以应越过特性“4”与“3”，直接由“5”过渡到“2”，自保回路于下降“2”位置断

开。

在控制电路中，串联在接触器 KM2 线圈电路中的一副触头KM9，与KM2的自锁触头并联，保证接触器 KM1 释放以后，在KM9断开转子电路保持一定的附加电阻下，上升接触器KM2才能接通并自锁，防止了反接时直接起动造成危险。

§4-4 机床电气控制线路举例

一、C620-1型普通车床电气线路

普通车床的电气线路比较简单，一般只用笼型异步电动机拖动，而通过机械变速箱调节主轴箱的转速来变速。

图4-41为C620-1型车床的电气原理图。

（1）主电路分析

主电路共有两台电动机，其中M1是主轴电动机，带动主轴旋转；M2是冷却液泵电动机，为车削工作时输送冷却液。主轴电动机和冷却液泵电动机的容量都不大，所以采用全压起动。

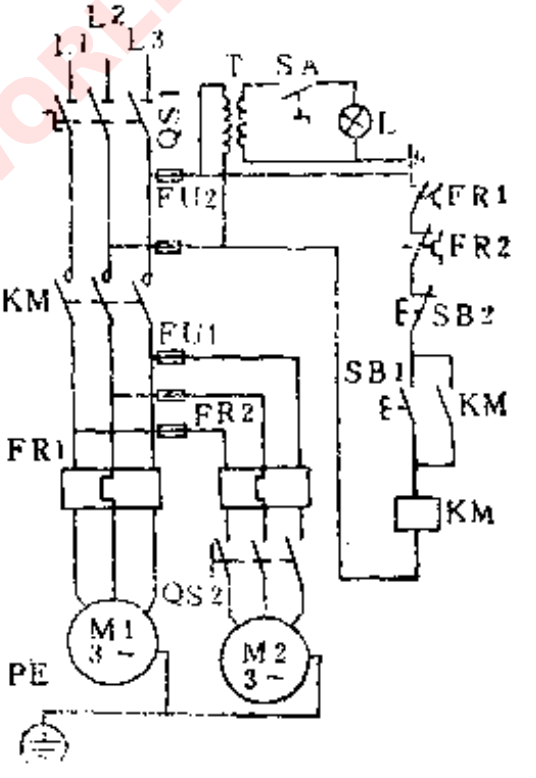


图4-41 C620-1型车床电气原理图

电动机采用三相380V的交流电源，由转换开关QS1引入机床。再用接触器KM的主触头来接通或断开电动机。冷却液泵电动机M2功率较小，只有0.125kW，故用转换开关QS2直接起动和停

止，而不用接触器和按钮，这样比较经济，操作也方便。

冷却液泵电动机由熔断器FU1作短路保护，和用热继电器FR2作过载保护。主轴电动机由热继电器FR1进行过载保护，因为在电源开关板上装有熔断器，可以保护主轴电动机的短路故障，如果没有装设熔断器，在电路中可另设主轴电动机的短路保护。

（二）控制电路分析

控制电路由熔断器FU2、起动按钮 SB1、停止按钮SB2、接触器线圈KM及自锁触头、热继电器FU1和FU2 的常闭触头等组成。其动作原理如下。

（1）主轴电动机的正转控制：合上转换开关QS1，按起动按钮SB1，接触器线圈KM获电，它的三副主触头闭合，将主轴电动机M1电源接通，接触器KM的辅助触头闭合自锁，电动机起动并继续运转。需要停止时，按下按钮SB2，接触器线圈KM断电，它的三副主触头将三相电源断开，电动机停止。

主轴电动机的反转是由机械结构来控制的。

（2）冷却泵电动机的控制：当主轴电动机M1接通电源转动后，如需要开动冷却泵，只要合上转换开关QS2，冷却液泵电动机M2就能起动。当M1断电停电后，M2也随之停车。

在电动机运行中，任何一个电动机过载，热继电器FR1或FR2动作，即可切断控制线路，使两个电动机停转。

（三）照明电路分析

照明工作灯采用36 V安全电压，由变压器T供给，使用时合上灯头开关SA，照明灯便接通。C620-1型车床电器元件如表4-5所示。

表4-5　C620-1车床电器元件明细表

代　号	元件名称	型　号	规　格	件数
M1	主轴电动机	J 52-4	7 kW，1400 r/min	1
M2	冷却泵电动机	JCB-22	0.125kW,2790 r/min	1
KM	交流接触器	CJ20-20	线圈电压380V	1
FR1	热继电器	JR2-1	热元件电流14.5A	1
FR2	热继电器	JR2-1	热元件电流0.43A	1
QS1	三相转换开关	HZ15-25/3	380V，25A	1
QS2	三相转换开关	HZ15-10/3	380V，10A	1
SA	二相转换开关	HZ15-10/2	380V，10A	1
FU1	熔断器	RM3-25	4A	3
FU2	熔断器	RM3-25	4A	2
FU3	熔断器	RM3-25		1
T	照明变压器	TZ-50	50VA，380V/36V	1
SB1，SB2	控制按钮	LA4-22K双钮	5A	1
L	照明灯具灯头	JC6-1		1
	灯泡	40W36V		1

二、X62W万能铣床的控制线路

以X62W万能铣床的电气控制线路，作为阅读电气原理图的举例。

（一）电气原理图的阅读方法

阅读电气原理图的方法，大致可归纳为以下几项。

（1）阅读主电路：阅读主电路时，应先了解主电路中接有那些电器以及它们的用途和工作特点，例如电动机的起动方式，有无正反转、调速、制动等。再根据工艺过程，了解各台用电设备之间的联系。在完全了解主电路的这些工作

WWW.PLCWORLD.CN

特点之后，就可根据这些去阅读控制电路。

（2）阅读控制电路：控制电路主要是用来控制主电路工作的。阅读电路时，首先了解各个电器的用途和相互联系。然后根据主电路对控制电路的要求，并结合生产机械的工艺过程，按照动作的先后顺序，仔细阅读，顺序解决。

对于机、电和液（或气）、电配合得比较密切的生产机械，只凭电气原理图往往还不能完全看懂其控制原理。这就必须进一步了解有关的机械传动和液压（或气压）传动后，才能真正弄清全部控制过程。

（3）最后阅读照明、信号指示、检测、保护等电路。这些电路和控制电路类似，在图上也用细实线画出。

（二）控制线路分析（如图4-42所示）

1. 主轴电动机的控制

X62W型铣床的主轴电动机应用了电力制动。KM1为主轴起动接触器。主轴电动机的旋转方向用转换开关SA3控制。电力制动过程用电磁制动离合器控制。

（1）起动与停止：开动主轴电动机时，先扳好转换开关SA3的位置，然后按起动按钮SB1或SB2，接触器KM1吸合自锁，主轴电动机起动。KM1另一对常开触点（37-17）闭合，为工作台控制回路供电及工作作好准备。机床的进给运动只有在主轴旋转后才有可能，这是机床加工状态所必须的，以免发生工件碰撞主轴刀具的事故。

停车时，按下停止按钮SB5或SB6，接触器KM1释放，并接通主轴电磁制动离合器YC1，主轴便迅速停止转动。

（2）主轴变速的短暂冲动：主轴变速时，选好变速盘的位置，将调速手柄扳回原位时，瞬时压合行程开关SQ1。其常闭触头（5-37）瞬时断开，切断了KM1的自锁回路；

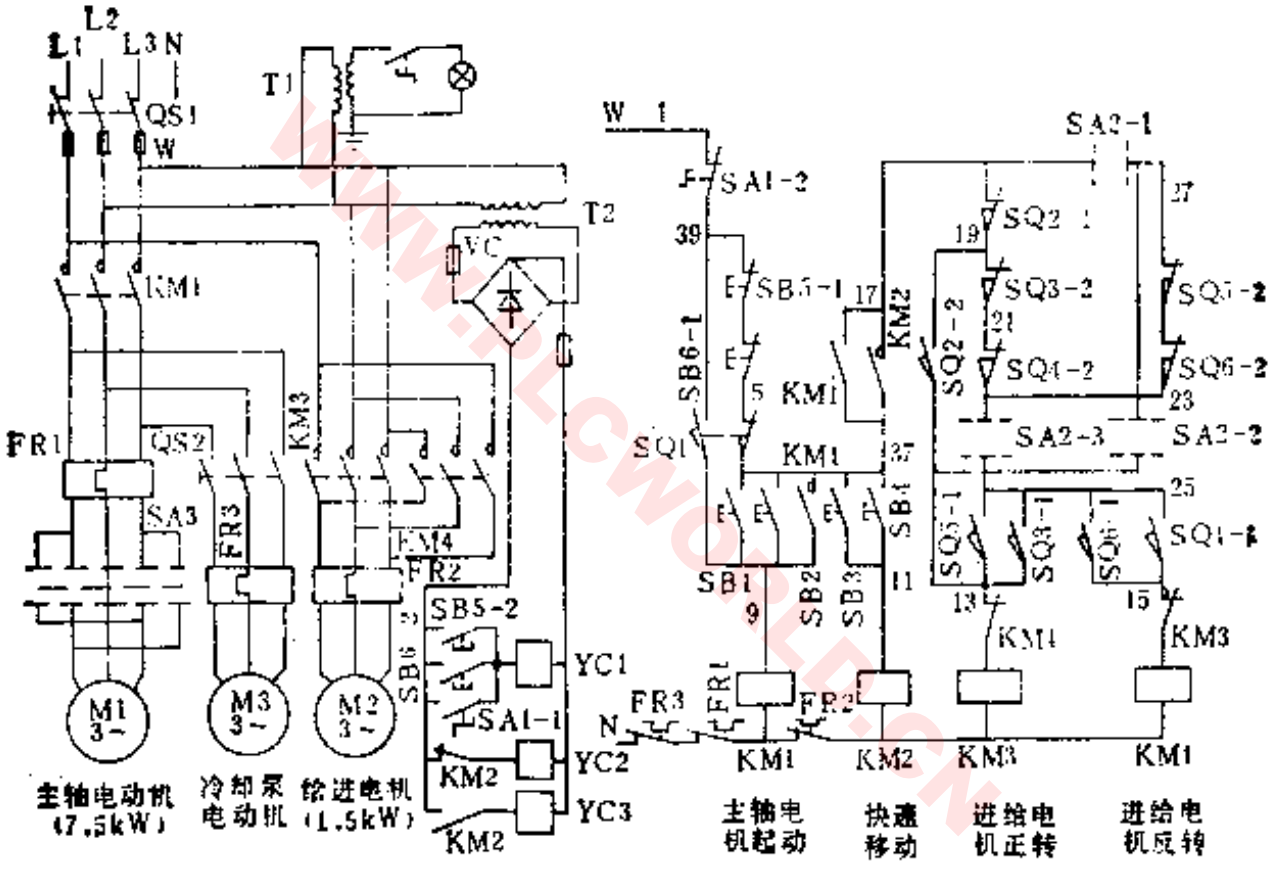


图4-42　X62W型万能铣床电气原理图

WWW.PLCWORLD.CN

其常开触头（9~39）瞬时接通，同时接触器KM1也瞬时接通，使主轴电动机作瞬时转动，使变速齿轮顺利地啮合。当手柄完全推向原来位置时，SQ1就恢复到原来状态，主轴电动机仅在此过程中瞬时转动，齿轮啮合完成，SQ1复原，主动冲动结束。

机床主轴的变速也可在主轴转动时进行预选。在变速盘上选好所需的转速时，不必按下停止按钮SB5-1或SB6-1，而可以直接进行变速操作。只要扳动变速手柄，在此过程中总是SQ1的常闭触头先断开，切断接触器KM1的回路，然后其常开触头闭合，KM1瞬时吸合，而在行程开关SQ1的状态复原，其触头通断的情况正好相反。因此在将手柄拉到底时，行程开关SQ1已经还原，接触器KM1不再吸合，电动机M1停转。注意，在开车状态下变速时，当拉出手柄后，必须等主轴转速充分慢下来以后才能把手柄推回原位，否则会因冲击而损坏齿轮。

主轴变速时，不论是停车变速还是开车变速，都应以较快的速度把手柄推回原位，以免通电时间过长、电动机转速过高而打坏齿轴。

（3）主轴上刀时的制动：当主轴上刀或换刀时，为了安全和便于工作，应使主轴停止转动。为此，在主轴上刀前，需将转换开关SA1扳到上刀位置，其触头（1~39）切断接触器KM1等的电源，电动机不能起动；而另一对触头SA1-1闭合接通电磁制动器YC1，使主轴不能转动，然后上刀。上刀完毕后，再将SA1扳回到工作位置，主轴就可再转动。

（4）改变旋转方向：主轴电动机旋转方向的改变，是通过转换开关SA3来实现的，节省了控制元件。

2. 工作台进给电动机M2的控制

工作台的进给运动、快速移动都由电动机M2驱动，也可以手动。

工作台的进给方向用两个手柄选择。纵向进给手柄有三个位置，即机动（左、右）和手动；横向和垂直进给手柄有五个位置，即中间位置为手动，手柄向上为升降运动，手柄向下为横向运动。两个手柄分别与行程开关SQ5、SQ6（纵向运动）和SQ3、SQ4（横向和垂直运动）联动。

（1）工作台的纵向（左右）运动：工作台的纵向运动由纵向进给手柄操纵。当手柄扳到向右位置时，一方面在机械上接通纵向离合器，同时在电气上压动行程开关SQ5-1常开触头闭合，常闭触头SQ5-2断开，而其他各控制进给运动的行程开关都处于停止位置。这时主轴电动机已经起动，控制电源由线号1-17-19-21-23-25-13接到接触器KM3的线圈上，KM3吸合，进给电动机M2正向起动，工作台向右运动。

当纵向进给手柄扳到向左位置时，却压动了行程开关SQ6，其常开触头SQ6-1闭合，常闭触头SQ6-2断开；同时SQ5-1断开，SQ5-2闭合，接触器KM3失电，接通了反转接触器KM4，电动机M2反转，工作台向左运动。

当纵向进给手柄处于中间位置时，M2停止，纵向进给结束。

（2）工作台垂直（上下）和横向（前后）运动：此时手柄有五个位置，即向上或向下；向前或向后及中间位置。

工作台上下进给运动，可将手柄扳到向上位置或扳到向下位置，机械上接通垂直进给离合器，同时压下行程开关SQ3或SQ4，接通接触器KM4或KM3，电动机M2正向起动

或反向起动，工作台就向上或向下移动。

工作台向前、向后进给运动：当操作手柄扳到向前或向后位置时，机械上接通横向进给离合器，而压下的行程开关仍是SQ3或SQ4，接通接触器KM4或KM3，电动机M2正向起动或反向起动，工作台就向前或向后运动。

（3）工作台的进给速度变换和M2的冲动：为使变速时齿轮易于啮合，进给速度的变换与主轴变换一样，设有瞬时冲动环节，其作用原理与主轴变速冲动环节基本相同。当变速手柄推回原位时，通过内部机构压下行程开关SQ2，其常闭触头SQ2-1瞬时断开，常开触头SQ2-2瞬时接通。此时，控制电源由1-17-27-29-23-21-19-13，接通接触器KM3，但KM3也是瞬时吸合，达到进给电动机M2瞬时转动的目的。当齿轮啮合后，手柄完全推回原位时，行程开关SQ2又恢复原来状态，切断了瞬时冲动电路。

由于此变速瞬时冲动电路要通过SQ5-2、SQ6-2、SQ4-2和SQ3-2四个行程开关的常闭触头，因此只有当纵向进给手柄和垂直、横向操纵手柄都位于中间位置时，工作台停止进给，才能实现变速时的瞬时冲动。这样就防止了如果发生一个进给操作手柄不在中间位置时，在变速时产生工作台沿进给方向移动的可能。

3、工作台的快速移动

纵向、横向和垂直三个方向的快速运动，由上述进给操作手柄配合快速运动按钮SB4或SB3进行控制。

主轴电动机开动后，先扳好选择进给方向的手柄，按下进给电动机的起动按钮SB3，接触器KM2吸合，其常闭触头KM2切断进给电磁离合器YC2，其常开触头KM2接通快速电磁离合器YC3，工作台即按选好的方向作快速运动。放开

快速按钮SB3，KM2释放，YC3断电，YC2通电，工作台恢复原来的进给速度。

机床部件的快速移动一般都用点动控制，不设自保回路。

在主轴M1未起动时，也可以进行工作台的快速运动。先扳好选择进给方向的手柄，按下SB3，使KM2吸合，其触头在切断YC2和接通YC3的同时，另一常开触头（37-17）接通进给电路，使工作台获得快速移动。当放松按钮SB3时，KM2失电，M2停止运转，工作台就立即停止。

4. 圆工作台的控制

为了扩大机床的加工范围，如铣切圆弧、凸轮等曲线，可在工作台上安装圆形工作台附件。圆形工作台的回转运动是由进给电动机M2经传动机构驱动的。使用圆形工作台时，应首先把圆工作台转换开关SA2扳到接通位置。其触头SA2-2接通，而触头SA2-1和SA2-3则断开。按下起动按钮SB1或SB2，接触器KM1、KM3相继吸合，主轴电动机及进给电动机起动，进给电动机M2带动圆工作台作回转运动，而且顺着一个方向作回转运动。

在圆工作台运转时，不允许机床的工作台在纵横或垂直方向作任何运动。为了防止因误操作而发生事故，在电气上设有联锁保护，即当圆工作台转换开关SB2扳到接通位置时，其触头SB2-1、SB2-3切断了机床工作台的进给控制回路，使工作台不可能在纵向、横向或垂直方向作进给运动。而且圆工作台的控制电路又经过SQ3、SQ4、SQ5及SQ6等四个行程开关的常闭触头，如因误操作而扳动进给操纵手柄时，就立即切断圆工作台的控制电路，电动机M2停止运转。这样就保证了圆工作台的回转运动与机床工作台的进给运动不

可能同时进行。

5. 电气联锁

该机床的电气联锁有以下几项。

（1）主轴转动与进给运动的联锁：只有在主轴起动以后，才能起动进给运动。主轴停车时，进给运动也就停止了。

（2）工作台三个方向的进给和快速运动的联锁：在同一时刻，只能选择一个方向的进给运动或快速运动。

（3）圆工作台回转运动与进给运动的联锁：在使用圆工作台时，且圆工作台转换开关SA2扳在接通位置时，机床工作台不能进行任何方向的进给和快速运动。

§4-5 高压电动机的控制电路

在工矿企业中，一些大容量的、重要的电动机往往采用高压（6～10kV）异步电动机（例如循环水泵、鼓风机等的电动机）。这些电动机一般由值班人员通过控制开关和断路器在控制盘上进行集中控制。

断路器（又叫油开关）是用来切断较大的负载电流或短路电流的一种高压控制电器，它的主要特点是具有特殊的消弧装置，能够很快地熄灭主触头拉开时所产生的电弧。因此，生产中的高压电气设备都采用断路器进行操作。

断路器中用来操纵触头闭合或断开的机构，叫做操作机构。

断路器的操作机构有三个基本作用：供断路器合闸；合闸后使主触头保持在闭合状态；使断路器跳闸。

合闸时，是使合闸线圈通入电流，产生电磁吸力拉动拉杆，通过一套传动机构带动断路器QF的主触头闭合，使主

电路接通，同时断路器的所有常开辅助触头接通，常闭辅助触头断开。由于合闸线圈所需要的电流大，控制合闸线圈电流的合闸回路一般要有单独的电源供电。跳闸时，接通跳闸控制回路，使跳闸线圈Y中有电流，线圈铁心吸上，撞动脱扣器，使主触头断开，常开辅助触头断开，常开辅助触头闭合。由此可见断路器主触头的通断分别由合闸线圈和跳闸线圈控制，合闸动作结束之后由“防跳”装置来维持主触头的闭合。

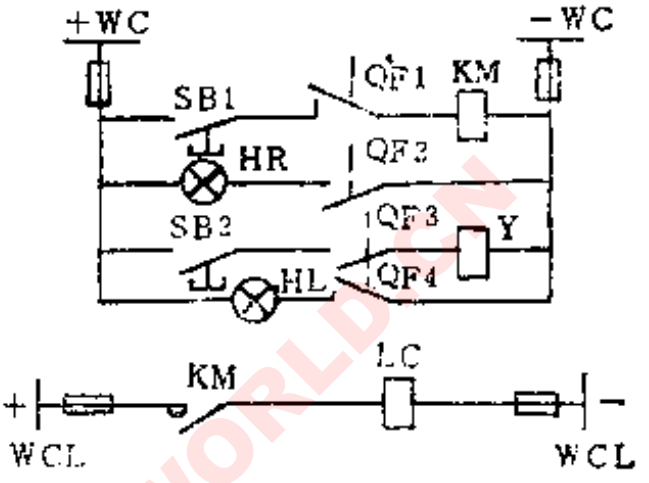


图4-43 断路器的控制电路和合闸电路

WC—控制母线 WCL—合闸母线

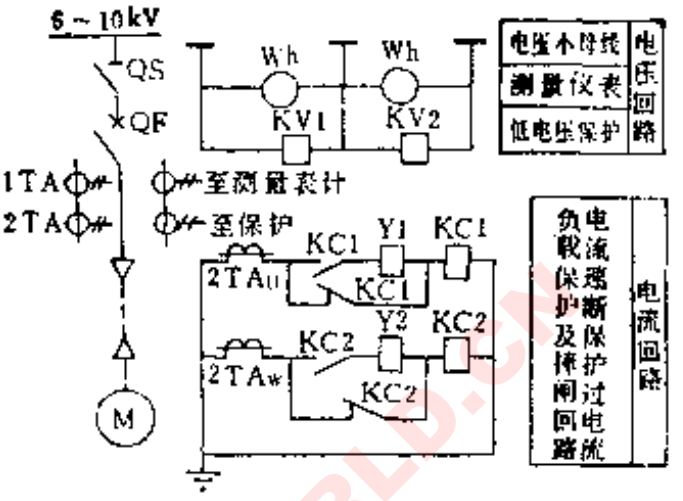
图4-43是断路器的简化控制电路展开图。合闸线圈LC由单独的电源通过合闸母线WCL供电，并且在控制电路中接入一个合闸接触器KM去控制合闸线圈的通电与断电。跳闸线圈Y和其他控制电路，则由控制母线WC供电，如图4-44所示。

下面根据图4-43、4-44分析一下断路器是怎样进行操作的。它是高压电动机的过电流保护电路之一。

手动合闸时，按下合闸按钮SB1，合闸接触器KM有电，合闸线圈LC供电，于是断路器QF合闸。合闸后常闭触头QF1即断开，使线圈KM断电，合闸线圈LC也就断电，断路器断电，断路器由搭钩锁住，维持主触头闭合。常开触头QF2、QF3闭合。

当手动控制跳闸时，按下开关SB2，接通控制回路，这

WWW.PLCWORLD.CN

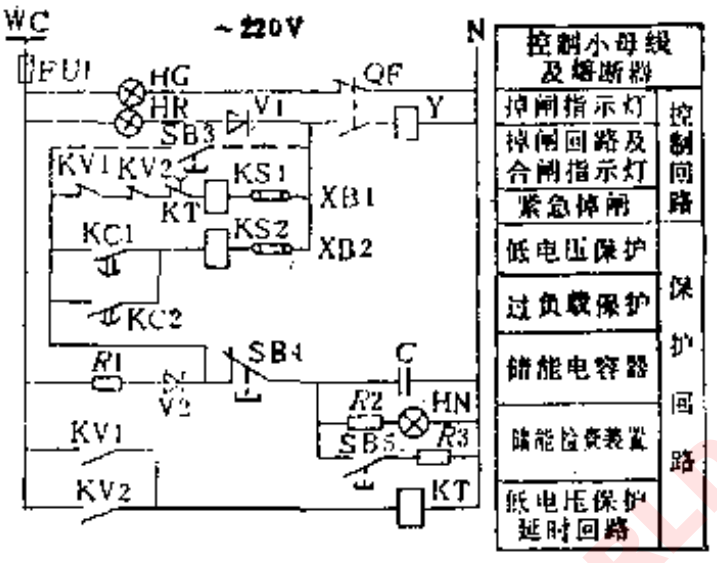


图中设备明细表

符　号	名　称	型号规格	数量	备注
KC1、KC2	过流继电器	GL-16(20)	2	
FV1、FV2	低电压继电器	DJ-132A/160	2	
KT	时间继电器	DSJ-13 220V	1	
KS1、KS2	信号继电器	DX-11/1	2	
Y1、Y2	跳闸线圈	CS2-114/5A～220V		操作机构内
QF	断路器辅助开关	F-B	1	操作机构内
Q	辅助开关	F-B	1	操作机构内
SB4	黑色按钮	LA19-11	1	

图4-44　高压电动机的二次回路

WWW.PLCWORLD.CN



符　号	名　称	型号规格	数量	备注
HR	红色信号灯	XD5 220V	1	
HG	绿色信号灯	XD5 220V	1	
HN	氖光辉光灯	NHO-4C	1	
XB1-2	连接片	YY_1-D	2	
FU1	熔断器	R_t-10/6	1	
$R1\sim3$	电阻器		3	
C	电容器	CDM500μF450V	1	
V1～2	二极管	2CP71 I 0.1A 1000V	2	

（反时限过电流保护线路）

WWW.PLCWORLD.CN

时跳闸线圈Y有电，使搭钩脱扣，断路器跳闸，主触头断开。

为了防止电动机内部发生短路或者长时间过负载运行，控制线路设有电流速断保护和过负载保护装置，当发生短路事故或严重过载时，就自动把电路切断。在高压电动机中，一般是用电流继电器作为过电流保护装置。

在继电保护原理接线图中，主电路一般用单线图表示(图4-44)，只在联接电流互感器的部分画出三相，而控制线路则需全部画出。电流回路是通过电流互感器2TA二次侧成回路，回路中接入反时限过流继电器KC1和KC2的线圈以及跳闸线圈Y1、Y2。当电路发生短路故障时，过流继电器瞬时动作，跳闸线圈Y1、Y2有电，使断路器跳闸。当电动机过负载或在低电压下运行时，通过反时限电流继电器触头KC1、KC2延时闭合或时间继电器KT延时闭合，使跳闸线圈Y有电，断路器跳闸，同时还使信号继电器动作，KS1、KS2发出信号，接通音响或灯光信号回路。当电压继电器KV接入电压互感器中，某一相熔体熔断时，只有一相电压继电器动作，不能起动信号继电器，可以防止误动作，所以触头KV1、KV2是串联的。

KC1和KC2的动合触头与Y1、Y2串联，其作用是避免线路正常工作时其动断触头偶然断开而导致跳闸停电，提高继电保护装置的可靠性。

此外还采用了电容器储能提供掉闸能源作为辅助方式，这主要用于电动机延时低电压保护、过负载保护跳闸。由于过负载时可供电流脱扣器的电流值较小，不能可靠地跳闸，所以采用电容储能跳闸方式。

§4-6 直流电动机的自动控制概述

直流电动机的控制是研究直流电动机的起动、正反转、

调速及制动的方法及电路。

一、并励电动机的起动、制动、调速和保护

（一）起动

如把直流电动机直接接入电源来起动，则起动电流很大。因为在刚起动的瞬间，电枢还没有转动，电枢电路中的反电动势为零，而电枢电阻又很小，此时通过电枢的电流（即起动电流）很大，即

$$I_{ST}=\frac{U}{R_a}$$

例如，某台10kW电动机的额定电压为220V，额定电流 $I_N=50A$，电枢电阻 $R_a=0.4\Omega$，则直接起动电流是

$$I_{ST}=\frac{U}{R_a}=\frac{220}{0.4}=550 \quad A$$

此电流为额定电流的11倍，这样大的电流将会烧毁换向器和电刷，同时使电动机的传动部件受一很大的冲击转矩，这是不允许的。因此，起动时，必须在电枢电路中串联起动变阻器来减小起动电流。同时为了获得较大的起动转矩而又不致于使换向器受到损伤，通常把起动电流限制为电枢额定电流的1.5～2.5倍，即

$$I_{ST}=\frac{U}{R_a+R_S}$$

$$=(1.5\sim2.5)I_N$$

串联电阻 R_S 称为起动电阻，利用上式，便可确定所需起动电阻 R_S 的数值。起动时接线图如图4-45所示。

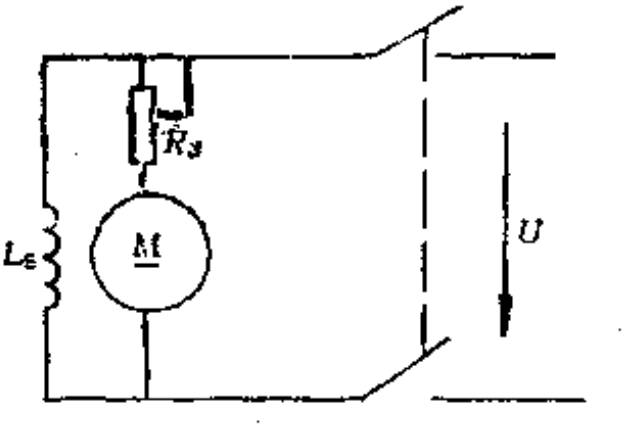


图4-45　并励直流电动机起动电路图

当电动机电枢旋转起来后，在电枢中则产生反电动势E_d，电枢电流逐渐减小，那么起动电阻就可以逐渐减小，最后起动电阻可以完全切除，电动机即起动完了，达到正常运转，此时电动机的电枢电流为

$$I_d = \frac{U - E_d}{R_d}$$

电动机起动时要求其磁场有最大值，即要先接上励磁起压，以保证起动过程中产生足够大的反电动势，迅速减少起动电流和保证足够大的起动转矩，加速起动过程。

直流电动机的起动方法有三种：即按反电动势特性（原则），按电流特性和按时间特性起动。前两种方法实用较少，目前应用广泛和起动稳定可靠的是按时间特性（原则）起动方法，故在下节介绍其控制电路。

（二）制动

直流电动机的电气制动同感应电动机一样有能耗制动、反接制动和再生制动三种方法。

1．能耗制动

是把电枢从供电线路上切断，然后把它联接到电阻R上，励磁电路仍接于电源上保持不变，如图4-46所示。此时电动机由于惯性继续转动，电枢绕组中产生感应电动势和电流，使电动机运行在发电机状态。电枢导线中的电流在磁场中产生电磁力矩，按照左手定则，它与电枢旋转方向相反，因此起制动作用，使电枢迅速停止运转。并励电动机大多采用能耗制动，并按感应电动势原则控

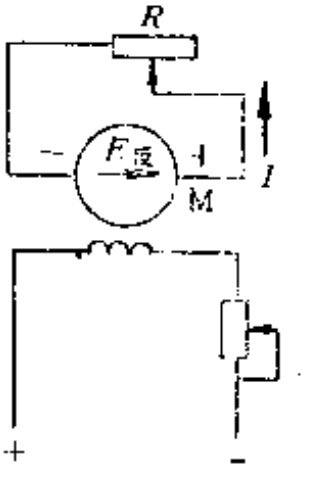


图4-46 作能耗制动的接线图

制，这种方法可以保证停车准确，而且接线简单。

2. 反接制动

反接制动在直流电动机正反向拖动中得到广泛应用，而通常也是用感应电动势原则来控制的(如图4-52所示)。反接时只需将电枢的两端电源电压极性对换一下即可，此时电枢电流方向改变，由于磁场方向不变，所以电枢产生的电磁转矩与原转动方向相反，起了制动作用。在反接过程中，电枢中需要接入反接电阻限制电流，因为此时电源电压与电动机中反电动势的极性相同，电流过大将造成危险。

3. 再生制动

再生制动是当并励电动机运行时，由于某种外因使电动机转速（如电力机车下坡时）超过了正常转速，反电动势增大，超过了外加电压，即 $E_{反}>U$，此时的电动机变成了发电机，向供电线路反馈供电，使电动机产生制动转矩（与旋转方向相反），而使电动机的转速减慢。

（三）调速

调速指的是在一定的机械负载下，通过对电动机施以附加的作用来改变转速，直流电动机的调速从式(3-23)可以看出有三个途径来调节电动机的转速。

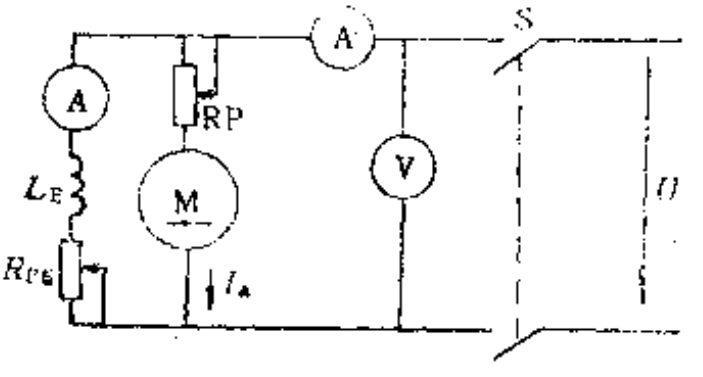


图4-47 调速的电路图

L_E—并励绕组

1. 改变磁极磁通 Φ 的调速法

如图4-47所示改变励磁电流，就可以使电动机的磁通改变，以调节转速。

为此，在励磁电路中串接了一个磁场变阻器 R_{PE}，改变磁场变阻器，即可调节电动机的转速。当励磁电流过小甚至励磁电路断开时，电动机的转速将急剧增加，会引起严重事故，这是在运用并励电动机时应注意防止的。电动机调速范围一般用最低转速和最高转速之比来表示，此种方法的调速范围可达1:3，是比较经济的一种方法，应用甚广。

一般电动机只允许转速比额定转速增加20%～50%，大范围调速的电动机是按特殊设计制造的。

2. 在电枢电路中串联电阻的调速法

如图4-47所示，在电枢电路内加入电阻（变阻器RP）也可以调速，通常电源电压 U 是一定的，如果把RP增加，则电阻电压降 $I_a(R_a+RP)$ 增加，电动机的转速下降；反之，则转速升高。通常电枢电流较大，在调速过程中，调速变阻器要消耗大量的电能，故不经济。但这种调速方法简单，所以还是被采用着。

3. 改变供电线路端电压 U 的调速法

从他（并）励直流电动机机械特性可知，这种调速方法的特点是：调速平滑，转速稳定，一般只能从额定电压向下调节，因而转速只能调低不能调高，调速范围较大。但最低转速常受静差率的限制而不能太低。

采用这种方法调速，必须有专门的可以改变电压的直流电源。目前用得较多的独立可调的直流电源是直流发电机-电动机系统（即G-M组）及晶闸管整流-电动机系统。

G-M机组是用交流电动机带动直流发电机，然后再拖动直流电动机，因而可以通过调节直流发电机的励磁电流（调 R_G）来改变其磁场的强弱，得到不同的输出电压，达到调节直流电动机转速的目的，如图4-48所示。也可以通过调

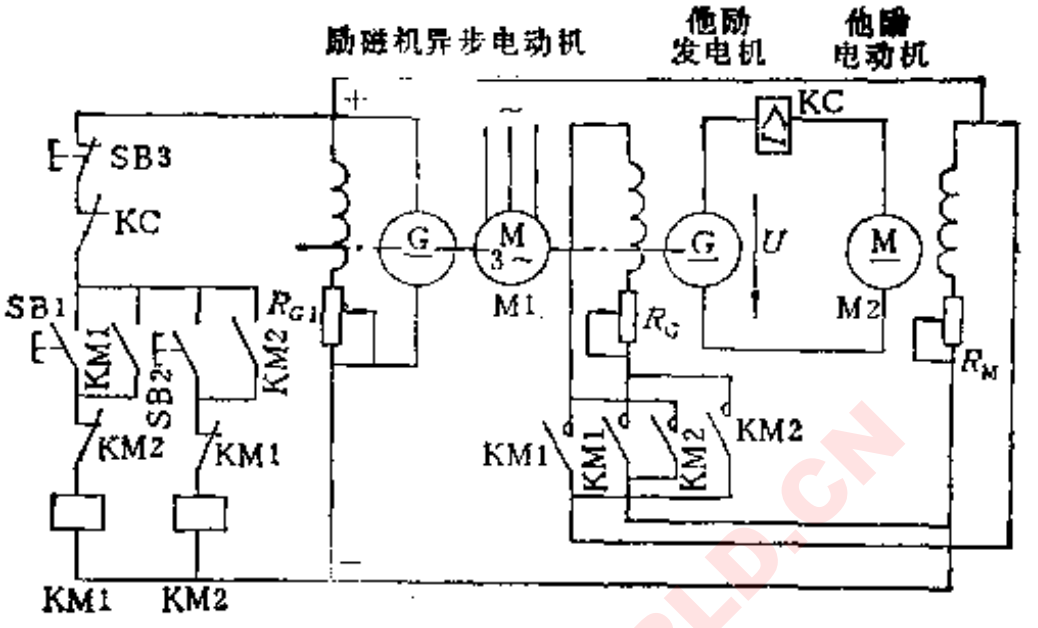


图4-48　G-M调速系统线路图

节直流电动机M2的励磁电流，改变其磁场强弱，从而得到10倍以上的大范围调速性能。通过改变直流发电机的励磁方向和大小，又可以实现直流电动机起动、制动和正反转控制。

如欲使电动机的转速在额定值以下调节，则可保持R_M不变，把R_G增大，因而发电机的端电压降低，由于Φ不变，电动机的转速便下降。如欲使电动机的转速在额定值以上调节，则应保持其两端电压为额定值不变，而把R_M增大，由于电动机的励磁电流减小，所以转速升高。

G-M组的优点是能使生产机械的转速在宽广的范围内均匀调节，调速范围可达到1:30，其缺点是设备费用很大。近年来，由于晶闸管整流技术的迅速发展，直流发电机有被晶闸管整流器代替的趋势，从而大大提高了效率，降低了设

WWW.ELECWORLD.CN

备费用。

在生产上常常需要电动机反转，如欲使直流电动机旋转的方向改变，只须改变励磁电流的方向或改变电枢电流的方向，只要两者变其一，便可使直流电动机反转，而通常采用的是改变电枢电流的方向，如图4-49所示。这是因为励磁电路具有很大的电感，若换接励磁电流方向，则将产生极高的感应电动势，可能击穿励磁绕组的绝缘，故不常用。

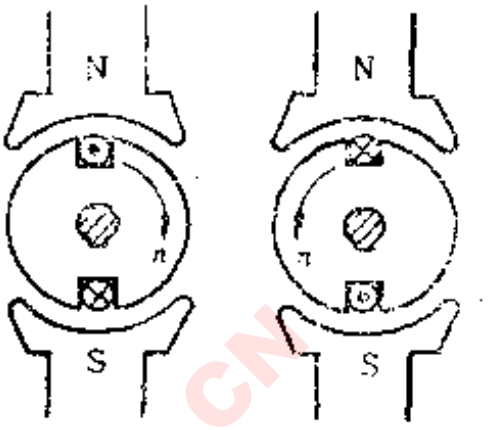


图4-49 改变电枢电流的方向使电动机反转

并励电动机的转速调节，不论运行时串入电阻的数值如何，起动和制动总是在满磁通下进行的。在调速过程中，为了限制电枢电流的冲击，常在电枢电流中接入电流继电器KC，它在电枢电流过大时动作，自动调节励磁以限制过大的冲击电流，如图4-48所示。

（四）保护

防止不正确起动或励磁消失等的过（欠）电流保护是用电流继电器来实现的，它也能在不大的短路电流下起保护作用。在短路电流很大的情况下，低压断路器作短路保护，为了防止过电流所产生的“环火”现象，有时要用快速低压断路器，以快速切断故障电流。在长期工作的小容量、不调速的电动机上可以用热继电器作过热保护，用零电压保护防止电动机自起动。为了防止励磁消失，在励磁电路中串入零电流继电器，但它不能很好地防止过低励磁造成的超速现象，为此有时用转速继电器来防止超速。

WWW.FEWORLD.CN

电动机常用按钮组合控制，在重复短期工作制的电动机中用主令控制器操作。串励电动机由于操作频繁普遍用主令控制器操纵。

二、串励电动机的起动和调速

串励电动机的起动和反转与并励电动机相同，为了限制起动电流，仍需要在电枢电路接入起动电阻，但它的起动性能要比并励电动机好。串励电动机的调速原理和并励电动机基本相同，当串励电动机采用改变磁场 Φ 的方法来调速时，则磁场变阻器 R_t 必须与串励绕组并联，如图 4-50 所示。当磁场变阻器的阻值减小时，通过变阻器的电流增大，而通过串励绕组的电流减小，其所产生的磁通 Φ 也随之减小，由转速公式

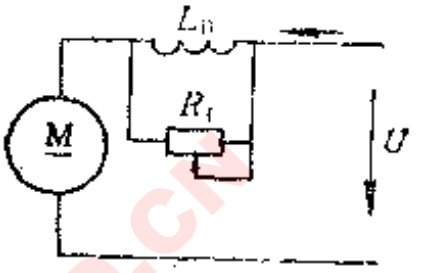


图4-50 串励电动机的调速

L_D—串励绕组

$$n=\frac{U-I_a(R_a+R_t)}{C\Phi}$$

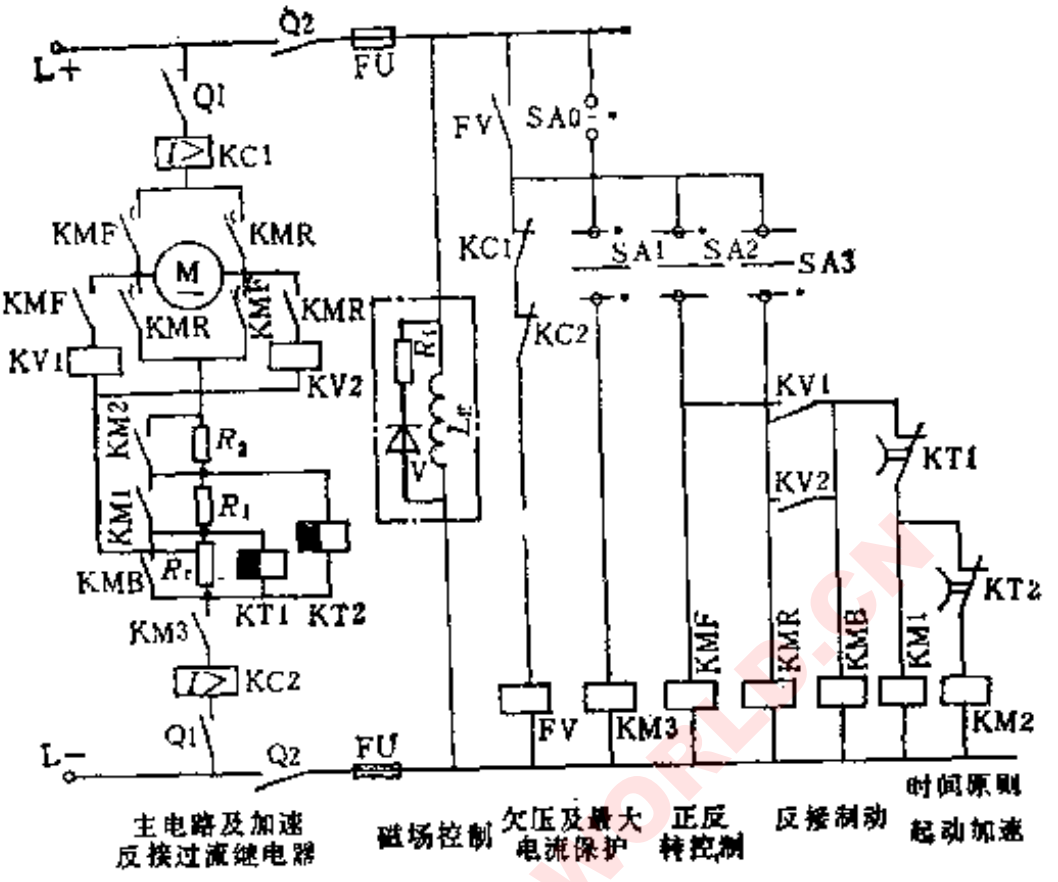
可知，转速 n 便升高，反之，则磁通增大，而转速下降。

串励电动机转速调节也可以用电枢串入电阻，这种方法比较常用。起动电阻用于调速时，电阻发热量应按长期工作计算。

§4-7 直流电动机控制线路举例

图4-51所示线路适用于频繁操作的直流电动机，是利用改变加在电枢上的电压极性实现正、反转的控制电路。

该线路有两级起动电阻，也可以采用更多级的起动电



	后	0	前
SA0	–	×	–
SA1	×	–	×
SA2	–	–	×
SA3	×	–	–

图4-51　直流电动机正、反转控制电路图

阻，但要相应增加接触器和继电器的数目。电动机反向时，先进行反接制动，然后进入反转。反接电阻的切除由电压继电器 KV1、KV2控制进行。线路中还有过电流及失压保护。线路不能进行调速，如果有需要，只要在接触器 KM1、KM2及 KM3 的线圈中串入相应的主令控制器触头即可实现。

控制线路的工作原理如下。

1．正向起动

此图是直流电动机按时间原则起动、按电动势原则反接制动的控制电路。按时间原则起动，就是以时间继电器预先整定的时间，逐级切除各段电阻，从而实现减压起动的目的。

合上开关Q1、Q2，主、辅电路均通电，L_E建立磁场，SA在“0”位，欠压继电器FV吸引并自保，起动准备。当SA1、SA2接通时，接触器KM3、KMF动作，接通主电路，使M在全电阻串联情况下起动。与此同时，时间继电器KT1、KT2和电压继电器KV1得电，KMB吸合，切除反接电阻R_f；KT1延时释放，加速接触器KM1吸合，切除起动电阻R_1；KT2延时释放，加速继电器KM2吸合，切除起动电阻R_2，正向起动完毕。

2．反转过程

主令控制器SA由“前”推向“后”，经过“0”位时，SA1、SA2断开→接触器KM3、KMF、KMB及加速接触器KM1、KM2释放→KV1释放。向“后”，SA1、SA3闭合→接触器KM3、KMR吸合，反接制动→时间继电器KT1、KT2吸合，转速接近零→电压继电器KV2吸引→接触器KMB吸合→时间继电器KT1延时释放，切除反接电阻R_f，电动机开始反向起动→加速接触器KM1吸合，切除R_1→时间继电器KT2延时释放→加速接触器KM2吸合，切除R_2，反向起动完毕。

由反转到正转的过程与上述过程相似，这时，制动过程的控制是由电压继电器KV1进行的。

3．停车

如果在电动机运转时，直接将主令控制器推到“0”位，则电动机在没有制动情况下自由停车。需要进行反接制动时，必须按反转过程的操作步骤。首先将主令控制器推向“后”，等电动机转速为零时，再将主令控制器返回“0”位。

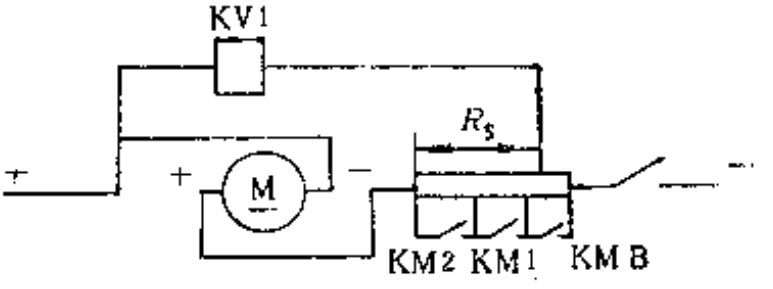


图4-52 用电压继电器KV1控制反接制动的原理图（R_S是动作电阻）

线路中某些元件的作用 电压继电器KV1、KV2是用来反映电动机感应电动势的变化的(图4-52)，它们的任务有三点：电动机由不动状态起动时，应马上短接R_1（继电器吸合）；电动机在不同转速下反向时，应接入反接电阻R_1（继电器释放）；电动机制动到转速接近于零时应短接反接电阻R_1（继电器吸合）。其中KV1在电动机由反转到正转时接入线路；KV2在电动机由正转到反转时接入线路。为了保证上面三点要求，必须正确选择继电器在R_1上的联接点，以及正确整定它们的动作值。

电流继电器KC1、KC2都用作短路保护。KC2用于保护电枢电路各元件及接线与正极之间的短路，为此还增加了一个接触器KM3；KC1用以保护电枢电路各元件及接线与负极之间的短路。两个继电器的线圈都要接得尽量靠近电源，以扩大保护范围。

R_T是并励磁场L_E的放电电阻，在容量较大的电动机上，为了避免R_T上经常流过电流，所以串入了半导体二极管V，V的极性必须保证控制电源接通时不导电，而在切断

WWW.IFSWORLD.CN

Q2时，磁场的放电电流能通过。

KMF及KMR都是单极的接触器(常选CZO-600/10)，所以，通过线圈并联，将两个接触器当一个用。在主电路中，把它们的触头中带磁吹线圈的一面（即静触头）靠电源联接，因为静触头为灭弧罩所遮，在电动机不工作时，减少了接触带电部分的危险。

§4-8 晶闸管-直流电动机的调速

直流电动机的调速，可以采用改变电枢电压和励磁绕组的电压来实现。晶闸管直流调速装置结构简单、效率高、工作可靠、控制精度高，因此获得了广泛的应用。

图4-53是一种直流电动机晶闸管整流无级调速系统，是通过改变电枢绕组电压来实现调速的。

一、主电路

主电路中整流变压器T1的一次侧经接触器K1和控制按钮S1、S2进行控制，与220 V交流电源联接。T1的二次侧输出127 V交流电压，经全波桥式整流器U1整流后输出直流，再经晶闸管V1进行调压后供给直流电动机M1。电容器C_1与电阻R_1组成V1的阻容保护环节，以防止晶闸管受过电压损坏。二极管V2的作用是阻隔M1的反电动势，使M1在低速运转时电流连续，运转平稳。直流电压表P1和直流电流表P2用来测量主电路中的电压和电流。M1的励磁绕组也由U1直接供电，励磁电流通过调节电阻R_{14}进行调节。M1与测速发电机G1硬轴联接，进行测速反馈，稳定M1的转速。电位器R_2和R_3把M1的端电压经电容器C_3进行微分反馈，当电压波动引起M1转速变化时，起稳定转速的作用。

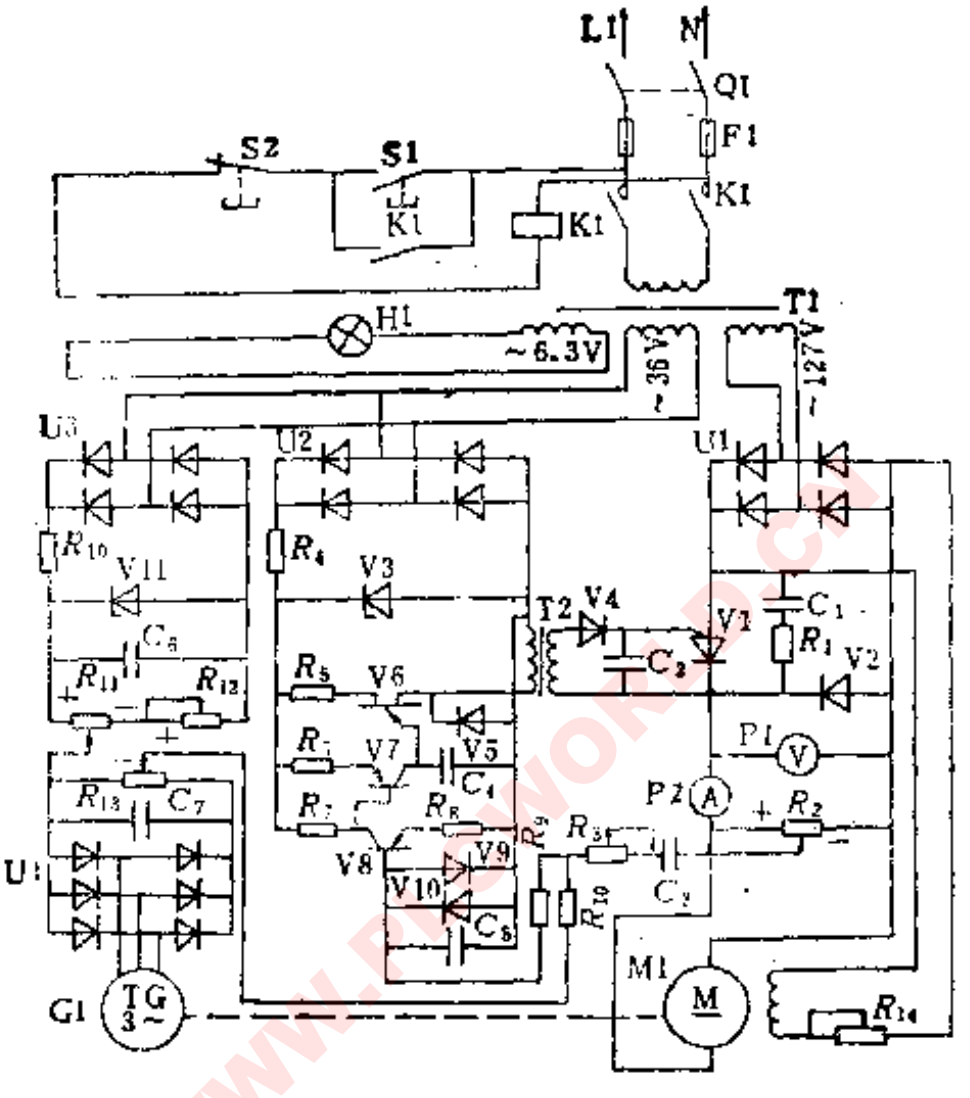


图4-53　晶闸管直流调速电路

二、触发电路

晶闸管的触发电路采用具有放大环节的单结晶体管V6触发电路。由T1的二次绕组输出的36 V交流电压，经整流桥U2整流、稳压管V3稳压后作为控制电路的工作电源。V3使单结晶体管V6得到过零的梯形波，以保证输出脉冲与主电路的电压同步，并使输出脉冲的幅值一定。

控制电路的输入信号经电容器C_3滤波后加到晶体管V8

的基极与发射极之间。二极管 V9、V10 起正向限幅作用，V8 作为前置放大，再把输出信号加到 V7 的基极上。

V6、V7、C_4 和脉冲变压器 T2 等元件构成触发电路。工作时，C_4 经 V7 充电，当达到 V6 的峰点电压时，V6 导通，C_4 经 T2 放电，于是 T2 的二次绕组输出脉冲去触发晶闸管 V1 导通。当 C_4 放电后电压逐步降低，达到 V6 的谷点电压时 V6 截止。这一过程不断重复连续对 V1 进行触发。当改变 V7 的基极电位时，输出脉冲信号将产生相移。这样 V1 输出直流电压得到了调节，M1 就实现了无级调速。V7 的基极电压是由给定信号决定的，所以只要调节给定信号，就可改变输出脉冲信号的相位。电阻 R_5 是温度补偿电阻；V4 的作用是防止负脉冲送到 V1 的控制极；C_2 的作用是防止干扰信号。

给定信号电路的电源也是由 T1 的二次绕组供电，电压为36 V。它是经整流桥 U3 整流后，由稳压管 V11 稳压，经电容器 C_6 滤波而得。给定信号电压的大小，可用电位器 R_{11} 与 R_{12} 进行粗调和细调。

三、反馈电路

测速反馈电压采用负反馈，由测速发电机 G1 输出并经整流桥 U4 整流和 C_7 滤波后加到电位器 R_{13} 上。反馈量大小由 R_{13} 调节，给定信号与测速反馈信号的差值（反馈信号的电压与给定信号的电压方向相反）再减去电压微分负反馈信号即为控制电路的输入信号。如果电动机的负载增大，引起电动机转速下降（$n \downarrow$），这时，测速发电机的输出电压将减小，即负反馈信号减小，控制电路的输入信号增加，晶体管 V7 的基极电位下降，发射极电流增大，使触发脉冲信号前移，故晶闸管整流输出电压上升，使电动机的转速上升，

即保证电动机的转速不因负载增大而下降过多。测速反馈的作用就是当电动机 M1 的转速变化时（可能是负载变化引起或是电压波动引起 M1 转速变化），起稳定转速的作用。

电源指示灯 H1 由 T1 的一个二次绕组供电，电压为 6.3 V。

§4-9 机床电气线路的维护与检修

机床电气设备运行中常会发生各种大小故障，它们会引起机床停车而影响生产，严重的还会造成事故。电气故障部分是由于电机绕组、电器线圈烧坏或主回路元件绝缘击穿短路而引起的。这类故障常有显著的冒烟、过热等外部征兆。但大多数故障是由于控制线路中元件调整不当、动作失灵或小零件损坏而引起的。这类故障没有显著的外部征兆，要找出故障的原因，常要花较多的时间，影响生产。因此，迅速找出故障点是维修工作的一个重要环节。

下面举例分析检查机床电路故障的一般方法。

（1）向操作者了解故障经过情况，了解故障前后的工作状况及具体"症状"。

（2）根据故障现象，从原理图上进行分析，确定故障发生的区段与可能范围。

（3）确定故障区段后，对有关元件进行外表检查。如检查开关、熔断器、继电器、电容器、电阻器等的接线端有无脱落、烧痕，检查线路有无断线或绝缘击穿，线圈是否烧坏等。

（4）利用万用表或试灯检查元件是否通路，线路是否断路，电流、电压是否平衡正常。

（5）试验控制回路的动作顺序。首先切断主回路电

源，仅在控制回路带电下进行试验，操作某一只按钮或开关时，观察线路中各只继电器、接触器是否按规定的顺序动作。若依次动作至某一元件发现动作不符，即可发现故障，直至把故障全部排除为止。

（6）用代换可疑元件、局部输入信号的方法，也能帮助确定机床线路故障区段以至故障的确切部位。

如何灵活运用上述检查方法，是保证迅速排除故障的关键。

排除故障后，要总结经验，作出修理记录，以便今后再出现这种情况时能迅速处理。

从上述分析，可以看出机床电气线路的维修人员，要顺利准确地排除电气线路的故障，必须首先弄通机床电气原理图及电气元件的结构形式；其次要结合实际，弄清楚电器所在机床的部位，起什么作用，特别是与机床有电气联锁的元件，在此基础上分析检查机床电路故障就容易多了。

检查其他电气线路的故障，也可参照上述方法进行。

练 习 题

4-1 刀开关为何不能用以切断较大电流的电路？操作刀开关时动作应当迅速还是缓慢？为什么？

4-2 低压断路器有什么用处？如何选用？

4-3 工厂常用的熔断器有几种形式？选择熔丝的原则是什么？

4-4 试述热继电器的动作原理。为什么它只能用来保护电动机过载而不能用来保护短路？

4-5 今有一台异步电动机，用380V电源供电，功率为15kW，功率因数为0.83，效率为0.81，若采用熔断器作短路保护，应如何选择？

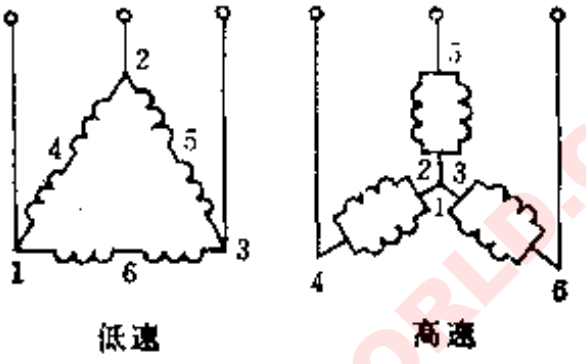
4-6 交流接触器的铁心为什么要装短路环？交流接触器频繁操

作，线圈为什么会发热？

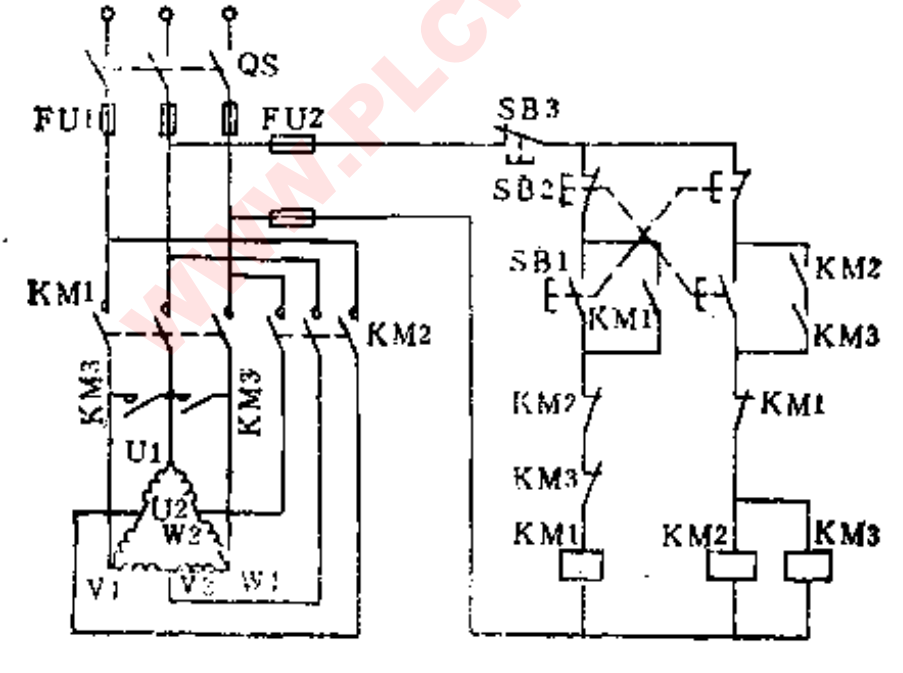
4-7　交流接触器送电后，由于某种故障使衔铁不能闭合，动铁与静铁间保持较大间隙，这时会产生什么异常现象和不良后果？直流接触器如果产生同样故障，后果又怎样？

4-8　在电动机的主电路中已经装有熔断器，为什么还要装热继电器？它们各起什么作用？

4-9　磁力起动器与接触器有何不同？各有什么保护作用？什么



a）



b）

图　4-54

a）双速电动机定子绕组的接线方法　b）双速电动机的控制线路

WWW.PLCWORLD.CN

情况下选用磁力起动器或接触器？

4-10　何谓电动机的保护？主要有哪几种？

4-11　怎样实现笼型电动机在多点进行起动、停止的控制？试绘出这个控制电路的展开图。

4-12　有两台电动机M1和M2，（1）M1先起动，经过一定时间后M2才能起动；（2）M2起动后，M1立即停车。试画出控制电路。

4-13　试分析图4-54双速电动机的控制线路的工作原理。

4-14　为了显示三相电路中某一相熔断器熔断，在每一相熔断器两端都并联一个发光二极管，如图4-55所示，试说明其原理。

4-15　试在图4-56画出绕线转子异步电动机的起动控制线路，其转子外加电阻只用一段。

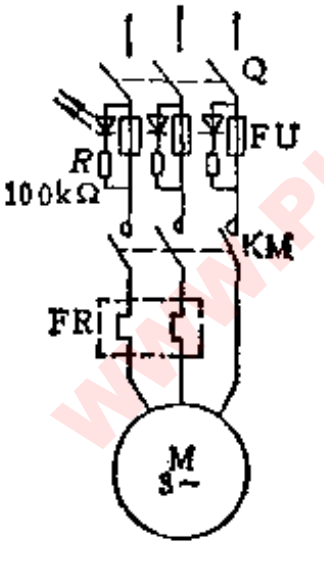


图　4-55

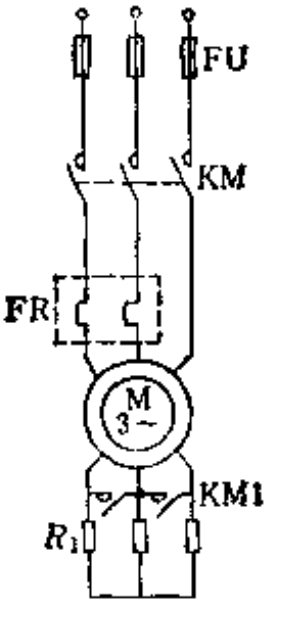


图　4-56

4-16　试分析三相电动机一相断电的保护电路（利用中性点电压变化保护方式），见图4-57所示。

4-17　高压异步电动机和低压异步机的起动装置（直接起动）与保护装置有何异同？加以比较。

WWW.PLCWORLD.CN

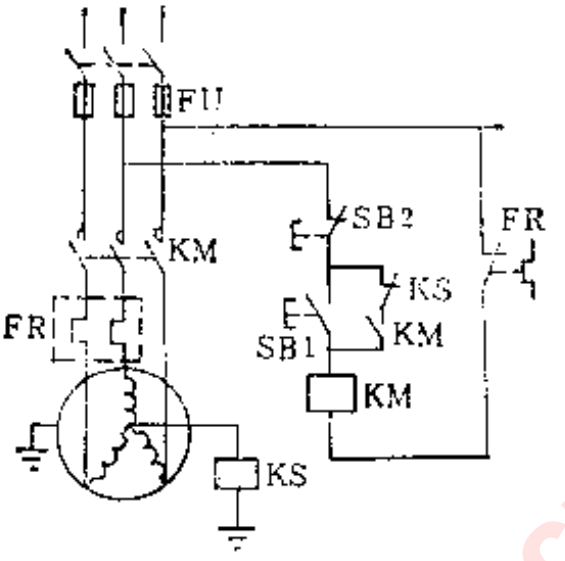


图 4-57

4-18 某生产机械要求既能连续工作，又能“点动”工作，试绘出电动机的控制电路图。

4-19 在改变电枢电阻调速时，调速电阻 R_T 变化后，电枢电流 I_a 和电动机转矩 T 有没有变化？为什么？

4-20 一并励电动机在额定负载下的电枢电流 $I_N = 26.6\,A$，端电压 $U_N = 110\,V$。如果直接起动，则电枢绕组的起动电流 $I_{ST} = 390\,A$，为了把电枢绕组的起动电流限制为 $I_{ST} = 2I_N$，问应接入多大的起动电阻 R_{ST}？

4-21 在起动直流电动机时，常使串联于励磁回路的变阻器短路掉，这是为什么？若在起动时，励磁回路内串入较大的电阻，会发生什么现象？

WWW.PLCWORLD.CN

第五章　工厂变电所主要电气设备及其安装与调整

§5-1　工厂供电概述

电力系统通常由发电、输电及配电系统构成。发电厂三相交流发电机产生的电压是6 kV、10kV，经过升压变压器将电压升高后输送出去。根据输电距离的远近及输电容量的大小，升高后的电压可以为35、110、220、330、500kV以至更高。输电距离越远，输电容量越大，则输电电压就越高。在用户地区设置降压变压器，将电压降低后送到工厂的配电变压器，由配电变压器将电压降到380 V及220 V，供大多数低压负载使用。

图5-1为由发电厂经输电线路至工厂车间的发电、输电、配电系统简图。图中输电线均用单线表示。

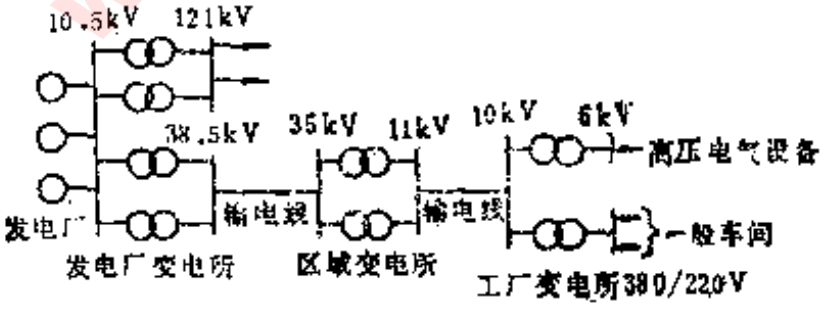


图5-1　输配电系统简图

工厂供电系统由供电电源、总降压变电所、高压配电线路、车间变（配）电所、低压配电线路及高、低压用电设备

组成。图5-2是大型工厂供电系统图。

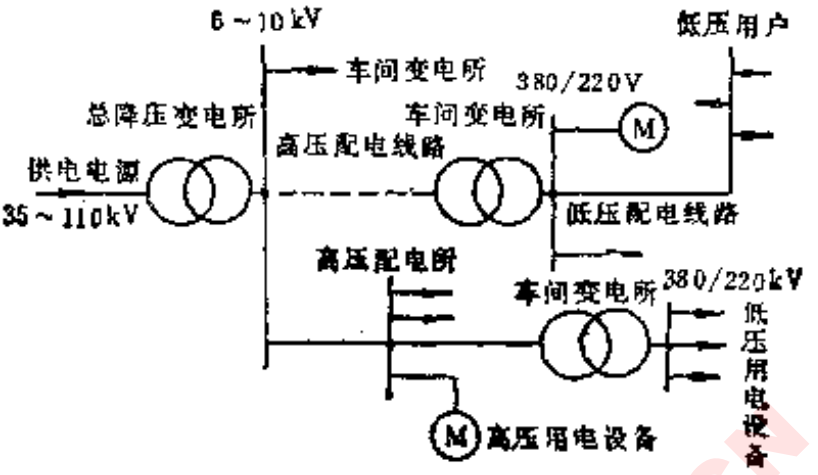


图5-2 大型工厂供电系统示意图

不是所有的工厂供电系统都必须包括上述所有部分，而是根据工厂的总负荷、生产车间的配置、厂区内的配电方式以及地区电网的供电条件等来确定其组合。

工厂供电可靠性的程度，是由工厂用电负载的性质及对供电可靠性要求的不同决定的，我国将工业企业的电力负荷按供电可靠性的程度分为三类。

（1）一类负荷(一级负荷)：如果突然停电，会引起人身伤亡或使生产设备损坏，产生大量废品，造成生产混乱，给国民经济带来重大损失或者造成重大政治影响。对这类负荷，应由两个独立的电源供电，以保证连续供电。

（2）二类负荷：供电中断会造成连续性生产遭到破坏，会引起生产严重减产，设备停止运行后恢复生产比较困难。这类负荷的供电，一般应采用双回路，当负荷容量较小或双回路供电确有困难时，也可以由一回路专用线供电。

（3）三类负荷：如果停电，除使产量减少外，并不致造成其他不良影响。这类负荷对供电可靠性无特殊要求，一

般都是一个电源供电，容量很大时，根据电源条件也可采用双回路供电。

就一个具体的工厂来说，各类负荷各占多少，与工厂的类型有关。一般而言，冶金、煤矿、石油化工等企业的一、二类负荷较多，而一般化工厂、机械加工企业则二、三类负荷居多。对于具体的电力负荷，应按哪类负荷供电，要经过经济技术比较而定。

工矿企业供电系统的接线方式与电压等级和该企业负荷配置、负荷类型、负荷大小等因素有关。大型工矿企业由于容量大，供电电压可达110kV；中型企业为了供电的经济性，将配电电压提高至35kV；一般中小型工厂以10kV（有高压电动机时，用6kV）为高压配电电压，低压配电电压通常采用380/220V。目前大多数工厂是以10kV级电压供电。

§5-2 工厂变电所的类型与主接线

工厂供电系统中变、配电所是十分重要的环节。变电所是接受电能、变换电压、分配电能的场所。配电所中没有变压器，它只是接受电能和分配电能，因此有时又将配电所称为开关所。

配电所通常是建立在6～10kV电网中，向各车间变电所或高压用电设备分配电力，它有时是企业变电所与地方性变电所之间的中间环节。有了它，可以减少从地方性变电所引出的馈线（架空线或电缆）数量，并可以减少馈线长度，减少线路走廊的面积，从而减少电网的投资。

工厂内电力的输送与分配，是由母线、开关、配电线路、变压器等组成供电电路，这就是供电系统的一次接线，

即主接线。供电电路常画成单线系统图，也就是用单线代表三相系统。

一、变电所的类型与主接线

降压变电所按它的重要性、供电范围及一、二次电压等级分为两大类：①区域性变电所；②地方性变电所。工厂企业的变电所属于地方性变电所。变电所一次接线的确定对变电所电气设备的选择、配电装置的布置以及变电所运行的可靠性、灵活性、安全性与经济性有很密切的关系。

（一）变电所主接线应满足的基本要求

（1）主接线要保证供电的可靠性。

（2）主接线要符合国家标准和有关技术规程的规定，保证安全运行；当部分设备检修时，尽可能地减少停电范围，充分保证人身和设备的安全。

（3）主接线要尽量简单、清晰，操作方便，具有一定灵活性，以适应各种不同的运行方式，便于检修、切换操作。

（4）主接线要留有发展的余地。

（5）在满足技术要求的前提下，要尽量减少投资费用，并使运行费用最低。

（二）6～10kV 工厂变电所主接线，一般遵循下列原则

（1）变、配电所的高压及低压母线，一般选用单母线或单母线分段的接线方式。

（2）从工厂外引至工厂变电所的电源进线侧，属于下列情况之一时，应装设断路器。

1）需要带负荷切换电源；

2）对继电保护或自动装置有要求；

3）配电所总出线在10回路及以上。

（3）采用分段单母线接线时，可以用隔离开关分段；当出线回路较多，对操作切换或继电保护有要求时，则用断路器分段。

（4）6～10kV 配电线路的出线侧，在架空出线或有反馈供电可能的出线中，要装设线路隔离开关。

二、几种典型的变、配电所的主接线

（一）单母线接线

当供电可靠性要求较高、负荷较集中、有两台或两台以上的变压器并考虑发展，采用高压侧单母线而低压侧单母线分段的接线方式，如图5-3所示。

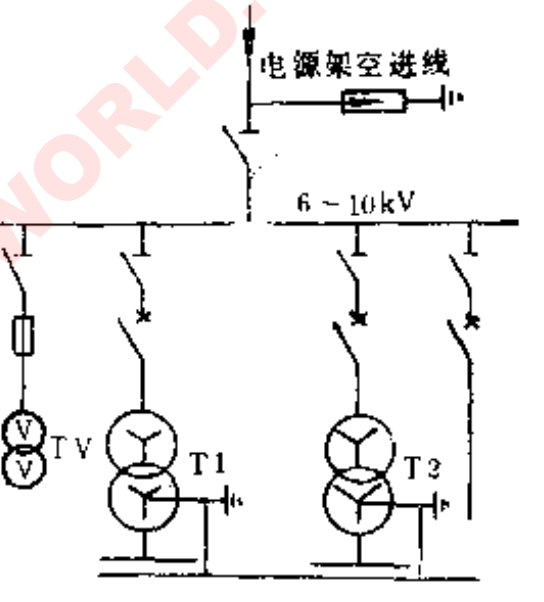


图5-3　变电所高压侧单母线接线

TV—电压互感器

单母线接线的优点是：主接线简单，使用的电气设备少，操作方便，配电装置的建造费用低。

单母线接线的主要缺点是：①当检修母线和任一个母线的隔离开关时，会造成全厂停电。②当母线和母线隔离开关短路以及断路器的母线侧发生故障时，将造成全厂停电；检修电源进线也将使全厂停电。③检修引出线回路的电气设备时，该回路被迫停电。

单母线的接线方式可供电给少量二类、大量三类负荷。如果有与其他变电所相联的高压或低压联络线作为备用电

WWW.PLCWORLD.CN

源，可靠性大大提高，可给容量不大的一、二类负荷供电。

（二）分段的单母线接线

用断路器分段的单母线接线方式，可以提高单母线接线的供电可靠性和灵活性。主接线见图5-4。中等容量的工厂降压站和总配电所、大型车间变电所常用这种接线方式。

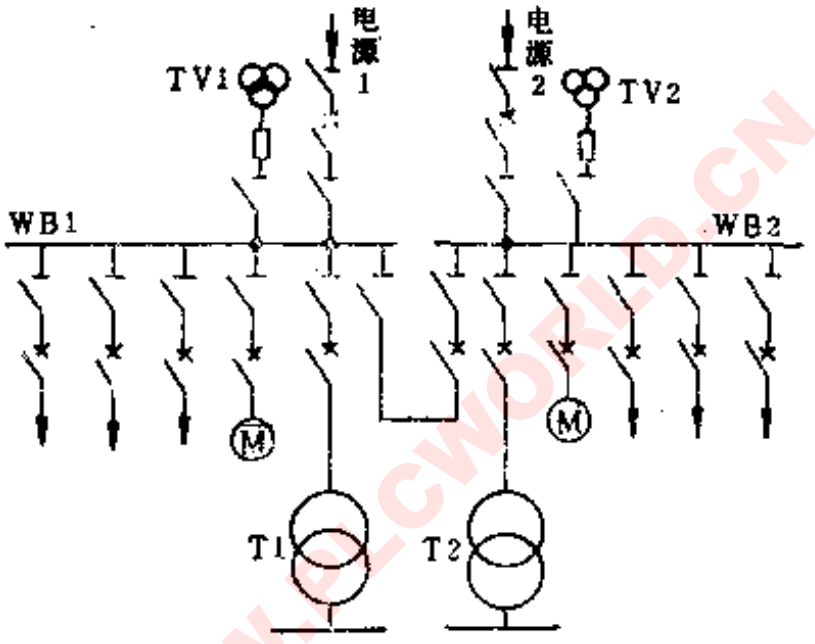


图5-4　变电所单母线分段接线

WB1、WB2—母线1、母线2

分段单母线的主接线可以有两种运行方式：一种是正常运行时断路器接通，分段母线并列运行；另一种是正常运行时断路器断开，这时分段母线分别运行。

采用分段断路器断开的运行方式，再配备必要的继电保护和自动装置，当任一路进线出现故障而停电时或线路突然断电，依靠继电保护和自动装置的作用，将母线分段断路器自动合上，使停电的母线段恢复供电。这个切换操作可以在1 s内完成，因而大大提高了供电的可靠性。当变电所的高

压侧和低压侧均采用单母线分段进线，则其供电可靠性与灵活性将大为提高。这样的主接线也完全能适用于少量不重要的一类负荷和容量较大的二类负荷。

分段单母线主接线的特点是：①一段母线发生故障时，仅故障段被切断，非故障段仍可继续运行；②重要的车间或电气设备，可采用不同分段引出的两回路供电，以保证可靠地向重要负荷供电；③当一路电源出故障或检修时，不影响全厂的供电；④当母线的一个分段发生故障或检修时，必须断开这个分段的电源和引出线。

（三）桥式接线

当工厂总降压站有两台大容量主变压器和两路电源进线时，且电压等级为35kV及以上，为了提高供电的可靠性，

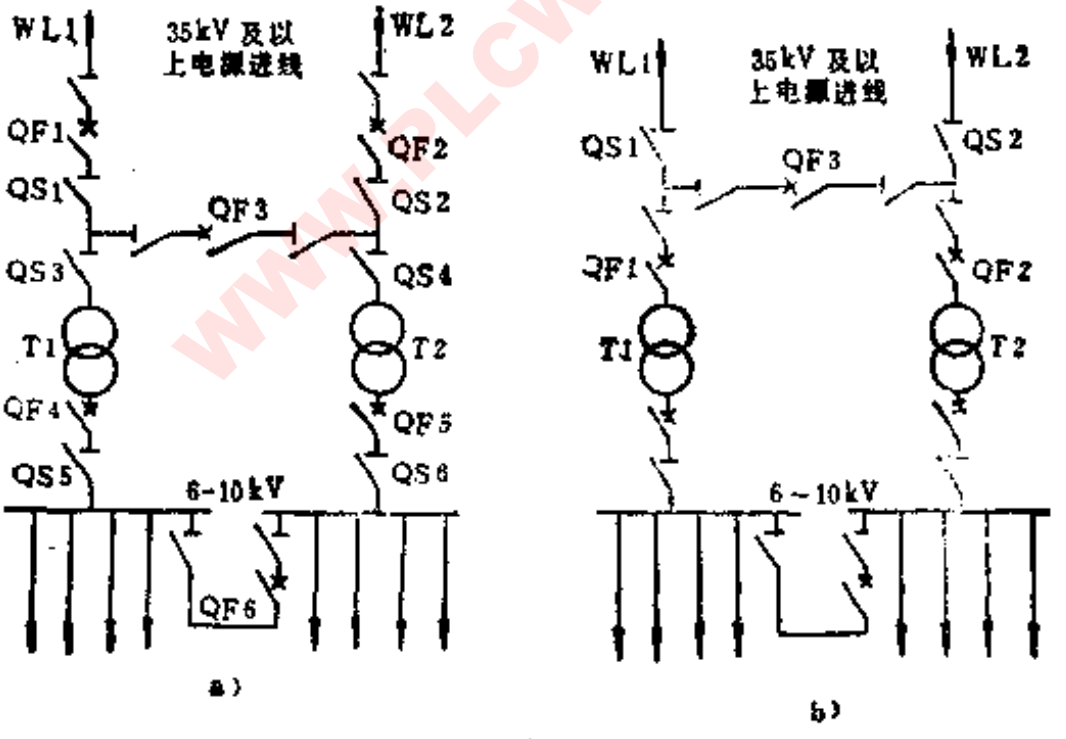


图5-5 桥式接线

a）内桥式接线 b）外桥式接线

WL1、WL2——进线1、进线2

可以采用桥式接线。“桥”就是在两路电源进线之间的横向联接。由于联接桥的位置不同，可分为内桥接线和外桥接线，桥式接线适用于不重要的一类或容量较大的二类负荷，如图5-5所示。当跨接桥横联在供电线路断路器 QF1 和 QF2 内侧并靠近变压器时，称为内桥式接线，见图5-5 a 。桥接断路器在线路断路器 QF1和QF2的外侧，称为外桥接线，见图5-5 b 。

桥式接线的优点是工作可靠，操作灵活，使用的电气设备少，装置简单清楚，基建投资少。这种接线还能在增添部分设备后，扩展为单母线分段的主接线，为以后的发展留下了可能性。

（四）小容量工厂变电所的接线(高压侧无母线)

当工厂用电量较小，且负荷重要性又较低时，往往只用一台变压器由电网电压6～10kV降为400 V供电。这种接线方式结构简单，维修方便，投资也很低。车间变电所也常常用这种接线方式。变压器的接通或断开可以分别采用跌落式熔断器控制方式，隔离开关控制方式，负荷开关控制方式及断路器控制方式等，高压开关主要依据变压器的容量、操作的频繁程度以及保护的要求等因素来分类。图 5-6 是小容量工厂变电所采用跌落式熔断器控制方式（变压器容量

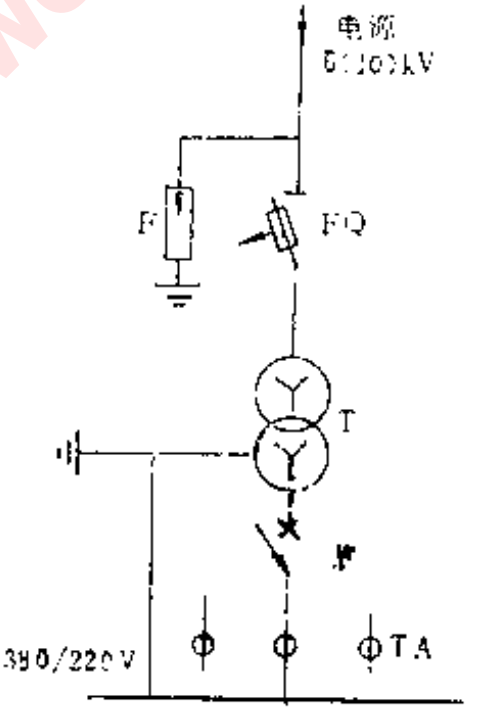


图5-6 跌落式熔断器控制方式接线

$S \leqslant 630kVA$）的接线图。

§5-3 工厂变电所的主要电气设备

工厂变电所的主要电气设备有断路器、隔离开关、负荷开关及高低压开关柜等（参见图5-3、5-4）。下面分别介绍它们的结构和原理，以便于正确、合理地选择和使用。

一、断路器

断路器（QF）是电力系统的重要组成元件，具有良好的灭弧性能，其作用是：既可以在带负荷状态下接通和断开电路，又能在故障短路电流下切断。

工厂变电所长期以来使用了各种类型的油断路器，油断路器按油量的多少分为多油断路器和少油断路器。

多油断路器的油箱体积大，油量多（根据型号不同，油量可达几百千克，甚至可达几十吨），绝缘油既作为灭弧介质，又是相间及相对地的绝缘介质。在少油断路器中，绝缘油只是灭弧介质，带电部分对地的绝缘由陶瓷或有机材料构成，其外壳带电。

由于绝缘方式的不同，两类高压油断路器在结构上有较大的差别。多油断路器需要大容积、高强度的金属油箱，使用的绝缘油油量较大，动、静触头与灭弧室经常浸没在绝缘油中，需与油箱壁保持一定的距离。因此，结构简单，可靠性高。但缺点是用油量多，金属消耗量大，故障时有发生燃烧或爆炸的危险。少油断路器的绝缘油用油量较少，通常用绝缘套筒作为贮油箱，并以瓷套对地绝缘。少油断路器的优点是结构简单、用油量少，系列性强。由于技术的改进，少油断路器的断流容量（切断短路电流的能力）不断提高，在工厂变、配电装置中已逐步取代了多油断路器。

由于电力系统容量不断扩大，电器制造技术的提高和对灭弧理论的深入研究，高压断路器的结构和性能都有极大程度地提高。近年来，无油断路器（磁吹断路器、压缩空气断路器、六氟化硫气体断路器、真空断路器等）的使用范围越来越广，并在相当程度上取代了油断路器。

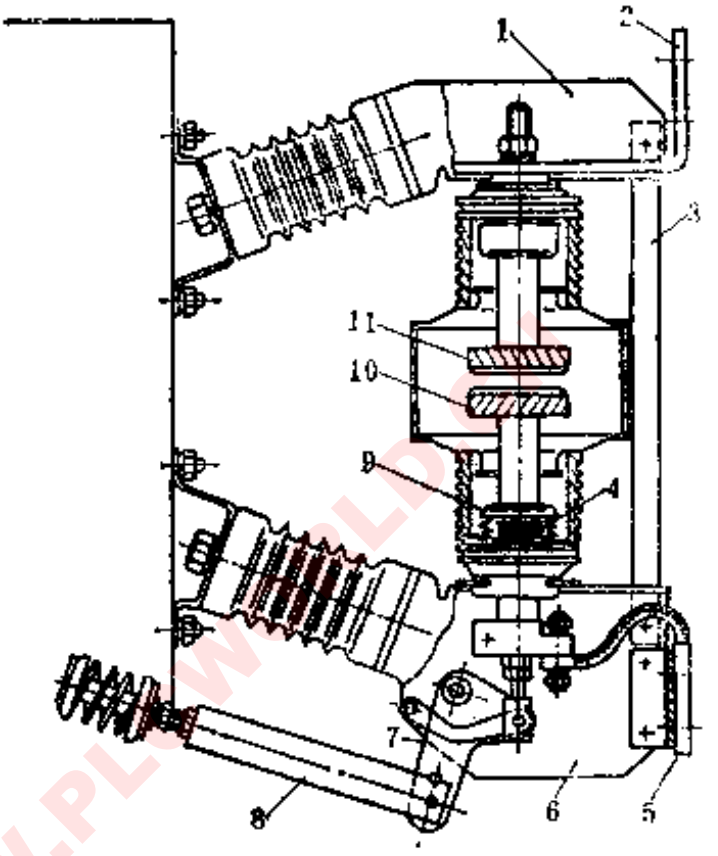


图5-7　真空断路器结构示意图

1—上支架　2—上端子　3—绝缘柱　4—波纹管　5—下端子　6—下支架　7—拐臂　8—绝缘杆　9—灭弧室　10—动触头　11—静触头

真空断路器是把触头装在一个真空容器（真空灭弧室）中，靠真空作为灭弧和绝缘介质。其结构示意见图5-7。在真空中，由于金属蒸气和带电粒子扩散而形成的电弧被迅速熄灭。真空灭弧室内的电弧在第一次电流过零时就熄灭了，所以燃弧时间只有半个周波。

真空断路器动作迅速、体积小、重量轻、触头寿命比油断路器触头寿命长、维护量小、噪声与震动小，特别适合于操作频繁的场合。由于没有绝缘油，在有爆炸和火灾危险的场所和高层建筑内也得到广泛应用。

六氟化硫（SF_6）断路器，用六氟化硫气体作为灭弧和绝缘介质，其结构见图5-8。

六氟化硫气体的灭弧能力约为空气的100倍，作为电弧等离子体具有最优越、最理想的灭弧特性。将这种气体的优异性能加以充分利用的六氟化硫断路器已逐步成为断路器家族中的重要成员。这种断路器绝缘性能好、灭弧能力强、断流能力大、体积小，在高电压和超高电压领域正显示其强劲的发展势头。

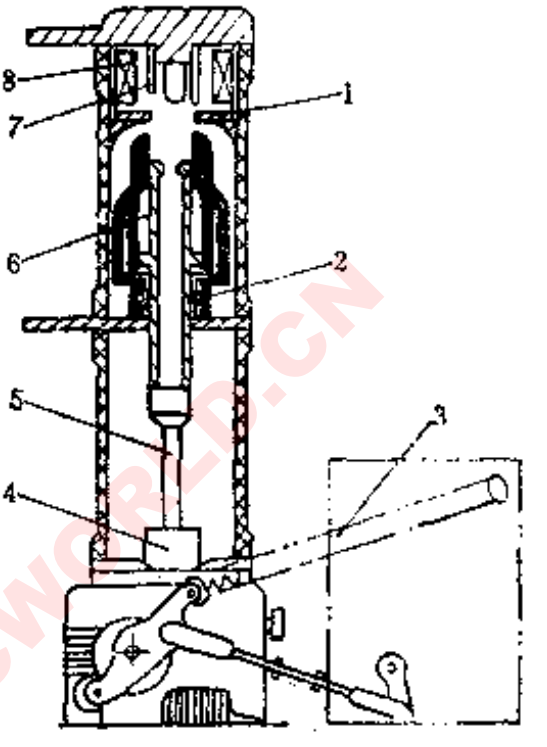


图5-8　10kV六氟化硫断路器
1—环形电极　2—中间触头　3—分闸弹簧　4—吸附剂　5—绝缘操作杆　6—动触头　7—静触头　8—吹弧线圈

考虑到工厂配电系统中使用较多的还是少油断路器，本书将重点介绍少油断路器的结构及其有关特性。

（一）SN10-10型少油断路器的结构

SN10-10型少油断路器是我国统一设计的产品，具有简单、坚固、体积小、重量轻、通用性强等特点，适用于固定式开关柜或安装在手车式开关柜内。目前，10kV级的少油断路器中，SN10-10型油断路器已取代老式的油断路器。由于老式的少油断路器结构复杂，安装后调整较困难，特别是发生短路故障时断流容量不够，往往发生爆炸或喷油事故。经国家主管部门决定，不再生产老式的少油断路器，凡新建和扩建的工厂变电所或老

WWW.HLCWORLD.CN

设备更新时，均应采用SN10-10型少油断路器。目前尚在工厂中使用的老式少油断路器，需经计算、复核，凡断流容量不够的，必须予以更换。

SN10-10型少油断路器的外形如图5-9所示。

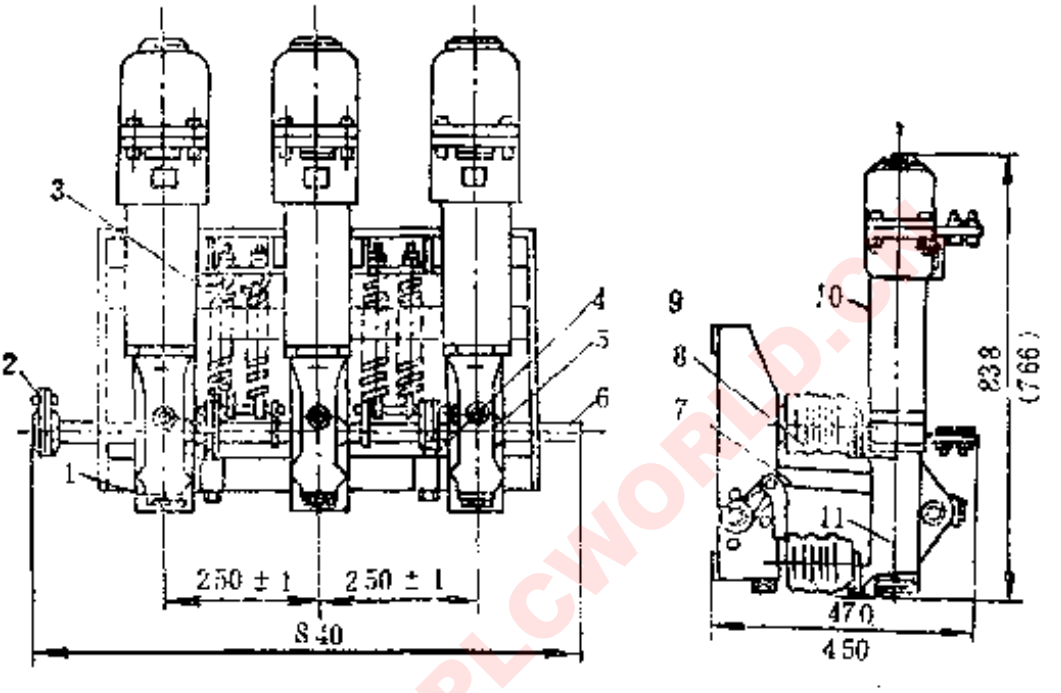


图5-9 SN10-10型少油断路器外形

1—油缓冲器 2—拐臂 3—分闸弹簧 4—弹簧缓冲器 5—拐臂 6—主轴 7—绝缘连杆 8—支持瓷套 9—支座 10—油箱 11—机构室（括号内数字是SN10-10/600型的尺寸）

SN10-10少油断路器的结构如图5-10所示。

SN10-10型断路器的导电回路如下：由上出线座进入，经瓣形静触头（梅花触头）7、导电杆19、滚动触头21后，由下接线柱22送出。

油断路器的框架是用角铁和钢板焊接成的。框架上有6个绝缘子，每个油箱固定在两个绝缘子上，以此作为油箱对地的绝缘。框架上有合闸缓冲器，用作合闸时的缓冲。

WWW.PLCWORLD.CN

油箱下部是高强度铸铁制成的底罩29，底罩下端装有油缓冲器的活塞杆28，当断路器分闸时，导电杆下端的孔正好插入活塞杆而起到缓冲作用。导电杆与下接线柱是滚动接触，滚动触头由触头架、紫铜滚轮和压缩弹簧组成。

导电杆19通过联臂与主拐臂25相联，导电杆上端装有可更换的铜钨合金触头。

在下接线柱上装有绝缘的高强度玻璃钢筒18。绝缘筒内装有几个用耐电弧塑料制成的灭弧室17，绝缘筒的上面装有压环15，用于压紧灭弧室。最上面的一片灭弧片靠中间喷口方向压着铁片16，其作用是在开断电流时，将动触头与静

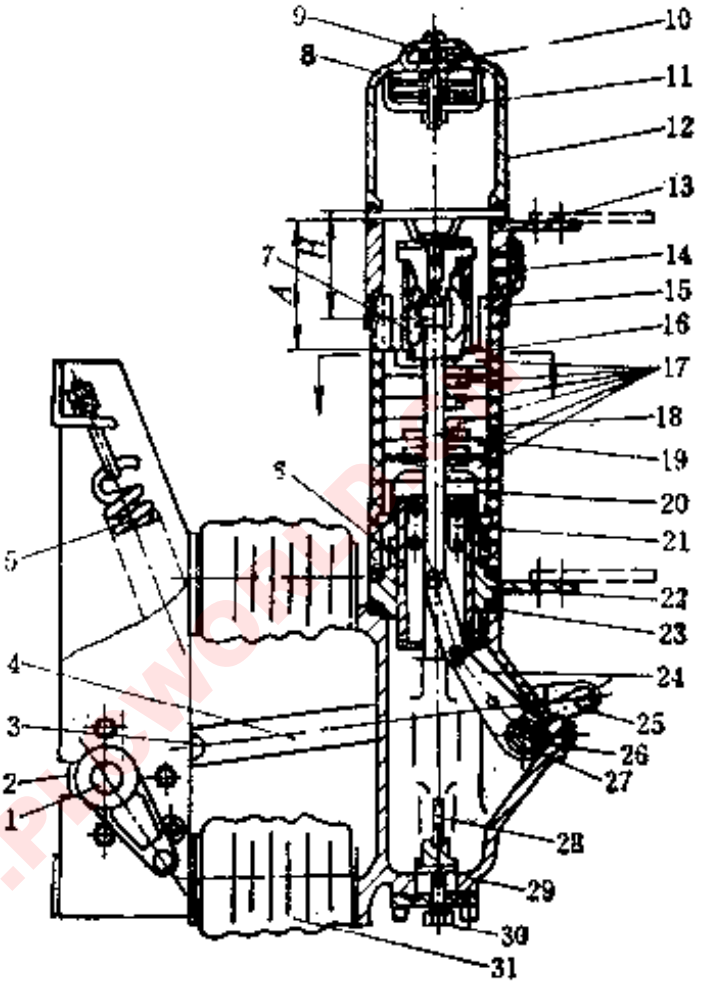


图5-10　SN10-10型少油断路器结构

1—主轴　2—拉杆拐臂　3—拐臂　4—绝缘拉杆　5—分闸弹簧　6—导杆　7—鳝形触头　8—六角螺栓　9—固定罩　10—螺钉　11—油气分离器　12—顶罩　13—上出线座　14—油位指示器　15—压环　16—引弧铁片　17—灭弧室　18—绝缘筒　19—导电杆　20—压环　21—滚动触头　22—下接线柱　23—密封圈　24—拐臂　25—主拐臂　26—弹簧销　27—转轴销　28—活塞杆　29—底罩　30—放油塞　31—支持绝缘子

触头之间的电弧拉向喷口，以减轻触头的烧伤。

在上出线座上端装有瓣形静触头7（俗称梅花触头）。在靠近吹弧口处的四片静触片镶有铜钨合金，上出线座外侧装有有机玻璃制成的油位指示器14，用以观察断路器内部油位的高低。

断路器的最上部是顶罩12，里边装有油气分离器11，顶盖有排气孔，侧面有注油孔，在静触头与顶罩之间装有逆止阀。

（二）SN10-10型少油断路器的灭弧过程

SN10-10型少油断路器采用横吹和机械油吹联合作用的灭弧结构，它的熄弧过程参看图5-11。

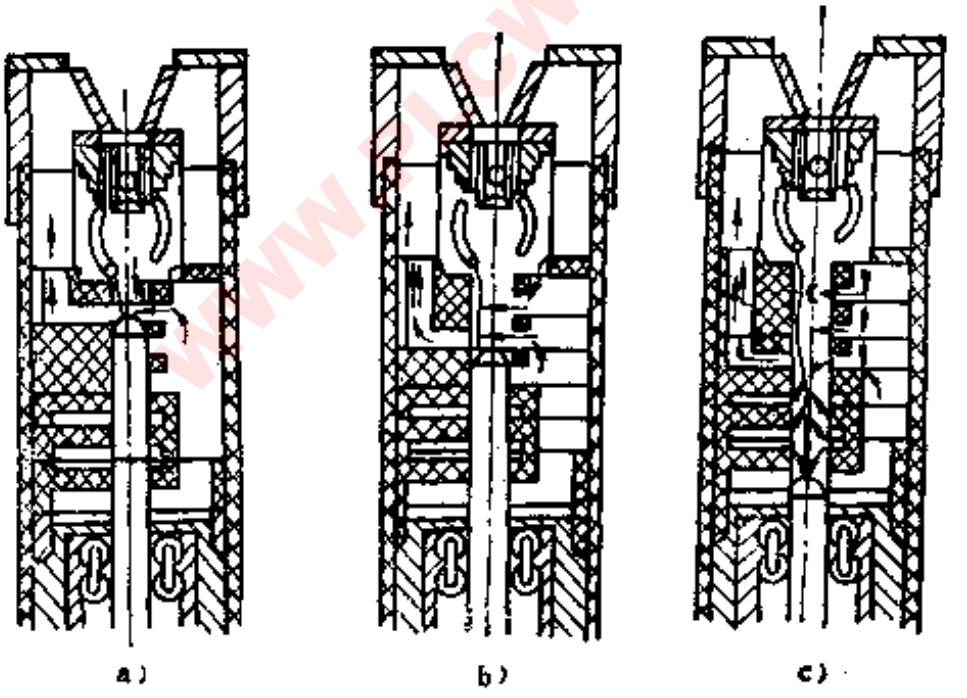


图5-11　SN10-10型少油断路器灭弧过程示意图

a)、b）切断大电流时的灭弧过程　c）切断小电流时的灭弧过程

WWW.FJCWORLD.CN

当断路器切断大电流时，导电杆迅速向下运动，动触头与静触头之间产生电弧。在电弧的高温作用下，电弧周围的绝缘油迅速分解成气体，灭弧室内压力升高，使逆止阀的钢球向上升起，堵住通向顶罩的通道，电弧就在几乎密闭的空间内燃烧，这样就有足够的灭弧压力，随即开始连续地吹气。由于导电杆向下移动，分别打开了灭弧室的各个横吹道和纵吹口，油和气体的混合体强烈吹动电弧，并将电弧分成数段，使电弧熄灭。

当断路器切断小电流时，导电杆向下运动，产生机械油吹效应，导电杆不断向下移动与下部的冷油接触，同时在灭弧室的纵吹口内形成附加油流，使电弧迅速熄灭。

（三）断路器的操作机构

断路器操作机构的作用，是使断路器接通并维持通路状态，或使断路器断开。操作机构可分为电磁操作机构、手动操作机构、弹簧储能机构以及液压、气压操作机构等。工厂变电所普遍采用电磁操作机构与手动操作机构，新建大容量工厂降压站已开始使用电动机驱动的弹簧储能机构。

小型变电所内，由于不设直流操作电源，断路器的操作大多配用CT8型弹簧操作机构。这种操作机构可以不专设操作电源手动合闸与分闸，还可以远距离控制脱扣和通过继电器分闸。

配油断路器用的直流电磁操作机构见图5-12。直流电磁机构主要由合闸电磁铁、传动部分及脱扣部分组成。它利用电磁铁的工作原理带动操作机构合闸、分闸。它的特点是动作迅速，因而可以带较大负荷合闸，并能实现远距离操作，适应继电保护和自动重合闸的需要。这种机构在大、中容量的工厂变电所内应用较普遍。

在图5-12中，B点受脱扣板、连杆和弹簧的制约。分闸时，脱扣器推动脱扣板向上运动，B点变为活动点。在分闸弹簧力作用下，滚轮脱离支架，D点跟着逆时针方向转动，带动触头分闸。合闸时，合闸电磁铁铁心向上运动，推动滚轮上升，带动D点顺时针方向转动，使断路器合闸。这种机构还有自由脱扣机构，当合闸时，正好又有分闸信号，脱扣板脱扣，B点成为活动点，滚轮脱离顶杆，使断路器分闸。

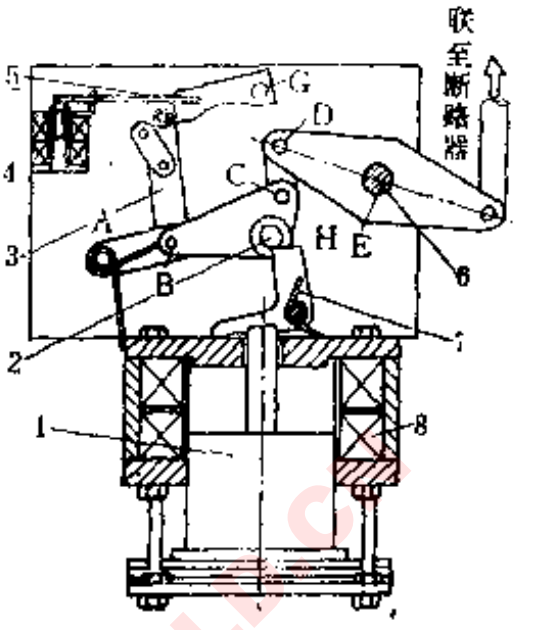


图5-12　直流电磁操动机构

1—合闸铁心　2—滚轮　3—自由脱扣机构　4—脱扣器　5—脱扣板　6—主轴　7—支架　8—合闸线圈

图5-13是电磁操作机构的动作原理示意图。它有一个合

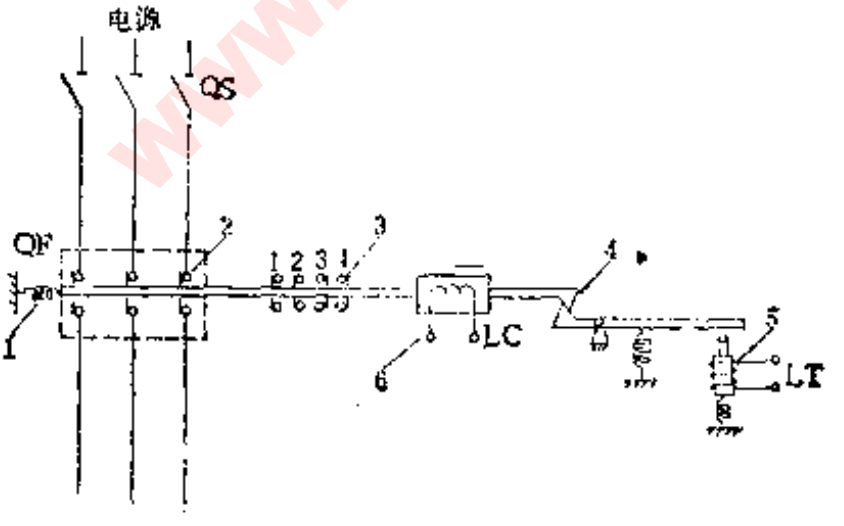


图5-13　电磁型操作机构原理示意图

1—弹簧　2—主触头　3—辅助触头　4—搭扣　5—跳闸线圈　6—合闸线圈

闸线圈 LC 和一个跳闸线圈LT，分别套在两个铁心上。当合闸线圈带电时，它所产生的电磁吸力就带动拉杆，通过一套传动机构带动断路器的主触头闭合，使主电路接通；同时，断路器所有常开辅助触头（联锁触头）接通，常闭辅助触头断开。此时，与传动机构联在一起的弹簧（又叫跳闸弹簧）被拉长。由于合闸线圈直接作用于拉杆，并且需要克服跳闸弹簧的拉力和传动机构的摩擦力，因此需要较大线圈电流（几十安至数百安），才能产生足够的电磁力。所以控制合闸线圈电流的合闸回路一般要由单独的电源供电，选用导线的截面也较大。

跳闸时，接通跳闸控制回路，使跳闸线圈LT中有电流流过，铁心吸上，撞动搭钩脱扣。在跳闸弹簧的作用下，主触头断开，常开辅助触头断开，常闭辅助触头闭合。由此可见，断路器跳闸时，主要是跳闸弹簧起作用。跳闸线圈的作用是吸动铁心撞击搭钩脱扣。因此，跳闸线圈所需的电流不大，通常只需要几安，跳闸回路就可以由控制母线供电。

二、隔离开关

隔离开关（QS）是工厂变电所中用得较多的一种电气设备，它没有专门的灭弧装置，不能用它来接通和切断负荷电流，更不能切断短路电流，只能在电气线路已被切断的情况下用来隔离电源。使用时，通常与断路器配合。

（1）隔离开关的主要作用是：①在检修设备时，将高压电源隔离，并保持明显可见的断开点，从而保证检修人员和设备的安全。如图5-14所示的电气接线图中，QF为断路器，QS为隔离开关，它们必须配合使用。若需要检修其中任一台断路器时，先使断路器分闸，再拉开装于断路器两侧的隔离开关，经检验确已断电后，在断路器的电源侧挂接地

线，检修人员才可以开始工作。②改变运行方式（如倒换母线等）。③接通和切断小电流的电路。

（2）隔离开关可以进行下述操作：

1）接通和断开电压互感器和避雷器电路；

2）接通和断开电压为35kV，长10km以内的空载架空输电线路；

3）接通和断开电压为10kV，长5km以内的空载架空输电线路；

4）接通和断开电压35kV、容量1000kVA及以下和10kV、400kVA及以下的空载变压器。

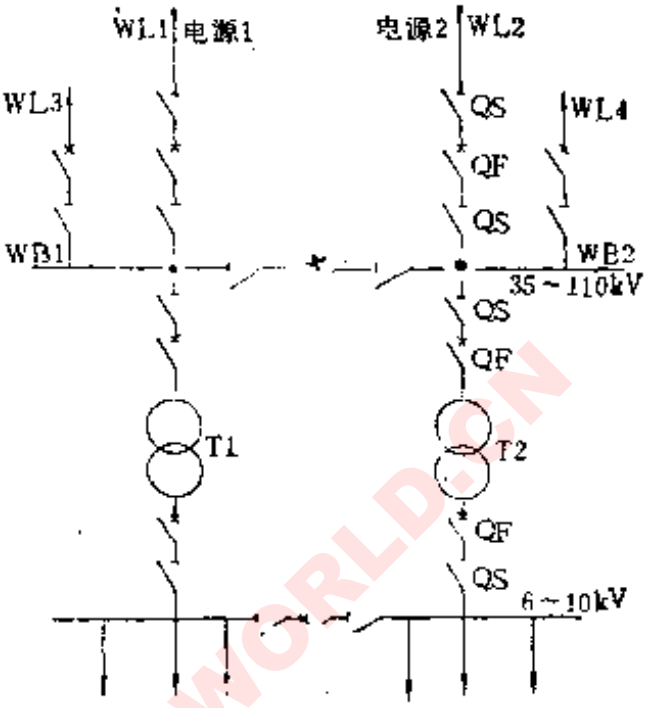


图5-14 隔离开关接线图

WL1、WL2—进线 WL3、WL4—出线

WB1、WB2—母线

隔离开关切断小电流时，要保证切断的变压器励磁电流（电感电流）和空载线路的电容电流不超过以下数值：额定电压6kV及10kV时，电感电流不超过4 A，电容电流不超过2 A；额定电压为20kV及35kV时，电感电流不超过3 A，电容电流不超过2 A。

图5-15所示是10kV、400A的GN2型户内式三极隔离开关及其安装图。

隔离开关一般用手动操作机构，这是因为它的结构简

WWW.PLCWORLD.CN

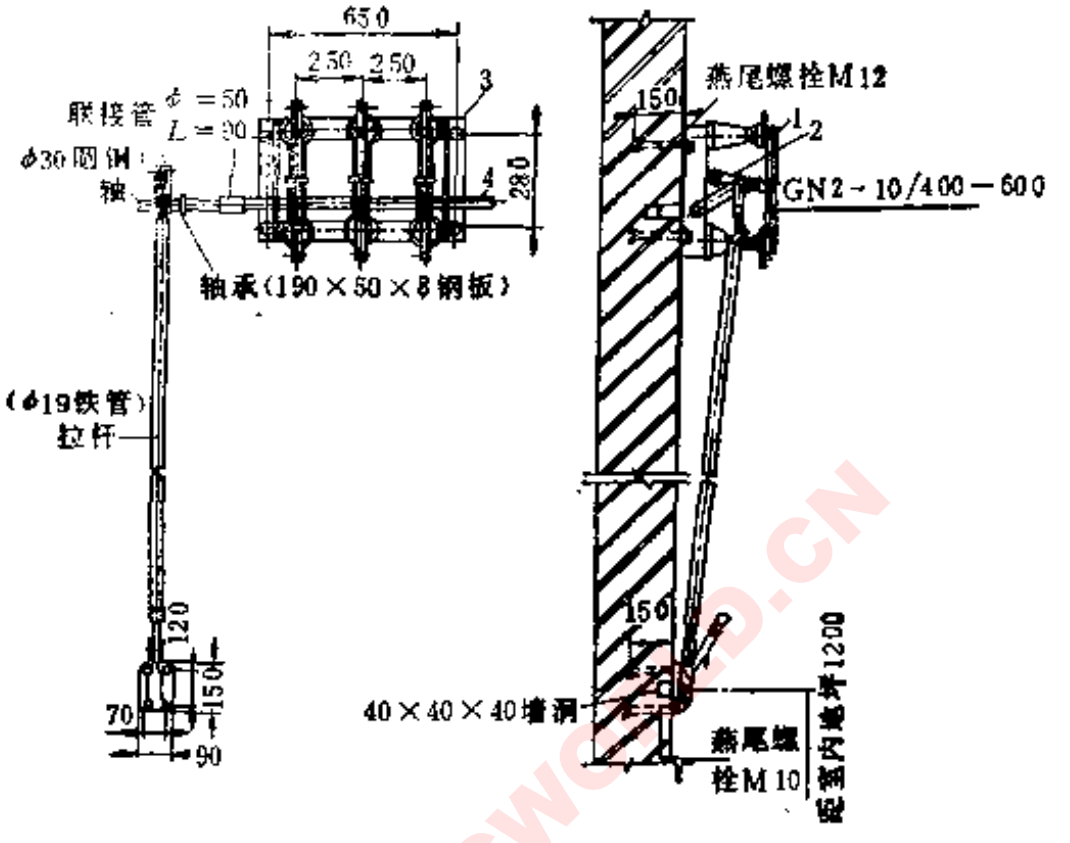


图5-15　GN2型隔离开关及安装图

单、价格便宜。手动蜗轮操作机构主要用来操作额定电流为3000 A以上的户内式重型隔离开关。电动操作机构适用于远距离操作，它主要用于需要在控制室操作的户内式重型隔离开关以及110kV以上的户外隔离开关。

在图5-15中，闸刀1是靠拉杆绝缘瓷瓶运动的，拉杆绝缘瓷瓶2与闸刀和转轴4上的拐臂铰接。操作机构通过钢管拉杆与轴4上的操作转杆联接套管来进行操作。

工厂变、配电所由于采用成套固定式开关柜（如GG-10型或GG-1A(F)型高压开关柜），柜上安装GN8型户内式隔离开关，这种隔离开关的构造与GN2型隔离开关基本相同，只是将固定闸刀的支柱绝缘瓷瓶改用套管式绝缘瓷瓶，

使之与开关柜内的油断路器联接。图5-16是GN8型隔离开关的安装图。

三、负荷开关

负荷开关（QL）是一种介于隔离开关与断路器之间的电气设备，负荷开关具有灭弧装置和快速分断机构，它可以接通和断开负荷电流，但是负荷开关不能切断很大的短路电流。为了保护电气设备不受短路电流的破坏，通常负荷开关与高压熔断器串联使用，由熔断器断开短路时的电流。

图 5-17 是FN2-10R型负荷开关及操作机构的安装图。

负荷开关的动触头与其静触头分开时，形成的电弧高温使灭弧腔固体产气材料产生大量气体，向灭弧室的出口处喷出，对电弧进行纵向吹动，使电弧迅速熄灭。

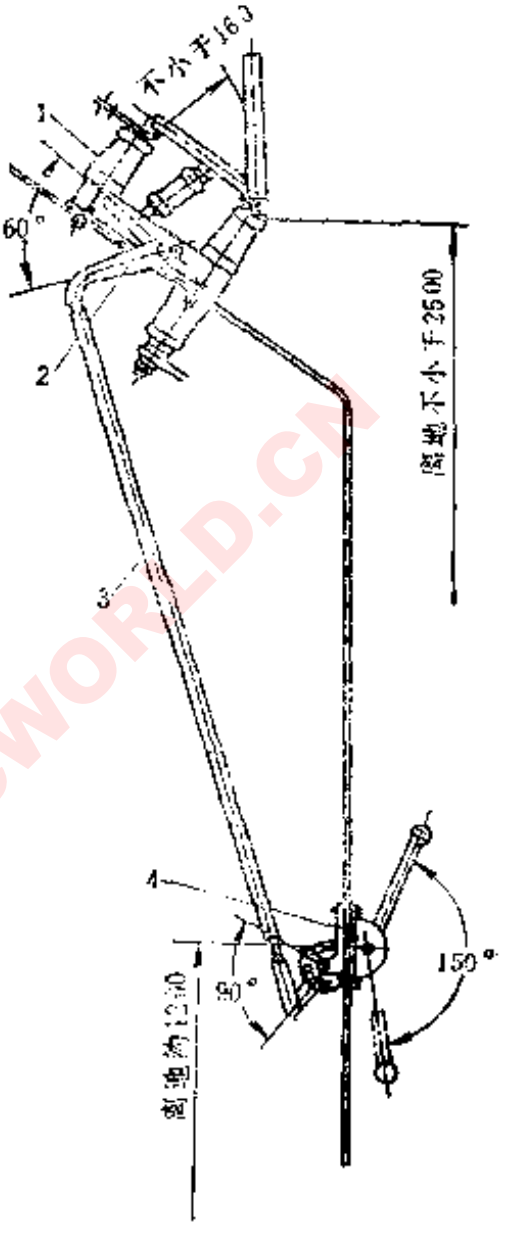


图5-16 GN 8 型隔离开关安装图

1—GN 8 型隔离开关 2—拐臂

3—连杆 4—手动操作机构

新型的FN2和FN3型压气式负荷开关则采用了由开关传动机构带动压气装置喷出压缩空气将电弧吹熄，灭弧性能

WWW.PLCWORLD.CN

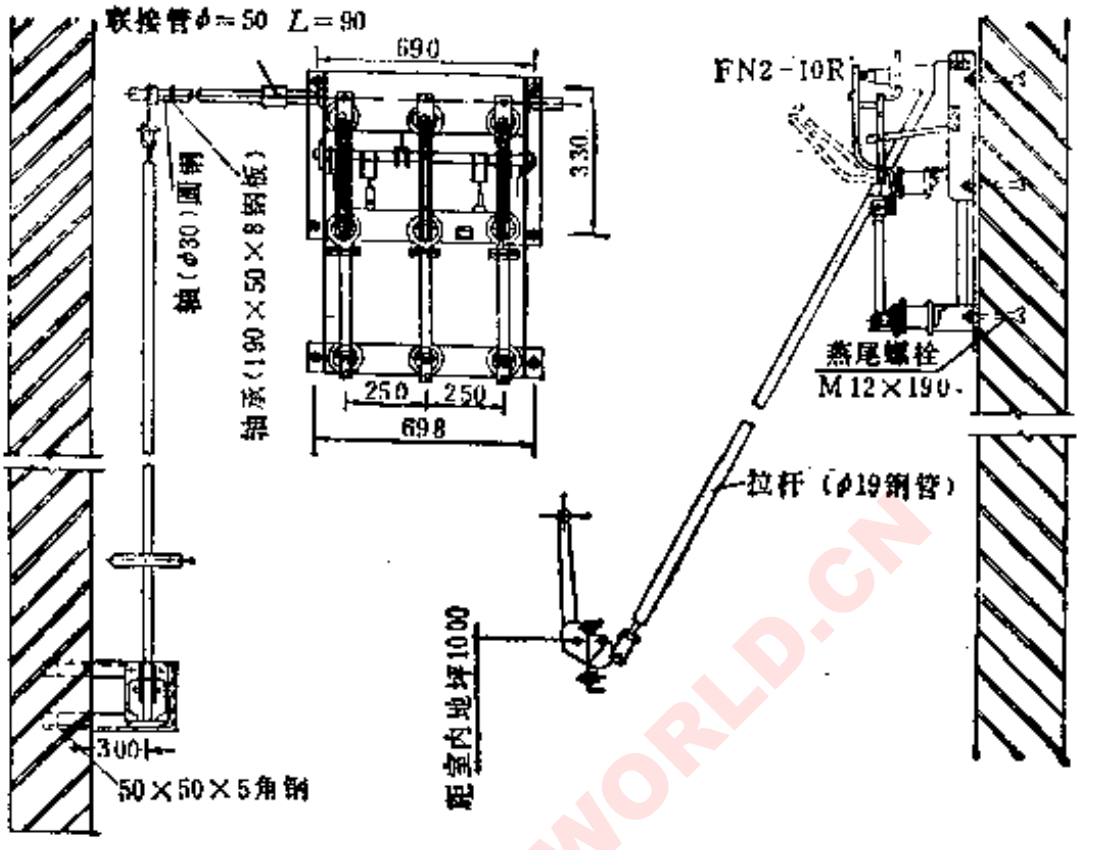


图5-17　10kV负荷开关及操作机构安装图

好，断流容量大，安装调整方便，寿命较长。

四、高压开关柜

高压开关柜是电气设备制造厂根据工厂供电系统的实际需要，将断路器、隔离开关、母线、互感器、避雷器、熔断器以及各种测量表计和保护装置、信号装置等组装成一个整体。在工厂变电所内，高压开关柜是电压在35kV及以下的一种成套配电装置，用于高压电能分配，控制和保护电力变压器，有时也用作高压电动机的控制和保护中心。

高压开关柜框架通常用薄钢板和角铁焊接而成，分固定式和手车式两类。

图5-18是采用GG-1A（F）型高压开关柜的6～10kV单

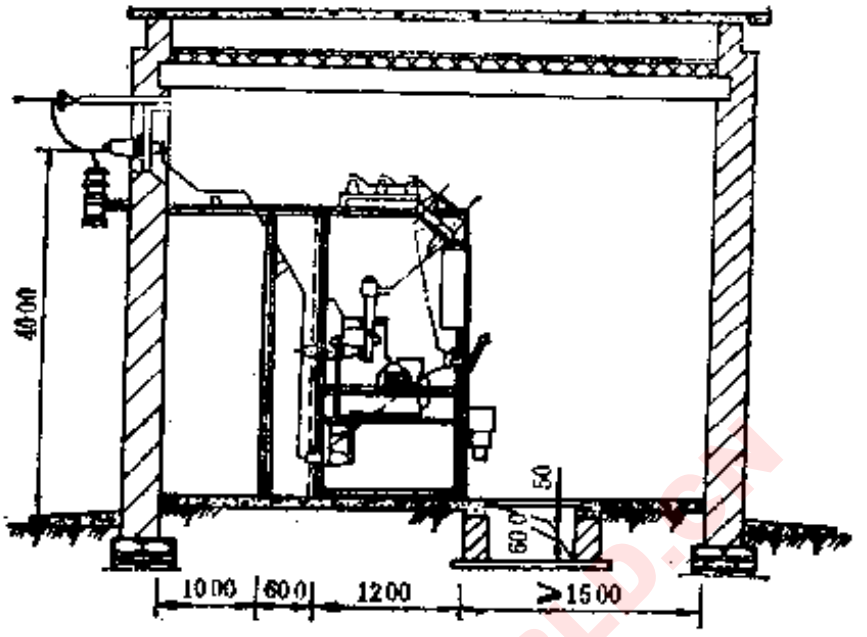


图5-18 GG-1A（F）型高压开关柜屋内配电装置

母线屋内配电装置的出线间隔剖面图。

GG-1A(F)型高压开关柜是固定式高压开关柜，其出线柜由钢板和角铁分成上、中、下三部分。上部是母线和隔离开关，三相母线水平排列。中部与下部之间的隔板上安装电流互感器和套管绝缘瓷瓶，这种隔板的作用是当出线能反馈供电时，拉开位于下部的出隔离开关，就可以确保进入中部检修人员的安全。中部与上部之间的隔板是为了在母线不停电的情况下，拉开母线隔离开关，检修人员可以在中部安全工作。开关柜前面是薄钢板压制而成的门，柜前右边上、下也有两扇门，检修人员可以由此进入柜内检修设备。左边上部钢板门为封闭金属小柜，在门上和小柜内安装测量仪表、继电器等。左边的下部是钢板，此处安装隔离开关与油断路器的操作机构。开关柜两侧用薄钢板压制成的隔板与相

邻开关柜隔开。

GG-1A(F)高压开关柜由于断路器、隔离开关的通断状况易于观察，一、二次回路均为固定联接，工作较可靠，所以仍受到一些工厂的欢迎。

近年来，电力工业与电器制造业的主管部门明确要求高压开关柜必须都是“五防型”的。所谓“五防”指的是：①防止误合、误分断路器；②防止带负荷分、合隔离开关；③防止带电挂地线；④防止带地线合闸；⑤防止误入带电间隔。

“五防型”高压开关柜从电气和机械联锁上采取了措施，实现了高压安全操作程序化，提高了安全、可靠性能。

属于“五防型”的固定式高压开关柜是KGN-10金属封

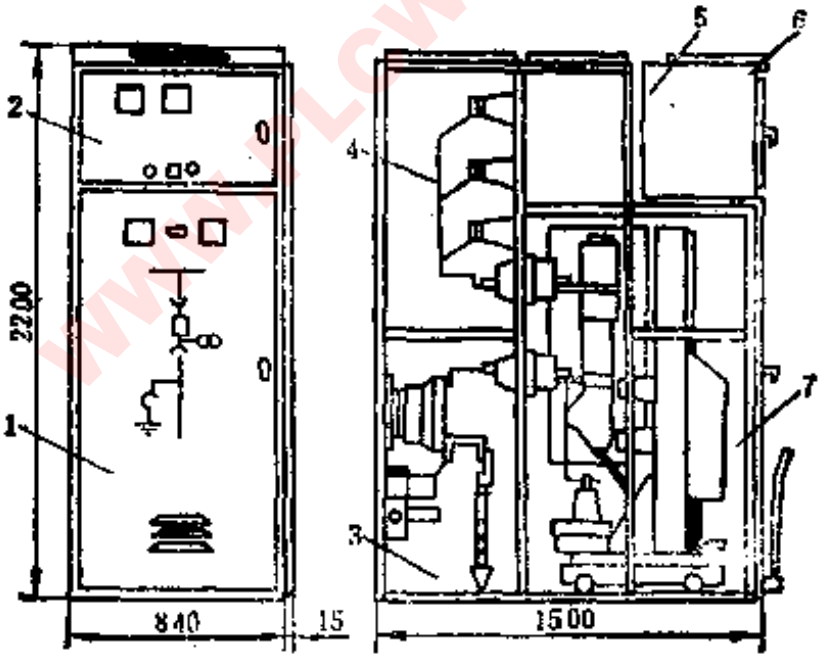


图5-19 JYN2-10型开关柜外形及结构图

1—手车室门 2—仪表板 3—电缆室 4—母线室 5—继电仪表室 6—小母线室 7—断路器室

闭式开关柜，用它来代替GG-1A、GG-10等固定式开关柜。

手车式高压开关柜是一种可将断路器由柜中抽出的成套配电装置。它由角钢和钢板焊成框架。包括固定的本体和用滚轮移动的开关小车。图5-19和图5-20为具有“五防”功能的JYN2-10型手车开关柜和KYN-10手车开关柜的外形与结构示意图。它们已经取代了GBC型、GFC型等各种电压的开关柜。

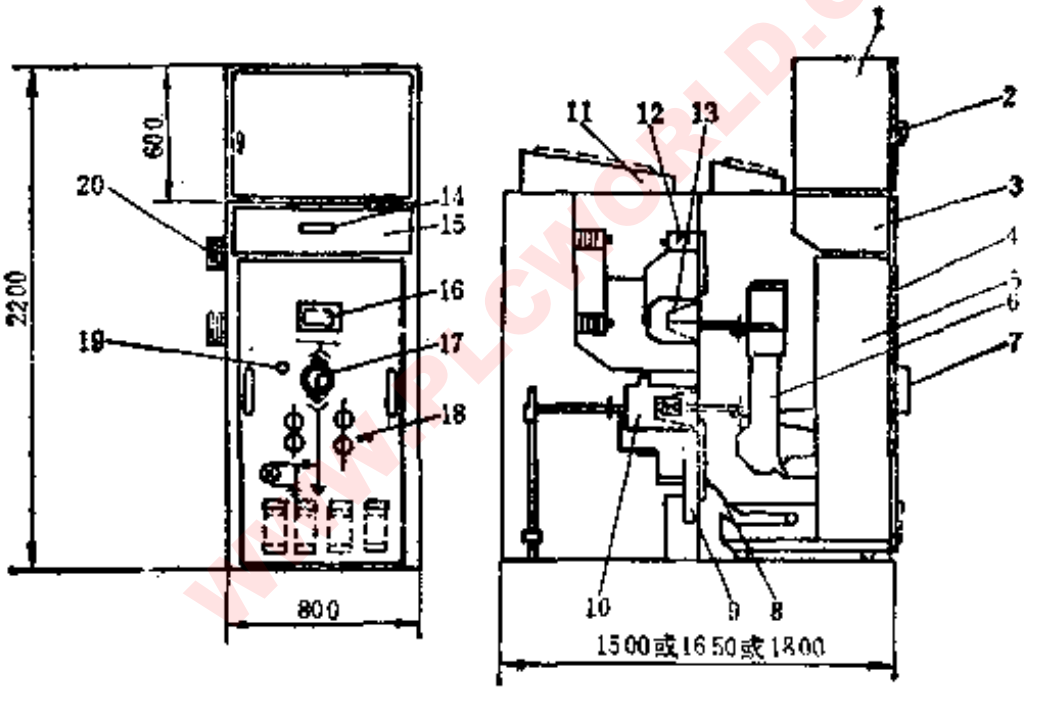


图5-20　KYN-10型开关柜外形、安装尺寸及结构示意图

1—仪表继电器室　2—手柄　3—端子室　4—手车面板　5—手车　6—断路器　7—手车手把　8—活门　9—接地开关　10—电流互感器　11—防护罩　12—支持绝缘子　13—一次触头盒　14—铭牌　15—端子室盖　16—观察孔　17—手车位置指示及锁定旋钮　18—分合观察孔　19—紧急跳闸按钮　20—套管

JYN2-10型手车开关柜由柜体和手车两部分组成。柜体用钢板或绝缘板分隔成手车室、母线室、电缆室和仪表继电器室四个部分。柜体的前上部分是仪表继电器室，下部门内是手车室和断路器排气通道，门上装有观察窗，底部左下侧为控制电缆进线孔，后上部为主母线室，后下部为电缆室，后面封板上装有观察窗，下封板与接地开关有联锁。

手车用钢板弯制焊接而成，底部有四只滚轮，能沿水平方向前后移动，车上还装有接地触头、导向装置、脚踏脱扣机构及手车推进机构的把手。手车拉出后用附加转向小轮使手车灵活转向移动。由于有“五防”联锁，故只有当断路器在分闸位置时，手车才能抽出或插入。手车在工作位置时，一次、二次回路都接通；手车在试验位置时，一次回路断开，二次回路仍接通；手车在断开位置时，一次、二次回路全断开。

使用手车式开关柜后，若检修断路器，可将小车抽出，在远离带电部分的场所修理；另外，又可以将备用柜的手车推入因检修而停电的柜中，减少了停电的时间。

KYN-10型手车式开关柜与JYN2-10型手车柜属于同一类型的开关柜，技术数据基本相同。KYN-10型手车式开关柜在外形上有特点，母线室虽然也在开关柜后上部，但比JYN2-10型手车柜要低，整个柜子在深度上尺寸也大些。

KYN-10型手车柜的手车面板就是柜门，门上部有观察窗和照明灯，能清楚地看到断路器油面指示器。门正中的模拟母线上有手车位置指示旋钮，它具有把手车锁定在工作、试验和断开位置的功能，模拟母线旁有紧急分闸按钮及分、合闸位置指示孔，能清楚地看出油断路器的工作状态。

断路器与接地开关有机械联锁，只有断路器在跳闸位

置，手车抽出，接地开关才能合闸。当接地开关在合闸位置时，手车只能推到试验位置而无法合闸，这有效地防止了带接地线合闸。

§5-4 工厂变电所的继电保护装置

为了保证供电系统的安全运行，对于供电系统中可能发生的各种不正常运行状态和短路、接地故障等必须有相应的保护装置，以便将故障从系统中迅速切除，从而保证非故障部分继续工作，或发出警报信号，通知值班人员采取措施消除故障。继电保护装置是能反应供电系统中的电气设备发生故障或不正常工作状态，并能动作于断路器跳闸或起动信号装置发出预报信号的一种自动装置。

工厂供电系统的高压配电装置的保护，采用继电保护装置和高压熔断器，低压配电系统除技术要求较高者选用了继电保护装置外，一般均采用低压断路器和低压熔断器。

（一）继电保护装置的四个基本要求

1. 选择性

当供电系统发生故障时，继电保护装置应该能准确判断和切除故障部分，并保证非故障部分的设备继续安全运行。

2. 快速性

为了限制由系统短路而引发的破坏范围，减轻危害程度，当供电系统发生故障时，继电保护装置应快速动作，以切除故障区段。

3. 灵敏性

继电保护装置对所保护的设备、线路发生的故障和异常工作状态能敏感地反应和正确动作。

4. 可靠性

正常运行中的继电保护装置，应经常处于“警戒”状态。当被保护范围内被保护设备发生故障或处于异常工作状态时，保护装置应准确动作，不应该误动作或不动作。

供电系统发生故障时，可能引起电流的增加和电压的升高或降低以及电流、电压间的相角变化。因此，可以运用故障状态下和正常运行时电气量的变化来组成各种继电保护装置。在工厂供电系统中常用的保护继电器，如电流继电器、电压继电器、差动继电器等就是用来反应电流和电压变化的。

工厂供电系统中，传统上多使用感应型和电磁型的继电器，由于这些继电器的特性基本上满足了电力系统的要求，它们的使用年限长，机械强度较好，因此，在工厂变电所内还在普遍应用。这两种类型的继电保护也存在一系列的缺点，如动作速度慢、消耗功率多、灵敏度较低以及尺寸大、带有旋转可动部分和接点容易耗损等。

随着科学技术的进步和电子工业的发展，由晶体管和集成电路组成的电子型继电保护装置在电力系统中得到越来越多地应用，工厂变电所也逐渐开始采用这种保护形式。目前，微机继电保护已开始了工业应用。

（二）电子型继电保护的优点

1）由静态电路构成，无可动部分，因而动作速度快，动作时限可达到数十毫秒甚至更短。没有接点的磨损和接触不良的问题，耐冲击、抗振动。

2）灵敏度高。

3）容易构成特性复杂的保护装置。

4）体积尺寸小、消耗功率少。

5）便于调试维护。

（三）电子型继电保护的缺点

1）抗干扰能力较差。

2）电子元件多，容易发生特性变化和损坏。

3）焊接点、接插件多，易发生制造不良的拒动或误动作。

随着电子元件质量的不断提高以及制造工艺的改进，在建筑结构上采取必要措施（防尘、恒温、恒湿），电子型继电保护的缺点正在得到解决，电子型继电保护逐步取代机电式继电保护已是发展的必然趋势。

考虑到电磁型继电保护在工厂变电所内用量较大，且在一段时间内会继续存在，为了方便读者的学习与工作，下面分别介绍工厂供电系统中常用的几种继电保护装置。

（四）常用的继电保护装置

1．电磁式电流继电器

图5-21是电磁式DL-10型电流继电器的简图。它由铁心、线圈、Z形舌片、反作用弹簧、动、静触头等元件组成。

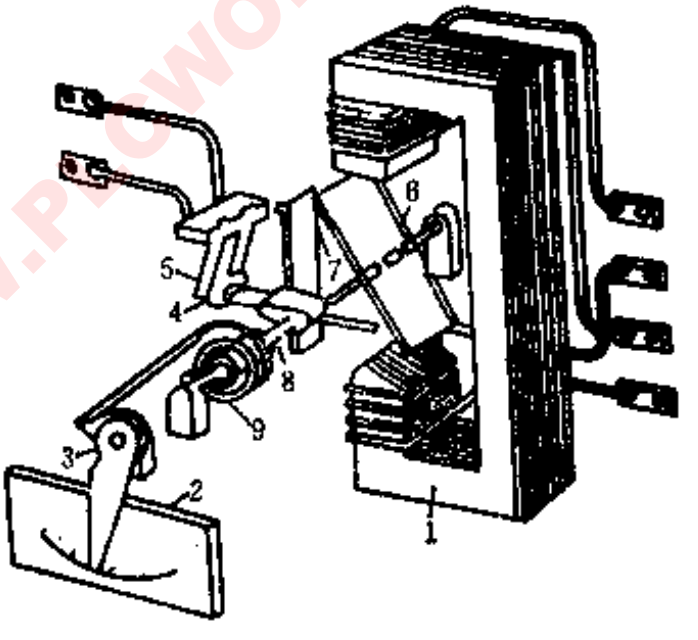


图5-21　DL-10型电流继电器

1—铁心　2—刻度盘　3—调整把手　4—动触头　5—静触头　6—Z形舌片　7—定位杆　8—转轴　9—反作用弹簧

这种继电器的动作原理是：当继电器线圈中有电流流过时，铁心1中产生磁通，Z形舌片在磁通作用下力图向垂直位置转动（此

时磁阻最小，磁极的吸引力最大），但受轴8上的反作用弹簧9的阻力，阻止Z形舌片转动。当发生故障电流时，继电器线圈中的电流增大到整定电流时，Z形舌片克服了弹簧的反作用力而转动，使动、静触头闭合。

继电器动作后，经断路器的跳闸线圈使断路器分闸，故障区段被切除，继电器线圈中的电流随之消失，铁心失磁，反作用弹簧使Z形舌片返回原位，这时继电器的动、静触头打开。上述过程叫做继电器的返回。

电流继电器的整定电流可以用调整手柄来确定。利用线圈的串联和并联，可以使继电器的动作电流成倍变化，从而使继电器有较大的应用范围，如图5-22所示。

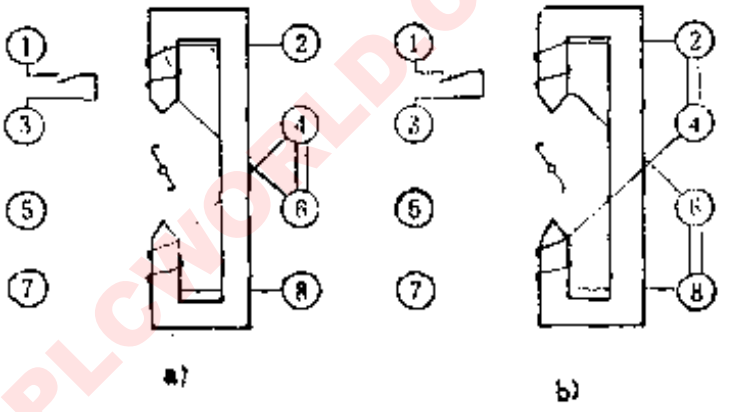


图5-22 DL型电流继电器内部接线图
a）串联 b）并联

DL-10型电流继电器可以用作变压器、电动机和线路的过负荷、过电流和电流速断保护。继电器动作时间短，为0.02～0.04 s，称为瞬动继电器。

下面，以电磁式电流继电器用于变压器保护为例，分别给出整定电流的计算公式。

过负荷保护：由于过负荷电流在大多数情况下是三相对称的，只要在一相上装设过负荷继电器，就可以监视三相的过负荷状况。当变压器过负荷时，过负荷继电器起动，经一定延时后动作，预告信号装置发出预告信号，提醒值班人员

WWW.PLCWORLD.CN

及时采取减载措施。由于变压器允许短时过负荷，故变压器过负荷保护一般不作用于跳闸，而只发出预告信号。过负荷保护的起动值，按躲过变压器一次侧额定电流整定，即

$$I_{op1}=\frac{K_{rel}}{K_{re}}I_{TN1} \tag{5-1}$$

式中 K_{rel}——可靠系数，当保护装置动作于发预告信号时，取1.05；

K_{re}——返回系数，它等于继电器的返回电流与动作电流之比，一般为0.85～0.95，取0.85；

I_{TN1}——变压器一次侧的额定电流。

过电流保护：按变压器最大负荷电流整定计算，即

$$I_{op1}=\frac{K_{rel}}{K_{re}}I_{Lmax} \tag{5-2}$$

式中 K_{rel}——可靠系数，当保护装置动作于跳闸或减载时，取1.15～1.25；

K_{re}——返回系数，取0.85；

I_{Lmax}——变压器的最大负荷电流。

在设计计算时，若不知道变压器的最大负荷电流值时，可用变压器一次侧额定电流I_{TN1}的1.5～3倍值代替最大负荷电流I_{Lmax}值进行设计。

继电保护的过电流动作值还应该避开由于大型电动机起动时出现的过电流值。这一要求通常是利用一个时间继电器附加一定的延时时间，使断路器延时动作(跳闸)得到保证。

速断保护：由于过电流保护装置动作时有一定时限，不能迅速切除故障，只能作变压器辅助保护或后备保护。当容量为400kVA以上的变压器其过电流保护动作时限为0.5～0.7 s时，就要装设速断保护装置。这种保护方式用于保护

WWW.PLCWORLD.CN

变压器本身出现的短路故障，也可作为变压器以外部分出故障时的后备保护。变压器速断保护的起动电流应躲过变压器二次侧母线短路时的最大穿越电流。继电器起动电流的整定值为

$$I_{op}=\frac{K_{rel}}{K_{re}}I'_{Kmax} \tag{5-3}$$

式中 I'_{Kmax}——变压器二次侧母线在最大运行方式下发生三相短路时穿越变压器一次侧的电流；

K_{rel}——可靠系数，取1.2～1.3；

K_{re}——返回系数，取0.85。

以上，都是按一次回路计算的起动电流整定值。若换算成继电器的动作电流，则应除以电流互感器的变比以及考虑继电器接入线路的方式（完全星形接线、不完全星形接线以及两相电流差接线等）。

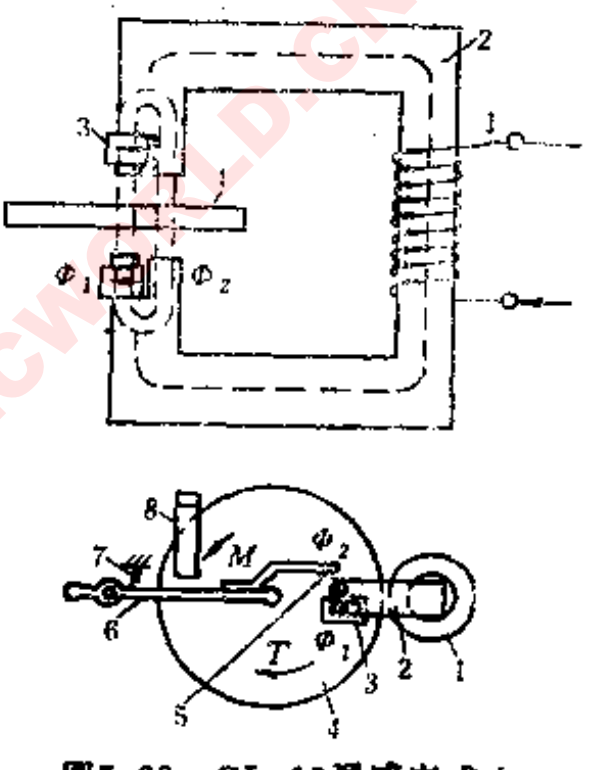


图5-23 GL-10型感应式电流继电器工作原理图

1—线圈 2—铁心 3—短路铜环 4—铝盘 5—钢片 6—框架 7—调节弹簧 8—制动磁铁

2. 感应式电流继电器

GL型感应式电流继电器是工厂供电系统中使用较多的一种继电保护装置，它由带延时动作的感应元件和瞬时动作

的电磁元件组成，成为一种组合式继电器。图5-23所示是GL型继电器的工作原理图。

GL型继电器感应元件的动作原理如下：

当继电器线圈1中有交流电流过时，铁心2在短路铜环3的作用下，产生两个交变磁通Φ_1和Φ_2，与交流罩极式单相电动机的工作原理相似，磁通Φ_1和Φ_2在时间与空间上都有相位差。当两个磁通穿过铝盘时，就在铝盘4上产生涡流。在涡流与交变磁通的作用下，铝盘受到一个与两个磁通成正比的转矩T的作用，转矩的方向由铁心不带短路铜环的部分朝向铁心上带短路铜环的部分。

当铝盘转动时，有两个力矩(电磁转矩T和制动力矩M)作用于铝盘上，M是铝盘旋转时切割永久磁铁8而产生的反力矩。T和M都力图使铝盘和框架6转动。当线圈中通过的电流增大到继电器的整定电流时，作用于框架上的转矩就克服了弹簧7的阻力，使动、静触头闭合。同时，继电器的信号牌掉下来，由观察孔就可以看到继电器已经动作。

感应式电流继电器的感应元件使继电器通电动作时，具有动作时间与电流大小有关的反时限特性和与电流大小无关的定时限特性。而电磁元件的作用是使继电器在通过电流很大时能瞬时动作。

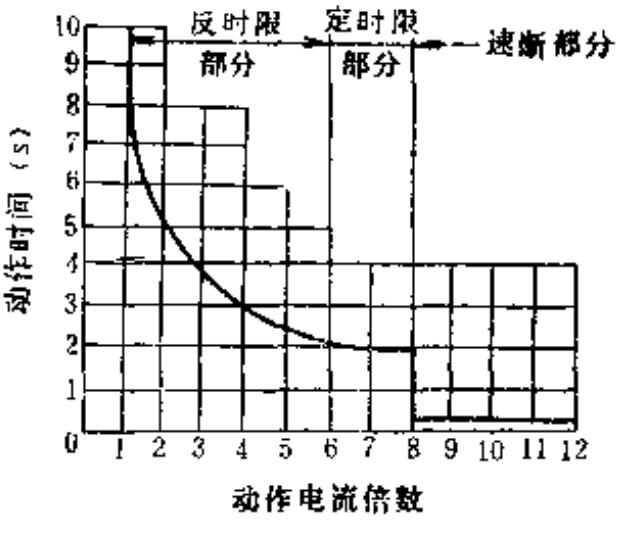


图5-24　感应式电流继电器的时间特性曲线

继电器的时间特

性如图5-24所示。特性前一部分称为反时限部分，继电器动作时间随通入线圈电流的增加而减小。这是因为在这一段范围内，继电器铁心还没有饱和，线圈电流增大使电磁转矩T加大，铝盘转速加快，动作时间减少，形成反时限特性。特性曲线中间一部分为定时限部分，其动作时间与线圈电流大小几乎无关。在这段范围内，线圈电流的增大已使铁心饱和，故线圈电流增加而T基本不变，铝盘转速也基本不变，动作时间基本为一定值。速断部分是由于线圈电流进一步增加使衔铁被瞬时吸合所致。

GL系列感应式继电器的特点是：继电器本身既是起动元件，又是时间元件，加之触头容量大，可以直接接通跳闸线圈使断路器跳闸。另外，继电器有动作掉牌信号装置。因此，感应式电流继电器兼有电磁式继电器、时间继电器、中间继电器和信号继电器的功能，大大简化了继电保护装置。但感应式电流继电器结构较复杂、体积大、准确性和灵敏性相对较差，大多用于保护高压电机和要求不高的场所。

3. 中间继电器

中间继电器是一种辅助继电器。当继电保护装置中需要增加触头的数量和提高触头的容量时，就要用到中间继电器。中间继电器的构造形式虽然很多，但大多数还是电磁式继电器。

图5-25所示是常用的DZ-10系列中间继电器的构造图。当线圈2中流过的电流大于动作电流时，衔铁被吸向铁心，使动、静触头闭合，此时常开触头闭合，常闭触头断开。

当线圈2电流中断后，衔铁4受返回弹簧的作用返回原来的位置，继电器的触头断开，即常开触头断开，常闭触头闭合。

4. 信号继电器

信号继电器用于各保护装置回路中，作为保护动作的指示器。继电保护装置动作后，信号继电器向值班人员发出信号，说明装置已动作，并指出哪种继电器已经动作，以便值班人员分析与判断事故发生在哪条回路以及是什么性质的事故。

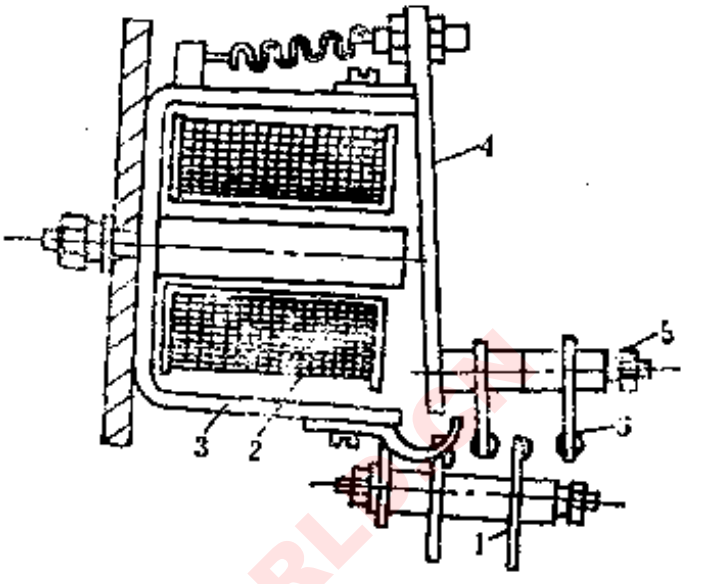


图5-25 DZ-10系列中间继电器结构图

1—静触头 2—线圈 3—铁心 4—衔铁 5—接触架 6—动触头

图 5-26 所示为 DX-11型电磁式信号继电器。当继电器的线圈 2 通电时，电磁铁的舌片 3 被吸引，信号牌 4 靠自身重量掉下，动、静触

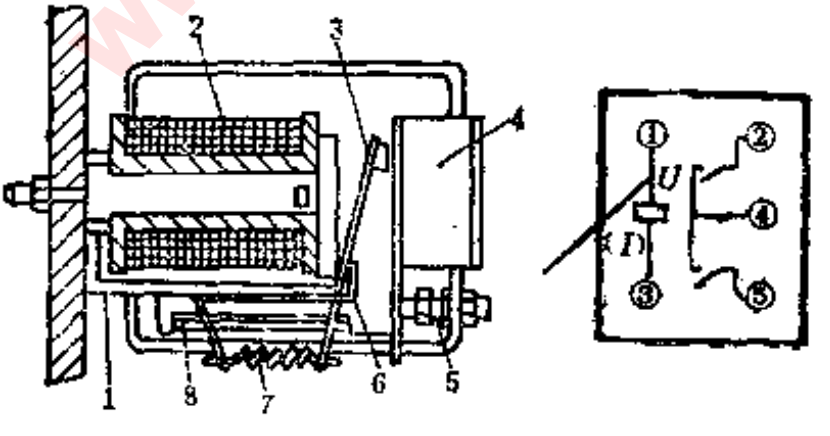


图5-26 DX-11型信号继电器

1—电磁铁 2—线圈 3—舌片 4—信号掉牌 5—调节螺钉 6—舌片行程限制 7—弹簧 8—带有可动触头的轴

头接通，闭合相应的信号回路，发出声响或灯光信号。当事故处理完毕、需要解除信号时，利用装在继电器外壳上的复位旋扭拨回信号牌和断开信号回路。

信号继电器分为电流型与电压型两大类。电流型串入继电保护电流回路，电压型接入电压回路，其接线如图5-27所示。

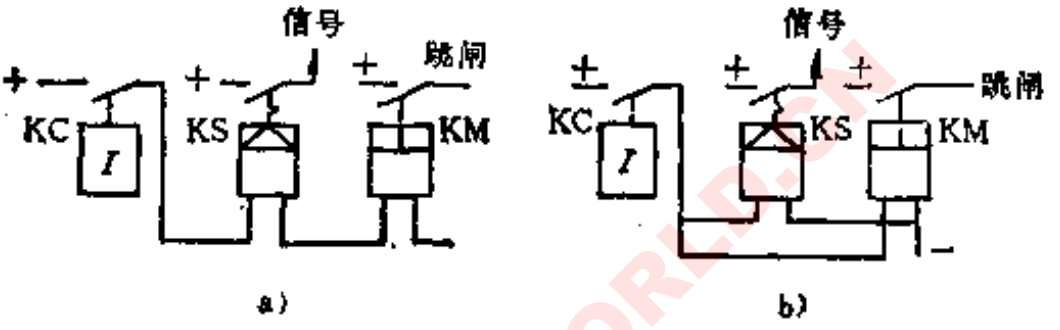


图5-27 信号继电器的接线方式

a）串联信号继电器 b）并联信号继电器

5. 瓦斯保护

电力变压器多数是油浸式变压器，以油作为绝缘和冷却介质。当变压器内部出故障时，电弧的高温将使油或线圈绝缘分解成大量气体，而瓦斯继电器就是保护变压器内部发生故障和油面明显降低时的一种有效装置。瓦斯继电器装设在变压器油枕和油箱间的油道上。

根据继电保护规程的规定，800kVA及以上的油浸式变压器和400kVA及以上车间内油浸式变压器应装设瓦斯保护。当变压器内部因故障产生轻微瓦斯或油面下降时，应瞬时作用于信号；当产生大量瓦斯时宜瞬时断开变压器电源侧的断路器。

老式变压器均安装浮子式瓦斯继电器，在瓦斯继电器内有上、下两个浮筒，内盛少量水银。变压器在正常运行情况下，瓦斯继电器内储满油，浮筒浮起，继电器的水银接点是断开的。

当变压器内部发生故障时，变压器油和绝缘材料因高温或电弧分解产生气体。故障较轻时，瓦斯量较小，可能使上浮筒的水银接点接通；故障严重时，瓦斯量大，使瓦斯继电器的下浮筒水银接点接通。上、下浮筒的水银接点分别接通警报信号和跳闸回路。

由于浮子式瓦斯继电器技术性能较差，动作不可靠，制造厂已不再生产。新型变压器均配置挡板式（复合式）瓦斯继电器，图5-28所示为FJ3-80型挡板式瓦斯继电器结构图。

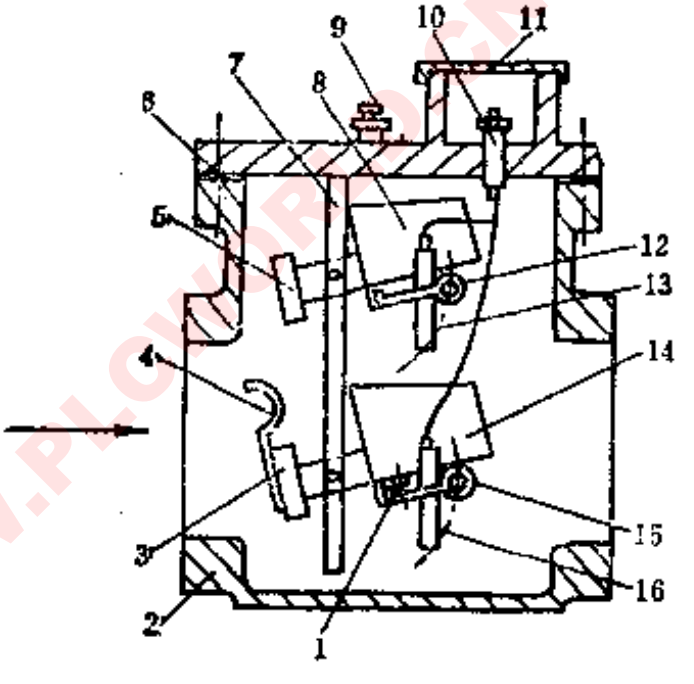


图5-28 FJ3-80型挡板式瓦斯继电器

1—螺钉 2—法兰 3、5—平衡锤 4—挡板 6—橡胶垫 7—支架 8—上油杯 9—放气塞 10—接线端子 11—接线盒盖板 12、15—磁铁 13、16—干簧触头 14—下油杯

图5-28所示是变压器正常运行状态时的挡板和油杯的位置。当变压器内部发生轻微故障时（如匝间短路），产生的气体较少，气体缓慢上升流动，并聚集在继电器上部，迫使瓦斯继电器内油面下

降，这时上油杯与永久磁铁随着油面逐渐下降，当磁铁接近干簧触头至某一限度时，便吸动干簧触头使之闭合，并接通信号回路，发出警告信号。当变压器内部发生严重故障时（如相对地或相间短路），油和其他有机物分解，产生大量气体，急速的油流涌向瓦斯继电器。油的流速达到一定数值时，便会冲动挡板4，使下油杯与永久磁铁下降，磁铁接近干簧管触头16到某一限度时，就吸动干簧触头使之闭合，接通变压器回路中断路器的跳闸回路，将故障的变压器从系统中切除。上油杯平衡锤5的位置和下油杯平衡锤3以及挡板4的位置可以调节，以调整继电器的动作时间。

运行经验证明，瓦斯保护对变压器内部故障反应是很灵敏的，特别是对匝间短路，它的灵敏度胜过其他各种保护设施。

对瓦斯继电器的动作值可整定如下：

轻瓦斯触头闭合的气体容积，当变压器容量小于1000kVA时，整定为200±0.1cm³；容量为1000～1500kVA的变压器，整定为250±0.1cm³；大于10000kVA的变压器整定为350±0.1cm³。

重瓦斯触头闭合的油速一般为0.6～1m/s，强迫油循环的变压器，触头闭合的油速为1.1～1.4m/s。

6．差动保护

差动保护是一种有效的保护变压器和供电线路的装置，对大容量（并联运行的变压器为5600kVA，单独运行变压器为7500kVA及以上）变压器，均应装设差动保护为变压器的主保护。差动保护可用为变压器内部相间短路或变压器引出线上相间短路的保护，也可用于变压器单相层间短路和接地短路的保护。

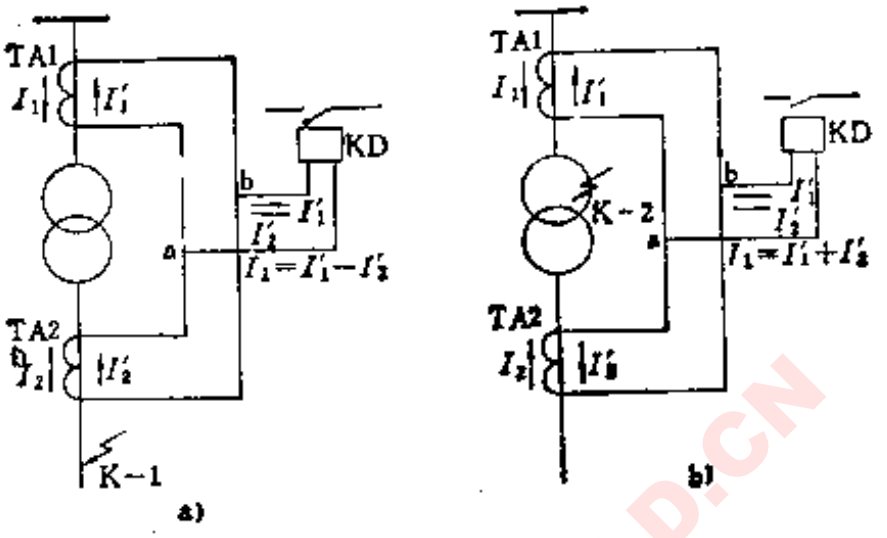


图5-29　变压器差动保护原理接线图

a）变压器正常运行或外部故障　b）变压器内部故障

TA—电流互感器　KD—差动继电器

变压器差动保护的原理接线图如图5-29所示。主要用来保护变压器外部引出线瓷套端头上短路和内部相间短路。

变压器高、低压侧均装设电流互感器，二次接线按环流法联接。差动继电器并接在环流回路上。当变压器处于正常运行情况下或外部发生短路（又称为穿越性故障，即变压器一、二次侧电流互感器以外部分的故障）时，电流互感器TA二次电流方向如图5-29 a 箭头所示，此时电流自成循环，流入差动继电器的电流为变压器一、二次侧的不平衡电流。由于此时不平衡电流小于差动继电器起动电流，故继电保护装置不动作。

当变压器内部或引线端头上发生短路，如图 b 所示，电流互感器TA2内电流反向（两端电源）或等于零（单端供

电），电流流入差动继电器线圈，继电器KD动作而使断路器跳闸。由上述可知，差动保护是不带时限、动作迅速的保护装置。差动保护是变压器的基本保护，而过电流保护是变压器的后备保护。

在实际应用变压器的差动保护中，要特别注意躲过穿越性短路时的不平衡电流以及由励磁涌流造成的不平衡电流。完全消除不平衡电流是不可能的，但采取措施，减小其影响，以提高差动保护灵敏度是可能的。

7. 典型的变压器保护接线图

为了便于了解各种单个继电器如何组成一套完整的继电保护装置，下面以变压器的保护接线图为例，绘出其全套保护线路图。

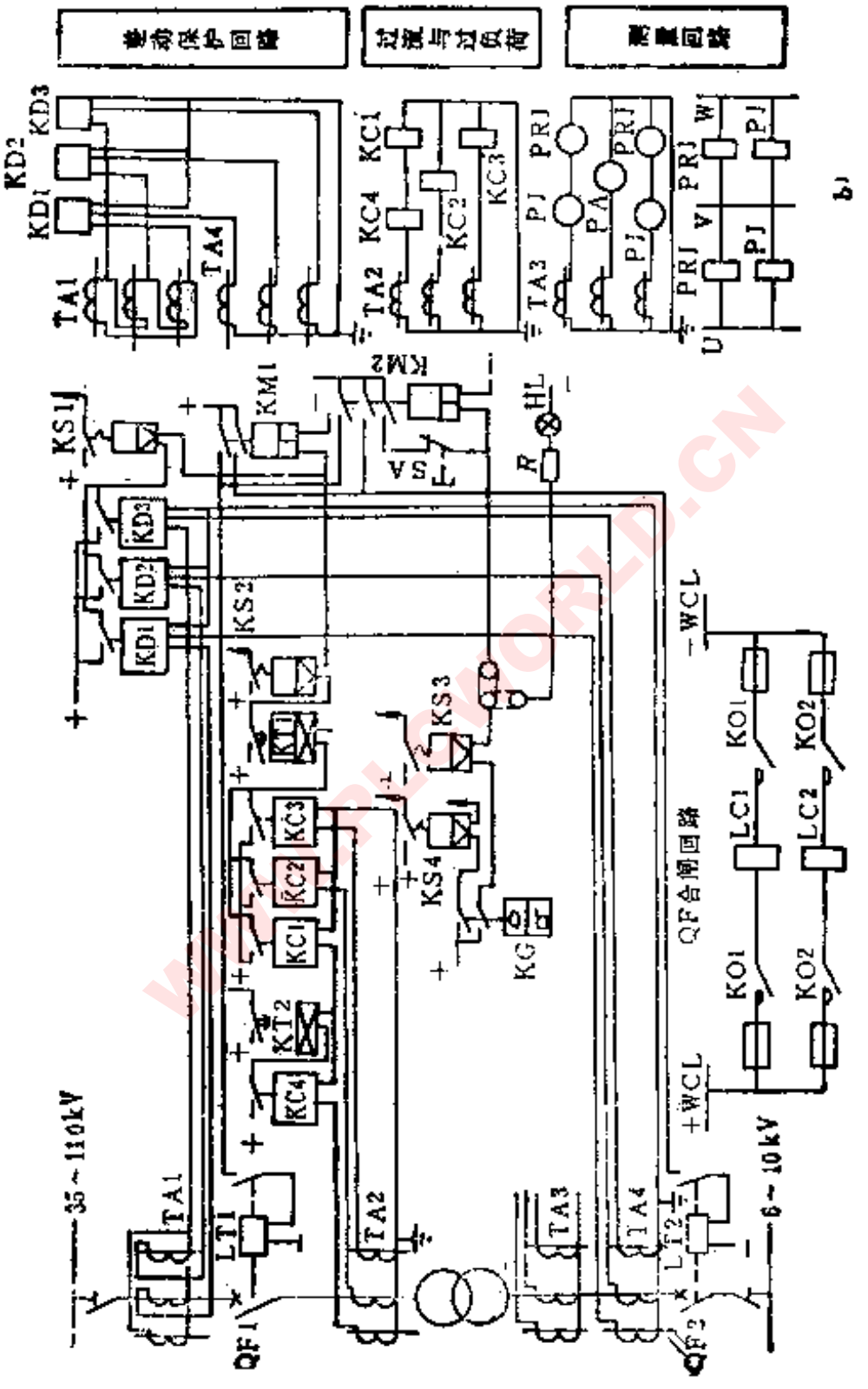
图5-30所示是7500kVA三相双绕组变压器保护、测量回路。

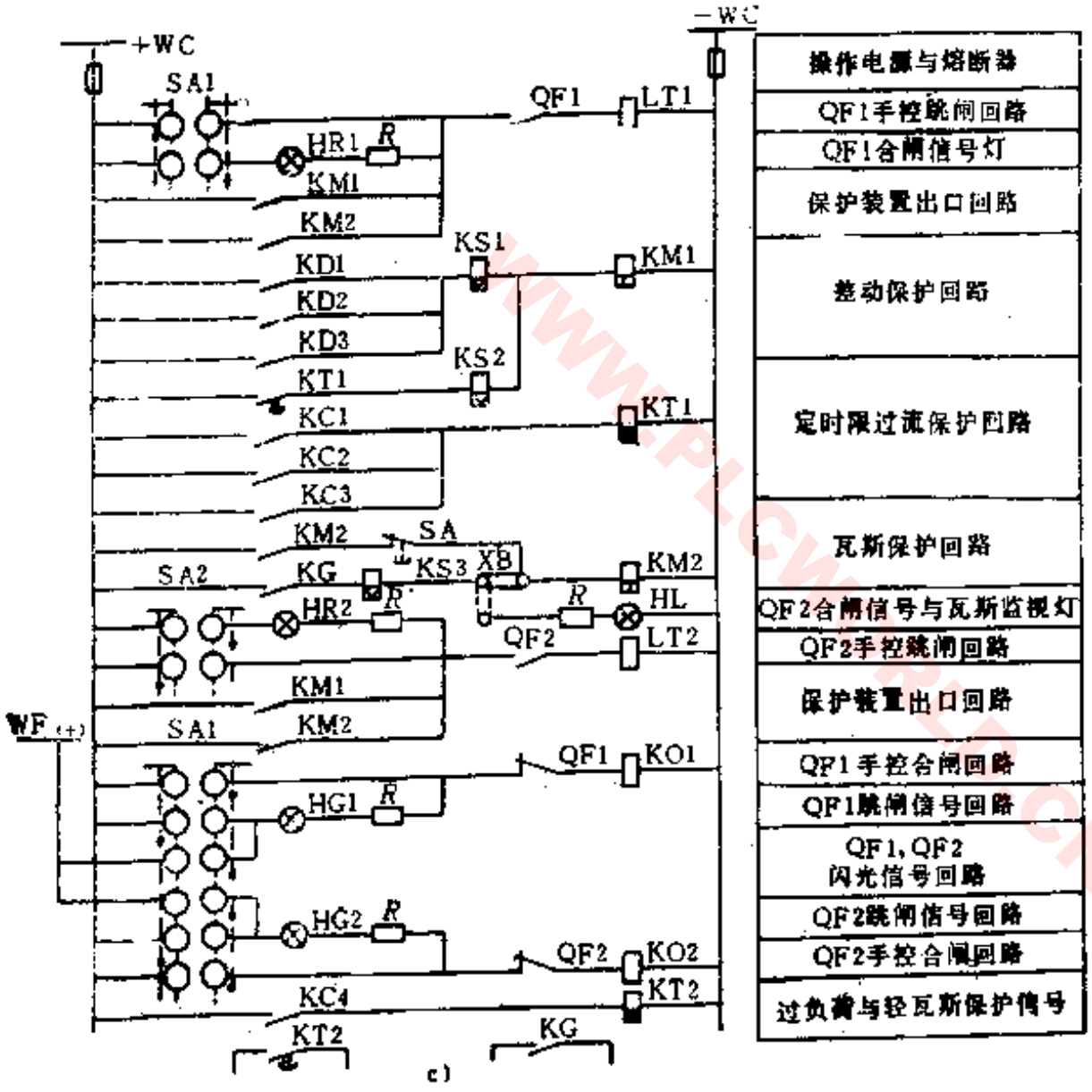
变压器的继电保护装置包括下面几个单元。

（1）差动保护：由接在电流互感器TA 1与TA 4之间的差动继电器KD 1～KD 3组成。差动继电器起动后，经出口中间继电器KM 1，使变压器两端的断路器QF 1、QF2跳闸。

（2）过电流保护：由接于TA 2的过电流继电器KC 1～KC 3和时间继电器KT 1组成。过电流继电器动作后，经过KT 1的延时，使出口中间继电器KM 1动作，再使变压器两端的断路器QF1、QF2跳闸。

（3）过负荷保护：由接于TA 2的过电流继电器KC 4和时间继电器KT 2组成。由于过负荷均为三相同时出现，故只接一个电流继电器KC 4。变压器过负荷时，电流继电器KC 4动作，经时间继电器延时后，发出警告信号。


35～110kV
6～10kV
QF合闸回路
+WCL
-WCL
KM1
KM2
KS1
KS2
KS3
KS4
KG
KT1
KT2
KC1
KC2
KC3
KC4
KD1
KD2
KD3
KO1
KO2
LC1
LC2
HL
SA
R
TA1
TA2
TA3
TA4
QF1
QF2
PJ
PA
PRJ
WJ
U
V
W



c)

图5-30 变压器保护装置接线图

a) 归总式（接线）原理图

b) 展开图（电流回路）

c) 展开图（保护回路）

WCL—合闸母线

WC—控制母线

WF—预报信号母线

WWW.PLCWR.COM.CN

（4）瓦斯保护：由瓦斯继电器KG构成，通过切换片XB可分别动作于断路器跳闸和发警告信号。

当我们将一个接线复杂的保护原理图分解成几个单元后，就可以很快弄清楚它们的工作状况和相互关系，有助于掌握全面情况。

8．继电器的表示符号

在归总式原理图（接线图）中，继电器的表示符号是一个方框和方框上的触头。方框表示继电器线圈，线圈的特点也同时可看出，如时间继电器的触头缓吸或缓放等。继电器名称以字母代号标注在方框中。常用继电器的表示符号见第四章表4-3。

绘制继电保护装置的展开图时，继电器的线圈与触头是按它们的动作顺序分别画在其线路图中的动作位置上，线圈就用一个方框表示，在其上边或旁边注以相应的代号，可参见有关的电路图。

§5-5 继电保护装置的运行和维修

在供电系统中，继电保护装置的主要作用是：当电气设备和供电系统发生故障时迅速而有选择地将被保护部分从电力系统中切除，把故障的范围缩小到最低限度；当电气设备处于不正常的运行状态时，立即发出警报信号，使值班人员及时进行处理，以防止事故的发生；配合自动装置，可使有些不正常的运行情况自动消除；继电保护装置应可靠地工作，不产生拒动或误动作。要满足这些要求，继电保护装置的设计应是合理的，各种元件质量应良好，施工安装质量应可靠，并且要认真进行运行巡视，精心地维护保养。否则，任何一个环节的失误都会带来不良的后果。

WWW.PLCWORLD.CN

一、继电保护装置的运行

由于继电保护装置的重要性及其技术的复杂性，除要求运行值班人员有良好的素质并持证上岗外，还要求运行单位加强技术管理，建立各种条例、标准，健全岗位责任制。为此，必须建立与健全技术档案。其内容应包括：符合现场实际状况的电气原理接线图与背面接线图；端子板联接图；施工单位移交的产品出厂技术文件（说明书、合格证、检验报告等）、安装记录、调整试验记录、竣工图；继电保护装置整定值变动记录、调整试验报告；设备缺陷及消除情况记录；事故记录；运行记录等。

正常的运行工作，主要是日常巡视、定期检查和清扫。认真搞好运行维护，及时发现保护装置存在的缺陷并予以消除，对保证继电保护装置在良好状态下运行有重要意义。

二、继电保护装置的维护检查

变电所的电气值班人员在接班时及运行中，应对继电保护装置进行例行的外部检查和动作试验。

（一）继电保护装置的外部检查

检查的主要内容是：继电器外壳是否完好，玻璃是否完整无损。

继电器的铅封应完好，继电器动作信号牌不落下。

根据电力系统的运行方式，检查各种压板位置是否正确，压接是否牢固可靠，接线是否正确。

线圈是否过热，触头有否抖动、卡住、熔接，感应式继电器的铝盘转动有无不正常现象。

直流电源系统和不间断电源装置工作正常，微型计算机和打印设备显示正常，动作良好。

（二）动作试验

操作控制屏、台上的各种试验按钮或有关的转换开关及光字牌指示应正确、完整、清楚，警铃、警笛功能完好，闪光信号应符合要求，直流电源的母线电压应正常，直流系统对地绝缘应良好等。

当继电器本身冒烟，有严重音响、过热和足以造成误动作的不正常现象时，值班人员经主管技术负责人同意后，应立即将该保护装置退出运行，并迅速予以处理。

值班人员对继电保护和自动装置的动作应记录以下几点：故障发生的顺序、地点、持续时间、种类和相别；跳闸和合闸的顺序，动作的继电器名称，拒绝动作或误动作的继电器名称；发生事故时出现的现象等。

（三）年检

所有安装在变电所或配电所的继电保护装置和系统及自动化装置，应每年进行一次定期检查。每年测量一次运行中的继电保护装置及其二次回路的绝缘状况，绝缘电阻应不低于0.5MΩ。利用继电保护装置与自动装置进行断路器的跳、合闸试验应每年进行一次；重要设备或动作频繁的设备，视具体情况缩短其检验周期。

在年度检验时，应仔细取下继电器的外壳、清除继电器内部的灰尘和油污；用细锉或细油石小心地除去继电器触头上的氧化物和凹凸不平处，旋紧各联接螺钉，配齐接线用的螺钉、螺母、垫圈等。要保证继电器各运动部分的动作灵活，并将二次接线中已脱落、退色的标志补全。在进行继电保护装置或二次回路的检修、试验工作时，必须保证两人以上，工作前应明确工作内容，熟悉保护装置的二次线路。当保护装置经过检验并反复核对、确认接线正确，同时进行继电保护装置的整组相互动作试验后，认为一切正常，方可投入运行。

§5-6 工厂变电所的过电压保护

过电压是一种对电气设备的绝缘有危害的突然升高的电压。

过电压包括内部过电压和大气过电压两种。大气过电压是由雷击引起的，所以又称为雷电过电压；内部过电压是由电力系统内的能量转化或传递引起的，包括操作过电压、电弧接地过电压和谐振过电压等。据统计，在电力系统中绝缘损坏事故占总事故次数的50%以上，而其中由于过电压造成的供电线路和供电设备的绝缘损坏，引起短路或接地而形成的事故又占很大的比例。为此，对过电压的形成及其特性和防止的方法，要有充分的了解。

一般厂矿的供电线路多为6～10kV级，也有35kV级的，由操作过电压引起的内部过电压一般不对电气设备的绝缘构成严重威胁，而谐振过电压造成的影响却不容忽视，对此，常采用避雷器和电阻、电容过电压吸引装置等予以保护。对于大气过电压的保护，主要是采用避雷针（线）和避雷器。

一、直击雷过电压防护

变电所的屋外配电装置遭受雷击的机会较多，当雷击直接对导线、设备放电时，能产生高达数百万伏甚至数千万伏的直击雷过电压。在变电所装设避雷针，可以有效地保护电气设备不受直击雷的破坏。

避雷针由接闪器、接地引下线和接地体三部分组成。它的安装高度高于被保护物，它的作用是将雷电吸引到金属针上，并安全导入大地中，从而保护了避雷针附近的建筑物和设备免遭雷击（详见第六章）。

避雷针遭到雷击时，由于强大的雷电流通过接地引下线的电感和接地体的散流电阻，在接地引下线和接地体上产生很高的电位，有可能对周围的设备产生放电现象，这称为反击。独立避雷针与被保护物之间应保持一定的距离，以免避雷针上落雷时造成向被保护物的反击，这个距离一般不小于5 m。

避雷线与避雷针相类似，起引雷作用，保护架空线不易遭受直击雷。避雷线不仅可用于保护架空线，也可以用来保护面积较广的电厂或变电所的户外配电装置以及各种建筑物。一些建筑物上装设的避雷带，实际上也是架空地线。

二、避雷器

工厂变电所中经常用避雷器作为过电压保护装置。避雷器的作用是，当变电所的架空进线上出现危及设备绝缘的大气过电压时，这个电压将沿着线路侵入变电所。由于避雷器与被保护的电气设备并联，避雷器的放电电压低于其他电气设备绝缘的耐压值，进入变电所的过电压便经过避雷器对地放电，因而起到了保护其他电气设备的作用。避雷器有两种，一种是阀型避雷器，另一种为管型避雷器。

（一）阀型避雷器

10kV及以下的中、小容量工厂变电所，广泛应用的阀型避雷器由封装在瓷套管内的火花间隙和非线性电阻构成，图5-31是阀型避雷器的结构示意图。

普通阀型避雷器均采用多个火花间隙串联的形式。每个火花间隙由两个黄铜电极和一个厚0.5～1mm的云母垫片组成，其结构见图5-32。当间隙上的电压达到某个数值时，火花间隙开始放电。由于火花间隙是多个串联的，整个避雷器的工频放电电压等于各串联间隙放电电压之和。

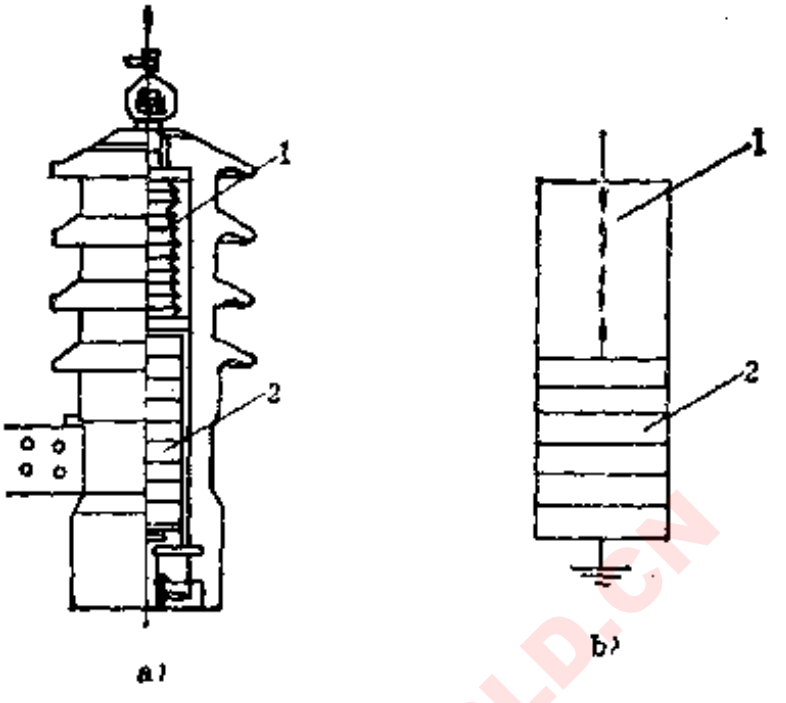


图5-31　阀型避雷器结构示意图

1—火花间隙　2—非线性电阻（碳化硅）

避雷器的阀电阻片（简称阀片）是由非线性材料碳化硅以陶料为粘合剂，在高温下烧结成圆饼状。图5-32所示的阀片两面喷了一层铝，当若干阀片串叠时，各个阀片之间有良好的接触。阀片的侧面涂了一层无机绝缘釉，以防止在阀片的侧面发生闪络。

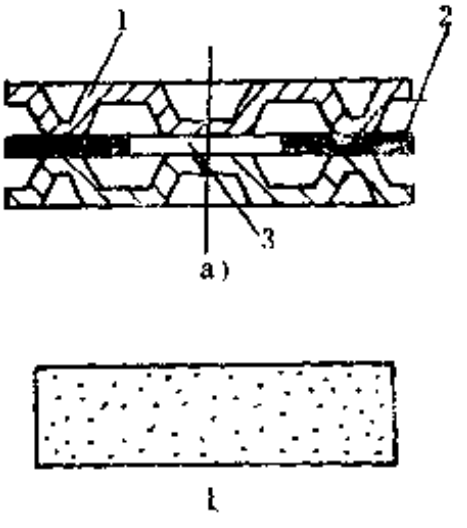


图5-32　火花间隙与阀片

a）火花间隙　b）阀电阻片

1—黄铜电极　2—云母片

3—间隙

阀片具有非线性的伏安特性，当避雷器承受正常运行电压时，阀片的电阻很大，再加上有多个火花间隙，非线性的阀片中不通过电流。在雷电过电压作用

下，阀片的电阻变得很小，让雷电流顺利通过，这样就限制了过电压的幅值。

通过以上对火花间隙和阀片工作特性的介绍，可以很方便地说明阀型避雷器的工作原理。当阀型避雷器的两端出现过电压时，火花间隙被击穿，这个电压就加至阀片，由于外加电压很高，阀片的电阻顿时变小，把雷电流引入大地。雷电流对地释放后，当阀型避雷器两端电压低于某个数值时，非线性的阀片电阻迅速增大，雷电流值减小。另一方面，由于火花间隙是多个串联的，火花间隙很快灭弧，切断了续流，系统恢复正常工作。在正常运行电压下，避雷器是不通电的。不同电压等级的电气设备选用不同电压等级的阀型避雷器，而避雷器的放电电压应低于被保护电气设备的耐压水平，所以，避雷器能够保护与它并联的电气设备。

常用的阀型避雷器有以下几种。

FZ型：由带有并联电阻的火花间隙和非线性电阻组成。并联电阻使工频电压下各火花间隙的分布较均匀，降低了冲击放电的电压，提高了间隙的灭弧能力。主要用于保护大、中容量的配电装置。

FS型：仅由火花间隙和非线性材料碳化硅组成，保护性能较差，仅用于保护10kV以下不太重要的配电装置。

FCD型：磁吹避雷器，由于改进了间隙的结构（旋转火花间隙），使间隙的灭弧性能大大提高，有较好的保护性能，专门用于保护旋转电机。

氧化锌（ZnO）避雷器：用氧化锌代替阀型避雷器中的碳化硅。氧化锌非线性电阻有良好的伏安特性，由于在正常电压作用下流过阀片的电流极小，故可以做成无间隙阀型避雷器。雷电流流过氧化锌避雷器时，在避雷器两端的电压降

很低，雷电流释放完毕后，它的绝缘极好，几乎没有工频续流。氧化锌避雷器具有无间隙、无续流、体积小、重量轻、通流能力大、残压低等优点，目前在110kV以上的电网中应用较多。10kV及以下系统常与真空断路器配合以降低操作过电压。

（二）管型避雷器

管型避雷器实质上是一个具有良好灭弧能力的保护间隙。它的基本元件是装在产气筒内的火花间隙，见图5-33。

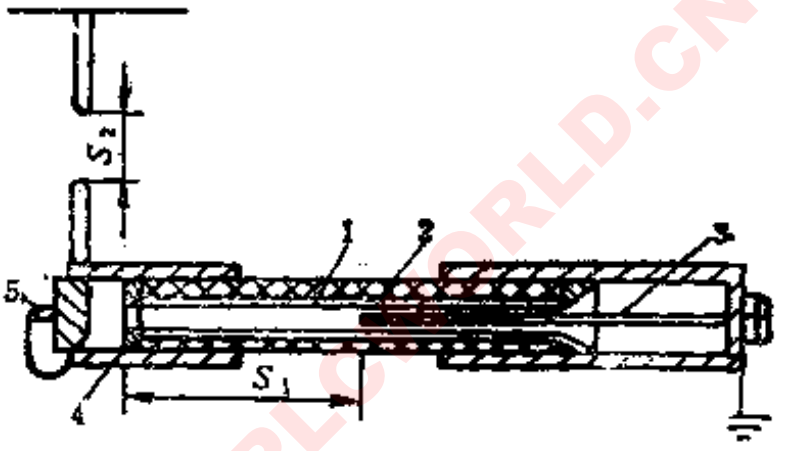


图5-33　管型避雷器

1—产气管　2—胶木管　3—棒形电极　4—环形电极

5—动作指示器

S_1—内间隙　S_2—外间隙

管型避雷器的间隙由棒形电极3和环形电极4组成。产气管由纤维、塑料或橡胶等产气材料制成。

当危及电气设备的过电压波传至管型避雷器安装地点时，放电间隙因被击穿而放电，雷电波因而被导入大地。在电弧高温的作用下，产气管的内壁产生强烈的气体，使管内压力升高。当高压气体由环形电极的开口处喷出时，形成与电弧平行的纵吹，使电弧迅速熄灭。外部间隙的空气恢复绝

缘，管型避雷器恢复正常工作，从而保护了电气设备不受过电压的破坏。

管型避雷器主要用于输电线路和变电站进线段的过电压保护，一般都是室外安装。由于风吹雨打，管子容易受潮，管子受潮后就有可能在工作电压下发生沿管子表面的闪络，导致避雷器的误动作。因此，在使用管型避雷器时，必须与管型避雷器串联一个空气间隙，即图5-33中的S_2，这个间隙称为管型避雷器的外间隙，管内的灭弧间隙称为内间隙。这样，只有当雷电波的高电压到达时，方能击穿两个间隙。

应当注意，避雷器多次动作以后，由于产气管的气化，管子内径不断扩大，管壁将变薄，影响准确地动作。通常规定，当管型避雷器的管子内径增加到原内径的1.2～1.25倍时，就不能使用，应予以换新。为了观察管型避雷器的动作情况，在避雷器一端装有一个塞子状的一次动作指示器。避雷器动作后，塞子会被气体从开口端喷射出来，表明管型避雷器已经动作。

阀型避雷器与管型避雷器的结构不同，它们的电气特性也不同，因此用途也不一样。在电力系统中，一般用阀型避雷器保护变压器和其他高压电器，而用管型避雷器保护架空线路和电缆线路。

三、工厂变电所的进线保护

工厂变电所的进线保护在于防止线路遭雷击后雷电波沿线路进入变电所，危害变电所的配电装置。当变电所进线的全长架设有架空地线时，可以不考虑进线保护。对于未沿全线路装设架空地线的35～110kV线路，可按图5-34所示的标准接线图配置进线保护。图中，FV为阀型避雷器。

对于小容量变电所（10kV及以下电压级），可以选用简

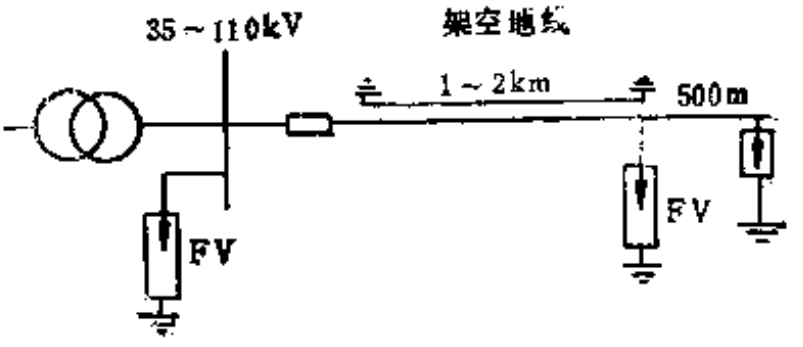


图5-34　进线段用阀型避雷器的35～110kV进线保护接线

化的保护方案，见图5-35所示。图5-35 a 为架空进线配置阀型避雷器，图 b 经电缆进线，c 图中的 L 是限制短路电流的电抗器，外线路一段较短，由电缆引入。

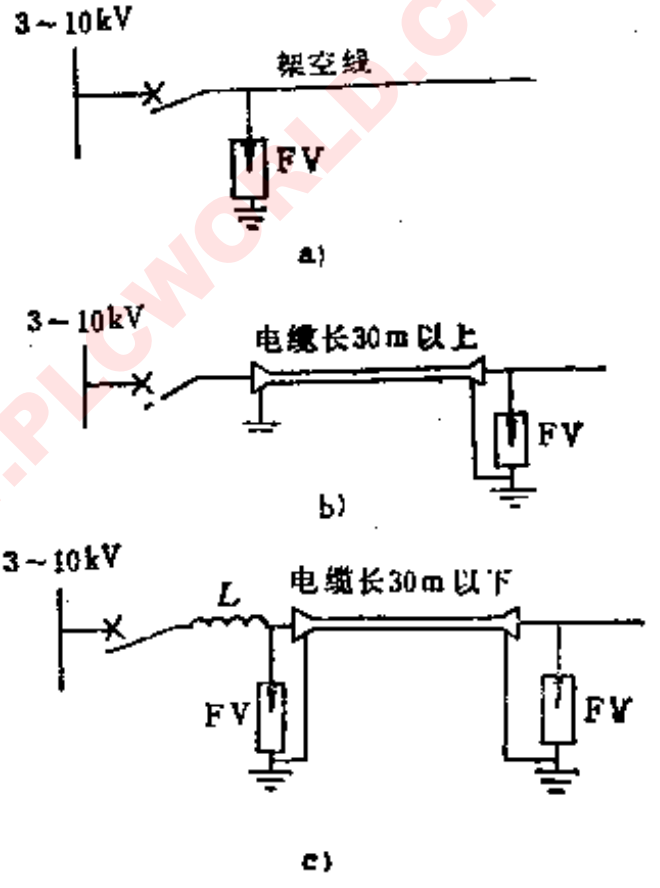


图5-35　3～10kV进线保护典型接线图

为防止多雷地区的 6 ～10kVY，yn0接线的配电变压器低压侧被雷电波侵入和反变换波击穿高压绕组的绝缘，变压器的低压侧宜装设一组 FS-0.38型低压避雷器或MOA-0.38型氧化锌避雷器或击穿熔断器。

WWW.PLCWORLD.CN

§5-7 电气设备的安装与调整

一、高压开关柜的安装

成套高压开关柜的基本形式有两大类：固定式与手车式。新建6～10kV工厂变电所已大多选用手车式开关柜。各种高压开关柜的安装方法与步骤基本相同，现以常见的GG-1A型高压开关柜为例，介绍其安装的方法。

（一）基础型钢的安装

安放基础型钢是安装高压开关柜的基本工序。开关柜通常用8#～10#槽钢为基础，槽钢可以在土建工程浇注开关柜基础混凝土时直接埋放，也可以用基础螺栓固定或焊在土建预埋铁件上。

为了保证高压开关柜的安装质量，目前多采用两步安装法，即在土建施工时，配合混凝土基础或地坪工程先埋设预埋铁件，留出槽钢的空位，在电气安装工程开始后再安装槽钢。槽钢的安装步骤如下所述。

（1）槽钢要先经调直，并除去铁锈。

（2）槽钢放在安装位置，调好水平。使用铁水平仪和平板尺调整槽钢水平，并使两条槽钢保持平行且在同一水平面上。槽钢的水平误差不得超过1 mm/1 m，全长不得超过5 mm。

施工经验表明：若柜后的基础槽钢比柜前的槽钢低1～2 mm，则对安装后开关柜的整齐美观和安装时的调整有好处。

（3）槽钢调整完毕后，用电焊法将槽钢与预埋铁件焊接牢固，以免在土建工程二次抹面时碰动槽钢而使之移位，确保开关柜的安装位置符合设计图样的要求。

埋设的基础型钢与变电所的接地干线用扁钢或圆钢焊接，接地点不应少于两处。槽钢露出地面部分应涂漆防腐。

（4）槽钢下面的空隙应填充水泥砂浆并捣实。

（二）开关柜的搬运与检查

高压开关柜开箱后，根据设计图样将开关柜编号，依次搬入变电所内，直接放在安装位置上。

对拆开包装的开关柜，要对照设计图样核对数量、规格检查是否符合设计要求，有无损坏、锈蚀等情况，检查附件、备件是否齐全。开箱时还应检查开关柜的产品技术文件是否齐全，这包括出厂合格证件和说明书及内部接线图等。

（三）立柜

开关柜安放到槽钢上后，利用薄垫铁将每一台柜子调整到大致水平位置，再以第一块为标准，将其他各台依次调整，使之盘面一致，排列整齐，盘间缝隙均匀。高压柜的水平误差不应大于1 mm/1 m，垂直误差不能大于1.5mm/1 m，即2～3 mm。柜与柜用螺栓固定后，柜间缝隙保持2～3mm。调整完毕后，还要用拉线法检查各柜的不平度，其最大差值不应大于5 mm。经全面检查符合质量要求后，用电焊法（或固定螺栓）将开关柜底座固定在基础槽钢上。为了美观，电焊的焊缝要在柜体的内侧，焊缝不少于四处，每处长80～100mm。在用电焊方法固定开关柜时，找正用的垫铁也要焊在基础槽钢上。高压开关柜安装示意图如图5-36所示。

（四）内部擦拭，联接母排

高压开关柜的主母排，可由开关柜制造厂配套供应，也可在施工现场按设计图样制作。主母排的联接以及主母排与引下母排的联接，一般均用螺栓联接，在母排联接面处应涂上电力复合脂，螺栓的拧紧程度以及联接面的联接状态，由

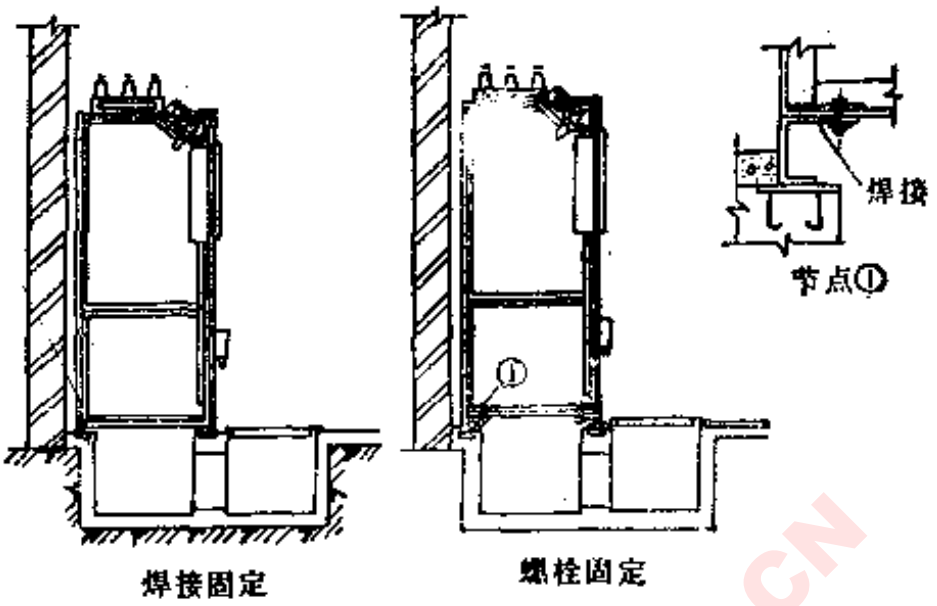


图5-36　高压开关柜安装示意图

力矩搬手按规定的力矩值拧紧螺栓来控制。

上面所介绍的安装步骤对于固定式高压开关柜和手车式开关柜基本上是相同的。对于手车式开关柜，还要按其特点注意下列几个方面。

（1）为了保证手车的互换性，每个手车的动触头必须调整得一致（相间距离、高低等），要使静触头与动触头的中心一致，接触紧密，以备在互换时，只要改变识别装置即可立即实现。

（2）检查开关柜二次回路的插头，应联接正确，线头焊接可靠。

（3）检查二次回路的辅助触头，应切换正确，接触可靠。

（4）电气或机械闭锁装置调整要正确，手车在合闸位置时，不能拉出。

（5）安全隔板开闭灵活，能随手车的进出而动作。

WWW.PLCWORLD.CN

（6）手车的接地装置与开关柜固定框架间接触要良好。

（7）柜内控制电缆固定牢靠，不影响手车的移动。

（8）核查开关柜的“五防”联锁，功能应齐全、正确。

二、SN10-10型少油断路器的安装与调整

6～10kV工厂变电所内安装的少油断路器，可以用支架、螺栓固定在墙上，也可以固定在手车或开关柜的构架上。由于多数工厂变电所采用成套高压开关柜，油断路器已由电器设备制造厂装配在开关柜的构架上，并经过适当调整试验，这就大大简化了在现场的安装调整工作。为了确保电气设备能安全、顺利地投入运行，在运用现场还是要对设备本身进行检查复核，对行程、合闸同时性予以调整，仅在确认符合施工与验收规范后方可投入使用。

（一）安装

（1）检查油断路器筒体是否垂直，以减少导电杆在运动中的摩擦，防止附加的摩擦影响开关分、合闸时间。断路器的筒体有少量偏斜时，可调节固定螺栓的距离、增减螺栓垫圈的数量。

（2）复核油断路器边相与中间相的中心距离，相间距离应为250±1 mm。当偏差不大时，可变动油箱在框架上的位置予以调整。

（3）解体检查。由于SN10-10型少油断路器已由电器制造厂组装、调整，在使用现场一般可不必再行拆卸检查。但是，目前各电器制造厂的质量水平参差不齐，又因为高压油断路器的事故往往造成较大的经济损失，所以，国家规范规定：油断路器的灭弧室应作解体检查及清理复原时应安装

正确。制造厂规定不作解体且有具体保证的10kV油断路器，可进行抽查。

分解、拆卸断路器的筒体时，应做好记号，以便于组装。要仔细察看筒内部件有无损坏和异常征状。卸下的零件要放在专用的铁盆内，各相零件分开放置，以免混杂弄错。解体灭弧室时，要依次抽出灭弧部件，进行检查清理。回装时，隔弧片的顺序和方向要正确。按说明书的要求校核各部分尺寸，若尺寸不符，由增减隔弧片之间的垫片来进行调整。

（4）检查排气孔的尺寸。当油断路器切断短路电流时，为了防止相间断路，SN10-10型少油断路器采用定向排气结构，断路器排气孔的相对关系如图5-37所示。

（5）擦净绝缘支持件。机械传动部件应注润滑油，以保持断路器动作灵活。

（6）母排与油断路器联接正确、合理，螺栓紧固，接触良好，断路器不受因联接母线而增加的机械应力。

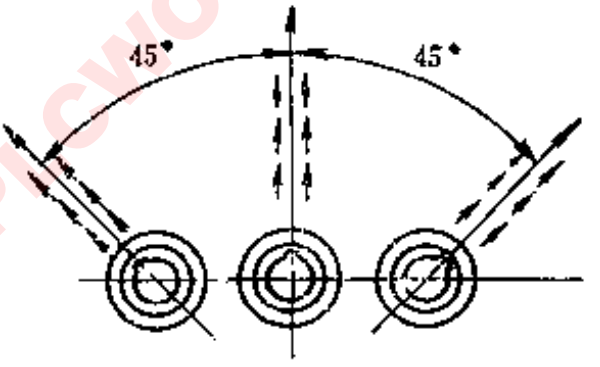


图5-37　SN10-10型少油断路器的定向排气

（7）油断路器各部分密封良好，无渗油、漏油现象。灌入的合格绝缘油应保持在油位指示器两刻线之间，每套SN10-10型少油断路器的注油量为5～8kg。注油前先用干净的绝缘油冲洗油箱，将脏油放掉，一直到放出的绝缘油干净为止，然后拧上放油塞，加油至油位指示器的指定位置。由于SN10-10型少油断路器的油缓冲器在底罩的下端，因此，油箱无油时，油缓冲器

不起作用。这时不允许对油断路器实行电动分、合闸。实行电动分、合闸操作的最少油量为1 kg。

（二）调整

（1）油断路器动作应灵活。卸开绝缘拉杆，用手转动底罩上的主拐臂，应灵活，不应有阻涩现象。

行程要符合技术要求。动触头合闸时的总行程为：

SN10-10/600-350型　　147^{+1}_{-8}mm

SN10-10/1000-500型　　160^{+1}_{-5}mm

在调整总行程时，可通过调整分闸限位器的垫片及绝缘拉杆的长度来完成。

（2）动触头与静触头接触时的超行程应为：

SN10-10/600-350　　41^{+3}_{-1}mm

SN10-10/1000-500　105^{+5}_{-1}mm

超行程的数值可由调节拉杆的长度与油缓冲器活塞杆的高度来满足。底罩上的主拐臂在合闸与分闸时的位置应相差110°。

（3）调整三相合闸同时性。油断路器合闸时，当一相的动触头与静触头刚接触，其余两相动触头与静触头的最大距离即为不同时误差。SN10-10型少油断路器三相触头接触不同期性，不得大于3 mm。调节绝缘拉杆的长度，可满足三相合闸同时性的要求。

为了防止不应有的冲击，三相中动触杆最高相在合闸位置时，以及动触杆最低相在分闸位置时，都应有一定的余量。

三相合闸同时性的检查，一般采用三灯法来校验。其接线方法如图5-38所示。用手动方式慢慢合闸，根据灯泡发光的先后顺序就可以知道三相动、静触头接触的先后顺序。

（4）调节分、合闸速度，使之符合要求。

当油断路器配CD2型直流电磁操作机构时，合闸时间不大于0.25 s，固有分闸时间不大于0.06 s。测量油断路器的分、合闸时间应该在操作机构额定操作电压、液压下进行。测出的数据应该符合断路器及操作机构技术条件的规定。

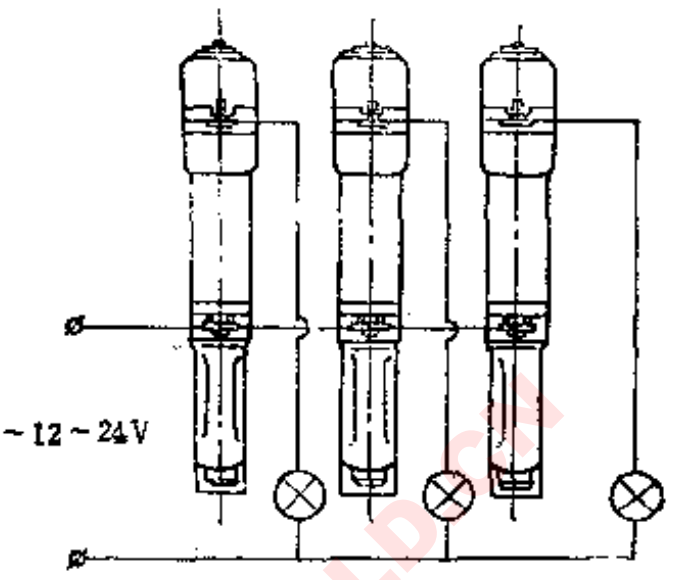


图5-38　油断路器合闸同时性检查图

在测量油断路器分、合闸速度时，应符合下列规定：测量应在产品额定操作电压、液压下进行，实测的数值符合产品技术条件的规定。

电压等级在15kV及以下的断路器，除发电机出线断路器和与发电机主母线相联的断路器应进行速度测量外，其余的就不必进行。

上述规定比以前的国家施工及验收规范放宽了，这是考虑到15kV及以下的断路器数量较多，如每一台都要进行测速试验，测速条件、测试设备及人力上均有困难，因此这类断路器的分、合闸速度应由制造厂给予保证。相反，15kV及以下的发电机出线断路器与发电机主母线相联的断路器，因其担负的作用较重要，断流容量大，所以还是要测量分、合闸速度。

分、合闸速度可由调整分闸弹簧的初拉力和合闸缓冲器的压力来调节。

工厂变电所选用的真空断路器、SF 6 断路器等无油断路器应根据制造厂提供的技术资料安装、调整，并以国家标准《电气装置安装工程高压电器施工及验收规范》组织检查与验收。

三、隔离开关的安装

在6～10kV工厂变电所中，隔离开关与油断路器一样可装在墙上或金属构架上。装在墙上时，需先在墙上预埋基础螺栓，并配制操作机构（见图5-15）。但更多的隔离开关是装在成套高压开关柜上，开关柜上隔离开关的安装与调整介绍如下。

（一）外观检查

（1）检查隔离开关的型号、规格是否符合设计图样的要求，零件是否齐全、完好，绝缘子有无损坏，绝缘子胶合处是否松动，闸刀及静触头有无变形，接线端子的接触面是否良好等。

（2）隔离开关安装应牢固。操作机构应轻便灵活，机构应无卡阻及晃动。操作手柄的位置应正确。

（3）用2500V兆欧表测量绝缘电阻，10kV隔离开关的绝缘电阻应在800～1000MΩ以上。

（二）调整

（1）初次操作隔离开关时，合闸和分闸应缓慢。合闸时应仔细观察动触头对静触头有无侧向的撞击，如果有撞击现象，可卸开静触头固定座的螺栓，调节固定座的位置，使动触头刀片刚好插入静触头的刀口。动触头刀片插入静触头的深度不应小于90%，但也不可过大，以防止刀片冲击绝缘子。动刀片与静触头固定座的底部，要保持4～6 mm的间隙。通过调整操作连杆的长度和操作绝缘子上的调节螺钉的

长度，可使隔离开关的动、静触头的距离符合要求。

（2）隔离开关合闸时，三相触头应有同时性。三相联动的隔离开关触头接触时的不同时值应符合产品的技术规定。若产品说明书无规定，则10～35kV的隔离开关允许的不同时误差为5mm。当不能达到要求时，可调整操作绝缘子联接螺钉的长度。

（3）隔离开关分闸时，触头间的净距或刀片拉开角度应符合产品的技术规定。若说明书无此数据时，可参照下面给出的数值：

GN2-6/400～600	41°
GN6-6/200～400～600	65°
GN6-10/200～400～600	65°

若不能满足要求时，调整操作拉杆上联接螺栓，以改变拉杆长度和改变联接舌头在调节板上的位置。

（4）检查动、静触头的接触情况。以0.05mm×10mm塞尺检查，对于线接触应塞不进去。对于面接触，其塞入深度：在接触表面宽度为50mm及以下时，不应超过4mm；在接触面宽度为60mm及以上时，不应超过6mm。动、静触头的接触表面应平整、清洁，并涂以薄层中性凡士林。隔离开关触头表面不要涂电力复合脂，因为触头的运动可能在触头表面使电力复合脂堆积，而复合脂具有导电性能，有可能在触头部分引起放电烧损事故。在隔离开关的设备接线端子上则应涂以薄层电力复合脂，安装与维修人员必须了解这些要求，使设备能以良好状态投入运行。

四、互感器的安装

（1）对高压开关柜内安装的互感器，应先检查瓷套管是否完好，有无渗油、漏油现象，用手轻轻扳动套管，套管

WWW.DLCWORLD.CN

不应活动。近年来，高压开关柜内安装的互感器，多半采用环氧树脂铸成的干式电流互感器和电压互感器，这类互感器结构紧凑，体积较小，仅作一般的外观检查即可。

（2）对油浸式电压互感器，油面要符合标准，互感器的外壳不应漏油、渗油。

（3）同一组的互感器应具有一致的极性，二次侧的接线端子要便于检查。互感器的金属外壳要可靠地接地。

（4）仔细检查互感器的二次接线。电压互感器的二次绕组不得短路；电流互感器的二次绕组不能开路，否则可能导致产生高电压，而引发危及人身安全和损伤设备的事故。接线螺钉要牢固，以防因线头松脱而引起二次绕组开路。

（5）互感器二次侧联接线路时，要注意极性。对于电度表和差动保护的接线要特别予以重视。当使用电流互感器构成差动保护时，要特别注意互感器二次侧的接地，此时只应有一个接地点，且仅在保护屏上经端子排接地。

五、低压配电盘的安装

低压配电盘是用于500V以下的、简单的配电装置，其中装有刀开关、熔断器、低压断路器、接触器、保护装置和测量仪表等，它是一种低电压成套配电装置。目前，我国生产的1kV以下低压配电屏有固定式和抽屉式两种。固定式配电盘老产品有BSL双面维护式（离墙装设）和BDL单面维护式（可以靠墙装设）两种，由于这类配电盘缺点较多（回路间距小，遮断容量不足，维护、检修不方便，安全性差等），故国家主管部门已宣布全部淘汰，用PGL1和PGL2型低压配电盘代替。此外，新产品还有GGL型和GHL型低压配电盘。80年代以来开发的抽屉式配电盘，目前使用较多的有BFC型和GCK、GCL型等，

抽屉式低压配电盘馈电回路多、体积小、占地少，由于抽屉具有互换性，故恢复供电迅速。然而这种盘加工精度要求高、价格较贵。从国外引进的生产装置中，较多地使用抽屉式配电盘。新建和扩建工程的配电系统中也越来越多地选用了抽屉式配电盘。

抽屉式开关设备采用钢板制成的封闭外壳，进出线回路的电器元件都安装在一个可抽出的抽屉内。配电盘的各个抽屉在隔室中移动时有三种位置：联接位置，即与主回路、辅助电路联接的位置；试验位置，即与主电路断开，但辅助电路仍处于接通位置；断开位置，即已与主电路断开，且与母线或静触头形成了足够的安全距离，辅助回路已断开。

为了确保安全，抽屉式配电盘应具有机械联锁。例如，为了防止带负载抽出抽屉，只有在主开关处于分断位置时，联锁机构才允许将抽屉抽出；为了防止未经允许而操作主开关，应提供带挂锁的操作机构，只有在挂锁打开之后才能操作主开关；单

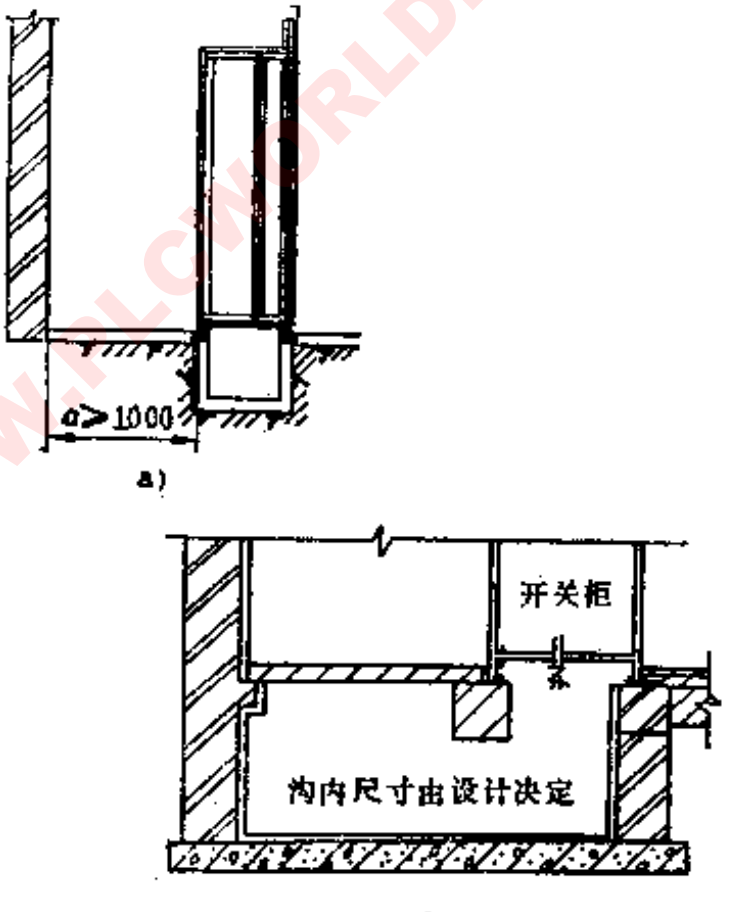


图5-39　配电盘安装示意图

a）独立式离墙距离　b）安装示意图

元的门与操作机构之间也要相互联锁——主开关断开之后才能打开门；反之，门关闭之后，方能接通主开关。

在安装抽屉式开关盘时，应检查上述联锁关系，在试验位置检查抽屉的各种操作功能，在确认无误后方可投入运行。

配电盘的安装示意图如图5-39所示。根据运行经验和设计规范，配电盘盘前操作通道，按固定式和抽屉式配电盘的不同，以及单列布置、双列面对面布置、双列背对背布置的不同，其距离由1500～2300mm不同。而为了维护方便和人身安全，盘后维护通道一般不应小于1000mm。

六、硬母线安装

硬母线常用在工厂变、配电所，作为高、低压配电装置的配电母线。母线材料有铜、铝、钢三种。目前，变电所大多采用铝母线，然而铜母线的应用日益增多。根据电压等级的高低及载流量和使用场合的不同，除带状母线外，还有管形母线和棒状母线。在结构形式上，除裸母线外，也有制造厂成套供应的封闭母线槽和插接母线槽，这将简化母线的安装，并改善维护条件。中小容量工厂变、配电所使用的母线多数是铝制带状硬母线。

硬母线的安装工序主要包括母线加工、联接和安装。

（一）母线的加工

1．检查

在母线下料以前，应对母线进行检查。检查母线的出厂合格证书及技术性能资料，检查母线的规格、截面大小是否符合要求，并检查母线有无锈蚀和机械损伤。母线表面应光洁、平整，不应有裂纹、折皱、夹渣及变形和扭曲现象。

2．平直

母线本体应很平直，对于弯曲不正的母线要予以校正调直。母线数量较少时，可用手工平直，将母线放在平整的钢板上，用木槌槌击。如使用铁锤，须用平直的硬木或金属垫板衬垫，铁锤不可直接打在母线上，以免出现凹凸不平的锤印。当有大量母线需要平直时，可使用母线校正机调直，这种方式操作简便，效率高并节省人力。

3．弯曲

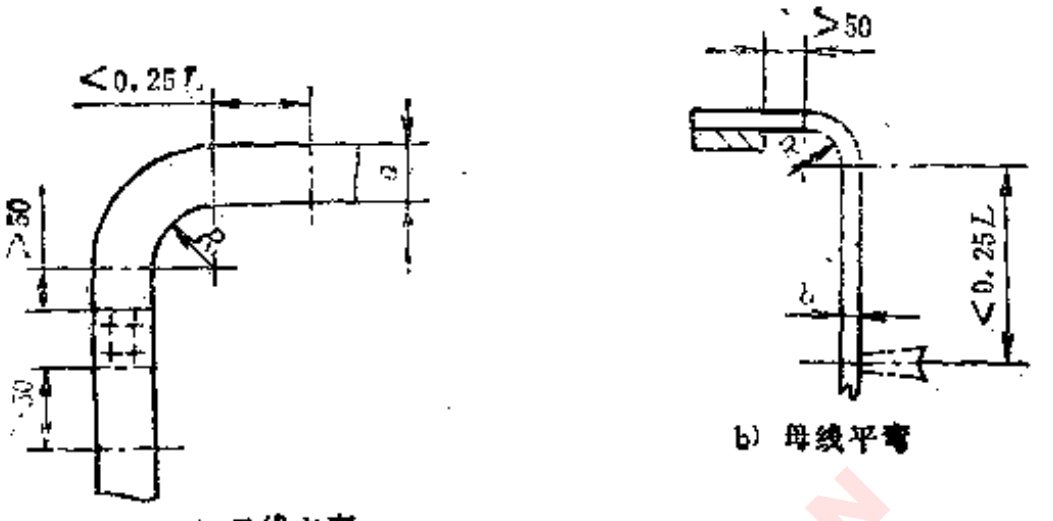
矩形母线的弯曲有三种形式，平弯、立弯和扭弯。

（1）为使母线的弯曲度数较精确，保证所有的弯头整齐划一、外形美观，通常都光做样板进行冷弯。当样板的尺寸符合质量要求后，再逐个按样板加工。当母线尺寸较大时，手工冷弯有一定难度，且质量不易保证，以往有热弯加工的工艺。当矩形母线热煨弯后，会使母线严重退火和起皱，而且要反复槌打，严重影响母线本身的质量。另一方面，国内已能生产各种规格母线的冷弯机，1990年新的国家施工及验收规范已明确规定："矩形母线应进行冷弯，不得进行热弯"。

（2）弯制母线时，应符合下列规定（图5-40）。

母线开始弯曲处距最近绝缘子的母线支持夹板边缘不应大于0.25L，但不得小于50mm；母线开始弯曲处距母线联接位置不得小于50mm。矩形母线应减少直角弯曲，弯曲处不得有裂纹及显著的折皱。母线的最小弯曲半径应符合表5-1所列数值。

矩形母线因弯曲的角度大小不同，其弯曲处发热温升也不同。直角弯曲处的温升可比45°弯曲处高10℃左右，故应减少母线的直角弯曲。为了避免母线弯曲处出现弯纹及显著的折皱，其弯曲半径应尽可能大于规定的弯曲半径值。



a）母线立弯　　b）母线平弯

图5-40　硬母线的立弯与平弯

a—母线宽度　b—母线厚度　L—母线两支持点间的距离

表5-1　硬母线最小允许弯曲半径（R）值

母线种类	弯曲方式	母线断面尺寸（mm²）	最小弯曲半径（mm）		
			铜	铝	钢
矩形母线	平　弯	50×5及以下	2b	2b	2b
		125×10及以下	2b	2.5b	2b
矩形母线	立　弯	50×5及以下	1a	1.5a	0.5a
		125×10及以下	1.5a	2a	1a

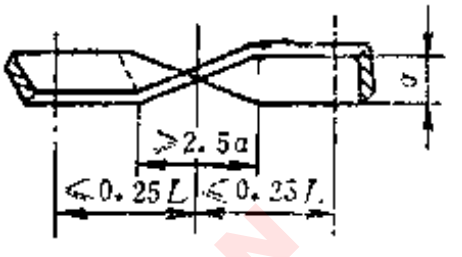
母线扭转90°时，若每相由多片母线组成，为使扭转程度一致，扭转部分的长度将随片数的增加而加长，所以它的扭转长度可在2.5～5倍的母线宽度之间选取，见图5-41。

（3）母线对接时，需将对接头处弯出鸭脖弯或另用辅

助夹板，以便将母线固定在同一水平上。图5-42所示为矩形母线搭接示意图。

（二）母线的联接

母线的联接可采用贯穿螺栓搭接、焊接或用夹板及夹持螺栓搭接。母线在机械张力较大的部位或与设备联接或与分支线联接时，一般都应用螺栓或方形夹具，以便拆卸与检修。凡螺栓联接的接头，应先在母线的相应部位钻孔，再将联接面加工，最后用螺栓联接。



母线平面扭弯90°

图5-41 带状母线扭弯示意图

a—母线的宽度

1．钻孔

母线钻孔时，应按施工规范的规定制作模板，并以此模板划线。先定出螺栓孔的中心，用钢冲头冲出一小凹坑，再用台钻（或手电钻）钻眼。母线接头螺孔的直径宜大于螺栓直径1mm，钻孔应垂直，不歪斜，螺孔间中心距离的误差应为±0.5mm。

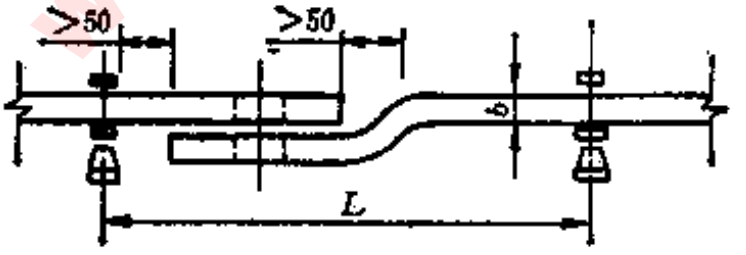


图5-42 矩形母线搭接

L—母线两支持点之间的距离

2．接触面加工

（1）母线接触面加工的主要作用是消除母线表面的氧

化膜及折皱和隆起部分，使接触面平整而略粗糙。通常采用钢丝刷清除母线表面的油污或氧化物，用锉刀将母线表面锉平。当接头数量较多时，可在铣床或刨床上加工母线接触表面。接触面的加工不宜过分精密，否则反会使接触不好。不能用砂布清除母线的油污和氧化物，以免砂布上的玻璃屑或砂粒嵌入金属内，增加接触电阻。

母线接触面加工是否平整，氧化膜是否打磨干净，是母线能否紧密接触和不过热的关键。在母线接触面加工时，一定要在锉平母线的过程中不断用直尺进行接触面的透光检查，透光必须一致，以保证接触面的平整。

（2）将铜母线的接头锉平、磨光后，应立即涂上焊锡膏，准备接头搪锡，将涂上焊锡膏的铜母线接触面浸入锡锅，使锡附在母线的表面。铝母线和其他材质的母线接触面经加工后必须保持清洁，并涂上电力复合脂（简称电力脂）。若暂不联接时，应将接头用油纸保护。传统的母线接触面加工工艺，要求在接触面抹上中性凡士林，新的国家施工规范规定母线接触面涂抹电力复合脂，而不采用中性凡士林。这是因为中性凡士林滴点太低，只有54℃，在正常的母线运行温度70℃情况下，早已流淌，以致母线接头间产生间隙，灰尘、水分随之侵入间隙中，增加了母线接头的接触电阻，引起接头发热；另外，中性凡士林对铜、铝母线联接处所产生的电化学腐蚀没有缓解作用，抗盐雾能力差。国内生产的多种电力复合脂，其滴点可高达180～220℃，在较高的运行温度下不会流淌。电力复合脂中含有细微的导电金属填料，所以导电性能好，而且这种填料的电位介于铜和铝之间，有缓解铜铝导体联接时的电化学腐蚀的作用。与中性凡士林相比，在相同的接触压力下，采用电力复合脂的接头有较小的

接触电阻。

（3）母线经加工后，其截面的减小量对于铜母线不应超过原截面的3%，对于铝母线不应超过原截面的5%。具有镀银面的母线搭接面不得任意锉磨。

3. 机械联接

母线以贯穿螺栓联接时，螺栓在母线上的布置及螺栓的直径、个数都有明确规定，如图5-43所示。

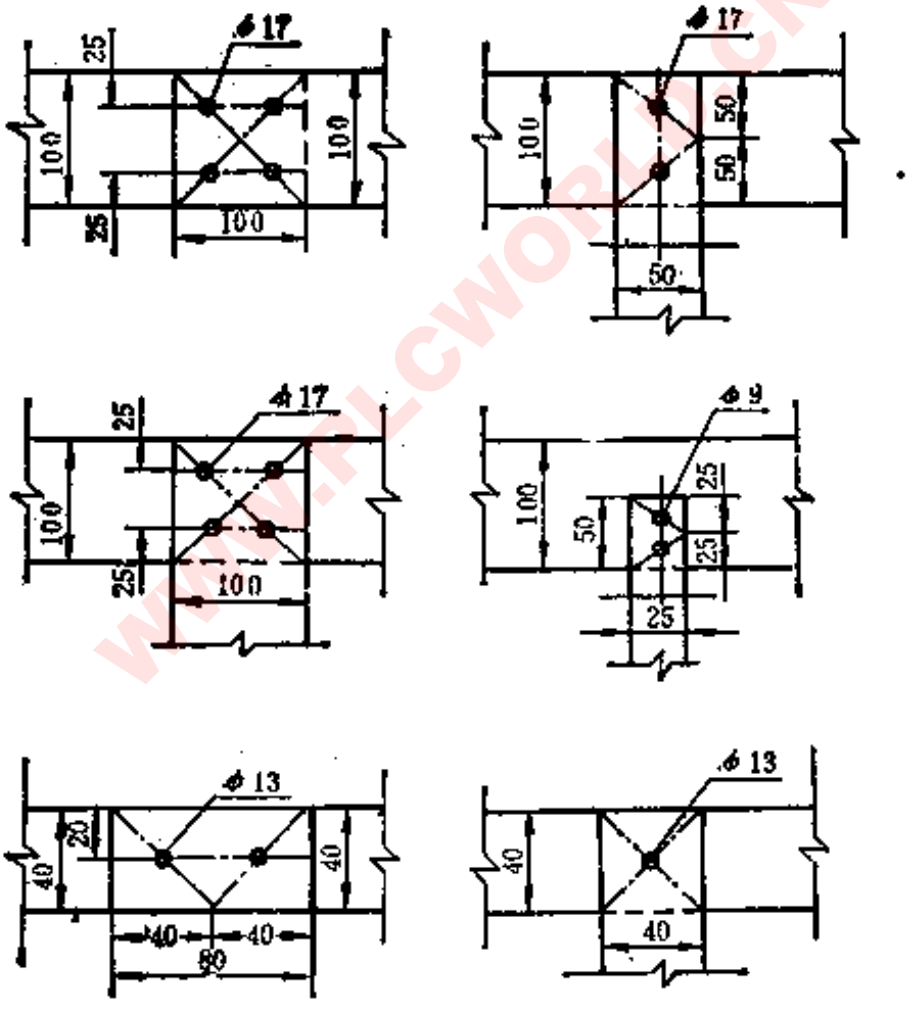


图5-43 各种母线螺栓联接的布置图

（1）母线联接螺栓时，先逐个均匀地拧紧，然后对称地加力拧紧。螺栓的松紧对母线接头的接触电阻有很大影响，不应过松或过紧。一般说来，螺栓拧得紧一些能使接触紧密，接触电阻也较小，但拧得过紧反而会得到相反的效果。传统的母线联接操作工艺，要求用0.05mm×10mm塞尺检查母线联接处，并以此确定螺栓的拧紧程度。由于用塞尺检查母线接头的检验方法不能充分有效地反映接触面的实际情况，因而是一种有缺陷的检验方法。根据国际上通用的母线联接工艺，我国新规范要求对母线的联接螺栓使用力矩扳手紧固。力矩扳手紧固螺栓可使每个相同直径的螺栓对母线的压力相等，受力均匀，可增加母线接头接触面，从而减少接触电阻，使母线不致过热。表5-2列出了母线联接接头螺栓的紧固力矩值。

表5-2　钢制螺栓的紧固力矩值

螺栓规格（mm）	力矩值（N·m）
M8	8.8～10.8
M10	17.7～22.6
M12	31.4～39.2
M14	51.0～60.8
M16	78.5～98.1
M18	98.0～127.4
M20	156.9～196.2
M24	274.6～348.2

图5-43所表示的母线联接螺栓数量及规格，是根据表5-2钢制螺栓的拧紧力矩值计算出螺栓施加于母线接触面的压强在6.86～17.65MPa的范围内，所以安装母线接头时，螺

栓规格、数量和钻孔尺寸不能任意改动，以避免母线接头联接不良而使接头温升过高。

在特定场合，母线联接若使用铝合金螺栓或铜螺栓，亦应用力矩扳手紧固，当螺栓强度级别相当于钢制螺栓 4.6 级时，其紧固力矩值可参照表5-2的数值或按设计图样标注的螺栓力矩值紧固。

螺栓的旋紧程度与母线安装时的温度有关。温度高时拧得稍紧一些，而温度低时就可以拧得稍松一些。在实际操作时，我们可在温度高时取紧固力矩的上限值，而温度低时取紧固力矩范围偏低的值。

（2）母线联接用的螺栓、螺母、垫圈要能防止生锈和其他有害气体的侵蚀，所以都要用镀锌制品。考虑到室外的环境条件比室内恶劣，因此，户外使用的紧固件必须是热镀锌制品。

由于母线联接螺栓都用力矩扳手紧固，为此，螺栓、螺母的六角头尺寸一定要标准，用于母线装置的紧固件必须符合国家的有关标准。进行母线联接时，两外侧都要有平垫圈，螺母侧应装弹簧垫圈、联接螺栓的长度以紧固后露出螺母 2～3 个螺纹为好。

（3）交流母线的固定金具或其他支持金具不应构成闭合磁路。在工程中，可以使用非导磁材料制成的夹具或者以铜螺栓和铁质夹具组合使用，以避免交流母线因产生涡流而发热。

（4）母线搭接处的接触面，对铜、钢母线应搪锡。铜与铝联接时，在干燥的室内可直接联接，在室外或潮湿的场所应使用铜铝过渡板，铜端应搪锡，以防止因两种不同金属直接接触后产生电化学腐蚀而影响接触效果。

（5）多片矩形母线间，应保持不小于母线厚度的间隙，每片母线的接头应错开，不可聚积在一起。

4．母线的焊接

在工厂变电所内常用的硬铝带状母线，除了用螺栓联接，还可以采用焊接法联接。焊接方法有电弧焊、氧乙炔焊和氩弧焊。

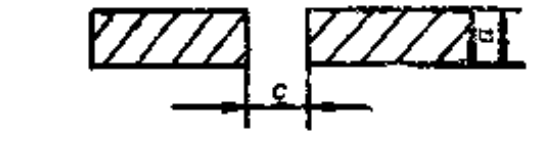
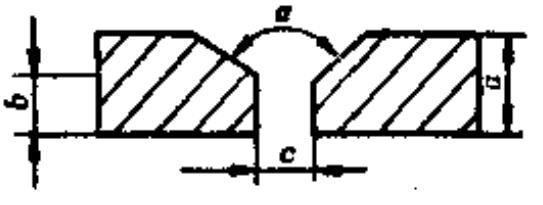
氩弧焊是一种较优越的铝母线焊接方法。施焊时，氩气将空气与焊件隔开，因此焊缝不会产生氧化膜和气孔；氩弧焊加热时间短，电流均匀，热影响区较小，母线退火不严重，焊接后母材强度降低不多，焊缝产生裂纹的可能性较气焊和碳弧焊为少，氩弧焊对于确保母线接头焊接质量有重要作用。因此，槽形母线、管形母线、封闭母线、重型母线都要采用这种焊接工艺。然而，氩弧焊要使用较复杂的设备及氩气，焊工又要接受专门训练和考核，因此，当接头数量少时，还是用气焊和电弧焊。

（1）硬铝母线对焊时，焊口尺寸应符合表5-3的规定。

截面较小的铝母线接头常用氧-乙炔焊焊接。先将两片母线端部平面切成65°～75°角，一般开V形坡口。母线焊接用的焊条、焊丝应符合国家标准；其表面应没有氧化膜、水分和油污等杂物。为了保证母线焊缝的焊接质量，可用钢丝刷清刷焊件坡口两侧表面，使焊口清洁。当以氧-乙炔焊接时，在火焰的高温下，焊丝与铝母线同时熔化，接头冷却后熔结，使接头具有较好的机械强度和导电性能。

焊接铝母线时，要用铝焊药。铝焊药可由市场购得。焊药的作用是使氧化铝结渣，并使熔化的金属表面结成一层液体的焊渣层，使焊缝与空气隔离，阻止生成新的氧化铝膜。

表5-3　对口焊焊口尺寸　　（mm）

母线类别	焊口形式	母线厚度 a	间隙 c	钝边厚度 b	坡口角度 α (°)
矩形母线	 ①	<5	<2		
		5	1～2	1.5	65～75
	 ②	6.3～12.5	2～4	1.5～2	65～75

使用铝焊药时，用蒸馏水将其调成膏状，再用毛刷将焊药膏涂在待焊接头的表面上。

（2）当母线截面较大时，要对铝母线预先加温。一般用氧-乙炔火焰或加热炉加温，然后再行焊接。

（3）铝母线焊接完毕后，焊接处用清水冲洗，将残留的焊药渣冲净，以免腐蚀母线。

（4）母线焊接时，每个焊缝应一次焊完。焊接接头必须牢固，不能有砂眼、裂纹，焊好后的母线其弯折偏移和中心偏移都不能大于允许值，以保证焊缝的接触面积和母线的平直美观。

（三）母线安装

安装母线以前，必须将母线支持架和支持绝缘子安装完毕。

1．母线在支持绝缘子上的固定

WWW.PLCWORLD.CN

高压母线用高压绝缘子支持固定；而低压母线就可用低压瓷瓶或胶木、塑料支持件固定。

母线在支持绝缘子上的固定方法，通常有三种，一种是用螺栓直接将母线定位于绝缘子上，这种方法须事先在母线上钻个长圆形孔，此孔的长轴应该与母线的走向一致，以便因温度变化而变形时，母线能够充分伸缩、移动。另一种是用卡板将母线固定和安装在绝缘子上，将卡板转动一个角度即可将母线卡住，如图5-44 a 所示。再一种方法是用扁铝夹板在绝缘子上固定和安装母线，如图5-44 b 所示。

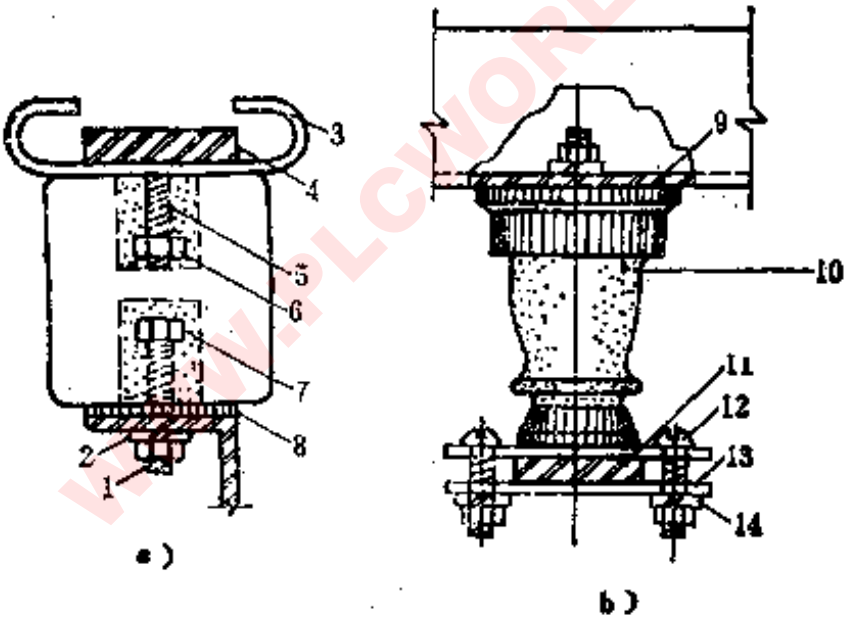


图5-44　母线固定示意图

a）卡板安装固定　b）扁铝夹板固定

1—螺栓　2—弹簧垫圈　3—母线夹板　4—母线　5—机螺钉　6—螺母　7—水泥砂浆　8—橡胶或石棉垫圈　9—角钢　10—ZA-10Y 支柱绝缘子　11—母线　12—M8 机螺钉　13—铝夹板　14—弹簧垫圈

WWW.PLCWORLD.CN

母线固定金具与支柱绝缘子间的固定应平整牢固，不应使它所支持的母线受到额外的应力。当母线平置时，母线支持夹板应与母线保持1～1.5mm的间隙，这样可使因持续的负荷电流或偶然性短路电流通过而导致母线发热时，母线可以自由膨胀伸缩。

2. 母线伸缩节

母线应按设计规定装设伸缩节。如无规定时，一般应隔20m左右安置一个。伸缩节系用0.2～0.5mm厚的紫铜片或铝片（用于铝母线）制成，由于已有制造厂的定型产品，施工现场无需单独加工伸缩节。在安装前应检查母线伸缩节，不应有裂纹、断股和折皱，其总截面不应小于母线截面的1.2倍。

3. 母线的排列与刷漆

（1）母线的排列顺序应按设计规定，低压母线沿墙敷设时的固定如图5-45所示。

当设计未对母线排列提出明确要求时，可参照下列规定。

垂直布置的母线：交流L1、L2、L3相的排列应由上向下；直流母线正极在上，负极在下。

水平布置的母线：交流L1、L2、L3相排列应由内向外，直流母线正、负极排列由内向外。

配电盘上水平布置的交流母线，由盘后向盘面排列为L1、L2、L3相。

引下线的排列：交流L1、L2、L3相的排列应自左至右（面对母排），直流正、负极的排列应自左至右（面对母排）。

全厂各变电所、各种不同电压等级配电装置的母线，其

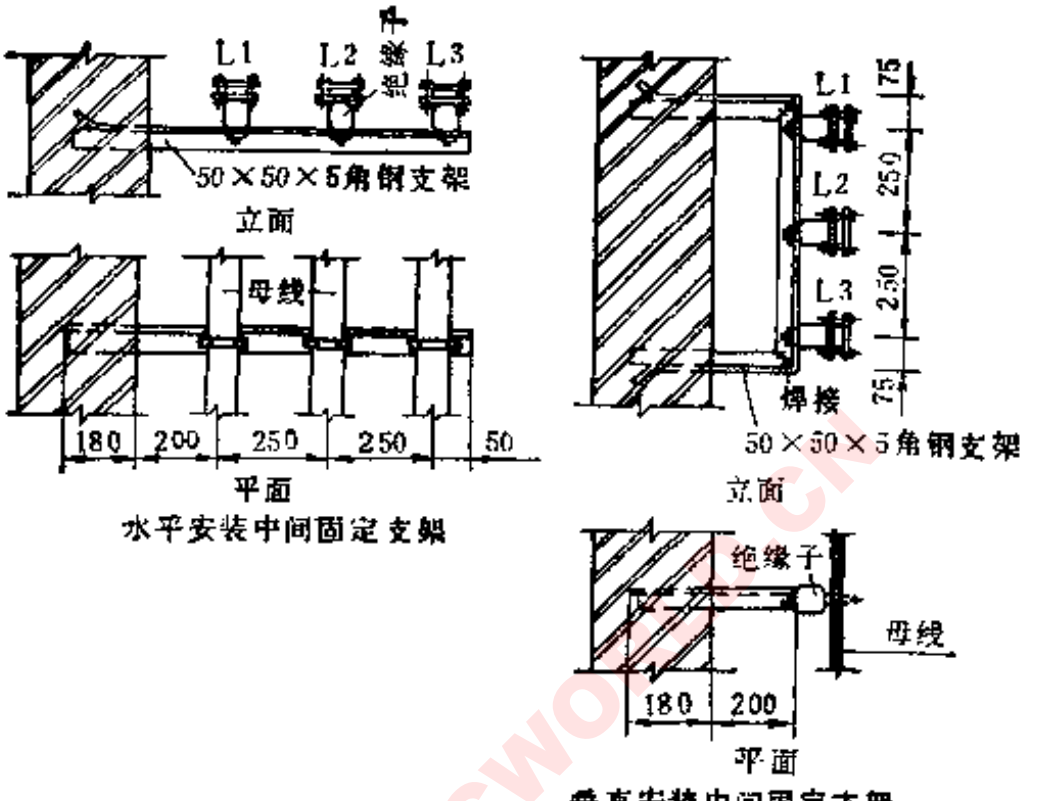


图5-45 母线在墙上的固定

相位的配置都应相互一致。

规定母线相序的统一排列方式，有助于运行操作人员的安全。因为L3相的相色漆规定为红色，故将其排在最容易接近的一侧，以引起接近母线人员的警觉。

（2）母线安装完毕后，都应刷漆。

母线刷相色漆不但可以方便运行及使维护人员易识别相序，而且在一般情况下能起到母线防腐保护作用。经过试验证明，母线表面刷漆后，还能起散热作用。刷漆后的铜、铝母线与裸露的母线相比较，在相同条件下，前者的温升可下降20%～35%。

母线分相刷色的规定是：L1相——黄色，L2相——绿色，L3相——红色。直流母线，正极——赭色，负极——蓝色。交流中性汇流母线和直流均衡汇流母线，不接地者为紫色，接地者刷紫色带黑色条纹。

母线刷相色漆时要注意：单片母线的所有面及多片、槽形、管形母线的所见到的表面应涂相色漆，而母线的螺栓联接及支持联接处、母线与电器的联接处以及距所有联接处10mm以内的地方不刷相色漆。

练习题

5-1 对工厂供电系统的主接线有哪些基本要求？

5-2 内桥式主接线和外接式主接线有什么区别？它们各适用于什么场合？

5-3 你们工厂的变电所主接线方式如何？有什么优点和缺点？

5-4 扼要说明下列继电保护：

瓦斯保护；定时限过电流保护；电流速断保护；差动保护。

5-5 说明过电流继电器、瓦斯继电器、信号继电器及避雷器在电路中各起什么作用。

5-6 油断路器、真空断路器、六氟化硫断路器各有何特点？断路器的灭弧原理有何不同？

5-7 隔离开关、负荷开关各有何特点？它们在电路中的作用如何？

5-8 根据图5-46所示电路，写出送电操作步骤和停电操作步骤。

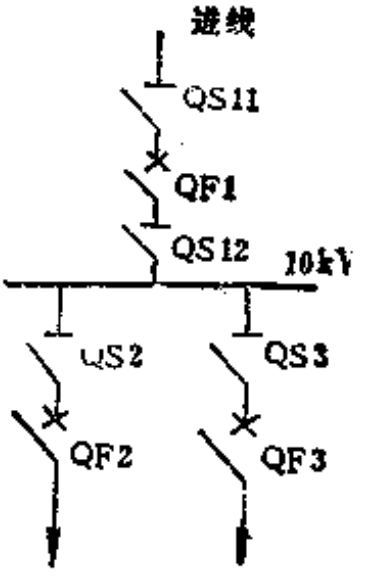


图 5-46

5-9　高压成套配电装置一般由哪些电器元件组成？请用单线图表示出它们的联接方法。

5-10　何谓高压开关柜的“五防”？

5-11　说明母线联接部位涂电力复合脂的理由？

5-12　如何检测母线联接部位螺栓的拧紧程度？

WWW.PLCWORLD.CN

第六章　电工安全技术

电气安全包括人身安全和设备安全两方面。人身安全是指电工本身及一般人员在生产与生活中防止触电及其他电气危害；设备安全是指电气设备、工作机械及其他设备的安全。本章主要介绍触电事故发生的种类和规律，电流对人体的作用，安全电压，防止触电的技术措施及触电急救等电气安全基础知识。

§6-1　电气安全技术基础

一、触电事故的种类和规律

触电事故是人体触及带电体的事故，主要是电流对人体造成的危害，是电气事故中最为常见的事故，是我们讨论电气事故的主要内容之一。

由于电气工作人员要经常接触电气装置，往往由于工作疏忽大意，操作技术不熟练或者没有遵守操作规程和安全技术规程，而造成人身触电事故。为了安全生产，防止事故的发生，因此特别要求电气人员应具有一定的安全用电知识，了解触电的原因，掌握用电的规律和特性，认真执行安全技术规程，采取必要的措施，人身触电和设备受损的事故是完全可以避免的。

（一）触电事故的发生

1．触电事故产生的原因

人体因触及带电体承受过高的电压，以致引起死亡或局

部受伤的现象称为触电。工程上发生触电事故，常见的有：①缺乏用电常识，触及带电的导线；②没有遵守操作规程，人体直接与带电部分接触；③由于用电设备管理不当，使绝缘损坏，发生漏电，人体碰触漏电设备外壳；④高压线路落地，造成跨步电压引起对人体的伤害；⑤检修中，安全组织措施和安全技术措施不完备，接线错误，造成触电事故很多；⑥偶然因素，即大风乱断低压线路，带电导线落到人体上及人体受雷击等。

2．触电事故的种类

人体触电按伤害的程度不同可分为电击和电伤两种。电击是指因电流通过人体而使内部器官受伤的现象，如造成肌肉抽筋，呼吸困难，心脏麻痹以至于死亡，这是最危险的触电事故。通过人体内的工频电流超过50mA时，中枢神经就会遭受损失，使人感觉麻痹，呼吸困难。如果通过人体的工频电流超过100mA时，只要很短时间就会失去知觉而死亡。

电伤主要是指电对人体外部造成的局部伤害。包括电弧烧伤、电烙印、熔化的金属微粒渗入皮肤等伤害，严重时也能致命。

（二）触电事故的规律

（1）农村触电事故远远多于企业：主要是农村设备简陋，技术水平低，安全意识差。

（2）低压触电多于高压触电：据统计表明，低压触电死亡人数占全部触电死亡人数的70%～80%，主要是低压电网广，与人接触机会多。

（3）单相触电事故多：特别是手持电动工具和移动性电具漏电引起的触电事故，占漏电全部事故的60%以上。在预防触电事故中，应着重考虑单相触电的危险。

（4）“事故点”多发生在电气联接部位：如开关、插销、接头、控制器等带电部位容易外露。

（5）有明显的季节性：每年的6～9月因天气潮湿、多雨，降低了电气设备的绝缘性能；特别在农村正值农忙，用电增多，是出现触电事故的高峰时期。

（6）误操作事故多：主要是安全教育不够，因操作违章造成。

（7）青、中年人触电事故多：由于他们缺乏电气安全知识，工作中缺乏警惕。

（8）触电事故与生产部门性质有关：冶金、矿山、建筑、机械等行业，存在作业现场混乱、温度高、湿度大、移动式设备多、金属设备多等不利因素。

二、电流对人体的作用

电流通过人体内部器官(心脏)，造成肌肉抽筋、呼吸困难、心脏颤动以至死亡，是触电伤害的主要原因。电流对人体伤害的严重程度与通过人体电流的大小、持续时间、途径、电流的种类以及人体的状况等多种因素有关。

通过人体的电流越大，人体生理反应越明显，感觉越强烈，引起心室颤动所需的时间越短，致命的危险就越大。

当人体通过工频交流电流约0.7(女性)～1.1(男性)mA时，就会引起人的感觉，称为感知电流。

人触电后能自主摆脱危险的电流的最大值称为摆脱电流。摆脱电流可看作人体允许电流，对成年男性最小摆脱电流约9mA，女性为6mA，儿童的摆脱电流较成人为小。

在较短时间内（数秒到数分钟）危及生命的最小电流称为致命电流。当通过人体的工频电流达到30～50mA，直流电流超过80mA时，会使人心脏跳动不规则、昏迷、血压升

高、强烈痉挛，有生命危险。当100mA的工频电流通过人体时，只要很短时间就会使人呼吸窒息、心脏停止跳动，失去知觉以致死亡。

电流对人体的伤害程度与电流途径有关系。电流通过心脏会引起心室颤动；电流通过中枢神经或有关部位会引起中枢神经系统强烈失调；电流通过头部会使人昏迷，若电流较大，都会导致死亡。电流通过脊髓，会使人截瘫。因此，从左手到胸部是最危险的电流途径；从手到手、从手到脚也是很危险的电流途径；从脚到脚是危险性较小的电流途径。

三、安全电压

触电的伤害程度与通过人体电流的大小及触电时的情况有关。通过人体的电流值还决定于作用到人体的电压和人体的电阻。因此，人体所触及电压的大小和触电时的情况，是决定触电伤害程度的最重要因素。

在干燥场合，人体的电阻可按1000～2000Ω考虑。对人体电阻的影响因素很多，除皮肤厚薄外，皮肤潮湿、多汗、有损伤、带有导电性粉尘等，都会降低人体电阻；接触电压增高，会击穿表皮角质层，并增加机体电解，也会降低人体电阻。在干燥场合，在220V电压下，流过人体的电流为110～220mA。

我国规定安全电压等级为36、24、12、6V，多采用24V和12V，这个规定是以人体允许电流与人体电阻的乘积为依据。

四、防止触电的技术措施

触电事故往往无任何预兆，而且在极短的时间内造成不可挽回的严重后果。因此，对于触电事故要特别注意以预防为主。

触电包括直接触电和间接触电。对于不同种类的触电事故，应采取不同的安全防护措施。

（一）直接触电防护措施

直接触电是指直接触及或过分接近正常运行的带电体。其防护措施如下所述。

（1）将带电体绝缘：采用绝缘良好的电线和电气设备来防止触及带电体。临时用电线路的绝缘也必须良好。

（2）装设屏护：即用屏障或围栏防止触及带电体。凡容易被人碰到的电气设备，如变电所的变压器装置在地面上时，周围应设围栏，并挂上“止步，高压危险”的警告牌。

（3）设置障碍：设置障碍可以防止无意触及带电体或接近带电体。如用保护遮栏、栏杆或网罩，可以防止人体无意接近带电部分，并挂上“高压，生命危险”的警告牌，警告人们不得接近或触及带电设备的绝缘部分。

（4）加大间隔：保持间隔可以防止无意触及带电体。凡易接近的带电部分应置于伸臂范围之外，但要保持检修安全距离等。

（5）装漏电保护装置：作附加保护，不应单独使用。动作电流不宜超过30mA。

（6）安全电压：根据场所特点，采用相应等级的安全电压。如规定凡工作人员经常接触的电气设备——行灯、机床照明灯、地下隧道照明灯等，应采用24V以下的安全电压；在锅炉及其他金属容器内部和特别潮湿的场所工作，必须采用不高于12V的电压。

（二）间接触电防护措施

间接触电是指触及正常时不带电而发生故障时带电的金属导体（电动机、变压器外壳）。

（1）采取保护措施：电气线路和设备发生故障时，能在规定时间内自动切断电源，防止接触电压的危险。如过电流保护、漏电保护、接地保护及绝缘监视等保护措施。

（2）加强绝缘：如使用Ⅱ级设备，在接头处采用双重绝缘，处理高压电气设备的故障时，应使用安全用具绝缘棒、绝缘手套及绝缘靴等，防止工作绝缘损坏后在易接近部分出现危险的对地电压。

（3）不导电环境：可以防止工作绝缘损坏时人体同时触及不同电位的两点。例如，合理使用安全用具；断电检修时，要在开关上挂出“有人工作，不准合闸”的标示牌，并用试电笔检验确认无电源才能进行工作，同时将不带电部分的线路短路作临时接地。

（4）等电位环境：这种措施是把所有容易同时接近的裸露导体（包括设备以外的裸露导体）互相联接起来，以防止危险的接触电压。对各处运行的电气设备，如电机、变压器、变配电装置等的金属外壳，采取良好的接地或接零保护措施，也是制造等电位环境，以防止危险的接触电压。

（5）电气隔离：如采用隔离变压器，以实现电气隔离，防止裸露导体故障带电时造成电击。

（6）安全电压：根据场所特点，采用相应等级的安全电压。

（7）严格遵守各种安全操作规程和安全工作规程，加强安全教育：①对有关工作人员普及安全用电知识和系统学习规范等，在进行电工安装与维修操作时，必须严格遵守各种安全操作规程和规定，做到不带电作业，不乱装、乱拆、乱修电器设备。②必须带电作业时（如操作高压电源）要由专业电工按操作顺序进行操作，执行工作票制度。坚决

消灭误操作、带负载拉闸和未拆接地线合闸等事故。③健全合理的规章制度，执行安全操作制度，贯彻岗位责任制。熟悉设备的结构和系统接线情况等。

（8）在雷雨时，不可走近高压电杆、铁塔和避雷针的接地导线周围，至少要相距10m远，以防雷电入地时周围存在跨步电压而造成触电。

五、触电急救

触电急救的要点是动作迅速、救护得法。首先是使触电者尽快脱离电源，然后根据触电者的具体情况进行相应的救治，即迅速而持久的抢救。

（1）发生高压触电时，救护人员应特别注意安全，迅速拉开电源开关，如果无法很快地切断电源开关时，应使用合格的绝缘棒并戴绝缘手套和穿绝缘靴使触电者脱离电源。

抛掷一端可靠接地的金属线，使线路短路接地，迫使保护装置动作，断开电源，也是一种应急办法。但注意，抛掷的一端不可触及触电者和其他人。同时立即通知有关部门停电。

（2）发生低压触电时，为了使触电者尽快脱离电源，采取下列可靠方法：

1）迅速切断电源开关；若无法很快切断时，可就地用干燥的竹竿、木棒等将电线拨开，或用干燥的衣服、手套、塑料制品和木板作隔离，拉开触电者脱离电源。禁止赤手接触触电者的身体。

2）触电者脱离电源后，应分秒必争地进行抢救。若触电人还能呼吸，心脏尚在跳动但已失去知觉时，应抬到通风处休息，加强观察。若人触电后受伤较严重，经常出现失去知觉，甚至发生“假死”现象，应立即进行人工呼吸及体外

心脏按摩、挤压，尤其在输送触电者至医院抢救过程中不能中断。急救不只是医生的事，每个电工都应掌握一定的触电急救技术，如人工呼吸等。

§6-2 电气设备的接地与接零

接地和接零在工程上应用极为广泛。由于接地和接零的具体目的不同，又可分为工作接地、工作接零、保护接地、保护接零四种。后两种是防止电气设备意外带电造成触电事故的技术措施，所以是本节介绍的重点。

一、电气设备的接地

将电气设备不带电的金属外壳或过电压保护装置用的导线（接地线）与接地体之间作良好的电气联接，称为接地。直接与大地接触的金属导体称为接地体。联接电气设备接地部分与接地体的导线就是接地线。接地线和接地体总称“接地装置”。

（一）接地的作用

接地的作用有两个，一是为了人身的安全，防止因电气设备绝缘损坏而引起触电事故。将电气设备正常运行时不带电的金属外壳或构架用导线同接地体可靠地联接起来，这种保护人身安全的接地措施，称为保护接地，接零和重复接地也属于这种情况；另一个是为了保证电气设备的正常运行和安全的需要，在电气回路中某一点进行接地，称为工作接地。如三相变压器星形接线的中性点、避雷器和避雷针的接地。根据接地的目的不同，按其不同的作用，常见的接地方式有：保护接地、工作接地、防雷接地、接零和重复接地等。现将各种接地的作用分述如下。

1．保护接地的作用及应用范围

为了保证电气设备（包括变压器、电机和配电装置）在运行、维护和检修时，不因设备的绝缘损坏而导致人身触电事故，所有这些电气设备不带电的部分如外壳、金属构架和操作机构以及互感器的二次绕组等都应妥善接地。电气设备的接地规程规定：电压在1000 V以下电源中性点不接地的电网和1000 V以上任何形式的电网中，均需采用保护接地（称之为IT系统），作为保安技术措施，应用很广泛。

保护接地的原理是给人体并联一个小电阻，以保证发生故障时，减小通过人体的电流和承受的电压。

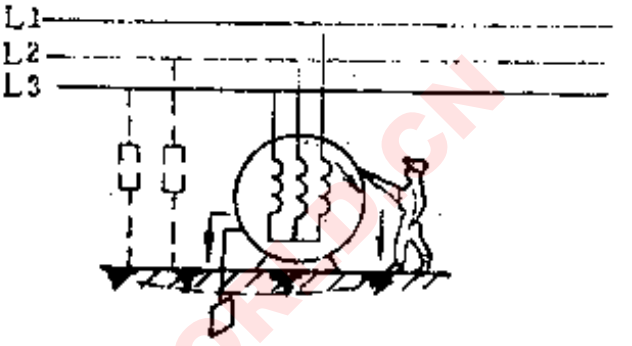


图6-1 保护接地（IT系统）

图6-1所示电动机采用保护接地后，当一相绕组因绝缘损坏而碰壳，即与外壳短路时，此时若工作人员触及带电的设备外壳，因人体的电阻远较接地极的电阻大，大部分电流流经接地极入地，而通过人体的电流极其微小，从而保证了人身的安全。

2. 保护接零（接中线）的作用及应用范围

在电源电压低于1000 V、中性点接地的配电系统中，应采用保护接零，即把设备的金属外壳和电源的中性线相联接。如图6-2所示，称之为TN-C系统。这种系统是将保护零线与工作

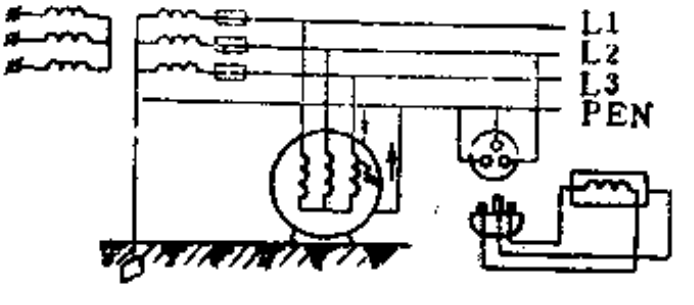


图6-2 保护接中线（TN-C系统）

零线合用一根零线，在三相负载基本平衡的一般工业企业中应用。保护接零的原理。如图6-2所示。当某电动机 L3相绕组碰壳时，则 L3 相与中性线间短路，使熔断器动作，切断电源，断开L3相，免除了触电危险。图中还表示了单相用电器具如使用三脚插头和三眼插座时，正确的接线应将用电器具的外壳用导线接在粗脚上，通过插座直接与中性线（或接地线）相联。

在中性点不接地系统中，绝对不容许采用接零保护。因为系统中的任何一点接地或碰壳时，都会使所有接在零线上的电气设备金属外壳上呈现近于相电压的数值，这对人身是十分危险的。

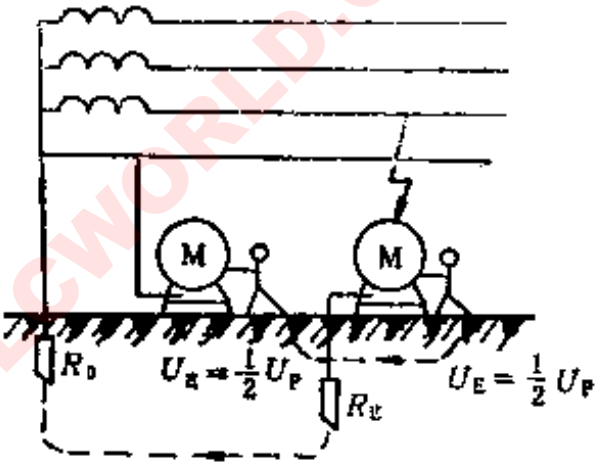


图6-3　中性点接地系统中接地和接零混用的危险

还必须指出：在380/220 V三相四线系统中，为了保证线路保护装置可靠地动作，确保人身安全，用电设备金属外壳不能单纯地采用保护接地，一定还要采用保护接零。这种金属外壳接地又保护接零的保护方式，称之为 TT 系统。380/220 V三相四线系统与人的接触机会最多，生产、生活中都能碰到；所以要采用更为稳妥的保护安全措施。不论系统中性点接地与否，严禁同一电网一部分设备用保护接零，另一部分设备用保护接地，见图6-3。当实行保护接地的某设备绝缘损坏时，该设备外壳对地电压将为 $U_E=U_P R_E/(R_0+R_E)$，如 $R_0 \approx R_E$ 时，

WWW.PLCWORLD.CN

$U_E = \frac{1}{2}U_P$。这时，即使实行了保护接零，所有设备上承受的电位也是危险电位，约为$U_P/2$。若人接触到设备外壳，是不安全的。

为了使电气设备具有更可靠的保护接零措施，使人身安全得到切实保证，根据国际电工委员会的标准，中性点直接接地的电力系统，目前广泛采用TN-S系统，即中性线与保护零线分开的保护系统，如图6-4所示。该系统不应称为“三相五线”制，因为保护地线PE正常情况下并无电流通过，它与工作零线是不同的。这是在三相四线制电源系统加一根专用保护接地线PE构成，该线往往是从电源进户线处接地引用，是民用住户建筑配电线的安全措施。在有爆炸危险的电气装置（矿井除外）的中性点接地系统中推荐采用TN-S系统。

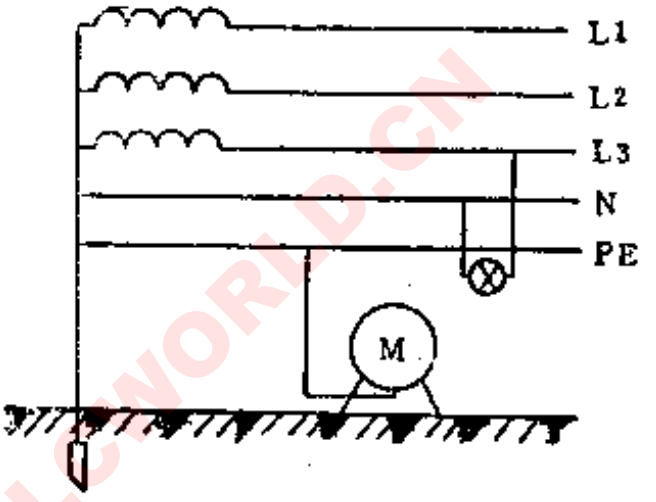


图6-4　TN-S系统

3. 重复接地的作用

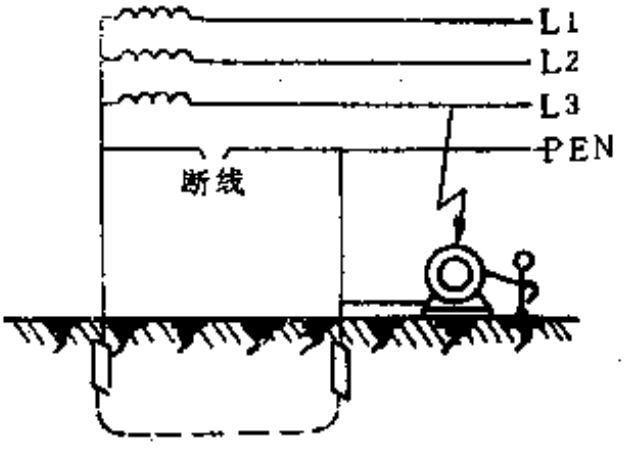


图6-5　有重复接地时零线断线

WWW.PLCWORLD.CN

重复接地的作用是，在中性点直接接地的低压系统中，减轻零线断线的危险性，确保接零安全可靠。当系统中发生断线时，在一定程度上能保证人与断线处后面的电气设备接触时的安全。见图6-5。

重复接地还可以改善架空线路的防雷性能，如在架空线路进户线的入口附近，架空干线或分支线的终端处的重复接地。线路的重复接地可以将沿线路侵入的雷电波导入地中。

重复接地的正确接法如图 6-6 所示。TN-C系统是对 PEN 线作重复接地；TN-S 系统是对 PE 线作重复接地；TN-C-S 系统一般在 PEN 线上自某点起分为 PE 和 N 线作重复接地。

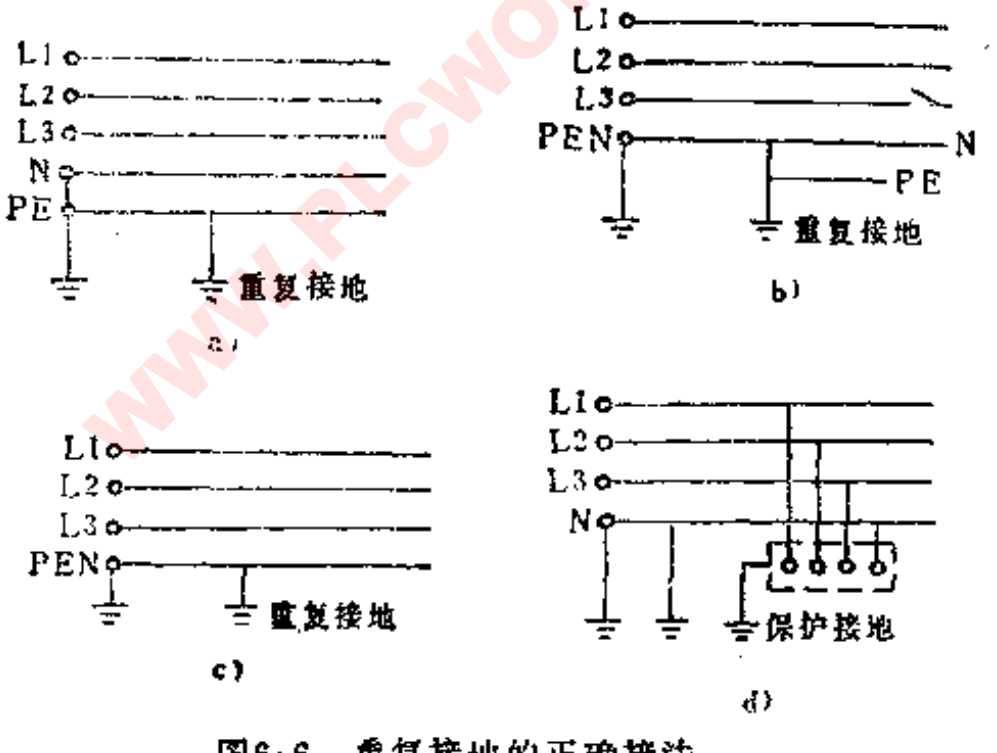


图6-6　重复接地的正确接法

a）TN-S系统　b）TN-C-S系统　c）TN-C系统　d）TT系统

4．工作接地的作用

工作接地是为了保证电气设备正常运行，也是安全的需

要，它可以减轻一相接地时的危险及减轻高压窜入低压的危险，如中性点接地、防雷设备和耦合电容器底座的接地等。

（二）接地电阻的要求值

根据变、配电所和送、配电线路的防雷接地、工作接地和保护接地的不同用途、不同电压等级和不同设备容量等因素，对其接地电阻值都有相应的要求。

1．架空线路的接地

（1）35kV及以上有避雷线的架空线路接地置装的接地电阻，见表6-1。

表6-1　架空线路接地电阻值

接地装置使用条件			接地电阻值（Ω）
土壤电阻率（Ω·m）	粘土	100及以下	10
	砂土	100～500	15
	多石土壤	500～1000	20
	砂	1000～2000	75
	岩石	2000以上	30

（2）3～35kV无避雷线小接地短路电流系统，在居民区的钢筋混凝土杆、金属杆应作接地，其接地电阻一般不应超过30Ω。

电压在1000V以上，单相接地短路电流小于或等于500A的，称为小接地短路电流系统。

（3）低压架空电力线路的零线，每一重复接地的电阻，一般不应大于10Ω。

（4）避雷器或保护间隙的接地线与变压器的外壳及低压侧中性点联接在一起后的共同接地，其接地电阻值应不大于4Ω。避雷器单独接地的接地电阻，一般不应大于5～10

WWW.PLCWORLD.CN

Ω。

2. 电气设备的接地

（1）电压在1000 V及以上（高压）的电气设备接地：在大接地短路电流系统中，由于接地短路电流很大，很难限制设备对地电压不超过某一范围或靠线路上的速断保护装置切断接地故障。故要求其接地电阻应符合下式要求，即

$$R_E \leqslant \frac{2000}{I_E}$$

式中 I_E——计算用接地短路电流（A）。

但当 $I_E > 4000$ A时，可取 $R_E \leqslant 0.5\ \Omega$。

小接地短路电流系统，发生接地故障时，电压在1000 V以下时，设备分布较广，安全要求应高些，所以要求设备对地电压不超过120 V，即 $R_E \leqslant \frac{120}{I_E}\ \Omega$，

电压在1000 V以上时

$$R_E \leqslant \frac{250}{I_E}\ \Omega。$$

根据计算出的电阻值，一般不应大于10 Ω。

（2）电压在1000 V以下（低压）电气设备的接地电阻值，见表6-2。

（3）变、配电所内，不同用途和不同电压等级的电力装置，除有专门规定者外，可使用一个总的接地装置，其接地电阻应满足其中最小值的要求。

（三）电气设备保护接地的范围

电气设备应接地或接零的部分如下所列：

1）电机、变压器、开关设备及其操作机构的底座和外壳。

WWW.PLCWORLD.CN

表6-2　电气设备接地电阻值

序号	电力线路名称	接地装置的特点	接地电阻值（Ω）
1	中性点直接接地电力系统	1kV以下电气设备及100kVA以上的变压器或发电机	$R \leqslant 4$
2		100kVA以下的变压器或发电机	$R \leqslant 10$
3		电流、电压互感器二次绕组	$R \leqslant 10$
4	中性点不接地电力线路	1kV以下电气设备及100kVA以上的变压器或发电机	$R \leqslant 4$
5		100kVA以下的变压器或发电机	$R \leqslant 10$

2）配电盘及控制屏等的金属框架或外壳。

3）电力电缆终端头的金属外壳和电缆的金属外皮，布线的钢管等。

4）室内外配电装置的金属构架及金属遮栏。

5）互感器的二次绕组，局部照明变压器的二次绕组。

6）居民区的高压架空电力线路的金属杆塔和钢筋混凝土杆。

7）架空线路的避雷线和架空线路的铁塔，装了避雷线的杆、塔，每座均应接地。

8）照明灯具、电热设备的金属外壳和底座。

9）手提电动工具及移动式电气设备。

10）医疗用电器设备。

（四）接地和接零系统中的特殊安全措施

携带式及移动式设备如行灯、电动工具、交流电焊机等，这类设备的电源线的绝缘由于受拉、磨或其他机械原因容易遭到破坏，因此有很大的触电危险性，应着重考虑其安全用电问题以及应该采取的特殊安全措施。

1．移动式电动机械和手持电动工具外壳接地

对移动式电动机械和手持电动工具的外壳应重复接地，如单相用电设备用三眼插销及三芯线将外壳重复接地。所使用的导线，应是绝缘的橡皮软线，其绝缘电阻应不小于0.5 MΩ。如电源系中性点不接地系统，宜采用漏电保护装置保护。

2．交流电焊机的接零(接地)

电焊机和其他电器设备一样，应采取保护接零(或接地)措施。但地线不许搭接在电线管上或可燃性管道上。

为了防止高压窜入低压造成触电危害，交流电焊机二次侧应当接零(或接地)。但必须注意二次侧接焊钳的一端是不允许接地（或接零）的，否则将出现图 6-7 a 所示的危险电流。因此，正确的接法应当象图 6-7 b 那样，将二次侧接工作件的一端接地(或接零)。

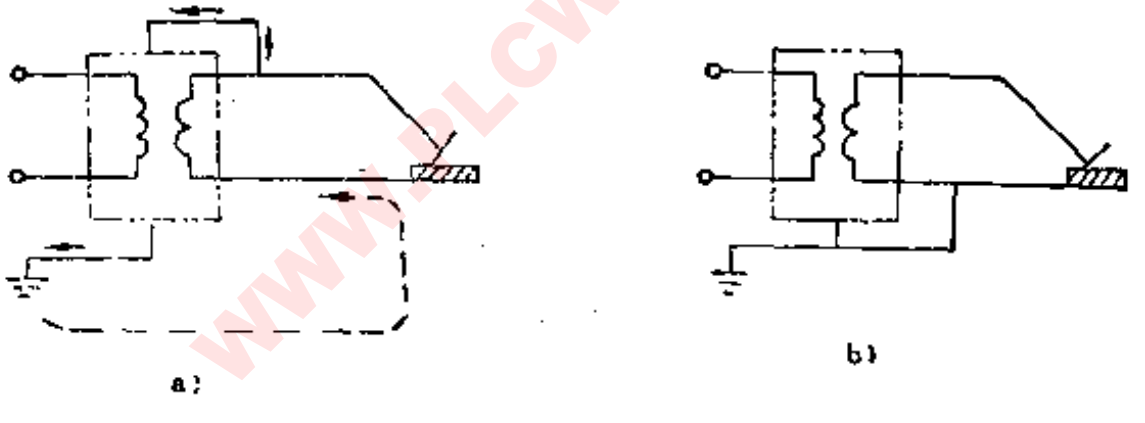


图6-7　交流电焊机的接地（接零）

a）错误接法　b）正确接法

为了避免有害电流，焊接时最好把焊件与大地隔开来。

3．防止高压窜入低压的安全措施

在对地绝缘的电网即中性点不接地系统中，当变压器绝缘损坏，高压意外窜入低压时(如遭雷击)，低压系统的对地电压将升高到高压系统的对地电压。这对整个低压系统的工

WWW.PLCWORLD.CN

作人员将是非常危险的，而且故障可能长期存在，这就更增加了问题的严重性。

图6-8所示是减轻高压窜入低压所造成的危险程度的最简单方法。该方法是把低压电网的中性点或者一相经击穿保险器接地。击穿保险器是由两片铜制电极夹以带孔的云母片制成的，其击穿电压不过数百伏。正常情况下，击穿保险器内的云母片，使低压电网与大地保持绝缘状态。电气设备的保护方式，不受安装击穿保险器的影响，仍采取保护接地。

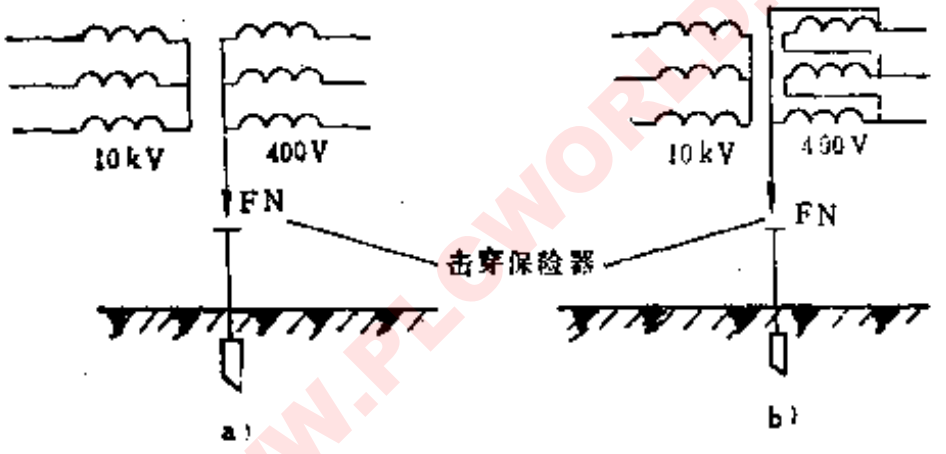


图6-8　击穿保险器的联接

当高压窜入低压时，云母片带孔部分的空气隙被击穿，故障电流经接地装置流入大地。这个电流即高压系统的接地短路电流，它可能引起高压系统过电流保护装置动作，切除故障，断开电源。如果这个电流不大，不足以引起高压保护装置动作，则可以通过选定适当的接地电阻值，控制低压系统电压升高不超过120 V。这就要求接地电阻

$$R_E = \frac{120}{I_g}$$

对中小容量的10kV电网，因高压接地电流一般都不超过30A，只要使 $R_E \leqslant 4\Omega$ 是能满足上述条件的，从而减轻了高压窜入低压后的危险性。

正常情况下，击穿保险器必须保持绝缘良好。否则，中性点不接地系统对地绝缘的电网将变成接地系统，系统内电器设备保护接地起不到保证安全的作用。因此，对击穿保险器要经常检查，或者象图 6-9 所示那样，接上两只电压表对击穿保险器进行经常性的监视。正常时，两电压表读数各为相电压的一半；如果击穿保险器内部短路，失去绝缘能力，则电压表V1读数至零，电压表V2读数上升至相电压。

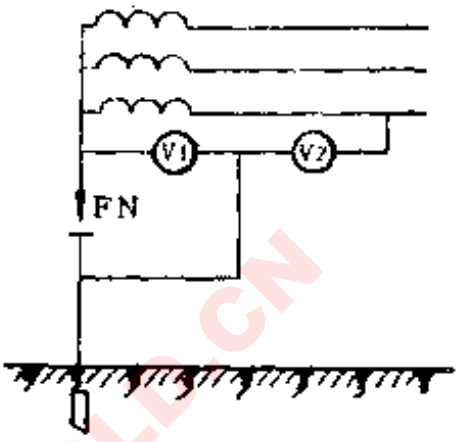


图6-9　击穿保险器的监视

此外，在中性点不接地电网中，对电网的绝缘进行监视（通过三只相同规格的电压表）也是发现一相接地故障的一种有效办法。

二、接地与接零的比较

工作接地、保护接地与工作接零、保护接零之间往往容易混淆不清，该用保护接地的地方而用了保护接零；或者相反。主要原因是对它们的概念、原理、适用范围等辨别不清。为此列表6-3进行比较。

三、接地装置和接零装置的安装与施工

（一）接地体的构造与安装

接地体分为自然接地体和人工接地体。

（1）接地装置的接地体应尽量利用自然接地体，以便

表6-3 接地与接零的比较

	保护接地	保护接零	工作接地	工作接零
定义	用电设备正常且不带电的金属外壳与接地装置联接	用电设备的金属外壳 用导线与系统零线联接	运行须要的接地，如中性点接地	220V用电设备的电源零线
适用范围	中性点不接地的电网	中性点接地电网，三相四线制系统	中性点接地电网	三相四线制电网，220V用电设备
目的	起安全保护作用	起安全保护作用	保证电网运行安全	提供供电通路
作用原理	平时保持零电位，不显作用。只有在绝缘损坏、发生漏电时才能降低对地电位，从而防止触电伤人事故	平时保持零线电位，不显作用。只有发生单相碰壳或短路时，电流很大，才促使保护装置速动，切断电源。必须有重复接地，才能保证人身安全	平时有三相不平衡电流。当发生高、低压短接时，可保证其他低压相线升压不高，为10V左右，提高电网运行的安全性。但触及工作接地线，有触电危险	平时线上有单相负载电流。如发生断线，负载不工作，断点后的零线有相电压，较危险
注意事项	确保接地可靠性。在中性点接地系统中，严禁单纯的保护接地，必须同时采用保护接零，才能确保人身安全	严禁在三相系统中的零线上装设保护装置和开关等，严禁零线断线，严禁同一电网接地和接零混用	工作接地必须单独设置，严禁与其他接地装置混设 工作接地，如有故障，危害整个保护接零系统	单相回路中，相线和零线都应该装熔断器

www.FECWORD.cn

节约钢材。可以用作电气设备接地装置的自然接地体有：埋在地下的金属水管，建筑物的金属构架，有金属外皮的电缆，埋在地下的建筑物钢筋混凝土基础等。

（2）人工接地体一般用镀锌钢管、镀锌角钢或镀锌圆钢等制成。禁止在地下用铝导线作为接地线。

垂直的接地体多用50×50×5mm角钢，接地体长2.5m，端部削尖，打入地中，如图6-10所示。

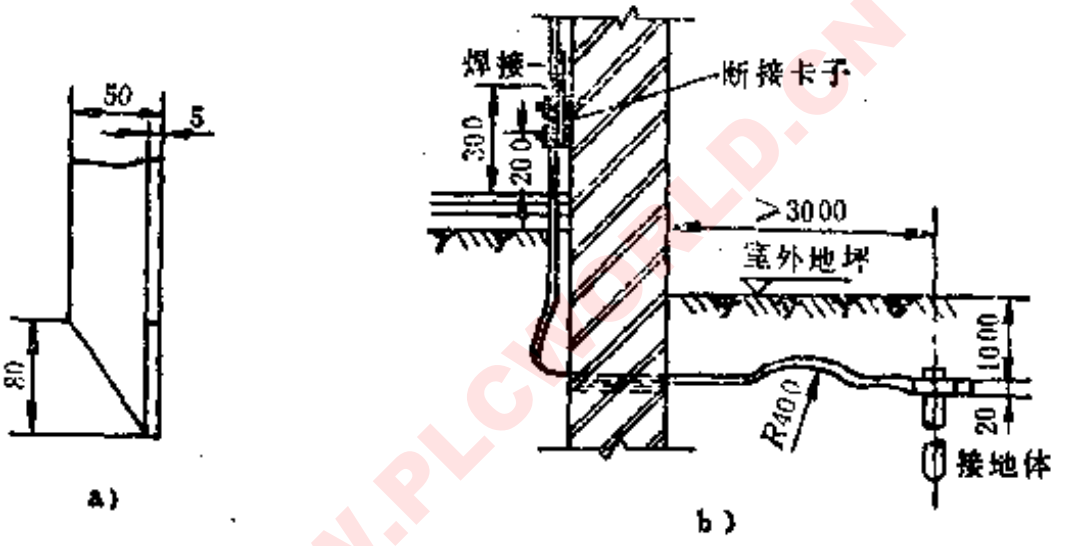


图6-10　接地体及其安装图

a）角钢接地体　b）接地装置图

管形接地体一般用直径50mm、管壁厚度不小于3.5mm、长2.5m的钢管制成，将其一端打扁，打入地中。

地下的金属接地体，其顶端应埋设在地下0.8m左右，一般不应小于0.6m。

水平接地体用扁钢或圆钢等材料。扁钢的厚度不应小于4mm，截面积不小于48mm²。圆钢的直径不应小于16mm。

（3）接地线相互间的联接以及和接地体的联接，应采用搭接焊。扁钢的搭接长度为宽度的2倍，并至少焊接三个

棱边；圆钢的搭接长度为圆钢直径的 6 倍。扁钢与角钢或钢管的焊接，除应在其接触两侧进行焊接外，还应焊上由扁钢弯成的直角形（或弧形）卡子与角钢(或钢管)焊接。凡焊接处均应刷 油 漆防腐。常用的接地导体的联接方式如图6-11所示。

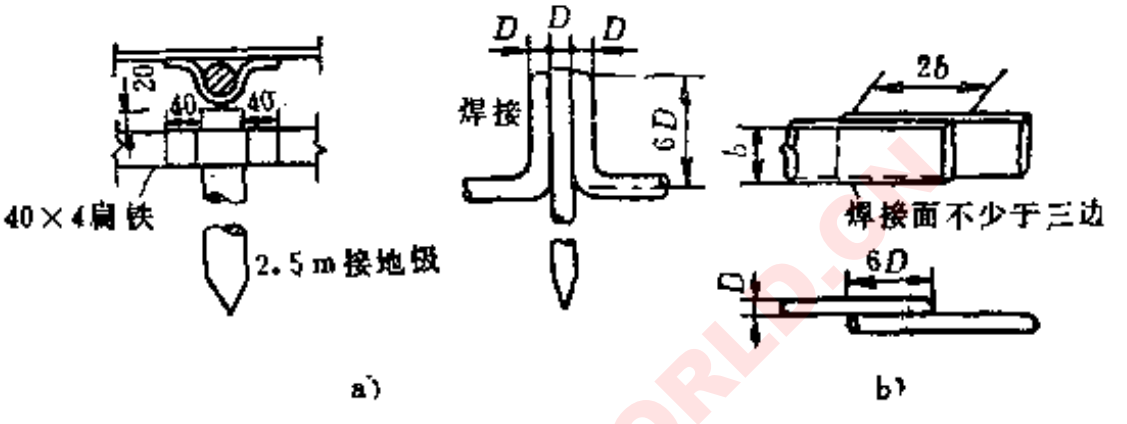


图6-11　接地体联接方式

a）接地极与接地导体联接图　b）接地导体联接图

（4）接地体的数量由接地电阻值来决定，但不能少于两根，接地电阻不符合要求时，应增加接地体。接地体的形式很多，有水平放射线形、环形和混合形等类型，如图6-12所示。

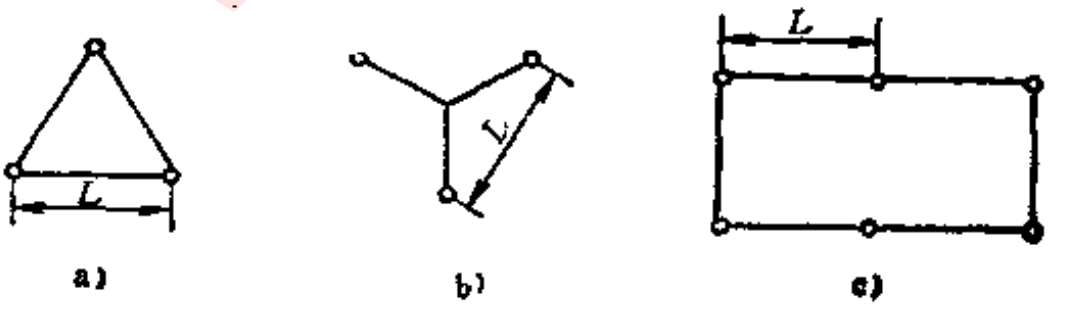


图6-12　接地体的形式

a）环形　b）放射形　c）混合形

$L=3\sim5$ m

（二）接地线的敷设

接地线的敷设包括接地极间联接用的扁钢及接地干线和接地支线的敷设。

（1）接地线应尽量利用建筑物的金属结构（必须是焊接成一个整体的，能形成电气通路）：生产用的金属结构如金属梁柱、吊车轨道等；其他如配线的钢管，电缆的铅包、铝包皮等也可以利用。如果不能利用上述导体时，就应另设接地线。常用的人工接地线为：室内用ϕ5～ϕ8mm的圆钢或25mm×4mm的扁钢；室外用ϕ14mm的镀锌圆钢或40mm×4mm的镀锌扁钢。接地线间的联接和与接地体的联接均采用搭接焊，凡焊接处均刷油漆防腐。

为了保证足够的机械强度，宜采用钢接地线或接零线，有困难时可采用铜、铝接地线或接零线，室内明设的导体最小尺寸为：铜线4mm^2，铝线6mm^2。地下不得采用裸铝导体作接地线。

（2）室外接地干线与支线一般敷设在土沟内。敷设接地线以前，应按设计要求的位置与走向挖掘土沟，沟的深度一般为0.7m，宽约0.4～0.5m，然后将扁钢（或圆钢）埋入。接地线与管道、电缆等交叉的地方以及接地线可能受到机械损伤的地方，都应装设保护装置。一般可将接地线套上钢管。

（3）室内的接地线多为明设。有时，与设备联接的支线需穿过地面，接地线过门时也要穿过地面，此时可将接地线埋设在混凝土地坪内。当接地线沿墙直线敷设时，固定接地线的支架其间距约在500～1000mm之间；当接地线转弯敷设时，在距转角处1000mm以内的地方应设支架；接地线的支架与地面的距离应在300～800mm之间。室内接地干线

的作法见图6-13和图6-14。

图6-13 室内接地干线安装示意图

（4）家用电器的接地：目前，一般住宅及高层建筑的供电都没有专用接地线，以致家用电器所带的接地线或要求装设接地线的部分不知往何处接，因而在家用电器的使用上发生了不少触电伤亡事故。

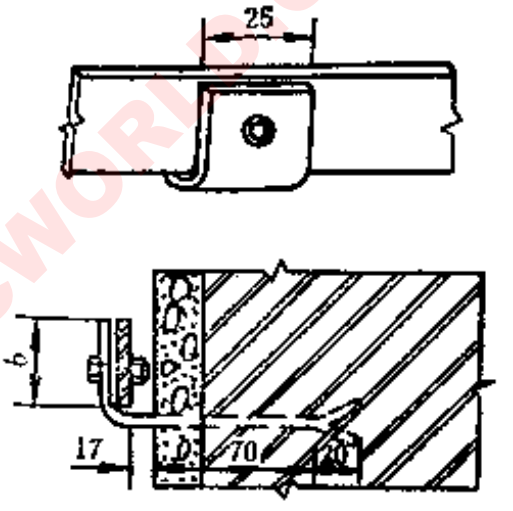


图6-14 接地干线支持卡子安装图

随着高层建筑的发展，其电气接地的使用安全性和施工经济性亦越来越被社会重视。当今的建筑物都是混凝土地面，当人体一旦接触到漏电的家用电器外壳时，其危险性是可想而知的。所以必要的安全用电和可靠的电气接地是十分重要的。在住户内，人们在没有专用接地线环境下，都迷信于把自来水管作接地体，实践证明这是不可靠的。但是比较安全又经济的接地方案可以借用自来水管作为接地线回路的一部分。室外管路必须另作接地装置，与水管（用4mm×25mm扁钢）焊接，在水

箱进水管处也应跨接，以构成接地回路，使整个管路系统始终处于良好的大地零位状态。

在室内管路上，可采用图6-15所示的平衡块 PE 与水管相焊，作为家庭零电位平衡系统（接地干线）。室内电气布线所有需要保护接地的部分，全部汇至平衡块 PE。各接地线与平衡块采用螺纹联接，在 PE 底板上攻螺纹。上述 PE 尺寸按施工时实际需要而定，它应该安装在比较隐蔽的地方，如卫生间或厨房等地方。

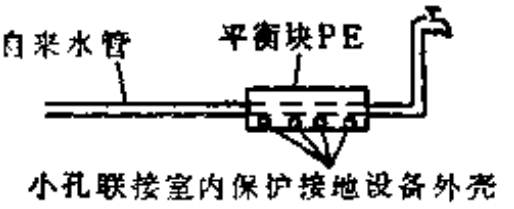


图6-15　平衡块的利用

必须注意，在金属管路接头两端须用扁钢跨焊，以消除接头填充物而增大了的接地电阻。按照上述方法接地，除特殊情况外，是足够安全的。接地线应采用截面积不小于0.75 mm^2的多芯软铜绞线。

（5）接地线经过建筑物伸缩缝时，如采用焊接固定，应将接地线通过伸缩缝的一段作成弧形，如图6-16所示。

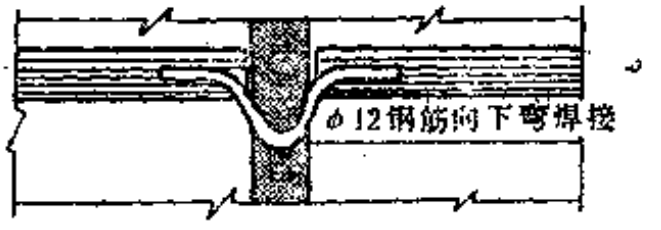


图6-16　接地干线在伸缩缝做法

（6）接地线与电气设备的联接可以用焊接和螺栓联接两种方法，但无论用哪种方法，都必须保证联接牢固、可靠，需要移动的设备（如变压器等）宜采用螺栓联接。在有振动的地方，要有防松措施，如弹簧垫圈。不需要移动的设备（如金属构架，开关操作机构，金属盘、柜等）可采用焊接。

每一接地的设备，必须用单独的接地线分别与接地干线

或接地极联接，不准用串联接法。

（三）接地装置的维护与检查

当接地装置安装完毕后，应对所有接地干线和支线的外露部分以及电气设备的接地部分进行外观检查，检查的内容是：检查电气设备是否已按设计要求接好接地线；螺栓联接是否牢固、可靠，是否有弹簧垫圈；检查所有的焊口叠焊长度与焊缝是否合符要求。最后，在所有焊接处各面涂以沥青漆。明设的接地线均涂黑色，接地中性线应涂紫色漆，并在其上每隔150mm 涂以10～15mm 宽的一道黑色漆。

运行中的接地装置应进行定期检查和试验。对于变、配电所和电气设备的接地装置，应在每年的 3 ～ 4 月份进行一次接地电阻测定及接地线和接零线的外部检查。测量接地电阻时，应将接地线与被保护的电气设备断开。对接地装置的外观检查，主要是检查接地线的联接卡子、跨接线等的接触是否良好；接地线有无损伤及腐蚀现象等。

四、接地电阻的测量

接地电阻就是接地装置和大地间的电阻。接地电阻包括：接地导线的电阻、接地体本身的电阻、接地体与土壤间的接触电阻和大地电阻。接地电阻主要是指接地电流流入土壤中时，土壤呈现的电阻。所测得的接地电阻值，在任何季节都不能超过允许的最高值。

当一项接地装置工程竣工时，应及时进行接地电阻的测量，如果接地电阻值不满足规定的要求，需增加接地极数量，或设法减小土壤电阻率，以使接地电阻值符合设计要求。

测量电气设备和防雷设施等接地装置的接地电阻，即使在一年中土壤最干燥的时期，所测接地电阻，也应符合表6-1

和表6-2规定的标准。

常用的接地电阻试验方法有电压表-电流表法和接地电阻测量仪直接测量的方法。

（一）电压表-电流表法

电压表-电流表法测量接地电阻的接线图见图6-17。

使用这一方法时，测试电源应为不接地的交流电源或经过隔离变压器联接的电源。电流表的准确等级要不低于0.5级。电压表要使用准确度较高的真空管电压表或采用高内阻万用表，以减小测量误差。

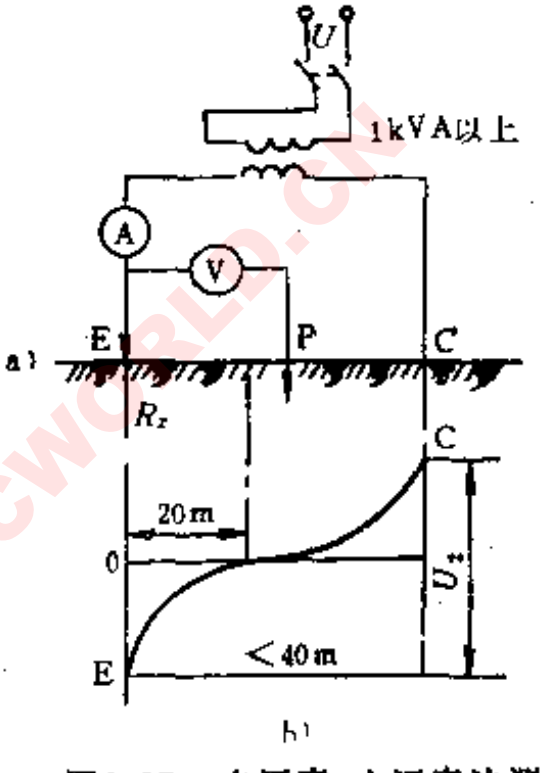


图6-17　电压表-电流表法测量接地电阻

a）接线图　b）电位分布曲线

测量接地电阻时，辅助接地极C与接地网之间的距离，一般不应小于5倍接地网对角线的距离，但最少不得少于40m。中间接地极P接在接地网与辅助极之间的零电位上。为尽量消除外界杂散电流对测量结果的影响，需加大测量电流，一般测量电流不应小于4～5 A。所测的接地电阻值由下式算出，即

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

在测量接地电阻时，工作人员应戴绝缘手套和穿绝缘靴，以防触电和跨步电压伤人。

WWW.PLCWORLD.CN

（二）用接地电阻测定仪测量接地电阻

目前，我国生产的接地电阻测量仪有ZC-8型和ZC-29型等。ZC-8型测量仪主要由手摇发电机、电流互感器、滑线电阻和检流计等组成。其外形与普通绝缘兆欧表差不多，所以一些工矿企业的工作人员习惯称它为接地电阻兆欧表。测量仪还随表带一套附件，附件包括接地探测针两支、导线三根。图6-18为利用三个端钮的测量仪测量接地电阻的接线图。图6-19为利用四个端钮的测量仪测量接地电阻的接线图。

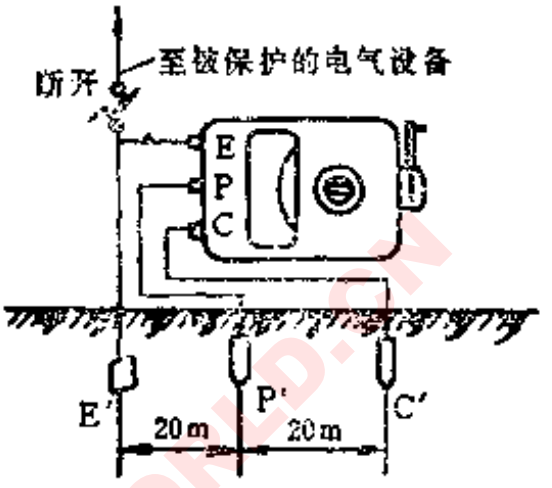


图6-18　三个端钮的测量仪测量接地电阻线路图

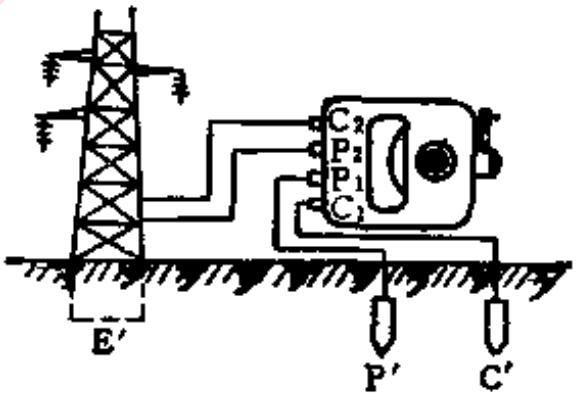


图6-19　测量电阻小于1欧时的接线图

四个端钮的测量仪，实际上是在用接地电阻测定仪测量小量程（小于1Ω）接地电阻时，将测定仪端钮C2、P2之间的联接片打开，分别用导线联接到被测接地体上，这样可以消除测量时联接导线电阻附加的误差。

WWW.PLCWORLD.CN

§6-3 漏电保护装置（漏电保护器）

漏电保护装置是现代工业国家低压电网中不可缺少的一种电气装置。它主要作用是防止由漏电造成人身触电事故和防止单相触电事故；其次是防止由漏电引起火灾事故以及监视或切除一相接地故障。漏电保护器一般有触电保护和过压保护两种功能，也有带短路保护和断相保护功能的。漏电保护器主要适用于低压系统，在高压供电系统中，它可用于绝缘监视的检漏等。

一、漏电保护装置概述

（一）漏电保护器的工作原理

漏电保护器是把漏电电流和触电电流转变为信号输出，再把这个信号通过放大、中间传递转换和传递，然后促成执行机构动作来切断电路电源，使触电者和电器设备得到保护。在低压配电系统中采用“漏电保护＋接地（或接零）保护”的方式，可以弥补保护接地和保护接零的不足，进一步提高安全用电的水平。但决不能认为设立了漏电保护器就取消接地保护和其他保护设备。

1．三相线路漏电保护原理

我们知道，当三相交流负载不平衡时，零序电流随即产生，即

$$\dot{I}_1+\dot{I}_2+\dot{I}_3\neq 0$$

上式说明三相交流电路中，如因某一相绝缘损坏而漏电，使得三相电流有效值不相等，此时用电设备如采用星形接线方式，零线将有电

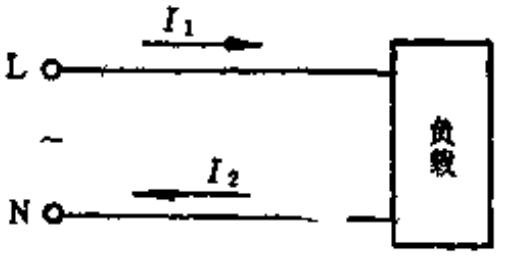


图 6-20

流产生，经过检测机构可将此电流转变为信号输出。根据电流信号原理，经过放大、中间传递转换，促成执行机构自动切断电源。这种漏电保护器属电流动作型。

2. 单相线路的漏电保护原理（图6-20）

单相线路正常运行时，线电流 I_1 和经过负载回到电源中线的电流 I_2 是大小相等、方向相反的，即 $\dot{I}_1+\dot{I}_2=0$

当负载侧线路发生触电、漏电或接地故障时，由于触电电流或漏电电流的存在，电流 I_1 和 I_2 不相等，也可转变为信号输出。

某些电气设备正常时，金属外壳是不带电的。但当绝缘不正常，其运行设备外壳漏电，将出现接地电阻 R_E，设备外壳对地将产生电压 U_E，设漏电电流的有效值为 I_0，则有

$$U_E=I_0R_E\ (V)$$

图6-21为运行设备外壳漏电图。根据电压信号原理，自动切断电源的漏电保护器属电压动作型。

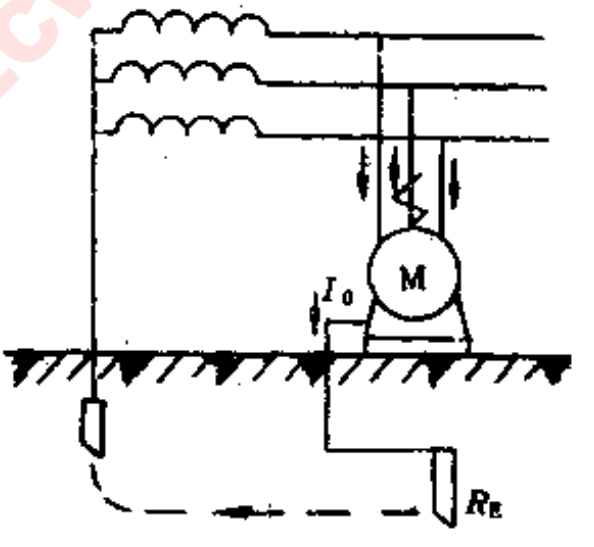


图6-21　设备漏电图

（二）漏电保护装置的分类

漏电保护装置种类很多，按信号检测原理分为电流型、电压型和脉冲型三种。电流型反映零序电流的大小；电压型反映对地电压的大小；脉冲型反映漏电电流的突然变化值。漏电保护电器按结构主要分为电磁式和电子式两大类。电磁式漏电保护器由检测元件检出的漏电信号，直接通过电磁元件自动

切断电源；而电子式是由检测元件检测出的漏电电流，经过电子放大器间接推动执行元件切断电源。

它还可按动作电流大小分为高灵敏度型、中灵敏度型和低灵敏度型三种。

二、零序电流型漏电保护器

零序电流型以零序电流为动作信号，分为互感器式和无互感器式两类。

电流动作型漏电保护器的组成部件有：①检测部件——零序电流互感器；②判别部件——漏电脱扣机构；③执行部件——触头系统；④检查部件——试验回路；⑤放大部件——放大信号的中间机构，介于零序电流互感器与脱扣器之间。

（一）有互感器式零序电流型漏电保护器

这类装置用零序电流互感器作为取得漏电信号的检测机构。按其中间机构不同可分为电磁脱扣型、灵敏继电器型、电子放大型三种。图6-22所示是三相线路漏电保护原理图，三根相线和中线同时穿过零序电流互感器TAZ。正常情况下，通过零序电流互感器一次绕组的相电流与中线电流平衡，各电流的相量和为零，TAZ二次绕组便没有电流输出，执行机构不动作。当任一相发生触电、漏电或接地故障时，漏电电流 I_0 经人体和大地返回到配电变压器的中性点，形成

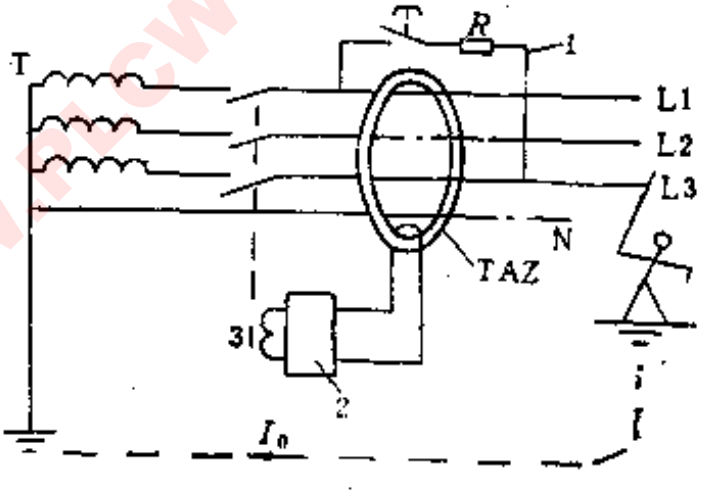


图6-22　三相四线制漏电保护电路原理图

1—试验回路　2—放大部件　3—脱扣机构

闭合电路。这时 TAZ 的一次侧就有励磁电流，在环形铁心中产生磁通，使二次侧绕组感生二次电压 U_2，此电压经元件 2 放大输出加在脱扣机构 3 的线圈上，产生一个电流 I_2。当 I_2 足够大时，推动脱扣机构动作，切断电源。

电路中按钮和电阻器组成为试验回路 1，供检验保护器动作正常与否用。

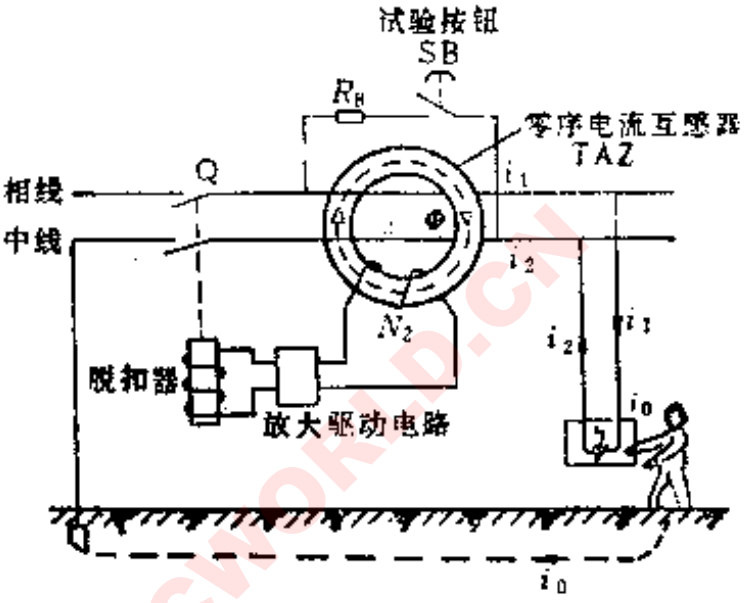


图6-23　单相漏电保护器原理图

单相线路漏电保护原理与三相线路漏电保护原理相似。图6-23是 DZL 18-20 型单相集成电路漏电保护器原理图。当电路正常使用时，无漏电现象，$I_0 = 0$，即 $\dot{I}_1 + \dot{I}_2 = 0$，这时零序电流互感器形成的磁通 $\Phi = 0$，故二次回路没有输出，$U_2 = 0$，放大器不起作用，漏电脱扣器不动作，主开关保持在闭合位置。当对地有一漏电电流 I_0 时，即 $\dot{I}_1 + \dot{I}_2 = \dot{I}_0$，这时 TAZ 铁心中合成磁通 $\Phi_1 + \Phi_2 = \Phi_0$，其二次绕组内就产生一个感应电流，即有一个电压输出。这个电压经过放大器放大，加到执行元件（漏电脱扣器）上，推动主开关，断开电源，起到保护作用。目前，这种电器已在所有场所如办公室、旅馆、饭店、家庭住户中得到了广泛的应用。该漏电保护器的额定漏电动作电流为10、15、30mA。

（二）无互感器零序电流型漏电保护器

这种漏电保护器主要用于不接地系统，对单相漏电起保护作用，是泄漏电流型，其基本接线如图6-24所示。工作原理是供电系统零线经灵敏继电器线圈接地，并与击穿保险器FN并联。当线路发生漏电时，设备的漏电流或人体导电流与其形成回路，灵敏继电器线圈动作，切断主回路，促成全系统停电。因此，较适用于小容量的配电系统。

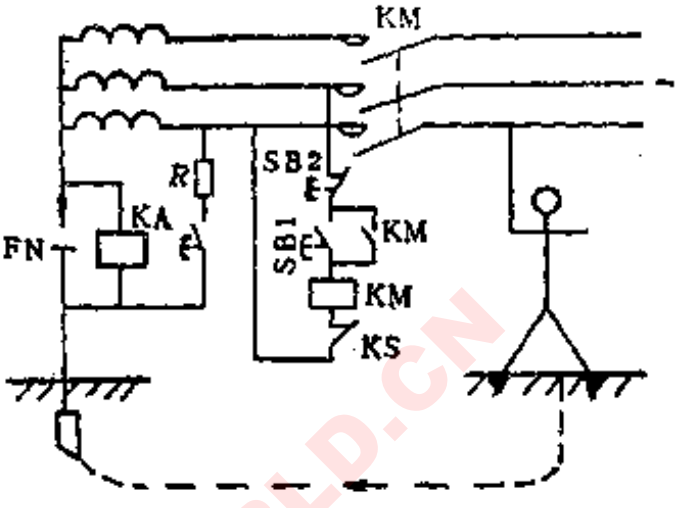


图6-24 无互感器零序电流型漏电保护原理

KA—灵敏继电器 FN—保险器

三、电压型漏电保护器

电压型漏电保护器是以金属外壳对地电压为基础的保护器。一端接设备金属外壳，一端接地形成主保护电路，将其常闭触头接入设备控制电路。当电压继电器KV动作时，设备断电达到漏电保护。参见图3-25。

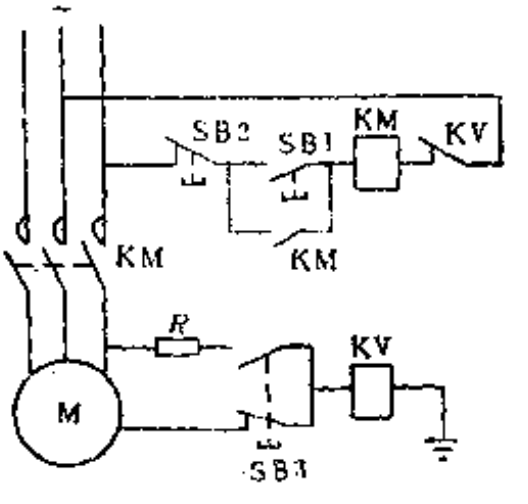


图6-25 电压型漏电保护原理

电压型漏电保护适用于低压供电系统，接地或接零方式均可使用。它不

但能起到保护人身安全的作用，且还能监督设备的绝缘状况。但它存在以下三个难以克服的缺点。

（1）它只能用于变压器中性点不接地系统中，而我国又主要是采用变压器中性点接地系统，故应用范围受到很大限制。如用于接地系统，一台配电变压器只能装一台保护装置。

（2）检测线圈匝数多，线径小，承受过电压和过电流的能力差，继电器线圈常被烧坏。

（3）要求低压电网经常保持良好的绝缘，否则会引起误动作。

因此，电压型漏电保护器应用受到限制。

四、漏电保护器的选用与安装

（一）漏电保护器的选用

选用时首先是质量鉴定。为了提高供电的安全可靠性，近年来，漏电保护器在低压配电系统中被大量采用。在选用漏电保护器时，一定要选用获得中国电工产品认证委员会低压电器认证试验站的产品认证证书的漏电保护器，上面具有CCEE安全认证标志。

一般漏电保护器均备有试验按钮，凡发现按下试验按钮而保护器不动作者，该漏电保护器就必须停止使用。

其次，选用时应按使用场合、设备本身的泄漏电流大小及保护对象（分级）详加考虑，以免漏电开关柜误动。目前我国生产的漏电保护器的动作电流值有15、30、50、70、100mA等，根据安全用电防护要求及其他因素，在不同的场合使用。以下对不同情况的选用范围作一简介，供选用时参考。

（1）对于配电母线总保护或总干线路保护（即第一级

保护）的漏电保护器，宜选用带有短路保护的漏电断路器，动作电流整定值应选择在110mA左右。则此时基本上可杜绝人身触电死亡事故的发生。

（2）对于中小型工厂的车间、居民区等场所，线路保护（即第二级保护）用的漏电保护器如果电路中本已有短路保护器，则选用漏电开关，常选用动作电流与动作时间的乘积来确定其整定值。国际电工委员会（IEC）规定，该级漏电保护的整定值应为30mA·s为人身触电安全电流。

（3）对于实验室、化验室、研究所、医务室、办公室等场所以及每台用电设备线路保护（末级保护）的漏电保护器，可使用漏电插头及插座，整定电流值应根据使用场所的不同来选择。

1）在特别潮湿处、有腐蚀性蒸汽和气体的场所及医疗电气设备等，通常应安装漏电动作电流为6mA的高灵敏度快速动作型漏电保护器。

2）在高空作业或河边使用的电气设备、游泳池的照明线路，即使在工作电压较低的情况下（如36V），仍应安装6～10mA的漏电保护器。

3）对于移动式及携带式设备，一般推荐采用15mA以下快速动作漏电保护器。

4）对于水泵、排风机、压缩机等固定设备，如果考虑装设漏电保护器，其额定动作电流的选择与设备金属外壳的接地电阻有关。当接地电阻在500Ω以下时，单机配用时可选用30mA的漏电保护器；多台设备或额定电流大于100A时则选用50～100mA的漏电保护器；当接地电阻为100Ω以下时，可选用200～500mA的漏电保护器。

5）办公室、民用住宅建筑居室等家用电器，宜在进户

线的电度表后装一台漏电保护器，以预防触电为主，且要求动作可靠。一般家庭一户使用的漏电保护器动作电流宜选为6～15mA；对于使用电热设备的家庭（漏电流变化在1.8～20mA），其漏电保护器动作电流宜选为6～30mA。

（二）漏电保护器的安装与接线

一般电子式漏电保护器的辅助电源均取自被保护的电源，为此应该安装在熔断器的前面，即电源→漏电保护器→熔断器→用电设备，而不能安装在熔断器之后。因为一旦零线熔丝熔断，保护器将失去辅助电源，无法使操作机构动作，就会发生触电事故。但是电磁式漏电保护器可以安装在熔断器后。

一般新安装或使用一个月后，在带电状态下，按动试验按钮，以检查漏电保护器性能是否正常可靠。电子式漏电保护器的安装实例如图6-26所示。

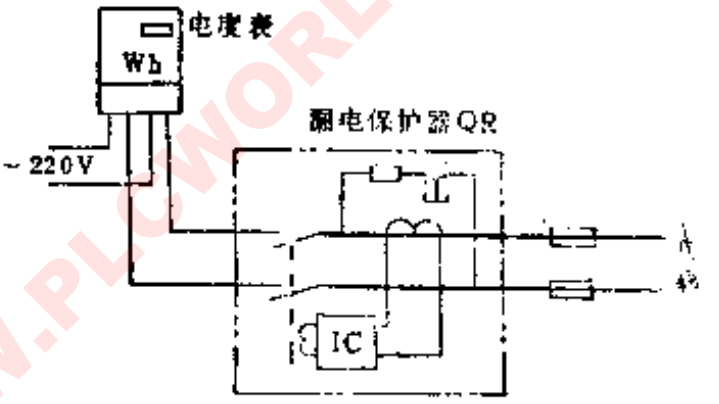


图6-26　电子式漏电保护器安装图

采用漏电保护方式，只有接线正确，才能得到有效的保护效果。接线的原则如下。

（1）漏电保护器所保护的线路及设备的外露导电体应用接地线（PE）联接至接地极上。

（2）在中性点直接接地、整个系统接零的TN系统中，工作零线一定要穿过漏电保护器的零序电流互感器；而保护零线即使在正常工作时，也不能有电流流过PE线，即

WWW.PLCWORLD.CN

一定不能穿过零序电流互感器。

（3）由于不带单相负载的动力线是对称负载，其零线不应穿过零序电流互感器，因此采用三极漏电保护器即可，见图6-27。单相负载回路的漏电保护器的接线如图6-28所示。

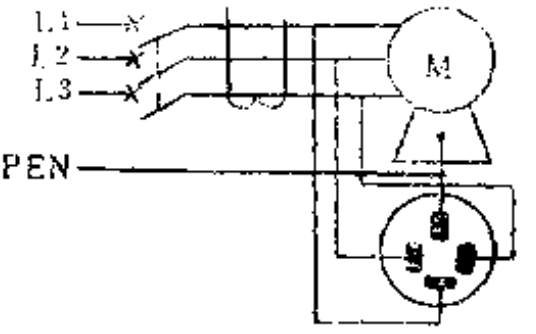


图6-27　三极漏电保护器在动力回路中的接线（TN系统）

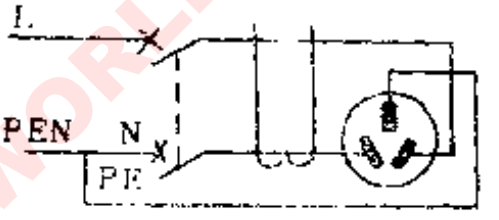


图6-28　二极漏电保护器在单相负载回路中的接线（TN-C系统）

（4）对动力、照明的混合线路，一般选用四极漏电保护器。如果采用中性点直接接地、保护线与零线合二为一的TN-C系统，则PEN线穿过零序TA，但TA后面的PEN线只起工作零线作用，而不能兼作保护线，见图6-29。

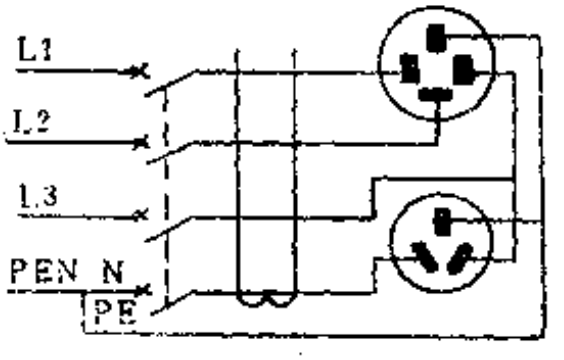


图6-29　四极漏电保护器在动力、照明回路中的接线（TN-C系统）

（5）装设漏电保护器对电网接线的要求如下。

1）三极漏电保护器只能用于保护三相线路，单相线路要用两极漏电保护器分开保护。

2）应尽量均衡分布各相负载；被保护的设备（已使用漏电保护器）与

WWW.PLCWORLD.CN

未被保护的设备不能共用接地极，以免失去保护作用。

3）在三相四线制中性点直接接地系统中，装设漏电保护器后，零线不得重复接地，因为即使低压电网处在正常运行情况下，三相负载也不可能完全对称，即 $\dot{I}_1+\dot{I}_2+\dot{I}_3\neq 0$，此三相不平衡电流将经过零线返回电源中性点，零序电流互感器的一次电流为 $\dot{I}_1+\dot{I}_2+\dot{I}_3-\dot{I}_0=0$，保护器不会动作。假如有重复接地（如图6-30），流经零线的电流则不再是 I_0，而是 $\dot{I}_0'=\dot{I}_0-\Delta\dot{I}_0$，此时，保护器就会发生误动作。若线路需要进行重复接地，其接地点只能选在工作零线的输入端（图中A端）。

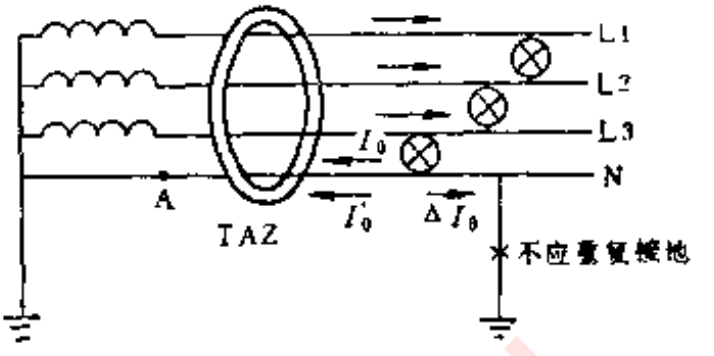


图 6-30

4）各被保护支路均应有其专用零线，每一分支保护的线路均必须有自己的专用零线，而且它们既不允许互相联接，也不允许就近支接，不然的话，保护器将发生误动作，无法正常运行。

（三）几种漏电保护装置的特点

1．电流动作型

其特点是：主要用于配电变压器二次侧中性点直接接地、保护接地系统内；可以实现分级保护，可用于线路，也可用于设备；对零线绝缘电阻要求不高，与电网仅有磁的联系，从而改善了由于过电压而造成的元器件烧毁的事故；运行可靠，是发展的方向。但是，当人体触电时，直接承受

220V电压，通过人体的电流比电压型漏电保护装置大，灵敏度变化较大，造价高，结构复杂，维修较麻烦，不宜用于保护接零系统。在三相四线制平衡系统中，如果设备采用了保护接零，则零线不应作为互感器的一次侧，否则互感器将不能反映漏电引起的零序电流。

2. 电压动作型

其特点是：结构简单，投资少；但存在难以克服的缺点（见电压型漏电保护器）。

3. 脉冲动作型

其特点是：不随低压电网漏电电流缓变而误动；当发生人身触电事故时，能立即动作切断电源；可作电网母线总保护用；整定电流可定在30mA以内（比电流型保护范围扩大）；对低压电网对地绝缘电阻的要求较低。但起动三相不对称的电动机时，有时也发生误动作；拉合分支线路和投切绝缘电阻较低的用电设备时，产生误动作较多；结构复杂，造价高。

低压电网漏电保护为总保护或干线保护方式时，可采用电流型或脉冲型。采用多级保护方式时，三级保护的第一级不能采用脉冲型，须用电流型漏电保护器，以满足多级保护的配合要求和保护供电可靠性，其他级可采用电流型或脉冲型保护器。

§6-4 防雷保护

雷电是自然界中很普遍的大气放电现象，是大气云层中的电荷雷云对大地放电形成的。

雷电的危害主要通过直击雷、感应雷和雷电侵入波三种方式。由于雷击时产生极高的电压和强大的电流造成很大的

破坏力，造成设备或设施的损坏，造成大面积停电或人民生命财产的损失。因此、研究防雷工作是非常重要的。

一、防雷装置

避雷针、避雷线、避雷网、避雷带和避雷器都是经常被采用的避雷装置。避雷装置包括接闪器(针、线、带)、引下线和接地装置。避雷针主要用来保护露天变、配电设备、建筑物等，防护直接雷击。避雷线主要用来保护电力线路。避雷带和避雷网用于保护普通建筑物。避雷器主要用来保护电力设备，防止雷电波侵入。

（一）避雷针和避雷线

避雷针和避雷线均是用于保护建筑物或露天变电设备、线路的。因为雷电是云层中的电荷相互放电或对大地放电。如果在建筑物或架空线的上部，即最高点的位置安放一个接地的铁针或铁线，就相当于将大地抬高至这么个高度，云层对地的放电，也就被吸引至该点，在它下面及周围的建筑物或架空线就能得到保护。避雷针所能保护的范围如图6-31所示。

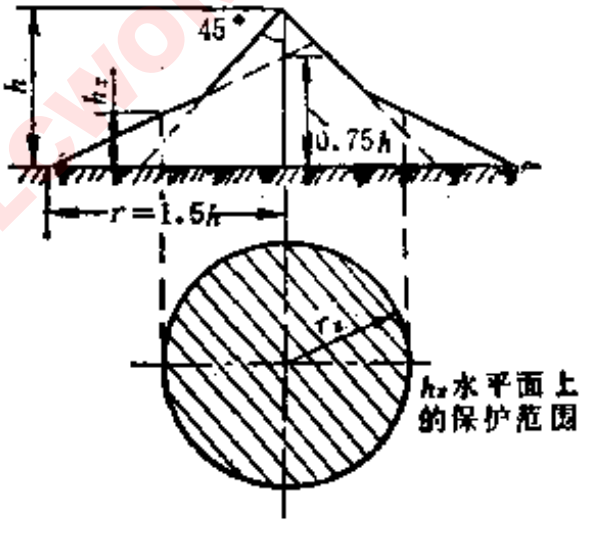


图6-31　单支避雷针的保护范围

由图6-31可看出，一定高度的避雷针下面有一个安全的区域。如果被保护的电气设备或建筑物全部在这个保护范围内，就可以避免遭受雷击。通常，根据电气设备和建筑物的大小和高度，决定所需安装的避雷针的高度和数量。

WWW.PLCWORLD.CN

下面简要介绍单根避雷针的保护区域。

单根避雷针的保护范围，很象一个圆锥形的帐篷，其边界是一条曲线，为了分析方便，可近似地用两根折线代替。图6-31是单根避雷针的保护范围示意图。图中 h 是避雷针顶端距地面的高度，r 为避雷针在地面上的保护半径，它等于避雷针高度 h 的1.5倍，h_x 可视为被保护的电气设备的高度，r_x 是避雷针在 h_x 高度的水平面上的保护半径。由此看出，避雷针离地面愈高，它的保护范围就愈大。根据过电压保护规范的要求，不同用途和不同性质的建筑物，应分别采取相应的防雷保护措施。

避雷针保护范围的计算，当顶端保护角 $\alpha = 45°$ 时(适用于平原地区）为

$$r = 1.5h \quad \text{m}$$

当 $h_x \geqslant h/2$ 时

$$r_x = (h - h_x)P \quad \text{m}$$

当 $h_x < h/2$ 时

$$r_x = (1.5h - 2h_x)P \quad \text{m}$$

式中 P——高度影响系数。

$h \leqslant 30$ m 时，P 取 1；

$30 < h \leqslant 120$ m 时，P 取 $5.5/\sqrt{h}$。

多支避雷针的保护范围是几支单根避雷针保护范围的叠加，在各避雷针间的保护范围，比单根避雷针的保护范围要大。

两支等高避雷针保护范围的计算按图6-32确定。两针外侧的保护范围按单支避雷针确定；两针之间的保护范围 $2b_x$ 按联接两针顶点A、B的圆弧确定。圆弧中点O对地高度 h_0 为

WWW.PLCWORLD.CN

$$h_0 = h - \frac{D}{7p} \quad \text{m}$$

式中 D——两避雷针间的距离（m）；

p——高度影响系数，确定方法同前。

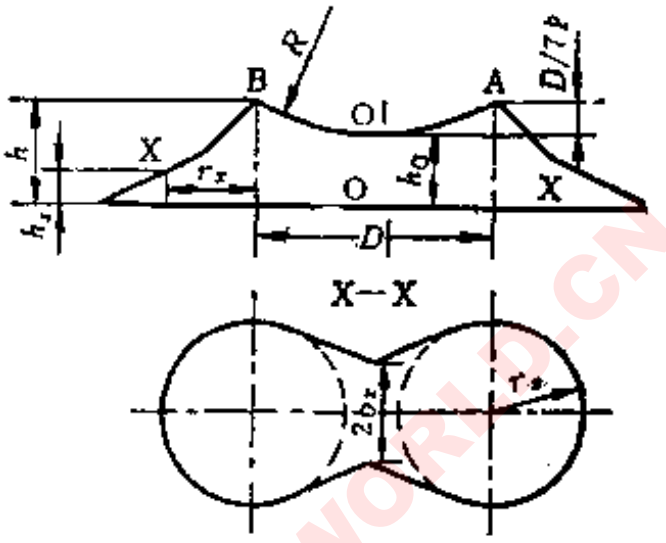


图6-32 双根避雷针的保护范围

两针间某平面高度为h_x时，其保护宽度$2b_x$的计算值为

$$2b_x = 3(h_0 - h_x) \quad (\text{m})$$

求出b_x后，可按图绘出两针间的保护范围。但两针之间的距离与针高之比（D/h）不宜大于5。

110～330 kV的输电线路，全线架设避雷线，作为过电压防护的措施，如图6-33所示。

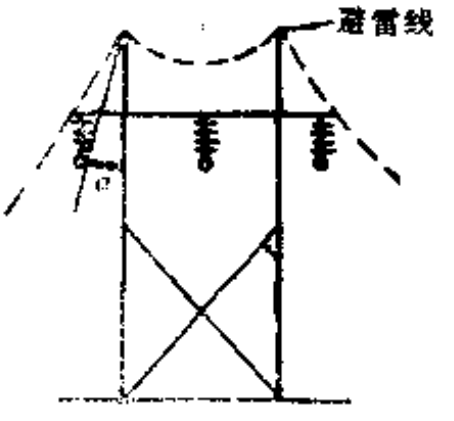


图6-33 避雷线的保护范围

（二）避雷针的制作与安装

（1）避雷针的针尖是接受雷击的部位，一般用直径25 mm的镀锌圆钢制成；也有用

直径 40mm 的镀锌钢管，将端部打扁制成的，钢管壁厚应不小于3mm，如图6-34所示。

避雷装置的引下线明装时，使用 ϕ 8mm镀锌圆钢；暗装时用 ϕ 12镀锌圆钢。明装时，支持卡子的间距要均匀。引下线遇弯曲处不应做直角弯头。

防雷装置引下线的安装示意图，见图6-35。

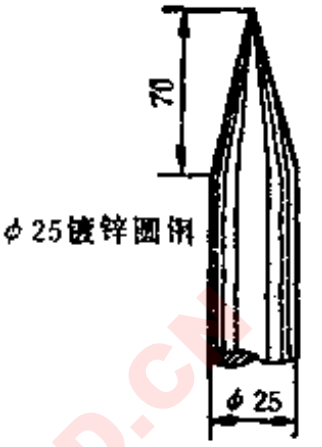


图6-34 避雷针尖做法图

（2）独立避雷针本身要有单独的接地极，它不能同设备的保护接地相联接。接地电阻一般不大于10Ω。避雷针离开被保护设备的空气距离不得小于5m，以防止雷电电流通过避雷针时，接地线上有很高的电压，而可能对设备的带电部分发生放电——"反击"。

（3）接地极、避雷线(针)及引下线的联接必须用焊接，焊接处应涂沥青防腐漆。

（4）避雷针虽然是接地的导体，但在雷击时，它的瞬时电压仍很高，对人体还是有危险的，且在接地装置附近会形成跨步电压。因此，接地极应埋设在很少有人通过的地方。接地极距离建

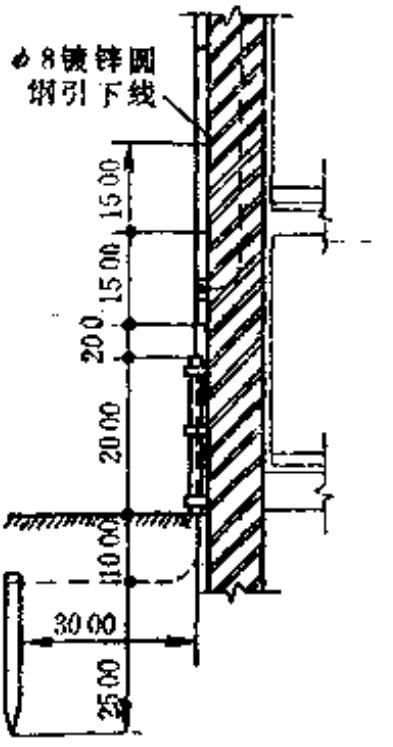


图6-35 防雷装置引下线的安装示意图

筑物，通常在3m以外。

（5）为了节约材料，可以尽量利用高烟囱、水塔、高大的建筑物加装上避雷针及引下线，构成防雷设施。

不要在35kV及以下电压的电气设备构架上安装避雷针，因为这一类电气设备的绝缘强度较低，雷击时的高电压，有可能引起反击，造成设备损坏。

二、防雷措施

雷击房屋、线路及电力设备等物体时，会产生雷电过电压，雷电所波及的范围内，会严重损害设备并危及人身安全。各类设备和建筑物需要采取什么防雷措施要根据实际情况和有关技术规范的要求，由设计人员决定。

（一）雷电过电压的防护

过电压保护的目的，是为了防止电气绝缘遭受过电压的破坏及发生人身触电等事故。雷电过电压的保护，主要是采用避雷针（线）和避雷器。工厂变电所的防雷措施在第五章已有介绍。

1. 防直击雷

直击雷是雷云向大地或建筑物等之间的放电。放电电压高达几百万千伏，放电电流可达数万到数百万安，放电时间极短，仅10～50μs，危害极大。

凡第一类工业与民用建筑，古代建筑，有爆炸或火灾危险的露天设备（油罐、气罐等），高压架空电力线路，发电厂和变电站等均采用防直击雷措施，即装设避雷针、避雷线（网）或避雷带进行防护。装设时应注意以下几点要求。

（1）装设避雷针、线或带，不应设置在人畜经常通行的地方。

（2）在装有避雷针或避雷线的构筑物上，严禁架设低

压线、通信线和广播线等。

（3）用独立避雷针（线）保护时，接地电阻$R \leqslant 10\Omega$，引下线距墙面及接地装置不小于3m。避雷针（带）装在建筑物上时，接地电阻$R \leqslant 5\Omega$，建筑物的钢筋及室内金属设备，均应彼此联接和接地。禁止独立避雷针（线）与电气设备的接地装置采用同一接地体。

（4）露天装设的有爆炸危险的金属封闭容器（如油罐或工艺容器装置），当其壁厚超过4mm时，一般可不装接闪器，但在雷雨时保证透光孔、量油孔、人孔等绝对密封，防止油气逸出于油罐外部而被点燃殃及罐内；在呼吸阀下安装阻火器，防止外火引入罐内。同时装置要有不少于两处的接地，其间距离不应大于30m，冲击接地电阻不应大于30Ω，以防止雷电流通过油罐时高电位伤人。

2. 防感应雷击

感应雷是雷云接近地面、架空线路或其他凸出物顶部，感应生成大量异性电荷引起的。在雷云与其他部位放电后，电荷以高速雷电波形式消失，产生很高的冲击电压，其幅值高达50～60万V，在电力系统里可形成巨大的破坏，因此，应视同过电压考虑。在建筑物和构筑物中，主要应考虑防止感应雷引起反击从而导致爆炸和火灾。对感应雷主要采用避雷线（网）防护。对第一类、第二类工业建筑物防感应雷击要求如下（第三类建筑物一般不考虑雷电感应的防护）。

（1）对非金属屋面用明装避雷网保护。对金属和钢筋混凝土（钢筋应焊成网格）屋面可直接接地。室内一切金属设备和管道都应进行电气联接后再与接地体联接。接地不少于两处。

（2）为了防止电磁感应，平行敷设的管道相距不到

100mm时，每20～30m须用金属线跨接；交叉或接近处不到100mm时，也应跨接。此外，管道接头处（管箍）等接触不可靠的地方，同样必须用金属线跨接后接地。接地电阻$R \leqslant 5\Omega$。

3. 防止（雷电波）高电压引入

因雷击架空的导线或金属管道而迅速传播的雷电波称为雷电侵入波。主要防护措施是装设避雷线和避雷器。

（1）35kV变电所防护雷电侵入波，应装设避雷器；对架空线进入变电所的线路，要在引户线段（1～2km）架设避雷线并在两端各设一组管形避雷器。当电缆导线进入变电所时，通常在变电所进户电缆的两端装设避雷器。

（2）3～10kV变电所，在引户线段主要装避雷器保护；对10kV变电所的配电装置（包括变压器）应在母线上装设FZ型阀型避雷器，各路架空进线上应装置管形避雷器（GX型）。

（3）在装设避雷线有困难时，可选电力电抗器装设在进线终端杆上作防雷保护。

（二）人身防雷及遭雷击后的处理

（1）雷雨时，不要站在高大构筑物（如烟囱）或大树下面；不要走近电力线路的杆、塔等；也不要走近带避雷针的杆和塔架以及屋檐等。应远离5m以外。

（2）雷雨时尽量不要在高山处或旷野的田间走路；也不要在江河、湖滨、堤坝上行走。

（3）雷雨时应停止电力线路作业，也不得触及已停电的电线电器。

（4）雷电猛烈时，要停止户外活动；在室内不要触及电器，并与电线及开关等保持距离（如电源线、电话线、广

播线、电视天线等)。

（5）电视机的外接天线应加装防雷熔断器，雷雨时应将天线与接地装置短接，停止收看。

在万一遭受雷击后，切不可惊慌失措，要冷静而迅速地处置。除非受雷击者已有明显死亡症状外，对于一般不省人事、处于昏迷状态甚至呼吸、心跳均停止而呈现“假死”状态时，也应不失时机地进行紧急救护。具体方法与抢救一般触电者时相同。

三、接地装置

防雷接地装置与一般接地装置的要求大体相同，但其所用材料应稍大于其他接地装置，其最小尺寸应满足表 6-4 的规定。

表6-4 防雷接地体和接地线的最小尺寸 （mm）

材料名称	圆钢	扁钢	角钢	钢管
材料尺寸	ϕ10	40×4	50×50×5 ～70×70×8	ϕ50～ϕ70

§6-5 电气防火与防爆

安全用电除了预防触电事故和设备事故发生外，还必须注意电气装置和防火。根据统计，电气火灾在火灾事故中占40%～50%。火灾事故往往是由于线路负荷过载，绝缘不良漏电，使电路发生过热或烧毁电线产生火花而造成的。特别是这些电气设备与可燃物接触或接近时，火灾危险性更大。在高压电气设备中，电力变压器和多油断路器有较大的火灾危险性，而且还有爆炸的危险性。电气火灾和爆炸事故除可能造成人身伤亡和设备毁坏外，还会给国家财产带来不可估

WWW.PLCWORLD.CN

量的损失。

一、爆炸和火灾危险环境

根据发生爆炸和火灾事故的可能性及其后果的严重程度，按照爆炸性环境出现的频繁程度和持续的时间可分为三类八区，以对不同危险程度有相应的处理措施。

（一）第一类

第一类是爆炸性气体环境。根据爆炸性气体混合物出现的频繁程度和持续时间可分为不同危险程度的三个区域。

（1）0区：连续出现或长期出现爆炸性气体混合物的环境。

（2）1区：在正常运行时可能出现爆炸性气体混合物的环境。

（3）2区：在正常运行时不可能出现爆炸性气体混合物的环境，或即使出现也仅是短时存在的爆炸性气体混合物的环境。

（二）第二类

第二类是爆炸性粉尘环境。根据爆炸性粉尘混合物出现的频繁程度和持续时间分为两个区域。

（1）10区：连续出现或长期出现爆炸性粉尘混合物的环境。

（2）11区：有时会将积留下来的粉尘扬起而偶然出现爆炸性粉尘混合物的环境。

（三）第三类

第三类是火灾危险环境。应根据火灾事故发生的可能性和后果，按危险程度及物质状态的不同，分为三个区域。

（1）21区：具有闪点高于环境温度的可燃液体，在数量和配置上能引起火灾危险的环境。

WWW.PLCWORLD.CN

（2）22区：具有悬浮状、堆积状的可燃粉尘或可燃纤维，虽不可能形成爆炸混合物，但在数量和配置上能引起火灾危险的环境。

（3）23区：具有固态状可燃物质，在数量和配置上能引起火灾危险的环境。

二、电气火灾和爆炸的原因

为了防止电气火灾和爆炸，首先应了解电气火灾和爆炸的原因。造成电气火灾的原因很多，除了电气本身的缺陷及设计、施工、安装等方面的原因外，在运行中，电流产生的热量和电火花或电弧是引起火灾或爆炸的直接原因。

（1）引起电气设备过度发热，导致发生火灾或爆炸的原因大体有：电气设备短路；设备严重过载；电路联接点接触不良引起过热现象；电气设备绝缘损坏漏电；设备运行铁心发热；使用电器不当（尤其电热器具）等。

（2）电火花和电弧：主要有过电压（雷电）放电火花、静电火花、感应电火花及电刷火花；开关或接触器通断时的火花；熔丝熔断时及导线联接松脱时的火花等。

（3）间接原因多是外界热源、火源导致电气绝缘损坏及绝缘油的分解或汽化等。

三、防火防爆措施

防火防爆措施必须是综合性措施。其内容如下。

（一）电气设备的选用

主要根据使用环境的危险程度来选择。

（1）根据爆炸危险场所区域选用：在0区及1区范围内必须用隔爆型，2区可用隔爆型、增安型，10区可用尘密型，11区可用尘密型也可用防尘型等的电动机、电器仪表、灯具、变压器、通信电器、配电装置等。

（2）按火灾危险场所等级选用防溅式、封闭式、防尘型、充油型等电器设备。

（3）危险场所的电气线路不得采用铝芯绝缘线，其额定电压不得低于电网的额定电压，且不得低于500V。绝缘导线须采用穿钢管敷设，并要密封。钢管配线的联接应采用螺纹联接。

（二）电气设备的正确装置

在有爆炸火灾危险场所，选择合理的安装位置、保持必要的防火间距是防火防爆的一项重要措施，而密封是局部防爆的重要措施。

（1）保持间距：如把易产生火花的电气设备（如开关、熔断器、电热器具等）装设在有爆炸火灾危险场所的外间。

（2）密封：密封是防爆的重要措施。

（3）保持电气设备的正常运行。

防止出现事故火花和危险温度，火灾事故往往是由于线路负荷过载，绝缘不良漏电，使电路发生过热或烧毁电线产生火花造成的。

（4）保持通风良好：降低爆炸性混合物的浓度和场所的温度，防止爆炸。

（5）装设良好的保护装置：①易发生火灾和爆炸的场所应有比较完善的短路、过载等保护措施；②应装设自动检测装置，当爆炸混合物的浓度达到危险浓度时能发出信号或报警。

（6）采用耐火设施：变配电装置的建筑物应为耐火建筑；穿入和穿出建筑物通向油区的沟道和孔洞，应采用非燃材料严密堵死或加装挡油设施；为了提高耐火性能，木质开

关箱等内表面应衬以白铁皮；电热器具应有耐热垫座等。

（7）等电位接地措施：有爆炸危险场所的接地（或接零）较一般场所要求高，必须将所有设备的金属部分、金属管道以及建筑物的金属结构全部接地(或接零)，并联接成连续的整体，以保持电流不中断，防止电火花产生。接地不少于两处。

四、电气灭火常识

电气设备着火时，首先应切断电源，以防火势蔓延和灭火时造成触电。

为了争取灭火时间和防止火灾扩大而来不及断电，或因生产需要等其他原因不能断电时，则可带电灭火。带电灭火须注意下列几点。

（1）应按火情选用灭火机的种类：二氧化碳、四氯化碳、1211、二氟二溴甲烷或干粉灭火机的灭火剂都是不导电的，可用于带电灭火。只有变压器油着火时才能使用泡沫灭火剂。如果不能扑灭火灾，必须尽快打电话通知消防部门灭火。

（2）选择适当的灭火水枪：用水枪灭火时宜采用喷雾水枪，因为通过水柱的泄漏电流较小，带电灭火比较安全；若用普通直流水枪灭火，可将水枪喷嘴接地；也可以让灭火人员穿戴绝缘手套和绝缘靴或穿戴均压服工作。

（3）必须保持安全距离：用水灭火时，水枪喷嘴至带电体（电压110kV以下）的距离不应小于3m。用二氧化碳等灭火机灭火时，机体、喷嘴至带电体（10kV）的最小距离不应小于0.4m或（35kV）0.6m。

（4）对架空线路等架空设备进行灭火时，人体位置与带电体之间的仰角不应超过45°，以防导线断落伤人。

（5）如遇带电导线断落地面，要划出一定的警戒区，防止跨步电压伤人。

§6-6 静电安全技术

静电现象是一种常见的带电现象，如雷电、电容器残留电荷、摩擦带电等，还有液体流动、气体流动、搅拌也容易产生静电，就是生活中的行走、起立、穿脱衣服等都会产生静电。这里主要从工业生产过程中静电的产生、静电的特点和危害以及清除静电危害的措施等几个方面来叙述静电的危害。

一、静电的产生、特点和危害

（一）静电的产生

静电是指相对静止的电荷。两种不同物质紧密接触，再分离时，一种物质把电子传给另一物质，失去电子的物质就带正电荷，得到电子的物质带负电，这样就产生了静电。在生产过程中产生静电是很多的。特别是石油化工部门，塑料、化纤等合成材料生产部门，橡胶制品生产部门，印刷和造纸部门，纺织部门以及其他制造、加工、转运高电阻材料的部门，都经常遇到有害的静电。

凡容易得失电子且电阻率很高的材料都容易产生和积累静电。生产中常见的乙烯、丙烯、丁烯、丁烷、原油、汽油、轻油、苯、甲苯、二甲苯、硫磺、橡胶、赛璐珞、塑料等都比较容易产生和积累静电。具体有下列各类工艺过程。

1．摩擦

（1）固体物质大面积的摩擦，如纸张与辊轴摩擦、橡胶或塑料碾制、传动带与带轮或辊轴间的摩擦等。

（2）固体物质在压力下接触而后分离，如塑料压制、

上光等。

（3）固体物质在挤出、过滤时与管道、过滤器等发生摩擦，如塑料的挤出、赛璐珞的过滤等。

（4）固体物质的粉碎、研磨过程，如悬浮粉尘的高速运动等。

2. 液体流动

当高电阻率液体在管道中流动且流速超过1 m/s时，液体喷出管口时，液体注入容器发生冲击、冲刷或飞溅时等，均易产生静电。

3. 气体流动

液化气体、压缩空气或高压蒸汽在管道中流动和由管口喷出时，如从气瓶放出压缩气体、喷漆等。

4. 搅拌

在混合器中搅拌各种高电阻率物质，如纺织品的涂胶过程等。

（二）静电的特点

（1）静电电量不大，而静电电压很高。

（2）静电放电：静电消失有两种主要方式，即中和及泄漏。中和主要是通过空气消失的，中和静电的主要方式有三种，即电晕放电、刷形放电和火花放电。

泄漏主要是通过带电体本身消失的，如绝缘体上静电的消失，由于绝缘体表面电阻和体电阻很大，所以静电泄漏很慢。

（3）静电感应：静电感应就是导体在静电场中，其表面不同部位感应出不同电荷或导体上原有电荷重新分布的现象。由于静电感应，不带电的导体可以变成带电的导体，即不带电的导体可以感应起电。在现场，由于静电感应和感应

起电，可能在导体（包括人体）上产生很高的电压，有时是导致危险的火花。这是很容易忽视的危险因素。

（4）静电屏蔽：在爆炸危险场所，可利用静电屏蔽原理，防止雷云等静电的危害。

（三）静电的危害

工业生产中的静电可以造成多种危害：静电火花引起的火灾和爆炸，会直接危及人身安全；静电的产生会妨碍生产；还可能直接给人以电击而造成伤亡事故。

对于静电引起的爆炸和火灾，就行业性质而言，以炼油、有机化工、橡胶、造纸、印刷、粉末加工、化纤等行业事故较多。

如某制药厂工人用塑料管头在二甲苯桶内抽二甲苯，管头随桶内液面下降而深入桶内，突然爆炸，一名工人被炸身亡。据分析系管头与液面脱离时产生静电火花，点燃了桶内达到爆炸极限的二甲苯蒸气混合物。

又如某厂的丁苯橡胶后处理工段，因老剂粉末在布袋过滤器中摩擦产生静电，引起火灾，损失数万元。

据资料报导，国外静电事故也是很多的，日本1971年曾发生静电事故近140起，分类见表6-5。

表6-5　静电事故统计表

静电火花来源	件数
粉末摩擦带电	32
管中液体流动带电	17
筒中喷出气体带电	15
橡胶或皮革牵引带电	13
滚筒带电	30
其他	84

人体在活动过程中，由于衣着等固体物质的接触和分离以及由于静电感应等原因，均可产生静电。当人体与其他物体之间发生放电时，人即遭到电击。

二、消除静电危害的措施

消除静电危害有两条主要途径：一是采取措施，加速工艺过程中静电的泄漏或中和，限制静电的积累，使其不超过安全限度；二是控制工艺过程，限制静电的产生，使之不超过安全限度。

五个具体技术措施是：①使生产过程尽量少产生静电荷（工艺控制法），即从工艺流程、材料选择、设备结构和操作管理等方面采取措施，控制静电的产生和积累，使之不超过危险的程度。②泄漏和导走静电荷（泄漏导走法），即使带电体上的静电荷能够顺利地向大地泄漏消散，系利用工艺手段，如加入抗静电剂、空气增湿、接地、涂导电涂料等均属泄漏法。③复合或中和物体上积聚着的静电荷（复合中和法），系运用感应中和器、高压中和器、放射线中和器等装置消除静电危害的方法。④屏蔽带静电的物体（静电屏蔽法），即用接地的金属板、网或缠上线匝加以全部或局部包覆，使带电体发生的电力线，中止在金属屏蔽体里侧的感应电荷上，从而减少或消除了带电体对周围导体的静电感应作用。示意图见图6-36所示。⑤使物体内、外表面光滑和无棱角（整净措施）。尖端放电能造成事故，故带电体及其生产装置、贮存容器、输送管道等的所有部件（包括邻近的接地体）应制成表面光滑、无棱角凸起者，设备、管道中的毛刺尤其要除掉。

在这五种措施中，工艺控制法是最积极的措施，它是防静电工作的核心所在，在具体工程设计中，应将这五方面有

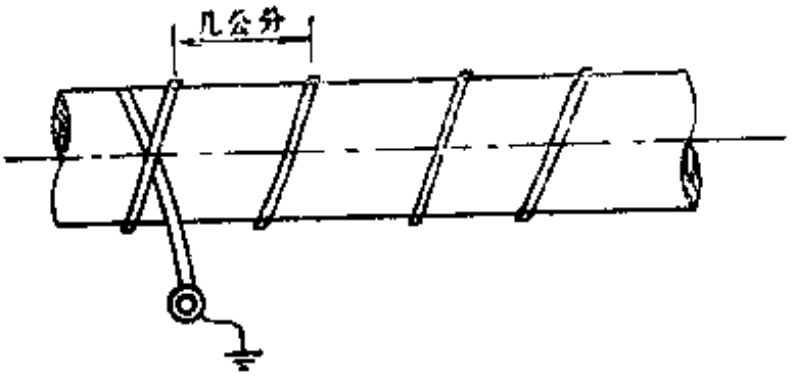


图6-36　接地屏蔽图

机的结合起来，因地制宜地采取多种手段，避免单打一的作法。

防静电工作的各种管理工作是十分重要的，没有严格的管理工作，再好的防静电措施也得不到正确的实施，静电事故照样会出现。更由于存在着已不起作用的防静电措施，人们得到的是虚假的安全感，在某种情况下是会坏事的。

（一）静电人工接地措施（让静电流入大地）

接地是消除静电危害最简单、最常用的方法。接地主要用来消除导体上的静电，而不宜用来消除高绝缘体上的静电。带有静电的绝缘体如经过导体直接接地，即相当于把大地电位引向绝缘体，反而会增加火花放电的危险。

1．静电接地联接方式

防静电接地与电气保安接地及防雷接地相比有很多特殊点，例如静电接地的对象要广泛得多，它包括了各式各样的工艺设备（外壳和内部）、物料、人物和工具。其物态有固体、粉体和液体，物质有金属、非金属等等。只要这个物件上有静电荷，它就存在着静电接地的问题。又如防静电接地是必须的，每处接地电阻100Ω即可，但不应超过1000Ω，

没有电气保安接地、防雷接地的要求那样严格。

根据静电接地的特点，静电接地联接的方式可分为三种。

（1）静电联接：指不同物体之间的电气联接，只要被接物体两端的电位大致相等即可。焊接、钳接、螺栓紧固是静电联接，两物紧密接触也是静电联接。

（2）直接接地：是将金属体与大地进行导电性联接。在具体做法上，可用焊接、钳接、螺栓紧固等方法使被接地的金属与静电接地干（支）线相联。被接地对象的各部分的金属部件间，通过金属性机械联接并接地。

（3）间接接地：将金属以外的物体表面，用接地的金属全部或局部作紧密相接、称作对该物体的“间接接地”。例如带电的液体装入接地的金属桶中，液体里的电荷就是通过金属桶导入大地的。

对静电接地的联接，总的要求是可靠，保证足够的机械强度和化学稳定性，不得有任何中断之处，那种用接地线缠绕带电体的联接方式不应采用。

2. 静电接地措施

（1）凡用来加工、贮运各种易燃液体、气体和粉体易燃品的设备、贮存池、贮气灌以及产品运输装置、封闭的运输装置、排注设备、混合器、过滤器、干燥器、升华器、吸附器等都必须接地。容积大于50m³的贮罐，应在沿其直径方向布置接地处，且最少不得少于两处。如果袋形过滤器由纺织品或类似物品制成，建议用金属丝穿缝并予以接地。如管道由非导电材料制成，应在管外或管内绕以金属丝，并将金属丝接地。

（2）厂区及车间的氧气、乙炔等管道必须联接成一个

整体，并予以接地。其他所有能产生静电的管道和设备，如油料贮运设备、空气压缩机、通风装置和空气管道，特别是局部排风的空气管道，都必须联接成连续整体。

（3）汽车式油槽车行驶时，由于汽车轮胎与地面有摩擦，汽车底盘上可能产生危险的静电电压。为了导走静电电荷，油槽车应带金属链条或导电橡胶带，将油槽车与大地接触。用油槽车装卸油前，应同贮油设备跨接并接地；装卸完毕拆除油管之后再拆除跨接线和接地线。

（4）注油漏斗、浮动罐顶、工作站台、磅秤、金属检尺等辅助设备均应接地。用油壶或油桶装油时，应与注油设备跨接起来，并予以接地，如图6-37所示。

（5）在可能产生积累静电的固体和粉体作业中，压延机、上光机、各种辊轴、磨、筛、混合器等工艺设备均应接地。某些危险性较大的场所，为了使转轴可靠接地，可采用导电性润滑油或采用滑环、碳刷接地。

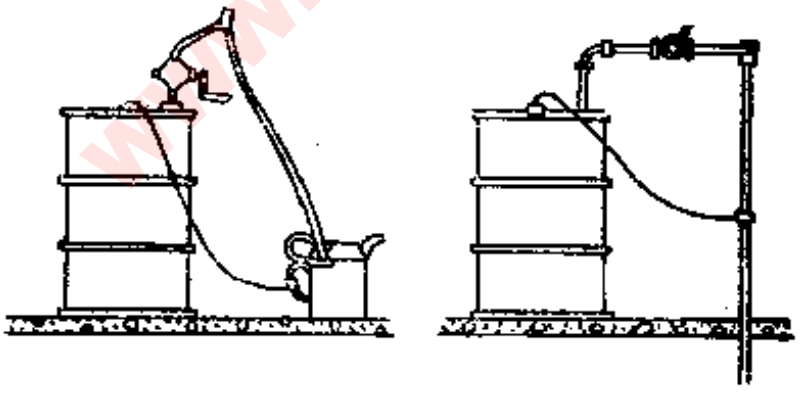


图6-37　油壶和油桶接地

（6）采用导电性地面也是一种接地措施。导电性地面不单能导走设备上的静电，还能导走聚集在人身上的静电。

导电性地面是指电阻率在$10^8\Omega\cdot cm$以下的地面，如导电橡胶地面、导电水磨石、混凝土等。

（7）为了消除人体静电，可穿导电性工作鞋（如皮底鞋或胶鞋），这实质上也是一种接地措施。此外，为防止人体受静电的危害，应避免穿着丝绸或合成纤维衣料的衣服。

（二）泄漏导走法

泄漏导走法主要是消除绝缘体上的静电，使带电体上的静电荷能够顺利地向大地泄漏消散。系利用工艺手段如加抗静电添加剂、空气增湿，使静电电荷从绝缘体上自行消散。

1．空气增湿

增湿就是提高空气的湿度。其作用是降低带静电绝缘体的表面电阻率，增加静电沿绝缘体表面的泄漏，带电区的静电荷则能较容易地进行复合或导入大地。

增湿空气的具体做法是，在通风系统中进行调湿，在地面上洒水，用喷雾器或用比大气压稍高的压力喷出水蒸汽等。从消除静电危害的角度出发，以保持相对湿度在70%以上较为适宜。

对于表面可被水湿润的材料，如醋酸纤维素、硝酸纤维素、纸张、橡胶等用增湿法消电效果好，但对表面很难被水湿润的材料，如纯涤纶、聚四氟乙烯、聚氯乙烯等效果就不理想。

2．加抗静电添加剂

抗静电剂是一种减少静电杂质的化学药剂，具有较好的导电性或较强的吸湿性。在容易产生静电的高绝缘材料中，加入微量抗静电剂之后，能降低材料的体电阻或表面电阻，加速静电泄漏，消除静电危险。此乃是工艺控制法的一个重要手段。如橡胶在液态时加入10%～20%的炭黑，固化后体

积电阻即有明显下降；石油制品加入 1 /10^5的油酸盐，即可消除静电危险；季铵盐阳离子抗静电油剂 SN 用于纤维纺织，只要加0.2%，静电电压就可在20 V 以下，聚乙烯醇合成纤维抽丝过程中采用 SN 效果也好。

（三）静电中和法

静电中和法是在静电电荷密集的地方设法产生带电离子，将该处静电电荷中和掉。静电中和法是用来消除绝缘体上静电电荷的。

1．感应中和器

感应中和器即自感应式静电消除器，是最简单的一种消电装置，用一根或多根接地的非常尖的金属针制得离子极，将针尖对准带电体，放在距带电体表面 1 ～2cm 处，或将尖针放进带电液体内部，带电体上的静电在针尖上感应出相反的电荷，在针尖附近形成很强的电场，将空气（或其他介质）电离而出现电晕放电。产生正离子和负离子，如图6-38所示。

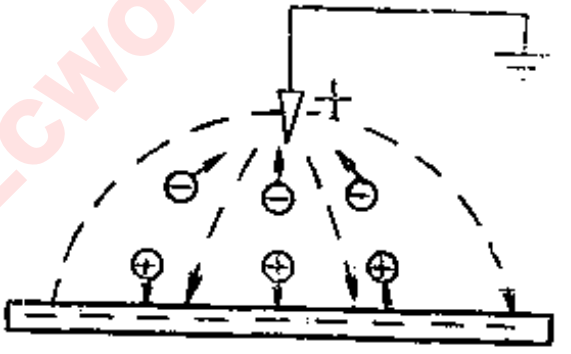


图6-38　自感应消电原理

在电场的作用下，正、负离子分别向生产物料和针尖移动，使静电电荷得到中和。而移到尖针处的离子通过接地线将电荷导入大地。

感应中和器不需要外加电源，设备简单、但作用范围小，消除静电不够彻底。在石油、化工、橡胶等行业特别适用。

2．高压中和器

WWW.PLCWORLD.CN

高压中和器是利用外界高电压在离子极与接地极间形成强电场，使极间空气电离，以消除静电电荷。外接高电压电源可以是直流也可以是交流。外接电源式高压中和器的接线如图6-39所示。

高压中和器消电效果比感应中和器为好，消电较彻底。适用于化纤、橡胶、塑料、印刷等行业。

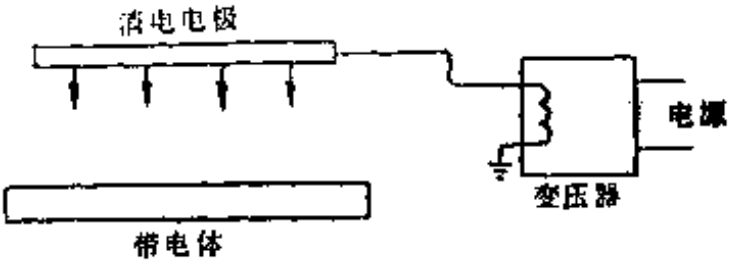


图6-39　高压中和器原理图

静电中和器还有放射线式和离子流式，这两种中和器可用于有爆炸危险的场所。

（四）人体防静电措施

对于静电，人体相当于导体，电荷能经人体泄入大地。但人体与地面绝缘时，则人成孤立导体，与大地之间一般保持有数百微微法的电容，人体静电电压可达数千至数万伏，可导致放电火花，可引燃某些爆炸性混合物。

防止人体带电的方法如下所述。

1．人体接地

（1）将工作地面做成导电性地面；同时操作人员应穿防静电工作服和防静电鞋。

（2）利用接地工具使人体接地。如在防火防爆场所的入口外侧，应装设金属地棒，人徒手接触之，以消除人体从外界带来的静电；在坐着工作的场合，可在手腕上佩带具有接地线的导电腕带。

2．工作地面导电化

（1）工作地面的泄漏电阻值既要小到能够防止人体静

WWW.PLCWORLD.CN

电的积累，又要能防止人体误触电力线时不致受到伤害。我国规定泄漏电阻值为 $3\times10^4\Omega\leqslant R\leqslant10^6\Omega$。

（2）用撒水的办法，使混凝土地面达到湿润的程度。

3. 安全操作

（1）工作中，应尽可能不进行与人体带电的有关动作（如接近或接触带电体）。

（2）使用规定的劳保用品和工具，防止劳保品带电。

（3）在有静电危险场所，一般不得穿化纤工作服，不得携带与工作无关的金属物品，如手表、硬币、钥匙、戒指等。

练 习 题

6-1 人为什么会触电？怎样加强安全技术措施以防触电事故的发生？

6-2 发现有人触电应立即采取哪些措施？电气设备着火，又应采取哪些措施？

6-3 造成触电事故的原因可分为哪些种类？

6-4 触电事故一般有哪些规律？

6-5 填空：

（1）当低压触电时，应立即采取各种方法使触电者_____。

（2）手提行灯的使用电压一律用____V，____V和____V。在金属容器内和金属结构架上及特别潮湿的场所，手提灯只允许使用____V。

（3）在装有避雷针或避雷线的构筑物上严禁架设____、____和____等。

（4）避雷针、线和带不应设置在____ ____经常通行的地方。

（5）静电的危害有____、____、____。

（6）防止人体带静电的方法之一是将工作地面做成____地面，同时操作人员穿____鞋。

6-6 什么是保护接地、工作接地和重复接地？它们有何区别？举例说明。

6-7 接地装置有几种？它们的作用是什么？埋设接地装置时有哪些质量要求？怎样检验？怎样测量接地电阻？

6-8 接零必须具备哪些条件？接零有什么优、缺点？

6-9 大气过电压是怎样形成的？怎样进行防护？

6-10 在三相四线制中，当三相负载不平衡且零线断裂时，试根据图6-40中两种不同接地方式，分析触电的危险程度（在图上用虚线画出电流路径）。

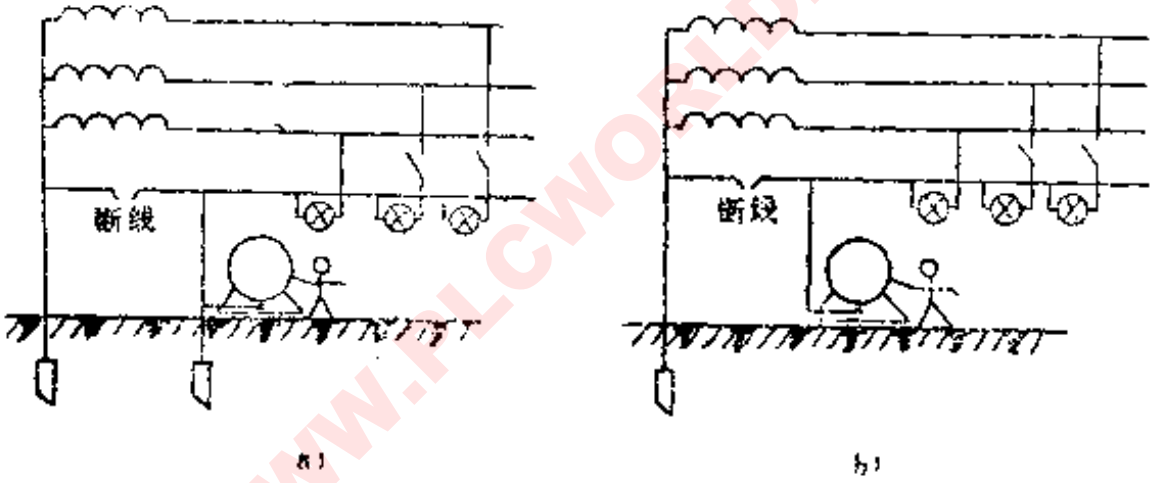


图 6-40

6-11 零序电流型漏电保护器由哪几部分组成？试说明其工作原理、适用条件及范围。

6-12 对家用电器（末级保护）应如何正确选择漏电保护器？

6-13 为什么同一配电系统中保护接地与保护接零不能混用？

6-14 防雷装置有哪些？接闪器是指什么？

6-15 引起电气设备发生火灾或爆炸的原因有哪些？

6-16 有爆炸或火灾危险的场所选用或安装电气设备时应注意什么？

6-17 何谓静电？生产过程中的静电会引起哪些危害？

6-18 消除静电危害的安全措施有哪些？每一措施要解决什么问题？使用中应注意什么？

WWW.PLCWORLD.CN

附

附录A　500V铝芯绝缘导

导线截面（mm²）	线芯结构			导线明敷设				橡胶绝缘导线多根同穿在一根管内（A）							
				25℃		35℃		25℃							
								穿金属管			穿塑料管			穿金属	
	股数	单芯直径（mm）	成品外径（mm）	橡胶	塑料	橡胶	塑料	2根	3根	4根	2根	3根	4根	2根	3根
2.5	1	1.76	5.0	27	25	28	21	21	19	16	19	17	15	18	16
4	1	2.24	5.5	35	32	30	27	28	25	23	25	23	20	24	21
6	1	2.73	6.2	45	42	38	36	37	34	30	33	29	26	32	29
10	7	1.33	7.8	65	59	56	51	52	46	40	44	40	35	44	39
16	7	1.68	8.8	85	80	73	69	66	59	52	58	52	46	57	51
25	7	2.11	10.6	110	105	95	90	86	76	68	77	68	60	74	65
35	7	2.49	11.8	138	130	119	112	106	94	83	95	84	74	91	81
50	19	1.81	13.8	175	165	151	142	133	118	105	120	108	95	115	102
70	19	2.14	16.0	220	205	190	177	165	150	133	153	135	120	142	129
95	19	2.49	18.3	265	250	229	216	200	180	160	184	165	150	173	155
120	37	2.01	20.0	310	283	268	246	230	210	190	210	190	170	198	181
150	37	2.24	22.0	360	—	311	—	260	240	220	250	227	205	224	207

注：导电线芯最高允许工作温度+65℃。

WWW.PLCWORLD.CN

录

线长期连续负荷允许载流量表

时，允许负荷电流				塑料绝缘导线多根同穿在一根管内时允许负荷电流（A）											
35℃				25℃						35℃					
管	穿塑料管			穿金属管			穿塑料管			穿金属管			穿塑料管		
4根	2根	3根	4根	2根	3根	4根	2根	3根	4根	2根	3根	4根	2根	3根	4根
13	16	14	12	20	18	15	16	16	14	18	16	13	16	14	12
19	21	19	17	27	24	22	24	22	19	24	20	19	20	19	17
25	28	25	22	35	32	28	31	27	25	31	28	25	27	25	21
34	38	34	30	49	44	38	42	38	33	43	38	33	37	34	30
44	50	44	39	63	56	50	55	49	44	56	50	43	49	44	38
58	66	58	51	80	70	65	73	65	57	70	64	58	65	58	50
71	82	72	64	100	90	80	90	80	70	90	81	70	81	72	64
90	103	93	82	125	110	100	114	102	90	115	102	90	103	93	82
115	132	116	103	155	143	127	145	130	115	140	128	113	130	116	102
138	159	142	129	190	170	152	175	158	140	173	155	137	157	142	129
164	181	164	147	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
190	216	196	177	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—

WWW.PLCWORLD.CN

附录B　500V铜芯绝缘导

导线截面（mm²）	线芯结构			导线明敷设				橡胶绝缘导线多根同穿在一根管内（A）							
				25℃		30℃		25℃							
								穿金属管			穿塑料管			穿金属	
	股数	单芯直径（mm）	成品外径（mm）	橡胶	塑料	橡胶	塑料	2根	3根	4根	2根	3根	4根	2根	3根
1.0	1	1.13	4.4	21	19	20	18	15	14	12	13	12	11	14	13
1.5	1	1.37	4.6	27	24	25	22	20	18	17	17	16	14	19	17
2.5	1	1.76	5.0	35	32	33	30	28	25	23	25	22	20	26	23
4	1	2.24	5.4	45	42	42	39	37	33	30	33	30	26	35	31
6	1	2.73	6.2	58	55	54	51	49	43	39	43	38	34	46	40
10	7	1.33	7.8	85	75	80	70	68	60	53	59	52	46	64	56
16	7	1.68	8.8	110	105	103	96	86	77	69	76	68	60	80	72
25	19	1.28	10.6	145	138	136	126	113	100	90	100	90	80	106	94
35	19	1.51	11.8	180	170	168	159	140	122	110	125	110	98	131	114
50	19	1.81	13.8	230	215	215	201	175	154	137	160	140	123	164	144
70	49	1.33	17.3	285	265	267	248	215	193	173	195	175	155	201	181
85	84	1.20	20.8	345	325	323	304	260	235	210	240	215	195	243	220
120	133	1.08	21.7	400	—	374	—	300	270	245	278	250	227	280	252
150	37	2.24	22.0	470	—	439	—	340	310	280	320	290	265	318	290
185	37	2.49	24.2	540	—	505	—	—	—	—	—	—	—	—	—
240	61	2.21	27.2	660	—	617	—	—	—	—	—	—	—	—	—

注：1.导电线芯最高允许工作温度+65℃。

2.25mm²及以上铜芯导线穿管时应用"(二)"型结构产品。

WWW.PLCWORLD.CN

线长期连续负荷允许载流量表

时，允许负荷电流				塑料绝缘导线多根同穿在一根管内时，允许负荷电流（A）											
30℃				25℃						30℃					
管	穿塑料管			穿金属管			穿塑料管			穿金属管			穿塑料管		
4根	2根	3根	4根	2根	3根	4根	2根	3根	4根	2根	3根	4根	2根	3根	4根
11	12	11	10	14	13	11	12	11	10	13	12	10	11	10	9
16	16	15	13	19	17	16	16	15	13	18	16	15	15	14	12
22	23	21	19	26	24	22	24	21	19	24	22	27	22	19	18
28	31	28	24	35	31	28	31	28	25	33	29	26	29	26	23
36	40	36	32	47	41	37	41	36	32	44	38	35	38	34	30
50	55	49	43	65	57	50	56	49	44	61	53	47	52	46	41
65	71	64	56	82	73	65	72	65	57	77	68	61	67	61	53
84	94	84	75	107	95	85	95	85	75	100	89	80	89	80	70
103	117	103	92	115	115	105	120	105	93	124	108	98	112	98	87
128	150	131	115	165	146	130	150	132	117	154	137	122	140	123	109
162	182	164	145	205	183	165	185	167	148	194	171	154	173	156	138
197	224	201	182	250	225	200	230	205	185	234	210	187	215	192	173
209	260	234	212	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
262	299	271	248	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
—	—	—	—												

WWW.PEGWORLD.CN

附录C　500V橡胶与塑料绝缘电力电缆及裸导线载流量表

（A）

导线截面 (mm²)	铜心橡胶或塑料绝缘电力电缆				铝心橡胶或塑料绝缘电力电缆				裸铜导线		裸铝导线	
	双芯		三芯		双芯		三芯		户内	户外	户内	户外
	明敷	埋设	明敷	埋设	明敷	埋设	明敷	埋设				
1	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
1.5	19	29	19	24	—	—	—	—	—	—	—	—
2.5	27	39	25	34	21	30	19	26	—	—	—	—
4	38	49	35	44	29	37	27	34	25	—	—	—
6	50	62	42	53	38	49	32	41	35	—	—	—
10	70	94	55	80	55	71	42	62	60	85	55	—
16	90	120	75	102	70	94	60	80	100	130	80	105
25	115	156	95	134	90	120	75	102	140	180	110	135
35	140	187	120	160	105	143	90	125	175	220	135	170
50	175	236	145	200	135	183	110	156	220	270	170	215
70	215	285	180	245	165	218	140	187	280	340	215	265
95	260	344	220	294	200	262	170	227	340	415	260	325
120	300	396	260	343	230	302	200	263	405	485	310	375
150	350	450	305	387	270	347	235	298	480	570	370	440
185	405	508	350	445	310	392	270	343	550	645	425	500
240	—	—	—	—	—	—	—	—	650	770	—	610

注：1.橡胶与塑料电力电缆线心最高允许工作温度+65℃，裸导线+70℃，护套线+65℃。

2.周围环境温度+25℃。

WWW.DLCWORLD.CN

附录D　500V塑料绝缘塑料护套线（BVV、BLVV）在空气中敷设长期连续负荷允许载流量表　（A）

截面（mm^2）	一心		二心		三心	
	铜心	铝心	铜心	铝心	铜心	铝心
1.0	19	—	15	—	11	—
1.5	24	—	19	—	12	—
2.5	32	25	26	20	20	16
4	42	32	34	26	26	22
6	55	42	43	33	32	25
10	75	59	65	51	52	40

附录E　电力电缆及高压架空线载流量表　（A）

导线（心线）截面（mm^2）	长期容许电流（A）（25℃）								
	有铠包纸绝缘的三心铠装电缆						高压架空线		
	3kV		6kV		10kV				
	铜	铝	铜	铝	铜	铝	铜	铝	钢心铝线
2.5	28	22							
4	37	29					50		
6	45	35					70		
10	60	46	55	43	50	39	95	75	
16	80	60	65	50	60	46	130	105	
25	105	80	90	70	85	65	180	135	
35	125	95	110	85	105	80	220	170	170
50	155	120	145	110	135	105	270	215	220
70	200	155	175	135	165	130	340	265	275
95	245	190	215	165	200	155	415	325	335
120	285	220	250	190	240	185	485	375	380
150	330	255	290	225	270	210	570	440	445
185	395	305	340	260	320	245	645	500	505
240	475	365	405	310	375	290	770	610	610

WWW.PLCWORLD.CN

附录F　熔断器的熔体电流

RC1A 额定电流（A）		
熔断器	熔体额定电流	最大分断电流(kA)
5	2、4	0.25
10	2、4、6、10	0.5
15	6、10、15	0.5
30	20、25、30	1.5
60	40、50、60	3
100	80、100	3
200	120、150、200	3

RM10 额定电流（A）		
熔管	装在管内的熔体	最大分断电流(kA)
15	6、10、15	1.2
60	15、20、25、35、45、60	3.5
100	60、80、100	10
200	100、125、160、200	10
350	200、225、260、300、350	10
600	350、430、500、600	10
1000	600、700、850、1000	12

RL6 额定电流（A）		
熔管	装在管内的熔体	最大分断电流(kA)
15	2、4、5、6、10、15	2
60	20、25、30、35、40、50、60	3.5
100	60、80、100	20
200	100、125、150、200	50

RTO 额定电流（A）		
熔管	装在管内的熔体	最大分断电流(kA)
50	5、10、15、30、40、50	50
100	30、40、50、60、80、100	
200	100、120、150、200	
400	200、250、300、350、400	
600	400、450、500、550、600	
1000	600、800、900、1000	

WWW.PECWORLD.CN