

# 建筑电工技术

谢文乔 秦光培 编



重庆大学出版社

# 建筑电工技术

谢文乔 秦光培 编

重庆大学出版社

### 内容简介

本书是根据国家教委颁布的“高等学校工医专科房屋建筑专业电工技术课程教学基本要求”编写的。全书共分六章。主要内容包括直流电路、正弦交流电路、民用建筑常用电气设备、继电接触器控制系统、电工测量、民用建筑供电系统、建筑电气照明技术与设计、建筑防雷与安全用电等。本书可作为高等工科学院专科房屋建筑专业和其它相近专业的教材，也可供有关工程技术人员参考。

3P20/15

### 建筑电工技术

谢文标 秦光培 编

责任编辑 谭 敬

重庆大学出版社出版发行  
新华书店经销  
重庆通信学院印刷厂印刷

开本: 787×1092 1/16 印张: 13.75 字数: 312千  
1998年4月第1版 1998年4月第1次印刷  
印数: 1—6000

ISBN 7-5624-1619-2/TU·51 定价: 14.00元

## 前 言

本书根据工科院校专科教材建设会议的精神,按照全国高等学校工程专科房屋建筑专业电工技术课程教学基本要求制定的编写大纲编写的。

本书在编写过程中,既考虑了建筑工程用电技术的基本概念、基本理论和基本计算,力求做到内容由浅入深,文字通顺易读,章节前后连贯,对重点内容的叙述力求详尽,也充分考虑到专科特点,理论推导删繁就简,以够用为度,加强了工程实际方面的内容。各章后附有习题,在习题中增加了实用的内容。

本课程的总学时为 50 学时。

本书由谢文乔和蔡光培编写,第一章、第二章、第三章的第一节至十四节由谢文乔编写,第四章、第五章、第六章、第三章的第十五节由蔡光培编写,全书由谢文乔统稿。

由于编者水平有限,加之时间仓促,书中难免存在不少缺点和错误,恳请读者批评指正。

编者

1997 年 3 月

## 目 录

<b>第一章 直流电路</b> .....	1
1-1 电路.....	1
1-2 电路的工作状态和电气设备的额定值.....	4
1-3 电路中电位的计算.....	7
1-4 克希荷夫定律.....	8
1-5 电压源与电流源及其等效变换.....	10
1-6 支路电流法.....	14
1-7 节点电位法.....	15
1-8 叠加原理.....	16
1-9 戴维南定理.....	18
习题.....	20
<b>第二章 正弦交流电路</b> .....	23
2-1 正弦交流电的三要素.....	23
2-2 正弦量的相量表示法.....	26
2-3 单一参数的交流电路.....	28
2-4 电阻、电感、电容串联交流电路.....	34
2-5 并联交流电路.....	37
2-6 功率因数的提高.....	39
2-7 三相交流电压.....	41
2-8 对称三相负载的星形联接.....	43
2-9 对称三相负载的三角形联接.....	45
2-10 负载不对称的三相电路.....	47
2-11 三相电功率的计算.....	49
习题.....	50
<b>第三章 民用建筑常用电气设备</b> .....	54
3-1 变压器的构造及工作原理.....	54
3-2 三相变压器和变压器的铭牌.....	58
3-3 变压器的运行特性.....	60
3-4 特殊变压器.....	62
3-5 三相异步电动机的构造与工作原理.....	65
3-6 三相异步电动机的电磁转矩和机械特性.....	71
3-7 三相异步电动机的使用.....	74
3-8 三相异步电动机的铭牌数据与选择.....	79
3-9 单相异步电动机.....	85
3-10 常用低压电器.....	87
3-11 鼠笼式电动机直接起动的控制电路.....	92
3-12 行程开关与限位控制电路.....	94

3-13	时间继电器与时间控制电路	97
3-14	干簧继电器与液面控制电路	99
3-15	常用电工测量仪表	102
	习题	110
<b>第四章</b>	<b>民用建筑供电系统</b>	<b>113</b>
4-1	电力系统概述	113
4-2	变电所和配电所	118
4-3	电力负荷的计算	127
4-4	低压配电线路	135
	习题	145
<b>第五章</b>	<b>建筑电气照明技术与设计</b>	<b>147</b>
5-1	照明技术的基本概念	147
5-2	电光源和灯具的选择与布置	154
5-3	照度计算	168
5-4	照明供电与照明设计	177
	习题	187
<b>第六章</b>	<b>建筑防雷与安全用电</b>	<b>189</b>
6-1	雷电的危害及防雷措施	189
6-2	建筑物的防雷装置	193
6-3	接地和接零	198
6-4	安全用电	201
	习题	204
<b>附录</b>		<b>205</b>
<b>习题答案</b>		<b>211</b>

## 第一章 直流电路

本章主要讨论直流电路的基本概念、基本定律和基本分析与计算方法。直流电路理论的基本内容,也是其他电路的基础。

### 1-1 电 路

#### 一、电路的组成与作用

电路是电流流径之路,也称为网络。电路由某些电气元件或设备组合而成。

实际电路其结构无论有多复杂,它均可以看成是由电源、负载和中间环节三部分组成。

##### 1. 电源

电源是将机械能、化学能等其他能量转换成电能的设备。常见的电源有发电机、电池等。

##### 2. 负载

负载是消耗电能的设备,如电灯、电加热器、电动机等,它们分别把电能转换为光能、热能、机械能。

##### 3. 中间环节

联接电源和负载的部分称为中间环节,它包括电源与负载接成闭合回路的导线、开关、熔断器等,它起到输送、分配和控制电能的作用。

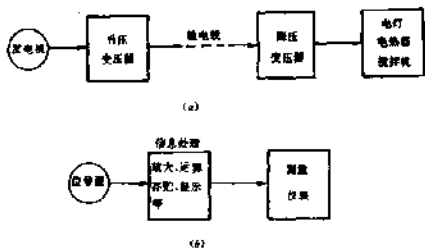


图 1-1 电路示意图

(a)电力系统 (b)信息处理

手电筒电路就是一个最简单的实际电路,其中的干电池就是电源、电珠就是负载,外壳则

起联接导线的作用,按钮便是启、闭电路的开关,当开关合上,电流便在电路中流通,灯泡发光。

一般把电源内部的通路称为内电路,由负载和中间环节构成的电路称为外电路。

无论是简单的或复杂的电路,其作用有两个,其一是通过电路实现电能的输送和转换,在电力系统中,发电机把热能、水力能、原子能等转换为电能,通过变压器、输电线路供给用户,根据用户需要,再把电能转换为光能(如建筑工地照明)、热能(如烘下机、电热器等)、机械能(如搅拌机、打夯机等)。如图 1-1(a)所示。

电路的第二个作用是进行信息的传递和处理。例如,钢筋混凝土构件受压时要发生变形,可以把一种叫做电阻应变片的敏感元件粘贴在构件的有关部位,当构件发生变形时,敏感元件可以把感受到的变形,转换成相应的电信号,它是一种信号源,而后通过电路传递和处理(滤波、放大、运算、存储、分离、显示等),送给测量仪表,由仪表测出的电量间接地反映出构件有关部位的受力情况。如图 1-1(b)所示。

## 二、电路模型

在电路理论中,实际电路都是由实际的电路元件组成,它们的电磁性质往往很复杂,例如一个很简单的白炽灯泡,除有电阻特性外,当电流通过时还会产生磁场,所以它还有电感性质。随着新的电器元件的不断涌现,它们的实际现象和电磁特性比白炽灯更加复杂,并且不便于用数学方法描述,为了分析和计算电路方便起见,在一定条件下将实际电路元件模型化,模型化就是突出实际电路元件的主要电磁性质,忽略其次要因素,把它近似地看成理想电路元件,理想电路元件具有单一的电磁性质,可以用数学式描述了,由理想元件所组成的电路,称为实际电路的电路模型,例如白炽灯在电感很小电流变化不大的

图 1-2 手电筒的电路模型

条件下,略去它的电感性,只保留它的主要特性,即电阻特性,把它看作是一个理想的电阻模型,在理想电路元件中主要有电阻元件、电感元件、电容元件和电源元件等,这些元件由相应的参数来表示,前述的手电筒,干电池是电源元件,其参数用电动势  $\mathcal{E}$  和内阻  $R_0$  表示,灯泡是电阻元件,其参数用电阻  $R$  表示,而筒体(包括开关)的电阻与负载电阻相比很小,一般忽略不计,视为理想导体,其电路模型如图 1-2 所示。

## 三、电路的基本物理量

### 1. 电流

电流是由电荷或带电粒子有规律的定向运动而形成的。电流的方向规定为正电荷移动的方向。电流在数值上等于单位时间内通过某一导体横截面的电荷量。

若在极短时间  $dt$  内通过导体横截面的电荷量为  $dq$ ,则通过该导体的电流为

$$i = \frac{dq}{dt} \quad (1)$$

若电流是随时间而变化,称为交流电流,用小写字母  $i$  表示。

如果电流的大小和方向都不随时间变化,即  $\frac{dq}{dt}$  为常数,则称为恒定电流,简称直流,用大写字母  $I$  表示。



$$I = \frac{q}{t} \quad (1-2)$$

式中  $q$  是在时间  $t$  内通过导体横截面  $S$  的电荷量。

在国际单位制 (IS) 中, 电流的单位是安 (A)。

$$1 \text{ 千安 (kA)} = 10^3 \text{ 安 (A)}$$

$$1 \text{ 毫安 (mA)} = 10^{-3} \text{ 安 (A)}$$

$$1 \text{ 微安 (}\mu\text{A)} = 10^{-6} \text{ 安 (A)}$$

## 2. 电压

电压是测量电场力对电荷作功能力的物理量,  $a, b$  两点间的电压  $U_{ab}$  在数值上等于电场力推动单位正电荷从  $a$  点移到  $b$  点所作的功, 如图 1-3 所示。则电压  $U_{ab}$  为

$$U_{ab} = \frac{W_{ab}}{q} \quad (1-3)$$

在电路中任意两点间的电压也常称为两点间的电位差, 即

$$U_{ab} = U_a - U_b \quad (1-4)$$

式中  $U_a$  为  $a$  点的电位,  $U_b$  为  $b$  点的电位。

## 3. 电动势

在图 1-3 中, 在电场力的作用下, 正电荷总是从高电位端通过负载向低电位端移动。正电荷从  $a$  移到  $b$  后, 马上与  $b$  板板上的负电荷中和, 这样正电荷的不断移动, 将使正负极板上的正负电荷逐渐消失, 电场也逐步减小, 电流就要中断。

为了维持电流不断地流通, 并且保持恒定, 因此在  $a, b$  极板之间必须要有一种力使极板  $b$  上的正电荷流向极板  $a$ , 使  $a, b$  之间始终维持一定强度的电场。电源能产生这种力, 称为电源力。在电池和发电机中, 电源力存在于电池内部的化学反应和在发电机内部的电磁力。电源力在电源内部源源不断地把正电荷从低电位端  $b$  移到高电位端  $a$ , 必须克服电场力作功。为衡量电源力对电荷作功的能力, 引入电动势这个物理量。电动势在数值上等于电源力将单位正电荷从电源的负极  $b$  推到正极  $a$  所作的功。则电动势  $E$  为

$$E = \frac{W_{ba}}{q} \quad (1-5)$$

在国际单位制 (IS) 中, 电压和电动势的单位都是伏 (V)。

$$1 \text{ 千伏 (kV)} = 10^3 \text{ 伏 (V)}$$

$$1 \text{ 毫伏 (mV)} = 10^{-3} \text{ 伏 (V)}$$

## 四、正方向

电流的实际方向规定为正电荷运动的方向, 电压的实际方向规定为由高电位端指向低电位端, 即为电位降低的方向; 电动势的实际方向规定为在电源内部由低电位端指向高电位端, 即为电位升的方向。但在复杂电路中, 支路电流的实际方向往往难以事先判定。为分析计算电路的需要, 常可任意选定某一方向作为电流的正方向 (用箭头表示), 或称参考方向。按此正方向对电路进行计算, 如果算得的电流为正值 ( $I > 0$ ), 则表示电流的实际方向与正方向一致, 若

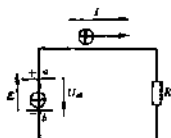


图 1-3 电压的回路

为负值( $I < 0$ ), 则电流的实际方向与正方向相反, 如图 1-4 所示。由此可见, 只有在正方向选定之后, 电流实际值才有正负之分。

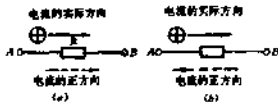


图 1-4 电流的正方向与实际方向  
(a)正值( $I > 0$ ) (b)负值( $I < 0$ )

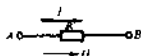


图 1-5 并联正方向

同样, 电压的正方向也可以任意假定, 当求解后, 根据计算结果的正负号, 对照正方向, 就可以确定出电压的实际方向。为了计算方便, 要尽可能减少分析电路时所列方程式中的负号, 以便减少计算错误。在同一段电路同一电阻元件中, 应当使电流的正方向与电压的正方向选为一致, 称为并联正方向, 如图 1-5 所示。采用并联正方向, 电路图中只要标出电流或电压的一个正方向就够了。

电路中的电功率  $P = UI$ , 当电压和电流的实际方向一致时, 则电功率  $P$  为正 ( $P > 0$ ), 反之为负 ( $P < 0$ )。  $P$  为正, 表示该部分电路吸取电功率;  $P$  为负则表示该部分电路输出电功率。由于电源电动势的实际方向十分明确, 因此通常不必设定正方向。

## 1-2 电路的工作状态和电气设备的额定值

### 一、电路的工作状态

电路有三种工作状态: 有载状态、开路状态和短路状态。

#### 1. 有载状态

在图 1-6 中, 电源与负载接通, 电路处于有载状态, 电路中的电流为

$$I = \frac{E}{R_0 + R} \quad (1-5)$$

通常电源的电动势  $E$  和内阻  $R_0$  是一定的, 由上式可见, 电路电流  $I$  的大小由负载电阻  $R$  值决定。

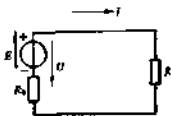


图 1-6 负载状态

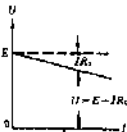


图 1-7 电源的外特性

负载电阻两端的电压为

$$U = IR = E - IR_0 \quad (1-7)$$

电源两端电压为电动势与电源内阻所产生的电压降  $IR_0$  之差。电流越大,则电源端电压下降得越多,表示电源端电压  $U$  与输出电流  $I$  之间关系的曲线称为电源的外特性,如图 1-7 所示,其斜率与电源内阻  $R_0$  有关。 $R_0$  一般很小,当  $R_0 \ll R$  时,则  $U \approx E$ ,表示当电流变动时,电源的端电压变化不大,说明带负载能力强。

若将式(1-7)各项同乘以电流  $I$ ,则得功率平衡方程式

$$\begin{aligned} UI &= EI - I^2 R_0 \\ P &= P_E - P_0 \end{aligned} \quad (1-8)$$

式中  $P_E = EI$ ——电源产生的功率;

$P_0 = I^2 R_0$ ——电源内阻消耗的功率;

$P = UI$ ——电源的输出功率,也是负载消耗的功率。

在国际单位制(SI)中,功率的单位是瓦特(W)或千瓦(kW)。

## 2. 开路状态

如图 1-8 中的开关  $S$  断开时的状态叫开路(空载)状态。开路时外电路的电阻对电源而言等于无穷大,因此电路中电流为零。由于无电流,电源的内阻上无电压降,这时电源的端电压(称开路电压  $U_0$ )等于电源电动势,电源不向负载输出功率。

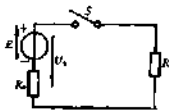


图 1-8 开路状态

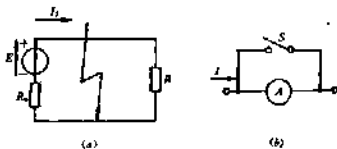


图 1-9 短路状态  
(a)电源短路 (b)电路短接

综上所述,电路开路状态的特征为

$$\left. \begin{aligned} I &= 0 \\ U &= U_0 = E \\ P &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (1-9)$$

## 3. 短路状态

当电路的元件或设备直接被导线接通,称为电路的元件或设备处于短路状态。如图 1-9 (a)所示。在实际工作中,电源短路是最值得注意的。电源短路时,外电路电阻接近零,故电源的端电压必为零,电动势  $E$  几乎全部降落在内阻  $R_0$  上,而  $R_0$  是很小的,所以短路电流  $I_0$  将很大。这时电源所产生的电功率全部被内阻  $R_0$  所消耗,电源将遭受热损伤乃至烧毁。

电源短路时的特征为

$$\left. \begin{aligned} I &= I_s = \frac{E}{R_0} \\ U &= 0 \\ P &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (1-10)$$

电源短路往往是由于绝缘损坏或接线错误等造成。电源短路是一种严重事故。为了防止短路,通常在电源侧接入熔断器或自动断路器,以便在发生短路时,能迅速将故障电路切除。但有时为了某种需要,人为地将电路中的某一段或某一个元件两端短接起来,如图 1-9(b)所示。当开关  $S$  闭合时,电流通过开关而不经过电流表,即相当于表计退出。这种有目的的人为短路称为有用短路。为了区别事故短路与有用短路,通常把后者称为短接。

## 二、电气设备的额定值

各种电气设备的电压、电流及功率等参数都有规定的值,称为额定值。电气设备的额定值包括额定电流、额定电压及额定功率,分别用  $I_N$ 、 $U_N$  和  $P_N$  表示。通常都标在设备的铭牌上,或注明在元件上。例如某电度表的额定值为 220V5A,它表明电度表工作在 220V 电压,最大允许流过的电流是 5A。

若电气设备按额定值运行使用时,称为额定工作状态,也称满载运行。电气设备的满载运行是最经济合理和安全可靠的。若低于额定值时,称为欠载运行,欠载时不能充分发挥设备应有的效能。若高于额定值运行,称过载运行,就可能引起设备损坏。因此,在使用任何电气设备时,应注意看清设备的额定值,不允许随意乱用,尤其是超值运行。为使电气设备能安全可靠地工作,电源和负载之间的联接要符合两个原则:(1)两者的额定电压相等;(2)电源额定功率(又称容量)应大于或等于负载所需功率。

应当指出,电气设备在额定状态下工作是理想的情况,实际上并不存在,这是因为电源电压产生波动和用电设备的设计参数与实际值存在差异等造成,但是在工程实际中,应当尽量接近额定工作状态。

**例题 1-1** 如图 1-5 所示电路,已知  $E=20\text{V}$ ,  $R_0=0.1\Omega$ ,试求当负载电阻  $R$  的阻值分别是  $\infty$ 、0、200 $\Omega$ 、1 $\Omega$  时电源的端电压  $U$ 、电流  $I$  和功率  $P$ ?

**解** 1. 当  $R=\infty$  时,即开路状态

$$\begin{aligned} I &= \frac{E}{R_0 + \infty} = 0 \\ U - U_0 &= E - IR_0 = E = 20\text{V} \\ P &= UI = 0 \end{aligned}$$

2. 当  $R=0$  时,即短路状态

$$\begin{aligned} I &= I_0 = \frac{E}{R_0} = \frac{20}{0.1} = 200\text{A} \\ U &= E - I_0 R_0 = 20 - 200 \times 0.1 = 0 \\ P &= UI = 0 \end{aligned}$$

3. 当  $R=200\Omega$  时,即有载状态

$$\begin{aligned} I &= \frac{E}{R_0 + R} = \frac{20}{0.1 + 200} = 0.1\text{A} \\ U - E - IR_0 &= 20 - 0.1 \times 0.1 \approx 20\text{V} \end{aligned}$$

$$P = UI = 20 \times 0.1 = 2 \text{ W}$$

4. 当  $R=1\Omega$  时

$$I = \frac{20}{0.1 + 1} = 18 \text{ A}$$

$$U = 20 - 18 \times 0.1 = 18.2 \text{ V}$$

$$P = 18.2 \times 18 = 327.6 \text{ W}$$

由计算可知,当  $R$  由大变小时,电流则由小变大,当短路时,电流很大。同时,当  $R$  越接近  $R_0$  时,负载获得的功率越大,电路理论已证明,当  $R=R_0$  时,负载可获得最大的功率。

### 1-3 电路中电位的计算

在进行电位计算时,首先必须在电路中选某点作为参考点,参考点的电位规定为零,把电路中任意点与参考点之间的电压,称为该点的电位。

参考点可以任意选定,在电力系统中,习惯上选大地作为参考点,在电子线路中,常选电路的公共线或机壳为参考点,用符号“⊥”表示。在电路中不指定参考点谈论电位就失去意义。电位虽然对某一点而言,但实质上还是指两点间的电位之差,只是其中参考点电位预先指定为零而已。

电位的计算,可按照下述步骤进行。

1. 选定电位参考点;
2. 假设出电流正方向;
3. 利用全电路欧姆定律计算出电路中的电流;
4. 凡电压  $U$  的正方向与电位绕行方向(某点电位到参考点的方向)一致者取正号,反之取负号;
5. 凡电流的正方向与电位绕行方向一致者,电阻压降为正,反之取负;
6. 凡电动势的实际方向与电位绕行方向一致者取负号,相反者取正号。

现结合上述步骤,举例加以说明。

在图 1-10 所示电路中,已知  $R_1=5\Omega, R_2=5\Omega, R_3=2\Omega, R_4=3\Omega, E_1=20\text{V}, E_2=5\text{V}$ 。

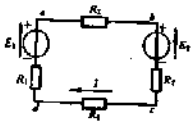


图 1-10 电路示例

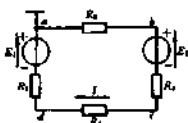


图 1-11  $U_a=0$

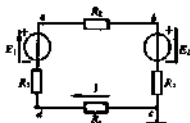


图 1-12  $U_c=0$

设  $a$  点为电位参考点,即  $U_a=0$ 。

假设出电流的正方向,如图 1-11 所示。

根据全电路欧姆定律求出电路中的电流

$$I = \frac{E_1 - E_2}{R_1 + R_2 + R_3 + R_4} = \frac{20 - 5}{5 + 3 + 2 + 3} = 1 \text{ A}$$

根据求电位步骤,可求出各点的电位值为

$$U_a = -IR_2 = -1 \times 5 = -5 \text{ V}$$

$$U_c = IR_4 + IR_1 - E_1 = 1 \times 3 + 1 \times 5 - 20 = -12 \text{ V}$$

$$U_d = IR_1 - E_1 = 1 \times 5 - 20 = -15 \text{ V}$$

如果设  $c$  点为电位参考点,即  $U_c = 0$ ,如图 1-12 所示,则可得出

$$U_a = E_1 - IR_1 - IR_2 = 20 - 1 \times 5 - 1 \times 3 = 12 \text{ V}$$

$$U_d = E_2 - IR_2 = 5 + 1 \times 2 = 7 \text{ V}$$

$$U_b = -IR_4 = -1 \times 3 = -3 \text{ V}$$

在图 1-12 电路中, $a$  点电位也可以写成

$$U_a = IR_2 + E_2 + IR_3 = 1 \times 5 + 5 + 1 \times 2 = 12 \text{ V}$$

从上面计算结果可以看出:

当电路的参考点选定后,电路中各点的电位值总是固定的。

改变电路的参考点,电路中各点的电位值随都改变,但任意两点间的电压值是不变的。

参考点选定后,电路中各点的电位值与选择路径无关。

## 1-4 克希荷夫定律

克希荷夫定律包括电流定律和电压定律。电流定律应用于节点,电压定律应用于回路。

在阐述克希荷夫定律之前,先介绍与定律有关的几个名词。

**支路** 电路中的每一分支称为支路。一条支路流过一个电流。在图 1-13 中共有三条支路。 $acb$ 、 $ab$  和  $adb$ 。

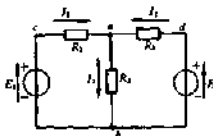


图 1-13 电路举例

该节点流出的电流之和,或在任一瞬时任一节点上电流的代数和恒等于零。这就是克希荷夫电流定律,其数学表达式为

$$\sum I = 0 \quad (1-11)$$

克希荷夫电流定律用来确定同一节点上各支路电流之间的相互关系,该定律说明了电荷不可能在电路中的任一点上有堆积和减少,体现了电流连续性原理。

**节点** 电路中三条或三条以上支路的连接点称为节点。图 1-13 中有两个节点  $a$  和  $b$ 。

**回路** 电路中任一闭合路径称为回路。图 1-13 中共有三个回路  $acbca$ 、 $abca$  和  $abda$ 。

**网孔** 回路中不再包含其它回路称为网孔或单孔。图 1-13 有两个网孔  $abca$  和  $abda$ 。

### 一、克希荷夫电流定律

在图 1-13 所示的电路中,对节点  $a$  可以写出

$$I_1 + I_2 = I_3$$

或

$$I_1 + I_2 - I_3 = 0$$

式(1-11)中各电流前面正负号的取法,如果规定正方向流进节点的电流取正号,则流出节点的电流就取负号。因此,应用克希荷夫电流定律时,电路中各支路的电流必须事先标明正方向。

根据计算的结果,有些支路的电流可能是负值,这是由于所选电流的正方向与实际方向相反所致。

克希荷夫电流定律也可以推广到包围部分电路的任一假设的闭合面,可把闭合面看成一个广义节点,如图 1-14 所示电路中,对于广义节点则有

$$I_a + I_c - I_b = 0$$

$$\sum I = 0$$

可见,在任一瞬时,通过任一闭合面的电流的代数和也恒等于零。

## 二.克希荷夫电压定律

在任一瞬时,从回路中任一点出发以顺时针方向或逆时针方向沿回路绕行一周,则在这个方向上的电位升之和应该等于电位降之和,这就是克希荷夫电压定律,其数学表达式为

$$\sum U = 0 \quad (1-12)$$

克希荷夫电压定律用来确定同一回路中各段电压之间的相互关系。该定律体现了电位单值性原理。

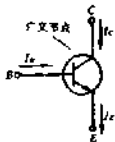


图 1-14 广义节点

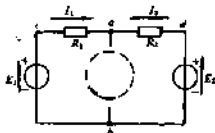


图 1-15 回路

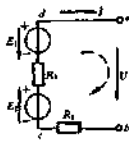


图 1-16 克希荷夫电压定律的推广

在图 1-15 所示电路中,沿着回路  $adbc$  环行一周,可写出

$$E_1 + I_2 R_2 = E_2 + I_1 R_1$$

或

$$E_1 - E_2 + I_2 R_2 - I_1 R_1 = 0$$

即

$$\sum U = 0$$

在这里,电阻两端的极性由电流正方向决定,流入端为正,流出端为负;电动势两端的极性已明确,电位的升降由回路绕行方向决定,由负极性到正极性为电位升,反之则为电位降。

上式也可改写为

$$E_1 - E_2 = I_1 R_1 - I_2 R_2$$

$$\sum E = \sum (IR)$$

这是克希荷夫电压定律在电阻电路中的另一种表达式,在任一回路绕行方向上,回路中电动势的代数和恒等于电阻上压降的代数和,电动势和电流的正负号确定原则为,凡是电动势的实际方向与回路绕行方向一致者取正号,反之取负号。凡是电流的正方向与回路绕行方向一致者,该电流在电阻上所产生的电压降取正号,反之取负号。

克希荷夫电压定律还可以推广应用于一个假设的闭合回路。在图 1-16 所示电路中,对假设回路  $abcd$  有

$$E_2 - E_1 = IR_1 + IR_2 + U$$

$$E_2 - E_1 - IR_1 - IR_2 - U = 0$$

或

$$U = E_2 - E_1 - IR_1 - IR_2$$

若已知电路中各元件的参数以及支路电流,就能计算出  $a, b$  两点间的电压  $U$  值。

例 1-2 如图 1-17 所示电路,已知  $E_1=24\text{ V}, E_2=12\text{ V}, R=2\ \Omega, I_2=2\text{ A}, I_3=8\text{ A}$ ,求  $I_1, I_4, U_4$  和  $U_{ab}$ 。

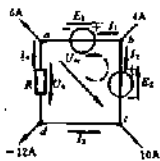


图 1-17 例题 1-2 的图

解 根据克希荷夫电流定律可求出  $I_1$  和  $I_4$ 。对节点  $b$  有

$$4 = I_1 + I_2$$

$$I_1 = 4 - I_2 = 4 - 2 = 2\text{ A}$$

对节点  $a$  有

$$I_1 = 6 + I_4$$

$$I_4 = I_1 - 6 = 2 - 6 = -4\text{ A}$$

根据欧姆定律得

$$U_4 = I_4 R = -4 \times 2 = -8\text{ V}$$

根据克希荷夫电压定律可求出

$$U_{ab} = E_2 - E_1 = 12 - 24 = -12\text{ V}$$

$I_4, U_4, U_{ab}$  均为负值,表示它们的实际方向与图中所标的正方向相反。

## 1-5 电压源与电流源及其等效变换

### 一、电压源

任何一个实际电源,都可用两种不同的电路模型来表示。用电动势  $E$  和内阻  $R_0$  相串联的电路模型来表示电源时,称为电压源,如图 1-18(a) 所示。

当电压源外接负载电阻  $R_L$  后,可得出电压源端电压  $U$  和输出电流  $I$  之间的关系为

$$U = E - IR_0 \quad (1-13)$$

当电动势  $E$  和内阻  $R_0$  固定时,则  $U$  和  $I$  互为变量,它们随负载电阻  $R_L$  的大小而变化。

将式(1-13)的  $U=f(I)$  关系描述在  $U-I$  坐标平面上,称为电压源的外特性曲线,如图 1-18(b) 所示。从电压源外特性可见,当电压源开路时,则  $I=0, U_{oc}=E$ ; 当负载电流增加时,由于存



在内阻压降  $IR_0$ ，使电源端电压有所下降， $I$  越大， $U$  下降得越多，因此，电压源端电压的稳定性不但取决于负载  $R_L$ ，还取决于内阻  $R_0$  的大小，在相同的负载电流下， $R_0$  越大，电压源端电压下降越多，外特性越差；当电压源短路时，则  $U=0, I=\frac{E}{R_0}$ 。在  $R_0=0$  的理想情况下，电压源端电压恒等于电动势，即  $U=E$ ，这时的电压源称为理想电压源或恒压源，其电路如图 1-19 所示，它的外特性是电压为  $E$  的一条平行横轴的直线，如图 1-18(b) 所示，恒压源输出电流是任意的，由负载电阻  $R_L$  来确定。

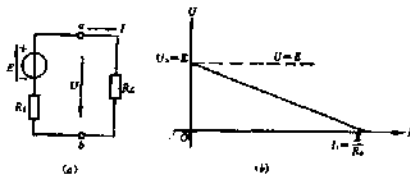


图 1-18 电压源及其外特性

(a) 电压源电路 (b) 电压源和恒压源的外特性

恒压源实际上是不存在的，因为电压源内阻不可能等于零，任何电源不可能在输出任意变化的电流时，端电压会保持恒定不变，但电压源的内阻很小，并且  $R_0 \ll R_L$ ，则内阻压降  $IR_0 \ll U$ ，于是  $U \approx E$ ，可以把电压源近似地看成为恒压源。通常用的稳压电源可视为恒压源。

## 二、电流源

如将式(1-13)两端除以  $R_0$ ，可得电流方程为

$$\frac{U}{R_0} = \frac{E}{R_0} - I = I_0 - I$$

或

$$I = \frac{U}{R_0} + I_0 \quad (1-14)$$

式中  $I_0 = \frac{E}{R_0}$  为电源的短路电流； $I$  是负载电流； $\frac{U}{R_0}$  是流经电源内阻  $R_0$  的电流。如图 1-20(a) 所示。用电流为  $I_0$  和内阻  $R_0$  相并联的电路模型来表示电源时，称为电流源。

当电流源外接负载电阻  $R_L$  时，电流源的输出电流  $I$  和输出电压  $U$  之间的关系为

$$I = I_0 \cdot \frac{U}{R_0} \quad (1-15)$$

当  $I_0$  和  $R_0$  不变时， $U$  和  $I$  是变量，它们随负载电阻  $R_L$  而变化。

由式(1-15)可作出电流源的外特性曲线，如图 1-20(b) 所示。从外特性可见，当电流源开路时，则  $I=0, U_0=I_0 R_0$ ；当电流源短路时，则  $U=0, I=I_0$ ，这时  $I_0$  全部输出给外电路；当外接负

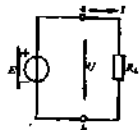


图 1-19 恒压源电路

载电阻  $R_L$  增大时, 则  $U$  增大, 由于内阻  $R_0$  分流为  $\frac{U}{R_0}$ , 使输出电流减少。显然,  $R_0$  值越小,  $i$  减少得越多, 电流源外特性就越差。当  $R_0 = \infty$  (相当  $R_0$  开路) 时, 则输出电流为一恒定值, 即  $I = I_s$ 。这时的电流源称为理想电流源或恒流源, 其电路如图 1-21 所示。恒流源的外特性是电流为  $I_s$  平行于纵轴的一条直线, 如图 1-20(b) 所示。恒流源的端电压是任意的, 它取决于所接负载  $R_L$  的大小。

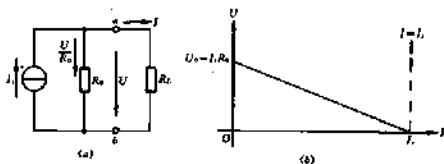


图 1-20 电流源及其外特性  
(a) 电流源电路 (b) 电流源和恒流源的外特性

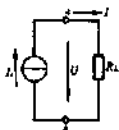


图 1-21 恒流源电路

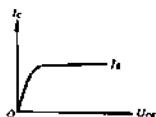


图 1-22 晶体管的输出特性

恒流源也是一种理想电源, 在实际中并不存在, 因为电流源内阻不可能为无穷大。但若电流源的内阻  $R_0 \gg R_L$  时, 则  $I \approx I_s$ , 可将电流源近似地看成恒流源。处于放大状态的三极管可近似看作一个恒流源, 它的输出特性如图 1-22 所示, 当基极电流  $I_B$  为某一值, 并当集电极电压  $U_{CE}$  超过一定值时, 集电极电流  $I_C$  不随  $U_{CE}$  而变化。

### 三、电压源与电流源的等效变换

在图 1-23 所示的电路中, 设电压源与电流源分别向同一阻值的负载电阻  $R_L$  供电, 若两种电源在  $R_L$  两端的电压  $U$  和通过的电流完全相同, 则对外电路而言, 这两种电源是等效的, 因此可以互换。对于图 1-23(a) 的电压源来说, 电阻  $R_L$  两端的电压和通过的电流为

$$\begin{cases} U = E - IR_0 \\ I = \frac{E - U}{R_0} = \frac{E}{R_0} - \frac{U}{R_0} \end{cases}$$

对于图 1-23(b) 的电流源来说, 电阻  $R_L$  两端的电压和通过的电流为

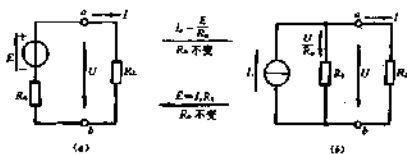


图 1-23 电压源与电流源的等效变换

(a)电压源 (b)电流源

$$\begin{cases} I = I_0 - \frac{U}{R_0} \\ U = I R_0 - I R_0 \end{cases}$$

满足上面两组公式相等的条件应是:

$$\begin{cases} R_0 \text{ 不变} \\ E = I_0 R_0 \text{ (或 } I_0 = \frac{E}{R_0}) \end{cases}$$

即电压源与电流源的参数相互间满足  $R_0$  不变和  $E = I_0 R_0$  的条件, 则两种电源对同一负载  $R_L$  输出的电压、电流均相同, 这时两种电源对外部的作用是等效的, 两者可以互换。

两种电源等效变换时应注意:

- (1) 电压源与电流源的等效变换, 是对外电路而言的, 而对电源内部电路并不等效。
- (2) 恒压源与恒流源两者不能等效变换。
- (3) 电压源与电流源等效变换时, 因为它们对外电路产生的电流方向相同, 所以电流源电流流出的一端应与电压源的正极相对应, 不可颠倒。

例 1-3 有一直流电源, 已知  $E = 12 \text{ V}$ ,  $R_0 = 1 \Omega$ ,  $R_L = 11 \Omega$ 。计算电源的两种等效电路的电压  $U$ 、电流  $I$  和电源内部的功率损耗。

解 电压源和电流源电路如图 1-24 所示。在电压源电路中:

$$I = \frac{E}{R_0 + R_L} = \frac{12}{1 + 11} = 1 \text{ A}$$

$$U = I R_L = 1 \times 11 = 11 \text{ V}$$

$$P_0 = I^2 R_0 = 1^2 \times 1 = 1 \text{ W}$$

在电流源电路中:

$$I_0 = \frac{E}{R_0} = \frac{12}{1} = 12 \text{ A}$$

$$I = \frac{R_0}{R_0 + R_L} I_0 = \frac{1}{1 + 11} \times 12 = 1 \text{ A}$$

$$U = I R_L = 1 \times 11 = 11 \text{ V}$$

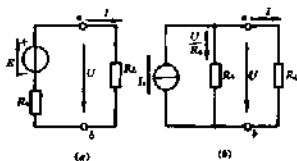


图 1-24 例题 1-3 的图

$$P_c = \left(\frac{U}{R_3}\right)^2 R_3 = \left(\frac{11}{1}\right)^2 \times 1 = 121 \text{ W}$$

可见,电压源与电流源对外电路而言,相互间是等效的,但对电源内部讲,则是不等效的。

## 1-6 支路电流法

以支路电流为未知量,应用克希荷夫定律,分别对节点和回路列出所需要的方程,然后求解出各支路电流的方法称为支路电流法。现以图 1-25 所示电路为例,说明支路电流法的应用。首先假设各支路电流的正方向,如图上标注。在本电路中,支路数  $b=3$ ,节点数  $n=2$ ,应用克希荷夫电流定律列出节点方程,对于节点  $a$

$$I_1 + I_2 - I_3 = 0 \quad (1-16)$$

对于节点  $b$

$$I_3 - I_1 - I_2 = 0 \quad (1-17)$$

式(1-17)即为式(1-16),不是独立方程。由此可见,对具有两个节点的电路,应用电流定律只能列出  $(2-1)=1$  个独立的节点电流方程。对具有  $n$  个节点的电路,可以列出  $(n-1)$  个独立的节点电流方程。

应用克希荷夫电压定律,列出独立的回路电压方程,对于图 1-25 电路中,共有 3 个回路,可列出 3 个回路方程,通常可取出网孔回路,列出各网孔回路

方程,即为独立的回路电压方程。在图 1-25 中只有 2 个网孔。对网孔  $abca$  可列出

$$E_1 = I_1 R_1 + I_2 R_2 \quad (1-18)$$

对网孔  $abda$  可列出

$$E_2 = I_2 R_2 + I_3 R_3 \quad (1-19)$$

得联立方程组为

$$\begin{cases} I_1 + I_2 - I_3 = 0 \\ E_1 = I_1 R_1 + I_2 R_2 \\ E_2 = I_2 R_2 + I_3 R_3 \end{cases}$$

就可解出三个支路的电流。

应用克希荷夫电流定律可列出  $(n-1)$  个独立的节点电流方程;应用克希荷夫电压定律可列出  $b \cdot (n-1)$  个独立的网孔回路电压方程,一共可列出  $(n-1) + b \cdot (n-1) = b$  个独立方程,所以能解出  $b$  个支路电流。

**例 1-4** 在图 1-26 所示电路中,  $E_1=115 \text{ V}$ ,  $E_2=50 \text{ V}$ ,  $R_1=R_2=R_3=5 \Omega$ ,用支路电流法求各支路的电流和  $U_3$ 。

**解** 假设各支路电流的正方向如图所示。

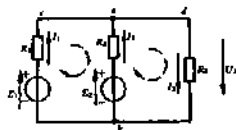


图 1-26 例题 1-4 的图

列出节点独立的电流方程为:

对节点  $a$  
$$I_1 + I_2 - I_3 = 0$$

列出独立的回路电压方程为:

对网孔  $abca$  
$$E_1 - E_2 = I_1 R_1 - I_2 R_1$$

对网孔  $adba$  
$$E_2 = I_2 R_2 + I_3 R_3$$

得联立方程组

$$\begin{cases} I_1 + I_2 - I_3 = 0 \\ E_1 - E_2 = I_1 R_1 - I_2 R_1 \\ E_2 = I_2 R_2 + I_3 R_3 \end{cases}$$

代入已知数据,得

$$\begin{cases} I_1 + I_2 - I_3 = 0 \\ 115 - 50 = 5I_1 - 5I_2 \\ 50 = 5I_2 + 5I_3 \end{cases}$$

解之,得

$$I_1 = 12 \text{ A}$$

$$I_2 = -1 \text{ A}$$

$$I_3 = 11 \text{ A}$$

$$U_3 = I_3 R_3 = 11 \times 5 = 55 \text{ V}$$

例 1-5 在图 1-25 所示的电路中,  $E_1 = 140 \text{ V}$ ,  $E_2 = 90 \text{ V}$ ,  $R_1 = 20 \Omega$ ,  $R_2 = 5 \Omega$ ,  $R_3 = 6 \Omega$ . 用支路电流法求各支路电流。

解 应用克希荷夫电流定律和电压定律写出式(1-16)、式(1-18)及式(1-19),并将已知数据代入,即得

$$\begin{cases} I_1 + I_2 - I_3 = 0 \\ 140 = 20I_1 + 6I_3 \\ 90 = 5I_2 + 6I_3 \end{cases}$$

解之,得

$$I_1 = 4 \text{ A}$$

$$I_2 = 6 \text{ A}$$

$$I_3 = 10 \text{ A}$$

## 1-7 节点电位法

以节点电位为未知量,列出和求解节点方程的方法称为节点电位法,也叫节点电压法。因为电路的独立节点数恒小于支路数,所以以节点电位为未知量列得的方程将少于支路电流方程。特别是对节点少,支路数多的电路来说,应用此法将会使电路分析大为简化。

在电路中任选一节点为参考点,其它节点对此参考点的电压就是该节点的电位,一旦各节点电位已知,则各节点之间的支路电流即可随之解出。

以图 1-27 电路为例来说明。此电路共有两个节点，各支路都跨接于这两节点之间，因此只要把这两节点之间的电压求出来，那么各支路的电流就可由克希荷夫列出的电压方程式求得。

在图 1-27 所示电路，选定参考点电位  $U_a = 0$ ，由节点  $a$  列得一个独立的电流方程

$$I_1 + I_2 - I_3 + I_4 = 0$$

各支路的电流可由克希荷夫电压定律导出

$$U = E_1 - I_1 R_1 \quad \text{或} \quad I_1 = \frac{E_1 - U}{R_1}$$

$$U = -I_2 R_2 \quad \text{或} \quad I_2 = \frac{-U}{R_2}$$

$$U = E_2 + I_3 R_3 \quad \text{或} \quad I_3 = \frac{U - E_2}{R_3}$$

$$U = -E_3 - I_4 R_4 \quad \text{或} \quad I_4 = \frac{-E_3 - U}{R_4}$$

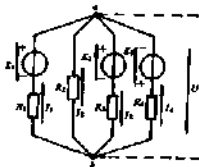


图 1-27 电路举例

把它们代入电流方程，经整理后得出节点电位  $U$  为

$$U = \frac{\frac{E_1}{R_1} + \frac{E_2}{R_2} - \frac{E_3}{R_3}}{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} + \frac{1}{R_4}} = \frac{\sum \frac{E}{R}}{\sum \frac{1}{R}} \quad (1-20)$$

解出  $U$  后，在已知电动势和电阻的情况下，各支路电流就可随之求得。

式中分母各项总为正，分子各项的正负号可根据电动势同节点电位的绕行方向是否一致来决定，一致者取负号，相反者取正号。

例 1-6 用节点电位法求解例 1-4 中的各支路电流。

解 根据节点电位公式有

$$U = \frac{\sum \frac{E}{R}}{\sum \frac{1}{R}} = \frac{\frac{E_1}{R_1} + \frac{E_2}{R_2}}{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3}} = \frac{\frac{115}{5} + \frac{50}{5}}{\frac{1}{5} + \frac{1}{5} + \frac{1}{5}} = 55 \text{ V}$$

$$I_1 = \frac{E_1 - U}{R_1} = \frac{115 - 55}{5} = 12 \text{ A}$$

$$I_2 = \frac{E_2 - U}{R_2} = \frac{50 - 55}{5} = -1 \text{ A}$$

$$I_3 = \frac{U}{R_3} = \frac{55}{5} = 11 \text{ A}$$

$$U_3 = I_3 R_3 = 11 \times 5 = 55 \text{ V}$$

所得结果与例 1-4 相同，但求解方法比例 1-4 简便。

## 1-8 叠加原理

在多个电源作用的线性电路中，在任一支路所产生的电流或电压等于各个电源单独作用时分别在该支路中所产生的电流或电压的代数和，这一原理称为叠加原理。在考虑某一电源单

独作用时,应将其余的电源作零值处理,即电压源短路,电流源开路,并保留各电源的内阻。

应用叠加原理的一般步骤为:

(1)根据原来多个电源共同作用的复杂电路画出各个电源单独作用时的电路,标出原来复杂电路各支路电流的正方向和电源单独作用时电路中各支路电流的实际方向;

(2)求出电源单独作用时电路中各支路电流;

(3)电源单独作用时电流的实际方向与原来多个电源共同作用的复杂电路各支路电流的正方向一致者为正,反之为负,然后将各个电源单独作用时的各支路电流相加而求出原来复杂电路各支路的电流。

例 1-7 用叠加原理计算图 1-26 电路中各支路电流。

解 图 1-26 所示电路看成两个电源单独作用的电路相叠加,如图 1-28 所示。

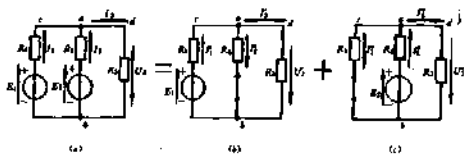


图 1-28 叠加原理

当  $E_1$  单独作用时,见图 1-28(b),可求出:

$$I'_1 = \frac{E_1}{R_1 + \frac{R_2 R_3}{R_2 + R_3}} = \frac{115}{5 + \frac{5 \times 5}{5 + 5}} = 15.33 \text{ A}$$

$$I'_2 = \frac{R_2}{R_2 + R_3} I'_1 = \frac{5}{5 + 5} \times 15.33 = 7.66 \text{ A}$$

$$I'_3 = \frac{R_3}{R_2 + R_3} I'_1 = \frac{5}{5 + 5} \times 15.33 = 7.66 \text{ A}$$

$$U'_x = I'_2 R_5 = 7.66 \times 5 = 38.35 \text{ V}$$

当  $E_2$  单独作用时,见图 1-28(c),可求出:

$$I''_2 = \frac{E_2}{R_2 + \frac{R_1 R_3}{R_1 + R_3}} = \frac{50}{5 + \frac{5 \times 5}{5 + 5}} = 6.66 \text{ A}$$

$$I''_1 = \frac{R_3}{R_1 + R_3} I''_2 = \frac{5}{5 + 5} \times 6.66 = 3.33 \text{ A}$$

$$I''_3 = \frac{R_1}{R_1 + R_3} I''_2 = \frac{5}{5 + 5} \times 6.66 = 3.33 \text{ A}$$

$$U''_x = I''_3 R_5 = 3.33 \times 5 = 16.65 \text{ V}$$

所以

$$I_1 = I'_1 - I''_1 = 15.33 - 3.33 = 12 \text{ A}$$

$$I_2 = I'_2 - I''_2 = 7.66 - 6.66 = 1 \text{ A}$$

$$I_3 = I'_3 + I''_3 = 7.66 + 3.33 = 11 \text{ A}$$

$$U_3 = U'_3 + U''_3 = 38.35 + 16.65 = 55 \text{ V}$$

计算结果与支路电流法求得结果一致。

由于功率不是电压和电流的一次函数,因此,功率与电压、电流不是线性关系,所以不能用叠加原理来计算功率。

## 1-9 戴维南定理

有时我们只需要计算某一复杂电路中的某一支路的电流或电压,通常应用戴维南定理求解较为方便。

求解复杂电路中某一支路的电流时,例如,求图 1-29 电路中的电流  $I$  时,可以将这个支路抽出来,而把该支路以外的其余电路(不论它包含几个电源)看成是一个含有电源的二端网络,只要具有两个出线端的电路皆称为二端网络。二端网络按其内部是否含有电源,分为有源二端网络和无源二端网络。于是,复杂电路就用有源二端网络和待求支路组合来表示,如图 1-29 (b)所示。

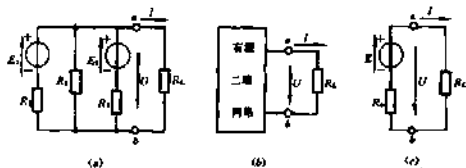


图 1-29 电路举例

(a) 复杂电路 (b) 有源二端网络 (c) 等效电压源

戴维南定理指出,任何一个有源二端网络都可以用一个电动势为  $E$  和内阻  $R_0$  相串联的电压源来等效。其中电动势  $E$  等于断开待求支路后求得的有源二端网络的开路电压;内阻  $R_0$  等于断开待求支路后从  $a, b$  两端看进去的等效电阻。在求等效电阻  $R_0$  时,应将网络内的电源零值处理,即恒压源短路,恒流源开路。

图 1-29(c) 的等效电压源电路是一个最简单的电路,这样,待求支路中的电流就可以方便地求得:

$$I = \frac{E}{R_0 + R_L} \quad (1-21)$$

例 1-8 用戴维南定理计算图 1-26 电路中的支路电流  $I_3$ 。

解 (1) 断开  $R_3$ , 求开路电压  $U_0$ 。

由图 1-30(a) 得

$$E = U_0 = \frac{\frac{E_1}{R_1} + \frac{E_2}{R_2}}{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}} = \frac{\frac{115}{5} + \frac{50}{5}}{\frac{1}{5} + \frac{1}{5}} = 82.5 \text{ V}$$



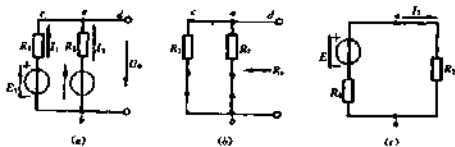


图 1-30 例题 1-8 的图

(2) 求内阻  $R_0$

将  $R_2$  断开, 将二端网络内的恒压源短路, 如图 1-30(b) 所示, 求从  $a$ 、 $b$  两点看进去的等效电阻。

$$R_0 = \frac{R_1 R_3}{R_1 + R_3} = \frac{5 \times 5}{5 + 5} = 2.5 \Omega$$

(3) 求  $I_2$

根据图 1-30(c) 得

$$I_2 = \frac{E}{R_0 + R_2} = \frac{82.5}{2.5 + 5} = 11 \text{ A}$$

例 1-9 用戴维南定理求图 1-25 电路中的支路电流  $I_2$ 。

解 (1) 断开  $R_2$  支路, 求开路电压  $U_0$ 。

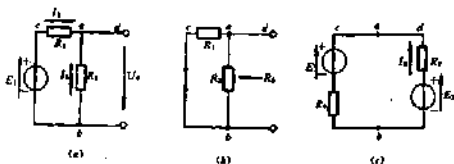


图 1-31 例题 1-9 的图

由图 1-31(a) 得:

$$E = U_0 = \frac{E_1}{R_1 + R_2} R_2 = \frac{140}{20 + 6} \times 6 = 32.3 \text{ V}$$

由图 1-31(b) 得

$$R_0 = R_1 // R_2 = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} = \frac{20 \times 6}{20 + 6} = 4.6 \Omega$$

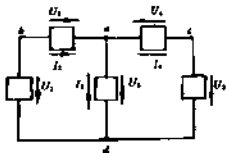
由图 1-31(c) 得

$$I_2 = \frac{E_2 - E}{R_0 + R_2} = \frac{90 - 32.3}{4.6 + 5} = 6 \text{ A}$$

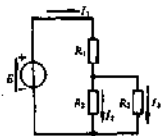
由上可见, 计算结果与用支路电流法和叠加原理计算的结果完全相同。但是, 其分析求解过程显得更加简洁方便。

## 习 题

1-1 电流和电压的正方向如图 1 所示, 5 个器件代表电源或负载, 由仪表测得  $I_1 = 12\text{A}$ ,  $I_2 = -4\text{A}$ ,  $I_3 = 8\text{A}$ ,  $U_1 = 11\text{V}$ ,  $U_2 = 3\text{V}$ ,  $U_3 = 5\text{V}$ ,  $U_4 = -3\text{V}$ ,  $U_5 = 8\text{V}$ 。试标出各电流的实际方向和各电压的实际极性, 并指出哪些器件是电源, 哪些器件是负载。



题图 1



题图 2

1-2 计算习题 1-1 电路中各器件的功率, 电路总功率是否平衡?

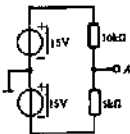
1-3 在题图 2 中,  $E = 12\text{V}$ ,  $R_1 = 30\Omega$ ,  $R_2 = 10\Omega$ ,  $R_3 = 15\Omega$ , 求电流  $I_1$ ,  $I_2$ ,  $I_3$  和各电阻上的电压  $U_1$ ,  $U_2$  和  $U_3$ 。

1-4 额定电压为  $220\text{V}$  的  $15\text{W}$  及  $60\text{W}$  的两个灯泡, 串联后接到  $380\text{V}$  的电源上, 试通过计算说明这样联接后发生什么现象?

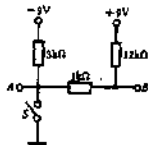
1-5 在图 1-6 所示电路中, 已知  $E = 220\text{V}$ ,  $R_0 = 1\Omega$ ,  $R = 40\Omega$ , 输送距离为  $200\text{m}$ , 用截面积为  $10\text{mm}^2$  铝线, 其电阻为  $R_1 = 1.16\Omega$ , 求: (1) 电路中电流; (2) 负载端电压; (3) 线路上电压降; (4) 电路发生断路时电源端电压; (5) 电源两端短路时的电流?

1-6 题图 3 所示电路中, 求开关  $S$  闭合前  $A$  点的电位  $U_A$ ?

1-7 求题图 4 所示电路中  $A$  点电位  $U_A$ ?



题图 3

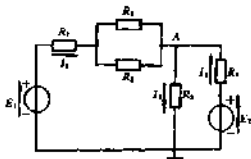


题图 4

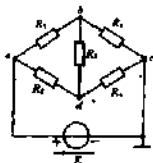
1-8 在图 1-13 电路中, 已知  $E_1 = 220\text{V}$ ,  $E_2 = 100\text{V}$ ,  $R_1 = 10\Omega$ ,  $R_2 = 5\Omega$ ,  $R_3 = 20\Omega$ , 计算  $I_1$  和  $I_2$ 。

1-9 在题图 5 所示电路中, 已知  $E_1 = 15\text{V}$ ,  $E_2 = 2\text{V}$ ,  $R_1 = 0.6\Omega$ ,  $R_2 = 6\Omega$ ,  $R_3 = 4\Omega$ ,  $R_4 = 0.2\Omega$ ,  $R_5 = 1\Omega$ , 试求  $A$  点的电位  $U_A$ ?

1-10 题图 6 是惠斯顿电桥电路, 已知  $R_1 = 1\Omega, R_2 = 2\Omega, R_3 = 3\Omega, R_4 = 6\Omega, R_5 = 8\Omega, E = 12V$ , 试将  $bd$  两端分别开路 and 短路后求各支路电流。



题图 5



题图 6

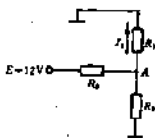
1-11 在图 1-6 所示电路中, 已知  $E = 12V, R_2 = 0.5\Omega, R = 10\Omega$ , 求: (1) 电路中电流; (2) 输出电压; (3) 负载消耗的功率; (4) 电源产生的功率; (5) 内阻损耗功率。

1-12 在图 1-26 所示电路中, 已知  $E_1 = 10V, E_2 = 6V, R_1 = 1\Omega, R_2 = 3\Omega, R_3 = 6\Omega$ , 把电压源电路简化为电流源电路, 并求出  $R_2$  上的电流  $I_2$ ?

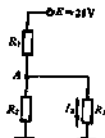
1-13 在图 1-26 电路中, 已知  $E_1 = 130V, E_2 = 117V, R_1 = 1\Omega, R_2 = 0.5\Omega, R_3 = 24\Omega$ , 试用支路电流法求各支路电流  $I_1, I_2$  和  $I_3$ , 并计算各器件上的功率?

1-14 电路如题图 7 所示, 已知  $E = 12V, R_1 = 2k\Omega, R_2 = 1.2k\Omega, R_3 = 3k\Omega$ , 试用节点电位法求电流  $I_1$ ?

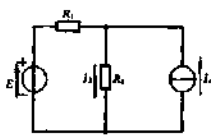
1-15 在题图 8 所示电路中, 已知  $E = 25V, R_1 = 100\Omega, R_2 = 6k\Omega, R_3 = 4k\Omega$ , 试用节点电位法求电流  $I_1$ ?



题图 7



题图 8



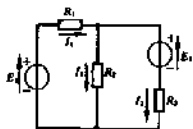
题图 9

1-16 在题图 9 所示电路中, 已知  $E = 6V, R_1 = 1\Omega, R_2 = 2\Omega, I_1 = 3A$ , 试用叠加原理求电流  $I_1$ ?

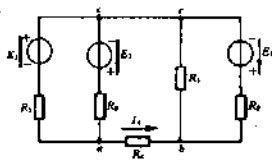
1-17 在题图 10 电路中, 已知  $E_1 = 78V, E_2 = 60V, R_1 = 0.2\Omega, R_2 = 4\Omega, R_3 = 1\Omega$ , 试用叠加原理求各支路电流  $I_1, I_2$  和  $I_3$ ?

1-18 在题图 11 所示电路中, 已知  $E_1 = 15V, E_2 = 70V, E_3 = 5V, R_1 = 6\Omega, R_2 = 5\Omega, R_3 = 10\Omega, R_4 = 2.5\Omega, R_5 = 15\Omega$ , 试用戴维南定理求  $R_5$  支路中的电流  $I_1$ ?

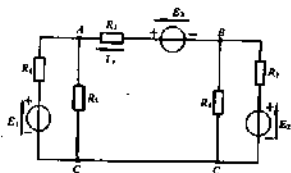
1-19 在如题图 12 所示电路中, 已知  $E_1 = 20V, E_2 = 10V, E_3 = 10V, R_1 = 10\Omega, R_2 = R_3 = R_4 = 5\Omega, R_5 = 10\Omega$ , 试用戴维南定理求电流  $I_1$  及  $A, B$  两点间的电压  $U_{AB}$ ?



题图 10



题图 11



题图 12

## 第二章 正弦交流电路

交流电容易产生、输送和分配,因此可为工农业提供较经济的电源。另外,使用交流电的电机、电器等用电设备具有结构简单、工作可靠和控制方便等优点,在现代电气技术中,交流电的应用最为广泛。

本章从交流电的基本概念入手,将讨论交流电路的基本规律、基本分析与计算方法。

### 2-1 正弦交流电的三要素

大小和方向随时间按正弦规律变化的电动势、电压、电流称为正弦交流电,如图 2-1 所示。含有正弦交流电动势的电路称为正弦交流电路,又把正弦电动势、电压和电流等物理量统称为正弦量。

正弦交流电路中的电动势  $e$ 、电压  $u$  和电流  $i$  的一般表达式为

$$\left. \begin{aligned} e &= E_m \sin(\omega t + \psi_e) \\ u &= U_m \sin(\omega t + \psi_u) \\ i &= I_m \sin(\omega t + \psi_i) \end{aligned} \right\} \quad (2-1)$$

式中  $e, u, i$  为正弦交流电的瞬时值;  $E_m, U_m, I_m$  为正弦交流电的幅值;  $\omega$  是正弦交流电的角频率;  $\psi_e, \psi_u, \psi_i$  为正弦交流电的初相角。正弦交流电的特征表现在变化的快慢、大小和初始值三个方面,它们分别由角频率、幅值及初相位来描述,这三个量叫做确定正弦量的三要素。

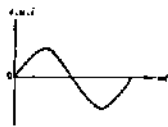


图 2-1 正弦波形

#### 一、角频率

正弦交流电变化一次所需的时间称为周期  $T$ , 其单位为秒(s)。每秒时间内变化的次数称为频率  $f$ , 其单位为赫兹(Hz)。

周期与频率互为倒数,即

$$f = \frac{1}{T} \quad (2-2)$$

我国规定工业用电标准频率(简称工频)是 50Hz, 对应于工频的周期则为  $T = \frac{1}{f} = \frac{1}{50} = 0.02\text{s}$ 。周期越短,或频率越高,表明交流电变化越快。

正弦量每秒钟所经历的弧度数称为角频率  $\omega$ , 其单位为弧度/秒(rad/s)。由于交流电变化一个周期经历了  $2\pi$  弧度,所以  $\omega, T$  与  $f$  的关系为

$$\omega = \frac{2\pi}{T} = 2\pi f \quad (2-3)$$

对于  $f=50\text{Hz}$  的工频交流电,其角频率  $\omega=2\pi f=2\pi\times 50=314\text{rad/s}$ 。周期,频率、角频率都是表示正弦交流电变化快慢的物理量。

## 二、幅值和有效值

正弦量在任一瞬间的值,称为瞬时值,电动势、电压、电流的瞬时值分别用小写字母  $e, u$  及  $i$  表示。瞬时值中的最大的值称为幅值或最大值,分别用带有下标  $m$  的大写字母  $E_m, U_m$  及  $I_m$  表示。

由于正弦交流电的大小和方向是随时间变化的,从做功的角度看,无论用瞬时值或幅值都不能反映交流电做功的效果,而且计算和测量也不方便。为此,引用有效值的概念。

有效值是根据交流电流和直流电流的热效应相等来确定的。将直流电流  $I$  和交流电流  $i$  分别通过同一电阻  $R$ ,如果在相等的时间  $T$  内该电阻产生的热量相等,即二者作的功是等效的,则把此直流电流  $I$  的数值定义为该交流电流  $i$  的有效值。

根据上述,可得

$$\int_0^T i^2 R dt = I^2 RT$$

由此得出交流电流的有效值为

$$I = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T i^2 dt} \quad (2-4)$$

由式(2-4)可见,交流电流的有效值等于电流瞬时值的平方在一个周期内的平均值的平方根,故有效值又称均方根值。

若为正弦交流电流,即  $i = I_m \sin \omega t$  时,则

$$I = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T (I_m \sin \omega t)^2 dt} = \frac{I_m}{\sqrt{2}} \quad (2-5)$$

同理可得正弦交流电压、电动势的有效值为

$$U = \frac{U_m}{\sqrt{2}}$$
$$E = \frac{E_m}{\sqrt{2}}$$

可见,正弦量的有效值等于它的幅值除以  $\sqrt{2}$ 。因此有效值可以代替幅值表示正弦量的大小。

按照规定,电动势、电压和电流的有效值分别用大写字母  $E, U, I$  表示。

在实际工作中,例如电动机,电灯等各种交流电气设备上所标的电压、电流值以及交流电压表、电流表的读数都是指有效值。

## 三、相位和初相位

在正弦量的表达式(2-1)中的角度  $(\omega t + \phi)$  称为相位或相位角。如正弦电流可表示为:

$$i = I_m \sin(\omega t + \phi) \quad (2-6)$$

其波形如图 2-2 所示。交流电流在不同的时间  $t$ , 对应不同的相位,因而也就对应不同的瞬时值。相位  $(\omega t + \phi)$  反映了正弦量变化进行中瞬时值的大小。 $t=0$  时的相位角  $\phi$  称为初相位或初相角。在波形图上初相角  $\phi$  是由计时前的那个由负向正值增长的零点(图 2-2 的  $a$  点)到  $t=0$

的计时起点之间对应的最小角度, 初相位用来确定正弦量的初始值( $t=0$ 时的值)。当初相位 $\psi$ 为零时, 则 $i=I_m \sin \omega t$ , 其波形如图 2-1 所示, 它的初始值为零。当初相位 $\psi$ 不为零时, 其波形如图 2-2 所示, 初始值 $i_0=I_m \sin \psi$ , 不等于零。可见, 初相位不同, 其初始值也不同, 到达幅值或某一特定值所需的时间也就不同。

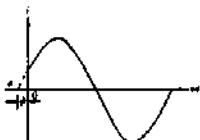


图 2-2 初相位不等于零的正弦波形

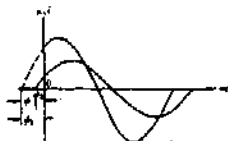


图 2-3  $u$  和  $i$  的初相位不相等

在波形图中, 若  $t=0$  时刻的瞬时值为正值, 则初相角为正值; 若  $t=0$  时刻的瞬时值为负值, 则其初相角为负值。

在正弦交流电路中, 电压  $u$  和电流  $i$  的频率是相同的, 且初相位不一定相同。在图 2-3 中,  $u$  和  $i$  波形用三角函数可表示为

$$\left. \begin{aligned} u &= U_m \sin(\omega t + \psi_1) \\ i &= I_m \sin(\omega t + \psi_2) \end{aligned} \right\} \quad (2-7)$$

它们的初相位分别为  $\psi_1$  和  $\psi_2$ , 即这两个正弦量的相位不同。两个同频率的正弦量的相位之差, 称为相位差。上述正弦电压和电流之间的相位差为

$$\varphi = (\omega t + \psi_1) - (\omega t + \psi_2) = \psi_1 - \psi_2 \quad (2-8)$$

上式表明, 两个同频率正弦量的相位差等于它们的初相角之差。

当  $\varphi=0$  时, 说明  $u$  与  $i$  同相位。

当  $\varphi>0$  时, 说明  $u$  超前  $i$  一个  $\varphi$  角。

当  $\varphi<0$  时, 说明  $u$  滞后  $i$  一个  $\varphi$  角。

当  $\varphi=180^\circ$  时, 说明  $u$  与  $i$  相位相反。

例 2-1 有一正弦交流电压, 当  $t=0$  时, 其瞬时值  $u_0=269\text{V}$ , 已知其初相角  $\psi=60^\circ$ , 试求该正弦电压的幅值和有效值。

解 根据题意, 该电压瞬时值方程式为

$$u = U_m \sin(\omega t + 60^\circ)$$

$$\text{当 } t=0 \text{ 时, } u_0 = U_m \sin 60^\circ = 269\text{V}$$

$$\text{电压幅值 } U_m = \frac{269}{\sin 60^\circ} = 311\text{V}$$

$$\text{有效值 } U = \frac{U_m}{\sqrt{2}} = \frac{311}{\sqrt{2}} = 220\text{V}$$

## 2-2 正弦量的相量表示法

正弦量除了用波形和三角函数式表示外,还可以用有向旋转线段表示以及用复数表示的相量法。

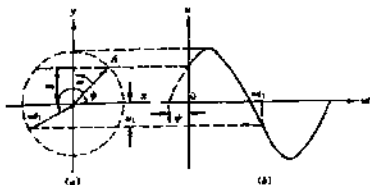


图 2-4 有向旋转线段表示正弦量

设正弦量  $i = I_m \sin(\omega t + \varphi)$ , 其波形如图 2-4(b) 所示。从直角坐标系的原点画一有向线段  $A$ , 使其长度等于正弦量的幅值  $I_m$ , 在  $t=0$  时与横轴间的夹角等于正弦量的初相位  $\varphi$ , 它绕坐标原点  $O$  沿逆时针方向旋转的角速度等于正弦量的角频率  $\omega$ , 这说明了正弦量的三要素可以用有向旋转线段完整地表达。有向线段任意时刻在纵轴上的投影就等于正弦量在该时刻的瞬时值, 如图 2-4(a) 所示。

正弦量可用有向旋转线段表示, 而有向线段可用复数表示。为此先对复数进行扼要的复习。

令一直角坐标系的横轴表示复数的实部, 称为实轴, 以  $+1$  为单位; 纵轴表示虚部, 称为虚轴, 以  $+j$  为单位。实轴与虚轴构成的平面称为复平面。复平面中有一有向线段  $A$ , 其实部为  $a$ , 虚部为  $b$ , 长度为  $r$ , 与实轴的夹角为  $\psi$ , 如图 2-5 所示。于是有向线段  $A$  可用下面的复数式表示:

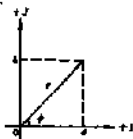


图 2-5 复数表示有向线段

代数式:

$$A = a + jb \quad (2.9)$$

由图 2-5 可见,  $a = r \cos \psi$ , 称为复数的实部;  $b = r \sin \psi$ , 称为复数的虚部;  $r = \sqrt{a^2 + b^2}$ , 称为复数的模;  $\psi = \arctg \frac{b}{a}$ , 称为复数的辐角。

三角式:

$$A = a + jb = r \cos \psi + jr \sin \psi = r(\cos \psi + j \sin \psi) \quad (2.10)$$

指数式:

利用欧拉公式

$$\begin{aligned} A &= r(\cos \psi + j \sin \psi) = r \left( \frac{e^{j\psi} + e^{-j\psi}}{2} + j \frac{e^{j\psi} - e^{-j\psi}}{2j} \right) \\ &= re^{j\psi} \end{aligned} \quad (2.11)$$



式中  $e$  是自然对数的底 ( $e \approx 2.718$ )。

极坐标式:

式(2-11)可写为

$$A = re^{j\psi} = r \angle \psi \quad (2-12)$$

因此,一个复数可用上述四种复数式来表示,它们之间可以互相转换。复数的四则运算法则列入表 2-1 中,以便参考。

表 2-1 复数四则运算的基本法则

运算方式	运 算 方 法
加	$A_1 + A_2 = (a_1 + jb_1) + (a_2 + jb_2) = (a_1 + a_2) + j(b_1 + b_2)$
减	$A_1 - A_2 = (a_1 + jb_1) - (a_2 + jb_2) = (a_1 - a_2) + j(b_1 - b_2)$
乘	$A_1 \cdot A_2 = r_1 \angle \psi_1 \cdot r_2 \angle \psi_2 = r_1 r_2 \angle \psi_1 + \psi_2$
除	$\frac{A_1}{A_2} = \frac{r_1 \angle \psi_1}{r_2 \angle \psi_2} = \frac{r_1}{r_2} \angle \psi_1 - \psi_2$

如上所述,复数可以表示有向线段,而有向旋转线段可以表示正弦量,因此复数也可以表示正弦量。用复数表示正弦量时,则复数的模等于正弦量的幅值或有效值,复数的辐角等于正弦量的初相位。把表示正弦量的复数称为相量,用大写字母上两打“·”表示。用幅值表示的相量称为幅值相量,用  $\dot{E}_m, \dot{U}_m, \dot{I}_m$  表示。用有效值表示的相量称为有效值相量,用  $\dot{E}, \dot{U}, \dot{I}$  表示。于是表示正弦量  $i = I_m \sin(\omega t + \psi)$  的幅值相量为

$$\dot{I}_m = I_m(\cos\psi + j\sin\psi) = I_m e^{j\psi} = I_m \angle \psi \quad (2-13)$$

有效值相量为

$$\dot{I} = I(\cos\psi + j\sin\psi) = I e^{j\psi} = I \angle \psi \quad (2-14)$$

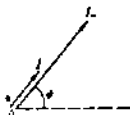


图 2-6 有效值相量与幅值相量



图 2-7 相量图

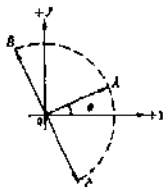


图 2-8  $A$  乘  $\pm j$

按照同频率的各正弦量的大小和相位关系画出的若干个相量的图形,称为相量图。如图 2-7 所示,电压  $\dot{U}$  比电流  $\dot{I}$  超前  $\psi$  角,画相量图时常以其中的一个相量作为参考相量,令其初相位为  $0^\circ$  (即画在横轴方向上),其余相量的位置按与此相量之间的相位差定出。

设有模为 1, 辐角  $\psi = \pm 90^\circ$  的相量  $A_1 = e^{\pm j90^\circ} = e^{\pm j\frac{\pi}{2}} = \cos 90^\circ \pm j \sin 90^\circ = \pm j$

如果把  $e^{+j\omega t}$  乘以另一相量  $A = r e^{j\psi}$ , 可得

$$A \cdot A_1 = r e^{j\omega t} \cdot e^{j\psi} = r e^{j(\omega t + \psi)} = r \angle \psi + 90^\circ = B$$

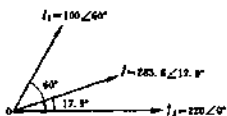


图 2-9 例题 2-2 的相量图

$$j' = 1; j^{-1} = \frac{1}{j} = -j$$

例 2-2 已知  $i_1 = 141 \sin(\omega t + 45^\circ)$ ,  $i_2 = 310 \sin(\omega t - 15^\circ)$ , 用相量法求  $i = i_1 + i_2$  的有效值及它们之间的相位差?

$$\begin{aligned} \text{解 } I_1 &= I_1 e^{j45^\circ} = \frac{141}{\sqrt{2}} (\cos 45^\circ + j \sin 45^\circ) \\ &= 70.7 + j70.7 = 100 \angle 45^\circ \text{ A} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} I_2 &= I_2 e^{-j15^\circ} = \frac{310}{\sqrt{2}} (\cos 15^\circ - j \sin 15^\circ) \\ &= 212.52 - j56.98 = 220 \angle -15^\circ \text{ A} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} I &= I_1 + I_2 = 70.7 + j70.7 + 212.52 - j56.98 \\ &= 283.22 + j13.72 \\ &= 283.6 \angle 2.7^\circ \text{ A} \end{aligned}$$

$$i = 283.6 \sqrt{2} \sin(\omega t + 2.7^\circ)$$

相量图如图 2-9 所示。

而把  $e^{-j\omega t}$  乘以相量  $A = r e^{j\psi}$ , 可得

$$A \cdot A_1 = r e^{j\psi} \cdot e^{-j\omega t} = r e^{j(\psi - \omega t)} = r \angle \psi - 90^\circ = C$$

可见, 任意一个相量乘上  $+j$  后, 该相量的模不变, 但向前旋转了  $90^\circ$ ; 乘上  $-j$  后, 即向后旋转了  $90^\circ$ , 如图 2-8 所示, 所以称  $j$  为旋转  $90^\circ$  的算子, 并可引出下列性质:

$$j = \sqrt{-1}; j^2 = -1; j^3 = -j$$

## 2-3 单一参数的交流电路

本节将讨论电阻、电感和电容三种电路模型在交流电路中电压与电流的关系, 能量的转换及功率等问题。

### 一、电阻元件的交流电路

#### 1. 电压和电流的关系

电路如图 2-10(a) 所示。设电阻中的电流为

$$i = I_m \sin \omega t \quad (2-15)$$

电阻两端电压为

$$\begin{aligned} u &= iR = I_m R \sin \omega t \\ &= U_m \sin \omega t \end{aligned} \quad (2-16)$$

由式(2-15)和(2-16)看出:

(1) 在相位上, 通过电阻的电流  $i$  和电阻两端电压  $u$  是同频率的正弦量, 而且两者同相位。

其波形图和相量图如图 2-10(b)和(c)所示。

(2)在数值上,由于  $U_m = I_m R$ ,得

用幅值表示为

$$I_m = \frac{U_m}{R}$$

用有效值表示为:

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

用有效值相量表示则为

$$I = I \angle 0^\circ, U = U \angle 0^\circ$$

$$\frac{U}{I} = \frac{U \angle 0^\circ}{I \angle 0^\circ} = R \quad (2-17)$$

或

$$U = IR$$

## 2. 功率关系

在任意瞬间,电压瞬时值与电流瞬时值的乘积,称为瞬时功率,用  $p$  表示,为

$$p = ui = U_m I_m \sin^2 \omega t$$

$$= \frac{U_m I_m}{2} (1 - \cos 2\omega t)$$

$$= UI (1 - \cos 2\omega t) \quad (2-18)$$

上式说明,  $p$  由固定分量  $UI$  和变化分量  $UI \cos 2\omega t$  组成。其变化规律由图 2-10(d)所示。由于在电阻元件交流电路中的  $u$  与  $i$  总是同相变化,所以瞬时功率总是正值,即  $p > 0$ 。这表明电阻元件在任何瞬间都是从电源吸取电能而转换为热能消耗了,这是一种不可逆的能量转换过程。

瞬时功率在一个周期内的平均值,称为平均功率,用  $P$  表示,即

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T p dt = \frac{1}{T} \int_0^T UI (1 - \cos 2\omega t) dt$$

$$= UI = I^2 R = \frac{U^2}{R} \quad (2-19)$$

从式(2-19)可知,在电阻元件的交流电路中消耗的平均功率等于电压与电流有效值的乘积。平均功率又称有功功率,简称功率,单位为瓦(W)或千瓦(kW)。平时说的某灯泡 60W,电炉 800W,均是指有功功率。

## 二、电感元件的交流电路

### 1. 电压和电流的关系

电路如图 2-11(a)所示,设通过电感线圈  $L$  中的电流为

$$i = I_m \sin \omega t \quad (2-20)$$

根据电磁感应原理,在线圈中产生感应电动势  $e_L$ ,于是在线圈两端出现电压  $u$ 。图中箭头所示分别为电流、电压和自感电动势的正方向。对图 2-11(a)电路列电压方程得

$$u = -e_L = L \frac{di}{dt} = L \frac{d(I_m \sin \omega t)}{dt}$$

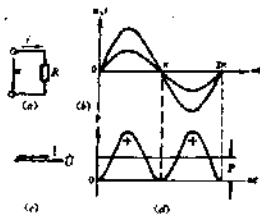


图 2-10 电阻元件的交流电路

$$\begin{aligned}
 &= \omega L I_m \cos \omega t = \omega L I_m \sin(\omega t + 90^\circ) \\
 &= U_m \sin(\omega t + 90^\circ)
 \end{aligned}
 \tag{2-21}$$

比较式(2-20)和(2-21)可见:

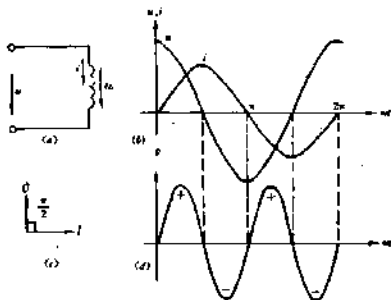


图 2-11 电感元件的交流电路

(1)在相位上,电压  $u$  和电流  $i$  是同频率的正弦量,电压  $u$  在相位上超前电流  $i$   $90^\circ$ ,其波形图和相量图如图 2-11(b)和(c)所示。电压超前电流  $90^\circ$ ,是由于电感上电压不与电流大小成正比,而是与电流变化率成正比的缘故。当电流  $i$  经过零值向正值增长的瞬间,电流变化率  $\frac{di}{dt}$  为最大,这时的感应电动势为负的最大值,而电压为正的最大值,当电流为最大值时,电流变化率  $\frac{di}{dt}=0$ ,这时  $u$  和  $e_L$  都为零。在正弦曲线中,出现最大值和零值的间隔正好为  $90^\circ$ ,所以电压超前电流  $90^\circ$  相位。

(2)在数值上,由于  $U_m = I_m \omega L$ ,令  $X_L = \omega L$ ,得:

$$\text{用幅值表示为 } I_m = \frac{U_m}{X_L}$$

$$\text{用有效值表示为 } I = \frac{U}{X_L}$$

可见,当电压一定时,  $X_L$  越大,则电流  $I$  愈小,  $X_L$  具有阻碍电流通过的性质,称为感性电抗,简称感抗,用  $X_L$  表示,其单位为欧姆( $\Omega$ )。即

$$X_L = \omega L = 2\pi fL \tag{2-22}$$

感抗  $X_L$  与频率  $f$  成正比,其关系曲线如图 2-12 所示。频率越高,电感线圈对高频电流的阻碍作用愈大,频率越低,阻碍作用越小。当  $f=0$  时,  $X_L=0$ ,电感线圈对直流可视为短路。

用有效值相量表示为

$$I = I \angle 0^\circ, U = U \angle 90^\circ$$

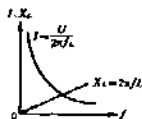


图 2-12 电感的频率特性

$$\frac{\dot{U}}{\dot{I}} = \frac{U/90^\circ}{I/0^\circ} = \frac{U}{I} / 90^\circ = jX_L \quad (2-23)$$

或

$$\dot{U} = jIX_L$$

## 2. 功率关系

电路的瞬时功率为

$$\begin{aligned} p &= ui = U_m \sin(\omega t + 90^\circ) I_m \sin \omega t \\ &= U_m I_m \sin \omega t \cos \omega t = \frac{1}{2} U_m I_m \sin 2\omega t \\ &= UI \sin 2\omega t \end{aligned} \quad (2-24)$$

由式(2-24)可见,电感电路中的瞬时功率是一个最大值为 $UI$ 、两倍于电流频率的正弦量,其波形如图2-11(d)所示。在第一个 $\frac{1}{4}$ 周期内,由于 $u$ 与 $i$ 方向相同, $p > 0$ ,它表示电感元件吸收电能并转换为磁场能储存在线圈内;在第二个 $\frac{1}{4}$ 周期内,由于 $u$ 与 $i$ 的方向相反, $p < 0$ ,它表示电感元件把前面 $\frac{1}{4}$ 周期吸收的磁场能转换为电能全部归还给电源。下面两个 $\frac{1}{4}$ 周期只是在反方向重复上述过程。

平均功率

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T p dt = \frac{1}{T} \int_0^T UI \sin 2\omega t dt = 0 \quad (2-25)$$

说明电感元件不消耗有功功率,故称电感是储能元件。

电感元件在储能放能的过程中,与电源之间不断地进行着能量的交换,为了衡量电感和电源之间这个不断往返互换能量的规模大小,取其瞬时功率的最大值即电感电压和电流有效值的乘积来表示,通常称为无功功率,用符号 $Q$ 表示,即

$$Q = UI = IX_L \quad (2-26)$$

无功功率的单位为乏(var)和千乏(kvar)。

例 2-3 设有一线圈的电感 $L=2\text{H}$ ,线圈电阻忽略,现把它接在电压 $U=220\text{V}$ ,频率 $f=50\text{Hz}$ 的交流电源上,求通过电感线圈的电流和无功功率?

解  $X_L = 2\pi fL = 2 \times 3.14 \times 50 \times 2 = 628 \Omega$

$$I = \frac{U}{X_L} = \frac{220}{628} = 0.35 \text{ A}$$

$$Q = UI = 220 \times 0.35 = 77 \text{ var}$$

## 三、电容元件的交流电路

### 1. 电压和电流的关系

图2-13(a)是电容元件的交流电路。若将电容接于交流电源两端,电容两极板上的电压极性不断地改变,两极板上的电量亦随时间作周期性的不断充电和放电,在电路中就引起电流

$$i = \frac{dq}{dt} = C \frac{du}{dt}$$

设加在电容器两端的电压为

$$u = U_m \sin \omega t \quad (2-27)$$

则电流为

$$\begin{aligned} i &= C \frac{du}{dt} = C \frac{d(U_m \sin \omega t)}{dt} = U_m \omega C \cos \omega t \\ &= U_m \omega C \sin(\omega t + 90^\circ) \\ &= I_m \sin(\omega t + 90^\circ) \end{aligned} \quad (2-28)$$

比较式(2-27)和(2-28)可见:

(1)在相位关系上,在电容元件的交流电路中,电压  $u$  与电流  $i$  是同频率的正弦量,且电流  $i$  超前电压  $u$   $90^\circ$  相位。其波形图及相量图如图 2-13(b)和(c)所示,电流超前电压  $90^\circ$ ,是因为电容电流正比于电容电压变化率的缘故。当电压为零的瞬间,电压变化率  $\frac{du}{dt}$  最大,所以充电电流在此瞬间达到最大;当电容电压达到最大值时,其电压变化率  $\frac{du}{dt} = 0$ ,所以电流等于零,使电流超前电压  $90^\circ$ 。

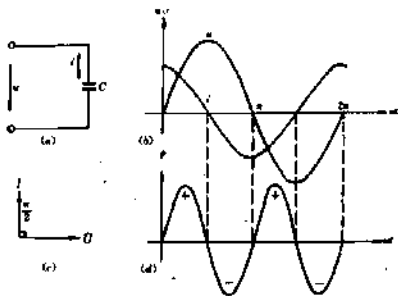


图 2-13 电容元件的交流电路

(2)在数值上,由式(2-28)得  $I_m = U_m \omega C$ 。

用幅值表示为

$$I_m = \frac{U_m}{\frac{1}{\omega C}}$$

如令  $X_C = \frac{1}{\omega C}$ , 则

$$I_m = \frac{U_m}{X_C}$$

用有效值表示为

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

当电压一定时,  $X_C$  越大, 则电路电流越小, 可见它具有阻碍电流通过的性质, 称为容性电阻, 简称容抗, 用  $X_C$  表示, 其单位是欧姆( $\Omega$ )。容抗是表征电容对交流电呈现阻力的一个参数, 即

$$X_C = \frac{1}{\omega C} = \frac{1}{2\pi fC} \quad (2-29)$$

在电容值一定时, 容抗  $X_C$  与频率  $f$  成反比, 其关系曲线如图(2-14)所示。即  $f$  越高,  $X_C$  越小, 当  $f \rightarrow \infty$  时,  $X_C \rightarrow 0$ , 这时电容相当于短路, 所以说高频电流容易通过电容器; 反之,  $f$  越低,  $X_C$  越大, 当  $f=0$  时, 即相当于在直流电压下,  $X_C \rightarrow \infty$ , 这时电容可视为开路, 故低频电流不容易通过电容, 直流电不能通过电容, 这就是电容有隔直(流)通交(流)作用的原因。

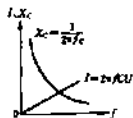


图 2-14 电容的频率特性

用有效值相量表示为:

$$\dot{U} = U \angle 0^\circ, \dot{I} = I \angle 90^\circ$$

$$\frac{\dot{U}}{\dot{I}} = \frac{U \angle 0^\circ}{I \angle 90^\circ} = \frac{U}{I} \angle -90^\circ = -jX_C \quad (2-30)$$

## 2. 功率关系

电路的瞬时功率:

$$\begin{aligned} p &= ui = U_m I_m \sin \omega t \sin(\omega t + 90^\circ) \\ &= U_m I_m \sin \omega t \cos \omega t = \frac{1}{2} U_m I_m \sin 2\omega t \\ &= UI \sin 2\omega t \end{aligned} \quad (2-31)$$

瞬时功率的波形如图 2-13(d) 所示, 在一个周期内, 是一个最大值为  $UI$  以电压的二倍角频率正负交替变化两次的正弦量, 分别表示着充电、放电然后又反向充电放电。例如在第一个  $\frac{1}{4}$  周期内,  $u$  与  $i$  的方向相同, 向电容器充电, 电容把吸收的电能转换成电场能储存起来, 故  $p$  为正。在第二个  $\frac{1}{4}$  周期内,  $u$  与  $i$  的方向相反, 电容器放电, 电容又把前面  $\frac{1}{4}$  周期储存的电场能转换为电能返还给电源, 故  $p$  为负。下面两个  $\frac{1}{4}$  周期, 只是在反方向上重复上述过程。

平均功率

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T p dt = \frac{1}{T} \int_0^T UI \sin 2\omega t dt = 0 \quad (2-32)$$

表示电容器不消耗有功功率, 所以电容不是耗能元件, 而是储能元件。

电容器在充电放电的过程中与电源之间不断地进行着能量交换, 为衡量这个能量交换规模的大小, 通常用瞬时功率的最大值即电容电压和电流有效值的乘积来表示, 因为这个功率只是交换而不被消耗, 故称作无功功率, 用字母  $Q$  表示, 即

$$Q = UI = I^2 X_C \quad (2-33)$$

它的单位为乏(var)和千乏(kvar)。

例 2-4 在电压  $U=220V$ 、频率  $f=50Hz$  的交流电源上, 接入  $C=2.5\mu F$  的电容器, 求容抗  $X_C$ 、电流  $I$  及无功功率  $Q$ 。

$$\text{解 } X_C = \frac{1}{2\pi fC} = \frac{10^4}{2 \times 3.14 \times 50 \times 2.5} = 1274 \Omega$$

$$I = \frac{U}{X_c} = \frac{220}{1274} = 0.17 \text{ A}$$

$$Q = UI = 220 \times 0.17 = 37.4 \text{ var}$$

## 2-4 电阻、电感、电容串联交流电路

### 一、电压与电流的关系

图 2-15(a) 是电阻、电感和电容元件串联的交流电路。电路中各元件通过同一电流，电流与各个电压的正方向如图所标。

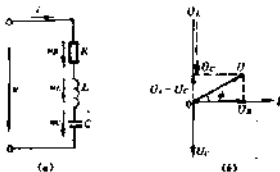


图 2-15 RLC 串联的交流电路

设电流为  $i = I_m \sin \omega t$

由克希荷夫电压定律可列出相量形式的电压方程为

$$U = U_R + U_L + U_C = I R + j I X_L - j I X_C$$

$$= I (R + j(X_L - X_C))$$

$$\frac{U}{I} = R + j(X_L - X_C) \quad (2-34)$$

式中的  $(R + j(X_L - X_C))$  对电流具有阻碍作用的性质，称为电路的复数阻抗，用大写字母  $Z$  表示。

$$Z = R + j(X_L - X_C)$$

$$= \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2} \angle \arctan \frac{X_L - X_C}{R} = \sqrt{R^2 + X^2} \angle \arctan \frac{X}{R}$$

$$= |z| \angle \varphi \quad (2-35)$$

式中  $|z| = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2}$  称为复数阻抗的模，用小写字母  $|z|$  表示； $X = X_L - X_C$ ，称为电抗； $\varphi = \arctan \frac{X_L - X_C}{R}$  称为复数阻抗的辐角或阻抗角。复数阻抗不仅反映了电路中电压与电流的大小，还反映了相位关系。复数阻抗的模就是电路的阻抗，辐角就是电压与电流间的相位差。

复数阻抗虽然是复数，但它不是随时间变化的正弦量，因此不是相量。为了与相量区别，在复数阻抗  $Z$  上不加“·”，画图时不加箭头，只用大写字母  $Z$  表示。



由  $\dot{U}_R$ 、 $(\dot{U}_L - \dot{U}_C)$  和  $\dot{U}$  三个相量组成的三角形称为电压三角形。由  $|Z|$ 、 $R$ 、 $(X_L - X_C)$  组成的三角形称为阻抗三角形,如图 2-16 所示。

根据电压三角形或阻抗三角形,可得总电压与电流之间的相位差角

$$\begin{aligned}\varphi &= \arctg \frac{U_L - U_C}{U_R} \\ &= \arctg \frac{X_L - X_C}{R}\end{aligned}\quad (2-36)$$

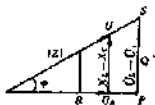


图 2-16 电压、阻抗和功率三角形

阻抗角  $\varphi$  也即总电压与电流的相位差。由于  $\varphi$  角的大小和正负完全由负载的参数来决定,故电路呈现以下三种不同的特征:

- (1) 当  $X_L > X_C$  时,则  $U_L > U_C$ ,  $\varphi > 0$ , 电压超前电流  $\varphi$  角,整个电路呈感性;
- (2) 当  $X_L < X_C$  时,则  $U_L < U_C$ ,  $\varphi < 0$ , 电压滞后电流  $\varphi$  角,整个电路呈容性;
- (3) 当  $X_L = X_C$  时,则  $U_L = U_C$ ,  $\varphi = 0$ , 电压与电流同相位,整个电路呈电阻性。

## 二、功率关系

在电阻、电感、电容串联的交流电路中,设电流  $i = I_m \sin \omega t$ , 电压  $u$  超前电流  $i$   $\varphi$  角。

### 1. 瞬时功率

$$\begin{aligned}p &= ui = U_m I_m \sin \omega t \sin(\omega t + \varphi) \\ &= \frac{1}{2} U_m I_m (\cos \varphi - \cos(2\omega t + \varphi)) \\ &= UI \cos \varphi - UI \cos(2\omega t + \varphi)\end{aligned}\quad (2-37)$$

在电阻、电感、电容串联交流电路中的电压、电流和功率的波形如图 2-17 所示。可以看出,瞬时功率有正有负,正功率表示负载从电源吸收能量,负功率表示负载还给电源能量。显然,正负功率曲线所包含的面积是不等的,

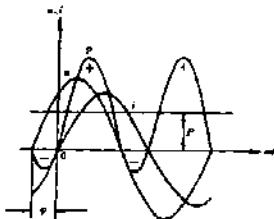


图 2-17 功率波形

所以电路的有功功率不为零,其差值便是负载在一个周期内消耗的电能。

### 2. 平均功率

$$\begin{aligned}P &= \frac{1}{T} \int_0^T p dt = \frac{1}{T} \int_0^T UI \cos \varphi dt - \frac{1}{T} \int_0^T UI \cos(2\omega t + \varphi) dt \\ &= UI \cos \varphi\end{aligned}\quad (2-38)$$

上式说明,有功功率的大小不仅与电压和电流有效值的乘积有关,还与电压、电流间相位差角(阻抗角)的余弦  $\cos \varphi$  成正比,称  $\cos \varphi$  为功率因数,称阻抗角  $\varphi$  为功率因数角。

### 3. 无功功率

电感和电容两端电压  $U_L$  和  $U_C$  是反相的,所以感性无功功率  $Q_L$  和容性无功功率  $Q_C$  的作用是相反的。当电感上的瞬时功率为正值时,电容上的瞬时功率恰为负值,即当电感需要能量建立磁场时,电容正好放出电场能量,使电源与负载之间传输的无功功率为电感无功功率和电容无功功率之差,即

$$Q = Q_L - Q_C = U_L I - U_C I = I(U_L - U_C)$$

由电压三角形可得

$$U_L - U_C = U \sin \varphi$$

则

$$Q = UI \sin \varphi \quad (2-39)$$

#### 4. 视在功率

在交流电路中,把电压和电流有效值的乘积,称为视在功率,用大写字母  $S$  表示,即

$$S = UI \quad (2-40)$$

单位是伏安(VA)或千伏安(kVA)。

一般交流电源设备,如交流发电机、变压器等都是按照安全运行规定的额定电压  $U_N$  和额定电流  $I_N$  来设计和使用的,把额定电压和额定电流的乘积称为额定视在功率,即

$$S_N = U_N I_N$$

用它来表明电源设备可能提供的最大有功功率,该功率称作额定容量,简称容量。电源设备铭牌上的功率,统一规定用额定视在功率标定。

视在功率  $S$  与有功功率  $P$ 、无功功率  $Q$  之间的关系是

$$P = UI \cos \varphi = S \cos \varphi$$

$$Q = UI \sin \varphi = S \sin \varphi$$

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2} \quad (2-41)$$

由平均功率  $P$ 、无功功率  $Q$  和视在功率  $S$  所组成的直角三角形,称为功率三角形,如图 2-16 所示。

例 2-5 有一电感线圈的  $L=200\text{mH}$ ,电阻  $R=10\Omega$ ,与一个  $C=70\mu\text{F}$  的电容器串联,接在电压为  $220\text{V}$ 、频率为  $50\text{Hz}$  的交流电源上,求电路的阻抗、电流及电路的有功功率、无功功率及视在功率。

解 (1) 电路的阻抗

$$\text{感抗 } X_L = 2\pi fL = 2 \times 3.14 \times 50 \times 200 \times 10^{-3} = 62.8 \Omega$$

$$\text{容抗 } X_C = \frac{1}{2\pi fC} = \frac{1}{2 \times 3.14 \times 50 \times 70 \times 10^{-6}} = 45.5 \Omega$$

$$\begin{aligned} \text{电路的阻抗 } |z| &= \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2} \\ &= \sqrt{10^2 + (62.8 - 45.5)^2} = 20 \Omega \end{aligned}$$

$$(2) \text{ 电流 } I = \frac{U}{|z|} = \frac{220}{20} = 11 \text{ A}$$

$$\begin{aligned} (3) \text{ 有功功率 } P &= UI \cos \varphi = UI \frac{R}{|z|} \\ &= 220 \times 11 \times \frac{10}{20} = 1210 \text{ W} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} (4) \text{ 无功功率 } Q &= UI \sin \varphi = UI \frac{X_L - X_C}{|z|} \\ &= 220 \times 11 \times \frac{62.8 - 45.5}{20} = 2093 \text{ var} \end{aligned}$$

$$(5) \text{ 视在功率 } S = UI = 220 \times 11 = 2420 \text{ VA}$$

例 2-6 有一日光灯,灯管等效电阻  $R=300\Omega$ ,镇流器电感  $L$

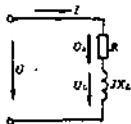


图 2-18 例 2-6 的图

=1.65H, 接在电压  $U=220\text{V}$ , 频率  $f=50\text{Hz}$  的交流电源上。求灯管电流、灯管两端电压、镇流器两端电压、日光灯消耗的功率、视在功率、无功功率。

解 日光灯电路等效为  $R$  和  $L$  的串联电路, 如图 2-18 所示。

设电流  $I=I \angle 0^\circ \text{A}$

$$X_L = 2\pi fL = 2 \times 3.14 \times 50 \times 1.65 \\ = 518 \Omega$$

$$Z = R + jX_L = 300 + j518 = 598.6 \angle 60^\circ \Omega$$

$$\dot{U} = IZ = I \angle 0^\circ \times 598.6 \angle 60^\circ = 598.6I \angle 60^\circ \text{V}$$

$$U = 598.6I = 220 \text{V}$$

$$I = \frac{U}{|Z|} = \frac{220}{598.6} = 0.37 \text{A}$$

$$I = I \angle 0^\circ = 0.37 \angle 0^\circ \text{A}, \varphi = 60^\circ$$

$$\dot{U}_R = IR = 0.37 \angle 0^\circ \times 300 = 111 \text{V}$$

$$\dot{U}_L = jIX_L = j0.37 \angle 0^\circ \times 518 = 192 \angle 90^\circ \text{V}$$

$$P = UI \cos \varphi = 220 \times 0.37 \times \cos 60^\circ = 40.7 \text{W}$$

$$S = UI = 220 \times 0.37 = 81.4 \text{VA}$$

$$Q_L = UI \sin \varphi = 220 \times 0.37 \times \sin 60^\circ = 70.5 \text{var}$$

## 2-5 并联交流电路

在单相低压供电线路上, 负载的额定电压相同, 都是并联使用。现以图 2-19 所示电路为例来说明并联交流电路的计算方法。

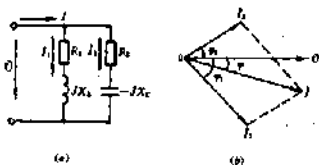


图 2-19 并联交流电路

(a) 电路 (b) 相量图

电路中的电压和电流都用相量标出, 各支路的阻抗也可以用复数标出, 如图 2-19(a) 所示。由于两个支路加的是同一电压, 故选电压为参考相量, 令其  $U=U \angle 0^\circ$ 。

对于并联交流电路的计算, 可首先计算出  $I_1$  和  $I_2$ , 然后求出总电流  $I$ , 则可按以下步骤进行:

计算第一支路的电流:

$$Z_1 = R_1 + jX_L = \sqrt{R_1^2 + X_L^2} \angle \arctan \frac{X_L}{R_1} = |z_1| \angle \varphi_1$$

$$I_1 = \frac{U}{Z_1} = \frac{U \angle 0^\circ}{|z_1| \angle \varphi_1} = I_1 \angle -\varphi_1$$

计算第二支路的电流:

$$Z_2 = R_2 - jX_C = \sqrt{R_2^2 + X_C^2} \angle \arctan \frac{-X_C}{R_2} = |z_2| \angle -\varphi_2$$

$$I_2 = \frac{U}{Z_2} = \frac{U \angle 0^\circ}{|z_2| \angle -\varphi_2} = I_2 \angle \varphi_2$$

总电流  $I = I_1 + I_2$

相量图如图 2-19(b) 所示,  $I_1$  是感性电流, 应滞后  $U$   $\varphi_1$  角,  $I_2$  是容性电流, 应超前  $U$   $\varphi_2$  角。总电流的相位由  $I_1$  和  $I_2$  的相量所决定, 图 2-19(b) 所示的总电流  $I$  滞后于  $U$   $\varphi$  角, 是感性的。如果先求出总电流  $I$ , 则

$$\begin{aligned} i &= i_1 + i_2 = \frac{U}{Z_1} + \frac{U}{Z_2} \\ &= U \left( \frac{1}{Z_1} + \frac{1}{Z_2} \right) = \frac{U}{Z} \end{aligned}$$

式中  $Z = \frac{Z_1 Z_2}{Z_1 + Z_2}$  为并联交流电路的等效复阻抗。总电流求出后, 可按分流公式计算任一支路电流

$$\left. \begin{aligned} i_1 &= \frac{Z_2}{Z_1 + Z_2} i \\ i_2 &= \frac{Z_1}{Z_1 + Z_2} i \end{aligned} \right\} \quad (2-42)$$

并联交流电路功率的计算

$$P_1 = UI_1 \cos \varphi_1 = I_1^2 R_1 \quad Q_1 = UI_1 \sin \varphi_1 = I_1^2 X_L = Q_L$$

$$P_2 = UI_2 \cos \varphi_2 = I_2^2 R_2 \quad Q_2 = UI_2 \sin \varphi_2 = -I_2^2 X_C = -Q_C$$

$$P = UI \cos \varphi = P_1 + P_2$$

$$Q = UI \sin \varphi = Q_1 + Q_2 = Q_L - Q_C$$

例 2-7 在图 2-19 所示的电路中, 已知  $R_1 = 2\Omega$ ,  $R_2 = 3\Omega$ ,  $X_L = 4\Omega$ ,  $X_C = 5\Omega$ , 电源电压  $U = 220V$ , 求各支路电流、功率、总电流和总功率?

解 (1) 求各支路电流和功率

设以电源电压为参考相量,  $\dot{U} = 220 \angle 0^\circ V$

$$Z_1 = R_1 + jX_L = 2 + j4 = 4.5 \angle 63.4^\circ \Omega$$

$$I_1 = \frac{U}{Z_1} = \frac{220 \angle 0^\circ}{4.5 \angle 63.4^\circ} = 49 \angle -63.4^\circ A$$

$$P_1 = UI_1 \cos \varphi_1 = 220 \times 49 \cos 63.4^\circ = 4851 W$$

$$Q_1 = UI_1 \sin \varphi_1 = 220 \times 49 \sin 63.4^\circ = 9594 \text{ var}$$

$$S_1 = \sqrt{P_1^2 + Q_1^2} = \sqrt{4851^2 + 9594^2} = 10750 VA$$

$$Z_2 = R_2 - jX_C = 3 - j5 = 5.8 \angle -59.3^\circ \Omega$$

$$I_1 = \frac{U}{Z_1} = \frac{220 \angle 0^\circ}{5.8 \angle -59.3^\circ} = 38 \angle 59.3^\circ \text{ A}$$

$$P_1 = UI_1 \cos \varphi_1 = 220 \times 38 \cos 59.3^\circ = 4264 \text{ W}$$

$$Q_1 = UI_1 \sin \varphi_1 = 220 \times 38 \sin 59.3^\circ = 7190 \text{ var}$$

$$S_1 = \sqrt{P_1^2 + Q_1^2} = \sqrt{4264^2 + 7190^2} = 8359 \text{ VA}$$

(2) 求总电流和总功率

$$I = I_1 + I_2 = 49 \angle -63.4^\circ + 38 \angle 59.3^\circ = 41.3 - j11.1$$

$$= 42.8 \angle -15^\circ \text{ A}$$

$$P = UI \cos \varphi = 220 \times 42.8 \cos 15^\circ = 9134 \text{ W}$$

$$Q = UI \sin \varphi = 220 \times 42.8 \sin 15^\circ = 2448 \text{ var}$$

$$S = UI = 220 \times 42.8 = 9416 \text{ VA}$$

## 2-6 功率因数的提高

在电力系统中,存在着大量的电感性负载,例如生产上大量使用的异步电动机、变压器等,可以等效地看成是由电阻和电感组成的感性负载,它们除消耗有功功率外,还从电源取用大量的无功功率。由式

$$\cos \varphi = \frac{P}{S} = \frac{P}{\sqrt{P^2 + Q^2}}$$

可知,无功功率  $Q$  值越大,功率因数  $\cos \varphi$  就越低。低功率因数对电源和线路会带来以下问题:

(1) 电源设备的利用率降低,一般电源设备其额定容量为

$$S_N = U_N I_N$$

根据

$$P = U_N I_N \cos \varphi = S_N \cos \varphi$$

可知,电源发出的有功功率正比于功率因数。例如容量为 100kVA 的变压器,当电力用户的功率因数  $\cos \varphi = 0.9$  时,能输出 90kVA 的有功功率;而当  $\cos \varphi = 0.5$  时,仅能输出 50kVA 的有功功率。可见,同一台变压器供电给不同功率因数的负载,输出的有功功率是不同的,这就是说供电设备的利用率降低了。

(2) 增加线路压降和功率损耗。用电设备在一定的功率和电压下运行时,由

$$I = \frac{P}{U \cos \varphi}$$

可知,  $\cos \varphi$  越低,则所需的电流越大。电流越大,在供电线路的阻抗上引起的电压降  $I|Z|$  和功率损耗  $I^2 R$  ( $R$  为供电线路导线的电阻) 将增加。功耗的增加,浪费了电能;电压降的增加,影响了供电质量。

因此,为了充分利用发电设备的容量,提高供电质量和节约电能,必须设法提高功率因数。

供电线路功率因数低的根本原因是由于实际中的大部分负载是感性负载,通常采用补偿电容器与感性负载并联的方法来提高功率因数,用它取用的容性无功功率去补偿原有负载取用的感性无功功率,使总无功功率减小。一般电感性负载可用图 2-20(a) 中的  $RL$  串联支路表

示,未并联电容 $C$ 时,感性负载从电源吸取的电流 $I_1$ 滞后电压 $U$ 一个 $\varphi_1$ 角,如图2-20(b)所示。并联电容 $C$ 后,原电感性负载中的电流 $I_1 = \frac{U}{|Z|} = \frac{U}{\sqrt{R^2 + X_L^2}}$ 及功率因数 $\cos\varphi_1 = \frac{R}{|Z|} = \frac{R}{\sqrt{R^2 + X_L^2}}$ 维持不变,因为所加电压和负载参数没有改变,但电容 $C$ 从电源吸收容性电流 $I_2$ 超前电压 $U$ 90°,因此电路的总电流 $I = I_1 + I_2$ 减小了,即电容的容性无功电流补偿了一部分感性无功电流,而且 $I$ 与 $U$ 之间的相位差由 $\varphi_1$ 变为 $\varphi$ ,由图可见, $\varphi < \varphi_1$ ,即 $\cos\varphi > \cos\varphi_1$ ,电路的功率因数提高了。

并联补偿电容并不是改变负载本身的功率因数,而是改变电路总电压和总电流之间的相位差,来提高供电线路的功率因数。此外,由于电容器不消耗有功功率,所以并联电容以后电源供给的有功功率并未改变,即 $P = UI_1\cos\varphi_1 = UI\cos\varphi$ 。

在图2-20电路中,已知电感性负载的功率 $P$ 和功率因数 $\cos\varphi_1$ ,现要把电路的功率因数从原来的数值提高到预定的数值 $\cos\varphi$ ,并联补偿电容器的数值可按下述方法计算:

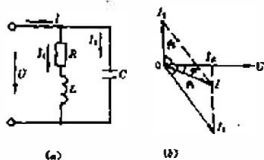


图 2-20 功率因数的提高  
(a) 电路图 (b) 相量图

$$\begin{aligned} I_2 &= I_1 \sin\varphi_1 - I \sin\varphi \\ &= \frac{P}{U \cos\varphi_1} \sin\varphi_1 - \frac{P}{U \cos\varphi} \sin\varphi \\ &= \frac{P}{U} (\operatorname{tg}\varphi_1 - \operatorname{tg}\varphi) \end{aligned}$$

又因

$$\begin{aligned} I_2 &= \frac{U}{X_C} = U\omega C \\ U\omega C &= \frac{P}{U} (\operatorname{tg}\varphi_1 - \operatorname{tg}\varphi) \end{aligned}$$

因此得

$$C = \frac{P}{\omega U^2} (\operatorname{tg}\varphi_1 - \operatorname{tg}\varphi) \quad (2-43)$$

例 2-8 照明日光灯电路可用图 2-20 的  $RL$  串联电路表示,已知功率  $P=40\text{W}$ ,电源电压  $U=220\text{V}$ ,电源频率  $f=50\text{Hz}$ ,灯管电压  $U_R=110\text{V}$ 。求:

- (1) 电路的功率因数及线路电流。
- (2) 如果将功率因数提高到  $\cos\varphi=0.9$ ,求并联的电容值及并联后的线路电流。

解 (1) 功率因数及线路电流分别为

$$\begin{aligned} I &= \frac{P}{U_R} = \frac{40}{110} = 0.36 \text{ A} \\ \cos\varphi &= \frac{P}{S} = \frac{P}{UI} = \frac{40}{220 \times 0.36} = 0.5 \end{aligned}$$

(2)  $\cos\varphi=0.5$  时,  $\varphi=60^\circ$ ,  $\operatorname{tg}\varphi=\operatorname{tg}60^\circ=1.73$

$$\cos\varphi=0.9 \text{ 时, } \varphi=25.8^\circ, \operatorname{tg}\varphi=\operatorname{tg}25.8^\circ=0.48$$

根据式(2-43), 补偿电容值为

$$\begin{aligned} C &= \frac{P}{\omega U^2}(\operatorname{tg}\varphi_A - \operatorname{tg}\varphi) \\ &= \frac{40}{2 \times 3.14 \times 50 \times 220^2}(1.73 - 0.48) \\ &= 3.29 \mu\text{F} \end{aligned}$$

此时, 线路电流

$$I = \frac{P}{U \cos\varphi} = \frac{40}{220 \times 0.9} = 0.2 \text{ A}$$

可见, 并联电容后, 电路电流大大减小。

## 2-7 三相交流电压

对称三相交流电压是由三相发电机产生的。在其定子槽中放置了三个同样的绕组 AX、BY 和 CZ, 三个绕组的首端分别为 A、B、C, 相位上彼此相差  $120^\circ$ , 它们的尾端分别为 X、Y、Z, 彼此也相差  $120^\circ$ 。当固定在转子上的磁极匀速旋转时, 便得到幅值相等、频率相同、相位上彼此相差  $120^\circ$  的正弦交流电压, 称为对称三相电压源。每一个绕组称为一相, 依次称为 A 相、B 相、C 相。

对称三相电压的瞬时值表达式为

$$\left. \begin{aligned} U_A &= U_m \sin \omega t \\ U_B &= U_m \sin(\omega t - 120^\circ) \\ U_C &= U_m \sin(\omega t + 120^\circ) \end{aligned} \right\} \quad (2-44)$$

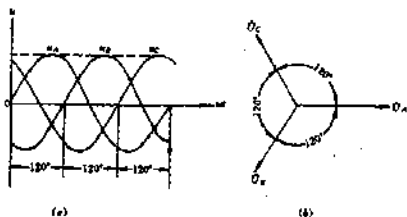


图 2-21 对称三相电压  
(a) 波形图 (b) 相量图

用相量式表示为

$$\left. \begin{aligned} U_A &= U \angle 0^\circ \\ U_B &= U \angle -120^\circ \\ U_C &= U \angle 120^\circ \end{aligned} \right\} \quad (2-45)$$

式(2-44)和(2-45)对应的波形图及相量图如图 2-21 所示。

三相交流电压出现最大值(或零值)的先后顺序称为三相电源的相序。上述三相电压的相序是 A→B→C。

可以证明,对称三相电压的瞬时值之和或相量之和等于零,即

$$\left. \begin{aligned} U_A + U_B + U_C &= 0 \\ \dot{U}_A + \dot{U}_B + \dot{U}_C &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (2-46)$$

把发电机三个绕组的尾端 X、Y、Z 联接在一起,首端 A、B、C 对外引出三根导线,就是三相电源的星形(Y)联接,如图 2-22 所示。

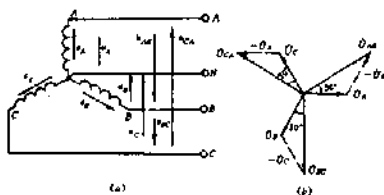


图 2-22 三相电源的星形联接

(a)发电机的星形联接 (b)相电压和线电压的相量图

图 2-22(a)中 X、Y、Z 的联接点称为中点,用 N 表示。从中点引出的导线称为中线,用黑色或白色标示。由首端 A、B、C 引出的三根导线,称为相线或端线,俗称火线,在配电母线上分别用黄、绿、红三色标示,火线和中线之间的电压  $U_A, U_B, U_C$  称为相电压,两根火线之间的电压  $\dot{U}_{AB}, \dot{U}_{BC}, \dot{U}_{CA}$  称为线电压,各相电压和线电压的正方向如图 2-22(a)所示。线电压与相电压之间有下列关系:

$$\begin{aligned} U_{AB} &= U_A - U_B \\ U_{BC} &= U_B - U_C \\ U_{CA} &= U_C - U_A \end{aligned}$$

由于三相电压对称,并设 A 相电压为参考相量,即  $\dot{U}_A = U_A \angle 0^\circ$ , 则有

$$\begin{aligned} \dot{U}_{AB} &= \dot{U}_A - \dot{U}_B \\ &= \dot{U}_A \angle 0^\circ - \dot{U}_A \angle -120^\circ \\ &= \dot{U}_A \left( \frac{3}{2} + j \frac{\sqrt{3}}{2} \right) \\ &= \sqrt{3} \dot{U}_A \angle 30^\circ = \sqrt{3} U_A \angle 30^\circ \end{aligned}$$

同理



$$\dot{U}_B = \sqrt{3} \dot{U}_A / 30^\circ = \sqrt{3} \dot{U}_A / -90^\circ$$

$$\dot{U}_C = \sqrt{3} \dot{U}_A / 30^\circ = \sqrt{3} \dot{U}_A / 150^\circ$$

通常用  $U_P$  和  $U_L$  分别表示相电压有效值和线电压有效值, 则

$$U_L = \sqrt{3} U_P / 30^\circ$$

$$U_L = \sqrt{3} U_P$$

由上式可知, 对称三相电源星形联接时, 其线电压也是对称的, 线电压有效值等于  $\sqrt{3}$  倍相电压有效值, 在相位上线电压较对应的相电压超前  $30^\circ$ 。

在图 2-22 中, 这种具有中线的三相供电方式称为三相四线制, 它能够为用户提供两种不同的电压, 即相电压  $U_P = 220\text{V}$  和线电压  $U_L = \sqrt{3} \times 220 = 380\text{V}$ 。如果不引出中线, 即由三根相线向负载供电时, 则称为三相三线制, 它只有线电压一种电压。

## 2-8 对称三相负载的星形联接

在三相供电系统中, 三相负载分为星形和三角形两种联接方式。

图 2-23 所示的电路为三相负载星形(Y)联接的三相四线制电路。中线联接电源和负载的两个中点  $N$  和  $N'$ , 每相负载的复数阻抗为  $Z_A, Z_B, Z_C$ , 电压和电流的正方向如图所示。

在三相电路中, 流过每相负载的电流称为相电流, 流过火线的电流称为线电流。由图 2-23 可知, 在负载星形联接的电路中, 各负载的相电流等于相应的线电流, 即  $I_P = I_L$ 。加在各相负载上的电压就等于电源的各相电压。因此加于负载的线电压与相电压的关系仍为  $U_L = \sqrt{3} U_P$ 。

如果三相负载复数阻抗相等, 即  $Z_A = Z_B = Z_C = Z = R + jX = |Z| \angle \varphi$ , 则称为对称三相负载。

对中线  $N'$  有

$$\dot{I}_A + \dot{I}_B + \dot{I}_C = 0$$

中线电流

$$\dot{I}_N = \dot{I}_A + \dot{I}_B + \dot{I}_C = 0$$

三相负载对称时, 中线电流等于零, 中线既无电流, 便可省去中线, 这样就构成了三相三线制电路, 如图 2-24 所示。设中点之间的电压为  $\dot{U}_{N'N}$ , 则各相负载中的相电流分别为

$$\dot{I}_A = \frac{\dot{U}_A}{Z_A} = \frac{\dot{U}_A - \dot{U}_{N'N}}{Z_A}$$

$$\dot{I}_B = \frac{\dot{U}_B}{Z_B} = \frac{\dot{U}_B - \dot{U}_{N'N}}{Z_B}$$

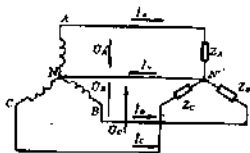


图 2-23 负载星形联接的三相四线制电路

$$i_c = \frac{U_c}{Z_c} = \frac{U_c - U_{NN'}}{Z_c}$$

由于

$$I_A + I_B + I_C = 0$$

则

$$\frac{U_A - U_{NN'}}{Z_A} + \frac{U_B - U_{NN'}}{Z_B} + \frac{U_C - U_{NN'}}{Z_C} = 0$$

整理得

$$U_{NN'} = \frac{\frac{U_A}{Z_A} + \frac{U_B}{Z_B} + \frac{U_C}{Z_C}}{\frac{1}{Z_A} + \frac{1}{Z_B} + \frac{1}{Z_C}} \quad (2-47)$$

由于三相负载对称,由式(2-46)可得

$$U_{NN'} = \frac{U_A + U_B + U_C}{\frac{3}{Z}} = 0$$

因此

$$I_A = \frac{U_A - U_{NN'}}{Z_A} = \frac{U \angle 0^\circ}{|Z| \angle \varphi} = \frac{U}{|Z|} \angle -\varphi = I_A \angle -\varphi$$

$$I_B = \frac{U_B - U_{NN'}}{Z_B} = \frac{U \angle -120^\circ}{|Z| \angle \varphi} = \frac{U}{|Z|} \angle -120^\circ - \varphi = I_B \angle -120^\circ - \varphi$$

$$I_C = \frac{U_C - U_{NN'}}{Z_C} = \frac{U \angle 120^\circ}{|Z| \angle \varphi} = \frac{U}{|Z|} \angle 120^\circ - \varphi = I_C \angle 120^\circ - \varphi$$

三相负载电流有效值相等,即

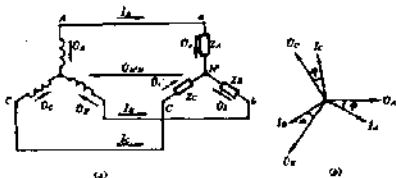


图 2-24 对称三相负载星形联接

(a) 电路图 (b) 相量图

$$I_A = I_B = I_C = \frac{U_p}{|Z_r|}$$

当三相负载对称时,中线电流等于零,此时中点电压为零,各相负载电流也是对称的,相量图如图 2-24(b) 所示。由此可知,计算这种电路,只需计算出一相参数便知其余两相。三相三线

制电路在生产上的应用极为广泛,因为生产中常用的三相异步电动机、三相电炉、三相整流器等三相负载一般都是对称的,只引出三个端子分别与电源的三根端线相连接,而且不接中线。

例 2-9 有一星形联接的对称电路,已知其各相电阻  $R=10\Omega$ ,电感  $L=25\text{mH}$ ,接于线电压有效值  $U_L=380\text{V}$ ,频率  $f=50\text{Hz}$  的电源上,求各相电流。

解 电源相电压有效值为:

$$U_p = \frac{U_L}{\sqrt{3}} = \frac{380}{\sqrt{3}} = 220 \text{ V}$$

负载复数阻抗为

$$\begin{aligned} Z &= R + jX_L = R + j\omega L = R + j2\pi fL \\ &= 10 + j2 \times 3.14 \times 50 \times 25 \times 10^{-3} \\ &= 10 + j7.85 = 12.7 / \underline{38.1^\circ} \Omega \end{aligned}$$

设  $U_A=220 \angle 0^\circ \text{V}$ ,所以 A 相负载电流为:

$$i_A = \frac{U_A}{Z_A} = \frac{220 \angle 0^\circ}{12.7 \underline{38.1^\circ}} = 17.3 \angle \underline{-38.1^\circ} \text{ A}$$

其余两相负载的电流依对称关系有

$$\begin{aligned} i_B &= 17.3 \angle \underline{-158.1^\circ} \text{ A} \\ i_C &= 17.3 \underline{81.9^\circ} \text{ A} \end{aligned}$$

## 2-9 对称三相负载的三角形联接

对称三相负载的三角形接法如图 2-25 所示,每相负载的复阻抗为  $Z_{AB}, Z_{BC}, Z_{CA}$ 。从图中可以看出,每相负载承受的相电压与电源的线电压对应相等。由于三相电源的线电压是对称的,因此,不论负载对称与否,其相电压总是对称的,其有效值为  $U_{AB}=U_{BC}=U_{CA}=U_p=U_L$ 。每相负载的相电流为:

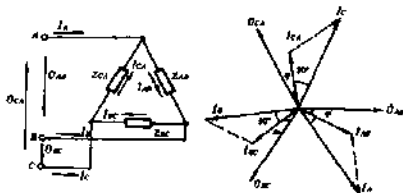


图 2-25 对称三相负载的三角形联接  
(a) 电路图 (b) 相量图

$$\left. \begin{aligned} \dot{I}_{AB} &= \frac{U_{AB}}{Z_{AB}} \\ \dot{I}_{BC} &= \frac{U_{BC}}{Z_{BC}} \\ \dot{I}_{CA} &= \frac{U_{CA}}{Z_{CA}} \end{aligned} \right\} \quad (2-48)$$

根据克希荷夫电流定律的相量形式可得各线电流为:

$$\left. \begin{aligned} \dot{I}_A &= \dot{I}_{AB} - \dot{I}_{CA} \\ \dot{I}_B &= \dot{I}_{BC} - \dot{I}_{AB} \\ \dot{I}_C &= \dot{I}_{CA} - \dot{I}_{BC} \end{aligned} \right\} \quad (2-49)$$

当负载对称时,设线电压

$$U_{AB} = U_{AB} \angle 0^\circ = U_l \angle 0^\circ$$

和

$$Z_{AB} = Z_{BC} = Z_{CA} = Z = R + jX = |Z| \angle \varphi$$

可以计算出各相电流如下:

$$\left. \begin{aligned} \dot{I}_{AB} &= \frac{U_{AB}}{Z_{AB}} = \frac{U_l \angle 0^\circ}{|Z| \angle \varphi} = I_{AB} \angle -\varphi \\ \dot{I}_{BC} &= \frac{U_{BC}}{Z_{BC}} = \frac{U_l \angle -120^\circ}{|Z| \angle \varphi} = I_{BC} \angle -120^\circ - \varphi \\ \dot{I}_{CA} &= \frac{U_{CA}}{Z_{CA}} = \frac{U_l \angle 120^\circ}{|Z| \angle \varphi} = I_{CA} \angle 120^\circ - \varphi \end{aligned} \right\} \quad (2-50)$$

上式表明,在三相负载对称的情况下,各相电流也是对称的,因此,也只需计算出一相的电流,按对应关系便可得出其余两相的电流。

把式(2-50)代入式(2-49)可求得各线电流分别为

$$\begin{aligned} \dot{I}_A &= \dot{I}_{AB} - \dot{I}_{CA} \\ &= \dot{I}_{AB} \angle 0^\circ - \dot{I}_{AB} \angle 120^\circ \\ &= \dot{I}_{AB} - \dot{I}_{AB} \left( -\frac{1}{2} + j \frac{\sqrt{3}}{2} \right) = \sqrt{3} \dot{I}_{AB} \angle -30^\circ \end{aligned}$$

同理

$$\begin{aligned} \dot{I}_B &= \sqrt{3} \dot{I}_{BC} \angle -30^\circ \\ \dot{I}_C &= \sqrt{3} \dot{I}_{CA} \angle -30^\circ \end{aligned}$$

显然,对称负载三角形联接时的线电流为相电流的 $\sqrt{3}$ 倍,各线电流在相位上分别滞后于相应的相电流 $30^\circ$ 。线电流和相电流的相量图如图2-25(b)所示。

有效值相量一般表达式为:

$$\begin{aligned} \dot{I}_L &= \sqrt{3} \dot{I}_P \angle -30^\circ \\ I_L &= \sqrt{3} I_P \end{aligned}$$

在三相电路中,三相负载选择星形接法还是三角形接法,要根据负载的额定电压和电源电

压确定。当负载的额定相电压等于电源线电压的 $\frac{1}{\sqrt{3}}$ 时,负载应采用星形联接。当负载的额定相电压等于电源的线电压时,负载应采用三角形联接,才能使其在额定电压下工作。

例 2-10 在三角形联接的对称三相负载中,每相的复阻抗  $Z=6+j8$ ,接入线电压  $U_L=380\text{V}$  的电源上,求各负载的相电流和线电流。

解 设  $\dot{U}_{AB}=380\angle 0^\circ\text{V}$

因为负载对称,只需计算一相电流即可。相电流为

$$Z_{AB}=Z_{BC}=Z_{CA}=6+j8=10\angle 53^\circ\Omega$$

$$\dot{I}_{AB}=\frac{\dot{U}_{AB}}{Z_{AB}}=\frac{380\angle 0^\circ}{10\angle 53^\circ}=38\angle -53^\circ\text{A}$$

$$\dot{I}_{BC}=38\angle -173^\circ\text{A}$$

$$\dot{I}_{CA}=38\angle 67^\circ\text{A}$$

各线电流为

$$\dot{I}_A=\sqrt{3}\dot{I}_{AB}\angle -30^\circ=\sqrt{3}\times 38\angle -53^\circ\angle -30^\circ=65.8\angle -83^\circ\text{A}$$

$$\dot{I}_B=\sqrt{3}\dot{I}_{BC}\angle -30^\circ=\sqrt{3}\times 38\angle -173^\circ\angle -30^\circ=65.8\angle -203^\circ\text{A}$$

$$\dot{I}_C=\sqrt{3}\dot{I}_{CA}\angle -30^\circ=\sqrt{3}\times 38\angle 67^\circ\angle -30^\circ=65.8\angle 37^\circ\text{A}$$

## 2-10 负载不对称的三相电路

如果三相负载的复数阻抗不相等,即  $Z_A\neq Z_B\neq Z_C$ ,则称为不对称三相负载。

### 一、星形联接的不对称负载电路

#### 1. 有中线时

由于有中线,不对称的星形负载上仍能得到对称相电压。当负载复数阻抗不对称时,负载的各相电流是不对称的,中线电流不为零。可按下列式子计算:

$$\left. \begin{aligned} \dot{I}_A &= \frac{\dot{U}_A}{Z_A} \\ \dot{I}_B &= \frac{\dot{U}_B}{Z_B} \\ \dot{I}_C &= \frac{\dot{U}_C}{Z_C} \end{aligned} \right\}$$

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

例 2-11 电路如图 2-23 所示。已知电源线电压  $U_L=380\text{V}$ ,各相负载的复数阻抗为  $Z_A=8\angle 25^\circ\Omega, Z_B=10\angle -45^\circ\Omega, Z_C=12\angle 50^\circ\Omega$ 。求各相负载电流和中线电流。

解 由于有中线,各相负载承受的相电压等于电源的相电压,  $U_\phi = \frac{U_L}{\sqrt{3}} = 220\text{V}$ , 设  $U_A = U_\phi\angle 0^\circ$  为参考相量,则各相负载相电流为:

$$i_A = \frac{U_A}{Z_A} = \frac{220 \angle 0^\circ}{8 \angle 25^\circ} = 27.5 \angle -25^\circ = 25 - j11.6 \text{ A}$$

$$i_B = \frac{U_B}{Z_B} = \frac{220 \angle -120^\circ}{10 \angle -45^\circ} = 22 \angle -75^\circ = 5.7 - j21.3 \text{ A}$$

$$i_C = \frac{U_C}{Z_C} = \frac{220 \angle 120^\circ}{12 \angle 50^\circ} = 18.3 \angle 70^\circ = 6.3 + j17.2 \text{ A}$$

中线电流等于

$$\begin{aligned} i_N &= i_A + i_B + i_C = 37 - j15.7 \\ &= 40.2 \angle -23^\circ \text{ A} \end{aligned}$$

## 2. 无中线时

电路如图 2-24 所示。由于负载不对称又无中线,一定会引起负载中点  $N'$  的电位发生偏移,使有的相电压高于负载的额定电压,而有的相电压低于负载的额定电压,使得各相负载的相电压不对称,造成负载不能正常工作。

根据式(2-47)求出两中点之间电压  $U_{NN'}$ ,最后再求出各相负载电流为

$$i_A = \frac{U_A - U_{NN'}}{Z_A}, i_B = \frac{U_B - U_{NN'}}{Z_B}, i_C = \frac{U_C - U_{NN'}}{Z_C}$$

**例 2-12** 在负载不对称又无中线的三相三线制电路中,电路如图 2-26 所示。三相负载均接电灯,已知  $Z_A=20\Omega, Z_B=40\Omega, Z_C=60\Omega$ ,电灯的额定电压为 220V,求各相负载的电压和电流。

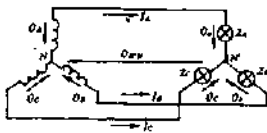


图 2-26 例题 2-12 的图

$$\text{解 } U_{NN'} = \frac{U_A + U_B + U_C}{\frac{1}{Z_A} + \frac{1}{Z_B} + \frac{1}{Z_C}}$$

$$= \frac{220 \angle 0^\circ}{20 \angle 0^\circ} + \frac{220 \angle -120^\circ}{40 \angle 0^\circ} + \frac{220 \angle 120^\circ}{60 \angle 0^\circ}$$

$$= \frac{\frac{1}{20} + \frac{1}{40} + \frac{1}{60}}{0.09} = \frac{11 \angle 0^\circ + 5.5 \angle -120^\circ + 3.7 \angle 120^\circ}{0.09}$$

$$= \frac{6.4 - j1.56}{0.09} = \frac{6.6 \angle -13.7^\circ}{0.09}$$

$$= 73.3 \angle -13.7^\circ \text{ V}$$

各负载上的电压为:

$$\begin{aligned} U_A &= U_A - U_{NN'} = 220 \angle 0^\circ - 73.3 \angle -13.7^\circ = 149 + j17.3 \\ &= 150 \angle 6.6^\circ \text{ V} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} U_B &= U_B - U_{NN'} = 220 \angle -120^\circ - 73.3 \angle -13.7^\circ = -181 - j172.7 \\ &= 250 \angle 43.7^\circ \text{ V} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} U_C &= U_C - U_{NN'} = 220 \angle 120^\circ - 73.3 \angle -13.7^\circ = -181 + j207.3 \\ &= 275 \angle -48.9^\circ \text{ V} \end{aligned}$$

各相负载的相电流为:

$$I_A = \frac{U_A}{Z_A} = \frac{150 \angle 6.6^\circ}{20 \angle 0^\circ} = 7.5 \angle 6.6^\circ \text{ A}$$

$$I_B = \frac{U_B}{Z_B} = \frac{250 \angle 43.7^\circ}{40 \angle 0^\circ} = 6.25 \angle 43.7^\circ \text{ A}$$

$$I_C = \frac{U_C}{Z_C} = \frac{275 \angle -48.9^\circ}{60 \angle 0^\circ} = 4.58 \angle -48.9^\circ \text{ A}$$

由上述计算可知,由于无中线,引起负载中点  $N'$  的电位产生位移,使  $B$ 、 $C$  两相负载上的相电压有效值大于  $220\text{V}$ ,  $A$  相负载相电压小于  $220\text{V}$ ,使三相负载的相电压不对称,致使电器烧毁。因此,为了使不对称的三相星形负载上的相电压对称,必须接入中线,即采用三相四线制。为了保证中线不断开,不允许在中线上安装熔断器和开关,以防止在不对称负载时,由于中线断开产生中点电位偏移而造成不正常的供电情形。

## 二、三角形联接的不对称负载电路

当不对称三相负载联接成三角形电路时,由于电源电压对称,负载相电压就是电源的线电压,因此加在各相负载上的电压也是对称的,所以仍能按式(2-48)和(2-49)分相进行计算。此时,各相负载相电流是不对称的,线电流也是不对称的,线电流与相电流之间已不存在  $\sqrt{3}$  的关系。

## 2-11 三相电功率的计算

如果三相负载对称,各负载相电压和电流的有效值相等,它们之间的相位差  $\varphi$  也相同,因而每相负载吸收的有功功率也相等,即

$$P_p = U_p I_p \cos \varphi$$

三相负载总有功功率等于各相负载有功功率之和,为

$$P = 3P_p = 3U_p I_p \cos \varphi \quad (2-51)$$

通常,测量线电压和线电流较为方便,可以将式(2-51)换算为用线电压  $U_L$  和线电流  $I_L$  表示。如果对称三相负载是星形联接,则

$$U_p = \frac{U_L}{\sqrt{3}}, I_p = I_L$$

如果是三角形联接,则

$$U_p = U_L, I_p = \frac{I_L}{\sqrt{3}}$$

故无论负载接成星形或三角形,三相负载总有功功率都可以改写为

$$P = \sqrt{3} U_L I_L \cos \varphi \quad (2-52)$$

式中  $\cos \varphi$  为每相负载的功率因数,  $\varphi$  角为相电压和相电流之间的相位差。

同理,可得出三相负载的总无功功率为

$$Q = 3U_p I_p \sin \varphi = \sqrt{3} U_L I_L \sin \varphi \quad (2-53)$$

三相负载的总视在功率为

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2} = 3U_L I_L = \sqrt{3} U_L I_L \quad (2-54)$$

对于不对称的三相负载,应该分别计算各相功率,再求出三相负载总功率,即

$$P = P_A + P_B + P_C = U_A I_A \cos \varphi_A + U_B I_B \cos \varphi_B + U_C I_C \cos \varphi_C$$

$$Q = Q_A + Q_B + Q_C = U_A I_A \sin \varphi_A + U_B I_B \sin \varphi_B + U_C I_C \sin \varphi_C$$

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2}$$

例 2-13 某三相异步电动机的额定相电压为 220V,每相等效复数阻抗为  $Z = 8 + j6\Omega$ 。

(1)求电源线电压为 380V 时,电动机的联接方式、相电流、线电流和吸收的有功功率。

(2)电源线电压为 220V 时,电动机的联接方式、相电流、线电流和吸收的有功功率。

解 (1) $Z = 8 + j6 = 10 \angle 36.9^\circ \Omega$

因  $U_L = 380V$ ,故电动机应星形联接,  $U_r = \frac{U_L}{\sqrt{3}} = \frac{380}{\sqrt{3}} = 220V$ ,电动机承受的相电压等于电动机的额定电压,此时

$$I_L = I_r = \frac{220}{10} = 22 \text{ A}$$

$$P = \sqrt{3} U_L I_L \cos \varphi = \sqrt{3} \times 380 \times 22 \cos 36.9^\circ \\ = 11566 \text{ W}$$

(2)电源线电压为 220V 时,电动机应为三角形联接,相电流和线电流分别为

$$I_r = \frac{220}{10} = 22 \text{ A}$$

$$I_L = \sqrt{3} I_r = \sqrt{3} \times 22 = 38 \text{ A}$$

功率为:

$$P = \sqrt{3} U_L I_L \cos \varphi = \sqrt{3} \times 220 \times 38 \cos 36.9^\circ \\ = 11566 \text{ W}$$

由上述分析可知,当电源线电压为该电动机每相绕组额定电压的  $\sqrt{3}$  倍时,应采用星形接法;当电源线电压与电动机每相绕组的额定电压相等时,应采用三角形接法。在两种接法中,电动机的相电压、相电流和功率都没有改变。

## 习 题

2-1 已知  $u_1 = 168 \sqrt{2} \sin 314t V$ ,  $u_2 = 168 \sqrt{2} \sin(314t - 45^\circ) V$ , (1)试指出各正弦电压的幅值、有效值、初相位、角频率、周期以及  $u_1$  与  $u_2$  之间的相位差各为多少? (2)作出它们的正弦波形。

2-2 有一电烙铁,在它的铭牌上标明 220V 100W。已知电源电压  $U = 220V$ ,频率  $f = 50\text{Hz}$ ,初相位是  $-45^\circ$ 。试求电烙铁中电流的瞬时值表达式。

3-3 (1)已知正弦电流  $i = 25 \sin(\omega t + 45^\circ) A$ ,试写出它的幅值相量形式;(2)已知电压幅值相量  $\dot{U} = 200e^{-j45^\circ} V$ ,求其瞬时值表达式。

2-4 已知  $i_1 = 3 \sqrt{2} \sin(\omega t + 30^\circ) A$ ,  $i_2 = 4 \sqrt{2} \sin(\omega t - 60^\circ) A$ ,用幅值相量求总电流



$i = i_1 + i_2 = ?$ , 并画出相量图。

2-5 已知  $u_1 = 220\sqrt{2}\sin\omega t$  V,  $u_2 = 220\sqrt{2}\sin(\omega t - 120^\circ)$  V, 试用有效值相量求  $u = u_1 - u_2 = ?$  并画出相量图。

2-6 已知  $i_1 = 14 - j24$  A,  $i_2 = 8.2 + j4$  A,  $i_3 = 9\angle 60^\circ$  A, 求  $i = i_1 + i_2 - i_3$ 。

2-7 今有一白炽灯, 在它的铭牌上注明 220V60W, 已知电源电压  $U = 220$  V, 试求 (1) 通过电流多少? (2) 灯泡电阻多少? (3) 若每天用 5 小时, 每月用电几度?

2-8 有一线圈的电感  $L = 10$  mH, 其电阻值很小可以忽略不计, 现把它接在电压  $U = 220\angle 0^\circ$  V, 频率  $f = 50$  Hz 的交流电源上, 试求通过电感线圈的电流相量  $i$  和无功功率。若把该线圈接在  $U = 220\angle 0^\circ$  V 频率为 1 000 Hz 的电源上时, 问感抗和电流各为多少? 如果把该线圈接在 220V 直流电源上, 可能出现什么后果?

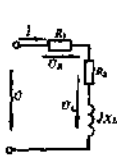
2-9 把一个  $C = 50\mu\text{F}$  的电容器接到电压  $U = 220\angle 0^\circ$  V, 频率为  $f = 50$  Hz 的交流电源上, 试求电容器的容抗  $X_C$ , 电流  $i$  及无功功率  $Q$ 。如果电容  $C$  和电压  $U$  不变, 而频率为  $f = 1\,000$  Hz, 电路的电流又是多少?

2-10 在  $RLC$  串联电路中, 已知  $R = 100\Omega$ ,  $L = 300$  mH,  $C = 100\mu\text{F}$ , 电源电压  $U = 100\angle 0^\circ$  V, 频率  $f = 50$  Hz, 试求电路电流相量  $i$ , 作出电流相量图, 并分析电路的性质。试写出  $u$  和  $i$  的三角函数式。

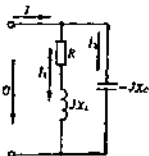
2-11 有一个  $RL$  串联电路, 已知  $U = 100\angle 0^\circ$  V, 频率  $f = 50$  Hz,  $i = 10\angle -30^\circ$  A, 求  $R$  及  $X_L$  值。

2-12 有一  $RLC$  串联电路, 已知  $R = 4\Omega$ ,  $X_L = 3\Omega$ ,  $X_C = 6\Omega$ , 电源电压  $U = 100\angle 0^\circ$  V, 试求电路电流  $i$  及各元件上的电压降  $U_R$ ,  $U_C$ ,  $U_L$  和总电压  $U$ , 并画出相量图。

2-13 日光灯和镇流器串联接到交流电源上, 可看作  $RL$  串联电路, 如图题 1 所示。今已知灯管的等效电阻  $R_1 = 280\Omega$ , 镇流器的电阻  $R_2 = 20\Omega$ , 镇流器电感  $L = 1.65$  H, 电源电压  $U = 220\angle 0^\circ$  V, 频率  $f = 50$  Hz, 试求电路中的电流  $i$  和灯管两端与镇流器上的电压  $U_{R_1}$ ,  $U_{R_2}$  值, 这两个电压的数量和是否等于 220V?

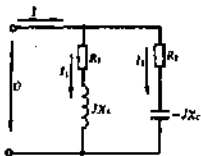


题图 1

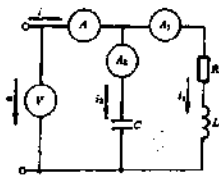


题图 2

2-14 在  $RLC$  串联电路中, 已知  $R = 800\Omega$ ,  $X_L = 100\Omega$ ,  $X_C = 40\Omega$ , 接入电压  $u = 100\sqrt{2}\sin(\omega t + 10^\circ)$  V 的交流电源, 求: (1) 电路中的各种功率  $P$ ,  $Q$  和  $S$  值; (2) 功率因数。



题图 3



题图 4

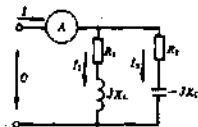
2-15 在题图 2 所示电路中,已知  $U=100\angle 0^\circ\text{V}$ , 频率  $f=50\text{Hz}$ ,  $R=100\Omega$ ,  $X_1=100\Omega$ ,  $X_2=400\Omega$ , 求  $I_1$ ,  $I_2$  和  $I$ , 并画它们的相量图。

2-16 在题图 3 所示的电路中,已知  $R_1=3\Omega$ ,  $R_2=5\Omega$ ,  $X_C=4\Omega$ ,  $X_L=8.68\Omega$ , 并设电源电压  $U=220\angle 0^\circ\text{V}$ 。求各支路电流、功率和总电流、总功率各为何值?

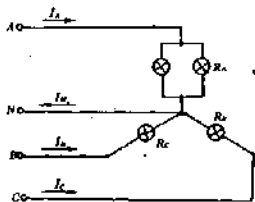
2-17 在题图 4 所示的电路中,已知  $u=220\sqrt{2}\sin 314t\text{V}$ ,  $i_1=22\sin(314t-45^\circ)\text{A}$ ,  $i_2=11\sqrt{2}\sin(314t+90^\circ)\text{A}$ 。试求各仪表读数及电路参数  $R$ ,  $L$  和  $C$ 。

2-18 在题图 5 所示电路中,已知  $R_1=5\Omega$ ,  $X_L=2\Omega$ ,  $R_2=3\Omega$ ,  $X_C=3\Omega$ , 用电压表在  $R_1$  电阻两端测得电压  $45\text{V}$ , 问电流表读数是几?

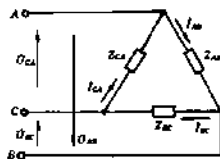
2-19 有一电动机,它的功率  $P=1.21\text{kW}$ , 接在  $U=220\text{V}$ ,  $f=50\text{Hz}$  的交流电源上, 通入电动机的电流  $I=11\text{A}$ 。求:(1)电路的功率因数  $\cos\varphi_1$ ; (2)欲把电路的功率因数提高到 0.95, 计算并联的电容值及电路电流。



题图 5



题图 6



题图 7

2-20 设电源电压对称, 电源线电压  $U_L=380\text{V}$ , 有一星形联接的白炽灯负载, 其电阻为  $R_a=11\Omega$ ,  $R_b=R_c=22\Omega$ , 如题图 6 所示。试求:(1)各相负载电流  $I_a$ ,  $I_b$ ,  $I_c$  及中线电流  $I_n$ , 并

画出它们的相量图；(2)如中线断开，C 相开路时负载相电流及另两相的相电压；(3)中线断开，C 相负载短路时负载相电流。

2-21 已知三角形联接的三相负载  $Z_{AB} = 20\Omega$ ,  $Z_{BC} = 30\Omega$ ,  $Z_{CA} = 40\Omega$ ，接入线电压为  $U_L = 380V$  的三相电源上，如题图 7 所示。设  $\dot{U}_{AA} = 380 \angle 0^\circ V$ ,  $\dot{U}_{BC} = 380 \angle -120^\circ V$ ,  $\dot{U}_{CA} = 380 \angle 120^\circ V$ 。试求各相负载的电流。

## 第三章 民用建筑常用电气设备

民用建筑常用电气设备主要有电力变压器、电动机及其控制设备等,本章将分别讨论它们的基本构造、工作原理、额定值和运行特性。

### 3-1 变压器的构造及工作原理

#### 一、变压器的构造

变压器是把某一电压值的交流电转换成同频率的另一电压值的静止电器。在一般的民用建筑供电系统中,大多采用的是把高压(通常是10kV)转换成400/230V的降压变压器。

变压器的主要组成部分是铁心和绕组。

##### 1. 铁心

铁心的作用是构成磁路,为了减少因铁心里的磁滞和涡流而造成的电能损耗,铁心是用厚度为0.35~0.5mm导磁性能好的硅钢片叠装而成。按照铁心的构造,变压器可分为心式和壳式两种,如图3-1所示。心式变压器的绕组环绕着铁心,壳式变压器的铁心包围着绕组,小功率变压器通常采用壳式结构,大功率的电力变压器通常采用心式结构。

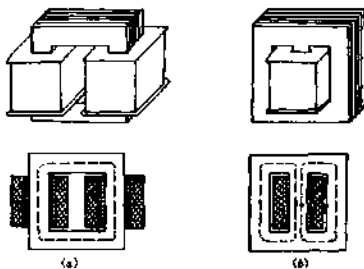


图 3-1 变压器的结构  
(a)心式变压器 (b)壳式变压器

##### 2. 绕组

绕组是变压器的电路部分,一般用绝缘的铜线或铝线制成。与电源相联的绕组称为原绕

组,与负载相联的绕组称为副绕组。

### 3. 冷却系统

变压器工作时,铁心和绕组都要损耗电能,分别称为铁损(磁滞损耗和涡流损耗)和铜损(绕组损耗),使变压器发热,因此必须采取散热措施。小功率变压器大多采用空气自冷式,大功率变压器通常采用油冷式,把铁心和绕组装在油箱中,油箱内装满变压器油,变压器油既起散热又起绝缘作用。油箱外装有散热油管,这种变压器称为油浸自冷式变压器。

常用的变压器有单相变压器和三相变压器,它们的符号如图 3-2 所示。

## 二、变压器的工作原理

现以心式单相变压器为例来分析变压器的工作原理,如图 3-3 所示。设原、副绕组的匝数分别为  $N_1$  和  $N_2$ 。两绕组之间以及绕组与铁心之间是绝缘的。

### 1. 电磁变换

变压器原绕组接电源,副绕组不接负载时的运行情况,称为空载运行,此时副绕组电流,  $= 0$ 。

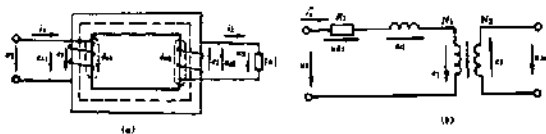


图 3-3 变压器的原理图

(a)原理图 (b)等效电路

在变压器副边空载的情况下,当原绕组接上交流电压  $u_1$  时,原绕组中通过的电流为空载电流,又称励磁电流,用  $i_0$  表示。原绕组磁动势  $N_1 i_0$  便产生经铁心闭合交变的主磁通  $\phi$ ,  $\phi = \phi_m \sin \omega t$ , 主磁通  $\phi$  分别在原、副绕组中感应出交流电动势  $e_1$  和  $e_2$ 。此时还有经空气穿过原绕组的漏磁通  $\phi_{l1}$  与相应的漏磁感应电动势  $e_{l1}$ 。

根据电磁感应定律,主磁通  $\phi$  在原、副绕组中产生的感应电动势为

$$\begin{aligned} e_1 &= -N_1 \frac{d\phi}{dt} = -N_1 \frac{d(\phi_m \sin \omega t)}{dt} \\ &= -N_1 \omega \phi_m \sin(\omega t - 90^\circ) \\ &= E_{m1} \sin(\omega t - 90^\circ) \\ e_2 &= -N_2 \frac{d\phi}{dt} = N_2 \omega \phi_m \sin(\omega t - 90^\circ) \end{aligned}$$

$$= E_{m2} \sin(\omega t - 90^\circ)$$

电动势  $e_1$  与  $e_2$  的有效值为:

$$E_1 = \frac{E_{m1}}{\sqrt{2}} = \frac{2\pi}{\sqrt{2}} f N_1 \phi_m = 4.44 f N_1 \phi_m$$

$$E_2 = \frac{E_{m2}}{\sqrt{2}} = \frac{2\pi}{\sqrt{2}} f N_2 \phi_m = 4.44 f N_2 \phi_m$$

从变压器原边看,除上述两个电动势  $e_1$  和  $e_{11}$  外,还有励磁电流  $i_0$  在线圈电阻  $R_1$  上产生的压降  $u_{r1} = i_0 R_1$ , 所以电源电压  $u_1$  必须平衡上述三个电压分量,变压器空载运行时的等效电路如图 3-3(b) 所示。根据克希荷夫电压定律,可列方程

$$u_1 = u_{r1} - e_1 - e_{11}$$

用相量式表示为

$$\dot{U}_1 = \dot{I}_0 R_1 - \dot{E}_1 - \dot{E}_{11}$$

上式中,原绕组的电阻  $R_1$  比较小,  $\dot{I}_0$  也不大,其有效值约为原绕组额定电流的 3%~8%, 所以  $\dot{I}_0 R_1$  数值较小,  $\dot{E}_{11}$  为穿过原绕组的漏磁通  $\phi_{11}$  在原绕组中产生的感应电动势,数值也较小,忽略  $\dot{I}_0 R_1$  和  $\dot{E}_{11}$ , 则

$$\begin{aligned} \dot{U}_1 &\approx -\dot{E}_1 \\ U_1 &\approx E_1 \end{aligned} \quad (3-1)$$

由于副绕组空载,  $\dot{I}_2 = 0$ , 所以空载电压  $U_{20}$  等于感应电动势  $E_2$ , 即

$$\begin{aligned} \dot{U}_{20} &= \dot{E}_2 \\ U_{20} &= E_2 \end{aligned} \quad (3-2)$$

由式(3-1)和(3-2)可以得出

$$\frac{U_1}{U_{20}} \approx \frac{E_1}{E_2} = \frac{4.44 f N_1 \phi_m}{4.44 f N_2 \phi_m} = \frac{N_1}{N_2} = K \quad (3-3)$$

$K$  称为变压器的变比。上式说明,原、副绕组的电压比等于匝数比,只要改变原、副绕组的匝数比,就可以进行电压变换。

## 2. 电流变换

变压器原绕组接上电压  $u_1$ , 副绕组接上负载  $|Z|$  时,变压器就进入负载运行状态。此时在感应电动势  $e_2$  的作用下产生电流  $i_2$ , 即有电流输出。与此同时,原绕组电流也从  $i_0$  增大为  $i_1$ 。从能量的观点看,副绕组有能量输出,原绕组必然要从电源吸取比空载时更多的能量。在电源电压  $\dot{U}_1$  保持不变的情况下,变压器输入能量的增加必然使原边电流  $i_1$  比空载电流  $i_0$  大得多。

由副绕组电流  $i_2$  所建立的磁动势  $N_2 i_2$  也会在铁心中产生磁通  $\phi_1$ , 并力图改变铁心中原有的主磁通  $\phi$ , 即负载运行时的主磁通  $\phi$  是由磁动势  $(N_1 i_1 + N_2 i_2)$  共同作用产生的。由式(3-3)中的关系  $U_1 \approx E_1 = 4.44 f N_1 \phi_m$  可知,由于空载和有载时原边电压  $\dot{U}_1$  不变,主磁通最大值  $\phi_m$  基本不变,加负载后原、副绕组合成的磁动势应和空载时原绕组的磁动势相等,即

$$N_1 i_1 + N_2 i_2 = N_1 i_0$$

用相量表示为

$$N_1 \dot{I}_1 + N_2 \dot{I}_2 = N_1 \dot{I}_0$$

或

$$N_1 \dot{I}_1 = N_1 \dot{I}_0 - N_2 \dot{I}_2 \quad (3-4)$$

变压器的空载电流  $\dot{I}_0$  很小,  $N_1 \dot{I}_0$  可从忽略, 即

$$N_1 \dot{I}_1 \approx -N_2 \dot{I}_2$$

用有效值表示为

$$N_1 I_1 \approx N_2 I_2$$

即

$$\frac{I_1}{I_2} \approx \frac{N_2}{N_1} = \frac{1}{K} \quad (3-5)$$

式(3-5)表明变压器原、副绕组的电流比等于匝数比的倒数。

由式(3-3)和(3-5)可得

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{I_2}{I_1}$$

因此输入视在功率  $S_1 = U_1 I_1$  和输出视在功率  $S_2 = U_2 I_2$  基本相等, 符合功率守恒, 此外也表明, 在副边负载电流  $I_2$  增大时, 原边输入电流  $I_1$  将随着增大, 并且  $I_1$  由  $I_2$  的大小来决定, 而  $I_2$  取决于负载。

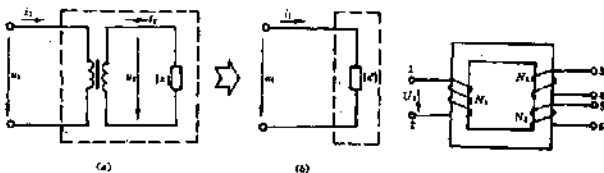


图 3-4 变压器的阻抗变换

### 3. 阻抗变换

阻抗变换是把变压器副边一侧所接的负载阻抗  $|z|$  折算到原边一侧, 其等效负载阻抗  $|z'|$  与  $|z|$  的转换关系。在图 3-4 中, 由原边两端输入端看进去的等效负载阻抗为

$$|z'| = \frac{U_1}{I_1} = \frac{N_1 U_2}{N_2 I_2} = \left( \frac{N_1}{N_2} \right)^2 \frac{U_2}{I_2} = K^2 |z| \quad (3-6)$$

图 3-5 例题 3-1 的图

式(3-6)表明, 采用不同的匝数比, 就能将实际负载阻抗变换为最佳负载阻抗, 即电源和负载的阻抗相匹配, 使负载获得较大的功率。

例 3-1 某一变压器, 如图 3-5 所示, 已知原边电压  $U_1 = 380\text{V}$ , 匝数  $N_1 = 760$ , 副边要求空载下有两个电压  $U_2 = 127\text{V}$  和  $U_3 = 36\text{V}$ , 求副绕组  $N_2$  和  $N_3$  各为多少匝?

$$\text{解 } N_2 = \frac{N_1 U_1}{U_2} = \frac{760 \times 127}{380} = 254$$

$$N_3 = \frac{N_1 U_1}{U_3} = \frac{760 \times 36}{380} = 72$$

### 3-2 三相变压器和变压器的铭牌

#### 一、三相变压器

电力系统中,普遍采用三相变压器来变换三相电压,如图 3-6(a)所示。它的铁心有 3 个心柱,每个心柱上各装有一个原绕组和副绕组,各相高压绕组为 A-X、B-Y、C-Z,低压绕组为 a-x、b-y、c-z。

由于三相变压器相当于 3 只单相变压器,因此三相变压器的工作原理与前所述单相变压器相同,单相变压器的分析方法和结论在三相变压器的对称电路中也完全适用。

三相变压器原、副绕组常用的接法有 Y/Y<sub>0</sub> 及 Y/Δ 两种联接方式。斜线上方的字母表示高压绕组的接法,斜线下方的字母表示低压绕组的接法。Y<sub>0</sub> 表示星形联接并有中点引出线。

Y/Y<sub>0</sub> 联接的三相变压器是供动力负载和照明负载共用的,其高压绕组的线电压不超过 35kV,低压一般是 400V。由于低压绕组接有中线,可以得到两种低压,即适用于线电压为 380V 的三相动力负载(如三相电动机)和相电压为 220V 的单相负载(如照明)。Y/Y<sub>0</sub> 联接时,高、低压绕组线电压与相电压之间的关系如下:当高压绕组的线电压为  $U_1$ ,

则其相电压为  $\frac{U_1}{\sqrt{3}}$ , 低压绕组的线电压为  $U_2$ , 若变比为  $K$ , 则  $U_2 = \frac{U_1}{K}$ , 低压绕组的相电压为

$\frac{U_1}{\sqrt{3}K}$ , 如图 3-6(b)所示。Y/Δ 联接的三相变压器,高压绕组接成星形,低压绕组接成三角形。

其高、低压绕组线电压和相电压的关系,已在图 3-6(c)中表明。大容量变压器常采用 Y/Δ 接法。

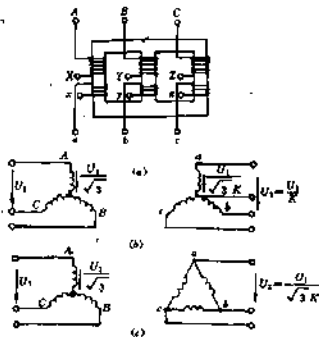


图 3-6 三相变压器的联接

(a)三相变压器 (b)Y/Y<sub>0</sub>联接 (c)Y/Δ联接



## 二、变压器的铭牌

每台变压器均附有铭牌，铭牌上标注了变压器在额定工作状态下的各项参数值。在使用变压器时，要求严格遵照铭牌上的规定。

变压器的铭牌如表 3-1 所示。现分别介绍如下：

表 3-1 变压器的铭牌

型号 SL <sub>1</sub> -1000/10	三相 50Hz	标准代号 JB1300-74
油浸自冷户外式 Y/Y <sub>0</sub> -12		产品许可证号

额定容量/kVA	分接位置	高 压		低 压		阻抗电压/%
		V	A	V	A	
1000	I	10500				5.55
	II	10000	57.7	400	1443	
	III	9500				

产品代号 254 器身重 1765kg 油重 695kg  
 出厂序号 455 总重 3390kg 1984年5月制造  
 中华人民共和国  
 重庆变压器总厂

### 1. 变压器型号

型号中各项文字含义如下：



### 2. 额定电压

变压器在额定运行情况下，根据绝缘强度和允许温升所规定的施加于原绕组上的最高线电压值称为原边额定电压  $U_{1N}$ 。变压器在空载运行时，原边加上  $U_{1N}$  后，副边的线电压值称为副边额定电压  $U_{2N}$ 。在三相变压器中，高、低压绕组的额定电压也规定了若干等级，如高压绕组为 10kV、35kV 等，低压绕组为 230V、400V 等。

### 3. 额定电流

在原边额定电压  $U_{1N}$  下，原绕组允许长期通过的最大电流称为原边额定电流  $I_{1N}$ 。在副边额定电压  $U_{2N}$  下，副绕组允许长期通过的最大电流称为副边额定电流  $I_{2N}$ 。对三相变压器是指线电流值。

### 4. 额定容量

是指变压器原、副边都在额定电压和额定电流工作条件下的输出能力，用视在功率表示。

单相变压器的额定容量为

$$S_N = U_{2N} I_{2N} = U_{1N} I_{1N} \quad (3-7)$$

三相变压器的额定容量为

$$S_N = \sqrt{3} U_{2N} I_{2N} = \sqrt{3} U_{1N} I_{1N} \quad (3-8)$$

电力变压器的额定容量等级有:20,30,50,75,100,180,240,320,560,750,1000,……kVA。

例 3-2 三相负载对称,额定线电压  $U_{2N}=380\text{V}$ ,功率  $P=40\text{kW}$ ,功率因数  $\cos\varphi=0.85$ ,高压电源线的线电压  $U_{1N}=10\text{kV}$ ,试选择一台合适的电力变压器。

解  $P=UI\cos\varphi=S\cos\varphi$

负载所需视在功率

$$S = \frac{P}{\cos\varphi} = \frac{40}{0.85} = 47 \text{ kW}$$

可选一台  $\frac{U_{1N}}{U_{2N}} = \frac{10}{0.4} \text{ kV}$ ,  $S_N=50\text{kVA}$  的变压器,其额定电流为

$$I_{1N} = \frac{S_N}{\sqrt{3}U_{1N}} = \frac{50}{\sqrt{3} \times 10} = 2.9 \text{ A}$$

$$I_{2N} = \frac{S_N}{\sqrt{3}U_{2N}} = \frac{50}{\sqrt{3} \times 0.4} = 72.3 \text{ A}$$

### 3-3 变压器的运行特性

#### 一、变压器的外特性和电压调整率

当变压器原绕组电压  $U_1$  和负载功率因数  $\cos\varphi$  一定时,副绕组电压  $U_2$  随负载电流  $I_2$  的变化关系  $U_2=f(I_2)$ ,称为变压器的外特性。

对电阻性和电感性负载而言,变压器的外特性如图 3-7 所示。从图中可见,对于相同的负载电流,其功率因数愈低,电压下降愈大。

变压器从空载到额定负载 ( $I_2=I_{2N}$ ) 运行,副绕组电压随负载变化的程度用电压变化率  $\Delta U$  表示。即

$$\Delta U = \frac{U_{20} - U_2}{U_{20}} \times 100\% \quad (3-9)$$

式中  $U_{20}$  和  $U_2$  分别为副绕组的空载电压和额定负载时的电压。电力变压器的电压调整率不大,约为 2%~3% 左右,这是由于变压器绕组的电阻与漏磁感抗均甚小,故随  $I_2$  的增加所产生的电压降也甚小的缘故。通常希望电压  $U_2$  的变化越小越好,即电压调整率愈小愈好,它反映了电力变压器向供电线路提供电压的稳定性,所以它是变压器的一个重要的技术指标。

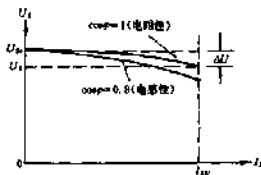


图 3-7 变压器的外特性

## 二、变压器的损耗和效率

变压器的功率损耗包括铜损  $P_C$  和铁损  $P_F$  两部分。铜损是原、副绕组中的电流在绕组电阻上产生的损耗。由于原、副绕组的电流都随负载而变化,铜损也随负载发生变化。设原、副绕组的直流电阻分别为  $R_1$  和  $R_2$ , 则铜损为

$$P_C = I_1^2 R_1 + I_2^2 R_2$$

铁损是交变的主磁通在铁心中产生的磁滞损耗和涡流损耗。由于变压器在空载与有载时主磁通基本不变,所以铁损基本不变,与负载无关。变压器的总损耗为  $\Delta P = P_C + P_F$ 。

对于单相变压器,副绕组的输出功率为

$$P_2 = U_2 I_2 \cos \phi_2$$

变压器的输入功率为

$$P_1 = U_1 I_1 \cos \phi_1 = P_2 + P_C + P_F$$

变压器的效率为

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} \times 100\% \\ = \frac{P_2}{P_2 + P_C + P_F} \times 100\% \quad (3-10)$$

由于变压器的铜损与铁损都很小,所以效率很高,通常在 95% 以上。但任何变压器在轻载时效率都较低。

例 3-3 某单相变压器,其数据如下:  $S_N = 50 \text{ kVA}$ ,  $U_{1N} = 10\,000 \text{ V}$ ,  $U_{2N} = 230 \text{ V}$ , 空载时原绕组输入功率  $P_0 = 500 \text{ W}$ , 空载电流  $I_0 = 0.25 \text{ A}$ 。副绕组接额定负载,且  $\cos \phi_2 = 1$ , 额定负载时副边电压为  $U_2 = 225 \text{ V}$ 。设原绕组电阻  $R_1 = 2 \Omega$ , 副绕组电阻  $R_2 = 0.02 \Omega$ , 求:

- (1) 原、副绕组的额定电流;
- (2) 电压调整率;
- (3) 铁损和铜损;
- (4) 额定负载时的效率。

解 副绕组额定电流

$$I_{2N} = \frac{S_N}{U_{2N}} = \frac{50000}{230} = 217 \text{ A}$$

原绕组额定电流

$$I_{1N} = \frac{I_{2N}}{K} = \frac{217}{\frac{10000}{230}} = 5 \text{ A}$$

- (2) 电压调整率

$$\Delta U\% = \frac{U_{2N} - U_2}{U_{2N}} \times 100\% \\ = \frac{230 - 225}{230} \times 100\% = 2.17\%$$

- (3) 由于空载电流很小,因此空载时铜损很小,可以认为空载铜损近似等于铁损,即

$$P_C \approx P_F = 500 \text{ W}$$

副绕组接额定负载时,设原、副绕组的电流均为额定电流,则铜损为

$$P_{Cu} = I_{1N}^2 R_1 + I_{2N}^2 R_2 \\ = 5^2 \times 2 + 217^2 \times 0.02 = 992 \text{ W}$$

(4)效率

$$\eta = \frac{U_2 I_2 \cos \varphi_2}{U_1 I_1 \cos \varphi_1 + P_{Cu} + P_{Fe}} \times 100\% \\ = \frac{225 \times 217 \times 1}{225 \times 217 \times 1 + 992 + 500} \times 100\% \\ = 97\%$$

### 3-4 特殊变压器

#### 一、自耦变压器

单相自耦变压器的特点是只有一个绕组,副绕组是原绕组的一部分,如图 3-8 所示。当原绕组的两端加上交流电压  $U_1$  后,铁心中便产生了交变磁通,该磁通在原、副绕组上产生感应电动势。原、副绕组电压之比和电流之比表达式与双绕组的单相变压器是完全一样的,即

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{N_1}{N_2} = K \\ \frac{I_1}{I_2} = \frac{N_2}{N_1} = \frac{1}{K}$$

可见,只要适当地选取匝数  $N_2$ ,就可获得所需的副边电压  $U_2$ 。

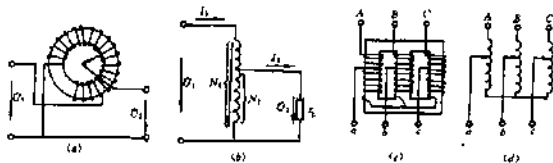


图 3-8 自耦变压器

(a)单相自耦变压器原理图 (b)电路图;(c)三相自耦变压器原理图 (d)电路图

如果把自耦变压器副绕组的分接头做成滑动的,就可平滑地调节副边电压  $U_2$ 。这种自耦变压器称为自耦调压器,如图 3-9 所示。

自耦变压器比普通变压器结构简单、省料、效率高,其缺点是原、副绕组之间有电的直接联系,一旦副绕组断开,高压电将串入低压一侧,不够安全。建筑工地使用的行灯变压器(包括 36V、24V、12V 几种)均禁止采用自耦变压器,只能采用双绕组的单相变压器,理由即在于此。

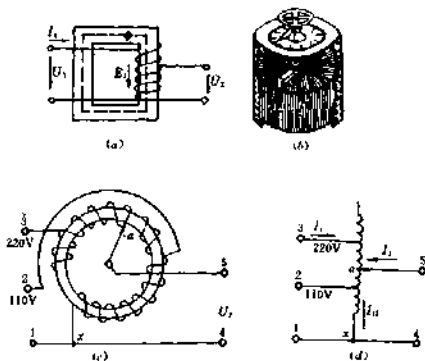


图 3-9 自耦调压器

(a)自耦变压器示意图 (b)自耦调压器 (c)自耦调压器示意图 (d)线路图

## 二、电压互感器

专供测量仪表使用的变压器称为仪用互感器,采用互感器的目的是:使测量仪表与高压电路绝缘,以保证工作安全;扩大仪表的量程。

电压互感器实质上是一种专用的降压变压器,它的作用是用来扩大交流伏特表的量程,其原理及其符号如图 3-10 所示,原绕组匝数较多,接到被测的高压电路上,副绕组匝数较少,连接一电压表。根据变压器原理,原、副绕组电压的关系为

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{N_1}{N_2} = K$$

或

$$U_1 = KU_2 \quad (3-11)$$

即被测电压  $U_1$  的数值等于电压表测出的  $U_2$  值再乘以变比  $K$ 。这种测量称为间接测量。

当电压表与一只配套的电压互感器配合使用时,在电压表的刻度盘上可直接读出互感器原边高压电压值。

无论电压互感器原边电压有多高,副边额定电压为同一标准值 100V。因此不同等级的电压互感器,其变比是不同的,如 6 000/100、10 000/100 等。

电压互感器的副绕组绝对不允许短路,因为副边短路时,会出现很大的短路电流,烧坏互感器。电压互感器副绕组的一端、铁心和外壳都要可靠地接地,以免当互感器绝缘损坏时高压

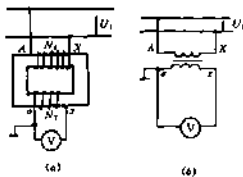


图 3-10 电压互感器

(a)原理图 (b)符号图

电串入低压,危及人身和设备安全。

### 三、电流互感器

电流互感器主要是用来扩大测量交流电流的  
量程,其原理及其符号如图 3-11 所示。

电流互感器原绕组用粗导线绕成,匝数为—  
匝或几匝,它串接在被测电路中。副绕组匝数较  
多,它与安培表连接成一个闭合回路。根据变压器  
的工作原理,可认为

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{N_2}{N_1} = \frac{1}{K} = K,$$

或 
$$I_1 = \frac{N_2}{N_1} I_2 = K I_2 \quad (3-12)$$

式中  $K$ , 是电流互感器的变换系数,称为变流比。

由式(3-12)可见,通过负载  $R$  的电流  $I_1$  等于副边安培表的读数  $I_2$  与变流比  $K$  的乘积。利  
用电流互感器可将大电流变换为小电流。大多数电流互感器副绕组的额定电流设计为 5A 或  
1A。当  $K=100$ ,若配以 5A 满偏的电流表,则最大可测 500A 的电流。不同等级的电流互感器,  
其变流比是不同的,如 40/5、75/5、100/5、200/5 等等。

在使用电流互感器时,在任何情况下副绕组绝对不允许开路,否则副绕组两端会产生高电  
压,危及人身和设备的安全。因此在电流互感器副边电路中不允许装熔断器。此外,为了运行  
安全,电流互感器副绕组的一端及铁心都要可靠接地。

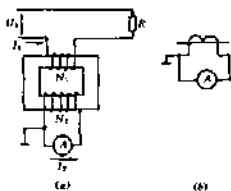


图 3-11 电流互感器  
(a)原理图 (b)符号图

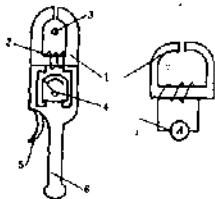


图 3-12 钳形电流表

- 1—铁心;2—副绕组;3—被测电流的导线;
- 4—电流表头;5—扳手;6—手柄

在许多既不切断电路而又需要进行  
电流测量的场合,通常使用钳形电流表。  
钳形电流表是电流互感器的另一种形  
式,其前端是两块可闭可开的钳形铁心,  
铁心上绕有电流互感器的副绕组,并与  
安培表相联,如图 3-12 所示。在测量时,  
先张开铁心,把待测电流的一根导线放  
入钳中,然后再把铁心闭合,这样被测导  
线便成为电流互感器的原绕组,由于电  
磁感应作用,电流表上就直接反应出所  
测电流的大小。

### 四、电焊变压器

生产上广泛采用的交流电弧焊机实  
际上就是一台电焊变压器。图 3-13 所示是一台带有电抗器的电焊变压器原理图。

对电焊变压器的基本要求是:

- (1)空载时副边电压必须具有 55 ~ 80V,以保证引燃焊接电弧;
- (2)在起弧或焊接过程中,经常短路,副边短路电流不致过大;

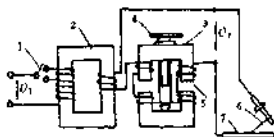


图 3-13 电焊变压器原理图

1—分接开关;2—变压器;3—可变电抗器;  
4—调接手柄;5—气隙;6—焊条;7—焊件

(3)电弧引燃后,副边电压要迅速下降,焊条与焊件间的电弧上约有 30~40V 的电弧压降;

(4)为了适应不同规格的焊条和焊件,焊接电流的大小要能调节。

电焊变压器的外特性,即副边电压  $U_2$  和副边电流  $I_2$  的关系曲线,如图 3-14 所示。

电力变压器的漏磁通较小,使漏阻抗很小,因此当副边电流变化时,副边电压变化是很小的,如图 3-14 中曲线 1。

由图 3-13 可见,在原绕组配有分接抽头,

并用一组分接开关调节副边的空载电压  $U_1$ ,即调节起弧电压在 55~80V 范围内。

电焊变压器除了原、副绕组之外还在副边电路中另外串接一个可调电抗器,这样可以获得较大的漏阻抗,在其两端产生较大的电压降,使引弧完毕后开始焊接时,焊条和工件之间的工作电压随电流增大而迅速下降,具有较陡的外特性,如图 3-14 中曲线 2 所示。

焊接时,焊条与焊件接触,即相当于短路,  $U_2 = 0$ ,由于电抗器有较大阻抗,具有一定的限流作用,短路电流  $I_2$  并不很大;当焊条提起时,焊条与焊件间形成电弧,即可进行焊接,此时焊条与焊件之间的电弧电压降约在 30~40V,如图 3-14 曲线 2 上的  $U_{LW}$ ,  $U_{LW}$  相当于电焊变压器的额定负载电压,此时输出的电流  $I_{2N}$  即为焊接电流。当焊条与焊件之间的距离变化而使电弧长度变化时,电弧电压降在  $U_{LW}$  上下变化,焊接电流在  $I_{2N}$  左右变化,由于电焊变压器的外特性很陡,当电弧电压降变化时,电弧电流的变化并不显著,使电弧比较稳定。

通过摇手柄来改变电抗器铁心的气隙,可改变漏阻抗,就可调节焊接电流的大小。

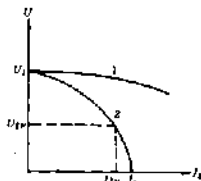


图 3-14 普通变压器和电焊变压器外特性

### 3-5 三相异步电动机的构造与工作原理

#### 一、三相异步电动机的构造

三相异步电动机按照转子结构的不同分为鼠笼式和绕线式两种。三相异步电动机主要由静止不动的定子和可以转动的转子两大部分组成。鼠笼式三相异步电动机的基本部件如图 3-15 所示。

##### 1. 定子

定子由机座、定子铁心和三相定子绕组三部分组成。定子铁心是电动机磁路的一部分,通常用厚度为 0.5mm 互相绝缘的硅钢片压叠成圆筒形状,内圆周表面有均匀分布的槽,见图

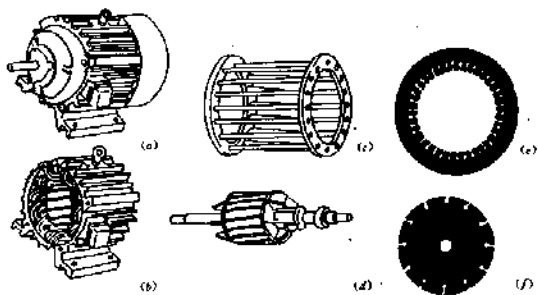


图 3-15 鼠笼式异步电动机的结构

(a)外形 (b)定子 (c)铜条鼠笼转子绕组:

(d)铸铝鼠笼转子 (e)定子冲片 (f)转子冲片

3-15(e), 用来嵌放三相定子绕组。定子绕组的 3 个首端  $U_1, V_1, W_1$  和 3 个尾端  $U_2, V_2, W_2$  分别引至电动机出线盒中的 6 个接线柱上, 如图 3-16 所示。根据电源电压和电动机额定电压可以把定子三相绕组接成星形或三角形。

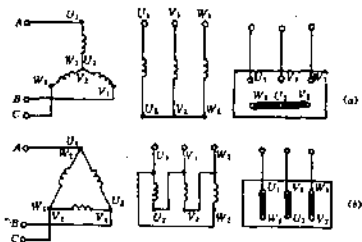


图 3-16 三相定子绕组的接线法

(a)星形接法 (b)三角形接法

### 3. 转子

转子是电动机的旋转部分, 它由转轴、转子铁心和转子绕组组成。

转子铁心也是电动机磁路的一部分, 由厚度为 0.5mm 的硅钢片叠压成圆柱形, 压装在转轴上, 其外圆筒表面均匀冲有槽, 如图 3-15(f) 所示, 槽内安放转子绕组。

转子绕组分为鼠笼式和绕线式两种类型。

鼠笼式绕组是用铜条安放在转子铁心的槽内, 两端焊上两个端环, 自成闭合路径, 形状像



鼠笼,如图 3-15(c)所示。对于中、小型电动机一般都采用铸铝方法将转子导体、两个端环及风扇一同铸成。如图 3-15(d)所示。具有鼠笼式转子绕组的电动机,称为鼠笼式异步电动机。

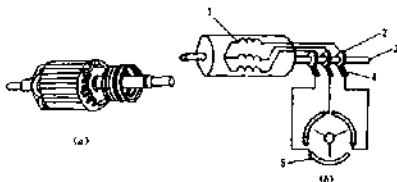


图 3-17 绕线式异步电动机的构造

(a)外形图 (b)接线图

1—转子绕组;2—滑环;3—刷;4—电刷;5—三相可变电阻器

绕线式转子绕组同定子绕组一样,也是三相的,作星形联接。每相的首端分别接到固定在转轴上的 3 个滑环上,环与环、环与转轴都互相绝缘。在各个环上,分别用弹簧压着固定不动的电刷,通过电刷与滑环的接触,使转子绕组与外接变阻器接通,以便改善起动性能和调节转速,如图 3-17(b)所示。

## 二、旋转磁场

### 1. 一对磁极(P=1)的旋转磁场

设三相异步电动机定子槽内放置有彼此互差 $120^\circ$ 的三相对称绕组AX、BY和CZ,将三相绕组接成星形,当三相定子绕组接通三相对称电源时,绕组中流过三相对称电流,即

$$i_A = I_m \sin \omega t$$

$$i_B = I_m \sin(\omega t - 120^\circ)$$

$$i_C = I_m \sin(\omega t + 120^\circ)$$

其波形如图 3-18 所示。

我们规定,在电流的正半周时,其值为正,电流由绕组首端流进,尾端流出;在电流的负半周时,其值为负,电流由尾端流进,首端流出。凡电流流进的一端标以 $\odot$ ,电流流出的一端标以 $\ominus$ 。设三相电流的相序为A-B-C,对应图 3-18 的波形图可知, $\omega t = t_1$ 时,A相绕组电流 $i_A = 0$ ,B相绕组电流 $i_B$ 为负,应从尾端Y流进,从首端B流出,C相绕组电流 $i_C$ 为正,应从首端C流进,从尾端Z流出。三相交流电在此刻所产生的磁场方向按右手螺旋定则确定,其方向是由A指向X,产生一对磁极(P=1)的磁场,如图 3-18(a)所示。 $\omega t = t_2$ 时,电流随时间变化了 $120^\circ$ , $i_A$ 为正,电流从A端流进,从X端流出, $i_B = 0$ , $i_C$ 为负,即从C端流出,从Z端流进。此时,电流及其磁场的方向如图 3-18(b)所示。显然,与 $t_1$ 时刻相比,磁场按顺时针方向转过 $120^\circ$ ,按同样的分析方法可知,电流变化一个周期( $360^\circ$ ),磁场也转过 $360^\circ$ ,即一圈。

根据上面的分析,三相对称电流通入电动机的三相定子绕组,在定子铁心中所产生的合成磁场是随电流的交变而在空间不断地旋转的,称为旋转磁场。

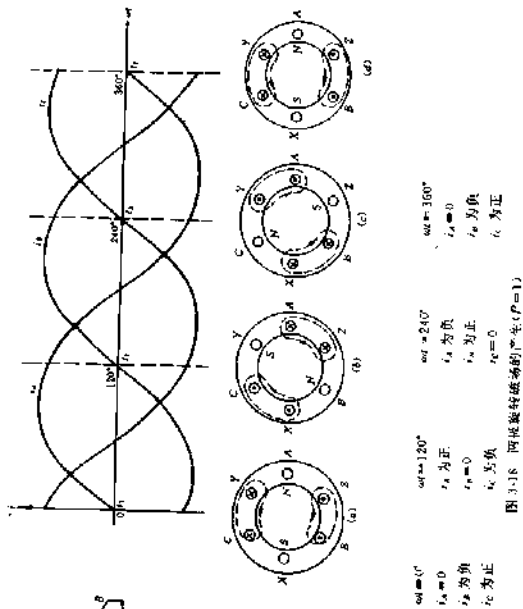
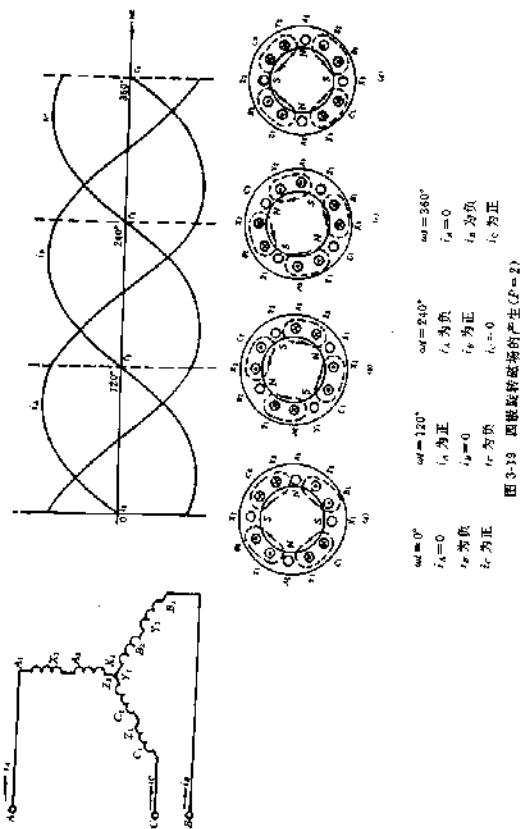


图 3-18 四极旋转磁场的产生 ( $P=4$ )



## 2. 两对磁极( $P=2$ )的旋转磁场

如果将三相定子绕组由六个线圈组成,即每相绕组由两个线圈串联,各线圈的首端或尾端之间彼此相差 $60^\circ$ ,分别放置在12个槽内,联接成星形,如图3-19所示,然后通入三相电源,流入三相绕组的电流所产生的合成磁场将是一个四极旋转磁场,即磁极对数 $P=2$ ,如图3-19(a)(b)(c)(d)所示。由图可见,当电流变化一个周期时,磁场旋转半圈。分析方法与两极旋转磁场相似。

由此可见,异步电动机的磁极对数决定于定于绕组的分布和联接方式。

## 3. 旋转磁场的转速和转向

对于一对磁极( $P=1$ )的旋转磁场,电流变化一个周期,旋转磁场在空间旋转一圈。设电流的频率为 $f_1$ ,即电流每秒种变化 $f_1$ 次或每分钟变化 $60f_1$ 次,则两极旋转磁场的转速为 $n_s = 60f_1$  r/min,转速的单位为转每分(r/min)。

对于两对磁极( $P=2$ )的旋转磁场,当电流变化一个周期时,磁场只旋转了半转,与 $P=1$ 情况相比,转速慢了一半,即 $n_s = \frac{60f_1}{2}$  r/min。

由此推之,当旋转磁场具有 $P$ 对磁极时,磁场的转速为

$$n_s = \frac{60f_1}{P} \text{ r/min} \quad (3-13)$$

上式表明,旋转磁场的转速 $n_s$ 决定于电流频率 $f_1$ 和磁极对数 $P$ 。 $n_s$ 又称为同步转速。在我国工频 $f_1=50\text{Hz}$ 情况下, $P=1$ 时, $n_s=3000\text{r/min}$ ;  $P=2$ 时, $n_s=1500\text{r/min}$ ;  $P=3$ 时, $n_s=1000\text{r/min}$ 。可见,磁极数越多,转速越低。

从图3-18可知,旋转磁场是按电流相序A—B—C的顺序旋转的,即旋转磁场的转向与通入绕组的三相电流的相序一致。如果把三相定子绕组同电源联接的三根导线中的任意两根对调,例如对调了三相绕组的B相与C相,使绕组中电流的相序变为A—C—B,再用前述分析方法可知,旋转磁场因此反转,变为逆时针方向。

## 三、三相异步电动机的转动原理

以磁极对数 $P=1$ 的旋转磁场为例,来说明鼠笼式电动机的转动原理。

旋转磁场按顺时针方向以同步转速 $n_s$ 旋转,而转子最初处于静止状态,相当于磁极不动而转子按逆时针方向旋转,此时,转子导体切割磁力线,产生感应电动势,根据右手定则可确定出感应电动势的方向,在N极下面的转子导体中为出来,在S极下面的转子导体中为进去,如图3-20所示。鼠笼式转子导体是由端环联接构成的闭合回路,故感应电动势在转子导体内产生感应电流,转子导体成了载流导体。载流的转子导体在磁场中要受到电磁力 $F$ 的作用,电磁力 $F$ 的方向由左手定则确定,为顺时针方向。电磁力 $F$ 形成电磁转矩,作用在转子的转轴上而使转子转动起来。显然,转子的转动方向与旋转磁场的转向相同。

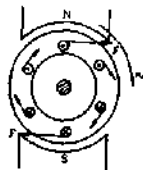


图3-20 异步电动机的转动原理

异步电动机转子的转速 $n$ 总是低于旋转磁场的同步转速 $n_s$ 。如果 $n=n_s$ ,则转子与旋转磁场之间处于相对静止,转子导体不再切割磁力线,因而转子电流

和转矩不再存在,转子就无法继续以 $n_0$ 的转速转动,必须慢下来。转子转速 $n$ 总是与旋转磁场转速 $n_0$ 保持一定的转速差,这就是异步电动机名称的由来。

异步电动机的转速 $n$ 与同步转速 $n_0$ 的差值与 $n_0$ 之比,称为转差率,用 $S$ 表示,即

$$S = \frac{n_0 - n}{n_0} \quad (3-14)$$

转差率反映了电动机的运行速度。当电动机起动时, $n=0$ ,转差率 $S=1$ ;当 $n=n_0$ 时(理想情况), $S=0$ 。一般 $S$ 的变化范围在0到1之间。

### 3-6 三相异步电动机的电磁转矩和机械特性

#### 一、电磁转矩

三相异步电动机的电磁转矩 $T$ 是由旋转磁场每极磁通 $\phi$ 与转子电流 $I_2$ 相互作用而产生的,其公式为

$$T = K_T \phi I_2 \cos \varphi_2 \quad (3-15)$$

式中  $K_T$  为转矩常数,它与电动机的结构有关。

$\phi$  为旋转磁场每极磁通。

$I_2$  为转子每相绕组电流的有效值。

$\cos \varphi_2$  为转子每相电路的功率因数。

为了进一步分析电磁转矩 $T$ 与定子每相电压 $U_1$ 以及转差率 $S$ 等关系,对式(3-15)经过一系列数学分析,可得电磁转矩的另一种表达式为

$$T = KU_1^2 \frac{SR_2}{R_1^2 + (SX_{20})^2} \quad (3-16)$$

式中  $K$  为比例常数。

$U_1$  为电源相电压。

$S$  为电动机的转差率。

$R_2$  为转子每相绕组的电阻。

$X_{20}$  为转子静止时转子每相绕组的感抗。

由上式可见,电磁转矩 $T$ 与定子每相电压 $U_1$ 的平方成正比,所以当电源电压有所变化时,对电磁转矩的影响很大。例如电源电压降低到额定电压的80%时,电动机发出的电磁转矩仅为额定值的64%。从而影响电动机的正常运行和工作质量,甚至烧毁绕组。

#### 二、机械特性

根据式(3-16)可以作出电动机的电磁转矩与转差率的关系 $T=f(S)$ 曲线叫作异步电动机的转矩特性,如图3-21(a)所示。在 $S$ 值较小的范围内(如 $S < 0.1$ ), $SX_{20} \ll R_1$ , $(SX_{20})^2 \ll R_1^2$ ,则式(3-16)分母中的 $(SX_{20})^2$ 项可忽略,因此转矩与转差率近似成正比变化,故 $aob$ 曲线 $T$ 随 $S$ 的增加而上升。在 $S$ 较大的范围内, $R_2 \ll SX_{20}$ , $R_2^2 \ll (SX_{20})^2$ ,式(3-16)分母中的 $R_2^2$ 项可忽略,因此 $T$ 与 $S$ 近似成反比变化,在 $bc$ 曲线 $T$ 随 $S$ 的增加而下降。

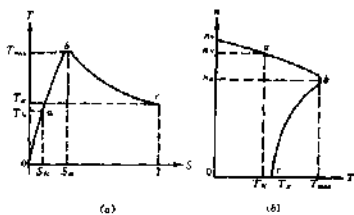


图 3-21 异步电动机的转矩特性和机械特性  
(a) 转矩特性  $T=f(S)$  曲线 (b) 机械特性  $n=f(T)$  曲线

在分析和使用电动机时,把  $T=f(S)$  关系转变为电磁转矩  $T$  与转速  $n$  的关系,较为直观方便。把  $S = \frac{n_s - n}{n_s}$  代入式(3-16),可得电磁转矩与转速的关系  $n=f(T)$  曲线,称为异步电动机的机械特性,如图 3-21(b)所示。

研究机械特性的目的是为了分析电动机的运行性能。应注意机械特性曲线上三个转矩和两个运行区间。

### 1. 三个转矩

#### (1) 额定转矩 $T_N$

异步电动机在额定负载时转轴输出的电磁转矩称为额定转矩,用  $T_N$  表示。

电动机的额定转矩可以由电动机铭牌数据用下式计算

$$T_N = 9550 \frac{P_N}{n_N} \text{ 牛顿} \cdot \text{米} (\text{N} \cdot \text{m}) \quad (3-17)$$

式中  $P_N$  为异步电动机的额定功率,单位为千瓦(kW);

$n_N$  为异步电动机的额定转速,单位为转/分(r/min);

#### (2) 最大转矩 $T_{max}$

机械特性曲线上的  $T_{max}$  称为最大转矩或临界转矩,它是电动机电磁转矩的最大值,与  $T_N$  相对应的转差率  $S_c$  称为临界转差率,对式(3-16)求微分

$$\frac{dT}{dS} = 0$$

可求得

$$S_c = \frac{R_2}{X_{2s}} \quad (3-18)$$

再将  $S = S_c$  代入式(3-16),可得最大转矩为

$$T_{max} = K \frac{U_1^2}{2X_{2s}} \quad (3-19)$$

由式(3-19)可知,最大转矩  $T_{max}$  与电源电压  $U_1$  成正比,而与转子电阻  $R_2$  无关。

每台异步电动机在额定电压和额定频率的情况下,它产生的电磁转矩只能有一个最大值  $T_{max}$ 。当负载转矩大于最大转矩时,电动机就带不动负载而被迫停转,造成电动机电流过大,电机严重过热,以致烧绕。最大转矩反映了电动机短时过载能力的极限。通常异步电动机所产生

的最大转矩 $T_{max}$ ,可达到额定转矩 $T_N$ 的1.8~2.5倍。最大转矩与额定转矩之比,称为过数系数,用 $\lambda$ 表示,即

$$\lambda = \frac{T_{max}}{T_N} \quad (3-20)$$

一般异步电动机的过数系数为1.8~2.5,对于起重机械用的电动机,其 $\lambda$ 可达2.2~2.8。

### (3) 起动转矩 $T_s$

电动机刚起动( $n=0, S=1$ )时的转矩称为起动转矩。将 $S=1$ 代入式(3-16)得

$$T_s = K \frac{R U_1^2}{R_2^2 + X_{2s}^2} \quad (3-21)$$

由上式可见, $T_s$ 与 $U_1^2$ 成正比,当电源电压 $U_1$ 降低时,机械特性曲线向左移动,最大转矩和起动转矩均下降,但 $\lambda$ 保持不变,如图3-22所示。当转子电阻 $R_2$ 适当增大时,起动转矩会增大,如图3-23所示。

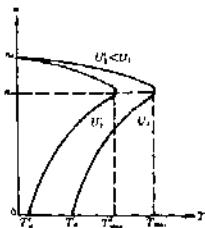


图 3-22 电源电压下降时 $n=f(T)$ 曲线左移  
( $R_2$  = 常数)

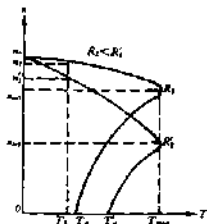


图 3-23 转子电阻增加时 $n=f(T)$ 曲线右移  
( $U_1$  = 常数)

只有当电动机的起动转矩大于负载转矩时电动机才能起动,并从 $c$ 点开始逐渐加速,这时电动机的电磁转矩 $T$ 沿着 $n=f(T)$ 曲线 $cb$ 部分随转速升高而增大,经过最大转矩 $T_{max}$ 后又沿曲线 $ba$ 部分逐渐下降,直至电磁转矩等于负载转矩时,电动机就以某一转速等速旋转。

异步电动机的起动转矩 $T_s$ 与额定转矩 $T_N$ 之比值称为电动机的起动系数,用 $K_s$ 表示,

$$K_s = \frac{T_s}{T_N} \quad (3-22)$$

一般鼠笼式异步电动机的起动系数为1~2。在额定负载下,只有 $K_s > 1$ 的电动机才能起动。

### 2. 两个运行区

当异步电动机的电磁转矩 $T$ 等于负载转矩 $T_L$ 时,即 $T=T_L$ ,电动机做等速旋转。当 $T > T_L$ 时,电动机做加速旋转。当 $T < T_L$ 时,电动机做减速旋转,在负载转矩发生变化时,电动机若能自动调节本身的新转速和电磁转矩,达到新的平衡状态,称电动机能稳定运行;否则,为非稳定运行。

#### (1) 稳定运行区

特性曲线的 $0 < S < S_m$ 这一范围,称为稳定运行区。在电动机运行过程中,当负载转矩减小时,则 $T < T_L$ ,转差率 $S$ 随之减小,电动机转速 $n$ 上升,电磁转矩相应地减小,当电磁转矩等

于负载转矩时,即  $T' = T'_L$ ,此时电动机在比原来稍高的新转速下稳定运行。这一过程可表示为

$$T_L \downarrow \rightarrow S \downarrow \rightarrow n \uparrow \rightarrow T \downarrow \rightarrow T' = T'_L$$

反之,当负载转矩增大,  $T'_L > T_L$  时,  $S$  增大,  $n$  下降,电磁转矩  $T$  增加,当电磁转矩等于负载转矩时,即  $T' = T'_L$ ,这时电动机又在比原来稍低的新转速下稳定运行。其过程为

$$T_L \uparrow \rightarrow S \uparrow \rightarrow n \downarrow \rightarrow T \uparrow \rightarrow T' = T'_L$$

由上可见,在稳定运行区,电动机能自动地调节其转速和电磁转矩以适应负载的变化。

### (2) 非稳定运行区

特性曲线的  $S_0 < S < 1$  这一范围,称为非稳定运行区。当负载转矩减小时,电动机转速上升,  $S$  减小,由于曲线上的这一区域内  $T$  与  $S$  成反比而使  $T$  增大,转速继续上升,其过程为

$$T_L \downarrow \rightarrow n \uparrow \rightarrow S \downarrow \rightarrow T \uparrow \rightarrow n \uparrow \uparrow \rightarrow T \uparrow \uparrow \rightarrow n \uparrow \uparrow \uparrow \dots$$

最后越过  $b$  点,进入稳定运行区,转速稳定在  $ab$  区间的某一点上。

反之,当负载转矩增大时,电动机转速下降,  $S$  增大,  $T$  减小,转速继续下降,其过程为

$$T_L \uparrow \rightarrow n \downarrow \rightarrow S \uparrow \rightarrow T \downarrow \rightarrow n \downarrow \downarrow \rightarrow T \downarrow \downarrow \rightarrow n \downarrow \downarrow \downarrow \dots$$

最终使  $n=0$ ,电动机停止转动。

在非稳定运行区,电动机已不能自动调节本身的转速和电磁转矩来适应负载转矩的变化了。

从机械特性曲线可知,异步电动机正常工作在稳定运行区,即特性曲线的  $ab$  段,此段特性曲线比较平直,电动机从空载到满载过程中电磁转矩变化范围较大,而转速下降较小,这种机械特性称为硬特性。金属切削机床、通风机、压缩机等生产机械都需要具有硬特性的电动机来拖动。

**例 3-4** 已知一台三相笼笼式异步电动机的技术数据如下:额定功率  $P_{2N}=15\text{kW}$ ,额定转速  $n_N=1450\text{r/min}$ ,启动系数  $K_s=1.6$ ,过载系数  $\lambda=2.1$ 。求电动机的额定转矩、启动转矩和最大转矩。

**解** 额定转矩

$$T_N = 9550 \frac{P_{2N}}{n_N} = 9550 \frac{15}{1450} = 98.8 \text{ N} \cdot \text{m}$$

启动转矩

$$T_d = 1.6T_N = 1.6 \times 98.8 = 158 \text{ N} \cdot \text{m}$$

最大转矩

$$T_{\max} = 2.1T_N = 2.1 \times 98.8 = 207.5 \text{ N} \cdot \text{m}$$

## 3-7 三相异步电动机的使用

三相异步电动机的使用,主要包括启动、反转、调速和制动。

### 一、笼笼式异步电动机的启动

电动机接通电源,转子由静止到稳定运行的过程叫启动。在启动瞬间,因为转子是静止的,



旋转磁场与转子的相对运动速度最大,转子绕组中的电流也最大,于是定子绕组也相应出现了很大的起动电流,其值约为额定电流的4~7倍,即 $I_s = (4 \sim 7)I_N$ 。一般中小型电动机的起动时间约为1~3s,大型电动机起动时间为十几秒至几十秒。异步电动机的起动电流虽然很大,但起动时间短暂,起动电流又随着转速的上升而很快下降,因此不会使电动机过热而损坏。但过大的起动电流会使供电线路上的压降增大,使负载端电压突然降低,这不仅会影响同一线路上其它负载的正常工作,而且会使电动机本身的起动转矩减小,甚至不能起动。因此电动机的起动方法总是以降低起动电流和保证足够的起动转矩来综合考虑的。鼠笼式异步电动机的起动有直接起动和降压起动两种方法。

### 1. 直接起动

将额定电压直接加在电动机的定子绕组上的起动方法,称为直接起动。究竟多大功率的鼠笼式电动机能允许直接起动,要视本单位电源变压器容量大小及电动机功率大小而定。只要电动机的容量不超过变压器容量的20%~30%,或直接起动引起的电网压降不超过额定电压的5%~15%时,可允许直接起动。但一般可由下列经验公式确定

$$\frac{I_s}{I_N} \leq \frac{3}{4} + \frac{\text{电源变压器容量(kVA)}}{4 \times \text{电动机功率(kW)}} \quad (3-23)$$

在实际工作中,容量在7.5kW以下的电动机一般都可以直接起动。

### 3. 降压起动

在电动机起动时降低加在定子绕组上的电压,待起动完毕,再加全压运行。对于不允许直接起动的鼠笼式异步电动机,必须采用降压起动的方法。

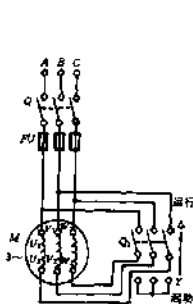


图 3-24 Y-Δ 起动原理图

#### (1) Y-Δ 降压起动

这种方法只适用于正常运行时定子绕组是Δ接法的鼠笼式异步电动机,即在起动时,将定子绕组接成Y形,起动后再把定子绕组改接成Δ形,使电动机在额定电压运转。Y-Δ起动的原理电路如图3-24所示。起动时,接通电源开关Q,再把Q1合向“启动”位置,电动机定子绕组接成Y形,等电动机转速升高后,把Q1切换到“运行”位置,定子绕组接成Δ形,进入正常运行。

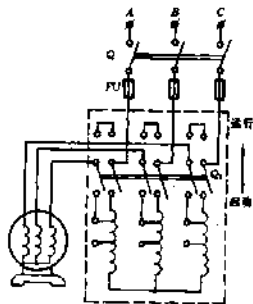


图 3-25 自耦变压器起动原理图

由于启动时将定子绕组接成 Y 形,使加在每相绕组上的相电压降至直接启动时的  $\frac{1}{\sqrt{3}}$ ,所以启动电流和启动转矩都降为直接启动时的  $\frac{1}{3}$ ,在允许轻载或空载启动的情况下,此法得到广泛应用。

### (2) 自耦降压启动

这种方法适用于定子绕组是 Y 接法的鼠笼式电动机。其原理电路如图 3-25 所示。启动时接通电源开关 Q,再把 Q<sub>1</sub> 合向“启动”位置,电网电压经自耦变压器降压后加到定子绕组上。等电动机转速升高后将 Q<sub>1</sub> 合向“运行”位置,自耦变压器被切除,电动机进入正常运行。自耦变压器通常备有三个抽头,分别输出电源电压的 40%、60%、80%,以供对启动转矩的不同要求进行选择。设自耦变压器的变比为 K,电动机每相绕组阻抗为 |Z|。在直接启动时,启动电流为  $I_s = \frac{U_1}{|Z|}$ ,而采用自耦变压器启动时,定子绕组的电流即变压器副边电流为

$$I_2 = \frac{U_1}{|Z|} = \frac{U_1}{K} \cdot \frac{1}{|Z|} \quad (3-24)$$

而此时变压器原边电流等于副边电流的  $\frac{1}{K}$ 。故采用自耦降压法后电动机的启动电流为

$$I_s = \frac{I_2}{K} = \frac{U_1}{K} \cdot \frac{1}{K} \cdot \frac{1}{|Z|} = \frac{1}{K^2} \cdot \frac{U_1}{|Z|} = \frac{I_s}{K^2} \quad (3-25)$$

可见,采用自耦变压器启动法,启动电流为直接启动电流的  $\frac{1}{K^2}$ 。但启动转矩也随之降低了,只适应于轻载或空载启动。

## 二、鼠笼式异步电动机的反转

在电力拖动中,如卷扬机、桥式起重机等,经常需要改变电动机的旋转方向。异步电动机的旋转方向是与旋转磁场的方向相同,而旋转磁场的方向又决定于三相电流的相序,因此要改变电动机的转向,只要把电动机定子绕组的三根电源线中的任意两根对调,电动机就反转了。

## 三、鼠笼式异步电动机的调速

在同一负载下改变电动机的转速,称为调速。由式(3-14)可得

$$n = (1 - S) \frac{60f_1}{P} \quad (3-26)$$

由此可知,改变电源频率  $f_1$ 、极对数  $P$  和转差率  $S$  都可进行调速。改变  $f_1$  与  $P$  应用于鼠笼式电动机的调速,对于绕线式电动机是采用改变  $S$  来实现调速。

### 1. 变频调速

这种调速方法需要有频率连续可调的变频装置,一般采用晶闸管交-直-交变频器,如图 3-26 所示。整流器将 50Hz 工频交流电整流成直流电,逆变器把直流电变成频率为  $f$  和电压  $U$  大小都可连续调节的三相交流电,供给鼠笼式电动机。从而实现电动机的无级调速。

### 2. 变极调速

改变鼠笼式电动机定子绕组的连接方式可以改变旋转磁场的极对数。这种磁极可以改变的电动机称为多速电动机。以极数为 2:4 的双速电动机为例,如图 3-27 所示。图中画出了 A 相绕组的两种接法。把 A 相绕组 AX 分成两半,由线圈 A<sub>1</sub>X<sub>1</sub> 和 A<sub>2</sub>X<sub>2</sub> 组成。当 A<sub>1</sub>X<sub>1</sub> 和 A<sub>2</sub>X<sub>2</sub>

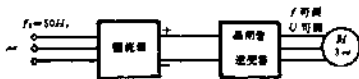


图 3-26 鼠笼式电动机变频调速

串联组成时,如图 3-27(a)(c)所示,得出  $P=2$ 、同步转速  $n_s=1\ 500r/min$ 。若  $A_1X_1$  和  $A_2X_2$  改为并联组成时,如图 3-27(b)(d)所示,得出  $P=1$ 、 $n_s=3\ 000r/min$ ,因为极对数是成倍的变化,所以电动机转速只能整数倍变化,称为有级调速。

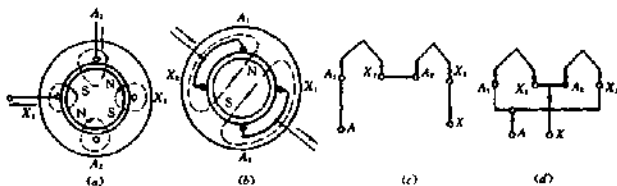


图 3-27 变极调速

(a)(c)串联 (b)(d)并联

#### 四、异步电动机的制动

在切断电动机电源时,施加一个与电动机旋转方向相反的制动转矩,使电动机迅速减速或停止,这一过程称为制动。异步电动机制动的有两种,即机械制动和电气制动。

##### 1. 机械制动

电磁抱闸是机械制动应用最普遍的设备。它是在电动机轴上加设闸瓦式制动器,制动器的夹紧和松开由弹簧和电磁铁互相配合来执行,如图 3-28 所示。

电动机正常运转时,电磁抱闸的线圈与电动机同时通电,电磁铁吸合,使抱闸打开。电动机断电时,抱闸线圈同时断电,电磁铁释放,在弹簧作用下,抱闸把电动机转子紧紧抱住,可使电动机迅速实现制动停车。

##### 2. 电气制动

常用的电气制动方法有能耗制动和反接制动两种。

##### (1) 能耗制动

在电动机断开三相电源的同时,把三极开关倒向下方,两带 1、4 弹簧,5—电磁铁,6—杠杆相定子绕组接通直流电源,如图 3 29 所示。由于直流电流产生的磁场是恒定不动的,而转子由

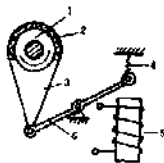


图 3 28 电磁抱闸示意图

1—电动机转子;2—橡皮;3—弹簧

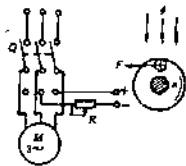


图 3-29 能耗制动

于惯性继续朝原方向旋转,于是在转子绕组内产生感应电动势和电流,根据右手定则和左手定则可确定出这时转子电流与恒定磁场相互作用,受到电磁力  $F$  的作用,产生制动转矩,它与电动机转动的方向相反,使电动机迅速停转。

制动转矩的大小与直流电流的大小有关,直流电流可通过电位器  $R$  来调节,其值一般为电动机额定电流的 0.5~1 倍。

切断电动机电源后,消耗转子上储存的动能并转换为电能来进行制动的方法,称为能耗制动。

### (2)反接制动

欲使电动机停转,可将接到电动机三根电源线中的任意两根对调,使定子旋转磁场反向,转子受到与原来旋转方向相反的制动转矩,使电动机很快停止转动。反接制动的原理电路如图 3-30 所示。当转速接近于零时,利用控制电器(如速度继电器)将电源自动切断以免电动机反转。

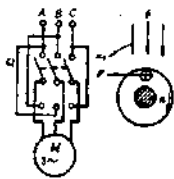


图 3-30 反接制动

在反接制动时,由于旋转磁场与转子的相对转速  $(n_s + n)$  很大,因而定子电流很大,为了限制电流,对大功率的鼠笼式电动机采用了定子电路串电阻,绕线式电动机采用转子串电阻的方法减小电流。

这种制动方法简单可靠,制动效果好,但能量消耗大,振动和冲击力也较大,会影响加工的精确度。常用于起停不频繁,功率小于 10kW 的中小型切削机床及辅助性的电力拖动中。

## 五、绕线式异步电动机的起动

对于绕线式异步电动机可以采用在转子电路中串接变阻器  $R_s$  进行起动,如图 3-31 所示。起动时,先将起动变阻器  $R_s$  的阻值调到最大位置,然后接通电动机的电源进行起动,随着电动机转速升高,分级切除起动变阻器的阻值,直到转速接近额定值时,再将起动变阻器的全部电阻切除使转子绕组短接,电动机进入正常运行,起动过程结束。这种起动方法既可减小起动电流又可增大起动转矩,在使用变阻器起动时,不应使起动时间过长,应将变阻器的阻值在一定时间内降至零,以免烧毁变阻器,而且当电动机停转后,将变阻器手柄移到最大电阻位置,以便第二次起动。

## 六、绕线式异步电动机的调速

绕线式电动机是采用改变转子电路电阻的方法进行调速,其接线图和图 3-31 相同,只是将起动变阻器调换为调速变阻器就行了。从图 3-23 可见,在负载转矩  $T_2$  一定的情况下,转子电阻由  $R_2$  增加到  $R_2'$  时,转速将从  $n_1$  下降到  $n_1'$ ,改变转子电路中的电阻,就可改变电动机的转速。

这种调速范围不能太大,一般 3:1。因为要使转速降得很低,就要串接大电阻,使机械特性很陡,转速难以稳定,电能损耗也较大。由于这种调速方法简单易行,目前仍广泛应用于起重

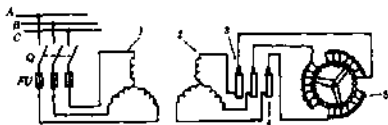


图 3-31 绕线式电动机的起动原理图

1-定子;2-转子;3-电刷;4-滑环;5-变阻器点。

运输机械等生产设备上。另外,调速变阻器是按长时间通过转子电流运行设计的,而起动变阻器只是在启动过程中短时间通过电流,故调速变阻器可兼作启动变阻器,反之则不行。

例 3-5 有一台 40kW 的电动机,其启动电流与额定电流之比为 6,已知电源变压器容量为 180kVA,问这台电动机能否采用直接启动?

解 因  $\frac{I_n}{I_N} = 6$

$$\frac{3}{4} + \frac{180}{4 \times 40} = 1.88 < 6$$

所以不允许该机直接启动。

### 3-8 三相异步电动机的铭牌数据与选择

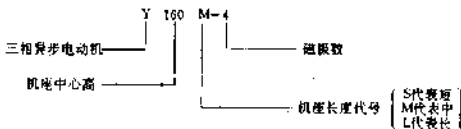
#### 一、三相异步电动机的铭牌数据

今以 Y160M-4 型电动机为例,来说明铭牌上各个数据的意义。

三相异步电动机			
型号	Y160M-4	功率	11kW
电压	380V	电流	22.6A
转速	1460r/min	绝缘等级	B
		工作方式	连续
			年 月

此外,它的技术数据还有:效率 88%,功率因数 0.84,  $\frac{I_K}{I_N} = 7$ ,  $\frac{T_n}{T_N} = 2.2$ ,  $\frac{T_{max}}{T_N} = 2.2$ 。

#### 1. 型号



国产常用系列异步电动机技术数据见表 3-2 所示。

## 2. 功率和效率

铭牌上所标的功率值是指电动机在额定状态下轴上输出的机械功率,即是电动机的额定功率  $P_{2N}$ 。效率是指电动机额定运行时,输出功率与输入功率的比值。由产品目录上查得的输

表 3-2 常用系列异步电动机技术数据举例

型 号	额定 功率 /kW	额定 电压 /V	满 载 时				$\frac{I_m}{I_N}$	$\frac{T_m}{T_N}$	$\frac{T_{max}}{T_N}$
			转速 /r (min) <sup>-1</sup>	电 流 /A	效 率 / %	功率 因数 $\cos\phi$			
JB1 2	1.0	220/380	2850	3.6/2.06	78.5	0.85	6.0	1.6	2.2
J <sub>1</sub> -61-2	17	380	2920	32	88.5	0.91	7.0	1.2	2.2
J <sub>1</sub> -62 4	17	380	1460	32.5	89	0.88	6.5	1.2	1.8
J <sub>1</sub> -71-6	17	380	970	35	88	0.84	6.5	1.2	1.8
J <sub>1</sub> -82-6	4.0	380	970	77	90.5	0.87	6.5	1.2	1.8
J <sub>1</sub> -92-10	4.0	380	580	86	89.5	0.79	4	1.0	1.8
JO <sub>2</sub> -11-2	0.8	220/380	2810	5.13/1.81	77.5	0.85	7.0	1.8	2.2
JO <sub>2</sub> -21-2	1.5	220/380	2860	5.61/3.24	81	0.87	7.0	1.8	2.2
JO <sub>2</sub> 32-2	4.0	380	2860	8.06	85.5	0.88	7.0	1.8	2.2
JO <sub>2</sub> -41-2	5.5	380	2920	11	86.5	0.88	7.0	1.6	2.2
JO <sub>2</sub> -41-6	3.0	220/380	950	12/6.94	82.5	0.78	6.5	1.9	1.8
JO <sub>2</sub> -42-8	3.0	220/380	710	13/7.5	82.5	0.72	5.5	1.8	1.8
JO <sub>2</sub> -52-4	7.5	380	1650	20	87.5	0.87	7.0	1.4	2.0
JO <sub>2</sub> -52-6	7.5	380	960	16.2	86	0.81	6.5	1.4	1.8
JO <sub>2</sub> -52-8	5.5	380	710	12.7	85	0.77	5.5	1.5	1.8
JO <sub>2</sub> 61-2	17	380	2940	32	89.5	0.90	7.0	1.3	2.2
JO <sub>2</sub> 62-6	13	380	970	26.2	87.5	0.83	6.5	1.4	1.8
JO <sub>2</sub> -62-8	10	380	725	22	87	0.80	5.5	1.3	1.8
JO <sub>2</sub> -72-2	30	380	2940	56	89.5	0.91	7.0	1.2	2.2
JO <sub>2</sub> -71-4	22	380	1470	42.3	89.5	0.88	7.0	1.2	2.0
JO <sub>2</sub> 72 6	22	380	970	43.1	87	0.85	6.5	1.4	1.8
JO <sub>2</sub> 71-8	13	380	725	27.8	87.5	0.81	5.5	1.3	1.8
JO <sub>2</sub> -82-2	40	380	2950	74.3	90	0.91	6.5	1.2	2.2
JO <sub>2</sub> 82-4	40	380	1470	75	91	0.89	6.5	1.2	2.0
JO <sub>2</sub> -82-6	40	380	975	74	90.5	0.87	6.5	1.4	1.8
JO <sub>2</sub> -81-8	22	380	730	46	88.5	0.82	5.5	1.3	1.8
JO <sub>2</sub> 82-8	30	380	730	61.5	89	0.83	5.5	1.3	1.8
JO <sub>2</sub> -82-10	22	380	580	49.2	88	0.77	5.5	1.2	1.8
JO <sub>2</sub> -92-8	55	380	730	108	91	0.85	5.5	1.3	1.8
JO <sub>2</sub> -91-10	30	380	580	86	88.5	0.78	5.5	1.2	1.8
JO <sub>2</sub> -92 10	40	380	586	86	89.5	0.79	5.5	1.2	1.8
JO <sub>2</sub> -801-2	1.1	220/380	2800	2.52	78	0.85	6.5	2.4	
JO <sub>2</sub> -1605-4	15	380	1460	30.4	87.5	0.86	7.0	2.0	2.2

Y系列三相异步电动机(部分型号)技术数据

(续上表)

型 号	额定 功率 /kW	满 载 时				启动 转矩	启动 电流	最大 转矩
		电 流 /A	转速 /(min) <sup>-1</sup>	效率 /%	功率因数 /cosφ	额定 转矩	额定 电流	额定 转矩
(一) 二极:同步转速3000r/min(部分型号)								
Y80L-2	0.75	1.8	2825	75	0.84	2.2	7.0	2.2
Y112M-2	4	8.2	2800	85.5	0.87	2.2	7.0	2.2
Y160M <sub>1</sub> -2	15	29.4	2930	88.2	0.88	2.0	7.0	2.2
Y225M-2	45	83.9	2970	91.5	0.89	2.0	7.0	2.2
Y280M-2	90	167	2970	92	0.89	2.0	7.0	2.2
(二) 四极:同步转速1500r/min(全部型号)								
Y60L-4	0.55	1.5	1390	73	0.76	2.2	6.5	2.2
Y80L-4	0.75	2.0	1390	74.5	0.76	2.2	6.5	2.2
Y90S-4	1.1	2.7	1400	78	0.78	2.2	6.5	2.2
Y90L-4	1.5	3.7	1400	79	0.79	2.2	6.5	2.2
Y100L-4	2.2	5.0	1420	81	0.82	2.2	7.0	2.2
Y100L <sub>1</sub> -4	3	6.8	1420	82.5	0.81	0.82	7.0	2.2
Y112M-4	4	8.8	1440	84.5	0.82	2.2	7.0	2.2
Y132S-4	5.5	11.6	1440	85.5	0.84	2.2	7.0	2.2
Y132M-4	7.5	15.4	1440	87	0.85	2.2	7.0	2.2
Y160M-4	11	22.6	1460	88	0.84	2.2	7.0	2.2
Y160L-4	1.5	30.3	1460	88.5	0.85	2.2	7.0	2.2
Y180M-4	18.5	35.9	1470	91	0.86	2.0	7.0	2.2
Y180L-4	22	42.5	1470	91.5	0.86	2.0	7.0	2.2
Y200L-4	30	56.8	1470	92.2	0.87	2.0	7.0	2.2
Y225S-4	37	69.8	1480	91.8	0.87	1.9	7.0	2.2
Y225M-4	45	84.2	1480	92.3	0.88	1.9	7.0	2.2
Y280M-4	55	102.5	1480	92.6	0.88	2.0	7.0	2.2
Y280S-4	75	139.7	1480	92.7	0.88	1.9	7.0	2.2
Y280M-4	90	164.3	1480	93.6	0.89	1.9	7.0	2.2
(三) 六极:同步转速1000r/min(部分型号)								
Y90S-6	0.75	3.3	910	72.5	0.70	2.0	6.0	2.0
Y160M-6	7.5	17.0	970	86	0.78	2.0	6.5	2.0
Y225M-6	30	55.5	980	90.2	0.85	1.7	6.5	2.0
Y315M <sub>1</sub> -6	90	170.8	980	92	0.87	1.6	7.0	2.0
(四) 八极:同步转速750r/min(部分型号)								
Y132S-8	2.2	5.8	710	81	0.71	2.0	5.5	2.0
Y225M-8	22	47.6	750	90	0.78	1.8	6.0	2.0
Y315M <sub>2</sub> -8	90	180.3	740	92.5	0.82	1.6	6.5	2.0

JZ<sub>2</sub>系列起重冶金用扁壳型电动机性能数据

(续上表)

型号	额定功率/kW	额定电压/V	接法	额定频率/Hz	负载持续率/%	额定负载时				最大转矩倍数	启动转矩倍数	绝缘等级	绕组温升/℃
						电流/A	转速/(r/min)	效率/%	功率因数				
JZ <sub>2</sub> -11-6	2.2	380	Y	50	25	6.4	910	71	0.73	2.5	2.5	F	75
JZ <sub>2</sub> -12-6	3.5	380	Y	50	25	9.8	915	72	0.73	2.5	2.5	F	75
JZ <sub>2</sub> -21-6	5.0	380	Y	50	25	12.6	925	76	0.79	2.5	2.5	F	75
JZ <sub>2</sub> -22-6	7.5	380	Y	50	25	18.3	930	78	0.80	2.5	2.5	F	75
JZ <sub>2</sub> -31-6	11	380	Y	50	25	26	9.5	81	0.79	2.9	2.8	F	75
JZ <sub>2</sub> -31-8	7.5	380	Y	50	25	20.8	760	78	0.70	2.5	2.5	F	75
JZ <sub>2</sub> -41-8	11	380	Y	50	25	28.0	765	79	0.74	2.8	2.8	F	75
JZ <sub>2</sub> -42-8	16	380	Y	50	25	42	710	80	0.72	2.8	2.8	F	75
JZ <sub>2</sub> -51-8	22	380	Y	50	25	52	720	84	0.75	2.8	2.8	F	75
JZ <sub>2</sub> -52-8	30	380	Y	50	25	67	720	85	0.80	2.8	2.8	F	75

JZR<sub>2</sub>系列起重冶金用绕线型电动机性能数据

(续上表)

型号	额定功率/kW	额定电压/V	接法	额定频率/Hz	负载持续率/%	额定负载时				转子数据		最大转矩倍数	绝缘等级	绕组温升/℃	
						电流/A	转速/(r/min)	效率/%	功率因数	电阻/V	电抗/V				
JZR <sub>2</sub> -11-6	2.2	380	Y	50	25	7.0	900	68	0.70	Y	138	12	2.5	E	75
JZR <sub>2</sub> -12-6	3.5	380	Y	50	25	10.4	910	71	0.72	Y	207	12	2.5	E	75
JZR <sub>2</sub> -21-6	5.0	380	Y	50	25	13.9	925	75.5	0.75	Y	190	19	2.5	E	75
JZR <sub>2</sub> -22-6	7.5	380	Y	50	25	19.1	935	78	0.75	Y	272	19	2.5	E	75
JZR <sub>2</sub> -31-6	11	380	Y	50	25	27	950	81	0.76	Y	226	33	2.8	E	75
JZR <sub>2</sub> -31-8	7.5	380	Y	50	25	22	700	77	0.67	Y	164	32	2.5	E	75
JZR <sub>2</sub> -41-8	11	380	Y	50	25	30	765	78.5	0.71	Y	148	49	2.8	E	76
JZR <sub>2</sub> -42-8	16	380	Y	50	25	44	710	80	0.69	Y	217	48	2.8	E	75
JZR <sub>2</sub> -51-8	22	380	Y	50	25	53	720	85	0.74	Y	217	66	2.8	E	75
JZR <sub>2</sub> -52-8	30	380	Y	50	25	67	720	86	0.79	Y	272	72	2.8	E	75
JZR <sub>2</sub> -61-10	30	380	Y	50	25	75	580	81	0.72	Y	145	134	2.8	B	80
JZR <sub>2</sub> -62-10	45	380	Y	50	25	100	580	82	0.78	Y	158	145	2.8	B	80
JZR <sub>2</sub> -63-10	60	380	Y	50	25	142	580	87.5	0.73	Y	272	140	2.8	B	80
JZR <sub>2</sub> -71-10	80	380	Y	50	25	177	585	83	0.77	Y	282	177	2.8	B	80
JZR <sub>2</sub> -72-10	100	380	Y	50	25	220	585	90.5	0.76	Y	354	176	2.8	B	80
JZR <sub>2</sub> -73-10	125	380	Y	50	25	266	585	90.3	0.79	Y	425	192	2.8	B	80

出功率  $P_{2N}$  和效率  $\eta_N$  可求出额定输入功率  $P_{1N}$  为

$$P_{1N} = \frac{P_{2N}}{\eta_N} \quad (3-27)$$

上式也可写成

$$P_{1N} = \frac{\sqrt{3} U_N I_N \cos \varphi_N}{1000} \quad (3-28)$$

式中  $P_{1N}$  为额定输入功率(单位 kW);

$U_N$  为额定线电压(单位 V);

$I_N$  为额定线电流(单位 A);



$\eta_N$  为额定效率;

$\cos\varphi_N$  为定子电路的额定功率因数。

根据式(3-27)和(3-28)可得

$$P_{2N} = \frac{\sqrt{3}U_N I_N \cos\varphi_N \eta_N}{1000} \quad (3-29)$$

### 3. 电压与接法

铭牌上的电压是指电动机定子绕组在规定接法下的线电压。铭牌上所标电压 380V、接法  $\Delta$ ，表示这台电动机的定子绕组应按三角形接法接在线电压为 380V 的电网上使用，即每相定子绕组的额定电压  $U_N$  等于 380V。有的电动机铭牌上标有两个电压值，这是和接法相对应的。如电压 380/220V、接法 Y/ $\Delta$ ，是表示电源线电压为 380V 时定子绕组应作 Y 接法；当电源线电压为 220V 时，定子绕组应作  $\Delta$  接法。

### 4. 电流

铭牌上所标的电流值是指电动机轴上输出额定功率时定子绕组的线电流值，又称额定电流  $I_N$ 。对于 380V、 $\Delta$  接法的电动机其线电流值只有一个。通常在铭牌上标有 380/220V、Y/ $\Delta$  接法的电动机，标出两种线电流值，如 20/34.6A，表示电动机接成 Y 在线电压为 380V 时的线电流为 20A，34.6A 表示电动机接成  $\Delta$  在线电压为 220V 时的线电流。

### 5. 转速

铭牌上的转速是指电动机额定运行时的转速  $n_N$ 。

### 6. 绝缘等级

绝缘等级是指电动机绕组所使用的绝缘材料的等级。绝缘等级的划分，是以允许的极限温度来分级的。

表 3-3 绝缘等级

绝缘材料级别	A	E	B	F	H	C
允许最高温度/°C	105	120	130	155	180	180 以上
最高允许温升 (环境温度为 40°C)	60	75	85	110	135	135 以上
主要绝缘材料举例	经漆处理过的有机材料、纸、锦纱、橡皮线。	高强度漆包线的绝缘，合成有机薄膜。	云母、纸、玻璃、锦布。	云母、石棉、玻璃、纤维。	石棉布、玻璃丝、有机树脂。	玻璃、陶瓷。

### 7. 功率因数

在额定运行状态下，电动机定子电路的功率因数称为额定功率因数  $\cos\varphi_N$ ，其值约为 0.7~0.9。在轻载和空载时较低，空载时具有 0.2~0.3。 $\varphi_N$  为定子相电压与相电流之间的相位差。

### 8. 工作方式

电动机的工作方式有三种，即连续、短时和断续。

连续工作，允许在额定运行下长期连续工作。例如水泵、通风机、压缩机等的电动机。

短时工作：每次只允许在规定的时间内额定运行，待冷却一定时间后再启动工作。  
断续工作：电动机的运行与停歇交替进行，如起重机械等专用电动机。

## 二、三相异步电动机的选择

### 1. 功率的选择

电动机的功率选择是由生产机械所需的功率决定的。功率选得过大，不但会使设备投资增加和电动机未被充分利用，而且运行效率和功率因数都低；若电动机的功率选小了，将引起过载，电动机可能过早损坏。

对于长期连续运行的电动机，先算出生产机械需要的功率，所需电动机的额定功率等于或略大于生产机械的功率即可。

例如对长期连续工作的离心水泵，所需要的功率可按下式计算：

$$P = \frac{P_1}{\eta} = \frac{\rho Q H}{102 \eta_1 \eta_2} \quad (3-30)$$

式中  $P$  为电动机的功率(单位为 kW)；

$P_1$  为生产机械轴上所需功率(单位为 kW)；

$Q$  为出水量(单位为  $\text{m}^3/\text{s}$ )；

$\rho$  为水的比重， $\rho=1000\text{kg}/\text{m}^3$ ；

$H$  为水被压送的高度，即扬程(单位为 m)；

$\eta_1$  为水泵效率；

$\eta_2$  为传动效率。直接连接时  $\eta_2=1$ ，皮带传动时  $\eta_2=0.95$ 。

例 3-6 有一离心水泵，其数据如下： $Q=0.025\text{m}^3/\text{s}$ ， $H=25\text{m}$ ， $n=1460\text{r}/\text{min}$ ， $\eta_1=0.6$ 。今用一鼠笼式电动机拖动作长期运行，电动机与水泵直接连接，试为其选配一台合适的电动机。

$$\text{解 } P = \frac{\rho Q H}{102 \eta_1 \eta_2} = \frac{1000 \times 0.025 \times 25}{102 \times 0.6 \times 1} = 10.2 \text{ kW}$$

选用 Y160M-4 型电动机，其额定功率  $P_N=11\text{kW}$ ，额定转速  $n_N=1460\text{r}/\text{min}$ 。

### 2. 电动机种类的选择

选择电动机的种类，主要是从机械特性、调速与起动性能、维护及价格等方面来考虑。

异步电动机有鼠笼式和绕线式两种类型。如要求机械特性较硬而无特殊调速要求的一般生产机械的拖动(如水泵、空气压缩机等)，应首先考虑选用鼠笼式电动机。因为鼠笼式电动机具有结构简单、工作可靠、维修方便、价格便宜等优点，其缺点是调速困难、起动性能差、功率因数较低。

当要求起动转矩大、起动电流小，在一定范围内平滑调速的生产机械(如起重机主钩、卷扬机等)应考虑绕线式电动机。但其结构复杂，维修麻烦，价格也较高。

### 3. 外型结构的选择

电动机有下列几种外形结构型式：

(1) 开启式。通风散热非常良好，用于干燥无尘的场所。

(2) 防护式。在机壳或端盖下面有通风罩，可防止铁屑等杂物掉入，但不能防尘，用于干燥少尘的场所。

(3) 封闭式。外壳严密封闭，能防止潮气和尘土侵入，用于灰尘多、潮湿或含有酸性气体的

场合。

(4)防爆式。电机的接线盒和外壳严密封闭,用于有爆炸性气体的场合。

#### 4. 电压和转速的选择

电动机的额定电压应根据电动机的功率大小和使用地点的电源电压来决定。一般中、小型(100kW以下)电动机的额定电压为380V或380/220V两种,只有大功率异步电动机才考虑用3kV和6kV。

电动机的额定转速是根据生产机械的要求而选定的。对额定功率相同的电动机,转速越高,极对数越少,体积就越小,价格低,而效率和功率因数较高。不过高速电动机传动的减速机构可能比较大。选择时应使电动机的转速尽可能接近生产机械的转速,以简化传动机构。

### 3-9 单相异步电动机

使用单相电源的异步电动机称为单相异步电动机。在建筑施工和日常生活中,单相异步电动机应用也很广泛,用来带动手电钻、风扇、洗衣机等。不同类型的单相异步电动机,其定子绕组的结构虽然各不相同,但其转子都是鼠笼式。按起动方法的不同,常用的单相异步电动机有下面两种。

#### 一、电容分相式异步电动机

在定子铁心上绕制两套绕组AX和BY,彼此互为垂直,在空间相差 $90^\circ$ ,其中AX绕组匝数较多,叫工作绕组,BY绕组匝数较少,称为起动绕组。在绕组BY回路中串联了一个容量足够大的电容C。如图3-32(a)所示。使BY绕组中的电流 $i_b$ 在相位上近似于超前AX绕组中的电流 $i_a$  $90^\circ$ ,通常称它们为两相电流,如图3-32(b)所示。这样的两相电流分别通过在空间上相差 $90^\circ$ 的两个绕组,从而产生旋转磁场,其分析方法与三相电流形成旋转磁场的分析方法相同。在此旋转磁场作用下,产生起动转矩,电动机的转子便跟随旋转磁场同方向旋转,如图3-32(c)所示。

起动绕组电路中还串有离心开关,它与电机转子同轴安装,一同旋转。电容器在完成起动作用后,等电动机转速约达到同步转速的75%~80%时,离心开关依靠离心力而自动断开,使电动机只靠工作绕组单独作用来运行。

如果要改变这种电动机的转向,只需把两绕组之一的首尾端对调连接就可以了。

电容分相式单相电动机的功率从几十瓦到几百瓦,其转速一般为1500r/min和3000r/min两种,额定电压为220V。

#### 二、罩极式异步电动机

它的定子上有凸出的磁极,励磁用主绕组绕在凸出的磁极上,在极面的约 $\frac{1}{3}$ 部分开有小槽,嵌入短路铜环(相当于副绕组),罩住部分磁极,故称罩极式异步电动机,如图3-33(a)所示。

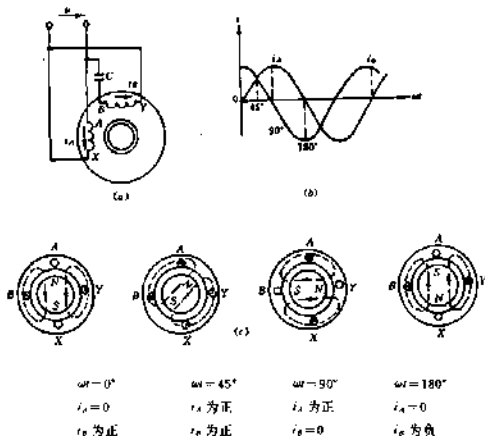


图 3-32 电容分相式异步电动机

当定子主绕组通入单相电流后, 所产生主磁通将分为两部分, 一部分不穿过短路环, 设为  $\phi_1$ , 它与主绕组中的电流同相; 另一部分穿过短路环, 设为  $\phi_2$ 。从空间看, 因为磁力线总是垂直进入和离开磁极极掌表面, 因此这两磁轴在空间错开  $\alpha$  角。从时间来看, 因  $\phi_2$  穿过短路环, 环中产生感应电流, 该电流所产生的磁动势要阻碍穿过短路环的磁通的变化, 使  $\phi_2$  的变化落后于  $\phi_1$  的变化, 于是环内磁通  $\phi_2$  在相位上落后于环外磁通  $\phi_1$  一个相位角。由上可知,  $\phi_1$  和  $\phi_2$  不仅在空间互差  $\alpha$  角, 在时间上又有一定相位差, 因此形成可移进的旋转磁场, 使鼠笼转子产生起动转矩。

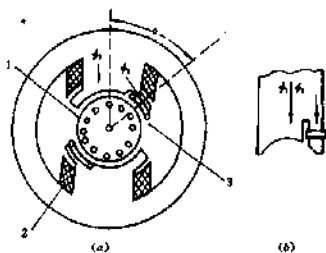


图 3-33 罩极电动机

1—鼠笼转子 2—主绕组 3—罩极短路铜环

这种单相电动机结构简单, 运行可靠, 但起动转矩小, 其额定功率在 15~90W 范围内, 转速为 1 500r/min 和 3 000r/min, 用于小型电扇、电唱机及电子仪器装置中。

### 3-10 常用低压电器

低压电器一般是指电压在 500V 以下,用来接通和断开电路以及用来控制、调节和保护用电设备的电器。低压电器按动作方式可分为手动和自动两大类。依靠人力直接操作的,如刀开关、按钮开关和组合开关等为手动电器;自动电器是按照指令、信号或参数变化而自动动作的,如接触器、继电器等。

#### 一、闸刀开关

闸刀开关是开关中最简单最常见的一种手动电器,它主要由刀片(动触头)和刀座(静触头)组成。通常在电流不太大的电路中作接通和断开电源之用,也可用来对小容量的电动机作不频繁的直接起动。闸刀开关的额定电压通常为 250V 和 500V,常用的瓷底胶盖闸刀开关的额定电流为 10~60A。闸刀开关的极数分为单极、双极和三极三种,三极闸刀开关的符号如图 3-34 所示。选用闸刀开关主要选择其额定电压和额定电流,应与所控电路的电压和电流相符合。

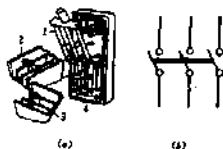


图 3-34 闸刀开关

(a)结构图 (b)符号

1—闸刀本体 2—上胶木盖  
3—下胶木盖 4—接铜丝接头

闸刀开关主要型号规格如表 3-4 所示。

表 3-4 HK1、HK2 及 HD11、HD14 系列刀开关

型 号	结 构 型 式	极 数	额 定 电 压 /V	额 定 电 流 等 级 /A
HK1-□	胶盖瓷底,与熔体组合式	2	220	15、30、60
		3	380	
HK2-□	胶盖瓷底,与熔体组合式	2	250	10、15、30
		3	380	15、30、60
HD11-□/38	中央操纵手柄,板前接线	3	交流 500	100、200、400
HD11-□/39	中央操纵手柄,板后接线			100、200、400、600、1000
HD14-□/30	侧面操纵手柄,不装灭弧室		直流 440	100、200、400、600
HD14-□/31	侧面操纵手柄,不装灭弧室			

注:型号中的“□”号为开关的额定电流等级。

#### 二、组合开关

组合开关又称转换开关,它是一种凸轮式作旋转运动的刀开关。今以常用的 HZ10 系列组合开关为例来说明。它有 3 套静触头和动触头,中间互相绝缘。静触头分别固定在圆形胶木盒

上,动触头分别套在套有手柄的绝缘公共轴上,并且3对触头彼此相差一定角度。当转动手柄时,可以将3个触头同时接通或断开。图3-35是用组合开关来起动和停止异步电动机的接线图。

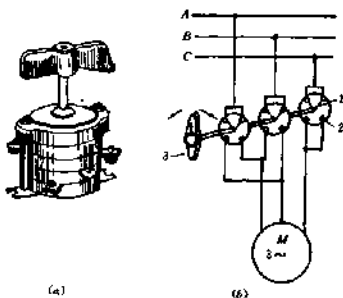


图 3-35 组合开关  
(a)外形图 (b)组合开关起停电动机的接线图  
1—动触点;2—静触点;3—手柄

组合开关有单极、双极、三级和四级几种,额定持续电流有10、25、60和100A等多种。组合开关结构紧凑,安装面积小,操作方便,在机床厂广泛应用它代替闸刀开关。

### 三、按钮开关

按钮开关通常用于接通和断开小电流的控制回路。图3-36是按钮开关的结构和符号。将按钮按下时,下面一对原来断开的静触点被桥式动触点接通,以接通某一控制电路,而上面一对静触点则被断开,以断开另一控制回路。当手指放开后,在弹簧的作用下触点立即恢复原态。原来就接通的触点,称为常闭触点;原来就断开的触点,称为常开触点。它们的图形符号见图3-36(b),所以,当按下按钮时,常闭触点先断,常开触点后通;而松开按钮时,常开触点先断,常闭触点后通。

### 四、交流接触器

交流接触器是利用电磁吸力来接通和断开电动机或电源到负载的主电路的自动电器。图3-37是交流接触器的主要结构及符号。交流接触器主要由电磁铁和触点两部分组成,当电磁铁线圈通电后,吸住动铁心(也称衔铁),使常开触点闭合,因而把主电路接通,电磁铁断电后靠弹簧反作用力使动铁心释放,切断主电路。

交流接触器的触点分为两类,一类接在电动机的主电路中,通过电流较大,称为主触点,另一类接在控制电路中,通过电流较小,称为辅助触点。

当主触点断开瞬间触点间会产生电弧,烧坏触点,因此交流接触器的动触点都做成桥式,

有两个断点,以降低当触点断开时加在断点上的电压,使电弧容易熄灭。在电流较大的接触器的主触点上还专门装有灭弧罩,其外壳由绝缘材料制成,里面的平行薄片使三对主触点相互隔开,其作用是将电弧分割成小段,使之容易熄灭。

为了减小磁滞及涡流损耗,交流接触器的铁心由硅钢片叠成。此外,由于交流电在一个周期内有两次为零,电流为零时,电磁吸力也为零,使动铁心振动,噪声大。为了消除这一现象,在交流接触器铁心的端面一部分嵌有短路环。

在选用接触器时,应注意它的额定电流、

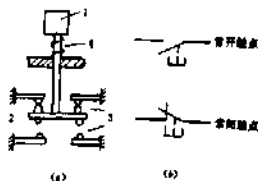


图 3-36 按钮开关结构及其符号

(a)结构图 (b)符号图

1—按钮帽;2—按钮式动触点;3—常开触点;4—常闭触点

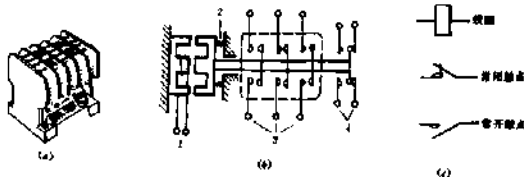


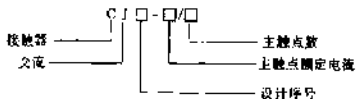
图 3-37 交流接触器结构及符号

(a)外形图 (b)结构 (c)符号

1: 线圈;2—弹簧;3—主触点;4—辅助触点

线圈电压及触点数量等。

交流接触器型号含义如下:



## 五、热继电器(双金属片型)

热继电器用于电动机的过载保护,它是利用电流热效应使双金属片受热后弯曲,通过联动机构使触点动作的自动电器,图 3-38 是热继电器的结构及符号。

发热元件是一段阻值不大的电阻丝,串接在被保护的电动机的主电路中,双金属片是由两种不同线膨胀系数的金属片碾压而成。图中所示的双金属片,下层一片的线膨胀系数大,上层的小,当电动机过载时,通过发热元件的电流超过额定电流,双金属片受热向上弯曲脱离扣板。

表 3-5 国产交流接触器技术数据表

1. CJ10 系列交流接触器控制的电动机最大功率

型 号	额定电流 /A	联锁触点 额定电流 /A	控制的三相电动机最大功率/kW		
			220/V	380/V	500/V
CJ10-5	5	5	1.2	2.2	2.2
CJ10-10	10	5	2.2	4	4
CJ10-20	20	5	5.5	10	10
CJ10-40	40	5	11	20	20
CJ10-60	60	5	17	30	30
CJ10-100	100	5	30	50	50
CJ10-150	150	5	43	75	75

2. CJ12 系列交流接触器技术数据

型 号	额定电压 /V	额定电流 /A	极 数	额定容量 每小时操 作次数	联 锁 触 点		
					额定电压 /V	额定电流 /A	组合情况
CJ12-100	380	100	2, 3, 4, 5	600	交流 230 或 直流 220	10	六个触点可组 成: 5~3“动合” 1~3“动断”
CJ12-150		150					
CJ12-250		250					
CJ12-400		400					
CJ12-600		600		300			

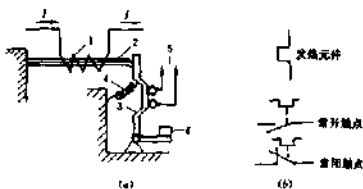


图 3-38 热继电器结构及符号

(a) 结构 (b) 符号

1—发热元件; 2—双金属片; 3—扣板; 4—弹簧; 5—常闭触点; 6—复位按钮



使常闭触点断开。由于常闭触点是接在电动机的控制电路中的,使其相接的接触器线圈断电,接触器主触点断开,接有电动机的主电路断电,实现了过载保护。

热继电器动作后,双金属片经过一段时间冷却后,按下复位按钮即可复位。

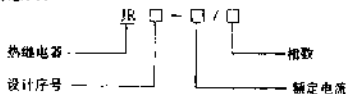
常用的热继电器有JR0、JR15、JR16等系列。热继电器的主要技术数据是整定电流。整定电流是指长期通过发热元件而不致使热继电器动作的最大电流。当发热元件中通过的电流超过整定电流值的20%时,热继电器应在20分钟内动作。热继电器的整定电流大小,可通过整定电流旋钮来改变。选用和整定热继电器时一定要使整定电流值与电动机的额定电流一致。

热继电器有各种额定电压和额定电流等级,同一额定电流又可配用各种电流等级的发热元件。如JR0-40型热继电器,额定电压为500V,额定电流为40A,它可以配用的发热元件从0.64A到40A共有十个电流等级,每一等级的发热元件工作电流调节范围为0.4~0.64,0.64~1.1,1.1~1.6,1.6~2.5,2.5~4.4,4.4~6.4,6.4~10,10~16,16~25,25~40A。例如电动机的额定电流为14.7A,可选热继电器的型号为JR0-40,选发热元件的电流等级为16A,工作时将发热元件的电流整定在14.7A。

表 3-6 JR 系列热继电器主要规格及用途

型 号	额定电流 /A	热元件等级		用 途
		热元件额定电流/A	电流调节范围/A	
JR14-20/2 JR14-20/3 JR14-20/D JR16-20/3 JK16-20/3D	20	0.35	0.25~0.35	长期工作或间断长期工作的交流异步电动机的过载保护,常与交流接触器构成磁力启动器
		0.5	0.32~0.5	
		0.72	0.45~0.72	
		1.1	0.58~1.1	
		1.6	1~1.6	
		2.4	1.5~2.4	
		3.5	2.2~3.5	
		5	3.2~5	
		7.2	4.5~7.2	
		11	6.8~11	
JR16-60/3 JR16-60/3D	60	22	14~22	
		32	20~32	
		45	28~45	
		63	40~63	

热继电器型号的意义:



## 六、自动空气断路器

自动空气断路器也叫自动开关,可实现短路、过载和失压保护。图 3-39 是其一般原理图。主触点通常是由手动的操作机构来闭合的。脱扣机构是一套连杆装置,当主触点闭合后就被锁钩锁住。在正常情况下,过流脱扣器的电磁铁是释放着的,一旦发生短路或严重过载故障时,串联在主电路中的过流脱扣器线圈(图中只画出一相)产生较强的电磁吸力把衔铁往下吸而顶开锁钩,在弹簧作用下使主触点断开。在电压正常时,欠压脱扣器吸住衔铁,主触点才得以闭合。当电路电压严重下降或断电时,欠压脱扣器的电磁吸力大大下降或消失,衔铁在弹簧作用下释放而顶开锁钩,而使主触点断开。当电路和电源电压都恢复正常时,必须重新合闸后才能工作。

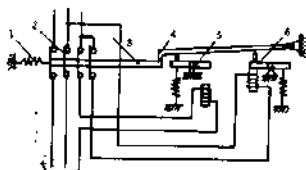


图 3-39 自动空气断路器的原理图  
1—弹簧;2—主触点;3—连杆;4—锁钩;  
5—过流脱扣器;6—欠压脱扣器

自动空气断路器具有结构紧凑、安装方便、操作安全等优点,因此得到广泛应用。常用的自动空气断路器有 DZ、DW 等系列。

## 3-11 鼠笼式电动机直接起动的控制电路

### 一、直接起动控制电路

图 3-40 是中、小容量鼠笼式电动机直接起动的控制电路示意图。图中采用了组合开关 Q、交流接触器 KM 按钮 SB 和热继电器 KH 等低压电器。

起动电动机时,先将组合开关 Q 闭合。当按下起动按钮 SB<sub>1</sub> 时,交流接触器 KM 的线圈通电,吸合动铁心使三个主触点闭合,电动机 M 便起动。与此同时,与起动按钮并联的辅助触点也闭合。当起动按钮复位时,接触器线圈仍保持通电,电动机继续运行。这个辅助触点称为自锁触点。要电动机停止运行,只需按下停止按钮 SB<sub>2</sub>,交流接触器的线圈断电,电磁吸力消失,电动机脱离电源停止运行。

在图 3-40 控制电路中,起短路保护的是熔断器 FU,起过载保护的是热继电器 KH。此外,当电源电压严重下降或暂时断电时,接触器的线圈中电流太小或为零,造成电磁吸力不足或消失,主触点便断开,实现了欠压(或零压)保护。电源电压恢复正常后,必须重新按下起动按钮,否则电动机不会自行起动。

图 3-40 称为控制电路的结构图,比较形象直观,但当电路元件较多时,则电路更不清晰。为了便于绘图和分析,通常把主电路和控制电路分开来画,称为控制电路的原理图。在电气原理图中,分散画出的同一电器的各部分都用同一字母来标注,如接触器线圈 KM 的触点规定也用字母 KM 表示,以便在分析电路原理时比较醒目易读。这样,图 3-40 所示的结构图可画成

图 3-41 所示的原理图。

如果将图 3-41 中的自锁触点 KM 除去,当按启动按钮 SB<sub>1</sub> 时,电动机便转动,一松手就停止,则可对电动机实现点动控制。如对冲床上下模具等。

## 二、正反转控制电路

有些生产机械要求电动机能够正反转运行,如起重机的提升与下降,机床工作台的进退等。图 3-42(a) 为鼠笼式电动机的正反转控制电路。

为了实现电动机的正反转,只要将接到电源的任意两根相线对调即可。为此,利用两个不同时工作的交流接触器就能实现这一要求。当正转

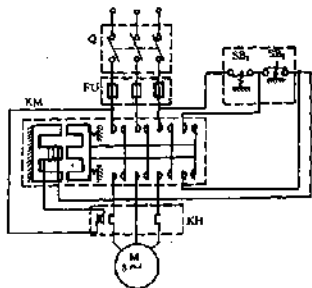


图 3-40 直接启动控制结构图

接触器 KM<sub>1</sub> 工作时,电动机正转;当反转接触器 KM<sub>r</sub> 工作时,由于调换了 A、C 两根电源线,所以电动机反转。

两个接触器是不允许同时工作的,否则会使 A、C 两相电源短路。为此,正转接触器 KM<sub>1</sub> 的一个常闭辅助触点串接在反转接触器 KM<sub>r</sub> 的线圈电路中,而反转接触器的一个常闭辅助触点串接在正转接触器的线圈电路中。这两个常闭触点称为联锁或互锁触点。当先按下正转按钮 SB<sub>1</sub>,使 KM<sub>1</sub> 线圈通电,主触点 KM<sub>1</sub> 闭合,电动机正转。与此同时,联锁触点断开了反转接触器的线圈电路。此时即使按下反转按钮 SB<sub>2</sub>,反转接触器也不能动作。同理,当先按下反转按钮 SB<sub>2</sub>,使 KM<sub>r</sub> 动作,电动机反转后,再按正转按钮 SB<sub>1</sub>,KM<sub>1</sub> 也不会动作。要改变电动机的转向,必须先按下停止按钮 SB<sub>0</sub>。

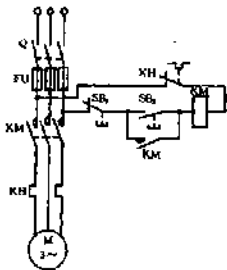


图 3-41 图 3-40 的电气控制原理图

图 3-42(b) 中采用了复式按钮来实现联锁。这样,在电动机正转过程中需要反转,或反转过程中需要正转,均不需按停止按钮,减少了操作上的不方便。

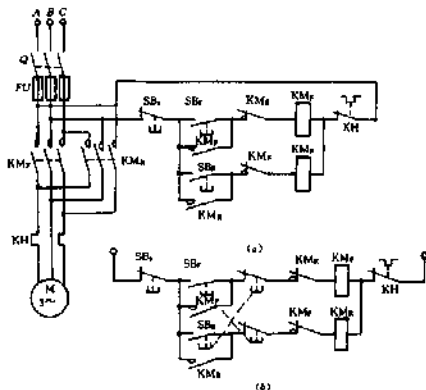


图 3-42 正反转控制电路

### 3-12 行程开关与限位控制电路

#### 一、行程开关

利用运动部件的位移来切换电路的自动控制电器称为行程开关或限位开关。行程开关的类型很多,有滚轮式、压合式等。它们的结构和符号如图 3-43 所示。行程开关内有一个微动开关,它有一对常闭触点和一对常开触点。

行程开关一般安装在某一固定的轨道或底座上,由装在运动部件上的挡块来撞动,当挡块与行程开关的推杆相碰时压下推杆,常闭触点断开,常开触点闭合。当挡块离开推杆时,推杆和触点在弹簧的作用下可自动复位。

#### 二、提升机的限位控制电路

图 3-44 所示为提升机限位控制电路。与图 3-42 的正反转控制电路比较,它多了两个行程开关的常闭触点  $ST_1$  和  $ST_2$ , 分别串接在正反转接触器的线圈电路中。

接通电源后,按下正转按钮  $SB_1$ , 接触器  $KM_1$  通电,电动机正转,提升机上升。当框架到达顶点位置时,其上的挡块碰撞上限行程开关  $ST_1$ , 使它的常闭触点断开,接触器  $KM_1$  的线圈断电,电动机停转,框架不能继续上升,达到了限制行程上限的目的。按反转按钮  $SB_2$ , 接触器  $KM_2$  通电,使电动机反转,提升机下降,挡块离开行程开关  $ST_1$  后,其常闭触点自动复位,为下

次正转作好准备。当框架下降到接近地面的另一限位位置时，其上的挡块碰撞下限位开关  $ST_2$ ，常闭触点断开，接触器  $KM_2$  的线圈断电，电动机立即停转，从而达到限制行程下限的目的。

### 三、电动吊车的控制电路

电动吊车又称电动葫芦，是建筑工地常用的提升搬运货物的施工机具。电气控制电路如图 3-43 所示。图中电动机  $M_1$  作升降用，电动机  $M_2$  作行走用。

升降控制：

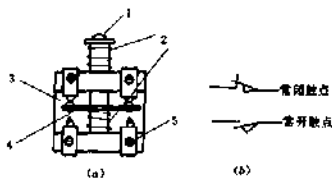


图 3-43 行程开关的结构与符号

(a) 结构图 (b) 符号

1—推杆；2—弹簧；3—常闭触点；

4—常开触点；5—锁紧螺钉

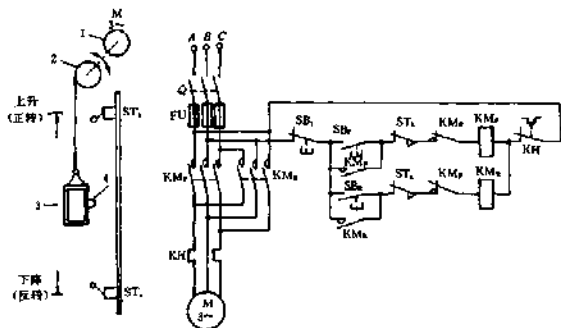


图 3-44 提升机限位控制电路

1—电动机；2—滑轮；3—框架；4—挡块

按下提升按钮  $SB_1$  → 线圈  $KM_1$  通电 →  $KM_1$  主触点闭合 →  $M_1$  正转 → 重物提升。

松开按钮  $SB_1$  → 线圈  $KM_1$  断电 →  $M_1$  停转。

按下下降按钮  $SB_2$  → 线圈  $KM_2$  通电 →  $KM_2$  主触点闭合 →  $M_1$  反转 → 重物下降。

前后行车控制：

按下向前按钮  $SB_3$  → 线圈  $KM_3$  通电 →  $KM_3$  主触点闭合 →  $M_2$  正转 → 重物前行。

按下向后按钮  $SB_4$  → 线圈  $KM_4$  通电 →  $KM_4$  主触点闭合 →  $M_2$  反转 → 重物后行。

图中常闭触点  $KM_1$ 、 $KM_2$ 、 $KM_3$  及  $KM_4$  起联锁保护作用，行程开关  $ST_1$  作提升终端保护。

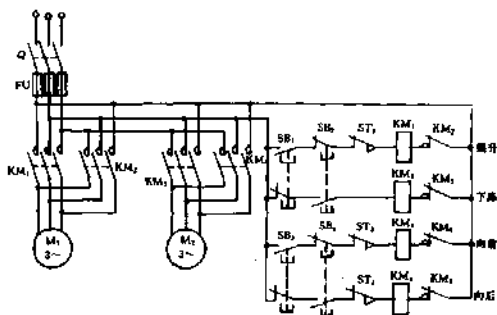


图 3-45 电动吊车控制电路

当重物提升到极限高度时,ST<sub>1</sub>在挡块作用下断开,使接触器KM<sub>1</sub>的线圈断电,电动机M<sub>1</sub>停转,防止继续提升造成事故,行程开关ST<sub>2</sub>和ST<sub>3</sub>分别是行车向前和向后的终点保护,与提升行程终端保护的作用原理相同。

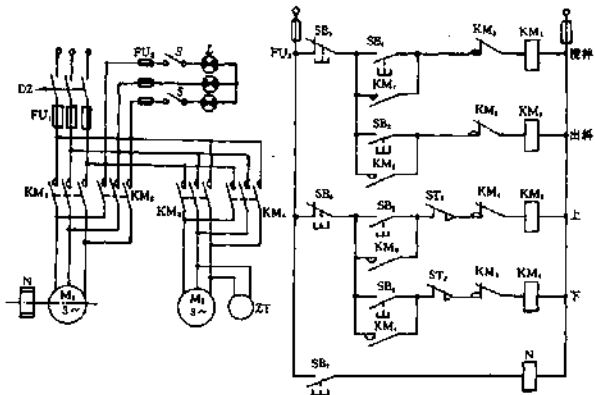


图 3-46 混凝土搅拌机控制电路

#### 四、混凝土搅拌机的控制电路

混凝土搅拌机是建筑工地上最常见的一种施工机械,其搅拌、出料、料斗的升降及给水等可全部采用按钮操作。图 3-46 所示为混凝土搅拌机的控制电路。

电路总开关采用自动空气开关 DZ 控制,当电动机过载或电路短路时,DZ 自动跳闸切断三相电源。有三盏不同颜色的指示灯 L 接电源,分别指示各相供电情况。

电动机  $M_1$ : 拖动搅拌机的深筒转动,正转时搅拌混凝土,反转时把混凝土从深筒中倒出来(即出料)。 $M_1$  的正反转由接触器  $KM_1$  和  $KM_2$  分别控制,且有联锁保护。

电动机  $M_2$ : 拖动料斗的升降,由接触器  $KM_3$  和  $KM_4$  分别控制,两者也有联锁保护。在料斗电动机  $M_2$  的电路并联一只电磁铁线圈 ZT,即为抱闸电磁铁,当给电动机  $M_2$  供电时,电磁铁 ZT 也通电动作,立即使制动器松开电动机  $M_2$  的轴,使  $M_2$  可自由转动。当  $M_2$  断电时,电磁铁也断电,在弹簧力作用下,使制动器紧抱住  $M_2$  的轴,则  $M_2$  停转。以保证料斗停在预定位置。在接触器  $KM_3$  和  $KM_4$  线圈的电路里分别串入了行程开关  $ST_1$  和  $ST_2$ ,以限制料斗上、下端的极限位置。按钮  $SB_1$  以控制水阀电磁铁的启闭,按下  $SB_1$ ,水阀电磁铁的线圈 N 通电,驱动水管阀门,使水直接流到搅拌机的深筒中,给搅拌中的混凝土添水,添足水后,松开按钮  $SB_1$ ,水阀电磁铁的线圈 N 断电,关闭水源,停止供水。为了保证混凝土一定的水灰比,操作人员可根据经验决定按动  $SB_1$  的时间长短。

### 3-13 时间继电器与时间控制电路

#### 一、时间继电器

时间继电器的触点具有延时动作的性能。在交流控制电路中广泛采用空气阻尼式时间继电器,它是利用空气阻尼作用而达到动作延时的目的。空气式时间继电器按延时的方式可分为通电延时和断电延时两类。这里仅介绍通电延时的空气式时间继电器。

图 3-47 是通电延时的空气阻尼式时间继电器的结构和触头符号。它主要由电磁系统、延时机构和触点系统三部分组成。当线圈 1 通电后,吸下动铁心 2,活塞杆 3 因失去支撑,在释放弹簧 4 的作用下开始下降,带动伞形活塞 5 和固定在其上的橡皮膜 6 一起下移,在膜上而造成空气稀薄的空间,活塞由于受到下面空气的压力,只能缓慢下降。经过一定时间后,杠杆 8 才能碰触微动开关 9,使常闭触点断开,常开触点闭合。可见,从电磁线圈通电时开始到触点动作时为止,中间经过一定的延时,这就是时间继电器的延时作用。延时长短可以通过螺钉 10 调节进气

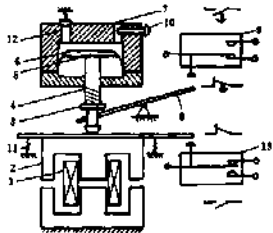


图 3-47 通电延时的空气式时间继电器

孔 7 的大小来改变,空气式时间继电器的延时范围较大,可达 0.4~180s。

当电磁线圈断电后,活塞在恢复弹簧 11 的作用下迅速复位,气室内的空气经出气孔 12 及时排出。

图 3-47 中所示通电延时继电器有两个延时触点,一个称为通电延时断开的常闭触点,另一个称为通电延时闭合的常开触点。此外,微动开关 13 中的两个触点是无延时作用的瞬时动作触点。

表 3-7 JS7-A 空气阻尼式时间继电器

型 号	触点容量		延时触点数量				不延时触点的数量		线圈电压 /V	延时整定范围 /s	操作频率 /次·h <sup>-1</sup>
	电压 /V	额定电流 /A	线圈通电后延时		线圈断电后延时		动合	动断			
			动合	动断	动合	动断					
JS7-1A	380	5	1	1					24、36	0.4~60 及	600
JS7-2A	380	5	1	1			1	1	110、127、	0.4~180	
JS7-3A	380	5			1	1			220、380、	(误差不大	
JS7-4A	380	5			1	1	1	1	420	于±10%)	

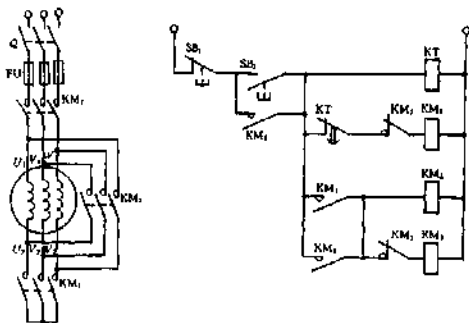
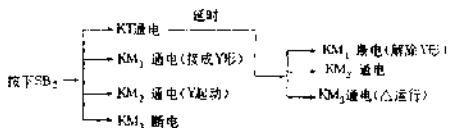


图 3-48 Y-Δ 起动的自动控制电路

## 二、Y-Δ 起动的自动控制电路

图 3-48 是采用通电延时时间继电器控制的鼠笼式电动机 Y-Δ 起动的自动控制电路。其中用了通电延时时间继电器 KT 的通电延时断开的常闭触点, KM<sub>1</sub>、KM<sub>2</sub>、KM<sub>3</sub> 是三个交流接触器。启动时 KM<sub>1</sub> 工作,电动机接成 Y 形;运行时 KM<sub>3</sub> 工作,电动机接成 Δ 形。电路的控制过程如下:





### 三、混凝土搅拌机自动供水控制电路

图 3-46 所示对水阀电磁铁  $N$  的手动按钮控制可改用时时间继电器控制, 达到自动供水的目的, 以保证混凝土的质量, 还能减轻操作人员的负担。改动后的控制电路如图 3-49 所示, 增加了一个通电延时时间继电器  $KT$  的通电延时断开的常闭触点和延时闭合的常开触点及按钮  $SB_1$ 。

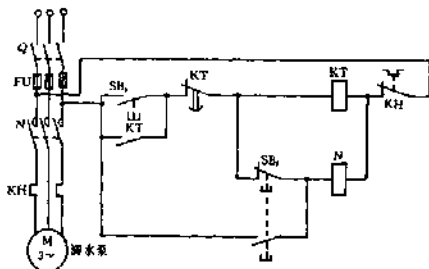


图 3-49 混凝土搅拌机自动供水控制电路

自动供水的控制过程为: 先按下启动按钮  $SB_1$ , 时间继电器  $KT$  的线圈通电, 其瞬时动作的常开触点闭合, 达到自锁。同时水阀电磁铁的线圈  $N$  通电, 吸动水管阀门, 向搅拌机供水。经过一段时间, 时间继电器  $KT$  的延时断开的常闭触点断开, 水阀电磁铁的线圈  $N$  断电, 水管阀门关闭, 停止向搅拌机供水。只要按照需水量来调节时间继电器的延迟时间, 就可达到自动供水的目的。

此电路仍可作为手动控制供水使用。

### 3-14 干簧继电器与液面控制电路

干簧继电器由干簧管和励磁线圈组成。

#### 一、干簧管

干簧管通常是由两片或数片铁镍合金导电簧片密封在玻璃管中组成, 如图 3-50 所示, 这

种导电簧片既作磁路导体,又作导电触点,还作反作用力弹簧。

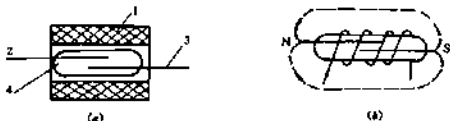


图 3-50 干簧管

1—线圈;2—簧片;3—密封触点;4—玻璃管

在干簧管周围固定有一个励磁线圈,通以电流就产生磁场,磁力线通过玻璃密封的触点,使两簧片磁化,根据右手螺旋定则,左边簧片为  $N$  极,右边簧片为  $S$  极,在靠近簧片的一端,因极性相异互相吸引而闭合,由此接通被控制的电路。当外磁场强度减弱到一定值后,因簧片自身的反弹力使触点恢复到原始位置,被控制的电路立即断开。

作用于干簧管的外磁场除可由通电线圈产生外,也可由管外的永久磁铁产生。

干簧继电器具有结构简单、灵敏度高、动作迅速、使用寿命长等优点,目前广泛用于自动控制 and 测量仪表等领域。

## 二、液面自动控制电路

液面自动控制电路如图 3-51 所示。图中,  $M$  是带动水泵向水箱供水的电动机,  $KM$  是交流接触器,  $J1$  和  $J2$  是中间继电器,要求水箱中液面保持在  $A$ 、 $B$  两点之间,干簧继电器  $JA$  和  $JB$  分别装在  $A$  和  $B$  两点,条形永久磁铁用浮子带动可随液面上下浮动。

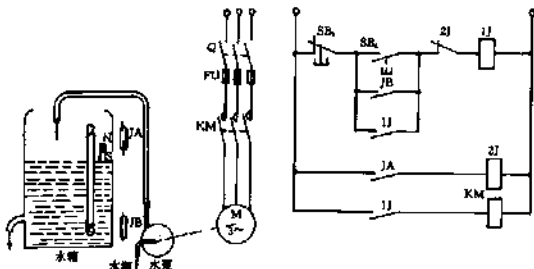


图 3-51 液面自动控制电路

当液面下降到  $B$  点时,永久磁铁使干簧继电器  $JB$  的常开触点闭合,中间继电器的线圈  $J1$  通电,其常开触点自锁,串接在交流接触器  $KM$  线圈电路中的常开触点也闭合,  $KM$  的线圈通电,主触点闭合,电动机  $M$  带动水泵向水箱供水。当液面上升到  $A$  点时,在永久磁铁作用下,

表 3-9 常用电机、电器的图形符号

名 称	符 号	名 称	符 号
三相鼠笼式异步电动机		按钮触点	常 开 
			常 闭 
三相绕线式异步电动机		接触器吸引线圈	
		继电器吸引线圈	
直流电动机		接触器触点	常 开 
			常 闭 
单相变压器		时间继电器触点	常开延时闭合 
三相开关			常闭延时断开 
			常开延时断开 
			常闭延时闭合 
熔断器		行程开关触点	常 开 
信号灯		热继电器	常 闭 
			常闭触点 
		热元件 	
一般电阻			一般电容 
滑线电阻			可变电容 
可变电阻			热流计 

干簧继电器 JA 的常开触点闭合,2J 的线圈通电,其串接在 1J 的线圈电路中的常闭触点断开,1J 的线圈断电,接触器的线圈 KM 断电,主触点断开,电动机停止转动,使水箱中的液面控制在 A、B 两点间范围之内。

### 3-15 常用电工测量仪表

在电气设备的安装、试验、运行、维修过程中,为了正确地使用电气设备,保证生产顺利进行,我们常常要进行电气测量,这就要使用电工仪表。通过电工仪表就能够了解电气设备的特性和运行情况,发现电气设备存在的问题,及时排除故障。下面分别介绍几种常用电工仪表。

#### 一、万用表

万用表是一种具有多种用途、多个量程的直读式仪表。一般可用来测量直流电流、直流电压、交流电压、电阻等。比较好的万用表还可以用来测量交流电流、功率、电感和电容等。万用表是由一个灵敏度很高的磁电式电流表(表头)、各种电阻、半导体二极管、选择开关等构成。表盘上有相应于被测量的几条标尺,通过选择开关可转换到某测量档,因此,我们了解万用表各测量档的情况后,对万用表就熟悉了。

##### 1. 直流电流的测量电路

万用表的直流电流测量档实质是一个多量程的直流电流表,图 3-52 就是测量直流电流的原理图,被测电流从“+”流进,从“-”流出, $R_{A1} \sim R_{A3}$  是分流器电阻,它们和磁电式微安计(表头)相连,改变转换开关的位置,就改变了分流器的电阻,从而就改变了电流的量程。例如当转换开关扳到 50mA 档时,分流电阻为  $R_{A1} + R_{A2}$ , $R_{A3}$  则与微安计相串联。由于微安计的内阻  $R_0$  和满标值电流  $I_0$  是已知的,则根据并联电路的特点可得下述等式:

$$(50 - I_0)(R_{A1} + R_{A2}) = I_0(R_0 + R_{A3}) \quad (3-31)$$

式中  $I_0$ ——微安计的满标值电流, mA;

$R_0$ ——微安计的电阻,  $\Omega$ ;

$R_{A1}$ 、 $R_{A2}$ 、 $R_{A3}$ ——万用表的分流器电阻,  $\Omega$ 。

每一档直流电流的量程均可按上式原理写出平衡式,从而可计算出各分流器电阻的数值。很明显,直流电流档的量程愈大,分流器电阻就愈小。

##### 2. 直流电压的测量电路

万用表的直流电压档实质是一个多量程的直流电压表,图 3-53 就是测量直流电压的原理图。被测直流电压加在“+”和“-”两端, $R_{V1}$ 、 $R_{V2}$ 、 $R_{V3}$  是倍压器电阻,直流电压的量程越大,倍压器电阻也越大。

在各量程档时倍压器的电阻都与微安计相串联。已知微安计的电阻  $R_0$  和满标值电流  $I_0$  时,则可用下面公式分别求出倍压器的各电阻:

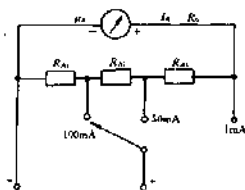


图 3-52 测量直流电流的原理图

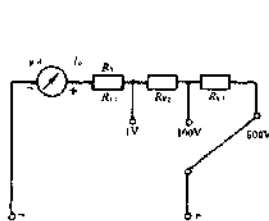


图 3-53 测量直流电压的原理图

### 3. 交流电压的测量

测量交流电压的原理电路见图 3-54。

由于微安计是磁电系测量机构,用它来测量交流时,必须要把交流转换成直流,图中二极管  $D_1$  和  $D_2$  就起整流器的作用。二极管有单向导电性,当二极管承受正向电压时,正向内阻很小,电流可以通过,当二极管承受反向电压时,反向内阻很大,电流很小近似为 0,即电流不能通过。

被测交流电压加在“+”、“-”两端,正半周时,电流从“+”流进,经倍压电阻和二极管  $D_2$ ,微安计后,由“-”端流出,负半周时,电流经“-”流进,经  $D_1$  和倍压电阻,由“+”流出,电流不经过微安表,所以流经微安计的是一个半波整流电流,该数为该电流的平均值,这样,仍用不同的倍压电阻来达到不同的量程,并把通过微安计的直流转换成交流电压有效值,从而可以测量交流电压,并在表盘上直接读出其有效值。

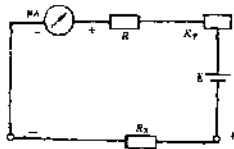


图 3-55 测量电阻的原理图

测量电阻的电路如图 3-55 所示,被测电阻  $R_x$  接在“+”、“-”两端,  $R_T$  为 0 欧姆调零电阻

$$\left. \begin{aligned} R_{V1} &= \frac{1}{I_s} - R_c \\ R_{V2} &= \frac{100}{I_s} - (R_c + R_{V1}) \\ R_{V3} &= \frac{500}{I_s} - (R_c + R_{V1} + R_{V2}) \end{aligned} \right\} \quad (3-32)$$

式中 1, 100, 500——分别是直流电压挡各挡的量程, V;

$R_{V1}, R_{V2}, R_{V3}$ ——万用表倍压器各挡电阻,  $\Omega$ ;

$I_s, R_c$ ——微安计满标值电流、内阻, A,  $\Omega$ 。

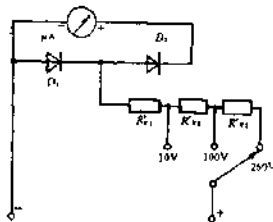


图 3-54 测量交流电压的原理图

所以,万用表的交流电压挡实质是一个多量程的整流系交流电压表,同理也可利用该原理用万用表来测量电流,但远不及用钳形电流表方便,所以万用表一般不设交流电流挡。

#### 4. 电阻的测量

电阻的测量是应用欧姆定律,这时万用表要有电池提供电压,电池电压加在被测电阻和微安计的串联电路上,产生电流使指针偏转,从而可测出电阻的大小。

器,微安计内阻  $R_0$ ,满刻度偏转电流  $I_g$ ,设电池电动势为  $E$ ,则电路中的电流为:

$$I = \frac{E}{R_0 + R_T + R + R_x}$$

当  $R_x=0$  时,即被测电阻为 0 时,电路中电流最大,这时  $I=I_g = \frac{E}{R_0 + R_T + R}$ ,为了使  $I_g$  等于微安计的全偏转电流  $I_g$ ,可调节可变电阻  $R_T$ ,使  $I_g = I_g$ ,这时该点为欧姆档的 0 值刻度。

当  $R_x = \infty$  时,电路中电流为 0,这时该点定为欧姆档的无穷大刻度,当  $R_x$  在  $0 \sim \infty$  之间变化时,电流  $I$  也作相应变化,微安计指针的位置也作相应变化,从而测出相应的电阻值。

### 5. 万用表的具体使用

万用表的型号很多,其原理用途基本相同,常用万用表的技术特性见表 3-9:

表 3-9 常用万用表的型号与规格

型 号	测量范围	灵敏度 / $\Omega \cdot V^{-1}$	准确度 级别	表 头			
				全偏转电流 / $\mu A$	内阻/ $\Omega$	匝数	线规 / $mm$
500	直流电压 /V 0~2.5~10~50~250 ~500 2500	4000	4.0	40	2800	1500	0.041
	交流电压 /V 0~10~50~250 ~500 2500	4000	5.0				
	直流电流 /mA 0~0.05~1~10 ~100~500		2.5				
	电 阻 /k $\Omega$ 0~2~20~200 ~2000~20000		2.5				
MF-15	直流电压 /V 0~10~50~250 ~500~1000	2000	2.5	176.5	268	500	0.041
	交流电压 /V 0~10~50~250 ~500~1000	2000	4.5				
	直流电流 /mA 0~0.5~10~100		2.5				
	电 阻 /k $\Omega$ 0~100~1000		2.5				
MF-16	直流电压 /V 0~0.5~10~50 ~250~500	3000	5.0	157	1000	700	0.030
	交流电压 /V 0~10~50~250 ~500	2000	5.0				
	直流电流 /mA 0~0.5~10~100		5.0				
	电 阻 /k $\Omega$ 0~0.001~0.1 ~10~1000		5.0				

续表

型号	测量范围	灵敏度 /Ω·V <sup>-1</sup>	准确度 级别	表头				
				全偏转电流 /μA	内阻/ Ω	匝数	线径 /mm	
108-1	直流电压 /V	0~2.5~10~50 ~250~500 2500	5000	2.5	63	1850	1000	0.030
	交流电压 /V	0~10~50~100 ~250~500 2500	5000					
	直流电流 /mA	0~0.5~5~50 ~500		2.5				
	电阻 /Ω	0~2~20~200 ~20000		2.5				

国产 MF-30 型万用表的面板图见图 3-56 所示,现介绍万用表的具体使用办法。

万用表使用前,要检查指针是否正确指在“0”位处,否则应转动表盘上的机械零位调整螺丝使其在“0”位。测试棒位置要正确,红测试棒应插在“+”的插孔内,黑测试棒应插在“-”的插孔内,测量种类和量程挡次要旋在需要的位置,绝对不能搞错,否则会烧坏微安计或损坏表针。

测量电阻时,首先应将红、黑测试棒碰在一起短路,这时指针应指到欧姆挡的 0 处,否则应转动 0 欧姆调节电位器进行校正,若因电池原因应更换新电池。

## 二、兆欧表

电气设备绝缘的好坏对安全运行有重大影响,其绝缘的好坏用绝缘电阻来反映,而测量绝缘电阻,就要使用兆欧表。使用时要用手摇其手柄,所以又叫摇表。它的标准尺以 MΩ 为单位,这是它名称的来源。

兆欧表主要由手摇直流发电机和磁电系比率表两部分组成。

手摇直流发电机的转子用永久磁铁制成,定子上装有电枢绕组,用手摇动转子旋转时,转了的磁场被定子的绕组所切割,在电枢绕组中就产生感应电动势,它是兆欧表的电源,其容量很小,但电压很高,所以能测量很高的绝缘电阻。电压越高,测量电阻越大。

磁电系比率表是一种特殊形式的磁电系测量机构,其结构见图 3-57,它有两个可动线圈 A<sub>1</sub> 和 A<sub>2</sub>。这两个可动线圈互成一定角度装在一个有缺口的圆柱形铁芯外面,和指针一起固定在同一转轴上。轴上没有产生反作用力矩的游丝,因此仪表不用时,表针可停在任意位置。动

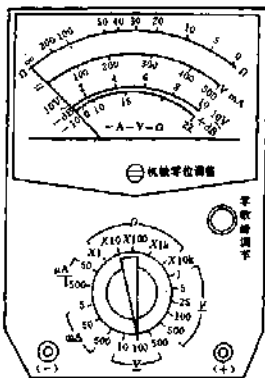


图 3-56 MF-30 型万用表的面板图

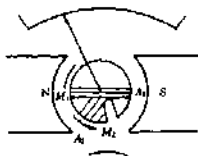


图 3-57 磁电系丁字交叉线圈式比率表的结构原理图

图电流采用柔软的细金属丝引入,由于圆柱核心开有缺口、磁路空气隙内的磁场是不均匀的。线圈的这种结构称丁字形交叉线圈式比率表,广泛用于兆欧表中。

兆欧表的原理性电路见图 3-58。它一般有三个接线柱:“线路”接线柱“L”,“接地”接线柱“E”,“保护”(或“屏”)接线柱“G”,被测绝缘电阻  $R_x$  接在“L”和“E”端钮之间,当用手摇发电机的手柄时,发电机产生的电压  $U$  加在两条支路上,一条为动圈  $A_1$  (线圈电阻为  $R_1$ ),内附电阻  $R_s$  与被测电阻  $R_x$  相串联的电路,另一条为动圈  $A_2$  (线圈电阻为  $R_2$ ),内附电阻  $R_0$  相串联的电路,两条支路的电流为:

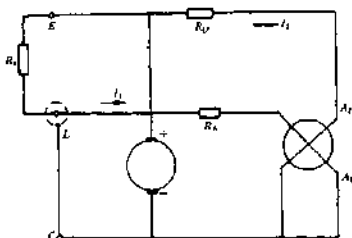


图 3-58 5000 型兆欧表电路图

$$I_1 = \frac{U}{R_1 + R_s + R_x}$$

$$I_2 = \frac{U}{R_2 + R_0}$$

电流  $I_1$  和  $I_2$  分别通过两个线圈时,都会受到永久磁铁磁场的电磁力作用,但两个线圈绕向相反、两个力矩反向。 $M_1$  为转动力矩, $M_2$  为反作用力矩(图 3-57),由于气隙内磁场不均匀。因此,力矩  $M_1$  和  $M_2$  的大小不仅和电源有关,而且与可动部分的偏转角  $\alpha$  有关,用数学形式表示可写成:

$$M_1 = I_1 f_1(\alpha)$$

$$M_2 = I_2 f_2(\alpha)$$

两者平衡时,指针在标度尺上就搭出被测电阻  $R_x$  的大小,此时

$$I_1 f_1(\alpha) = I_2 f_2(\alpha)$$

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{f_2(\alpha)}{f_1(\alpha)} = f_3(\alpha)$$

通过数学变换,指针偏转角



$$\alpha = f\left(\frac{I_1}{I_2}\right) = f\left(\frac{R_2 + R_0}{R_1 + R_2 + R_0}\right) = \phi(R_2)$$

这说明绝缘电阻  $R_2$  的大小决定了指针偏转角  $\alpha$  的大小,而指针偏转角  $\alpha$  的大小由电流  $I_1$  和  $I_2$  的比值所决定。这种指针的指示值由两个线圈中电流的比值所决定的仪表叫“比率表”。公式中  $R_1$ 、 $R_2$ 、 $R_0$  和  $R_0$  都是常数,所以可动部分的偏转角  $\alpha$  只随被测电阻  $R_2$  而改变。

当绝缘电阻  $R_2=0$  时,  $I_1 = \frac{U}{R_1 + R_0}$  最大,转动力矩  $M_1$  也最大,使指针向右偏转到最大位置,即“0”值。

当绝缘电阻  $R_2=\infty$ ,即接线端开路时,  $I_1=0$ ,  $I_2 = \frac{U}{R_2 + R_0}$  不变,转动力矩  $M_2=0$ ,反作用力矩  $M_2$  使指针向左偏转到最大位置,即“ $\infty$ ”值,同时动圈  $A_2$  正好转至圆柱形铁心缺口处(见图 3-57),  $I_2$  所形成的磁场与缺口处由永久磁铁所形成的磁场方向一致,这时将不产生力矩,线圈也就停在此位置。

当绝缘电阻在  $0 \rightarrow \infty$  之间变化时,指针将相应停留在某一位置,从而读出绝缘电阻的数值,表盘的刻度是不均匀的。

用兆欧表测量电动机、变压器、发电机等电气设备的绝缘电阻时,应将摇表的“接地 E”与设备的外壳相连,“线路 L”接到线圈的导线上。测量电缆对地绝缘时,“线路 L”接到芯线上,“接地 E”接到绝缘外皮上,“保护 G”接到芯线的绝缘物上。“保护”(或叫“屏蔽”)端钮主要用来屏蔽表面电流,避免漏电流对测量产生影响。

兆欧表应按电气设备的电压等级来选择,测量额定电压在 500V 以下的电气设备或线路的绝缘电阻时,应选用 500V 或 1000V 的摇表,测量额定电压在 500V 以上的电气设备或线路的绝缘电阻时,应选用 1000V 的摇表,对高压设备,一般应选用 2500V 摇表。

测量前,兆欧表本身应作一次短路和开路试验,就是使两联接线 L 和 E 开路,摇动手柄表针应指到  $\infty$  处,然后把两联接线 L 和 E 迅速相碰一下,表针应指到 0 处。这样,表示兆欧表本身无故障,可以进行测量。

测量绝缘电阻必须断开被测设备的电源,并在充分放电情况下才能测量得准确,也只有这样才能保证人员和设备的安全。被测设备表面应擦拭清洁、干燥,以免表面漏电影响测量结果。测量时采用绝缘良好的单根线,不能用缠绕在一起的双股线,也不要与被测设备和地面相接触,以免影响测量结果。

兆欧表测量时应保持 120 转/分的转速,最低不应低于 90 转/分,最高不应高于 150 转/分,一般采用一分钟以后的读数为准,对于电容较大的被测物,则等到指针稳定后为准。如果所测设备短路,指针会指到 0 点,这时应停止摇动,以免兆欧表发热损坏。

测量大型变压器、电容器、电缆等电容较大的电气设备的绝缘电阻时,因充放电关系,在测定绝缘后,要先将“线路 L”联线断开,再降速松开摇手柄,以免被测设备向摇表倒充电而损坏仪表。被测设备测完后要充分放电才能拆线,以防止残留电压危及人身安全。

测量设备的绝缘电阻时,对于不允许过电压的元件,如晶体管或某些电子线路,必须可靠短接或接地,防止兆欧表的电压使晶体管等元件击穿。

### 三、接地电阻测定器

按“电力工业技术管理法规”规定:电气设备和装置,由于绝缘损坏可能带电而危及人身安

全的金属部分,以及为防止过电压而设置的避雷针、避雷线、避雷器等均应接地。

对于不同的电气设备,其接地电阻的数值有不同的规定,保证接地装置的接地电阻满足规定的数值,这是电气设备正常运行和安全用电的重要条件,为了测量接地装置的接地电阻,这就需要使用接地电阻测定器。

接地电阻测定器外型类似兆欧表,使用时也要用手摇,所以又称接地摇表,国产 ZC-8 型接地电阻测定器有两种,一种量限为 0~10/100/1000Ω,有 E、P、C 三个接线柱,另一种量限为 0~1/10/100Ω,有 C<sub>1</sub>、C<sub>2</sub>、P<sub>1</sub>、P<sub>2</sub> 四个接线柱,主要用来测量各种接地装置的接地电阻和土壤电阻率。

ZC-8 型接地电阻测定器是采用补偿法测量接地电阻,其原理见图 3-59。图中  $U$  为交流电源,  $LH$  为电流互感器,其变流比为  $K$ ,  $R$  为电位器,  $G$  为检流计,  $E'$  为接地装置的接地体,其接地电阻  $R_x$  就是被测量,  $P'$  为电位辅助电极,  $C'$  为电流辅助电极。由于接地电阻  $R_x = \frac{U}{I}$ ,  $U$  为接地体和 0 电位点两者之间的电压,  $I$  为接地体的接地电流,而距离接地体 15~20m 处的电位才为 0,所以辅助电极  $P'$  与接地体  $E$  相距 20m,辅助电极  $P'$  与  $C'$  之间也相距 20m。

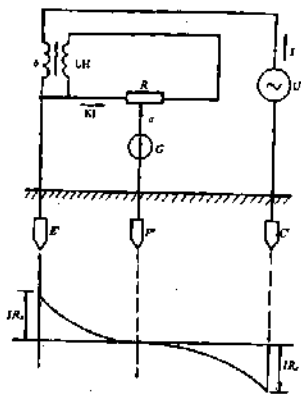


图 3-59 用补偿法测量接地电阻的原理图

测量时交流电源产生的电压  $U$  经电流互感器原边、接地体  $E'$ , 经地和电流辅助电极  $C'$  构成回路, 形成接地电流  $I$ , 构成如图的电位分布, 电位辅助电极  $P'$  居中, 它的电位为 0, 因此  $E'$  和  $P'$  之间电压为  $IR_x$ 。

测量时调节可变电阻  $R$  使检流计  $G$  的电流为 0, 而在电流互感器副边回路中流过的电流为  $KI$ , 设电位器  $R$  左边部分电阻为  $R_s$ , 则  $a, b$  两点间电压为

$$U_{ab} = KIR_s$$

该电压与  $E'$  和  $P'$  之间的电压相等, 所以:

$$IR_x = KIR_s$$

则

$$R_x = KR_s$$

这样, 已知电流互感器变比  $K$  和电位器电阻  $R_s$  就可计算出接地体  $E'$  的接地电阻  $R_x$ 。

计算  $R_x$  与两个辅助电极无关, 但两个电极是测量时必不可少的条件,  $P'$  存在才能使检流计指 0,  $C'$  存在使接地电流  $I$  构成回路, 并使测量结果不包括辅助电极的接地电阻。

ZC-8 型接地电阻测定器的具体电路如图 3-60。手摇发电机产生 90~98 周/s 的交流电作为电源, 使电流互感器原副边分别产生电流  $I_1$  和  $I_2$ 。磁电系检流计  $G$  所需的直流电流由机

被整流器或相敏整流器提供。三个端钮  $E$ 、 $P$ 、 $C$  分别接接地体和辅助电极。 $P_2$  串联电容  $C$  为了隔断直流,防止杂散电流的影响,该仪表有三个量程,由三组不同的分流电阻  $R_1 \sim R_3$  和  $R_4 \sim R_6$  对电流互感器的副边电流以及检流计支路的分流。用转换开关  $K$  实现切换,以得到  $0 \sim 1\Omega$ ,  $0 \sim 10\Omega$ ,  $0 \sim 100\Omega$  三档。

测量前,首先将两根探测针分别插入地中,如图 3-61 所示。被测接地电阻  $E'$ , 电位探测针  $P'$ , 电流探测针  $C'$ , 在一条直线上,  $P'$  距  $E'$  20m,  $C'$  距  $E'$  40m, 并用专用导线分别与仪表的相应接线柱相接。

测量时仪表放平,检查检流计的指针是否在红线上,否则可用“调 0 螺丝”把指针调整指于红线。然后将仪表的“倍率标度”置于最大倍数,慢慢转动发电机的摇把,同时旋动“测量标度盘”,使检流计指针平衡,当指针接近红线时,加快发电机摇把的转速使其达额定转速(120 转/s),再调整“测量标度盘”,使指针于红线上。

当指针完全平衡在红线上以后,用“测量标度盘”的读数乘以“倍率标度”的倍数,即为所测的电阻值。

测量时,接地装置要与被测保护的的设备断开,以便得到准确的测量数据,当被测电阻小于  $1\Omega$  时,为了消除接线电阻和接触电阻的影响,宜采用有四端钮的测定器。原  $C_1$  和  $P_2$  用短接片连接作为  $E$ , 现将短接片打开,分别用导线接到接地体上,并使端钮  $P_1$  接靠近接地体的一侧,如图 3-62 所示。

量程为  $0 \sim 1/10/100\Omega$  的四端钮的接地电阻测量器还可用来测量土壤的电阻率。

另外还有国产的 JD-1 型晶体管接地电阻测定仪,使用干电池,不用手摇发电机,重约 1.5kg,比较轻便。

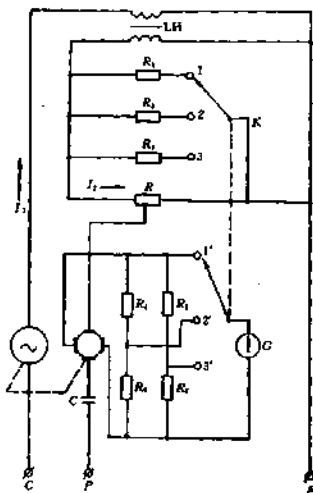


图 3-60 2C-8 型接地电阻测定仪

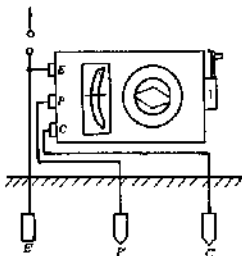


图 3-61 测量接地电阻的接线图

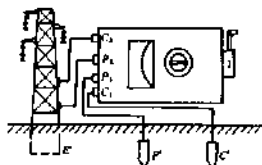


图 3-62 四端钮式测定器测量小接地电阻的接线图

## 习 题

3-1 某变压器原边电压  $U_1 = 3300\text{V}$ ，副边电压  $U_2 = 220\text{V}$ ，原边匝数为  $N_1 = 2100$  匝，变压器的负载为  $|z_L| = 10\Omega$  的阻抗，求副边绕组的匝数  $N_2$  及原、副绕组中的电流  $I_1$  和  $I_2$ 。

3-2 某变压器  $N_1 = 1000$  匝， $U_1 = 220\text{V}$ ， $U_2 = 55\text{V}$ ， $I_2 = 8\text{A}$ ，试求变压器的原边电流  $I_1$  和副绕组匝数  $N_2$ 。

3-3 某变压器的额定容量  $S_N = U_{1N} \cdot I_{1N} = 100\text{kVA}$ ，额定电压为  $10000/230\text{V}$ 。当此变压器向  $R = 0.412\Omega$ ， $X_L = 0.309\Omega$  的负载供电时正好满载，求变压器原、副绕组的额定电流和电压调整率。

3-4 某变压器的额定电压为  $10000/230\text{V}$ ，额定电流为  $5/127\text{A}$ ，在空载时原绕组自  $10000\text{V}$  电源取用功率  $340\text{W}$ ，电流  $0.43\text{A}$ ，试求变压器的变比及空载时原绕组的功率因数。

3-5 一台单相照明变压器铭牌上标明容量  $10\text{kVA}$ ，电压  $3300/220\text{V}$ 。现在副绕组接上  $220\text{V}$ 、 $50\text{W}$  的电灯，试求可接多少盏电灯？原、副绕组中的电流是多少？

3-6 某单相行灯变压器原边额定电压  $U_{1N} = 220\text{V}$ ，额定电流  $I_{1N} = 4.55\text{A}$ ，副边额定电压  $U_{2N} = 36\text{V}$ ，试求副边可接  $36\text{V}60\text{W}$  的白炽灯多少？

3-7 试绘出磁极对数  $P=2$  及定子绕组接成 Y 形的三相异步电动机在  $\omega t = 0^\circ$  和  $\omega t = 90^\circ$  时定子合成磁场的图形。三相电流为 A-B-C 相序。当对调 B 相和 C 相两根电源线，会发生什么变化？

3-8 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)  $S > 1$ 。

3-9 一台三相异步电动机的额定转速为  $n = 960\text{r/min}$ ，电源频率  $f = 50\text{Hz}$ ，试求电动机的同步转速  $n_s$  和额定转差率  $S_N$  是多少？

3-10 三相异步电动机在正常运行时，如果转子突然被卡住而不能转动，这时电动机的电流有何变化？对电动机有何影响？如果把电动机的转子抽走后，在定子绕组上加额定电压，有

什么后果。

3-11 在稳定运行情况下,当负载转矩增加时,异步电动机的电磁转矩为什么也相应增加?当负载转矩大于电动机的最大转矩时,电动机将发生什么情况?

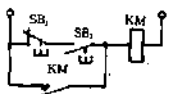
3-12 三相异步电动机的额定功率  $P_N = 4\text{kW}$ , 额定电压  $U_N = 220/380\text{V}$ , 额定转速  $n_N = 1450\text{r/min}$ , 额定功率因数  $\cos\varphi_N = 0.85$ , 额定效率  $\eta_N = 86\%$ 。试求:(1)额定输入功率  $P_1$ ;(2)星形联接和三角形联接时的额定电流  $I_N$ ;(3)额定转矩  $T_N$ ;(4)额定转差率  $S_N$ 。

3-13 Y280 S 4 型三相异步电动机的技术数据如下:额定功率  $P_N = 75\text{kW}$ , 转速  $n_N = 1485\text{r/min}$ , 效率  $\eta_N = 92.7\%$ ,  $\cos\varphi_N = 0.88$ , 起动电流与额定电流之比  $I_s/I_N = 7$ ,  $U_L = 380\text{V}$ 。试求:(1)额定转差率  $S_N$ ;(2)定子绕组的额定电流  $I_N$ ;(3)起动电流  $I_s$ ;(4)额定转矩  $T_N$ 。

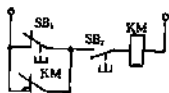
3-14 已知 Y132 S 4 型三相异步电动机的技术数据为:功率  $P_N = 5.5\text{kW}$ , 频率  $f = 50\text{Hz}$ , 转速  $n_N = 1440\text{r/min}$ , 电压  $U_L = 380\text{V}$ , 效率  $\eta_N = 85.5\%$ , 功率因数  $\cos\varphi_N = 0.84$ ,  $\frac{I_s}{I_N} = 7$ ,  $\frac{T_s}{T_N} = 2.2$ ,  $\frac{T_{\max}}{T_N} = 2.2$ 。试求电动机的额定电流, 起动电流, 起动转矩及最大转矩。

3-15 已知 JO<sub>2</sub>-64-4 型三相异步电动机的技术数据为: $P_N = 17\text{kW}$ , 频率  $f = 50\text{Hz}$ , 转速  $n_N = 1460\text{r/min}$ , 电压  $U_L = 380\text{V}$ , 接法为  $\Delta$  形, 功率因数  $\cos\varphi_N = 0.88$ , 效率  $\eta_N = 89.2\%$ ,  $\frac{I_s}{I_N} = 7$ ,  $\frac{T_s}{T_N} = 1.3$ , 当采用 Y- $\Delta$  起动时, 求:(1)起动电流,(2)当负载转矩分别为  $0.3T_N = 33.4\text{N}\cdot\text{m}$  和  $0.5T_N = 55.6\text{N}\cdot\text{m}$  时, 电动机能否起动?

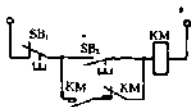
3-16 试分析题图所示电动机控制电路能否正常工作?如果不能, 说明存在的问题。



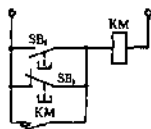
(a)



(b)



(c)



(d)

题图

3-17 试画出既能连续工作, 又能点动的控制电路。

3-18 试画出两处独立控制同一电动机的控制电路。

3-19 车床主轴由电动机  $M_1$  带动, 润滑油泵由电动机  $M_2$  带动。今要求: (1) 主轴必须在油泵开动后, 才能开动; (2) 主轴要求正反转, 并能单独停车; (3) 有短路、欠压及过载保护。试画出控制电路。

3-20 试画出用行程开关控制工作台自动往返的控制电路。(提示: 电动机能正反转, 用两个行程开关分别装在所控行程的两端, 每个行程开关有一对常闭和一对常开触点, 由工作台上的挡块来碰撞。)

3-21 有两台电动机  $M_1$  和  $M_2$ , 今要求: (1)  $M_1$  先起动, 经过一定时间后  $M_2$  能自动起动; (2)  $M_2$  起动后,  $M_1$  立即停车, 试画出控制电路。

## 第四章 民用建筑供电系统

本章主要涉及供电系统的一般知识,介绍变电站、配电所的电气主接线,主要电气设备、低压配电线路,电力负荷计算方法,导线、熔断器的选择,这样对发电、输电、变电、配电、用电有一个比较完整的了解。

### 4-1 电力系统概述

电力是现代工农业生产的主要能源和动力,电能比其它形式的能量具有很多优点,它可以很方便地转换为其它形式的能量,输送和分配经济方便,易于控制,有利于实现自动化等,因此,电能广泛应用于国民经济各个领域。

#### 一、电力系统的组成

电力系统是发电厂、电力网和用电设备组成的统一整体。

电力网由变电所、配电所及各种电压等级的电力线路组成,它是电力系统的一部分。

图 4-1 是电力系统示意图。电能由发电厂发出,经电力网变换、输送、分配,然后供给用电设备消费使用。

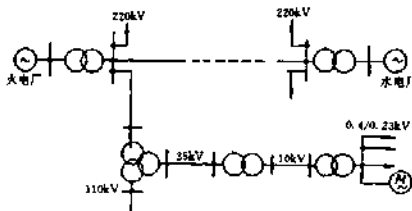


图 4-1 电力系统示意图

发电厂是把各种形式能量转换成电能的工厂,按照被转换能源的不同,发电厂有不同的类型,主要有火力发电厂、水力发电厂、原子能发电厂。

火力发电厂主要设备有锅炉、汽轮机、发电机,它是利用燃料(主要是煤)燃烧产生热能来生产电能。水力发电厂主要由水库、水轮机、发电机等组成,它是将水流中的位能转换成电能。原子能发电厂是以原子能反应堆和蒸发器代替锅炉,利用原子核的核能来产生电能。

变电所是接受电能、变换电压和分配电能的场所,将低电压变换成高电压称为升压变电

所,一般建在发电厂附近,将高电压变换成低电压称为降压变电所,一般建在用电负荷中心,主要用来接受和分配电能,不改变电压的场所称为配电所,多建在建筑物内部。

电力线路是输送电能的通道,由于发电厂高电能用户都较远,所以需要各种不同电压等级的电力线路,将发电厂生产的电能源源不断的输送到电能用户。

电力负荷就是消费电能的用电设备。用电设备按其用途可分为:动力用电设备,如电动机等;工艺用电设备,如电解、冶炼、热处理等;电热用电设备,如电炉、空调等;照明用电设备等。它们分别将电能转换成机械能、热能、光能,以适应生产和生活对电能的需要。按我国各类电能用户统计资料表明,工业是电力系统的最大电能用户,约占总电量的73%。

## 二、电力系统的电压等级

考虑设备制造的标准化、系列化,我国规定了电力系统的额定电压,不同的额定电压有不同的用途。从输电角度来考虑,输送功率一定时,输送电压越高,则线路中电流越小,就可减少线路上的电能损失和电压损失,对于某一截面的线路,输送电压越高,则传输的功率也越大,输送的距离也越远。但额定电压越高,对绝缘水平的要求也越高,投资造价也越高。因而对应一定输送功率和输送距离,有一相应的技术经济上合理的额定电压,表4-1列出了各种额定电压等级线路的合理输送功率和输送距离的有关数据。

表4-1 各种额定电压等级线路的输送功率和输送距离

额定电压(U) /kV	输送功率(P) /kW	输送距离 /km
0.22	50以下	0.15以下
0.38	100以下	0.6以下
3	100~1000	1~3
6	100~1200	4~15
10	200~2000	6~20
35	2000~10000	20~50
110	10000~50000	50~150
220	100000~500000	100~300

在我国电力系统中,110kV及以上电压多作为主干线电压,35kV多用于大型工厂、建筑群的内部供电网络,6~10kV多作为一般工厂内部、建筑物、建筑工地的高压配电电压,380/220V电压等级多作为工厂内部、建筑物内的低压配电电压。关于用电设备,一般是380/220V低压电器,也有6kV或10kV的高压电动机。

若仅考虑输电线的电阻和有功功率损耗,则可对各种输送电压进行具体比较。由三相视在功率的公式 $S = \sqrt{3}UI$ 可得到输电线中的电流公式

$$I = \frac{S}{\sqrt{3}U} \quad (4-1)$$

式中  $S$  —— 三相输电线输送的视在功率,VA;



$U_e$ ——线路的额定线电压, V。

若输电线每根的电阻为  $R$ , 则三相输电线的有功损耗为  $\Delta P = 3I^2 R$ 。将(4-1)代入

$$\Delta P = \frac{S^2}{U_e^2} R = \frac{P^2 + Q^2}{U_e^2} R \quad (4-2)$$

式中  $P$ 、 $Q$ 、 $S$ ——三相输电线路输送的有功、无功、视在功率。

**例 4-1** 一条 LJ-70 的铝绞线输电线路, 长 8 公里, 每公里单位电阻  $r_0 = 0.46 \Omega/\text{km}$ , 输送功率  $S = 800 \text{ kVA}$ , 试比较用 10kV 和 6kV 电压输送时线路的有功功率损耗。

**解** 每根输电线路的电阻:  $R = r_0 l = 8 \times 0.46 = 3.68 \Omega$ 。采用 10kV 时的有功损耗  $\Delta P_{10kV} = \frac{800^2}{10^2} \times 3.68 = 23.6 \text{ kW}$ ; 采用 6kV 时的有功损耗  $\Delta P_{6kV} = \frac{800^2}{6^2} \times 3.68 = 65.4 \text{ kW}$ 。

所以, 当工厂或建筑工地没有 6kV 用电设备时, 从技术、经济综合比较, 最好采用 10kV 电压。

### 三、民用建筑的供电系统

民用建筑的供电系统根据负荷的大小, 采用不同的方案。

对于小型民用建筑, 由于负荷较小, 则可采用一个降压变电所, 将 6~10kV 电压经变压器降压为 380/220V 供用户使用, 其供电系统如图 4-2。

若小型民用建筑用电量较小, 附近已有低压电源, 且变压器容量足够, 则可不再安装变压器, 而设立一个低压配电室由该变压器供电。

对于中型民用建筑物, 由于负荷较大且分散, 则可设立高压变电所, 由 6~10kV 电源进线, 然后分别引出几路高压出线, 在各负荷相对集中地点设立降压变电所, 将电压降为 380/220V 供给各用户, 如图 4-3 所示。

对于大型民用建筑, 由于负荷很大, 分布更广, 采用 6~10kV 电压在经济技术上均不合理, 必须采用 35kV 电压, 进行两次降压。这时应设立总变电所, 将 35kV 降为 6~10kV 电压, 然后用高压配电线将电能送至各负荷中心, 并设立变电所再降至 380/220V。如图 4-4 所示。

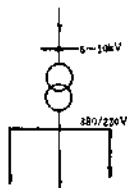


图 4-2 小型民用建筑物的供电系统

### 四、电力负荷的分类

根据用电设备在生产和社会生活中的重要性, 以及供电中断对人身和设备安全的影响, 电能用户分为三个等级。对于不同等级的电能用户, 其供电要求也不同。

供电中断将造成人身伤亡, 或造成重大设备损坏, 或破坏复杂的工艺过程使生产长期不能恢复, 或破坏重要交通枢纽、通讯设施、宾馆、公共场所的正常秩序, 带来极大政治经济损失者, 属于一级负荷。一级负荷要求有两个独立的电源供电, 当一个电源发生故障或检修时, 另一个电源能继续供电, 保证供电不中断。

供电中断将造成经济较大损失, 设备局部损坏, 产品大量减产, 生产较长时间才能恢复, 以及影响交通枢纽、通讯设备等正常工作, 造成城市及重要公共场所, 如大型体育场, 大型影剧院

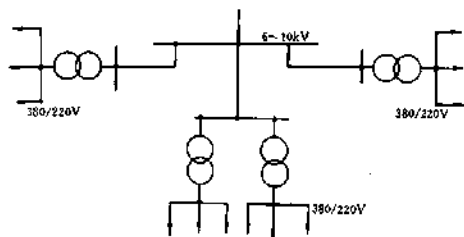


图 4-3 中型民用建筑物的供电系统

等秩序混乱的电能用户属于二级负荷。二级负荷应由两条线路供电，即一条线路工作时，另一条线路处于备用，当采用两条线路有困难时，则允许由一条专用架空线供电。

不属于一级和二级负荷的电能用户均为三级负荷。三级负荷对供电无特殊要求，允许较长时间停电，可用单回线路供电。

在民用建筑中，重要的医院、大型商场、体育馆、影剧院、重要宾馆和电信电视中心应列入一级负荷。一般民用建筑都属于三级负荷。

为了确定民用建筑的用电负荷等级，必须作深入的调查研究，即使在同一建筑中，对于不同的用电设备和不同的部位，其用电负荷的级别也不一定相同，建筑物用电设备及部位的负荷级别见表 4-2。

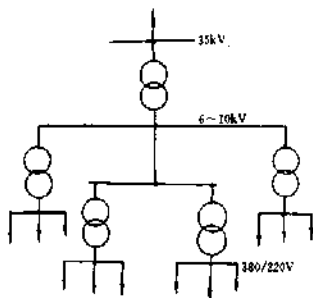


图 4-4 大型民用建筑物供电系统

表 4-2 常用民用用电设备及部位的负荷级别

序号	建筑类别	建筑物名称	用电设备及部位名称	负荷级别
1	住宅建筑	高层普通住宅	客梯电力、楼梯照明	二级
2	宿舍建筑	高层宿舍	客梯电力、主要通道照明	二级
3	旅馆建筑	一、二级旅游旅馆	经营管理用电子计算机及其外部设备电源,宴会厅、电声、新闻摄影、录像电源,宴会厅、餐厅、娱乐厅、高级客房、厨房、主要通道照明,部分客梯电力,厨房部分电力	一级
		高层普通旅馆	其余客梯电力,一般客房照明	二级
4	办公建筑	省、市、自治区及部级办公楼	客梯电力,主要办公室、会议室、值班室、档案室及主要通道照明	一级
		银行	主要业务用电子计算机及其外部设备电源,防盗信号电源 客梯电力	一级 二级
5	教学建筑	高等学校教学楼	客梯电力、主要通道照明	二级
		高等学校的重要实验室		一级
6	科教建筑	科研院所的重要实验室		一级
		市(地区)级及以上气象台	主要业务用电子计算机及其外部设备电源,气象雷达、电报及传真收发设备、卫星云图接收机、语言广播电报、天气绘图及预报照明 客梯电力	一级 二级
		计算中心	主要业务用电子计算机及其外部设备电源 客梯电力	一级 二级
7	文娱建筑	大型剧院	舞台、贵宾室、演员化妆室照明,电声、广播及电视转播、新闻摄影电源	一级
8	博览建筑	省、市、自治区级及以上博物馆、展览馆	珍贵展品展室的照明,防盗信号电源 商品橱窗用电	一级 二级
		省、市、自治区级及以上体育馆、体育场	比赛厅(场)、主席台、贵宾室、接待室、广场照明、计时记分、电声、广播及电视转播、新闻摄影电源	一级
10	医疗建筑	县(区)级及以上医院	手术室、分诊室、婴儿室、急诊室、监护病房、高压氧仓、病理切片分析、区域性中心血库的电力及照明 细菌培养、电子显微镜、电子计算机X线断层扫描装置、放射性同位素加速器电源,客梯电力	一级 二级
		商业仓库建筑	冷库	大型冷库、有特殊要求的冷库的一台氟压缩机及其附属设备电力,电梯电力,库内照明
12	商业建筑	省辖市及以上重点百货大楼	营业厅部分照明 自动扶梯电力	一级 二级

## 4-2 变电所和配电所



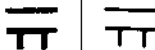
















变电所是接受电能,变换电压和分配电能的场所。配电所基本是用来接受和分配电能,不改变电网电压。变配电所在规划设计中,要尽量接近负荷中心,进出线方便,避免多尘和有腐蚀性气体的场所,避免有剧烈振动和低洼积水地区。尽可能结合土建工程规划设计,以减少建设投资 and 电能损耗。

### 一、变、配电所主接线

电气主接线图是由各种主要电气设备——变压器、开关、互感器等按一定顺序连接而成的总电路图,又称一次电路或一次接线图,一次电路中的电气设备称一次电气设备。由于交流三相供电系统一般是对称的,所以可以用一根线表示三相电路,称为电气主接线单线接线图,简称电气主接线图。

电气主接线图应按国家规定标准的图形符号和文字符号绘制。现将各种常用电气设备的图形和文字符号列于表 4-3,供参考。

表 4-3 电气主接线的主要电气设备文字与图形符号表

电气设备名称	文字符号	图形符号	简化图形	电气设备名称	文字符号	图形符号	简化图形
电力变压器	B			母线及母线引出线	M		
断路器	DL			电流互感器(单级)	LH		
负荷开关	F			电流互感器(双级)	LH		
隔离开关	G			电压互感器(单相式)	YH		
熔断器	RD			电压互感器(三相式)	YH		

续表

电气设备名称	文字符号	图形符号	简化图形	电气设备名称	文字符号	图形符号	简化图形
跌落式熔断器	DR			两相熔断器	FZ		
自动空气断路器 (低压空气开关)	ZK			电抗器	DK		
刀开关	DK			移相电容器	C		
刀熔开关	KK			电焊及其 终端头	L		

对于用电量很大的大型民用建筑,可采用 35kV 线路——变压器组单元接线,见图 4-5。35kV 侧接有避雷器、隔离开关、高压断路器。6~10kV 侧采用单母线不分段,接有站用变压器、电压互感器、避雷器等,并有 4 路高压出线,每条高压出线都有隔离开关、高压断路器、避雷器。在不同位置装有电流互感器,电流互感器用于计量和继电保护。

配电所由于不进行变压,所以接线简单,见图 4-6。6~10kV 进线接有避雷器和总断路器,然后有多路出线供给多个高压用电点。配电所内装有电压互感器,用高压熔断器对其保护,电流互感器未画出。电压、电流互感器都用于计量和继电保护。

一般民用建筑用电量都不大,可采用线路——变压器组单元接线,如图 4-7。这种接线的高压侧可根据不

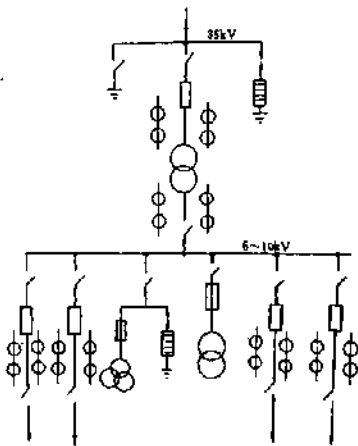


图 4-5 35kV 线路——变压器组单元接线图

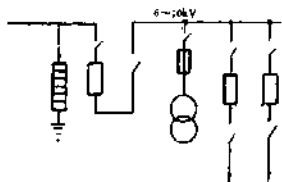


图 4-6 配电所主接线图

故障时,保险丝熔断,熔管跌落下来切断电源。

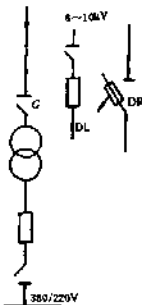


图 4-7 线路-变压器组单元接线

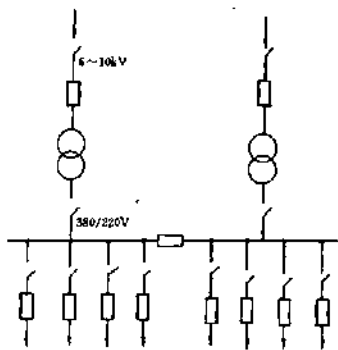


图 4-8 双回路两行变压器的变电所主接线图

线路-变压器组单元接线简单,设备少,节约了投资和占地面积。其缺点是任一设备出故障均会使供电中断,所以供电可靠性差。但变压器出故障的机率较小,在防蓄保护较完善的情况下,仍有较好的供电可靠性,所以广泛应用于三级负荷供电。如果低压侧有备用电源,或低压母线接有来自相邻变电所的联络线时,也可对一级或二级负荷供电。

为了提高供电的可靠性,满足对一、二级负荷的供电要求,可采用双回路和两台变压器的主接线图,如图 4-8 所示。其低压侧母线用联络开关分段,正常运行时母线联络开关处于断开位置,当双回路中有一路进线电源中断,可通过低压母线联络开关将断电部分的负荷接到另一条进线上,保证负荷继续供电。如果低压母线有一段发生故障或停电检修时,另一段母线仍可正常工作,所以供电可靠性很高。

同情况装设不同高压电器,一般有三种情况。

高压侧通常可装设一台高压断路器 *DL* 和一台隔离开关,发生故障时,*DL* 可断开切除故障。

由于变压器低压侧装有断路器,当高压线路较短,或供电端变电所的继电保护范围可以包括该供电线路全长和变压器时,可在变压器高压侧仅装一只隔离开关 *G*;高压侧也可采用高压熔断器来保护变压器,通常采用跌落式熔断器,当变压器出现

## 二、变、配电所的高压电气设备

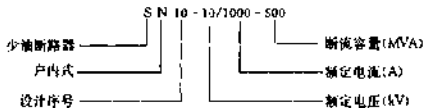
在6~10kV的民用建筑供电系统中,常用的高压一次电气设备有:高压断路器、高压隔离开关、高压熔断器、避雷器、高压开关柜等。一次侧额定电压为6~10kV的电压、电流互感器也属高压一次设备。

### 1. 高压断路器

高压断路器又叫油开关,按用油多少又分为高压多油断路器和高压少油断路器,多油断路器用油量多,其绝缘油有灭弧、绝缘作用,外壳不带电。少油断路器用油量少,其绝缘油主要起灭弧作用,所以外壳一般是带电的。6~10kV户内配电装置中都采用少油断路器,图4-9所示为SN10-10型高压少油断路器的外型结构图。

高压断路器具有相当完善的灭弧装置和足够大的灭弧能力,它的作用是在正常运行时接通和断开负荷电流;在发生短路故障或严重过负荷时能自动跳闸,切断故障电流,以防止事故范围扩大。所以断路器工作好坏,直接关系到供电系统的安全运行。

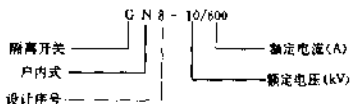
SN10-10/1000-500型号的含义



### 2. 高压隔离开关

隔离开关没有灭弧装置,因而不能接通和切断负荷电流,更不能切断故障短路电流。按装设地点的不同可分为户内式和户外式两大类。图4-10是GN8-10/600型户内高压隔离开关的外型结构图。

型号含义



隔离开关的主要作用是用来隔离高压电源,造成明显的断开点,以保证其它电气设备能安全进行检修;也可用来接通和断开较小电流,例如接通和断开电压互感器、避雷器、激磁电流不超过2A的空载变压器,电容电流不超过5A的空载线路等。由于隔离开关没有专门的灭弧装置,所以不允许用它接通和断开负荷电流。接通有负荷的电流时,必须先闭合隔离开关,然后再闭合高压断路器;断开有负荷的电路时,必须先用高压断路器切断电路,然后才能断开隔离开关。为了防止用隔离开关分合带负载的电路,应在隔离开关和相应断路器之间加装联锁装置,以防止误操作。

### 3. 高压熔断器

熔断器是一种常用的、简单的保护装置,当电路发生严重过负荷或短路故障时,熔丝熔断,

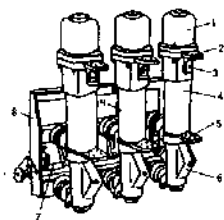


图 4-9 SN10-10 型高压少油断路器  
1—上帽;2—上出线座;3—油标;  
4—绝烧筒;5—下出线座;6—基座;  
7—主轴;8—框架;9—断路弹簧

在熔管自重作用下跌落,形成明显的断开间隙。

切断电路,防止故障扩大。主要有户内和户外两大类,6~10kV 电路中,户内广泛使用 RN<sub>1</sub>、RN<sub>2</sub> 型管式熔断器,户外广泛使用 RW<sub>3</sub> 型跌落式熔断器。

户内高压熔断器 RN<sub>2</sub> 型的外形结构如图 4-11,熔管及其内部结构如图 4-12 所示。

在高压熔断器的密封瓷管内,由一根或几根并联的铜丝组成熔体,四周充满石英砂填料。当短路电流或过负荷电流通过熔体时,熔体熔断,切断电路,石英砂熄灭电弧,同时指示器弹出,表示熔体已熔断。

图 4-13 所示为户外 RW<sub>4</sub>-10 型跌落式熔断器,它的熔管由酚醛纸管做成,里面装有熔丝。当线路发生故障时,故障电流使熔丝熔断并产生电弧,电弧的高温使管壁分解产生大量气体,使电弧迅速熄灭。熔丝熔断后,熔管下部触头因失去张力而下翻,

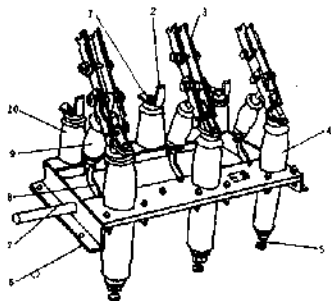


图 4-10 GN8-10/600 型高压隔离开关

- 1—上接线端;2—静触头;3—刀闸;4—套管绝缘子;5—下接线端;  
6—框架;7—转轴;8—拐臂;9—升降绝缘子;10—支柱绝缘子

这种熔断器适用于没有导电尘埃,没有腐蚀性气体,无易燃易爆和剧烈振动的场所。可作电力线路和变压器的短路保护,也可用绝缘棒操作,断开和接通小容量空载变压器、空载线路和小负荷电流,在 6~10kV 变压器上广泛使用。

#### 4. 高压开关柜

高压开关柜属于成套配电装置,它是由制造厂按一定的接线方案,将同一回路的开关、母线、测量仪表、保护电器和辅助设备等等,组成一个整体,成套供应给用户。



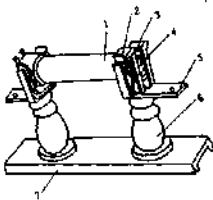


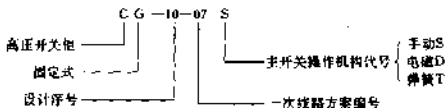
图 4-11 RN<sub>1</sub> 型高压管式熔断器  
1—瓷熔管；2—金属管帽；3—操作触座；4—熔断指示器；5—挂线端子；6—瓷绝缘子；7—底座



图 4-12 RN<sub>1</sub> 型高压管式熔断器的熔管剖面示意图  
1—管帽；2—瓷熔管；3—工作熔体；4—指示熔体；5—绝缘球；6—石英砂填料；7—熔断指示器（虚线表示指示器在熔体熔断时弹出）

这种成套配电设备结构紧凑，运输和使用方便，体积小、节约钢材，在变电所广泛应用于控制和保护变压器及电力线路。图 4-14 为 GG-10-07S 型高压开关柜的外型结构图。

#### GG10-07S 型号的含义



还有一些高压设备，如高压负荷开关、电压电流互感器，由于篇幅限制，就省略不讲了。

### 三、变、配电所的低压电气设备

民用建筑物的低压电气设备主要是对低压配电线路及用电设备进行控制和保护，其主要设备有：低压熔断器、刀闸开关、自动空气开关、低压配电板等。

#### 1. 低压熔断器

低压熔断器是串接在低压线路中的一种保护电器。当线路严重过负荷或发生短路时，熔片因产生的热量而熔断，从而切断有故障的线路。常用的低压熔断器有瓷插式(RC)、螺旋式(RL)、密闭管式(RM)、填料管式(RT)等。在同一熔断器内，可分别装入不同额定电流的熔体，最大的熔体额定电流可与熔断器的额定电流相同。

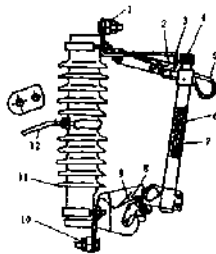


图 4-13 RW4-10 型户外跌落式熔断器  
1—上接线端；2—上静触头；3—上瓷触头；4—管帽；5—操作杆；6—熔管（外层为酚醛纸管或环氧玻璃布管，内套消弧管）；7—绝缘球；8—下静触头；9—下静触头；10—下接线端；11—瓷绝缘子；12—固定安装板

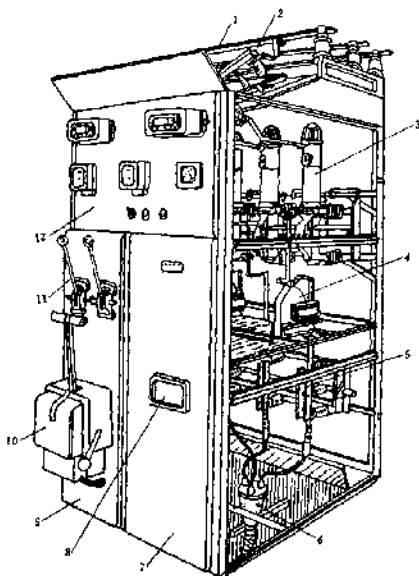


图 4-14 GG10-07S 型高压开关柜(已抽出正面的防护板)

1- 母线(汇流排);2- 高压隔离开关;3- 高压断路器;4- 电流互感器;5- 高压隔离开关;6- 电  
头;7- 检修门;8- 观察用玻璃;9- 操作板;10- 高压断路器操作机构;11- 高压隔离开关操作机构;  
12- 仪表、继电板(兼检修门)

## 2. 刀闸开关

刀闸开关也称刀开关,是一种简单的手动操作电器,用于非频繁接通和断开容量不大的  
低压供电线路,也可兼作电源隔离开关。按结构形式可分为胶盖闸刀开关(HK)、铁壳开关  
(HH)、熔断式刀开关(HR)等。其中熔断式刀开关是将熔断器和刀开关组合在一起,以简化配  
电装置的结构。

## 3. 低压空气开关

低压空气开关具有良好的灭弧性能,它既可带负荷接通和断开电路,也可切断短路电流,  
但不宜用于频繁操作的电路,它广泛用于变电所总开关,大负荷电力线路和大功率电动机的控  
制开关。

空气开关的工作原理和接线图如图 4-15 所示,主触头 1 常闭触 2 和锁扣 3 维持在闭合状  
态,过流脱扣器的线圈 7 串联在电路中,当电路发生故障时,较大的电流使衔铁 9 一端向下吸

住,另一端克服弹簧拉力向上转动,顶撞锁扣 3,释放跳钩 2,使主触头跳开,切断电路,这就是瞬时脱扣。延时脱扣靠热脱扣器动作来完成,它的加热电阻丝 13 也串联在电路中,较大的电流使它发热,加热双金属片 12,双金属片向上弯曲顶撞锁扣 3,使主触头断开。

空气开关还装有欠压保护。欠压脱扣器 8 的线圈接在线电压上,正常运行时,衔铁 10 被吸住,当电压降低到额定电压的 50%~60% 时,线圈吸力小于弹簧 11 的拉力,衔铁 10 向上撞击锁扣,使开关跳闸。

图 4-16 为 DZ10-250 型塑料外壳式空气开关的剖面图,其全部结构和导电部分都装在塑料外壳内,仅在壳盖中央露出操作手柄,供手动操作。

图 4-17 为 DW10-200 型自动空气开关外形结构图,它的合闸操作方式较多,可直接手动或通过杠杆手动操作,也可由电磁铁或电动机操作,故又称万能式自动开关。

自动空气开关型号的含义如下

字母, D 表示自动空气断路器

字母, D 表示自动空气断路器  
(即自动开关)

字母, W 表示万能式, Z 表示装置式

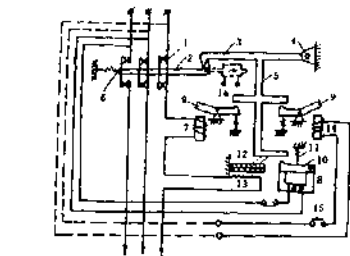
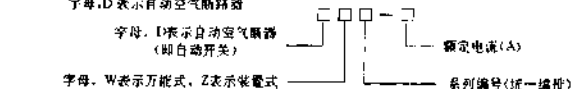


图 4-15 自动空气开关动作原理示意图

1-触头;2-锁键;3-搭钩(代表自由脱扣机构);4-转轴;  
5-杠杆;6,11-弹簧;7-过流脱扣器;8-欠压脱扣器;9、  
10-衔铁;12-热脱扣器双金属片;13-加热电阻丝;14-分  
励脱扣器(远距离切除);15-按钮;16-合闸电磁铁



#### 4. 低压配电箱

低压配电箱是将有关低压开关电器按一定的接线方案组合起来的成套配电装置,用于 500V 以下的供电系统中,作照明和动力配电之用。按其维护方式不同分单面维护式和双面维护式两种类型,BSL 系列属于双面维护式低压配电箱,如图 4-18 所示,面板上部装有测量仪表,中部有闸刀开关。

单面维护式靠墙安装,在前侧维护检修;双面维护式离墙安装,屏后留有维护通道,可前后两面进行维修,比单面更方便一些。

低压配电箱型号含义如下:



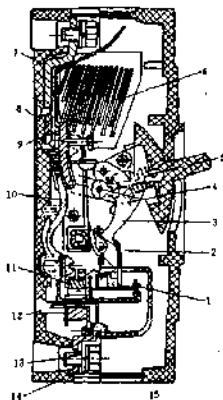


图 4-16 DZ10—250 型自动空气开关

1—牵引杆；2—锁扣；3—锁钩；4—连杆；5—操作手柄；6—灭弧罩；7—引入线；  
8—静触头；9—动触头；10—可挠性接头；11—电磁脱扣器；12—热脱扣器；  
13—引出线和接线嘴；14—塑料底座；15—塑料盖

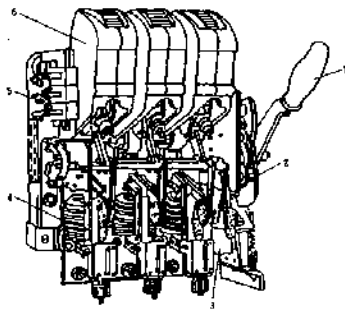


图 4-17 DW10—200 型万能式自动开关

1—操作手柄；2—自动脱扣机构；3—热脱扣器；4—过流脱扣器；5—触头触点；6—灭弧罩

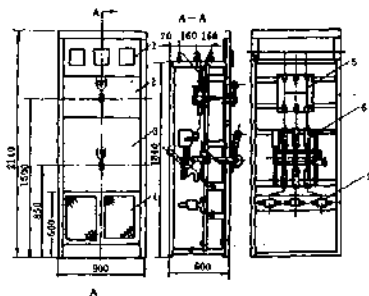


图 4-18 BSL-10 型低压配电箱

1—仪表板;2—上操作板;3—下操作板;4—门;5—刀开关;6—自动开关;7—电流互感器

### 4-3 电力负荷的计算

在电力系统中,用电设备所需要的电功率称为电力负荷,变压器的容量,导线的截面积、开关、熔断器的选择等都要根据负荷大小来确定。

电力系统中有各种用电设备,它们不一定满载工作,也不会同时使用,所以如果把各用电设备的额定容量相加,并用其选择变压器容量、选择开关设备或导线,必然会过大,造成设备和投资的浪费。相反,若选得过小,则会引起导体过热,使导线或电气设备绝缘老化发生击穿,影响电力系统的正常运行,所以对电力负荷必须进行合理计算。

负荷计算法有需用系数法、二项式法、利用系数法、单位产品耗电量法等。在供电设计和建筑群的变电所设计中广泛使用需用系数法,由于篇幅所限,这里仅介绍需用系数法。

#### 一、确定用电设备的容量

进行负荷计算时,要按性质把不同的设备分为各用电组,然后确定该组的设备容量。

用电设备铭牌上的功率就是用电设备的额定容量。各用电设备额定工作条件不同,有的长期工作,有的短时工作,因而不能将额定容量直接相加,必须将不同工作制的用电设备额定功率换算成统一规定工作条件下的功率,这个功率称为用电设备的设备功率或设备容量,用  $P_d$  表示。

1. 对于一般长期工作制的用电设备,设备容量就等于铭牌上的额定容量,即  $P_d = P_n$  (额定功率);

2. 对于短时但连续运行的用电设备,与上一样,  $P_d = P_n$ ;

3. 对于照明:白炽灯的设备容量就是灯泡上标出的额定容量,  $\cos\phi = 1$ ; 荧光灯及高压汞

灯须考虑镇流器的功率损耗,所以荧光灯的设备容量为灯管额定容量的1.2倍,高压汞灯为灯池额定容量的1.1倍,  $\cos\phi$  为0.55~0.6;

4. 反复短时工作制的用电设备:其设备功率是将某一暂载率下的铭牌额定功率统一换算到一个标准暂载率下的功率。

在生产中,常用到重复短时运行的用电设备,如起重机、电焊机等,它们的工作时间和停止时间都较短,工作时电机的温度还来不及达到稳定值,停止时电机又来不及冷却到周围环境温度,工作时间和停止时间作周期性重复。

用电设备工作时间与整个工作周期之比,称为暂载率,用  $JC$  表示:

$$JC = \frac{t_g}{t_g + t_s} \times 100\% \quad (4-3)$$

式中  $t_g$ ——工作时间;

$t_s$ ——休息时间。

设备铭牌上所给出的额定功率的暂载率称额定暂载率,用  $JC_r$  表示,它们必须换算到另一要求的暂载率下的功率,并用其作为负荷计算时的设备容量。

对于起重吊车电动机的设备容量,要求统一换算到  $JC=25\%$  时功率,其换算式为:

$$P_r = \sqrt{\frac{JC_r}{JC_{25}}} \cdot 2P_n \sqrt{JC_r} \quad (4-4)$$

式中  $P_n$ ——起重吊车电动机的额定功率, kW;

$JC_{25}$ ——暂载率为25%,即0.25;

$JC_r$ ——电动机铭牌,即额定暂载率(用小数);

$P_r$ ——换算到  $JC_{25}$  时的吊车电动机设备容量, kW。

对于电焊机,要求统一换算到  $JC=100\%$  时功率,其换算式为

$$P_r = \sqrt{\frac{JC_r}{JC_{100}}} P_n - \sqrt{JC_r} S_n \cos\phi \quad (4-5)$$

式中  $S_n$ ——电焊机铭牌额定容量, kVA;

$JC_r$ ——电焊机铭牌,即额定暂载率(用小数);

$\cos\phi$ ——电焊机额定功率因数;

$P_n$ ——电焊机铭牌额定功率, kW;

$JC_{100}$ ——其暂载率为100%(计算中取1.0);

$P_r$ ——换算到  $JC_{100}$  时的电焊机设备功率, kW。

设备容量  $P_r$  不包括备用设备容量,即在计算设备容量时,备用设备容量不应计入。

例4-2 一台电焊变压器其铭牌给出额定容量  $S_n=30\text{kVA}$ , 暂载率60%, 功率因数  $\cos\phi=0.56$ , 试求该电焊变压器的设备功率  $P_r$ 。

解 电焊机设备功率应换算到100%暂载率的功率

$$\begin{aligned} P_r &= S_n \sqrt{JC_r} \cos\phi \\ &= 30 \times \sqrt{0.6} \times 0.56 = 13\text{kW} \end{aligned}$$

## 二、按需用系数法确定计算负荷

需用系数法是将用电设备的设备容量  $P_r$  乘以需用系数和同时系数,这样便可求出计算负

荷的一种简便方法。

### 1. 需用系数 $K_d$

需用系数  $K_d$  与各用电设备工作情况、负载情况、效率、供电线路损耗、工人操作水平、工作条件等很多因素有关,它是一个综合系数,标志着用电设备组投入运行时,以电网中实际取用的功率与用电设备组的设备功率之比。需用系数一般小于 1,它是对各类用电设备进行实测,然后分析统计,将所有影响计算负荷的因素综合成一个系数,制成统计表,供计算时使用。

表 4-4 和 4-5 是部分用电设备及照明场所的需用系数和功率因数。

表 4-4 部分用电设备的需用系数和功率因数

序号	用电设备名称	需用系数	$\cos\varphi$	$\lg\varphi$
1	大批生产及流水作业的加热车间	0.3~0.4	0.65	1.17
2	大批生产及流水作业的冷加工车间	0.2~0.25	0.50	1.73
3	小批生产及单独生产的冷加工车间	0.16~0.2	0.5	1.73
4	生产用的通风机、水泵	0.75~0.85	0.8	0.75
5	卫生保健用的通风机	0.65	0.8	0.75
6	运输机、传送带	0.52~0.60	0.75	0.83
7	混凝土及砂浆搅拌机	0.65~0.70	0.65	1.17
8	破碎机、筛、泥泵、砾石洗涤机	0.70	0.70	1.02
9	起重機、掘土机、升降机	0.25	0.70	1.02
10	球磨机	0.70	0.70	1.02
11	电焊变压器	0.45	0.45	1.98
12	工业企业建筑物室内照明	0.80	1.00	0
13	大面积住宅、办公室室内照明	0.40~0.70	1.00	0

表 4-5 照明场所的需用系数  $K_d$  和各类光源的  $\cos\varphi$ 、 $\lg\varphi$  值

照明场所	$K_d$	光源类别	$\cos\varphi$	$\lg\varphi$
生产厂房(有天然采光)	0.8~0.9	白炽灯、卤钨灯	1	0
生产厂房(无天然采光)	0.9~1	荧光灯(无补偿)	0.55	1.52
办公楼	0.7~0.8	荧光灯(有补偿)	0.9	0.48
设计室	0.9~0.95	高压水银灯	0.45~0.65	1.98~1.16
科研楼	0.8~0.9	高压钠灯	0.45	1.96
仓库	0.5~0.7	金属卤化物灯	0.4~0.61	2.20~1.29
锅炉房	0.9	钠灯	0.52	1.6
宿舍区	0.6~0.8	氙灯	0.9	0.48
医院	0.5			
食堂	0.9~0.95			
商店	0.9			
学校	0.6~0.7			
展览馆	0.7~0.8			
旅馆	0.6~0.7			

### 2. 用电设备组的计算负荷

在采用需用系数法进行负荷计算时,首先应把性质相同,需用系数相近的一些设备合并成

一组用电设备,然后分别计算各用电设备组的计算负荷,计算负荷包括有功、无功、视在功率和电流,其计算公式为:

$$\left. \begin{aligned} P_n &= K_x P_e \\ Q_n &= P_n \operatorname{tg} \phi \\ S_n &= \sqrt{P_n^2 + Q_n^2} \\ I_n &= S_n / (\sqrt{3} U_n) \end{aligned} \right\} \quad (4-6)$$

式中  $P_n$ —用电设备组的设备容量, kW;

$K_x$ —用电设备组的需用系数;

$\operatorname{tg} \phi$ —与用电设备组功率因数角相对应的正切值;

$U_n$ —额定电压, kV;

$P_n, Q_n, S_n$ —用电设备组的有功、无功、视在计算负荷, kW, kVar, kVA;

$I_n$ —用电设备组的计算电流, A。

例 4-3 有一冷加工机床组,电动机电压 380V, 10kW 的 3 台, 4kW 的 8 台, 3kW 的 18 台, 1.5kW 的 10 台, 试用需用系数法求该设备组的计算负荷。

解 由于该组用电设备为连续工作制, 其设备功率为

$$P_e = \sum P_n = 10 \times 3 + 4 \times 8 + 3 \times 18 + 1.5 \times 10 = 131 \text{ kW}$$

查表 4-4 得需用系数  $K_x = 0.16 \sim 0.2$ , 取  $K_x = 0.2$ ,  $\cos \phi = 0.5$ ,  $\operatorname{tg} \phi = 1.73$ , 则

$$P_n = K_x P_e = 0.2 \times 131 = 26.2 \text{ kW}$$

$$Q_n = P_n \operatorname{tg} \phi = 26.2 \times 1.73 = 45.3 \text{ kvar}$$

$$S_n = \sqrt{P_n^2 + Q_n^2} = \sqrt{26.2^2 + 45.3^2} = 52.3 \text{ kVA}$$

$$I_n = S_n / (\sqrt{3} U_n) = 52.3 / (\sqrt{3} \times 0.38) = 79.6 \text{ A}$$

### 3. 多个用电设备组的计算负荷

各个用电设备组的计算负荷求出后, 就可求出它们总的计算负荷, 由于各个用电设备组的最大负荷往往不是同时出现, 所以在确定低压干线或低压母线上的计算负荷时, 要乘一个同时系数  $K_x$ , 同时系数的数值也是根据统计规律确定的, 它的数值如下:

对于变电所低压母线  $K_x = 0.8 \sim 0.9$

对于配电所或低压干线  $K_x = 0.9 \sim 1.0$

对于总变配电所母线  $K_x = 0.95 \sim 1.0$

这样, 配电干线或低压母线上的总计算负荷为:

$$\left. \begin{aligned} P_n &= K_x \sum_{i=1}^n (K_{xi} P_{ei}) \quad (i = 1, 2, \dots, n) \\ Q_n &= K_x \sum_{i=1}^n (K_{xi} P_{ei} \operatorname{tg} \phi_i) \\ S_n &= \sqrt{P_n^2 + Q_n^2} \\ I_n &= S_n / (\sqrt{3} U_n) \end{aligned} \right\} \quad (4-7)$$

式中  $P_n, Q_n, S_n$ —为配电干线或低压母线的有功、无功、视在计算负荷;



$K_x$ ——同时系数；

$n$ ——该配电干线或低压母线上所接用电设备组数；

$K_{\alpha}, \text{tg}\phi, P_n$ ——对应于某一用电设备组的需用系数、功率因数正切、设备容量；

$I_n$ ——该干线或低压母线上的计算电流。

这些计算功率和计算电流是选择变压器容量、电气设备、导体截面等的重要依据。

例 4-4 某机修车间 380V 干线上, 接有冷加工机床电动机 60kW, 通风机 5.6kW, 电阻炉 2kW, 试确定该干线的计算负荷。

解 先求各组的计算负荷

冷加工机床组 查表取  $K_{\alpha 1}=0.2, \cos\phi_1=0.5, \text{tg}\phi_1=1.73$

$$P_{\alpha 1} = K_{\alpha 1} P_{n1} = 0.2 \times 60 = 12 \text{ kW}$$

$$Q_{\alpha 1} = P_{\alpha 1} \text{tg}\phi_1 = 12 \times 1.73 = 20.76 \text{ kvar}$$

通风机组 查表取  $K_{\alpha 2}=0.8, \cos\phi_2=0.8, \text{tg}\phi_2=0.75$

$$P_{\alpha 2} = K_{\alpha 2} P_{n2} = 0.8 \times 5.6 = 4.48 \text{ kW}$$

$$Q_{\alpha 2} = P_{\alpha 2} \text{tg}\phi_2 = 4.48 \times 0.75 = 3.36 \text{ kvar}$$

电阻炉 查表取  $K_{\alpha 3}=0.7, \cos\phi_3=1, \text{tg}\phi_3=0$

$$P_{\alpha 3} = K_{\alpha 3} P_{n3} = 0.7 \times 2 = 1.4 \text{ kW}$$

$$Q_{\alpha 3} = 0$$

取同时系数  $K_x=0.9$ , 则干线总的计算负荷

$$P_p = K_x \sum_{i=1}^3 P_{\alpha i} = 0.9 \times (12 + 4.48 + 1.4) = 16.1 \text{ kW}$$

$$Q_p = K_x \sum_{i=1}^3 Q_{\alpha i} = 0.9 \times (20.76 + 3.36) = 21.7 \text{ kvar}$$

$$S_p = \sqrt{P_p^2 + Q_p^2} = \sqrt{16.1^2 + 21.7^2} = 27 \text{ kVA}$$

$$I_n = S_p / (\sqrt{3} U_n) = 27 / (\sqrt{3} \times 0.38) = 41 \text{ A}$$

### 三、输电线路和变压器的功率损耗

电力系统的输出功率, 大部分供给电力用户, 另一部分损失在输电线路和变压器中。在确定计算负荷时, 应考虑这部分功率损失, 它包括有功和无功功率损耗。

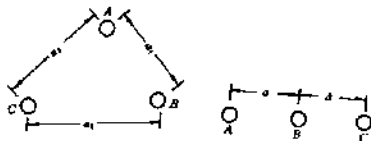


图 4-19 三相导线的排列

### 1. 输电线路的功率损耗

输电线路的电阻与长度、截面、材料的电阻率有关： $R = \rho \frac{l}{S}$ ，其单位长度的交流电阻值  $r$ （欧/公里）可从附表 1、附表 2 中查出。

输电线路单位长度的交流感抗值  $x_0$ （欧/公里）也可从附表 1 和附表 2 中查出，它不仅与导线材料、截面有关，而且还与导线相互间的距离有关，也就是与所谓的“线间几何均距”有关，“线间几何均距”是指三相线路各相线间距离的几何平均值，如图 4-19 所示，其公式为

$$a_{\text{eq}} = \sqrt[3]{a_1 a_2 a_3} \quad (4-8)$$

式中  $a_{\text{eq}}$ ——三相导线的线间几何均距，m；

$a_1, a_2, a_3$ ——三相导线相互间的距离，m。

当三相导线呈等边三角形排列时： $a_1 = a_2 = a_3 = a$ ，则线间几何均距为  $a_{\text{eq}} = a$ ；当三相导线水平排列时： $a_{\text{eq}} = \sqrt[3]{2} a = 1.26a$ 。

这样，若知道输电线的长度  $l$ ，并从附表 1 和 2 中查出  $r_0$  和  $x_0$ ，就可计算出输电线路每相的电阻和感抗：

$$\left. \begin{aligned} R &= r_0 l \\ X &= x_0 l \end{aligned} \right\} \quad (4-9)$$

三相输电线路的有功损耗  $\Delta P_l$ 、无功损耗  $\Delta Q_l$  可分别按下式计算：

$$\left. \begin{aligned} \Delta P_l &= 3I_a^2 R \\ \Delta Q_l &= 3I_a^2 X \end{aligned} \right\} \quad (4-10)$$

式中  $R, X$ ——线路每相电阻和感抗；

$I_a$ ——通过每相线路的计算电流。

当计算负荷用  $P_n, Q_n, S_n$  功率表示时，(4-10)式可变换为下述形式：

$$\left. \begin{aligned} \Delta P_l &= \frac{S_n^2}{U_n^2} R = \frac{P_n^2 + Q_n^2}{U_n^2} R \\ \Delta Q_l &= \frac{S_n^2}{U_n^2} X = \frac{P_n^2 + Q_n^2}{U_n^2} X \end{aligned} \right\} \quad (4-11)$$

式中  $P_n, Q_n, S_n$ ——分别为线路的视在、有功、无功计算负荷；

$U_n$ ——线路的额定线电压。

例 4-5 有长度为 8km 的 10kV 送电线路，采用 LGJ-50 型钢芯铝绞线，导线几何均距为 1.5m，输送有功计算功率 500kW，无功计算功率 400kvar，求该线路有功、无功损耗。

解 查附表 2 可得 LGJ-50 型导线的  $r_0 = 0.65\Omega/\text{km}$ ， $x_0 = 0.376\Omega/\text{km}$

$$\text{所以 } \Delta P_l = \frac{P_n^2 + Q_n^2}{U_n^2} R = \frac{500^2 + 400^2}{10^2} \times 8 \times 0.65 = 21.32 \text{ kW}$$

$$\Delta Q_l = \frac{P_n^2 + Q_n^2}{U_n^2} X = \frac{500^2 + 400^2}{10^2} \times 8 \times 0.376 = 12.33 \text{ kvar}$$

在设计中，若建筑物设施范围小，线路短，线路损耗所占比例很小，则可忽略不计。

### 2. 变压器的功率损耗

从变压器产品目录或附表 3、附表 4 中可查得变压器的有关技术参数： $\Delta P_0$ ——变压器空载有功损耗(kW)； $I_0(\%)$ ——变压器空载电流  $I_0$  占额定电流  $I_n$  的百分数； $\Delta P_L$ ——变压器在

额定负荷时的短路有功损耗(kW); $U_d(\%)$ ——变压器短路电压(阻抗电压)占额定电压的百分数。这四个参数在计算变压器功率损耗时都要用到。

变压器的功率损耗由空载损耗和短路损耗两部分构成。空载损耗又称铁损,它是变压器主磁通在铁芯中产生的损耗。主磁通正比于外加电压,当外加电压的频率和电压一定时,铁损为一常数,与负荷无关。短路损耗又称铜损,它是负荷电流在变压器一、二次绕组中产生的损耗,所以它与负荷电流(或功率)平方成正比。这样,双绕组变压器的有功功率损耗表达式为:

$$\Delta P_s = \Delta P_0 + \Delta P_s \left\{ \frac{S_p}{S_N} \right\} \quad (\text{kW}) \quad (4-12)$$

式中  $\Delta P_0$ 、 $\Delta P_s$  —— 变压器空载、短路有功损耗, kW;

$S_p$  —— 变压器的计算负荷, kVA;

$S_N$  —— 变压器的额定容量, kVA。

计算变压器的无功损耗时,必须先计算出变压器空载无功损耗  $\Delta Q_0$  和短路无功损耗  $\Delta Q_s$ , 其表达式为

$$\left. \begin{aligned} \Delta Q_0 &= \frac{I_0(\%)}{100} S_N \quad (\text{kvar}) \\ \Delta Q_s &= \frac{U_d(\%)}{100} S_p \quad (\text{kvar}) \end{aligned} \right\} \quad (4-13)$$

式中  $I_0(\%)$ 、 $U_d(\%)$  —— 分别为变压器空载电流、阻抗电压百分数, 计算时不能带百分号。

这样, 可得变压器无功功率损耗的表达式:

$$\Delta Q_s = \Delta Q_0 + \Delta Q_s \left\{ \frac{S_p}{S_N} \right\}^2 \quad (\text{kvar}) \quad (4-14)$$

式中  $\Delta Q_0$ 、 $\Delta Q_s$  —— 分别为变压器空载无功、短路无功损耗, (kvar);

$S_p$ 、 $S_N$  —— 变压器计算负荷、额定容量(kVA)。

变压器的功率损耗数值较大, 在计算变、配电所或干线的负荷时应予以计入。在负荷估算中, 可采用下述近似公式计算:

$$\left. \begin{aligned} \Delta P_s &\approx 0.02 S_N \quad (\text{kW}) \\ \Delta Q_s &\approx 0.08 S_N \quad (\text{kVAr}) \end{aligned} \right\} \quad (4-15)$$

式中  $S_N$  —— 变压器的额定量, kVA。

例 4-6 当计算负荷  $S_p = 60 \text{ kVA}$  时, 试计算电压为 10/0.4 kV, 型号为 SJL<sub>1</sub>-100/10 变压器的有功和无功损耗。

解 查附表 3, 电压为 10/0.4 kV, SJL<sub>1</sub>-100/10 型变压器

$$\Delta P_0 = 0.35 \text{ kW} \quad \Delta P_s = 2.1 \text{ kW}$$

$$I_0(\%) = 4 \quad I_d(\%) = 3.8$$

变压器有功损耗为

$$\begin{aligned} \Delta P_s &= \Delta P_0 + \Delta P_s \left\{ \frac{S_p}{S_N} \right\}^2 \\ &= 0.35 + 2.1 \times \left\{ \frac{60}{100} \right\}^2 = 1.1 \text{ kW} \end{aligned}$$

变压器空载无功损耗

$$\Delta Q_0 = \frac{I_0(\%) S_w}{100} S_w = \frac{3.8}{100} \times 100 = 3.8 \text{ Kvar}$$

变压器短路无功损耗

$$\Delta Q_k = \frac{U_d(\%) S_w}{100} S_w = \frac{4}{100} \times 100 = 4 \text{ Kvar}$$

变压器无功损耗为

$$\begin{aligned} \Delta Q_s &= \Delta Q_0 + \Delta Q_k \left( \frac{S_g}{S_w} \right)^2 \\ &= 3.8 + 4 \times \left( \frac{60}{100} \right)^2 = 5.24 \text{ kvar} \end{aligned}$$

#### 四、供电系统总计算负荷的确定

负荷计算是建筑物供电设计的重要组成部分,图4-20是具有一级降压变电所和配电所的供电系统示意图,下面以该图为例,说明由低压用电设备开始,逐级相加计算整个供电系统的总计算负荷的步骤,即确定图4-20中7点处6~10kV高压电源进线的总计算负荷。

##### 1. 求用电设备组的计算负荷

图4-20中的1点为用电设备,按其工作制、性质不同分为若干组,求出各用电设备组的设备容量 $P_{\Sigma 1}$ ,查相关需用系数 $K_x$ ,确定各用电设备组的计算负荷 $P_{\rho 1}$ 、 $Q_{\rho 1}$ 、 $S_{\rho 1}$ ;

##### 2. 求低压干线上的计算负荷

在用电设备组计算负荷的基础上,可求出图4-20中2点处的计算负荷; $P_{\rho 2} = \sum P_{\rho 1}$ ,若忽略建筑物低压干线2和3点之间输电线的损耗,则 $P_{\rho 2} = P_{\rho 1}$ ,由此可选择建筑物低压干线的截面和电气设备;

##### 3. 变电所变压器低压侧计算负荷

图4-20中4点处的负荷就是变压器低压侧的计算负荷,把各条干线上的计算负荷相加,并乘以同时系数 $K_x$ ,就可得到低压母线上的计算负荷; $P_{\rho 4} = K_x \sum P_{\rho 3}$ ,以此来选择变压器容量、低压总开关等电器设备;

##### 4. 变电所变压器高压侧计算负荷

根据所选变压器查出其参数,计算该变压器的有功、无功损耗,然后将其损耗与低压侧计算负荷相加,就得到变压器高压侧5点处的计算负荷; $P_{\rho 5} = P_{\rho 4} + \Delta P_s$ 、 $Q_{\rho 5} = Q_{\rho 4} + \Delta Q_s$ 。此数值用来选择变电所高压侧电器设备;

##### 5. 高压配电线的计算负荷

利用得出的 $P_{\rho 5}$ 和 $Q_{\rho 5}$ ,可求出高压输电线5点和6点之间的损耗 $\Delta P_l$ 和 $\Delta Q_l$ ,再加上变压器高压侧的计算负荷,即为高压配电引出处6点的计算负荷; $P_{\rho 6} = P_{\rho 5} + \Delta P_l$ 、 $Q_{\rho 6} = Q_{\rho 5} + \Delta Q_l$ ;

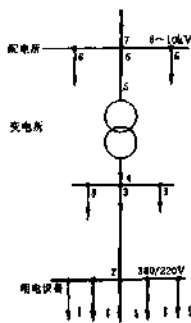


图 4-20 电力负荷计算示意图

## 6. 电源进线总计算负荷

把高压配电所各条引出线的计算负荷相加,可得 $\Sigma P_{js}$ 、 $\Sigma Q_{js}$ ,然后乘以同时系数 $K_x$ ,即可得到 $P_{js}$ 、 $Q_{js}$ ,再计算出 $S_{js}$ ,这就是6~10kV高压配电所母线上的总计算负荷,也就是电源进线7点处的总计算负荷。

## 五、变压器容量的确定

选择变压器,就是确定变压器原副边的额定电压、容量、台数、型式等。

变压器的原、副边额定电压由当地高压电源的电压所决定,中小型建筑物一般为6~10kV,变压器副边电压由负载来决定,一般为380/220V。

变电所变压器的台数由负荷大小以及供电可靠性的要求来决定。变电所通常选用1~2台变压器。因为台数过多,不仅使电气接线复杂,增加投资,而且给运行维护也带来麻烦,所以一般建筑物采用一台变压器就行了。对于一、二级负荷较多的变电所,考虑较高的供电可靠性,可采用两台变压器,当一台变压器故障停电时,另一台变压器可保证对重要用户供电。对于随季节负荷变化较大的建筑物,也可采用两台变压器,负荷较大时两台运行,负荷较小时采用一台变压器运行,这样减少变压器损耗,使变电所运行经济。若在建筑物附近能取得备用电源时,一、二级负荷也可只装一台变压器。

变压器容量的选择,应满足在计算负荷通过时不致过热损坏,所以应由用电设备的计算负荷来决定。

采用一台变压器时,变压器的额定容量 $S_N$ 应满足整个建筑群用电设备总计算负荷 $S_p$ 的需要,即

$$S_N \geq S_p \quad (3-16)$$

例如,进行负荷计算后,若总计算负荷为85kVA,建筑群附近电网为10kV,则查附表3,可选取SJL<sub>1</sub>-100/10型的变压器,其容量为100kVA,高压为10kV,低压为0.4kV,属三相油浸自冷式铝绕组变压器。

采用一台变压器时以容量为750kVA及以下为宜,最好不要超过1000kVA,这样变压器可更接近负荷中心,低压电气设备运行也安全。

采用两台变压器时,应使其中任一台变压器的容量在单独运行时能满足变电所总计算负荷的60%以上的需要。任一台变压器的额定容量应按用户计算负荷的70%选择,即

$$S_{N1} \approx 0.7S_p \quad (4-17)$$

式中  $S_N$ ——一台变压器的额定容量,kVA;

$S_p$ ——变压器用户总的计算负荷,kVA。

动力和照明可共用一台变压器,有条件时可把动力和照明分开,设置专用照明变压器,以减少动力负荷对照明质量及灯泡寿命的影响。

对负荷不大的建筑群,若附近有低电源,且电源足够时,可考虑不再装设变压器。

## 4-4 低压配电线路

低压配电线路是从变电所低压母线引出,一直到民用建筑各用电地点的电力线路,电压一

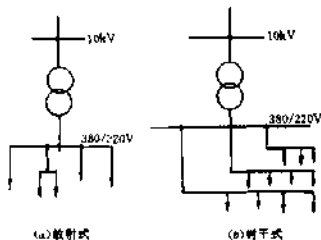
一般为 380/220V。低压配电线路应满足民用建筑不同用电级别供电的可靠性,保证民用建筑的电能质量,即电压质量;还应力求接线简单、经济、维护方便,并能适应负荷发展的需要。

## 一、低压配电线路的接线方式

市区一般采用 10kV 输送电压,所以民用建筑群应架设 10kV 架空线,安装降压变压器、低压配电箱,然后架设低压配电线路到各用电点的配电箱;若建筑群附近有三相四线制低压电网,且变压器容量足够,则可直接架设低压配电线路。

低压配电线路的接线方式直接影响到用电的可靠性和基本投资,其接线方式常采用放射式和树干式,见图 4-21。

图 4-21(a)为放射式接线,它是从降压变压器低压母线上引出若干条支线,各条支线分别向各用电点直接供电。若某一条支线发生故障,可由开关断开,不会影响其它支线供电,所以供电可靠性较高;这种接线方式使配电设备比较集中,操作维修方便,但安装的配电设备较多,导线及有色金属消耗量大,投资高。当各用电点的用电量较大,负荷相对集中,降压变压器又处于这些用电点的中心位置时,采用放射式接线方式是合理的。



(a) 放射式

(b) 树干式

图 4-21 低压配电线路的接线方式

图 4-21(b)为树干式接线方式,它是从降压变压器低压母线上引出若干条干线,沿每条干线再引出若干条支线向各用电点供电。这种接线方式节省设备和导线,有色金属消耗量少,投资费用低,各用电点就近在干线上接线,灵活性较大。当干线出现故障或需要检修时,接在该干线上的所有负荷都将失去电源,造成大面积停电,所以供电可靠性较低,当用电设备分布比较均匀,容量不大,各用电点居于降压变压器同一侧时,比较适于采用树干式接线方式。

低压配电线路的接线方式除了放射式和树干式外,还有环形式、链式等。在具体应用中,往往不是某一种单一接线方式,而是将它们混合交替使用。在具体选择配电接线方式时,应根据用电设备的分布情况,负荷对供电可靠性的要求及投资费用等综合考虑。

## 二、导线的选择

低压配电线路有架空线和电缆线两种。电缆线路运行可靠,不受雷击、风害等外力破坏,可埋于地下或电缆沟内,使环境整齐美观,但投资大,约为架空线投资的十倍,电缆线路很少发生故障,但发生故障其寻找和检修都极为困难。

架空线施工容易,取材方便,投资少,所以得到广泛使用。但架空线架设在露天环境中,受风、雷、雨雪等自然条件影响很大,运行可靠性要差一些。

### 1. 导线型号的选择

导线是用来输送和分配电能的导体,有铜和铝两种。铜线电阻率低,导电性能好,机械强度

高,但质量重,价格贵。与铜线相比,铝线电阻率高,机械强度低,焊接困难,但质量轻,价格便宜,所以大量采用铝线。

导线有裸线、绝缘线、电缆。在民用建筑中,室内常用绝缘线和电缆,室外常用裸线和绝缘线、电缆。

裸导线 架空线一般都用裸导线,按其结构分为单股线和多股绞线。多股绞线有铜绞线、铝绞线和钢芯铝绞线,其型号分别为 TJ、LJ、LGJ。钢芯铝绞线中的芯是铜线,以增加导线的机械强度,外用铝线,由于趋肤效应交流电流实际上从铝线上通过,克服了铜线导电性差的缺点。

电缆 电缆主要由导体、绝缘层、保护层三部分组成。导体一般由多股铜线或铝线绞合而成,绝缘层用于导体线芯之间、线芯与地之间的绝缘,保护层用来保护整个电缆,使其密封并具有有一定机械强度,防止潮气侵入。按其绝缘材料的不同,分为油浸纸绝缘、橡皮绝缘、塑料绝缘三大类。线芯按数目有单芯、双芯、三芯及多芯之分。

绝缘线外面有绝缘层,按所用绝缘材料不同,分为塑料绝缘导线和橡皮绝缘导线。

塑料绝缘电线 常用的有聚氯乙烯绝缘导线,它是在导电线芯外包上一层聚氯乙烯,铜芯电线的型号为 BV,铝芯电线的型号为 BLV。

橡皮绝缘电线 常用的有铜(铝)芯棉纱编织橡皮绝缘线,型号为 BX(BLX),它们是在导电线芯外包一层橡胶,然后编织一层棉纱或玻璃纤维,并涂上一层腊。

导线截面的大小按国家规定分级制造,配电线路常用的有 1.5、2.5、4、6、10、16、25、35、50、70、95、120mm<sup>2</sup> 等。表 4-6 为常用导线的型号和主要用途。

表 4-6 常用导线的型号和主要用途

型 号		名 称	主要用途
铝 芯	铜 芯		
LJ	TJ	裸绞线	室外架空
LJ/TJ		钢芯铝绞线	室外大跨距架空输电线路
BLV	BV	聚氯乙烯绝缘线	室内架空或穿管敷设
BLX	BX	绝缘橡皮线	室内架空或穿管敷设
BLXF	BXF	氯丁橡皮绝缘线	室内穿管敷设
BLVV	BVV	塑料护套线	室内固定敷设
	RV	铜芯聚氯乙烯绝缘软线	交流 220V 及以下各种移动电器接线
	RVB	铜芯聚氯乙烯绝缘平形软线	
	RVS	铜芯聚氯乙烯绝缘绞型软线	
	RVV	铜芯聚氯乙烯绝缘乙炔护套软线	

### 三、导线截面的选择

合理的选择导线截面,不仅能保证供电质量和安全运行,而且还可以节约有色金属消耗,减少投资。导线截面选择方法如下:

1. 按导体长期发热允许电流选择导线截面

负荷电流通过导体时会发热,使导线温度升高。如果温度过高,会引起绝缘老化或损坏,造成事故。因此,规定了不同型号和截面的导线在不同环境温度、不同敷设方式时长期允许的电流值,又称安全载流量,见附表 5 和附表 6,在这个允许值范围以内运行,导线温度不会超过允许值。

按导线长期允许电流选择导线截面时,应使负荷的计算电流不大于导线的长期允许电流,即

$$I_p \leq I_{\infty} \quad (4-18)$$

式中  $I_p$  —— 负荷计算电流, A;

$I_{\infty}$  —— 导体长期允许电流, A。

由于允许载流量与环境温度有关,选择导线截面时要注意导线安装地点的环境温度,必要时应考虑温度修正系数。

## 2. 按允许电压损失选择导线截面

电流通过导线时,由于线路有阻抗,将引起电压损失。电压损失是指线路始端电压  $U_1$  与终端电压  $U_2$  有效值的代数差,即  $\Delta U = U_1 - U_2$ 。由于电压等级的不同,电压损失  $\Delta U$  并不能确切的反映电压损失的程度,而常用  $\Delta U$  与额定电压的百分比来表示电压损失的程度

$$\delta_u = \frac{\Delta U}{U_N} = \frac{U_1 - U_2}{U_N} \times 100\% \quad (4-19)$$

式中  $\delta_u$  —— 电压损失相对值,或电压损失百分数;

$\Delta U$  —— 电压损失;

$U_1, U_2, U_N$  —— 线路首端、末端电压有效值,线路额定电压。

电压损失不能太大,否则使用电设备端电压降低,影响用电设备的正常运行。例如端电压过低会使白炽灯光昏暗,日光灯不能启动,电动机电流增大发热,加速其绝缘老化。因此,线路电压损失有一定允许值。照明线路允许电压损失不超过 5%,远离变电所的小面积工作场所允许 10%。

在进行设计时,可先给定电压损失的允许值,然后按这个允许值选择导线截面;或先按其它条件选择导线截面,再计算电压损失值检验是否在允许范围内,这都必须了解各种情况下电压损失的计算。

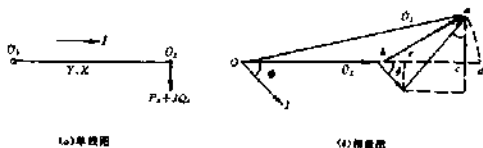


图 4-22 单相电路带一个集中负荷的电压损失

### (1) 单相电路带一个集中负荷的电压损失

图 4-22(a) 为末端有一个集中负荷的单相电路单线图。以末端电压  $U_2$  为参考正弦量,可作出其相量图,见图 4-22(b)。



电压降落相量  $\Delta \dot{U}_{21} = \dot{U}_1 - \dot{U}_2 = \overline{bd}$ ，以  $O$  为圆心，以  $U_1$  长为半径，作圆弧与  $\dot{U}_2$  的延长线交于  $d$  点，则电压损失为

$$\Delta U_{21} = U_1 - U_2 = bd$$

在工程计算中，由于  $cd$  值很小，可将其忽略，则电压损失为：

$$\Delta U_{21} \approx bc = be + ec = Ir \cos \phi + Ix \sin \phi \quad (4-20)$$

用功率表示则为

$$\Delta U_{21} = \frac{(I r \cos \phi + I x \sin \phi)}{U_2} U_2 = \frac{P_1 r + Q_1 x}{U_2} \quad (4-21)$$

单相电路为两根线，电阻和电抗均为单根的两倍，电压损失也为单根的两倍，末端电压近似等于额定相电压，则单相电路的电压损失为

$$\Delta U_1 = \frac{2(P_1 r + Q_1 x)}{U_p} \quad (4-22)$$

电压损失百分数为

$$\delta_v = \frac{2(P_1 r + Q_1 x)}{U_p^2} \times 100\% \quad (4-23)$$

式中  $\Delta U_1$ ——单相电路相电压损失，V；

$r, x$ ——线路首、末两端间的电阻、感抗， $\Omega$ ；

$P_1, Q_1$ ——线路末端处有功、无功功率，W、Var；

$U_p$ ——线路额定相电压，V。

(2) 三相电路带一个集中负荷的电压损失

将(4-21)式单相一根导线电压损失  $\Delta U_{21}$  换算为线电压，并用电网额定线电压  $U$  代替相电压  $U_p$ ，则(4-21)式就变成三相电路的电压损失公式：

$$\Delta U = \sqrt{3} U_{21} = \frac{\sqrt{3} (P_1 r + Q_1 x)}{U_p} = \frac{P_1 r + Q_1 x}{U} \quad (4-24)$$

电压损失百分数为

$$\delta_v = \frac{P_1 r + Q_1 x}{U^2} \times 100\% \quad (4-25)$$

式中  $U$ ——输电线额定线电压，V；

$P, Q$ ——线路末端三相有功、无功功率，W、Var；

$r, x$ ——每条线路的电阻、感抗， $\Omega$ 。

(3) 三相电路带  $n$  个集中负荷时的电压损失

以带三个集中负荷为例如图 4-23，三段线路  $AB, BC, CD$ ，线路  $AB$  的电阻和感抗为  $r_1, x_1$ ，通过的三相负荷为：

$$P_1 = p_1 + p_2 + p_3, \quad Q_1 = q_1$$

+  $q_2 + q_3$ ；线路  $BC$  的电阻和感抗为  $r_2, x_2$ ，通过的三相负荷为： $P_2 = p_2 + p_3, Q_2 = q_2 + q_3$ ；线路  $CD$  的电阻和感抗为  $r_3, x_3$ ，通过的三相负荷为： $P_3 = p_3, Q_3 = q_3$ 。

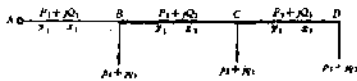


图 4-23 带三个集中负荷的线路示意图

线路上总的电压损失,为各段电压损失之和,即

$$\begin{aligned} \Delta U &= \Delta U_{AB} + \Delta U_{BC} + \Delta U_{CD} \\ &= \frac{P_1 r_1 + Q_1 x_1}{U_1} + \frac{P_2 r_2 + Q_2 x_2}{U_2} + \frac{P_3 r_3 + Q_3 x_3}{U_3} \end{aligned} \quad (4-26)$$

对于带有  $n$  个集中负荷的三相线路,同理可得:

$$\Delta U = \sum_{i=1}^n \frac{P_i r_i}{U_i} + \sum_{i=1}^n \frac{Q_i x_i}{U_i} \quad (4-27)$$

式中  $r_i, x_i$ ——第  $i$  段线路上的电阻、感抗,  $\Omega$ ;

$P_i, Q_i$ ——通过第  $i$  段线路上的三相有功、无功功率, W, Var;

$U_i$ ——电网额定线电压, V。

(4) 功率因数等于 1 的低压线路

对于低压供电线路,若功率因数等于 1 或接近于 1,则(4-22)和(4-27)式变为:

$$\text{单相供电线路: } \Delta U_s = \frac{2P_s r}{U_s} \quad (4-28)$$

$$\text{三相供电线路: } \Delta U = \sum_{i=1}^n \frac{P_i r_i}{U_i} \quad (4-29)$$

导线的电阻  $r = \rho \frac{l}{S}$ , 其中  $\rho$  为电阻率, 铜的电阻率为  $18.8$ , 铝为  $31.7 \Omega \cdot \text{mm}^2/\text{km}$ ,  $l$  为长度,  $S$  为截面, 知道传送的功率和电压损失后, 则可计算出相应的导线截面。

3. 按机构温度选择导线截面

输电线路由于自身的重量及外界因素的影响, 导线内部会受到张力作用而断裂, 所以选择导线截面规定不应小于某一最小截面, 以保证导线具有足够的机械强度。在不同敷设方式下, 最小允许截面如表 4-7 及表 4-8 所示。

表 4-7 绝缘导线最小允许截面/ $\text{mm}^2$

序号	用途	线芯的最小截面		
		铜芯软线	铜线	铝线
1	照明用灯头线 (1) 民用建筑屋内 (2) 工业建筑屋内 (3) 屋外	0.4	0.5	
		0.5	0.8	2.5
		1.0	1.0	2.5
2	移动式用电设备 (1) 生活用 (2) 生产用	0.2		
		1.0		
3	架设在绝缘支持件上的绝缘导线其支持点间距 (1) 2m 及以下, 屋内 (2) 2m 及以下, 屋外 (3) 6m 及以下 (4) 12m 及以下		1.0	2.5
			1.5	2.5
			2.5	4
			2.5	6
4	穿管敷设的绝缘导线	1.0	1.0	2.5
5	塑料护套线沿墙明敷设		1.0	2.5
6	板孔穿线敷设的导线		1.5	2.5

表 4-8 架空线路导线最小截面/mm<sup>2</sup>

导线种类	高压线路		低压线路
	居民区	非居民区	
铝绞线及铝合金线	35	25	16
钢芯铝绞线	25	16	16
铜绞线	16	16	(直径 3.2mm)

在选择导线截面时,对于电流较大、距离较近的线路,可先按发热条件选择截面,然后用允许电压损失和机械强度校验;对于送电距离较长的线路,则可先按允许电压损失来选择,然后按发热和机械强度条件校验。

例 4-7 用 220V 单相电源对 20m 处的白炽灯供电,白炽灯总功率 4kW,要求这段线路电压损失不超过 2.5%,拟采用 BLX 型铝芯橡皮绝缘线穿金属管敷设,环境温度为 25°C,试选择导线截面积。

解 (1)按电压损失容许值选择

$$\text{由(3-28)式求电阻 } r = \frac{\Delta_u \% U_p^2}{2P_p} = \frac{0.025 \times 220^2}{2 \times 4000} = 0.15 \Omega$$

$$\text{铝线截面 } S = \rho \frac{I}{r} = 31.7 \times \frac{0.02}{0.15} = 4.2 \text{ mm}^2$$

选  $S = 6 \text{ mm}^2$  的铝线

(2)按允许载流量校验

查附表 6,  $S = 6 \text{ mm}^2$  的铝芯橡皮绝缘线,在环境温度 25°C,2 根穿金属管时最大允许电流为 37A。

$$\begin{aligned} \text{负荷电流为 } I_p &= \frac{P_p}{U_p} = \frac{4000}{220} = 18.2 \text{ A} \\ I_{30} &> I_p \end{aligned}$$

(3)按机械强度校验

查表 4-7,穿管敷设的绝缘铝导线最小允许截面为 2.5mm<sup>2</sup>

所以选择 6mm<sup>2</sup> 的铝芯橡皮绝缘线是合理的。

#### 四. 熔断器的选择

熔断器是一种很简单的保护装置,当用电设备严重过载或发生短路时,熔体将熔断切除故障。熔断器应装在相线上,零线上不允许装设熔断器。

选择低压熔断器时,应首先选定适当的型式,再根据正常工作电流和起动尖峰电流两个条件选择熔断器及熔体的额定电流,熔体的额定电流可按下面情况计算。

1. 照明线路 为了保证电路正常工作电流时熔体不熔断,熔体的额定电流  $I_n$  应大于被保护电器的计算电流  $I_p$ ,

$$I_n \geq K_n I_p \quad (4-30)$$

式中  $K_n$  —— 照明线路熔体选择计算系数,白炽灯、荧光灯  $K_n = 1$ ; 高压钠灯取  $K_n = 1.1$

~1.5, 高压泵灯取  $K_m = 1.3 \sim 1.7$ 。

2. 电动机电路 电动机由于起动电流较大, 若按起动电流选择, 则熔体额定电流过大, 起不到保险的作用; 也不能按电动机额定电流选择, 否则电动机启动时就会熔断, 因此, 电动机的熔体额定电流应按下述情况选择

$$I_m \geq \frac{I_{d1}}{\alpha} \quad (4-31)$$

式中  $I_{d1}$ ——线路中的尖峰电流;

$\alpha$ ——大于 1 的系数, 取决于起动状况和熔断器的特性等, 一般可取 2.5~3。

单台电动机的尖峰电流 线路仅供一台电动机时, 其尖峰电流就是这台电动机的起动电流, 即

$$I_{d1} = KI_n \quad (4-32)$$

式中  $I_n$ ——电动机的额定电流;

$K$ ——电动机起动电流倍数, 对鼠笼式异步电动机可取 5~7; 对绕线式电动机可取 2~2.5。

多台电动机的尖峰电流 按其中最大一台电动机起动, 而其余电动机正常运行来计算尖峰电流

$$I_{d1} = I_{j(n-1)} + KI_{n_{max}} \quad (4-33)$$

式中  $I_{j(n-1)}$ ——除起动电流最大的一台电动机外, 线路的计算电流;

$K$ ——起动电流最大一台电动机的起动电流倍数;

$I_{n_{max}}$ ——起动电流最大一台电动机的额定电流。

3. 变压器电路 熔体的额定电流  $I_m$  应大于变压器的额定电流

$$I_m \geq (1.4 \sim 2)I_n \quad (4-34)$$

式中  $I_n$ ——变压器额定电流。

选择熔断器的熔体, 还应考虑与导线截面的配合, 与各熔断器选择性的配合。在发生过载或短路时, 应该使最接近短路点的熔断器的熔体熔断, 为此要求上一级熔体比相邻下一级线路中熔体的额定电流大。

表 4-9 为各种低压熔断器的熔体规格。

例 4-8 某干线电压为 380V, 接有 6 台混凝土搅拌机, 距离很近, 每台电动机 7.5kW, 额定电流 15.1A, 起动电流倍数为 7, 干线明敷, 环境温度 25°C, 计算干线截面和熔断器熔体的额定电流。

解 (1) 选择干线截面

干线上设备容量  $\Sigma P_n = 7.5 \times 6 = 45 \text{ kW}$

查表 4-4, 需用系数取  $K_d = 0.65, \cos\phi = 0.65$

有功计算负荷  $P_{js} = K_d \Sigma P_n = 0.65 \times 45 = 29.3 \text{ kW}$

视在计算负荷  $S_{js} = \frac{P_{js}}{\cos\phi} = \frac{29.3}{0.65} = 45.1 \text{ kVA}$

计算电流为  $I_{js} = \frac{S_{js}}{\sqrt{3}U_n} = \frac{45160}{\sqrt{3} \times 380} = 68.5 \text{ A}$

由于距离近, 则按安全载流量选择导线截面, 查附表 6, 16mm<sup>2</sup> 橡皮绝缘铝芯线其允许载

满值为 85A, 满足  $I_n > I_p$  要求, 查表 4-7, 机械强度也足够。

表 4-9 各种类型低压断路器的熔体额定电流表

断路器 型号	断路器 额定电流 /A	熔体额定电流 /A	断路器 型号	断路器 额定电流 /A	熔体额定电流 /A
RC <sub>1</sub> A	5	2.4	RM <sub>10</sub>	15	6, 10, 15
	10	2.4, 6, 10		60	15, 20, 25, 35, 45, 60
	15	6, 10, 15		100	60, 80, 100
	30	20, 25, 30		200	100, 125, 160, 200
	60	40, 50, 60		350	200, 225, 260, 300, 350
	100	80, 100		600	350, 430, 500, 600
	200	120, 150, 200			
RL <sub>1</sub>	15	2.4, 5, 6, 10, 15	RTO	30	5, 10, 15, 30, 40, 50
	60	20, 25, 30, 35, 40, 50, 60		100	30, 40, 50, 60, 80, 100
	100	60, 80, 100		200	120, 150, 200
		400		250, 300, 350, 400	

## (2) 计算断路器的熔体额定电流

除去一台电动机时有功计算负荷

$$P_{js(1-11)} = (6 - 1) \times 7.5 \times 0.65 = 24.7 \text{ kW}$$

$$\text{视在计算功率 } S_{js(1-11)} = \frac{P_{js(1-11)}}{\cos\phi} = \frac{24.7}{0.65} = 38 \text{ kVA}$$

$$\text{计算电流 } I_{js(1-11)} = \frac{S_{js(1-11)}}{\sqrt{3}U_n} = \frac{38000}{\sqrt{3} \times 380} = 57.7 \text{ A}$$

$$\text{尖峰电流 } I_{jf} = I_{js(1-11)} + KI_p = 57.7 + 7 \times 15.1 = 163.4 \text{ A}$$

取  $\alpha = 2.5$ , 则熔体额定电流为

$$I_n = \frac{I_{jf}}{\alpha} = \frac{163.4}{2.5} = 65.4 \text{ A}$$

查表 4-9, 选择熔丝的额定电流为 80A, 它满足  $I_n \geq I_{js} = 68.5 \text{ A}$ , 又满足  $I_n \geq \frac{I_{jf}}{\alpha} = 65.4 \text{ A}$

所以

$$I_n = 80 \text{ A}$$

## 五、常用配电箱的选择

配电箱是接受和分配电能的装置, 配电箱内主要安装开关、熔断器, 有的还安装电度表, 它们属小型成套电气设备。国内有许多厂家专门生产, 在民用建筑中使用量很大。

图 4-24 为配电箱盘面布置示意图, 其中有空气开关 DZ15-10 一只, 胶盖闸刀开关 HK1-10 三只, 瓷插式熔断器 RC<sub>1A-10</sub> 三只, 熔断器均安装在相线上。

与图 4-24 对应的配电箱控制的线路如图 4-25 所示, 空气开关作为总开关, 三只闸刀开关控制向外引出的三路干线, 三只单极自动开关控制三路单相出线。

配电箱的安装方式有明装和暗装两种。明装多靠墙装设, 暗装嵌入建筑物的墙壁内, 箱门

与墙面取平。

配电箱主要有动力、照明配电箱,还有各种计量箱和控制箱,动力和照明配电箱又分为标准式和非标准式。各种配电箱按其结构,又分为板式、箱式和落地式。

1. 标准动力配电箱 标准动力配电箱是按照实际需要,根据国家有关标准和规范,进行统一设计的全国通用的定型产品。主要有 XL(F)-14, XL(R)-20, XL-21 等型号。其

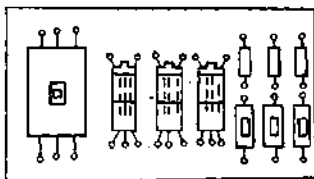


图 4-24 配电箱盘面布置示意图

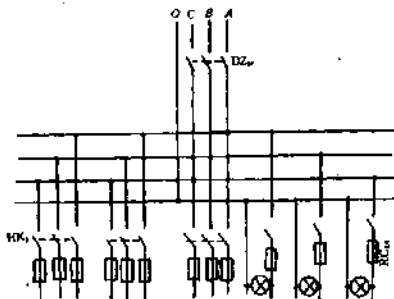


图 4-25 配电箱控制的线路图

字母含义为:XL 表示动力配电箱,括号内字母表示安装和结构形式,F 为防尘式,R 为嵌入式,无括号及字母表示一般,或明装,或落地安装,后面数字为设计序号。

2. 标准照明配电箱 照明配电箱一般分为挂墙式和嵌墙式,也是按国家标准统一设计的全国通用的定型产品。常用的有 XM-4 和 XM(R)-7 等型号,其中 X 表示低压配电箱,M 表示照明,括号内 R 表示嵌入式安装,无括号及字母表示挂墙式安装,数字表示设计序号。

3. 非标准箱 所谓非标准箱,是指那些箱体尺寸和结构等均未按国家规定的通用标准进行统一设计的非定型产品。非标准配电箱可分为:木制明装和暗装,铁制明装和暗装,铁木混合制作等种类。它可根据需要进行设计,可用木板、钢板、塑料板等材料制作。

选择配电箱时,要根据负荷特性和用途,确定是照明还是动力配电箱、或计量箱、插座箱等;根据控制对象负荷电流大小,保护要求,确定配电箱内主回路和各支路开关电器、保护电器的容量;根据使用环境和使用场所的要求,选择配电箱的结构形式,确定明装或暗装,以及外观颜色、防潮、防火等要求。为便于设计和施工,一般尽量选用标准配电箱。

## 习 题

4-1 什么叫电力系统和电力网？它们的作用是什么。

4-2 一条 35kV 送电线路，每相导线电阻  $R=10\Omega$ ，输送有功功率  $P=800\text{kW}$ ， $\cos\phi=0.6$ ，求送电线路中的电流和有功功率损耗？

4-3 一条 10km 长的输电线路，其单位长度电阻  $r_0=0.65\Omega/\text{km}$ ，输送  $P=600\text{kW}$ ， $\cos\phi=0.7$  的负荷，试分别计算采用 10kV、6kV 送电时的有功功率损耗？

4-4 电力负荷如何根据用电性质进行分级？不同等级的负荷对供电要求有何不同？

4-5 何谓变、配电所的一次主接线？怎样画一次接线单线接线图？

4-6 高压断路器与高压隔离开关的主要区别是什么？各有什么用途？

4-7 某 380V 线路，供电容量为 85kW 的小批生产的冷加工机床电动机，用需用系数法确定其计算负荷。

4-8 某施工工地有如下施工机械：混凝土搅拌机 5 台，每台 7.5kW；砂浆搅拌机 4 台，每台 3kW；单相交流电焊机 3 台，每台 20kVA，单相 220V，暂载率  $JC=40\%$ ；起重机械 3 台，每台 40kW， $JC=25\%$ ；照明采用白炽灯，共 8kW，试进行负荷计算，并选择变压器。

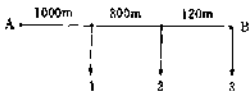
4-9 某变电所，以 10kV LJ-70 送电线路由地区变电所供电，线路长 10km，变电所装有 1 台 SJL1-800/10 型变压器，其低压侧负荷  $P_{\Sigma}=500\text{kW}$ ， $Q_{\Sigma}=300\text{kVar}$ ，求地区变电所向该变电所供给多少计算负荷？

4-10 某车间 380V 电力线路供给下列设备用电：(1) 长期工作的设备：7.5kW 电动机一台，5kW 电动机 2 台，3.5kW 电动机 7 台， $\cos\phi=0.6$ ；(2) 反复短时工作的设备：10 吨吊车一台，在暂载率为 40% 的条件下，其额定功率为 39.6kW， $\eta=0.8$ ， $\cos\phi=0.5$ 。试确定其设备容量，设  $K_x=0.2$ ，求该线路的计算负荷功率和电流。

4-11 某 10kV 线路，接有两个用户，在距电源 O 点 10km 的 A 点处负荷功率 100kW， $\cos\phi=0.85$ ；在距 20km 的 B 点处负荷功率 150kW 和 120kVar。线路  $r_0=0.46\Omega/\text{km}$ ， $x_0=0.358\Omega/\text{km}$ ，试求 OB 段、BA 段和 OA 段线路的电压损失？

4-12 某住宅楼的白炽灯照明计算负荷为 2.5kW，由 200m 处的变电所用橡皮绝缘铝线供电，供电电压为 220V，单相，要求这段线路的电压损失不超过 2.5%，试选择导线截面。

4-13 如图所示，配电线路电压 10kV， $r_0=0.54\Omega/\text{km}$ ， $x_0=0.366\Omega/\text{km}$ ，各支线负荷为  $p_1=50\text{kW}$ ， $p_2=100\text{kW}$ ， $p_3=30\text{kW}$ ，功率因数均为 0.8，求 AB 线段的电压损失。



4-13 题图 配电线路负荷分配图

4-14 某单独生产的金属冷加工车间的一条明敷树干式供电线路，供电线路较短，给 11 台电动机供电，各台电动机的数据如下：

型号	额定功率 /kW	额定电压 /V	额定电流 /A	$I_e/I_n$	台数
JO <sub>2</sub> -42-4	5.5	380	11.3	7	8
JO <sub>1</sub> -52-4	10	380	20	7	3

选择干线的截面及熔丝的额定电流(环境温度 30°C)。



## 第五章 建筑电气照明技术与设计

电气照明是一门综合性技术,它涉及到光学、电学、建筑学和生理学。由于电光源的出现和发展,电气照明已广泛应用于生产和生活等各个方面,它是人工照明的基本方式,是当今建筑设计中不可缺少的部分,本章主要介绍电气照明的一些基本概念,介绍工业与民用建筑室内电气照明设计的最基本内容,如电光源和灯具的选择、布置,照明计算和设计,照明线路的设计等有关问题。

### 5-1 照明技术的基本概念

建筑物内的照明有自然照明和人工照明两大类。

电气照明是人工照明中应用最广的一种照明方式,它是通过电光源将电能转换成光能,在夜间或天然采光不足的情况下提供明亮的环境,以保证生产、学习、生活的需要,照明设计是否合理,将直接影响到生产的安全、产品的质量、工作效率、职工的视力,同时,电气照明装置还能装饰建筑物,美化环境。所以,电气照明是建筑设计中不可缺少的重要组成部分。

#### 一、照明的光学概念

光是能量的一种形式,在空间以电磁波的形式传播,波长在 $0.00004\sim 0.00007\text{cm}$ 之间的电磁波可在人眼中产生光的感觉,这部分电磁波叫可见光。由于其波长很短,常用纳米(nm)来表示, $1\text{nm}=10^{-9}\text{m}=10^{-7}\text{cm}$ 。所以可见光的波长介于 $400\text{nm}$ 和 $700\text{nm}$ 之间,其波长不同,在人眼中会产生不同的颜色,人眼对可见光中波长为 $555\text{nm}$ 的黄绿色光最为敏感,可见度最高,设计时应予以适当注意。

下面介绍照明技术中常用的一些基本概念。

##### 1. 光通量

光源在单位时间内,向周围空间辐射并引起视觉的能量称为光通量,用符号 $\Phi$ 表示,单位为流明(lm)。

例如,手电筒小灯泡的光通量约为 $6\text{lm}$ ,额定电压 $220\text{V}$ ,额定功率 $25\text{W}$ 的白炽灯光通量约为 $191\text{lm}$ , $100\text{W}$ 的白炽灯约为 $1000\text{lm}$ 。

##### 2. 发光强度(光强)

光源在某一方向上光通量的立体角密度,就称为光源在该方向的发光强度,简称光强,用符号 $I$ 表示,它表示了光源发光的强弱,其公式为

$$I = \frac{\Phi}{\omega} \quad (5-1)$$

式中  $I$ ——发光强度,单位坎德拉(cd),又称烛光;

$\Phi$ ——光源在 $\omega$ 立体角内所辐射出的总光通量,单位流明(lm);

$\omega$  光源发光范围内的立体角,单位球面度, Sr。

关于立体角,如图 5-1 所示,设有以  $O$  点为顶点,以  $S$  面为底面的锥体,与以  $O$  点为球心,以  $r$  为半径的球面相交时,在球面上截取的面积为  $S'$ ,则  $S$  面对应于  $O$  点的立体角为



$$\omega = \frac{S'}{r^2} \quad (5-2)$$

式中  $\omega$ ——立体角,单位球面度, Sr;

$r$ ——球的半径, m;

$S'$ ——与立体角  $\omega$  相对应,半径为  $r$  的球面积,米<sup>2</sup>(m<sup>2</sup>)。

应用(5-2)式,可知围绕一点的整个圆球面的立体角为:

$$\omega = \frac{4\pi r^2}{r^2} = 4\pi$$

图 5-1 立体角

### 3. 照度

光通量和发光强度是表示光源的物理量,而照度是表示物体被照亮程度的物理量,被照物体单位面积上接收的光通量称为照度,用符号  $E$  表示:

$$E = \frac{\phi}{S} \quad (5-3)$$

式中  $E$ ——照度,单位勒克司(lx);

$\phi$ ——均匀投射到物体表面上的光通量,流明(lm);

$S$ ——受照表面积。

能否看清一个物体,与这个物体的照度有关。照度为 1lx,仅能辨别物体的轮廓;照度为 5~10lx,看一般书籍比较困难;阅览室和办公室的照度一般要求不低于 50lx。

例 5-1 有一只 100W 的灯泡,发出总的光通量为 1200lm,均匀分布在一半球上,试求距光源 1m 和 5m 处的光照度和光强度?

解 (1)求光照度

半径为 1m 的半球面积为  $S_{(1)} = 2\pi \cdot 1^2 = 6.28 \text{ m}^2$

距光源 1m 处的光照度为

$$E_{(1)} = \frac{1200\text{lm}}{6.28\text{m}^2} = 191 \text{ lx}$$

半径为 5m 的半球面积为  $S_{(5)} = 2\pi \cdot 5^2 = 157\text{m}^2$

距光源 5m 处的光照度为

$$E_{(5)} = \frac{1200\text{lm}}{157\text{m}^2} = 7.64 \text{ lx}$$

比较  $E_{(1)}$  和  $E_{(5)}$  可以看出,点光源发出的光照度与高光源距离的平方成反比。

(2)求光强度

半球面的立体角为  $\omega = \frac{S}{r^2} = 2\pi \text{ Sr}$

光强度为  $I = \frac{\phi}{\omega} = \frac{1200\text{lm}}{2\pi\text{Sr}} = 191 \text{ cd}$

这表示光强度与距离无关。

### 4. 亮度

照度仪表示被照面接收光照的强弱,而不能表示被照面的明暗程度。在同一照度下,并排放着的白色和黑色物体,人眼看起来白色物体要比黑色物体明亮得多。眼睛对发光体(既指光源,又指被光照射产生反射光的物体)明暗程度的感觉,用亮度表示。

发光体在视线方向单位投影面上的发光强度,称为该物体表面在视线方向的亮度,用符号  $L$  表示,如图 5-2 所示,设发光体表面法线方向的光强为  $I$ ,人眼视线方向与发光体表面法线方向成  $\alpha$  角,因此视线方向的光强为  $I_s = I \cos \alpha$ ,视线方向的投影面为  $S_s = S \cos \alpha$ ,因此发光体在视线方向的亮度为:

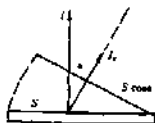


图 5-2 亮度的定义示意图

$$L = \frac{I_s}{S_s} = \frac{I \cos \alpha}{S \cos \alpha} = \frac{I}{S} \quad (5-4)$$

式中  $L$ ——亮度,单位为尼特(nt);

$I$ ——光强,坎德拉(cd);

$S$ ——面积,米<sup>2</sup>(m<sup>2</sup>)。

由上式可知,发光体的亮度与视线方向无关。

此外也常用照提(sb)作亮度单位

$$1 \text{ 照提}(sb) = \frac{1 \text{ 坎德拉}(cd)}{1 \text{ 平方厘米}(cm^2)} = 10^4 \text{ 尼特}(nt)$$

亮度的定量概念是,白天晴朗天空亮度为 0.5 照提,正午太阳的亮度为 150,000 照提。

例 5-2 直径为 15cm 的乳白色球型玻璃罩照明器,其向下轴线方向的光强  $I = 120cd$ ,试计算从下面看,该照明器的亮度?

解 发光体表面虽是球形,但投影到视线方向的面积是:

$$S = \frac{\pi d^2}{4} = \frac{3.14 \times 15^2}{4} = 176.7cm^2$$

从下面看其亮度为

$$L = \frac{I}{S} = \frac{120cd}{176.7cm^2} = 0.679 sb$$

以上是常用的四种光量:光通量、发光强度、照度和亮度。

## 二、照明质量的基本要求

照明设计首先应考虑照明质量,在满足照明质量的基础上,再综合考虑投资省、安全可靠、便于维护管理等问题。

### 1. 照度均匀

如果被照面的明亮程度不均匀,使眼睛经常处于亮度差异较大的适应变化之中,将会导致视觉疲劳。因此,在进行照明设计时,必须进行合理的灯具布置,以使工作面上的照度比较均匀。

为了使照度均匀,灯具布置时其相互间的距离和对被照面的高度有一定比例,这个比例要选得恰当。均匀度要求很高时,可采用间接型、半间接型灯具,但这样造价要高一些,光源光通量利用率低,耗电也大一些。

## 2. 照度合理

亮度反映了眼睛对发光体明暗程度的感觉,原则上讲应规定合适的亮度,但在计算过程中确定照度比确定亮度要简单得多,所以在照明设计中一般是规定照度标准。

合理的照度是进行照明设计的重要条件,为了保证必要的视觉条件,根据适用、安全、有利于提高劳动生产率 and 经济效益等方面的要求,规定了《工业企业照明标准》,如表 5-1 所列数值。在参照此标准进行照度计算时,一般不应大于照度标准的 20%,不小于照度标准的 10%。

表 5-1 主要生产车间工作面上的照度最低值(参考值)

车间名称及工作场所	工作面上的最低照度 / lx		
	混合照明	混合照明中的一般照明	单独使用一般照明
金属机械加工车间			
一般	500	30	
精度	1000	75	
机电装配车间			
大件装配	500	50	
精密小件装配	1000	75	
机电设备试车			
地  面			20
试  车  台	500	50	
焊接车间			
弧  焊			50
接  触  焊	500	50	
缝  焊			75
钣金车间			50
冲压剪切车间	300	30	
锻工车间			30
热处理车间			20
铸工车间			
熔  化、浇  铸			50
型  砂  处  理、清  理			50
选  型	500	30	
木工车间			
机  床  区	300	30	
木  工  工  作  台、检  验	300	30	
表面处理车间			
电  镀  槽  区			50
酸  洗			30
抛  光	300	20	
电  源(整流器)室			50
喷漆车间			
油  漆、喷  漆			50
调  漆  配  制			30
喷砂车间	200	20	

续表

车间名称及工作场所	工作面上的最低照度/lx		
	混合照明	混合照明中的一般照明	单独使用一般照明
电梯车间			
一般	300	30	50
精密	500	50	
配、变电所			
高、低压开关室			30
变压器室			20
控制室			75
实验室			
理化、天平、计量			100
光学计量			50
动力站房			20
办公室、会议室			50
设计室			100
露天工作			3~20
道路	主要道路		0.5
	一般道路		0.3

民用建筑的照度标准一般是规定平均照度值,表 5-2 给出了推荐的民用建筑照度标准,在推荐照度幅度范围内可根据具体情况选择适当的照度值。

表 5-2 常见建筑的照明标准(平均照度推荐值)/lx

居住建筑	厕所、盥洗室	5~15
	餐室、厨房、起居室	15~30
	卧室	20~50
	单宿、活动室	30~50
公共办公室等建筑	厕所、盥洗室、楼梯间、走道	5~15
	食堂、传达室	30~75
	厨房	50~100
	医务室、报告厅、办公室、会议室接待室	75~150
	实验室、阅览室、书库、教室	75~150
	设计室、绘图室、打字室	100~200
	电子计算机房	150~300
医疗建筑	厕所、盥洗室、楼梯间、走道	5~15
	病房、健身房	15~30
	X 线诊断室、化疗室、同位素扫描室	30~75
	理疗室、麻醉室、候诊室	30~75
	解剖室、化验室、药房、诊室、护士站	75~150
	医生值班室、门诊挂号药房室	75~150
	手术室、加速器治疗室	100~200
	电子计算机 X 线扫描室	100~200

续表

商业建筑	厕所、更衣室、热水间 楼梯间、冷库、库房 一般居住客房、浴池 大门厅、售票室、小吃店 餐厅、照相馆营业厅、菜场、菜店 旅店、钟表眼镜店 银行出纳厅、邮电营业厅 理发室、书店、服装商店 字画商店、百货商场	5~15 10~20 20~50 30~75 50~100 70~150 100~200
旅游饭店建筑	贮藏、楼梯间、公共卫生间 衣帽间、库房、冷库、客房走廊 客房、电梯厅、台球房、台球房 洗衣间、客房卫生间、邮电厅 健身房 酒吧、咖啡厅、茶室、游艺厅 游泳池、电影院、小舞厅、原形旋转厅 餐厅、小卖部、休息室、会议厅 网球场、美容室 大宴会厅、大门厅、厨房 多功能大厅、总服务台	10~20 15~30 30~75 75~150 30~75 50~100 100~200 150~300 300~750
影剧院、礼堂建筑	主楼梯间、公共走廊、卫生间 拷贝室 放映室、电梯厅、衣帽厅 转播室、录音室、化妆室 后台、门厅 美工室、排练厅、休息厅、会议厅 观众厅 报告厅、接待厅、小宴会厅	5~15 15~30 20~50 50~100 50~100 75~150 75~150 100~200
道路照明	住宅小区道路 公共建筑的庭园道路 大型停车场 广场 隧道(长度 100m 以内直线隧道) 白天 傍晚、夜间	0.2~1 2~5 3~10 5~15 100~200 35~75

### 3. 限制眩光

光源的亮度极高或强烈的亮度对比,使人眼受到刺激或视觉降低的现象称为眩光。眩光不仅使人感觉不舒服,而且对视力危害极大,是照明质量的重要特征,在现代人工照明中对眩光的限制应予以重视。

眩光分直射眩光和反射眩光两种。直射眩光是在观察方向上存在很亮的光源所产生的眩光,反射眩光是在观察方向上由发光体镜面反射所引起的眩光。

眩光与背景亮度的大小有关,当背景很暗时,不大的光源亮度都可引起眩光。例如白天阳光下点燃的路灯很不刺眼,而在黑夜时它却显得很刺眼。眩光还与光源的亮度有关,在背景亮度一定的情况下,光源亮度越大,眩光作用也越强。亮度超过16 熙曼(sb)的光源,在任何背景下都会产生眩光,亮度低于0.6 熙曼(sb)的光源,即使在黑暗背景下也不会产生眩光。另外,视线越接近光线,眩光作用也越强。

为了限制眩光,可采用限制光源的亮度,如用磨砂玻璃来降低灯具表面亮度,选用有遮挡刺眼光线装置灯具,选择适当的灯具悬挂高度。例如当人眼的视线在水平方向时,灯泡应悬挂在观察者上方27°以上的高度,很显然,灯具悬挂越高,眩光作用就越小。

## 三、民用建筑的照明种类

民用建筑中的照明按其作用主要可分为:正常照明、事故照明、警卫值班照明、障碍照明、彩灯和装饰照明等。

### 1. 正常照明

满足一般生产、生活需要的照明称为正常照明。所有居住的房间和供工作、运输、人行的走道、以及室外场地,都应设置正常照明。

正常照明按照明装置的分布特点又分为一般照明、局部照明、混和照明三种方式。

一般照明:为整个房间普遍需要的照明称为一般照明。这种照度一般都很均匀,所以又称一般均匀照明。其灯具通常分布在天花板下面距工作面有足够高的距离,采用单灯一般照明的房间,可在所有工作面和通道上得到同等的照度。

局部照明:在工作地点附近设置照明灯具,以满足某一局部工作地点的照度要求。它又分为固定式和移动式两种,前者的灯具是固定安装,后者的灯具是可以移动的,例如临时照明用的手提灯等。

混和照明:它由一般照明和局部照明共同组成。两者搭配要适当,若采用过低的一般照明和过高的局部照明,则会造成背景和工作面的亮度对比相差很大,这容易引起视觉疲劳。

### 2. 事故照明

正常照明因事故而中断、供继续工作和人员疏散而设置的照明称事故照明。在下列场所,例如影剧院、博物馆、餐厅、营业厅、百货大楼等公共场所、高层建筑物的疏散楼梯、医院的手术室、急救室等,均应设置事故照明。

事故照明应采用能瞬时点燃的照明光源,一般采用白炽灯,当事故照明是正常照明的一部分而经常点燃,在发生故障时又不需要切换电源的情况下,也可采用荧光灯光。事故照明不允许采用荧光高压汞灯,不允许采用金属卤化物灯和高压钠灯。

用于继续工作的事故照明,在工作面上的照度不应低于一般照明推荐照度的10%,用于人员疏散的事故照明,其照度不应低于0.5 勒克司。

### 3. 警卫值班照明

在值班室、警卫室、门卫等地方所设置的照明叫警卫值班照明，它可利用正常照明的一部分，但应能单独控制，也可利用事故照明的一部分或全部作为值班照明。

### 4. 障碍照明

在建筑物上装设用于障碍标志的照明称为障碍照明。例如装设在高层建筑物顶上作为飞行障碍标志用的照明，装在水上航道两侧建筑物上作为航行障碍标志用的照明，这些照明应按交通部门有关规定设置，尽量采用能透雾的红灯灯具。

### 5. 彩灯和装饰照明

为美化市容夜景、以及节日装饰或室内装饰而设置的照明叫彩灯和装饰照明，一般采用15瓦左右的白炽灯或彩色灯。

## 5-2 电光源和灯具的选择与布置

电气照明是现代人工照明的基本方式，它广泛应用于生产和生活等各个方面。电气照明取决于电光源的出现和发展，电光源的进一步发展必将促进电气照明的更广泛应用。

### 一、电光源的选择

利用电能发光的光源称为电光源。

电气照明采用的电光源按发光原理可分为两大类：一类是热辐射光源，如白炽灯、卤钨灯等。另一类是气体放电光源，如荧光灯、高压汞灯、高压钠灯、管形氙灯等。

#### 1. 白炽灯

白炽灯是应用最广的热辐射光源，它是利用电流通过灯丝产生热量，把灯丝加热到白炽状态而发光。

白炽灯由玻璃泡壳、灯丝、引线和灯头等部分组成。灯丝用高熔点的钨丝绕制，小功率的白炽灯玻璃泡壳内抽成真空，大功率的玻璃泡壳内抽真空后充入氩、氮等惰性气体，以减少钨丝的蒸发，提高灯泡的使用寿命。灯头用于固定灯泡和引入电流，分螺口灯头和插口灯头，与相应灯座相配合。

白炽灯有以下特点：构造简单、价格便宜、使用方便。灯丝加热迅速，一般加热到输出90%的光通量只需0.07~0.38s，实际为瞬时点燃，所以照明可靠，事故照明都采用白炽灯。灯丝热惯性大，交流电过0时所引起的频闪效应不明显。白炽灯光谱中红光成分较显著，照在红颜色物体上显得更鲜艳，照在蓝颜色物体上有些失真，它属于暖色光。

白炽灯灯丝温度越高，发光效率也越高，但输入灯泡的大部分电能转变成看不见的红外线辐射能和热能，只有少部分转变成可见光，所以发光效率低，一般为7~19lm/W，白炽灯泡的主要技术数据见表5-3。电压对白炽灯的光通量和寿命有很大影响，电压超过额定值5%时，使用寿命缩短50%。灯丝是一个非线性电阻，其冷态电阻约为热态电阻的 $\frac{1}{8} \sim \frac{1}{10}$ ，所以起燃瞬间的电流约为正常工作电流的8倍以上，但点燃和熄灭对其使用寿命影响较小，适于频繁开关情况下使用。



表 5-3 普通白炽灯泡的主要技术数据

额定电压/V	220										
额定功率/W	15	25	40	60	75	100	150	200	300	500	1000
光通量/lm	110	220	350	630	850	1250	2030	2920	4610	8300	8600
平均寿命/h	1000										

## 2. 卤钨灯

白炽灯泡在使用时,高温使钨丝不断蒸发,钨蒸气沉积在灯泡壁上,使玻璃逐渐变黑,灯泡透明度变坏,发光效率变低,灯泡使用寿命也缩短。为避免这种现象,在白炽灯基础上改进而制成了卤钨灯,它由灯丝和耐高温的石英管组成,灯丝仍由钨丝绕制,但比白炽灯更密,因此工作温度更高,管内除充入惰性气体外,还充入适量卤族元素,如碘和溴等。使用时,灯丝在高温下工作,蒸发出来的钨和卤素在管壁附近化合或卤化钨,使钨不会沉积在管壁上。当卤化钨向管心扩散时,在灯丝高温作用下又分解成钨和卤素,从而在灯丝周围形成一层钨蒸气,一部分钨又重新回到灯丝上,从而有效的抑制了钨的蒸发。这样的卤钨循环不断进行,将蒸发的钨不断送回钨丝,这样不仅避免管壁发黑,还可保证灯管在较高温下工作,从而提高灯丝的使用寿命和发光效率。

卤钨灯的规格型号见表 5-4。

表 5-4 卤钨灯的规格型号

序号	灯管型号	额定值			主要尺寸/mm		安装方式
		电压/V	功率/W	光通量/lm	管径	全长	
1	LZG220-500	220	500	9750	12	177	夹式
2	LZG220-1000		1000	21000		210±2	顶式
						232	夹式
3	LZG220-1500		1500	31500	13.5	293±2	顶式
		310				夹式	
4	LZG220-2000	2000	42000	13.5	293±2	顶式	
					310	夹式	
5	LZG220-500	110	500	10250	12	123±2	顶式

卤钨灯有碘钨灯管和溴钨灯管两种,它的主要特点是:体积小,温度高,光色发白,发光效率高,可达 21lm/W,比白炽灯光色有所改善,使用寿命长,主要用于大面积照明场所和投光灯。

卤钨灯使用了石英玻璃管,故价格贵,由于灯丝长,所以耐振性差,不应装在易振场所。其工作温度也高,约 600℃ 左右,所以也不适于安装在有易燃易爆以及灰尘较多的场所。卤钨灯必须水平安装,倾角不得大于 ±4°,否则,卤蒸气会沉积在低端,破坏卤钨循环,使灯管很快发黑烧断,严重影响使用寿命。

### 3. 荧光灯

荧光灯俗称日光灯,也是应用很广的一种电光源。

荧光灯主要由灯管  $F$ 、启辉器  $S$ 、镇流器  $L$  等组成,如图 5-3 所示。灯管是一根玻璃管,管壁均匀涂有一层荧光粉,两端装有钨丝电极,管内抽成真空后充入少量汞和惰性气体氩。启辉器  $S$  是一个充有氖气的玻璃泡,里面有一个固定触片和一个 U 型双金属可动触片。镇流器  $L$  是一个铁芯线圈。

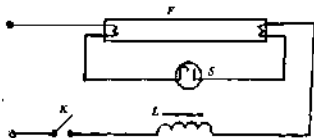


图 5-3 荧光灯电路

荧光灯合上电源开关  $K$  时,电压加在启辉器触头两端,产生辉光放电,灯管发光,双金属片的热胀系数不同,辉光放电使双金属片受热而弯曲,启辉器触点闭合,灯管的钨丝通电加热,发射大量电子。启辉器触点闭合后,辉光放电停止,灯管熄灭,双金属片冷却恢复原形,使触点断开,这时镇流器线圈将产生高压,因灯丝已发射大量电子,致使管内两电极间击穿放电,荧光灯点燃。这时镇流器由于本身的阻抗产生较大的电压降,使灯管两端维持较低的工作电压,启辉器这时停止工作,形成灯管与镇流器串联,灯管放电点燃后,汞原子受到电子的不断碰撞,产生紫外线,紫外线照射到管壁的荧光粉上,就发出可见光。

荧光灯的主要技术数据见表 5-5。

表 5-5 直管形荧光灯技术数据

灯管型号	灯管额定值						灯管外形		镇流器 最大功 耗/W	功率因数	
	功率 /W	电源电压 /V	工作电压 /V	工作电 流/mA	启动电 压/V	启动电 流/mA	光通量 /lm	全长 /mm			直径 /mm
RG15	15	~220	52	320	190	440	580	451	38	8	0.33
RG20	20		60	350		480	970	604			0.36
RG30	30		95	350		560	1550	909			0.5
RG40	40		108	410		650	2400	1215			0.53
RG100	100		87	1500		1800	5500				20

荧光灯的主要特点是:荧光灯的发光效率很高,约为普通白炽灯的 4 倍,可达 50~60lm/W;使用寿命长,达 2000~3000h;光线柔和,光色接近于日光,所以又称日光灯。

荧光灯由于有镇流器,所以功率因数很低,启辉器触点接通和断开对无线电波产生干扰,所以启辉器铝壳内并联有  $0.06\mu\text{F}$  的电容器;电源电压变化不宜超过  $\pm 5\%$ ,否则将影响光效和灯管使用寿命;荧光灯最适宜  $18\sim 25^\circ\text{C}$  的温度,环境温度过高过低都会造成启辉困难和光效下降;随交流电的变化,荧光灯的发光也周期闪烁,每秒闪烁 100 次,产生频闪效应,在荧光灯照明下观察有转动的物体,如果每秒钟转速正好是灯光闪烁频率的整数倍,则转动物体看上去好像没有转动一样,这容易引起错觉而发生事故,为消除荧光灯的频闪效应,可采用一些办法,例如采用有移相电路的双管日光灯、采用二灯分接二相电路或三灯分接三相电路等。

### 4. 荧光灯高压水银灯

荧光高压水银灯又叫荧光高压汞灯。它主要由灯头、玻璃外壳、镇流器、石英放电管等组成。放电管由耐高温的石英玻璃制成,内装两个主电极 $E_1$ 和 $E_2$ ,还装有一个辅助电极 $E_3$ , $E_3$ 也叫引燃电极,如图5-4,放电管内充有适量的汞和氩气。放电管安装在玻璃壳内,起保温和避免外界对放电管的影响。辅助电极 $E_3$ 串有电阻 $R$ ,玻璃外壳的内壁涂有荧光粉,外壳与放电管之间抽成真空并充有少量惰性气体。

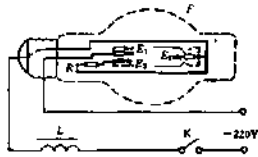


图5-4 荧光高压汞灯工作电路  
F—荧光高压汞灯;L—镇流器;K—开关;  
 $E_1$ 、 $E_2$ —主电极; $E_3$ —引燃电极

荧光高压水银灯的启动过程不需要预热,也不要启动器。开关 $K$ 闭合后,由于主电极 $E_1$ 和辅助电极 $E_3$ 之间距离很近,所以首先在 $E_1$ 和 $E_3$ 之间击穿发生辉光放电,电阻 $R$ 起限流作用。此时产生大量电子和离子,在两个主电极 $E_1$ 和 $E_2$ 间的电场作用下,很快过渡到两个主电极之间的弧光放电,由于电阻 $R$ 的作用,主电极开始放电后, $E_1$ 和 $E_2$ 之间停止放电。

主电极放电后,管内温度升高,加速汞的气化,汞蒸气压力较高,达2~6个大气压,所以称高压水银灯。高压汞蒸气放电辐射出可见光和紫外线,紫外线再激发玻璃外壳内壁的荧光粉,又转变为可见光。整个启动过程需要4~8分钟,才进入高压汞蒸气放电的稳定工作状态。

镇流器在工作过程中起限流作用。当主电极放电后,只须较低的维持电压,镇流器产生压降,保证高压水银灯正常工作。

照明用高压汞灯有三种类型:普通型,型号为GGY;反射型,型号GGF;自镇流型,型号GGZ。普通型和反射型要外接镇流器,反射型是在玻璃外壳内壁上都镀有铝反射层,然后再涂荧光粉,所以有定向反射性能,不用灯罩。自镇流型不用外接镇流器,它是在石英放电管外绕以钨丝代替镇流器,工作时该钨丝也发光,所以既有热辐射光,又有气体放电的光。高压汞灯的规格型号见表5-6。

荧光高压汞灯发光效率高,使用寿命长,亮度高并接近日光。电源电压降低超过5%时,可能使灯泡自行熄灭。玻璃外壳破碎后灯仍可点燃使用,但大量紫外线辐射易灼伤眼睛和皮肤。电源中断灯熄灭后,放电管内仍保持较高的汞气压力,不能立即启动,如需再启动必须等待5~10分钟冷却时间,所以不能用于事故照明和频繁开关的场所。

### 5. 金属卤化物灯

金属卤化物灯是在高压汞灯的基础上发展起来的新型电光源。它是在高压汞灯的石英放电管内添加某些金属卤化物,在放电时利用金属卤化物的循环作用,不断向电弧提供相应的金属蒸气,金属原子在电弧中受电弧激发而辐射该金属特性的光谱线,选择金属卤化物的适当比例,便可制成各种不同光色的金属卤化物灯,石英放电管内充以碘化钠、碘化铯、碘化铟的灯泡称“钠-铯-铟”灯,型号为NTY;充以碘化镉、碘化铊的灯称“镉灯”,型号DDG。金属卤化物灯的规格型号见表5-7。

表 5-6 高压汞灯的规格型号

灯泡型号	额定功率 /W	电源电压 /V	工作电压 /V	工作电流 /A	启动电压 /V	启动电流 /A	光通量 /lm	平均寿命 /h	主要尺寸/mm	
									直径	全长
GGY50	50	~220	95±15	0.62	180	1.0	1500	2500	56	130±5
GGY80	80		110±15	0.85		1.3	2800		71	160±5
GGY125	125		115±15	1.25		1.8	4750		81	184±7
GGY175	175		130±15	1.50		2.3	7000	5000	91	211±7
GGY250	250		130±15	2.15		3.7	10500		230±7	
GGY400	400		135±15	3.25		5.7	20000	122	300±10	
GGY700	700		140±15	5.45		10.0	35000	152	358±10	
GGY1000	1000		145±15	7.50		13.7	50000	182	400±10	
GYF400	400		135±15	3.25		5.7	16500	162	300±10	
GYZ250	250		220	1.20		1.7	9500	3000	102	250
GYZ450	450		220	2.25		3.5	13000		122	310
GYZ750	750		220	3.55		6.0	22500		152	370

注:GGY型为普通型,GGF为反射型,两者均需配用镇流器;GGZ为自镇流型,即在石英放电管外绕以钨丝,代替镇流器,既有气体放电的光,也有热辐射光。

表 5-7 金属卤化物灯规格型号

灯泡型号	额定功率 /W	工作电压 /V	工作电流 /A	启动电压 /V	稳定时间 /min	光通量 /lm	主要尺寸/mm	
							直径	全长
钠铊铟灯 NTY1000	1000	90±10	10~12.5	180	5~8	60000~70000	23	170~200
钠铊铟灯 NTY400	400	135±15	3.25	180	4~8	28000	91	227±7
管形碘灯 DCL400	400	216	2.7	340	4~6	38000	120	300

金属卤化物灯发光效率高,可达 80lm/W,光色好,接近自然光。但使用寿命比高压汞灯短,电压波动不宜超过额定电压的±5%,否则会引起光效、光色的变化,电压过低会引起自行熄灭。使用时需配相应的镇流器。

#### 6. 高压钠灯

它是利用高压钠蒸气放电发光的一种新型电光源,其电路见图 5-5。它是在玻璃外壳内抽真空后充入氩气,放电管由陶瓷制成,内部抽真空后充以钠。冷态时双金属片 a 使触点闭合,开

关  $K$  闭合电路接通,线圈  $b$  发热,双金属片  $a$  受热弯曲使触点断开,此时镇流器  $L$  产生高压脉冲使放电管击穿放电,灯管点燃发光。灯管点燃后,放电的热量使双金属片  $a$  仍处于断开状态,电源中断灯熄灭后,需经  $10 \sim 20 \text{min}$ ,等双金属片  $a$  冷却闭合后才能重新启动,每次从点燃到稳定工作约需  $4 \sim 8 \text{min}$ 。

高压钠灯的规格型号见表 5-8。

表 5-8 高压钠灯的规格型号

灯泡型号	额定功率 /W	工作电压 /V	工作电流 /A	稳定时间 /min	再启动时间 /min	光通量 /lm	主要尺寸/mm	
							直径	全长
NG250	250	$100 \pm \begin{smallmatrix} 20 \\ 15 \end{smallmatrix}$	3	4~8	10~20	22500	62	260
NG400	400	$190 \pm \begin{smallmatrix} 20 \\ 15 \end{smallmatrix}$	4.6	4~8	10~20	40000	62	280

高压钠灯发光效率高,可达  $90 \sim 100 \text{lm/W}$ ,使用寿命长,约  $10000 \text{h}$ ,透雾性很强,光色较好,为金黄色。

### 7. 管型氙灯

管型氙灯是一根封接有钨电极和氙气的石英玻璃管。一般不用镇流器,但需用触发器启动。管型氙灯在点燃前管内已有很高的气压,需要约  $2 \sim 3$  万伏的点燃电压,因此需配用触发器来产生脉冲高频电压,将灯管点燃,使高压氙气放电产生很强的白光,和太阳光十分相似,所以有小太阳之称。

管型氙灯功率大,发光效率高,发光稳定,可瞬时点燃,适用于广场、机场、海港等照明使用,其规格型号见表 5-9。

### 8. 电光源的选择

电光源的选择应考虑下面一些条件:

(1) 使用场所和环境 白炽灯、荧光灯、气体放电光源等广泛应用于室内外照明,选用气体放电光源时,应防止电磁干扰和频闪效应的影响。对于视觉要求较高的场所,一般不选用气体放电光源,对于广场、车站、展览馆等大面积照明,广泛采用大功率的高压汞灯、钠灯等。

(2) 光源的显色性 电光源的光线是有色的,电光源照在物体上反射出来的色光与自然光存在差异,这种有别于天然光的差异程度称为光源的显色性,并用显色指数来表示光源显色性能的好坏。在显色性比较中,一般以日光作为标准光源,显色指数定为 100,其余光源的显示指数均小于 100,所以电光源的显色指数越大,表明其所显之色越接近天然光,或称显色性越好。

在需要正确辨色的场所,应选用显色性能指数较高的光源,例如白炽灯、荧光灯、钠灯。也可采用两种或两种以上光源的混和光来照明,互相补充显色性,达到更好的辨色。

(3) 光源的色调 不同颜色的光照在同一物体上,给人的视觉产生的效果也不同,红、橙、

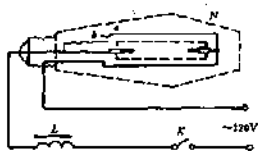


图 5-5 高压钠灯工作电路  
 $N$ —高压钠灯, $L$ —镇流器, $K$ —开关;  
 $a$ —双金属片; $b$ —加热线圈

黄、棕色给人以温暖的感觉,称为暖色光;蓝、青、绿、紫色光给人以寒冷的感觉,称为冷色光。光源的这种视觉颜色特性称为色调。

表 5-9 管型灯具的规格型号

型号	额定功率/W	电源电压/V	工作电压/V	工作电流/A	光通量/lm	平均寿命/h	主要尺寸/mm			与之配套的触发器型号	
							外径	全长	体长		
XG1500	1500	~220	220	60	20	$30 \times 10^3$	1000	32	350	110	XC-S1.5A
XG3000	3000			13~18	$72 \times 10^3$	25±1		700	590	XC-3A	
XG6000	6000			24.5~30	$144 \times 10^3$	21±1		1000	600	SQ-10	
XG10000	10000			41~50	$27 \times 10^4$	26±1		1500	1050	XC-10A	
XG20000	20000			84~100	$58 \times 10^4$	38±1		1800	1300	XC-S20A	
XG20000	20000	~380	380	47.5~58	$58 \times 10^4$	500	28±1	2500	2000	SQ-20	
XG50000	50000			118~145	$155 \times 10^4$		45±1	3400	2700	SCH-50	
XSG4000	4000	~220	220	15~20	$14 \times 10^3$	500	25±3	450	±10	250	DWC-3
XSG6000	6000			23~31	$22 \times 10^3$						

在选择照明光源时,应考虑对光源的色调要求,因为光源的色调直接影响人们的情趣、影响人们的工作效率和精神状态。对要求较高的照明,如高级宾馆、饭店、展览馆等场所,对色调的要求更要慎重考虑。

前面介绍了各种电光源的构造、工作原理、特点和使用时的注意事项,表 5-10 列出了它们的技术特性、优缺点、适用场所,供选择电光源时参考。

表 5-10 常用电光源的主要技术特性比较

光源 技术特性	光源						
	白炽灯	卤钨灯	荧光灯	高压汞灯	高压钠灯	金属卤化物灯	管形汞灯
额定功率/W	15~1000	500~2000	6~200	50~1000	250~400	250~3500	1500~100000
发光效率/lm/W	7~19	19.5~21	25~67	30~50	90~100	60~80	20~37
使用寿命/h	1000	1500	2000~3000	2500~5300	3000	2000	500~1000
显色指数/%	95~99	95~99	70~80	30~40	20~25	55~85	90~94
启动稳定时间	瞬时	瞬时	1~33	4~8min	4~8min	4~8min	1~2s
再启动时间	瞬时	瞬时	瞬时	5~10min	10~20min	0~15min	瞬时
功率因数	1	1	0.33~0.7	0.44~0.67	0.44	0.4~0.61	0.4~0.9
电压波动不宜大于			±5%U <sub>n</sub>	±5%U <sub>n</sub>	低于5%自灭	±5%U <sub>n</sub>	±5%U <sub>n</sub>

续表

项目	光源 技术特性						
	白炽灯	卤钨灯	荧光灯	高压汞灯	高压钠灯	金属卤钨灯	管形氙灯
优点	频闪效应	无	无	有	有	有	有
	电压变化对光通量的影响	大	大	较大	较大	大	较大
	温度变化对光通量的影响	小	小	大	较小	较小	较小
	抗震性能	较差	差	较好	好	较好	好
需增装附件	无	无	镇流器、启动器	镇流器	镇流器	镇流器、触发器	镇流器、触发器
适用场所	广泛应用	厂前区 屋外配电装置 广场	广泛应用	广场、车站 道路 屋外配电装置等	广场 街道 交通枢纽 展览馆等	大型广场 体育场 商场等	广场、车站 大型屋外配电装置等

## 二、灯具的选择

灯具是光源、灯罩和灯座的总称，灯具也叫照明器，它的作用是固定和保护光源；将光源的光通量进行合理分配、限制眩光；装饰和变化环境。

### 1. 灯具的基本特征参数

要正确选择灯具，必须了解灯具的基本特征参数，它包括灯具的配光曲线、保护角和效率。

(1) 配光曲线 光源的光通量是射向四周的，为了合理的利用光通量，就要配上灯罩重新分配光通量。光源加上灯罩后，表征光强在各个方向分布情况的曲线称为光强分布曲线，也叫配光曲线。

图 5-6 是用极坐标绘制的对称配光曲线。在通过灯具对称轴的任一平面上，测出该灯具在不同角度的光强值，将各个角度的光强用矢量标注出来，连接矢量端点就构成了配光曲线。

为了便于比较，通常按光源为 1000lm 光通量的假想光源来绘制配光曲线。如果光源的实际光通量为  $\phi$ ，入射角为  $\theta$ ，则该方向的光强  $I_{\theta}$  可按下式换算：

$$I_{\theta} = \frac{\phi}{1000} I_{n(1000)} \quad (5-5)$$

式中  $I_{\theta}$ ——入射角为  $\theta$  方向的发光强度，坎德拉(cd)；

$I_{n(1000)}$ ——从配光曲线上查得的该灯具在  $\theta$  方向的光强，坎德拉(cd)；

$\phi$ ——该灯具的实际光通量，流明(lm)。

(2) 保护角 保护角是以衡量灯罩保护人眼不受光源直射眩光的一个指标。眩光的强弱与

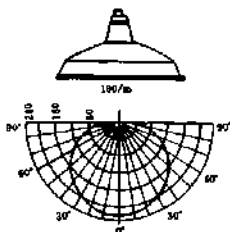


图 5-6 对称配照型配光曲线

视角存在一定的关系,如图 5-7、为限制直射眩光,光源应排在观察着上方 27°以上的高度、或用灯具保护角加以限制。

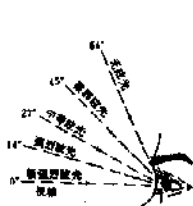


图 5-7 眩光的强弱与视角的关系

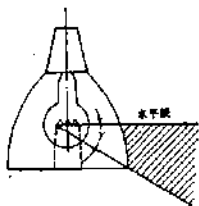


图 5-8 灯具保护角

一般灯具的保护角为灯丝的水平线与灯丝外端和灯具下缘连线之间的夹角 $\gamma$ ,如图 5-8 所示。在保护角范围以内,人眼直接看不到光源,也就避免了直射眩光。

(3)灯具的效率 使用灯具配光时,灯罩会吸收一些光通量。灯具的效率是灯具发出的光通量 $\phi_2$ 与光源发出的总光通量 $\phi_1$ 之比,并用百分数表示

$$\eta = \frac{\phi_2}{\phi_1}$$

灯具的效率是评价其技术经济优劣的一个指标,它的大小与灯具形状、材料的光学性质、如反射率、吸收率、穿透率等有关。灯具的效率一般在 40%~90%之间。

## 2. 灯具的分类

灯具的分类方法较多,通常按灯具的配光特性,灯具的结构特点和安装特点进行分类。

(1)按光通量重新分配的分类 根据光通量在空间上,下半球的分布情况,灯具可分为直射型、半直射型、漫射型、半反射型、反射型等,如表 5-11 所示。

表 5-11 光通量在空间上、下半球分配比例

灯具类型		直射型	半直射型	漫射型	半反射型	反射型
光通量分配比例/%	上半部	0~10	10~40	40~60	60~90	90~100
	下半部	90~100	60~90	40~60	10~40	0~10
配光示意图						

直射型 灯具由反光性能良好的不透明材料制成,如搪瓷、铝抛光和镀银镜面等。光通量经过灯罩内壁的反射和折射,使 90% 以上的光通量集中向下直射,工作面可得到充分照度,光



线利用率高,适用于高大厂房的一般照明。

**半直射型** 光线主要向下射出,其余透过灯罩向四周射出,空间仍能得到适当照度,眩光比直射型小。

**漫射型** 灯具用漫射透光材料制成,光线柔和均匀,空间各光强基本一致,可达到无眩光,但光通量损失较多,适用于需要创造环境气氛的场所。

**半反射型** 灯具上半部用透明材料制成,下半部用漫射透光材料制成,光线主要反射到顶棚或墙上再反射下来,使光线比较柔和均匀。其向下光线只有一小部分,所以光线利用率较低,使用这种情况的情况不多。

**反射型** 灯具用不透明材料制成,光线全部反射,顶棚变成二次发光体,能最大限度减弱阴影和眩光,光线柔和均匀,但光线利用率低,故很少采用。

(2) 按配光曲线形状的分类

直射型灯具应用比较广泛,它又分为均照型、广照型、配照型、深照型等,其配光曲线见图 5-9,常用照明灯具见图 5-10。

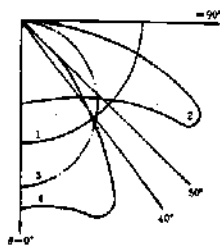


图 5-9 直射型灯具按配光曲线分类

- 1—均照型 2—广照型  
3—配照型 4—深照型

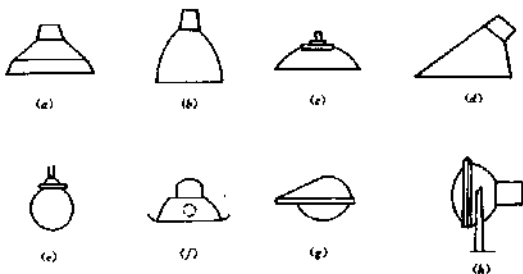


图 5-10 常用照明灯具简图

- (a)配照型;(b)深照型;(c)广照型;(d)斜照型;  
(e)均照型;(f)透光灯罩;(g)射灯;(h)投光灯

图 5-9 中曲线 1 为均照型,光强在各个角度基本相等,所以又称漫射型,均匀配光型,乳白色玻璃球灯等属于此类型,见图 5-10 中的 (e)。

曲线 2 为广照型,最大光强分布在  $50^{\circ}\sim 90^{\circ}$  的角度上,在  $0^{\circ}\sim 40^{\circ}$  角度范围内光强很小,可在较大的面积上形成均匀照度。灯具见图 5-10 中 (c)。

曲线 3 为配照型,光强最大值  $I_0$  出现在  $0^{\circ}$ ,光强  $I$  随角度  $\theta$  按余弦规律变化,即  $I = I_0 \cos \theta$ ,所以也叫余弦配光型,其中  $\theta$  角代表光线方向与垂直轴线之间的夹角,  $I_0$  代表  $\theta = 0^{\circ}$  方向的光强。带有珠帘质、搪瓷类反射器的灯具属于配照型,见图 5-10 中 (a)。

曲线4为深照型,最大光强集中在 $0\sim 30^\circ$ 的狭小立体角内,如镜面深照型灯具,见图5-10中(6)。

### (3)按灯具结构特点分类

开启式 光源与外界环境直接接触。

闭台式 灯罩将光源包合起来,但内外空气仍能自由流通。

封闭式 灯罩固定处加一般封闭,内外空气仍可有限流通。

密闭式 灯罩固定处加以严密封闭,内外空气不能流通,如防水防尘灯具。

防爆式 灯罩及固定处均能承受要求的压力,能安全使用在有爆炸危险性介质的场所。

### (4)按灯具在建筑物上的安装方式分类

吸顶式 将灯具直接安装在顶棚上,可使顶棚较明亮,构成全房间的明亮感,常采用乳白玻璃吸顶灯,适用于顶棚比较光洁而且比较低矮的房间作直射照明。

嵌入顶棚式 将灯具嵌入顶棚内安装,从侧面看不到灯具,适用于顶棚低,要求眩光少的房间。

悬挂式 用软线、链子、管子等将灯具从顶棚上吊下来的安装方式称悬挂式,多用于一般照明。

壁灯 用托架将灯具安装在墙壁上,主要作装饰用,也兼作辅助照明,由于安装低,容易成为眩光光源,所以一般使用小功率灯泡并装以漫射玻璃罩。

### 3. 灯具的选择

灯具的选择主要考虑环境条件和灯具的光强分布特性两个因素,同时也应考虑限制眩光,效率高,维护要方便等因素。

(1)按环境条件选择灯具 对于民用建筑,在正常环境中宜选用开启式灯具;在潮湿房间内,采用具有防水灯头的灯具;在特别潮湿的场所应选用防水防尘密闭式灯具;在有腐蚀性气体和有蒸汽的场所,有易燃易爆气体的场所,应选用耐腐蚀的密闭式灯具和防爆式灯具。

工厂常用灯具(照明器)技术参数及适用场所见表3-12。

总之,对于环境条件不同的场所,应选用有相应防护措施的灯具,以保护光源,使光源长期使用。

(2)按光强分布特性选择灯具 不同的灯具有不同的配光曲线,即光源在空间各个方向上的光强分布情况不同。按此要求选择灯具时,灯具型式和悬挂高度可按下列原则选用,配照型灯具适用于 $4\sim 6\text{m}$ 的高度;搪瓷深照型灯具适用于 $6\sim 20\text{m}$ 的高度;有铝抛光镜面反射器的深照型灯具适用于 $15\sim 30\text{m}$ 的高度。

一般生活和公共建筑物多采用半直射型、漫射型灯具或荧光灯具;室外照明一般采用广照型灯具;对于铁路、矿山、码头、广场、桥梁、运动场等大型室外照明场所,可采用投光灯。

## 三、灯具的布置

在照明设计时,必须考虑到灯具的合理布置,满足规定的照度并使照度均匀,耗电少、无眩光和阴影,维修方便,布置美观。

灯具的布置方式有均匀布置和选择布置两种,均匀布置是指灯具具有规律的按行、列等距分布,使室内照度均匀,这是应用最广泛的一种灯具布置方式。选择布置多用于局部照明及需要加强照度的场所,灯具一般按对称于工作面设置,这样可达到消除阴影的效果。

表 5-12 工厂常用照明器技术参数及适用场所

特征参数		光源及功率/W	效率 $\eta$ /%	保护角 $\gamma$	重量/kg	结构型式及适用场所
配照型	B-100(60W)	63	24°	2.0	开启式,工厂车间、一般性仓库,及公共场所等照明用。	
	G-125	72	—			
	B-200(150W同)	62.4	14°	2.2		
	G-250	74	17°	2.6		
广照型	D-200(150W同)	74	—	4.2	密闭式,适用于多水多尘的车间等操作场所的照明。	
	B-200(150W同)	64	—	4.4		
深照型	B-200(150W同)	63	32.7°	2.2	开启式,工厂车间和大型机床设备作固定照明。	
	G-125	54	16.7°	2.2		
斜照灯(搪瓷)	G-250	62.5	24°	5	开启式,适用于中、大型车间作为壁灯用。	
	G-400	67	20°	5		
荧光灯罩	(单管)Y-40	81	4.6°	4.9	开启式,用于车间办公室,饭厅商店食堂等处照明。	
	(双管)Y-40×2	97	12.5°	7.2		
均照型(圆球灯)	B-100	88		2.5	闭合式,用于办公室、俱乐部、阅览室、商店、走廊等处的照明	
	B-200	85				
	B-150	75				
路 灯	乳白玻璃型	G-250	84.3	15°	8	开启式,适用于工厂厂区要道及街道、马路等处的照明。
	乳白玻璃透明型		63		6.1	封闭式,适用于工厂厂区要道及街道马路等处的照明。
投光灯	G-125 G-250 G-400					封闭式,适用于街道广场、公园、工厂、车站、桥梁、运动场等室外照明。

灯具的布置要合理,主要应正确选择灯具的安装高度和灯具间的相互距离。灯具的安装高度和距离选择配合不当,就会造成照度不均匀。不难理解,在灯具安装高度一定的情况下,灯具间的相互距离越大,被照面上的照度越不均匀。反过来,当灯具间的距离一定时,灯具安装越低,被照面上的照度也越不均匀。因此,应合理选择灯具的安装高度和它们之间的相互距离。

### 1. 灯具的悬挂高度(H)

灯具的悬挂高度应合理,悬挂过高,在一定照度下需增加电光源的功率,不经济,维修也不

方便;灯具悬挂过低,会产生严重的眩光,也不安全。所以照明设计时,要选择合理的灯具安装高度。

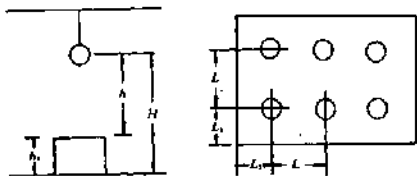


图 5-11 灯具均匀布置示意图

图 5-11 为灯具均匀布置示意图。 $H$  为灯具至地面的高度,也称灯具的悬挂高度。它以不发生眩光作用为限,表 5-13 给出了室内照明灯具最低悬挂高度值。 $h$  为灯具至工作面的高度,也称计算高度, $A$  为工作面距地面的高度, $L$  为均匀布置时灯具之间的距离, $L_1$  为灯具与墙壁之间的距离。

灯具的计算高度

$$h = H - A \quad (5-6)$$

式中  $A$  为被照工作面离地面的高度,应根据实际情况确定,一般可取  $A_0 = 0.8\text{m}$ 。

表 5-13 室内一般照明灯具距地面的最低悬挂高度

光源种类	灯具型式	灯泡容量/W	最低离地悬挂高度/m
白炽灯	带反射罩	100 及以下	2.5
		150~200	3.0
		300~500	3.5
		500 以上	4.0
白炽灯	乳白玻璃漫射罩	100 及以下	2.0
		150~200	2.5
		300~500	3.0
荧光灯	无罩	40 及以下	2.0
高压汞灯	带反射罩	250 及以下	5.5
		400 及以上	6.0
高压钠灯	带反射罩	250	6.0
		400	7.0
卤钨灯	带反射罩	500	6.0
		1000~2000	7.0
金属卤素灯	带反射罩	400	6.0
		1000 及以下	14.0 以上

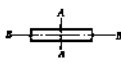
注:1000W 的金属卤素灯有紫外辐射防护措施时,悬挂高度可适当降低。

## 2. 灯具的距离比

灯具均匀布置时,灯具之间的距离 $L$ 与其计算高度 $h$ 之比( $L:h$ )称为灯具的距离比。为使工作面上的照度均匀,灯具的距离比应有合理的数值。

采用各类不同型式的灯具后,可从有关灯具手册中查出其距离比。表 5-14 为各种灯具距离比的推荐值,表中前面第一个数字为最适宜值,后面第二个数字为允许值。

表 5-14 各种灯具较合适的  $L/h$  值

照明光源类型	$L/h$		单行布置时房间的最大高度/m
	多行布置	单行布置	
配照型,广照型工厂灯	1.8~2.5	1.8~2.0	1.2
深照型	1.6~1.8	1.5~1.8	1.0
防爆灯、吸顶灯、防水防尘灯	2.9~3.2	1.9~2.5	1.2
荧光灯(40W) 	A-A 方向	B-B 方向	注:光通量为 2400lm
	1.62	1.22	

灯具位置的确定方法是:由(5-6)式预先计算出灯具的计算高度 $h$ ,按选定的灯具型号,查出这种灯具合适的距离比( $L/h$ )值,从而确定灯具之间的距离

$$L = (L/h) \cdot h \quad (5-7)$$

边缘灯具与墙壁之间的距离 $L_1$ 可按下式计算:

$$\left. \begin{aligned} \text{当靠墙有工作面时 } L_1 &= (0.25 \sim 0.3)L \\ \text{当靠墙无工作面时 } L_1 &= (0.4 \sim 0.5)L \end{aligned} \right\} \quad (5-8)$$

均匀布置多为有规则的几何形状,如正方形、长方形、菱形、直线形等,如图 5-12 所示。这时距离比中的 $L$ 与其关系为:

对于正方形布置  $L = L_1 = L_2$

对于长方形布置  $L = \sqrt{L_1 L_2}$ , 即长方形面积的平方根

对于菱形布置  $L = \sqrt{\frac{L_1 L_2}{2}}$ , 即菱形面积的平方根

正方形布置可提高照度的均匀度并降低电光源的功率,比长方形布置更有利。长方形布置以 $L_2 < 1.5L_1$ 为宜,菱形布置以三个灯具构成等边三角形为宜,此时 $L_2 = \sqrt{3}L_1$ ,一般以 $1.5L_1 < L_2 < 2L_1$ 为宜。

由于荧光灯的形状在纵向和横向是不对称的,它的距离比在纵向(A-A)和横向(B-B)有不同值,所以应在两个方向上分别计算。

灯具均匀布置的最终目的是,既要保证工作面有均匀且符合标准的照度,又要使电光源的总功率最小。

### 3. 灯具的选择布置

对于面积范围较大,而只须对某些部分要求有较强的光通量时,若全部采用均匀布置会造成灯具和电功率的浪费。这时可采用选择布置方式,这样既经济,在需要的工作面上又可得到较好的照明质量。

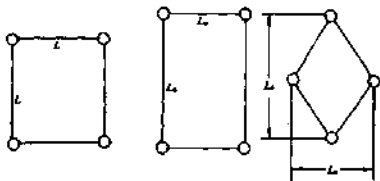


图 5-12 点光源灯具均匀布置的几种形式

## 5-3 照度计算

当光源类型、灯具型式、布置方式等基本确定后,需对各工作面的照度进行计算,检验其是否满足该场所的照度标准。或者根据所需要的照度值和其它一些已知条件,如灯具的布置、房间各个面的反射条件及房间灰尘污染情况等,进行相应照度计算来确定灯具光源的容量或数量。

照度计算方法都只能做到基本准确,计算结果与标准照度相差 $\pm 20\% \sim 10\%$ 都是允许的。照度计算方法有好几种,这里仅介绍利用系数法和单位容量法。利用系数法是计算工作面上的平均照度,它适用于一般均匀布置的照度计算。单位容量法是一种简化办法,主要用于根据照度标准计算电光源的容量。

### 一、利用系数法

利用系数法适用于均匀布置灯具的一般照明,可进行平均照度计算,从而确定照明灯具的数量以及电光源的功率,下面介绍利用查表和公式计算的综合方法。

#### 1. 利用系数 $K_t$ :

所谓利用系数,是指投射到工作面的光通量与室内各光源发出的总光通量之比,用  $K_t$  表示

$$K_t = \frac{\Phi}{N\phi} \quad (5-9)$$

式中  $\Phi$ ——投射到工作面上的光通量,流明(lm);

$N$ ——光源的数量;

$\phi$ ——每个光源发出的光通量,流明(lm)。

常用光源光通量推荐值见表 5-15。

表 5-15 常用光源光通量推荐值

光源类型 \ 光通量 / lm	光源额定功率 / W		30		40		60		100		125		150		200		250		300		400		500		1000		2000		
	白炽灯	—	—	—	350	580	1140	—	—	1880	2700	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
卤钨灯	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
荧光灯	—	—	1550	2400	—	—	5500	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
荧光高压汞灯	—	—	—	—	—	—	—	—	4750	—	—	—	—	—	10500	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—

利用系数是表示照明光源的光通量被利用程度的参数,它小于1。一般它的数值由灯具制造商提供,或从有关手册中查取。表 5-16 是部分灯具的利用系数表。

表 5-16 部分灯具的利用系数表

$P_n/\%$	70				50				30				0	
	70	50	30	10	70	50	30	10	70	50	30	10	0	0
$K_{uc}$	筒式荧光灯 YG2-1, $\eta=88\%$ , $1 \times 40W$ , 2400lm													
1	0.93	0.89	0.86	0.83	0.89	0.85	0.83	0.80	0.85	0.82	0.80	0.78	0.73	
2	0.85	0.79	0.73	0.69	0.81	0.75	0.71	0.67	0.77	0.73	0.69	0.65	0.62	
3	0.78	0.70	0.63	0.59	0.74	0.67	0.61	0.57	0.70	0.65	0.60	0.56	0.53	
4	0.71	0.61	0.54	0.49	0.67	0.59	0.53	0.48	0.64	0.57	0.52	0.47	0.45	
5	0.65	0.55	0.47	0.42	0.62	0.53	0.46	0.41	0.59	0.51	0.45	0.41	0.39	
6	0.60	0.49	0.42	0.36	0.57	0.48	0.41	0.36	0.54	0.46	0.40	0.36	0.34	
7	0.55	0.44	0.37	0.32	0.52	0.43	0.36	0.31	0.50	0.42	0.36	0.31	0.29	
8	0.51	0.40	0.33	0.27	0.48	0.39	0.32	0.27	0.46	0.37	0.32	0.27	0.25	
9	0.47	0.36	0.29	0.24	0.45	0.35	0.29	0.24	0.43	0.34	0.28	0.24	0.22	
10	0.43	0.32	0.25	0.20	0.41	0.31	0.24	0.20	0.39	0.30	0.24	0.20	0.18	
$K_{uc}$	吸顶式荧光灯 YG6-2, $\eta=86\%$ , $2 \times 40W$ , $2 \times 2400lm$													
1	0.82	0.78	0.74	0.70	0.73	0.70	0.67	0.64	0.65	0.68	0.60	0.58	0.49	
2	0.74	0.67	0.62	0.57	0.66	0.61	0.56	0.52	0.59	0.54	0.51	0.48	0.40	
3	0.68	0.59	0.53	0.47	0.60	0.53	0.48	0.44	0.53	0.48	0.44	0.40	0.34	
4	0.62	0.52	0.45	0.40	0.55	0.47	0.41	0.37	0.49	0.43	0.38	0.34	0.28	
5	0.56	0.46	0.39	0.34	0.50	0.42	0.36	0.31	0.45	0.38	0.33	0.29	0.24	
6	0.52	0.42	0.35	0.29	0.46	0.38	0.32	0.27	0.41	0.34	0.29	0.25	0.21	
7	0.48	0.37	0.30	0.25	0.43	0.34	0.28	0.24	0.38	0.31	0.26	0.22	0.18	
8	0.44	0.34	0.27	0.22	0.40	0.31	0.25	0.21	0.35	0.28	0.23	0.19	0.16	
9	0.41	0.31	0.24	0.19	0.37	0.28	0.22	0.18	0.33	0.26	0.21	0.17	0.14	
10	0.38	0.27	0.21	0.16	0.34	0.25	0.19	0.15	0.30	0.22	0.18	0.14	0.11	

查表 5-16 必须知道三个系数:室空间系数  $K_{sc}$ 、顶棚反射系数  $P_t$ 、墙面反射系数  $P_w$ , 下面分别予以介绍。

室空间系数  $K_{sc}$ : 投射到工作面的光通量由直射光和反射光两部分构成, 直射光是主要部分, 所以影响利用系数的主要因素是灯具的直射光通量。室内空间高度对直射光影响很大, 矮而宽的房间大部分直射光都落在工作面上, 利用系数自然就高, 高而窄的房间直射光落在工作面上的部分较少, 利用系数也就小, 这些因素可用室空系数  $K_{sc}$  来体现。

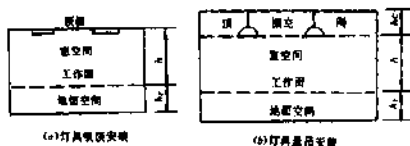


图 5-13 室内空间示意图

一个房间接受照明情况可分为三个空间, 如图 5-13 所示。最上面为顶棚空间, 中间为室空间, 最下面为地面空间, 各空间的相对尺寸对直射光和反射光的影响用三个室形系数表示, 即顶棚空间系数、室空间系数、地面空间系数, 对于装设吸顶式或嵌入式灯具的房间, 则无顶棚空间; 对于工作面为地面的房间, 则无地面空间。三个空间系数中最常用的是室空间系数  $K_{sc}$ 。

$$K_{sc} = \frac{5h(a+b)}{ab} \quad (5-10)$$

式中  $a$ ——房间的长度, 米;  
 $b$ ——房间的宽度, 米;  
 $h$ ——房间里空间高度, 即计算高度, 米。

顶棚反射系数  $P_t$  和墙面反射系数  $P_w$ : 顶棚反射系数反映了顶棚表面和顶棚空间周围墙壁多次反射的综合效果。墙面由墙壁和玻璃窗两部分组成, 它们的反射系数不同, 也综合用墙面反射系数予以考虑。这些反射系数与所使用的建筑材料性质、颜色等有关, 顶棚和墙壁的反射系数用百分数表示, 其参考值见表 5-17。

表 5-17 墙壁和顶棚反射系数参考值

反 射 面 情 况	反射系数 (%)
刷白的墙壁、顶棚, 窗子装有白色窗帘	70
刷白的墙壁, 但窗子未装窗帘, 或装深色窗帘, 刷白的顶棚, 但房间潮湿, 显得刷白, 但不净光亮的墙壁、顶棚	50
有窗子的水泥墙壁, 水泥顶棚, 或木墙壁, 木质顶, 糊有淡色纸的墙壁、顶棚	30
有大量深色灰尘的墙壁和顶棚, 无窗帘遮盖的玻璃窗, 未粉刷的砖墙; 糊有深色纸的墙壁、顶棚	10

地面对光通量的反射作用用地面反射系数予以考虑, 它反映了地面和地面空间周围墙壁



多次反射的综合效果。但它对利用系数  $K_u$  的影响较小,在编制利用系数表时,一般按 20%予以考虑,所以查表时不再出现地面反射系数,而只考虑顶棚、墙面的反射系数对利用系数的修正。

综上所述,查利用系数必须根据房间的具体尺寸,由公式(5-10)计算出房间的室空间系数  $K_{sc}$ ,再根据房间顶棚、墙壁的实际情况由表 5-17 查出顶棚反射系数  $P_r$  和墙壁反射系数  $P_w$ ,这样,用这三个系数  $K_{sc}$ 、 $P_r$ 、 $P_w$  就可从表 5-16 中查出不同类型灯具的利用系数  $K_u$ 。由于篇幅限制,表 5-16 中仅列出了荧光灯的利用系数,其它灯具可从有关资料中查出。

### 2. 平均照度的计算

当已知房间的面积、灯具的计算高度、灯具类型及光源的光通量时,可按下式计算室内的平均照度

$$E_{av} = \frac{K_u N \Phi}{K_a \cdot S} \quad \text{lm} \quad (5-11)$$

式中  $K_u$ ——利用系数,可从有关表格中查出数值;

$S$ ——房间的面积或被照水平工作面的面积;

$K_a$ ——照度补偿系数,可从表 5-18 中查出。

照度补偿系数  $K_a$  是用来考虑光源本身光效的衰减,以及墙壁、天棚等行损后反射率降低而引入的系数,它又叫减光补偿系数。根据灯具的类型和房间环境情况,可从表 5-18 中查出照度补偿系数  $K_a$ 。

表 5-18 照度补偿系数

环境类别	照度补偿系数 $K_a$				灯具擦拭次数
	白炽灯	荧光灯	荧光高压汞灯	卤钨灯	
清洁		1.3		1.2	每月一次
一般		1.4		1.3	每月一次
污染严重		1.5		1.4	每月二次
室外		1.4		1.3	每月一次

### 3. 最小照度的计算

一般手册上的照度标准大多为最低照定值,所以应将平均照度  $E_{av}$  换算成最低照度值  $E_{min}$ ,两者之间的关系用最小照度系数  $Z$  表示,  $Z = E_{av} / E_{min}$ ,由  $Z$  和  $E_{av}$  即可求出最低照度:

$$E_{min} = \frac{E_{av}}{Z} = \frac{K_u N \Phi}{K_a Z S} \quad (5-12)$$

式中  $E_{min}$ ——标准照度最低值或工作面上的最低照度值,勒克司(lx);

$Z$ ——最小照度系数,可查表 5-19。

表 5-19 部分灯具的最小照度系数 Z 值表

灯具名称	灯具型号	光源种类 及容量 /W	距高比 L/A				(L/A)/Z 的最大允许值	
			0.6	0.8	1.0	1.2		
			Z 值					
配照型灯具	GC1-A B-1	B150	1.30	1.32	1.33		1.25/1.33	
		G125		1.34	1.33	1.32		1.41/1.29
广照型灯具	GC3-A B-2	G125	1.28	1.30				0.96/1.32
		B200,150	1.30	1.33				1.02/1.33
深照型灯具	GC5-A B-3	B300		1.34	1.33	1.30		1.40/1.29
		G250		1.35	1.34	1.32		1.45/1.32
	GC5-A B-4	B300,500		1.33	1.34	1.32		1.40/1.31
		G400	1.29	1.34	1.35			1.23/1.32
筒式荧光灯具	YG1-1	1×40	1.34	1.34	1.31			1.22/1.29
	YG2-1			1.35	1.33	1.28		1.28/1.28
	YG2-2	2×40		1.35	1.33	1.29		1.28/1.29
吸顶荧光灯具	YG6-2	2×40	1.34	1.36	1.33			1.22/1.29
	YG6-3	3×40		1.35	1.32	1.30		1.26/1.30
嵌入式荧光灯具	YG15-2	2×40	1.34	1.34	1.31	1.30		
	YG15-3	3×40	1.37	1.33				1.05/1.30
房间较暗 反射条件较好		灯指数 ≤ 3					1.15~1.2	
		灯指数 > 3					1.10	

注：上表中 L 为灯具的间距，A 为灯具至工作面的高度。

根据房间的具体尺寸和情况，从表 5-16 中可查出利用系数  $K_u$ ，根据所选灯具类型、距高比等，可从表 5-19 中查出最小照度系数 Z，这样就可计算出房间内光源的总光通量  $\Sigma\phi$  和每只灯具光源的光通量  $\phi$ ：

$$\Sigma\phi = N\phi = \frac{E_{\min}K_uZS}{K_t} \quad (5-13)$$

$$\phi = \frac{E_{\min}K_uZS}{NK_t} \quad (5-14)$$

若已知每只灯具光源的光通量  $\phi$ ，则可求得房间内的灯具数

$$N = \frac{\Sigma\phi}{\phi} \quad (5-15)$$

式中  $\phi$ ——每只灯具内光源的光通量，流明。(lm)；

$\Sigma\phi$ ——房间内所有灯具光源的总光通量，流明。(lm)。

#### 4. 选择计算步骤

由以上介绍的公式和表格,即可对房间内的照度进行计算,并检验其是否合理。或者根据照度标准的规定,计算房间内灯具的数目和电光源的功率,对灯具进行选择 and 布置,其步骤如下:

根据房间的实际尺寸计算室空间系数  $K_{sc}$ ;查墙壁和顶棚反射系数  $P_w$  和  $P_t$ ,确定光通量利用系数  $K_u$ ;根据灯具布置情况和类型确定最小照度系数  $Z$ ,并计算最低照度  $E_{min}$ ;确定照度补偿系数  $K_c$ ,计算房间总光通量  $\Sigma\phi$  和灯具数  $N$ 。

**例 5-3** 某实验室面积为  $12 \times 5 \text{m}^2$ ,桌面高  $0.8 \text{m}$ ,灯具吸顶安装高  $3.8 \text{m}$ 。拟采用 YG6-2 型双管  $2 \times 40 \text{W}$  吸顶式荧光灯照明,灯具效率为  $86\%$ ,查其墙面反射系数  $P_w$  为  $0.5$ ,顶棚反射系数  $P_t$  为  $0.7$ ,试用光通利用系数法计算桌面最低照度,并确定房间内的灯具数。

**解** 灯具的计算高度  $h = 3.8 - 0.8 = 3 \text{m}$

面积  $S = 12 \times 5 = 60 \text{m}^2$

查表 5-2,实验室平均照度推荐值为  $75 \sim 150 \text{lx}$ ,取平均照度  $E_{av} = 150 \text{lx}$ 。

(1) 计算室空间系数  $K_{sc}$

$$K_{sc} = \frac{5h(a+b)}{ab} = \frac{5 \times 3 \times (12+5)}{12 \times 5} \approx 4$$

(2) 确定光通利用系数  $K_u$

墙壁反射系数  $P_w = 0.5 = 50\%$ ,顶棚反射系数  $P_t = 0.7 = 70\%$ ,室空间系数  $K_{sc} \approx 4$ ,查表 5-16 中 YG6-2,  $\eta = 86\%$  的荧光灯的利用系数  $K_u = 0.52$

(3) 计算桌面最低照度  $E_{min}$

取距高比  $L/H = 1.0$ ,查表 5-19, YG6-2 吸顶式荧光灯具的最小照度系数  $Z = 1.33$ ,则最低照度

$$E_{min} = \frac{E_{av}}{Z} = \frac{150}{1.33} = 113 \text{lx}$$

(4) 确定灯具数  $N$

实验室环境较清洁,从表 5-18 中查出荧光灯的照度补偿系数  $K_c = 1.3$ ,则房间内总光通量

$$\Sigma\phi = \frac{E_{av}SK_c}{K_u} = \frac{150 \times 60 \times 1.3}{0.52} = 22500 \text{lm}$$

由表 5-16 知每套 YG6-2 荧光灯的光通量

$$\phi = 2 \times 2400 = 4800 \text{lm}$$

故房间内的灯具数为  $N = \frac{\Sigma\phi}{\phi} = \frac{22500}{4800} \approx 4.7$  套

可按 4 套或 5 套布置,如按 5 套布置时其照度验算为

$$E'_{av} = \frac{NK_u}{K_c S} = \frac{5 \times 4800 \times 0.52}{1.3 \times 60} = 160 \text{lx}$$

稍大于平均照度推荐值  $150$  勒克司,可以满足使用要求。

## 二、单位容量法

单位容量法是一种简单而常用的计算方法,它适用于初步设计时照明的近似计算,它根据房间的被照面积和推荐的单位面积安装功率,就可确定房间所需要的总功率。

单位面积安装照明容量可由有关手册查出,表 5-20、表 5-21、表 5-22 分别给出了配照型白炽灯、荧光灯、圆球型灯的单位面积安装功率。

表 5-20 配照型工厂灯单位面积安装功率/W·m<sup>-2</sup>

灯 型	计算高度 /m	房间面积 /m <sup>2</sup>	白 炽 灯 照 度/lx					
			5	10	15	20	30	40
配 照 型 工 厂 灯	2~3	10~15	3.3	6.2	8.4	10.5	14.3	17.9
		15~25	2.7	5.0	6.8	8.6	11.4	14.3
		25~50	2.3	4.3	5.7	7.3	9.5	11.9
		50~150	2.0	3.6	5.3	6.7	8.6	10
		150~300	1.8	3.4	4.7	6.0	7.8	9.5
		300以上	1.7	3.2	4.5	5.8	7.3	9.0
	3~4	10~15	4.3	7.3	9.6	12.1	16.2	20
		15~20	3.7	6.4	8.5	10.5	13.8	17.6
		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	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
4~6	300以上	1.7	2.9	4.0	5.0	6.8	8.6	
	10~17	5.2	8.6	11.4	14.3	20	25.6	
	17~25	4.1	6.8	9.0	11.4	15.7	20.7	
	25~35	3.4	5.6	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	
6~8	80~150	2.0	3.3	4.5	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	
	25~35	4.2	6.9	9.1	11.7	16.6	21.7	
	35~50	3.4	5.7	7.9	10.0	14.7	18.4	
	50~65	2.9	4.9	6.8	8.7	12.4	15.7	
500以上	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	

表 5-21 荧光灯均匀照明近似单位容量值/W·m<sup>-2</sup>

计算高度 h /m	E/lx	30W、40W 格栅						30W、40W 不带罩					
		30	50	75	100	150	200	30	50	75	100	150	200
2~3	10~15	2.5	4.2	6.2	8.3	12.3	16.7	2.8	4.7	7.1	9.6	14.3	19.0
	15~25	2.1	3.6	5.4	7.2	10.9	14.6	2.5	4.2	6.3	8.3	12.5	16.7
	25~50	1.8	3.1	4.8	6.4	9.5	12.7	2.1	3.5	5.4	7.2	10.9	14.5
	50~150	1.7	2.8	4.3	5.7	8.6	11.5	1.9	3.1	4.7	6.3	9.5	12.7
	150~300	1.6	2.6	3.9	5.2	7.8	10.4	1.7	2.9	4.3	5.7	8.6	11.5
	>300	1.5	2.4	3.2	4.9	7.3	9.7	1.6	2.8	4.2	5.6	8.4	11.2
3~4	10~15	3.7	6.2	9.3	12.3	18.5	24.7	4.3	7.1	10.6	14.2	21.2	28.2
	15~20	3.0	5.0	7.5	10.0	15.0	20.0	3.4	5.7	8.6	11.5	17.1	22.9
	20~30	2.5	4.2	6.2	8.3	12.3	16.7	2.8	4.7	7.1	9.6	14.3	19.0
	30~50	2.1	3.6	5.4	7.2	10.9	14.6	2.5	4.2	6.3	8.3	12.5	16.7
	50~120	1.8	3.1	4.8	6.4	9.5	12.7	2.1	3.5	5.4	7.2	10.9	14.5
	120~300	1.7	2.8	4.3	5.7	8.6	11.5	1.9	3.1	4.7	6.3	9.5	12.7
>300	1.6	2.7	3.9	5.3	7.8	10.5	1.7	2.9	4.3	5.7	8.6	11.5	
4~6	10~17	6.5	9.2	13.4	18.3	27.5	36.6	6.3	10.5	15.7	20.9	31.4	41.9
	17~25	4.0	6.7	9.9	13.3	19.9	26.5	4.6	7.6	11.4	15.2	22.9	30.4
	25~35	3.3	5.5	8.2	11.0	16.5	22.0	3.8	6.4	9.5	12.7	19.0	25.4
	35~50	2.6	4.5	6.6	8.8	13.3	17.7	3.1	5.1	7.6	10.0	15.2	20.2
	50~80	2.3	3.9	5.7	7.7	11.5	15.5	2.6	4.4	6.6	8.8	13.3	17.7
	80~150	2.0	3.4	5.1	6.9	10.1	13.5	2.3	3.9	5.7	7.7	11.5	15.5
	150~400	1.8	3.0	4.4	6.0	9.0	11.9	2.0	3.4	5.1	6.9	10.1	13.5
	>400	1.6	2.7	4.0	5.4	8.1	10.8	1.8	3.0	4.5	6.0	9.0	12.0

表 5-22 圆球型灯单位面积安装功率/W·m<sup>-2</sup>

灯型	计算高度/m	房间面积/m <sup>2</sup>	白炽灯照度/lx					
			5	10	15	20	30	40
圆	2~3	10~15	4.9	8.8	11.6	15.2	20.9	27
		15~25	4.1	7.5	10.1	12.9	17.7	23.1
		25~50	3.6	6.4	8.8	10.7	14.8	19.3
		50~150	2.9	5.1	7.0	8.8	11.8	15.7
		150~300	2.4	4.3	5.7	6.9	9.9	12.9
		300以上	2.2	3.9	5.2	6.2	8.9	11.5
球	3~4	10~15	6.2	10.4	13.8	17.1	24.7	30.9
		15~20	5.1	8.7	11.2	14.3	21.4	26.9
		20~30	4.3	7.3	9.9	12.5	18.4	23.5
		30~50	3.7	6.2	8.8	10.7	15.2	19.3
		50~120	3.0	5.3	7.3	9.0	12.4	16.2
		120~300	2.3	4.1	5.7	7.3	9.7	12.8
灯	4~6	10~17	7.8	12.4	17.1	21.9	30.4	40
		17~25	6.0	9.7	13.3	17.1	24.7	31.8
		25~35	4.9	8.3	11	14.5	20.4	26.4
		35~50	4.0	7.0	9.4	12.3	16.9	22.2
		50~80	3.3	5.8	8.2	10.6	14	18.4
		80~150	2.9	4.9	7.0	8.8	11.9	15.9
		150~400	2.3	4.0	5.7	7.1	9.9	12.9

单位面积安装容量与灯具型式、计算高度、房间面积等因素有关。所以应根据建筑物的使用特点、照度要求、建筑物的高度和面积，选定的计算高度等，从表中查出其单位面积所需安装的功率，从而可确定房间内照明灯具的总功率

$$\Sigma P = \omega S \quad (5-16)$$

式中  $\Sigma P$ ——房间内全部照明安装容量，不包括镇流器的功率损耗，瓦(W)；

$\omega$ ——在某最低照度值时单位面积的照明安装功率，瓦/米<sup>2</sup>(W/m<sup>2</sup>)；

$S$ ——房间的总面积，米<sup>2</sup>(m<sup>2</sup>)。

从而可求出在某最低照度下每套灯具的功率

$$P = \frac{\Sigma P}{N} \quad (5-17)$$

式中  $P$ ——每套灯具的容量，不包括镇流器的功率损耗，瓦(W)；

$N$ ——在规定照度下所需灯具数，套。

若房间的照度标准为推荐的平均照度值  $E_n$  时,则应考虑最小照度系数  $Z$  将其转换成最低照度  $E_{\min}$ 。这时  $\Sigma P$  由下式确定

$$\Sigma P = \frac{\omega}{Z} S \quad (5-18)$$

即仍可按平均照度值查表中  $\omega$  值,然后按(5-18)式计算  $\Sigma P$  的值;或将平均照度换成最低照度

$$E_{\min} = \frac{E_n}{Z}$$

然后按最低照度查表中  $\omega$  值,最后用(5-16)式计算  $\Sigma P$ 。

在进行灯具的平面布置、确定灯具的安装高度以及灯具的功率时,有时候需要经过反复计算后才能确定。

**例 5-4** 用单位容量法计算例 5-3 中的灯具数。

**解** 从例 5-3 可知,面积  $S=60\text{m}^2$ ,计算高度  $h=3\text{m}$ ,查表 5-2,已知实验室平均照度为  $E_n=150\text{lx}$ ,按平均照度值查表 5-21,得荧光灯单位面积安装容量值  $\omega=8.6\text{W}/\text{m}^2$ ,此时总安装容量按(5-18)式计算,式中最小照度系数  $Z$  为 1.33,则

$$\Sigma P = \frac{\omega}{Z} S = \frac{8.6}{1.33} \times 60 = 388\text{W}$$

YG6-2 荧光灯每套功率  $P=2 \times 40=80\text{W}$

$$\text{则 } N = \frac{\Sigma P}{P} = \frac{388}{80} = 4.8 \text{ 套}$$

也可把平均照度转换成最低照度

$$E_{\min} = \frac{E_n}{Z} = \frac{150}{1.33} = 113\text{lx}$$

在表 5-21 中用最低照度  $E_{\min}=113$  勒克司查  $\omega$  值时,可采用插值法查取,即

$$\omega = 5.7 + \frac{8.6 - 5.7}{150 - 100} \times 13 = 6.454\text{W}/\text{m}^2$$

表 5-2 中 100lx 时为  $5.7\text{W}/\text{m}^2$ ,另外 13lx 在 100~150lx 内按比例计算,

这样,总安装容量应按(5-16)式计算

$$\Sigma P = \omega S = 6.454 \times 60 = 387\text{W}$$

两种方法计算结果基本相等。

以上介绍了利用系数法和单位容量法。当需要进行照度计算和验算时,宜采用利用系数法;当只需要确定灯具数和电功率时,宜采用单位容量法。

## 5-4 照明供电与照明设计

当照明灯具的型式、功率、数量、布置方式等确定,经照度计算满足照明标准时,则应进行照明供电的设计,它包括供电电压的选择、照明方式的确定、照明负荷计算及导线截面选择等工作,本节将介绍这些有关问题及照明设计的一般过程。

### 一、照明供电和设计的一般要求

#### 1. 电压要求

照明线路的供电一般为单相交流 220V 的两线制,若负载电流超过 30A 时应考虑采用 380/220V 的三相四线制;在有触电危险的场所采用局部照明和手提式照明时,应采用交流 36 伏的安全电压,在触电危险性较大、工作面很窄的地方,或工作环境特别潮湿的地方,此时的局部照明应采用 24V 或 12V 电压,并且由 380(220)/36~12V 的干式变压器降压,不允许用自耦变压器降压。

照明灯具两端的电压偏移不得高于额定电压的 5%,电压损失值也不允许过大,对视觉较高的室内照明,灯具两端的电压不得低于额定电压的 2.5%,一般工作场所的室内外照明不得低于额定电压 5%,极少数远离变电所的地方允许低于额定电压的 10%;事故照明、道路照明及 12~36V 照明,允许电压降低 10%、否则,应采取例如稳压等一些措施。

## 2. 其它要求

照明和电力负荷一般可共用变压器供电,但电力冲击负荷不宜过大,当电压偏移或波动过大不能保证照明质量或光源寿命时,可考虑采用调压器或专用变压器供电,事故照明应有独立的供电电源,并与工作照明电源分开;事故照明平时也可接在工作电源上,但发生事故时应能立即自动接入备用的事故照明电源。配电箱和其它配电设备的质量直接关系到照明电路正常运行,因此应采用制造厂的定型产品。

## 二、照明配电线路

建筑物内部照明配电系统应根据负荷容量、用户位置、要求等条件来确定,一般采用 380/220V 三相四线制线路供电,图 5-14 是照明配电线路简例。

### 1. 进户线

由室外架空线至建筑物外墙支架的这段线路称为引下线或接户线,从外墙支架到总照明配电箱的这段线路称为进户线。

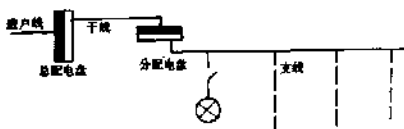


图 5-14 照明配电线路简例

低压接户线的档距不宜大于 25m,档距超过 25m 时,要增加接户杆,接户杆的档距不应超过 40m,低压进户线在进线处的对地距离不应小于 2.7m。

进户点是建筑物照明供电的引入点,选择进户位置时,应综合考虑建筑物的美观,供电安全及工程造价等问题。一般应尽量从建筑物的背面或侧面进线,并尽量靠近架空线电杆,对于多层建筑物,一般由二层进线。

### 2. 配电箱

配电箱是接受和分配电能的装置,根据建筑物电能用户容量的大小,可安装总配电箱和分配电箱,在配电箱里,一般应装有开关、熔断器、电度表等电气设备。

三相电源的零线不经过开关,直接接在零线板上,各单相电路所需零线都可从零线接线板上引出。



照明配电箱一般距地面 1.5m 安装,这样便于检修维护。

### 3. 干线

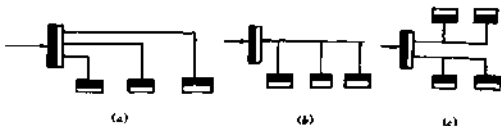


图 5-15 下线布置的二种方式

从总配电箱到各分配电箱的线路称为干线。照明供电的干线,一般有以下三种方式:

**放射式** 如图 5-15(a),适用于一个电源对小区建筑群供电。

**树干式** 也称链式,如图 5-15(b),适用于狭长区域的建筑群供电。

**混和式** 如图 5-15(c),适用于大中型建筑群或上述两种建筑群的综合供电。

### 4. 支线

从分配电箱引出的线路称为支线,建筑物内将有若干条支线,各支线的负荷应尽可能均匀分配在三根相线上。

对单相支线,一般不宜超过 15A,灯和插座数量不宜超过 20 个,最多不应超过 25 个,否则线路出故障的机会将增多,检修也较困难。

## 三、照明负荷计算

照明负荷计算主要是照明负荷电流计算,由于负荷电流在不断变化,所以计算结果应是线路持续工作可能出现的最大负荷电流,我们称它为计算电流,用  $I_c$  表示。计算电流是我们选择导线截面、熔断器、开关设备的重要依据。

### 1. 单相二线支线负荷电流的计算

住宅照明一般都是单相二线支线供电,每户的照明负荷可按用电设备的实际情况计算,也可按设计标准的统计结果计算。

根据规定的设计标准,对于无炊事用电和电热器等大容量用电的一般住宅,目前每户的用电负荷可取为 1kW;对于用电作炊事的住宅,每户用电负荷,包括炊事用电和照明用电之和可取 3kW;对于生活水平较高的高级住宅,每户用电负荷可在一般住宅用电负荷的基础上各增加 0.5kW,即无电炊的每户为 1.5kW,有电炊的 3.5kW;对于装有电热淋浴器或窗式空调的住宅,则须另加 3kW。这样以户为基准,可统计出每幢住宅的照明负荷。

另外,也可按每户实际负荷统计,并假定支线内所有电光源和其它单相负载都同时工作,如果支线内电光源的功率因数不相同,则应分别计算各类电光源的有功和无功电流,然后汇总求线路的总电流。镇流器的功率损耗应考虑在内,对于容量为 5A 的民用建筑插座,每个可按 100W 及功率因数 0.8 计算其负荷电流(住宅建筑中的插座每个可按 50W 计算)。

若支线内有  $n$  个电光源,其容量和功率因数分别表示为:  $P_1, \cos\phi_1, P_2, \cos\phi_2, \dots, P_n, \cos\phi_n$ , 则该支线总的有功功率为

$$\sum P = P_1 + P_2 + \dots + P_n \quad (5-19)$$

该支线总的无功功率为

$$\sum Q = P_1 \operatorname{tg} \phi_1 + P_2 \operatorname{tg} \phi_2 + \cdots + P_n \operatorname{tg} \phi_n \quad (5-20)$$

该支线总的有功电流和无功电流为

$$\sum I_r = \frac{\sum P}{U_r} \quad (5-21)$$

$$\sum I_n = \frac{\sum Q}{U_r} \quad (5-22)$$

式中  $U_r$  —— 支线额定相电压。

这样,可得该支线的计算电流为

$$I_r = \sqrt{(\sum I_r)^2 + (\sum I_n)^2} \quad (5-23)$$

该支线的功率因数为

$$\cos \phi = \frac{\sum I_r}{I_r} \quad (5-24)$$

## 2. 二相三线支线负荷电流计算

当建筑物的负荷不大时,常采用二根相线和一根零线,即两相供电,这可实现对有气体放电光源采用分相供电。二相三线支线负荷电流计算方法与单相电路相同,但两相应分别计算,求出两相的线电流,再求零线中的电流。

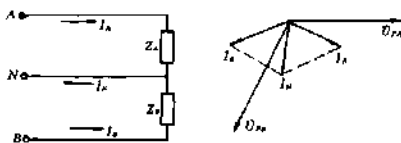


图 5-16 二相三线制配电线路及相量图

如负载  $Z_A$  和  $Z_B$  接在 A、B 两相,如图 5-16 所示,以 A 相相电压  $U_{PA}$  为参考正弦面出其相量图,负载基本为感性负载,所以相电流均滞后相电压一个角度,则零线电流为两相线电流的相量和

$$\dot{I}_N = -\dot{I}_A + \dot{I}_B$$

从相量图可知,当两相负载对称时,零线上的电流与两相的线电流在数值上相等。

## 3. 三相四线制干线负荷电流的计算

计算出各支线各相的计算电流以后,再将各相计算电流相加,由于干线所带负荷较多,但它们不可能同时工作,故须乘一个小于 1 的系数,这就是需用系数,照明负荷需用系数可从表 5-23 中查出。然后在三相电流中选取负荷最大的一相电流作为干线各相线电流。

当三相负荷不平衡时,线路总的功率因数可按下式计算

$$\cos \phi = \frac{\sum P}{\sqrt{(\sum P)^2 + (\sum Q)^2}} = \frac{\sum I_r}{\sqrt{(\sum I_r)^2 + (\sum I_n)^2}} \quad (5-25)$$

式中  $\sum P$  —— 干线各相有功功率之和;

$\sum Q$  —— 干线各相无功功率之和;

$\Sigma I_1, \Sigma I_2$ ——干线各相有功、无功电流之和。

表 5-23 照明负荷的需用系数表

建筑物分类	需用系数 $K_d$
小型生产建筑物、商业场所、户外照明、事故照明	1
由大跨间组成的生产建筑物	0.95
图书馆、行政机关、公用事业	0.9
分隔成数个房间的厂房或多层厂房	0.85
试验室、托儿所、幼儿园、学校、医院	0.8
大型仓库	0.6
三相支线	1

例 5-5 求图 5-17 所示三相四线制干线的计算电流  $I_{\Sigma}$  和功率因数  $\cos\varphi$ 。已知负载中荧光灯  $\cos\varphi_2 = 0.55$ ，镇流器功耗为 8W,  $K_d = 0.85$ ，插座额定容量为 5A，按  $P_2 = 50W$  及  $\cos\varphi_2 = 0.8$  计算其负荷电流。

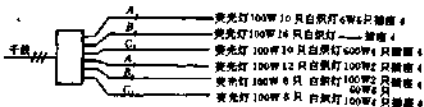


图 5-17 例 5-5 的图

解 A 相负载如下：

荧光灯有功功率  $P_1$  和无功功率  $Q_1$  为

$$P_1 = 100 \times 22 + 8 \times 22 = 2376 \text{ W}$$

$$Q_1 = P_1 \tan\varphi_1 = 2376 \times 1.518 = 3606.76 \text{ var}$$

白炽灯有功功率  $P_2$  为

$$P_2 = 60 \times 6 + 100 \times 2 = 560 \text{ W}$$

插座有功功率  $P_3$  和无功功率  $Q_3$  为

$$P_3 = 8 \times 50 = 400 \text{ W}$$

$$Q_3 = 400 \tan\varphi_2 = 300 \text{ var}$$

总有功电流  $\Sigma I_1$  和总无功电流  $\Sigma I_2$  为：

$$\Sigma I_1 = \frac{2376 + 560 + 400}{220} = 15.164 \text{ A}$$

$$\Sigma I_2 = \frac{3606.76 + 300}{220} = 17.76 \text{ A}$$

A 相线路的计算电流  $I_{\Sigma A}$  为

$$I_{\Sigma A} = \sqrt{(\Sigma I_1)^2 + (\Sigma I_2)^2} = \sqrt{15.164^2 + 17.76^2} = 23.353 \text{ A}$$

同理，可求得 B 相电流为

$$\Sigma I_1 = 16.145 \text{ A}$$

$$\Sigma I_2 = 19.248 \text{ A}$$

$$I_{js} = 25.123 \text{ A}$$

C 相电流为,

$$\Sigma I_y = 13.564 \text{ A}$$

$$\Sigma I_w = 14.777 \text{ A}$$

$$I_{js} = 20.058 \text{ A}$$

从以上计算结果可见, B 相计算电流  $I_{js} = 25.123 \text{ A}$  最大, 以此为准, 再乘以  $K_x = 0.85$ , 得三相四线制线路计算电流  $I_p$  为

$$I_p = 25.123 \times 0.85 = 21.35 \text{ A}$$

三相四线制线路总功率因数  $\cos\varphi$  为

$$\begin{aligned} \cos\varphi &= \frac{15.164 + 16.145 + 13.564}{\sqrt{(15.164 + 16.145 + 13.564)^2 + (17.76 + 19.248 + 14.777)^2}} \\ &= 0.655 \end{aligned}$$

照明负荷计算是选择导线, 各种电器设备的主要依据, 选择导线截面时, 还应考虑到允许电压损失、机械强度等问题。

照明供电一般为三相四线制, 其零线选择的原则是: 单相二线制电路, 零线与相线截面相同; 三相三线制线路, 零线与两个相线的截面相同; 三相四线制电路, 一般情况下零线与相线截面相同, 当三相负载接近对称时, 零线可按相线计算电流的 50% 选择截面。

#### 四、电气照明识图

电气照明的施工图包括电气照明平面图、照明配电系统图等, 它们是设计方案的集中表达, 是工程施工的主要依据。照明平面图和系统图都是用规定的图形符号、文字标注来表示。

在电气照明平面图和系统图中, 线路都用单线表示, 然后在线上打戳表示导线的根数; 或打一撇加数字, 用数字表示根数。电气照明图例见表 5-24。

表 5-24 电气照明图例

图 例	名 称	图 例	名 称
	电力配电箱(板) 置于室外为明装, 置于室内为暗装		单线画法的三相空气开关
	照明配电箱(板) 置于室外为明装, 置于室内为暗装		单线画法的三相自动空气开关
	多线画法的三相闸刀		单线画法的三相跌落式熔断器
	单线画法的三相闸刀		单线画法的三相熔断器
	单线画法的单相闸刀		单线画法的三相电路开关
	电度表		一般灯具

续表

图 例	名 称	图 例	名 称
	明装双孔单相插座		乳白玻璃球型灯
	暗装双孔单相插座		壁灯
	明装三孔单相插座		防水防尘灯
	暗装三孔单相插座		远视半封闭灯
	明装四孔三相插座		防爆灯
	暗装四孔三相插座		安全灯
	吊扇		吊花灯
	吊扇调速开关		信号灯
	明装单极和双极掣把开关		半罩罩天棚灯
	暗装单极和双极掣把开关		投光灯
	明装暗装双控开关		天棚座灯头
	一般和防水拉线开关		暗上座灯头
	拉线双控开关		射灯
	导线引上和引下		荧光灯
	导线由上引来和导线由下引来		半罩罩荧光灯
	导线由上引来和导线由下引来		导线引上并引下
	按钮		导线由上引来并引下
	导线由下引来并引上		接地母线

图 例	名 称	图 例	名 称
	两根导线		带接地线的接地母线
	三根导线		避雷针
	n根单线		阀型避雷器
	电源引入线		36V 以下交流线路
	接地		直流线路
	避雷带(线)		

表 5-24 文字符号

相 序	A	A 相(黄)	线路敷设 部位	L	沿(跨)屋架
	B	B 相(绿)		Z	沿(跨)柱
C	C 相(红)		Q	沿墙	
N	中性线(黑)		P	沿天棚	
			D	沿地板或埋地	
配电线路	$a(b \times c)d-e$		常用灯具	J	水晶灯
	a	导线型号		T	圆筒型灯
	b	导线根数		W	碗型灯
	c	导线截面		P	玻璃平盘罩灯
	d	敷设方式及穿管管径			
e	敷设部位				
线路敷设 方式	M	明敷	灯具安装 方式	X	吊链式
	A	暗敷		L	吊链式
	CP	瓷瓶或瓷柱敷		G	管吊式
	S	钢索敷		B	壁式
	CJ	瓷夹或瓷卡敷		D	吸顶式
	QD	铝皮卡钉敷	R	嵌入式	
	CB	槽板敷			
	G	穿钢管敷			
	DG	穿电线管敷			
	VG	穿塑料管敷			
电机出线口	$\frac{a}{A}$	设备编号 容量/kW	灯具标注	$a-b \frac{c \times d}{e} f$	
				a	灯具数
			b	灯具型号	
			c	每盏灯灯罩灯管数	
			d	灯泡容量/W	
			e	悬挂高度/m	
			f	安装方式	

### 1. 电气照明平面布置图

电气照明平面图是在土建施工用的平面图上绘出电气照明分布图,即在土建平面图上先用细线画出建筑和室内布置的轮廓,然后按照电气照明设备和线路的图例规定,在土建平面图上画出电源进线和线路、配电箱(盘)安装位置,干线和支线编号、走向、穿线管径、数量、敷设方式,开关、插座、灯具种类、安装位置、高度、安装方式等。

平面图应逐层来画,当有标准层时,可用一张图纸来表示布置相同的各层平面。

照明灯具的标准方式为  $a-b \frac{c \times d}{e} f$ , 如果灯具为吸顶安装,则标注方式为  $a-b \frac{c \times d}{-}$ 。  
式中: $a$ —灯具数, $b$ —灯具型号, $c$ —每盏灯具中的灯泡数或灯管数, $d$ —灯泡或灯管的功率(瓦), $e$ —悬挂高度(米), $f$ —灯具的安装方式。

表示灯具安装方式的代号为: $X$ —吊线式, $L$ —吊链式, $G$ —管吊式, $B$ —壁装式, $D$ —吸顶式, $R$ —嵌入式, $Z$ —柱灯。

例如在平面图上一个灯具图形符号旁边标注着  $6 \text{---} YG \frac{1 \times 40}{2.5} L$ ,则表示共 6 盏荧光灯,每盏有一根 40 瓦的灯管,安装高度距地面 2.5m,链条悬吊式安装方式。

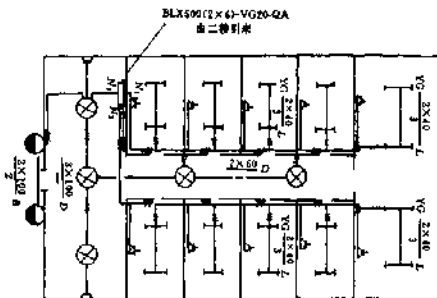


图 5-18 办公楼底层照明线路平面布置图

图 5-18 为一座三层办公楼的底层照明平面布置图,为简便起见,该图中未画出楼梯,各房间也仅只有轮廓线,二楼和三楼的照明布置与一楼相同,进户线设在二楼。

### 2. 照明配电系统图

它是整个建筑物内的配电系统图,包括总的设备容量,配电装置型号数量,配电线路,各支路容量分配等情况。图上应标明各级配电装置和照明线路、开关、熔断器等电器设备的规格型号、导线型号、截面、敷设方式等。

配电线路的标注方式为  $a(b \times c) d - e$

式中: $a$ —导线型号, $b$ —导线根数, $c$ —导线截面, $d$ —导线的敷设方式及穿管的管径, $e$ —导线在建筑物中的敷设部位。

表示导线敷设方式的代号为: $M$ —明敷, $A$ —暗敷, $CP$ —瓷瓶或瓷柱敷设, $S$ —钢

索敷设, CJ——瓷夹或瓷卡敷设, QD——铝皮卡打敷, CB——槽板敷设, G——穿钢管敷设, DG——穿电线管敷设, VG——穿硬塑料管敷设。

表示导线敷设部位的代号: ZM——沿柱明敷, QM——沿墙明敷, FM——沿天棚明敷, LM——沿梁下明敷, LA——梁内暗敷, ZA——柱内暗敷, QA——墙内暗敷, PA——顶棚暗敷, DA——地面内暗敷。

例如, 在一般干线的旁边标注 BLV-(3×6+1×4)G25-QA, 则表明这根干线采用型号为 BLV 的导线, 即聚氯乙烯绝缘铝芯线, 其中三根截面为  $6\text{mm}^2$  的相线, 一根截面为  $4\text{mm}^2$  的零线, 穿钢管敷设, 钢管的管径为 25mm, 沿墙暗敷的敷设方式。

控制、保护和计量设备的型号规格都要标注在图上的设备旁边。例如在开关旁边标注  $\text{HK}_2-10/3$ , 则表示型号为  $\text{HK}_2$  的胶盖开关, 其额定电流为 10A, 3 极。熔断器旁边标注  $\text{RC}_1-10/6$ , 则表示为  $\text{RC}_1$  的瓷插式熔断器, 额定电流 10A, 其熔丝的额定电流为 6A。

照明配电系统图有总系统图和分系统图, 对于较简单的电气照明设计, 系统图可附在平面布置图上, 或者不出系统图。

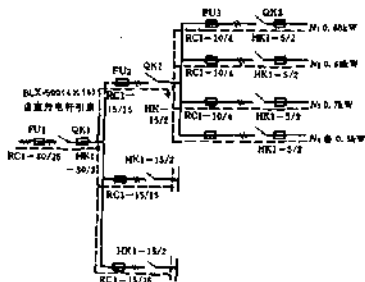


图 5-19 办公楼照明配电系统图

图 5-19 是图 5-18 办公楼的照明配电系统图。办公楼为三层, 由二楼进线至总配电箱, 然后由总配电箱向各层引出线, 单相, 三条支线。每层楼有分配电箱, 分别控制本层楼的电灯、插座等电器设备。

## 五. 电气照明设计的一般过程

电气照明设计主要根据土建设计所提供的建筑空间尺寸、道路、场地的环境状况, 结合使用要求和照明设计的有关规程和标准, 进行合理设计。

照明设计的一般过程为: 收集照明设计的有关资料, 确定照明设计方案, 进行具体的照明设计和计算、编制照明设计施工预算和图表。

### 1. 收集照明设计的有关资料

在设计前应收集照明设计的一些原始资料, 如建筑物的结构尺寸, 建筑物的平面图、正面图、侧面图、室内布置图, 设备安装位置, 生产工作内容; 照明设计要求, 各房间对照明的特殊要



求,有无特殊介质,如易燃、易爆、潮湿、腐蚀、灰尘等;电源情况、进线位置、用电负荷的估算等。这样,在设计之前要充分了解建筑物的结构和状况,初步考虑照明供电系统和线路,内部灯具类型和安装方法。

### 2. 确定照明设计方案

根据所收集的有关资料和照明设计任务书,按照国家或部颁的照度标准,进行初步照明设计和方案比较,综合研究不同方案的照明效果、投资、维修费用的高低,确定照明设计的最佳方案,包括确定照明方式、选定光源和灯具,拟定灯具的布置方案和安装方式;确定供电电源、接线方式,采用单相二线、两相三线或三相四线制供电,工作照明和事故照明的供电方式;对各级负荷应满足不同的供电要求,一级负荷应由两个独立电源供电,二级负荷原则上也应由两个独立电源供电,但当地区供电条件有困难时,可由 6kV 以上的专用线路供电,三级负荷对供电电源无特殊要求。

### 3. 进行具体的照明设计和计算

根据已确定的照明设计方案,进行具体的设计和有关的计算。确定照度和照明方式,选择光源和灯具,确定合理的布灯方案,进行相应的照度计算,决定安装灯具的数量和电光源的容量,确定照明的供电负荷;确定照明供电系统和照明支线的用电负荷,选择供电线路的走向和敷设方式,选择导线型号和截面;确定灯具的控制方法,集中或分散控制;选择开关、熔断器、计量仪表等电器设备,确定总配电箱、分配电箱的安装位置等。

### 4. 绘制照明设计施工图表

电气照明施工图是电气施工安装和使用维修的主要依据文件,它包括电气外线总平面图、照明配电系统图、各层电气照明平面布置图、构件大样图和详图等。另外应进行汇总,编制电气照明设备和主要材料表,进行照明设计部分的概算,提交图纸目录、材料表、图纸说明、施工说明书等。

## 习 题

5-1 光的度量有哪几个主要参数? 它们的物理意义及单位是什么?

5-2 一只 40W 的白炽灯泡,发出总的光通量为 350lm,均匀分布在一半球上,试求距光源 3 米处的光照度和光强度?

5-3 某车间有一功率为 200W 的局部照明器,发出的总光通量为 2920lm,均匀地分布在半球上,工作台面距光源 2m,要求照度不低于 40lx,试问在工作台上的照度和光强度为多少? 并检验是否满足照度要求。

5-4 照明灯具主要有哪几部分构成?

5-5 画一盏荧光灯电路图,并简述其工作原理。

5-6 某房间为  $5 \times 5 \text{m}^2$ ,装有 4 个光源为 G125 广照型工厂照明器,其每盏光通量为 1800lm,利用系数  $K_u=0.6$ ,照明补偿系数  $K_c=1.3$ ,照明器装于  $3 \times 3 \text{m}^2$  的正方形灯罩上,悬挂高度  $H=4.5 \text{m}$ ,工作面高度  $A_w=0.8 \text{m}$ ,试计算工作面上的平均照度  $E_w$  和最小照度  $E_{\min}$ 。

5-7 车间的长度  $a=54 \text{m}$ ,宽度  $b=18 \text{m}$ ,高  $H=12 \text{m}$ ,顶棚和地面空间高度  $h_1$  和  $h_2=0.8 \text{m}$ ,顶棚和墙面反射系数  $P_1$  和  $P_2$  均为 50%,试求简式荧光灯 YG2-1 的照明利用系数

$K_L$ 。

5-8 某车间的长、宽、高各为 23m、14m、5.8m，灯具悬挂高度  $h_c=1m$ ，工作面高度  $h_r=0.8m$ ，最低照度  $E_{min}=30lx$ ，求总的照明安装容量  $\Sigma P$ （选配照型工厂灯）？

5-9 某办公室的建筑面积为  $3.3 \times 4.2m^2$ ，拟采用 YG2-1（带罩）筒式荧光灯照明，办公桌高 0.8m，灯具吊高 3.1m，距离比选  $L/h=1.22$ ，试计算需要安装灯具的数量？

5-10 某照相馆营业厅的面积为  $6 \times 8m^2$ ，房间净高 3m，工作面高 0.8m，天棚反射系数 70%，墙面反射系数为 55%，拟采用吸顶式荧光灯 YG6-2.2 $\times$ 40W 照明，试计算需安装灯具的数量。

5-11 某会议室面积为  $12 \times 8m^2$ ，天棚距地面 5m，工作面距地面 0.8m，刷白的墙壁，窗子装有白色窗帘，木制顶棚，采用 YG6-2.2 $\times$ 40W 荧光灯吸顶安装，试确定光源的功率和数量。

5-12 某图书馆采用三相四线制供电，A 相接荧光灯 40W40 盏，白炽灯 60W40 盏，插座 10 个，B 相接荧光灯 40W30 盏，白炽灯 60W50 盏，插座 15 个，C 相接荧光灯 40W50 盏，白炽灯 60W40 盏，插座 20 个。荧光灯功率因数取 0.55，镇流器功耗为 8W，插座按 50W，功率因数 0.8 考虑，计算各相电流和干线的计算电流。

5-13 在图 5-6 中，设灯泡的光通量为 800lm，求 30°、50°时的发光强度。

5-14 画出你所在教室的电气照明平面图。

## 第六章 建筑防雷与安全用电

防雷和接地是民用建筑安全供电的重要措施之一。防雷关系到建筑物及其内部设备的安全,接地则涉及到建筑物供电系统设备及人身安全,本章将介绍防雷接地以及安全用电的一些基本知识。

### 6-1 雷电的危害及防雷措施

我国很多地区雷电活动十分强烈,雷击建筑物会造成极大的危害。随着大型、高层建筑物的不断增加,防止雷电危害对建筑工程有很重要的意义,本节主要讨论雷电对建筑物的危害及防雷措施。

#### 一、雷电的形成及对建筑物的危害

##### 1. 雷电的形成

雷电是大气中的一种自然放电现象,通常可这样解释:地面的湿气受热上升,在空中与不同冷热气团相遇,凝结成水滴或冰晶,形成积云。积云在运动过程中受到强烈气流撞击作用,使电荷发生分离,形成带正、负不同电荷的雷云。在气流强烈撞击和摩擦下,雷云中的电荷越来越多,形成正、负不同雷云间的强大电场。带电雷云临近地面时,由于静电感应,使大地或建筑物感应出与其极性相反的电荷,这样,雷云与大地或建筑物之间也形成很强大的电场。

雷云中的电荷积累到足够数量,使电场强度达到 $25\sim 30\text{kV/cm}$ 时,就会使正、负雷云之间或雷云与大地之间的空气绝缘击穿,发生先导放电。当先导放电到达另一雷云或大地时,则进入主放电阶段,其放电电流为雷电流,可达几十万安培,电压可达几百万伏,温度可达 $2$ 万摄氏度。在几个微秒的时间内,使周围空气猛烈膨胀,出现耀眼的光亮和巨响,称为雷电,也就是通常所说的“闪电”和“打雷”。

##### 2. 雷电的种类

雷云与大地之间的放电会产生很大的破坏作用,雷电的种类有:

**直击雷** 雷云直接对建筑物或地面上的其它物体放电的现象称为直击雷。雷电直接击中建筑物或其它物体时,会产生很大的雷电流,并在其阻抗上产生较高的电压降。建筑物的顶部突出部分或高层建筑物的侧面容易受到直击雷的作用。

**感应雷** 感应雷又称雷电感应,分为静电感应雷和电磁感应雷两种。静电感应雷是当雷云接近地面时,由于静电感应会在建筑物上感应出大量异性电荷;当雷云向附近物体或其它雷云放电后,建筑物的电荷来不及立即疏散,残留电荷会产生很高的对地电位,如果沿导线、金属管道传入室内,有可能发生放电,引起火灾,爆炸,将危及人身安全。

电磁感应雷是当发生雷击时,雷电流的变化非常迅速,在周围空间产生迅速变化的强磁场,地面上或建筑物中的金属导体,由于电磁感应,则会产生感应电动势,如果是开口的环形导

体,在开口处可能产生过电压或火花放电。

**雷电波侵入** 雷电波侵入又称高电位引入。当架空线或金属管道遭到雷击,以及由于雷云在附近放电,使架空线或金属管道感应出很高的电动势,这个高电位沿线路或管道迅速传入建筑物内部,称为雷电波侵入。雷电波侵入时,可能发生火灾及触电事故。

### 3. 雷电的危害

雷电的破坏作用主要是由雷电流的热效应、电磁效应及机械效应所引起。

**雷电的热效应** 遭受雷击的建筑物、树木等,因通过强大的雷电流,会产生极大的热量,但在极短的时间内又不易散发出去,所以会使金属熔化,树木烧焦。当雷电流流过易燃易爆物体时,会引起火灾和爆炸等重大事故。

**雷电的电磁效应** 雷电流很大且变化迅速,在其周围会产生强大的电磁场,使附近导体上产生很高的感应电压,其幅值可达几十万伏。它足以击穿一般电气设备的绝缘,造成短路,导致火灾和爆炸。有时还会沿着导线或金属管道将高压引进建筑物内,造成设备和人身事故。

**雷电的机械效应** 强大的雷电流会产生巨大的电动力,在巨大的机械力作用下可摧毁设备、建筑物、造成房屋倒塌,物体劈裂等严重事故。

由以上可知,雷击对建筑物会造成巨大危害,对建筑物和电气设备应采取必要的防雷措施。

## 二、建筑物的防雷等级

建筑物的防雷分类是根据建筑物的重要性、使用性质、影响后果等来划分的,不同性质的建筑物其防雷措施是不同的。在建筑电气设计中,把建筑物按照防雷等级分成三类。

### 1. 第一类防雷的建筑物:

(1)凡在建筑物中制造、使用或贮存大量爆炸物质,或在正常情况下能形成爆炸性混合物,因电火花而引起爆炸,造成巨大破坏和人身伤亡者。

(2)具有特别重要用途的建筑物,如国家级的会堂、办公建筑、大型展览会建筑、特等火车站、国际性的航空港、通讯枢纽、国宾馆、大型旅游建筑、国家级重点文物保护的建筑物,超高层建筑物等。

### 2. 第二类防雷的建筑物:

(1)特征同第一类第(1)条,但不致造成巨大破坏和人身伤亡者;或在非正常情况下才能形成爆炸性混合物,因电火花而引起爆炸造成巨大破坏和人身伤亡者。

(2)重要的或人员密集的大型建筑物。例如部、省级办公楼,省级大型集会、展览会、体育、交通、通讯、广播、商业、影剧院建筑等。

(3)省级重点文物保护的建筑物。

(4)十九层及以上的住宅建筑和高度超过50m的其它民用和一般工业建筑物。

### 3. 第三类防雷的建筑物:

(1)凡不属于第一、二类防雷的一般建筑物而需要作防雷保护者。

(2)建筑群中高于其它建筑物或处于边缘地带的高度为20m以上的民用和一般工业建筑物;建筑物超过20m的突出物体。在雷电活动强烈地区其高度可为15m以上,雷电活动较弱地区其高度可为25m以上。

(3)高度超过15m的烟囱、水塔等孤立的建筑物。在雷电活动较弱地区,其高度可在20m

以上。

(4)历史上雷害事故严重地区的建筑物。

### 三、建筑物的防雷措施

建筑物的防雷措施,应根据环境条件、雷电活动情况和建筑物的特点而采取不同的措施。对于第一、二类防雷等级的建筑物,应有防止击雷和雷电波侵入的措施,对于第三类防雷等级的建筑物,应有防止雷电波沿低压架空线侵入的措施。

#### 1. 防直击雷的措施

建筑物为防止直接雷击,应装设防雷装置。一套完整的防雷装置由接闪器、引下线和接地装置三部分构成,如图 6-1 所示。

接闪器是用来吸引雷电的,是直接遭受雷击的部分。其基本形式有避雷针、避雷带、避雷网等,它们安装在建筑物顶部,用金属材料制成,建筑物的金属屋顶和金属构件,如金属烟囱、金属栏杆、风管等,都可兼作接闪器。

避雷针为针状导体,如图 6-1 所示,独立且高于被保护建筑物,或安装在建筑物突出部位,像伞一样保护下面的建筑物免遭直接雷击。它常用于保护重要建筑物。

避雷带是在建筑物容易遭受雷击的地方,如屋脊、屋檐、屋角、女儿墙等处安装用圆钢或扁钢制成的条形长带,这是一种很有效的保护办法,广泛应用于一般建筑物。

避雷网是在避雷带的基础上增加一些带状导体,将屋面上纵横敷设的避雷带组成网格,对于防雷等级不同的建筑物,规范所确定的网格大小也不同,它通常只用于重要建筑物的防雷。

各种接闪器所用材料及尺寸必须满足机械强度和耐腐蚀性要求,一般用镀锌圆钢和扁钢制成,其尺寸列于表 6-1 中,它们还应有足够的热稳定性,以能承受雷电流的热破坏作用。

表 6-1 接闪器所用材料尺寸

类别	规格	直径/mm		扁钢	
		圆钢	钢管	截面/mm <sup>2</sup>	厚度/mm
避雷针	针长 1m 以下者	12	20	—	—
	针长 1m 以上者	16	25	—	—
	针在屋顶上	20	—	—	—
避雷网(带)	网格 6×6~10×10m	8	—	48	4
	网或带	12	—	100	4

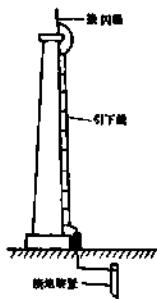


图 6-1 垂直避雷针示意图

接闪器通过引下线与接地装置相连,引下线的作用是构成雷电流的通路,引下线一般用圆钢或扁钢制成,其截面大小应能承受通过雷电流,也可利用建筑物的金属构件、建筑物钢筋混

凝土内的钢筋作为防雷引下线,用焊接方法使其构成电气通路。

接地装置是埋设在地下下的金属导体,它的作用是使雷电流迅速流散到大地中去,限制防雷装置对地电压过高。接地装置一般采用垂直埋设角钢、圆钢、钢管或水平埋设的扁钢、圆钢组成,也可利用建筑物的钢筋混凝土基础内的钢筋,埋设在地下下的金属构件等作为接地装置。

避雷针、避雷带、避雷网是防止直击雷的防雷装置,其作用原理是:将雷电引向自身,使雷云与接闪器之间放电,通过引下线将雷电流引入地下,由接地装置将雷电流迅速流散到大地之中,从而保护了附近建筑物免遭雷击。

### 2. 防感应雷的措施

为了防止感应雷,可在建筑物屋面上安装收集电荷的金属装置,用来收集感应静电荷,建筑物内的管道、构件、钢管等金属物,均应通过引下线与接地装置相连,当建筑物上空雷云放电后,建筑物上残留的电荷可通过引下线迅速引入大地,从而防止建筑物出现高电位,因此,避雷带、避雷网不仅能防直击雷,还可防止感应雷的危害。

对平行敷设的金属管道,金属构架、电缆外皮等,当距离较近时,应按规范要求,每隔一定距离用金属线跨接起来。

### 3. 防雷电波侵入措施

雷电波的侵入,是由于雷电对架空线或金属管道的作用,雷电波沿着这些管线侵入建筑物内,损坏设备或危及人身安全。

为防雷电波侵入建筑物,可安装避雷器和保护间隙,将雷电流在室外引入大地。

避雷器可用来防止雷电产生的高电位沿线侵入建筑物,常用的有阀型避雷器,它由火花间隙和阀型电阻片串联而成,装在密封的瓷导管内。火花间隙用铜片制成,每对间隙用云母垫圈隔开,正常情况下,火花间隙对工频电流处于断路状态,但当线路受到雷击出现过电压时,火花间隙被击穿放电。

阀型避雷器的符号见图 6-2(a),它里面的阀型电阻片具有非线性特征,电压正常时,阀片电阻很高,但当过电压时,阀片则呈很低的电阻,其特性曲线见图 6-2(b)。阀型避雷器在过电压作用下,火花间隙击穿,阀片电阻很小,能使雷电流畅通地流入大地,当过电压消失后,线路恢复工频正常电压,阀片又呈很高的电阻,火花间隙也恢复绝缘,从而线路恢复正常工作。

保护间隙是一种简单经济的防雷设备,如 6-3 所示。由于制成角型,所以又称羊角间隙,其中一个电极接入线路,另一个电极接地。

在正常情况下,由于有空气隙,它把大地与线路隔开。遇雷击时,过电压将空气隙击穿,使雷电流泄入大地,过电压就不会引入建筑物内部。

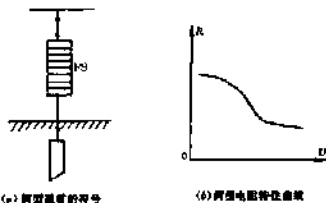


图 6-2 阀型避雷器

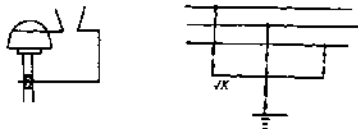


图 6-3 羊角间隙

安装避雷器和保护间隙是防止雷电流由输电线进入建筑物的有效措施。另外,可把进入建筑物的各种金属管道和各种线路全线埋入地下引入,并在入户处将其相应部分接地。电缆进线时在入户端将其金属外皮接地,当采用架空线入户时,在入户处或接户杆上应将绝缘子的铁脚接到接地装置上。

## 6-2 建筑物的防雷装置

建筑物的防雷装置主要有避雷针、避雷带、避雷网。在建筑物的防雷保护中,主要用避雷针防直击雷,用避雷带和避雷网防直击雷和感应雷。避雷器主要用在输电线路,它可以防雷电波侵入。

### 一、避雷针

避雷针的针尖一般用镀锌钢棒或钢管制成,长 1~2m,下边用水泥杆或钢铁构架支撑,装设在建筑物顶部最高处,或顶部两端以及女儿墙上,有时也安装独立避雷针。由于它高于被保护建筑物,易将雷电流引向其尖端再泄入大地,避免了雷云向建筑物放电,保护了建筑物免受雷击的破坏。

根据被保护建筑物的高度及范围大小,可分别采用单支、双支或多支独立避雷针。避雷针的保护范围,在一定高度下面有一个安全区,在这个安全区内的建筑物基本不受雷击,这个安全区就是避雷针的保护范围。保护范围大小与避雷针高度和采用方式有关,各种避雷针的保护范围计算如下:

#### 1. 单支避雷针的保护范围

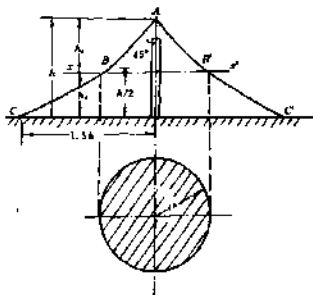


图 6-4 单支避雷针保护范围

单支避雷针的保护范围是以避雷针为轴的折线圆锥体,如图 6-4,图中  $h$  为避雷针的高度,避雷针在地面的保护范围为:

$$r = 1.5h \quad (6-1)$$

式中  $r$ ——地面保护半径;

$h$ ——避雷针的高度。

在图 6-4 中,由避雷针顶点向下作  $45^\circ$  斜线与  $\frac{1}{2}h$  水平线相交于  $B$  和  $B'$  点,交点再与地面  $1.5h$  处的  $C$  和  $C'$  点相连,这就构成了单支避雷针在空间的保护范围。

如果被保护物的高度为  $h_x$ ,则在高为  $h_x$  的水平面上,即图 6-4 中  $xx'$  的联线平面上的保护半径  $r_x$  按下列公式计算:

$$\left. \begin{aligned} \text{当 } h_x \geq \frac{h}{2} \text{ 时} & \quad r_x = (h - h_x) \rho - h_x \rho \\ \text{当 } h_x < \frac{h}{2} \text{ 时} & \quad r_x = (1.5h - 2h_x) \rho \end{aligned} \right\} \quad (6-2)$$

式中  $h_x$ ——被保护物的高度;

$h$ ——避雷针的有效高度;

$r_x$ ——避雷针在  $h_x$  高水平面上的保护半径;

$\rho$ ——高度影响的修正系数,当  $h \leq 30\text{m}$  时  $\rho = 1$ ; 当  $30 < h \leq 120\text{m}$  时,  $\rho = \frac{5.5}{\sqrt{h}}$ 。后面的

公式也会出现  $\rho$  值,其值与上相同。

被保护建筑物必须完全处在折线锥体之内才能免受雷击。从(6-2)式还可看出,避雷针高度超过 30m 时,其保护范围不再随避雷针的高度成正比例增加,这时应考虑用多支避雷针来扩大其保护范围。

例 6-1 某工厂在其 60m 高的烟囱上装置 2m 高的避雷针,试计算附近的一建筑物是否在它的保护范围内。建筑物的位置和尺寸如 6-5 所示。

解 避雷针的高度为

$$h = 60 + 2 = 62 \text{ m}$$

$$\because 30\text{m} < h < 120 \text{ m}$$

$$\text{修正系数 } \rho = \frac{5.5}{\sqrt{h}} = \frac{5.5}{\sqrt{62}} = 0.7$$

$$h_x = 30\text{m} < \frac{h}{2} = 31\text{m}$$

则  $h_x = 30\text{m}$  高水平面保护

$$\begin{aligned} \text{半径为 } r_x &= (1.5h - 2h_x) \rho \\ &= (1.5 \times 62 - 2 \times 30) \times 0.7 = 23 \text{ m} \end{aligned}$$

很显然,该建筑物不在它的保护范围内。

## 2. 两支等高避雷针的保护范围

当被保护建筑物的范围较大时,采用两支较矮的避雷针进行联合保护,比采用一支很高的避雷针更有效,技术经济上更合理,更便于施工安装。

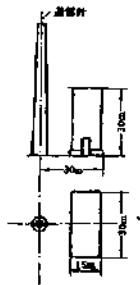


图 6-5 例题 6-1 的图



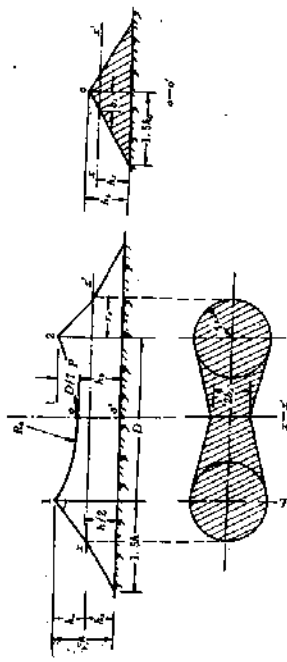


图 6-6 双拱桥设计的桥拱视图

图 6-6 为两支等高避雷针的保护范围图。设计时首先根据被保护建筑物的长、宽、高和避雷针的理想安装位置等情况，初步确定两针之间的距离  $D$ ，然后按照  $D \leq 7(\lambda - h_0) = 7h_0$  的条件，初选避雷针的有效高度  $h_0$ ，它是避雷针高出被保护建筑物的高度，再根据被保护建筑物的高度  $h$ ，可初选避雷针的高度  $A$ ，然后再进行两针联合保护范围计算。

两针外侧的保护范围，按单支避雷针的计算方法确定。两针之间的保护范围可这样确定：在两针之间的中点有一支假想避雷针，其高度为  $h_0$ ，顶点为  $o$  点

$$h_0 = h - \frac{D}{7p} \quad (6-3)$$

式中  $h_0$ ——两针间保护范围最低点  $o$  的高度；

$D$ ——两针间的距离；

$p$ ——高度影响修正系数。见(6-2)式。

通过两针顶点和两针间最低点  $o$  画一半径为  $R_0$  的圆弧，圆弧以下便是两针之间的保护范围。

两针之间在  $h$  高度水平面，即  $xy'$  水平面上的保护范围这样确定：假想避雷针  $h_0$  在地面上一侧的保护宽度  $b_0 = 1.5h_0$ ，其保护范围的外限为一条通过  $o$  点的直线。见图 6-6 中右边  $o-o'$  截面图。两针间在  $h$  水平面上同一侧最小保护宽度  $b_x$  可按下式计算：

$$b_x = 1.5(h_0 - h_x) \quad (6-4)$$

式中  $b_x$ ——在  $h$  高水平面保护范围最小宽度的一半。

在被保护建筑物  $h$  高的水平面上若  $b_x > 0$ ，且整个被保护建筑物均处于保护范围内，则达到保护要求，否则应重新调整  $D$  和  $h_0$ ，直至合理为止。

当  $D = 7h_0 p$  时， $h_0 = h - h_0 = h_x$ ，则  $b_x = 0$ ，此时再增大两针间的距离，也不能构成联合保护范围。所以两针间的距离与针高之比  $D/h$  不宜大于 5。

### 3. 多支避雷针的保护范围

范围较大的建筑物经常需安装多支避雷针进行联合保护，现以三支为例说明其保护范围的确定办法。

如图 6-7 所示，三支等高避雷针的保护范围为一个三角形及其外侧。三角形外侧的保护范围按单支及两支等高避雷针的方法进行计算。在三角形内被保护建筑物最大高度  $h$ ，水平面上，各相邻避雷针间保护范围一侧最小宽度  $b_x \geq 0$  时，则全部面积都将受到可靠保护。

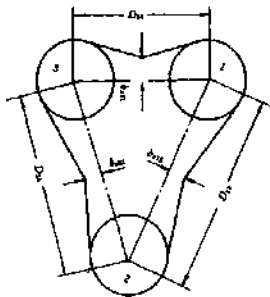


图 6-7 三支避雷针保护范围

## 二、避雷带和避雷网

由于建筑物屋顶的面积较大，所以应采用避雷带和避雷网作为防雷装置，它可作为对直击

雷的防护,同时也是防感应雷的安全措施,其保护范围无需计算,当屋顶面积较小时,可采用避雷带,当屋顶面积较大时,则可采用避雷网。

避雷带应安装在建筑物最可能遭受雷击的地方,如屋脊、屋檐、女儿墙、平屋顶边缘等处。避雷带一般采用直径为8mm的镀锌圆钢或截面不小于 $50\text{mm}^2$ 的扁钢制成,每隔1m用支架固定在墙上或混凝土支座上,并高出屋面0.2m,使对不易遭受雷击的部位也有一定保护作用,如图6-8所示。

避雷带防雷装置广泛应用于第三类防雷建筑物,在雷电活动比较频繁的地区,在采用避雷带保护的同时,还可在避雷带上增设一些短针,短针长0.4~0.5m,这样能更有效的实现对建筑物重要部位的保护。

根据屋顶的大小及防雷的重要性,可采用不同大小网格的避雷网,其网格不大于 $8\sim 10\text{m}$ ,一般有 $5\times 5\text{m}$ , $6\times 10\text{m}$ , $10\times 10\text{m}$ 的网格,避雷网的材料采用圆钢或扁钢,交叉点需进行焊接。

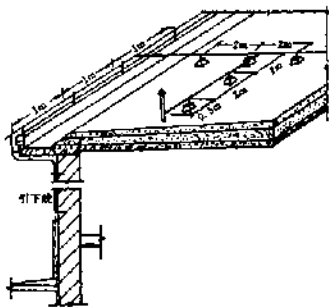


图6-8 平屋顶避雷装置

### 三、引下线和接地装置

防雷装置的引下线是连接接闪器和接地装置的金属导体,它构成雷电流的通路。

引下线的敷设有明装和暗装两种。明装引下线沿建筑物外墙敷设,用支持卡子固定,支持卡子埋设在墙里,间距约1.5m。引下线一般采用直径不小于8mm的圆钢或截面积不小于 $48\text{mm}^2$ 的扁钢,引下线一般不少于两根,尽可能短而直,避开人员不经常到之处。为了便于测量接地电阻以及检查引下线与接地线的连接状况,在距地面1.8m处以下设置断接卡子,用螺帽连接。

暗装引下线常用于高层建筑或建筑艺术较高的建筑,防雷装置引下线可预埋在建建筑物墙内,但截面要加大,可采用直径为10mm的圆钢。若利用混凝土内钢筋作引下线时,与钢筋连接处应该焊牢,连接要可靠,以构成良好的电气通路。

接地装置是引导雷电流安全入地的导体,它把雷电流散发到周围的土地中去,以限制防雷装置对地电压不要过高。接地装置由接地体和接地线两部分组成。接地线是从引下线的断接卡子至接地体的连接导体,接地体是埋设在地下,与大地有良好接触的金属导体。

接地体可采用垂直埋设和水平埋设。垂直埋设常采用角钢、圆钢、钢管。圆钢直径不小于10mm,钢管壁厚不小于3.5mm,角钢厚度不小于4mm。先在地面挖下0.3m左右,然后把长为2.5m的角钢或钢管垂直打入地下,为减小相邻接地体之间的屏蔽效应,接地体相邻两根之间的间距一般为5m,然后用扁钢将其顶端焊接全部连接起来,扁钢水平埋设,并回填土将其夯实。

防直击雷的独立避雷针应单独设置接地装置,其接地电阻要等于或小于 $10\Omega$ 。建筑物上的

避雷针、避雷带的接地装置尽可能单独设置,不设置独立避雷针时,也可以与工作接地、保护接地的接地装置共用接地,但接地电阻要符合规定要求。防雷装置的接地体应设置在行人较少的地方,以减少雷电流通过接地装置时可能产生的危险。接地体的布置方式、几何尺寸等应根据接地电阻的要求和土地电阻率等因素而确定。

防雷装置的安装一定要遵守规范,否则不但不能防止雷击,反而由于安装不当招至雷电破坏。

#### 四、建筑防雷平面图

建筑防雷平面图是在屋面平面图的基础上绘制的,一般只画出屋面的轮廓线,然后用图例符号表示出避雷针、避雷带、避雷网等接闪器的安装位置,对于避雷网应画出网孔尺寸,对于独立避雷针还应标出杆体长以及对建筑物各高度屋面的保护范围,防雷装置的引下线、接地装置的安装位置等也应在图中表示出。

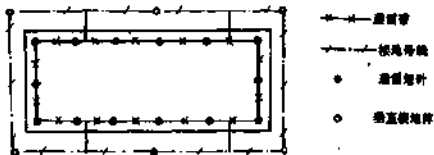


图 6-9 建筑防雷平面图

图 6-9 所示为用避雷带和短针对建筑物进行防雷保护的平面图,建筑物仅画出了轮廓线,防雷引下线用了虚线。

### 6-3 接地和接零

为了保证电气设备正常运行和安全用电,需要把电气设备不带电的金属外壳接地或接零,这是工业与民用安全用电的有效措施。

在低压 380/220V 的配电系统中,变压器中性点有直接接地、中性点不接地两种运行方式。当变压器中性点采用不接地方式运行时,其中性点对地是绝缘的,这时电气设备外壳应采用接地的方法作为安全措施,这种接地叫做保护接地。当变压器中性点采用直接接地方式运行时,变压器中性点接地称为工作接地,与中性点相连的中性线称为零线。在这种三相四线制配电系统中,其电气设备外壳应采用接零线的方法作为安全措施,这种接零叫做保护接零。为了保证中性点接地牢固可靠,并使零线上的电位为零,除变压器处将其中性点直接接地以外,将零线多点再次接地,这种零线多处接地的做法叫做重复接地。

## 一、保护接地

在中性点不接地系统中,将电气设备金属外壳与接地体相连叫做保护接地。在正常情况下电气设备金属外壳是不带电的,但当电气设备绝缘损坏时,外壳电位上升,人接触外壳是危险的。如果电气设备外壳作了保护接地,设接地电阻为  $R_d$ ,则人接触外壳时相当于人体电阻  $R_r$  与接地电阻  $R_d$  相并联,故障电流流经两条闭合回路,如图 6-10 所示。一条是接地电流  $I_d$  经过保护接地电阻  $R_d$  和电容  $C$  与线路构成回路;另一条是流过人体的电流  $I_r$  经过人体和电容  $C$  与线路构成回路。根据并联电路的原理,显然,

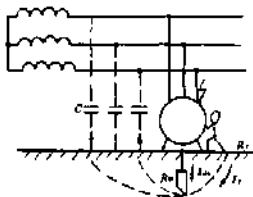


图 6-10 保护接地原理图

$$\frac{I_r}{I_d} = \frac{R_d}{R_r} \quad (6-5)$$

式中  $R_r, I_r$ ——人体电阻和流过人体的电流;  
 $R_d, I_d$ ——接地电阻和流经接地体的电流。

由于接地体与大地之间有良好的接触,接地电阻  $R_d$  一般为  $4 \sim 10 \Omega$ ,而人体电阻一般为  $1000 \Omega$ ,所以流经人体的电流极小,从而避免了触电的危险。从(6-5)可知,接地体的接地电阻  $R_d$  愈小,流经人体的电流也就愈小。

保护接地应用于中性点不接地的三相三线制、三相四线制配电系统中,凡是因绝缘损坏或其它原因而可能出现危险电压的金属部分,如变压器、电机、电器等的外壳和底座,均可采用保护接地。

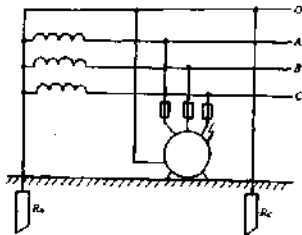


图 6-11 保护接零和重复接地

## 二、保护接零

在中性点直接接地系统中,将电气设备的金属外壳与电源的零线相接称为保护接零,如图 6-11 所示。

采取保护接零措施后,当某一相绝缘损坏使相线碰壳时,相电压经过相线和零线产生很大的短路电流,它足以使保护动作或使熔断器熔断,从而将漏电设备与电源断开,避免人身触电危险。在三相四线制中性点直接接地的  $380/220V$  配电系统中,电气设备外壳广泛采用保护接零。

对于中性点直接接地的三相四线制系统,只能采取保护接零,不能采用保护接地,如图 6-12 所示。当设备绝缘损坏,外壳带电时,若中性点接地电阻和电气设备的接地电阻均为  $4 \Omega$ ,若电源相电压为  $220V$ ,则此时接地短路电

流为  $I = \frac{220}{4+4} = 27.5\text{A}$ 。这一电流不一定能烧断熔断器，外壳带电设备不能立即切断电源，其对地电压为  $U = 27.5 \times 4 = 110\text{V}$ ，显然这是危险的。若保护接地电阻高于中性点接地电阻，设备外壳对地电压还要高，这时危险性更大，所以中性点直接接地系统中，只有采用保护接零才是安全的。

### 三、工作接地和重复接地

电源变压器副边中性点通过接地装置与大地直接连接叫工作接地。变压器中性点工作接地的接地电阻，一般要求小于或等于  $4\Omega$ 。变压器中性点直接接地，是保护接零的必要条件，同时还可降低每相对地电压，当人触及一相电源时，人体承受的是相电压。而在中性点不接地系统中，一相接地仍可继续运行，当人触及另一相电源时，人体承受的是线电压，危险性将更大。

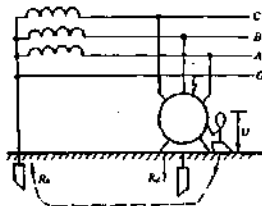


图 6-12 中性点接地系统采用接地保护的危險示意图

采用保护接零时，除变压器中性点必须接地外，还规定零线必须重复接地。所谓重复接地，就是零线沿走向的一处或多处要再次接地。低压线路零线每一重复接地装置的接地电阻应等于或小于  $10\Omega$ 。

重复接地可降低漏电设备外壳对地电压和减轻零线断路时的触电危险。

当设备外壳漏电时，接零保护使熔断器熔断切断电源。但是，从设备外壳漏电到熔断器熔断有一段时间，在这段时间外壳存在对地电压，其值为短路电流在零线上的电压降，这个电压对人还是很危险的。若零线采取了重复接地，如图 6-13(a)所示，重复接地可降低设备外壳的对地电压，减少触电的危险性。

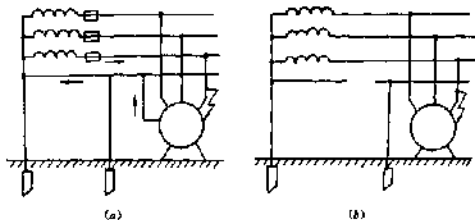


图 6-13 重复接地

如果发生零线断路，且零线断路处后面又同时发生电气设备外壳漏电，这时不构成短路回路，熔断器不会烧断。这样，不仅这台漏电设备外壳长期带电，而且使接在断路后面所有采取接零保护的设备外壳均带电，其电压接近于相电压，造成大范围可能触电的危险性。当采取重复

接地时,如图 6-13(6)所示,漏电气设备外壳的对地电压就等于相电压在重复接地电阻上的电压降,这就比没有重复接地装置时有所降低,减轻了触电的危险程度,但对人还是存在危险,应予以避免。

从以上有否重复接地的两种情况分析可知:零线必须很牢固,连接可靠,对零线应精心施工维护,尽量避免零线断路事故的发生。

## 6-4 安全用电

电能广泛应用于工农业、国民经济各部门以及日常生活之中,为了更好的使用电能,必须了解安全用电方面的一些基本知识,了解电流对人体的危害,了解各种可能发生的触电事故及其预防措施。

### 一、电流对人体的危害

如果不遵守安全用电规则或粗心大意,当人体接触到电气设备的带电部分时,电流会流经人体,轻者使人受伤,重者造成死亡,电流流经人体所造成的伤害程度与通过人体电流的大小、电流的频率、通电的持续时间、电流在人体中的途径以及人体的电阻大小等各方面因素有关。

通过人体的电流越大,人体的生理反应越明显,感觉也越强烈,致命的危险性也越大。实验证明:1mA 的工频电流流过人体时便有不愉快的感觉,50mA 的工频电流流过人体则有生命危险,100mA 的工频电流流过人体就能使人死亡。

工业频率 50~60Hz 的电流对人体伤害最严重、也最危险,大于或小于工频的电流,其危险性程度降低。

人体通过电流的时间越长,人体电阻因多种原因而降低,导致通过人体的电流增加,以及容易引起心室颤动,所以危险性越大。

电流通过人体的途径以流经心脏最危险,因为电流流经心脏会引起心室颤动,较大电流还会使心脏停止跳动。所以,从手到手、从手到脚、从手到胸部都是很危险的电流途径,从脚到脚是危险性较小的电流途径。

流过人体的电流大小主要与触电电压和人体电阻有关,人体电阻基本由人的表皮角质层的电阻大小而定,由于各人的皮肤状况不同,人体的电阻也因人而异。如皮肤潮湿、多汗、有损伤、有导电粉尘等都会使人体电阻降低,在一般情况下,人体电阻可按 1000~2000Ω 计算。若人体电阻以 1000Ω 计算,通过人体的电流为 50mA 工频电流时,则人体承受的工频电压为: $U=IR=0.05 \times 1000=50V$ 。

因此,规定 36V 以下电压为安全电压,所谓安全电压,是指人体不代任何防护设备触及带电体而无危险的电压。

根据用电环境不同,我国规定的安全电压分为三个等级:空气干燥、条件较好的生产场所采用 36V 电压;潮湿、有导电尘埃的危险场所采用 24V;非常潮湿、有腐蚀性气体的特别危险场地,如隧道内、矿井内、金属容器内等,采用 12V 电压。

建筑工地处在露天中,比其它场合更容易发生触电事故,应根据建筑工地不同情况采用不同等级的安全电压,如在潮湿、阴暗的地下施工中,手持电动工具和照明灯具电压应采用 12V

的安全电压。

## 二、触电的形式

电流对人体的伤害有两种情况：电伤和电击。

电伤是由于电弧以及熔化、蒸发的金属微粒对人体外表的伤害，基本是造成外伤。如熔丝熔断时，飞溅的金属微粒可能烫伤或渗入人体皮肤表层，短路或拉闸时的电弧会烧伤及刺伤人的眼睛等。

电击是电流通过人体，使人体内部的器官受到损伤，人体触电时，肌肉内会发生收缩，电流连续通过人体会造成呼吸困难，心脏麻痹，以至于死亡，所以电击危险性极大。

常见的人体触电有以下几种形式：

### 1. 单相触电

人站在地面上，人体的其它部分触及一相带电体或漏电设备外壳而触电，称为单相触电。根据电网中性点运行方式的不同，又分为中性点接地系统和中性点不接地系统的单相触电。

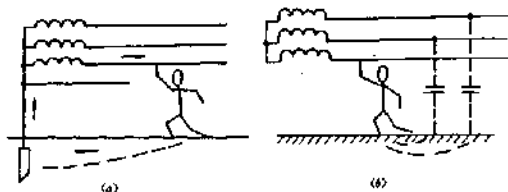


图 6-14 单相触电

图 6-14(a)所示为中性点接地系统的单相触电。这时相电压加在人体电阻与接地电阻串联的电路中，此时流过人体的电流为：

$$I_t = \frac{U_p}{R_n + R} \quad (6-6)$$

式中  $U_p$  —— 相电压；

$R_n$  —— 电网中性点的接地电阻，低压电网一般为  $4\Omega$ ；

$R$  —— 人体电阻，一般可取  $1000\Omega$ 。

若相电压  $U_p = 220V$ ，则流过人体的电流为

$$I_t = \frac{U_p}{R_n + R} = \frac{220}{4 + 1000} = 219 \text{ mA}$$

这个电流流过人体是很危险的。

图 6-14(b)所示为中性点不接地系统的单相触电。每相输电线与地之间存在有电容，当人站在地上触及一相导线时，电流经过人体和

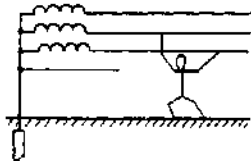


图 6-15 两相触电



另外两相导线对地电容构成回路。电网电压越高,以及线路越长,触电时的危险性就越大。

### 2. 两相触电

当人体的两处分别触及两根相线所发生的触电现象,称为两相触电,如图 6-15 所示。

不管电网中性点接地与否,两相触电时人体承受的是线电压,流过人体的电流主要决定于人体的电阻,所以电流较大,触电伤亡的程度也比单相触电更为严重,应特别防止这种触电现象的发生。

### 3. 接触电压和跨步电压

当高压设备发生接地故障时,接地电流流过外壳由接地装置流入大地时,电流在接地装置周围的土地中产生电位降,接地点处电位最高,离接地点越远电位越低,试验表明,离接地点 20m 处电位才趋于 0,其电位分布曲线如图 6-16 所示。

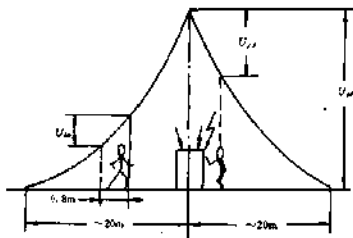


图 6-16 接触电压和跨步电压示意图

当人站在发生接地短路的设备旁,手触及已发生漏电的电气设备时,手和足之间出现电位差,其大小等于漏电设备对地电压  $U_w$  (即接地电压) 与人体所站立点对地电位之差,如图 6-16 中  $U_{ca}$ , 这个电压  $U_{ca}$  就是人体承受的接触电压。

当人、畜在接地点附近行走时,由于两脚所处的位置不同,其电位也不同,两脚之间的电位差就是人体所承受的电压,这个电压叫跨步电压,如图 6-16 中的  $U_{cb}$ , 越靠近接地点,跨步电压越大,人、畜的步子越大,两脚之间的电位差也越大。

## 三、一般安全用电知识

为了防止触电,确保用电安全,首先必须从思想上充分认识电气安全的重要性,贯彻“安全第一”的思想,切实保障职工在生产中的安全和健康,防止人身触电和设备损坏等事故,除思想上高度重视外,还要在技术上、组织上、制度上健全各种措施。

为了防止直接接触及过分靠近带电体,以及防止触及意外带电体,必须采取安全技术措施,通常使用绝缘,用绝缘材料把带电体封闭起来。当不便使用绝缘或绝缘不足时,可采用屏护装置,如遮栏、护罩等,将带电体隔离,防止人体触及或接近带电体。合理选择安全电压,选择漏电保护装置,采用保护接地、保护接零和自动切断等措施,这些都是安全用电中广泛使用的行之有效的技术措施。

安全管理工作必须贯彻“安全第一、预防为主”的方针,必须有具体的安全组织措施,要建立安全管理机构和制度,加强对职工的安全教育,加强对电工的培训和考核,定期进行安全检查,特别要注意对建筑工地露天电气设备的检查,检查有无漏电、绝缘老化等现象,一旦发现不安全因素,必须即时予以排除,不能留下隐患。

必要而合理的规章制度是人们长期生产实践的经验总结,是用来确保电气设备正常运行和保护电气作业人员安全的有效措施。例如移动电具,电焊机、水泵、电钻、电风扇等的安全规程要认真执行,对这些移动电具必须定时检查其绝缘,且绝缘电阻不得低于  $2M\Omega$ ,外壳应有明显的接地螺丝和可靠的接地线,使用时金属外壳决不允许漏电且必须可靠接地。其它如停电检修安全规程,临时用电装置的安全规程,工作票制度,安全操作、运行和检修制度等,都与安全生产有直接关系,都是防止触电事故的必不可少的措施,必须严格遵守,认真执行。

## 习 题

6-1 雷电的种类及各自的防雷措施。

6-2 某厂有一变电所,高  $10m$ ,其最远的一角距离一高  $60m$  的烟囱  $50m$  远。烟囱上装一根  $2.5m$  高的避雷针,试计算此避雷针能否保护这座变电所?

6-3 某工厂一座  $30m$  高的水塔附近,建有一个高度为  $8m$  的变电所,距离如图 6-17 所示。水塔上面装有一支  $2m$  高的避雷针,试问该避雷针能否保护这一变电所?

6-4 画单支独立避雷针  $h=18m$  时的保护范围图?

6-5 有三支避雷针,分别装在边长  $30m$  的等边三角形三个顶点上,避雷针高  $20m$ ,试求在  $h_r=8m$  水平面避雷针的保护范围,并给出保护范围图。

6-6 什么叫避雷带?为什么建筑物采用避雷带既可防直击雷,又可防止感应雷?

6-7 什么叫保护接地和保护接零?各适用于什么场合?为什么有了保护接零还要重复接地?

6-8 试述电流对人体的危险及其影响因素。

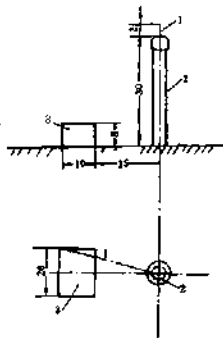


图 6-17 某变电所防雷保护范围  
1—避雷针;2—水塔;  
3—变电所(图中长度单位为  $m$ )

附录：部分电气设备的技术参数

附表1 LJ型裸铝导线的电阻和感抗

导线型号	LJ-16	LJ-25	LJ-35	LJ-50	LJ-70	LJ-95	LJ-120	LJ-150	LJ-185	LJ-240
电阻/ $\Omega \cdot (\text{km})^{-1}$	1.98	1.28	0.92	0.64	0.46	0.34	0.27	0.21	0.17	0.132
线间几何均距/m	感 抗 $X_0/\Omega \cdot (\text{km})^{-1}$									
0.6	0.358	0.344	0.324	0.322	0.312	0.303	0.295	0.287	0.231	0.273
0.8	0.377	0.362	0.352	0.341	0.330	0.321	0.313	0.305	0.299	0.291
1.0	0.390	0.376	0.366	0.355	0.344	0.335	0.327	0.319	0.313	0.305
1.25	0.404	0.390	0.380	0.369	0.358	0.349	0.341	0.333	0.327	0.319
1.5	0.416	0.402	0.392	0.380	0.369	0.360	0.353	0.345	0.339	0.330
2.0	0.434	0.420	0.410	0.398	0.387	0.378	0.371	0.363	0.356	0.348
2.5	0.448	0.434	0.424	0.412	0.401	0.392	0.385	0.377	0.371	0.362
3.0	0.459	0.445	0.435	0.424	0.413	0.403	0.396	0.388	0.382	0.374
3.5	—	—	0.445	0.433	0.423	0.413	0.406	0.398	0.392	0.383

附表2 LGJ型钢芯铝绞线的电阻和感抗

导线型号	LGJ-16	LGJ-25	LGJ-35	LGJ-50	LGJ-70	LGJ-95	LGJ-120	LGJ-150	LGJ-185	LGJ-240	LGJ-300	LGJ-400
电阻/ $\Omega \cdot (\text{km})^{-1}$	2.04	1.38	0.95	0.65	0.46	0.33	0.27	0.21	0.17	0.132	0.137	0.082
线间几何均距/m	感 抗 $X_0/\Omega \cdot (\text{km})^{-1}$											
1.0	0.387	0.374	0.359	0.351	0.345	0.334	0.327	0.319	0.311	—	—	—
1.25	0.401	0.388	0.373	0.365	0.359	0.347	0.341	0.333	0.323	—	—	—
1.5	0.412	0.400	0.385	0.376	0.365	0.354	0.347	0.340	0.335	—	—	—
2.0	0.430	0.418	0.403	0.397	0.383	0.372	0.365	0.358	0.351	—	—	—
2.5	0.444	0.432	0.417	0.408	0.397	0.386	0.379	0.372	0.365	0.357	—	—
3.0	0.456	0.443	0.428	0.420	0.409	0.398	0.391	0.384	0.377	0.369	—	—
3.5	0.466	0.453	0.438	0.429	0.418	0.406	0.400	0.394	0.386	0.378	0.371	0.362

附表3 10kV 变压器技术参数

型号及容量 /kVA	低压侧额定电压 /kV	连接组	损耗/kW		阻抗电压 /%	空载电流 /%	重量 /t	孔距 /mm
			空载	短路				
SJL <sub>1</sub> -20	0.4	Y/Y <sub>0</sub> -12	0.12	0.59	4	8	0.2	
SJL <sub>1</sub> -30	0.4	Y/Y <sub>0</sub> -12	0.16	0.83	4	6.6	0.26	
SJL <sub>1</sub> -40	0.4	Y/Y <sub>0</sub> -12	0.19	0.98	4	4.7	0.3	
SJL <sub>1</sub> -50	0.4	Y/Y <sub>0</sub> -12	0.22	1.15	4	5.4	0.34	
SJL <sub>1</sub> -63	0.4	Y/Y <sub>0</sub> -12	0.26	1.4	4	4.6	0.45	
SJL <sub>1</sub> -80	0.4	Y/Y <sub>0</sub> -12	0.31	1.7	4	4.2	0.48	
SJL <sub>1</sub> -100	0.4	Y/Y <sub>0</sub> -12	0.35	2.1	4	3.8	0.52	
SJL <sub>1</sub> -125	0.4	Y/Y <sub>0</sub> -12	0.42	2.4	4	3.2	0.68	
SJL <sub>1</sub> -160	0.4	Y/Y <sub>0</sub> -12	0.5	2.9	4	3.0	0.81	550
SJL <sub>1</sub> -200	0.4	Y/Y <sub>0</sub> -12	0.58	3.6	4	2.8	0.94	550
SJL <sub>1</sub> -250	0.4	Y/Y <sub>0</sub> -12	0.68	4.1	4	2.6	1.1	550
SJL <sub>1</sub> -315	0.4	Y/Y <sub>0</sub> -12	0.8	5	4	2.4	1.3	550
SJL <sub>1</sub> -400	0.4	Y/Y <sub>0</sub> -12	0.93	6	4	2.3	1.5	640
SJL <sub>1</sub> -500	0.4	Y/Y <sub>0</sub> -12	1.1	7.1	4	2.1	1.82	640
SJL <sub>1</sub> -630	0.4	Y/Y <sub>0</sub> -12	1.3	8.4	4	2.0	2	660
SJL <sub>1</sub> -800	0.4	Y/Y <sub>0</sub> -12	1.7	11.5	4.5	1.9	2.9	820
SJL <sub>1</sub> -1000	0.4	Y/Y <sub>0</sub> -12	2.0	13.7	4.5	1.7	3.44	820
SJL <sub>1</sub> -1250	0.4	Y/Y <sub>0</sub> -12	2.35	16.4	4.5	1.6	4.0	820
SJL <sub>1</sub> -1600	0.4	Y/Y <sub>0</sub> -12	2.85	2.0	4.5	1.5	5.2	820

续附表 3

型号及容量 /kVA	额定电压 /kV	连接组	损耗/kW		阻抗电压 /%	空载电流 /%	总重 /t	铁心 /mm
			空载	短路				
SJL <sub>1</sub> -630	6.3	Y/Δ-11	1.4	9.3	5.5	2.0	2.17	660
SJL <sub>1</sub> -800	6.3	Y/Δ-11	1.7	11.5	5.5	1.9	2.72	820
SJL <sub>1</sub> -1000	6.3	Y/Δ-11	2.0	13.7	5.5	1.7	3.33	820
SJL <sub>1</sub> -1250	6.3	Y/Δ-11	2.35	16.4	5.5	1.6	3.98	820
SJL <sub>1</sub> -1500	6.3	Y/Δ-11	2.85	20	5.5	1.5	4.72	820
SJL <sub>1</sub> -2000	6.3	Y/Δ-11	3.3	24	5.5	1.4	5.4	1070
SJL <sub>1</sub> -2500	6.3	Y/Δ-11	3.9	27.5	5.5	1.3	6.3	1070
SJL <sub>1</sub> -3150	6.3	Y/Δ-11	4.5	33	5.5	1.2	7.2	1070
SJL <sub>1</sub> -4000	6.3	Y/Δ-11	5.5	39	5.5	1.1	8.6	1070
SJL <sub>1</sub> -5000	6.3	Y/Δ-11	6.5	45	5.5	1.1	10.2	1070
SJL <sub>1</sub> -6300	6.3	Y/Δ-11	7.9	52	5.5	1.0	11.85	1070
SJL <sub>1</sub> -8000	6.3	Y/Δ-11	9.4	70	10	0.85	13.7	1435
SJL <sub>1</sub> -10000	6.3	Y/Δ-11	11.2	92	12	0.8	16.7	1435
SJL-20	0.4	Y/Y <sub>0</sub> -12	0.2	0.6	4.5	10	0.26	
SJL-30	0.4	Y/Y <sub>0</sub> -12	0.27	0.84	4.5	9	0.32	
SJL-50	0.4	Y/Y <sub>0</sub> -12	0.39	1.3	4.5	8	0.43	
SJL-100	0.4	Y/Y <sub>0</sub> -12	0.65	2.3	4.5	7.5	0.69	
SJL-1000	0.4	Y/Y <sub>0</sub> -12	4.1	14	4.5	5	4.3	
SJL-1000	6.3	Y/Δ-11	4.1	14	5.5	5	4.2	
SF-10000	6.3	Y/Δ-11	12	100	12			
SJL-75	0.4	Y/Y <sub>0</sub> -12	0.51	1.7	4.5	7.5	0.46	
SJL-180	0.4	Y/Y <sub>0</sub> -12	0.95	3.6	4.5	7	1.07	660
SJL-240	0.4	Y/Y <sub>0</sub> -12	1.28	4.5	4.5	7	1.26	660
SJL-320	0.4	Y/Y <sub>0</sub> -12	1.4	5.7	4.5	7	1.59	660
SJL-420	0.4	Y/Y <sub>0</sub> -12	1.7	7.05	4.5	6.5	1.84	820
SJL-560	0.4	Y/Y <sub>0</sub> -12	2.25	8.6	4.5	6	2.33	820
SJL-750	0.4	Y/Y <sub>0</sub> -12	3.35	11.5	4.5	6	3.62	820
SJL-1800	0.4	Y/Y <sub>0</sub> -12	6.0	22	4.5	4.5	6.77	1070
SJL-1800	6.3	Y/Δ-11	6.0	22	5.5	4.5	6.17	1070
SJL-3200	6.3	Y/Δ-11	9.1	34	5.5	4.0	10.53	
SJL-5600	6.3	Y/Δ-11	13.6	53	5.5	4.0	15.5	
SFL-7500	6.3	Y/Δ-11	9.3	86.1	10	0.9		
SFL-15000	6.3	Y/Δ-11	14.3	116	10.5	0.8	20.9	

注:1. 8000, 10000kV 变压器有 SF<sub>1</sub>、SSPL<sub>1</sub> 两种新型号。

2. 10kV 变压器额定电压有 0.4、3、15、6、3kV 三种, 3、15、6、3kV 的变压器参数相同, 只写出 6、3kV 的为代表。

附表4 35kV 变压器技术数据

型号及容量 /kVA	高压侧额定电压 /kV	连接组	损耗/kW		阻抗电压 /%	空载电流 /%	重量 /t
			空载	短路			
SJL <sub>1</sub> -50	0.4	Y/Y <sub>0</sub> -12	0.3	1.1	6.5	6.5	0.75
SJL <sub>1</sub> -100	0.4	Y/Y <sub>0</sub> -12	0.43	2.5	6.5	3.53	1.03
SJL <sub>1</sub> -160	0.4	Y/Y <sub>0</sub> -12	0.59	3.6	6.5	2.8	1.3
SJL <sub>1</sub> -250	0.4	Y/Y <sub>0</sub> -12	0.8	4.8	6.5	2.3	1.73
SJL <sub>1</sub> -400	0.4	Y/Y <sub>0</sub> -12	1.1	6.9	6.5	1.69	2.15
SJL <sub>1</sub> -630	0.4	Y/Y <sub>0</sub> -12	1.57	9.7	6.5	1.91	2.76
SJL <sub>1</sub> -1000	0.4	Y/Y <sub>0</sub> -12	2.2	14	6.5	1.5	4.08
SJL <sub>1</sub> -1600	0.4	Y/Y <sub>0</sub> -12	2.9	20.3	6.5	1.2	5.15
SJL <sub>1</sub> -160	10.5	Y/Δ-11	0.64	3.8	6.5	2.8	1.46
SJL <sub>1</sub> -200	10.5	Y/Δ-11	0.76	4.4	6.5	2.5	1.7
SJL <sub>1</sub> -250	10.5	Y/Δ-11	0.88	5.0	6.5	2.3	1.9
SJL <sub>1</sub> -315	10.5	Y/Δ-11	1.03	6.1	6.5	2.1	2.11
SJL <sub>1</sub> -400	10.5	Y/Δ-11	1.2	7.2	6.5	1.89	2.4
SJL <sub>1</sub> -500	10.5	Y/Δ-11	1.43	8.4	6.5	1.65	2.91
SJL <sub>1</sub> -630	10.5	Y/Δ-11	1.7	9.7	6.5	1.37	3.21
SJL <sub>1</sub> -800	10.5	Y/Δ-11	1.9	11.7	6.5	1.58	3.7
SJL <sub>1</sub> -1000	10.5	Y/Δ-11	2.2	14	6.5	1.5	4.17
SJL <sub>1</sub> -1250	10.5	Y/Δ-11	2.6	17	6.5	1.3	4.67
SJL <sub>1</sub> -1600	10.5	Y/Δ-11	3.07	20	6.5	1.36	5.47
SJL <sub>1</sub> -2000	10.5	Y/Δ-11	3.6	24	6.5	1.2	6.3
SJL <sub>1</sub> -2500	10.5	Y/Δ-11	4.2	27.9	6.5	1.2	7.04
SJL <sub>1</sub> -3150	10.5	Y/Δ-11	5.0	33	7	1.1	8.33
SJL <sub>1</sub> -4000	10.5	Y/Δ-11	5.9	39	7	0.9	9.56
SJL <sub>1</sub> -5000	10.5	Y/Δ-11	6.9	45	7	0.9	11.2
SJL <sub>1</sub> -6300	10.5	Y/Δ-11	8.2	52	7.5	0.7	12.82
SFL <sub>1</sub> -7500	10.5	Y/Δ-11					
SFL <sub>1</sub> -8000	11	Y/Δ-11	13	57	7.5	1.5	11.75
SFL <sub>1</sub> -10000	11	Y/Δ-11	11.8	68	7.5	1.5	13.65
SFL <sub>1</sub> -15000	11	Y/Δ-11	16.1	92	8	1.0	20.1
SFL <sub>1</sub> -1600	11	Y/Δ-11					
SFL <sub>1</sub> -20000	11	Y/Δ-11	22	115	8	1.0	30.1
SFL <sub>1</sub> -31500	11	Y/Δ-11	30	117	8	0.7	40.5
SSPL <sub>1</sub> -10000Y	6.3	Y <sub>0</sub> /Δ-11	12	70	7.5	1.5	15.5
SSPL <sub>1</sub> -60000	10.5	Y <sub>0</sub> /Δ-11			8.5		51.5

注:35kV 变压器高压侧额定电压有 0.4、3、15(2.3)、6.3(6.6)、10.5(11)kV 四种,3.15(3.3)、6.3(6.6)、10.5(11)kV 的变压器参数相同,只写出 10.5(11)kV 的为代表,1600kVA 以上容量变压器,高压侧额定电压有 35kV(降压变),38.5kV(升压变)两种。

附表 5 500V 塑壳断路器长柄连接装置允许载流量表

导线截面/mm <sup>2</sup>	芯线结构		塑壳明装设/A		允许负荷电流/A				允许负荷电流/A							
	25℃		30℃		25℃		30℃		25℃		30℃					
	额定电压/kV	额定电流/A	额定电压/kV	额定电流/A	安全距离/mm	穿金属管	穿塑料管	穿金属管	穿塑料管	安全距离/mm	穿金属管	穿塑料管				
1.0	1.14	4.21	19	20	16	15	14	12	13	11	10	14	13	12	10	9
1.5	1.37	4.6	27	28	25	22	20	19	17	16	15	13	10	17	16	15
2.5	1.76	5.0	35	38	32	30	28	25	23	22	20	26	24	22	21	22
4	2.24	5.45	45	42	42	39	37	33	30	33	30	26	35	31	28	33
6	2.73	6.2	56	55	54	51	49	43	38	43	38	34	46	40	36	42
10	3.34	7.8	85	75	80	70	68	60	53	59	52	46	64	56	50	56
16	4.08	8.1	105	108	96	86	77	69	76	68	60	52	84	75	65	72
25	4.91	9.6	130	135	120	105	95	85	80	80	72	65	100	90	80	85
35	5.84	11.2	160	165	150	140	122	110	98	131	114	103	117	103	92	105
50	6.97	13.4	200	205	185	175	154	137	125	160	140	123	144	128	115	135
70	8.31	15.6	250	255	230	215	193	173	155	201	181	162	182	164	145	165
95	9.84	18.1	300	305	275	260	235	210	240	245	220	197	224	203	182	205
120	11.5	21.0	350	355	320	300	270	245	275	250	227	260	252	229	200	234
150	13.4	24.0	400	405	360	340	310	280	320	290	265	318	300	282	259	271
185	15.6	27.5	470	475	430	410	375	340	370	340	310	360	340	310	285	315
240	18.4	32.0	560	565	510	490	450	410	450	410	370	430	400	360	400	370

注：塑壳断路器允许工作温度+65℃。

附表 6 300V 铅芯绝缘导线长期连续载重允许载流量表

导线 截面 mm <sup>2</sup>	导线结构			塑料绝缘导线多根同穿在一根管内时， 塑料绝缘导线多根同穿在一根管内时， 允许载流量/A																							
	导线规格/A			25℃				30℃				25℃				30℃											
	单芯 绝缘 导线 根数	绝缘 材料	规格 /mm <sup>2</sup>	穿金属管 2根	穿金属管 3根	穿塑料管 2根	穿塑料管 3根	穿金属管 2根	穿金属管 3根	穿塑料管 2根	穿塑料管 3根	穿金属管 2根	穿金属管 3根	穿塑料管 2根	穿塑料管 3根	穿金属管 2根	穿金属管 3根	穿塑料管 2根	穿塑料管 3根								
2.3	1	L-78	3.0	27	25	23	21	19	17	15	12	10	18	15	14	20	18	13	16	4	19	17	14	17	15	13	
4	1	L-24	5.5	35	32	33	30	28	25	23	20	18	23	22	21	27	24	22	24	22	19	25	22	21	22	21	20
6	1	L-73	6.3	45	42	42	39	37	34	30	26	23	28	27	24	35	32	28	31	27	24	35	32	28	31	27	25
10	7	L-33	7.8	65	59	61	55	52	46	40	35	29	43	37	41	38	33	49	44	38	42	38	33	46	41	36	39
16	7	L-68	8.3	85	80	80	75	66	59	52	45	42	58	49	54	49	43	63	56	50	53	49	44	59	52	47	51
25	7	L-110	9.1	110	105	103	98	86	76	68	58	50	71	64	72	64	56	80	70	65	73	65	57	75	65	61	68
35	7	L-138	11.3	138	130	129	122	106	94	83	74	63	89	79	89	79	69	100	90	80	90	80	70	94	84	75	84
50	19	L-181	13.8	175	165	164	154	138	118	105	100	108	95	124	110	88	112	101	89	125	110	100	114	102	90	117	103
70	19	L-141.6	16.0	205	206	192	165	150	133	123	135	120	134	140	124	143	126	132	155	143	127	145	130	115	145	134	119
95	19	L-240	18.3	265	250	248	234	200	180	160	184	165	150	187	168	150	172	154	140	190	170	152	175	158	140	178	159
120	37	L-202	20.3	310	—	290	—	230	210	190	210	190	210	197	178	197	178	159	—	—	—	—	—	—	—	—	—
150	37	L-242	22.3	360	—	337	—	260	240	220	250	227	205	243	224	206	234	212	192	—	—	—	—	—	—	—	—

注：导线绝缘最高允许工作温度+65℃。



## 习题答案

### 第一章

1-3  $I_1=0.33\text{ A}$   $I_2=0.2\text{ A}$   $I_3=0.13\text{ A}$   $U_1=9.9\text{ V}$   $U_2=2\text{ V}$   $U_3=1.95\text{ V}$

1-5 (1)5.2 A (2)208 V (3)6 V (4)220 V (5)220 A

1-6  $U_A=-5.625\text{ V}$

1-7  $U_A=-5\text{ V}$

1-8  $I_1=10\text{ A}$   $I_2=-4\text{ A}$   $I_3=6\text{ A}$

1-9  $U_A=2.37\text{ V}$

1-10  $I_1=3\text{ A}$   $I_2=\frac{3}{2}\text{ A}$   $I_3=3\text{ A}$   $I_4=\frac{3}{2}\text{ A}$

1-11 (1)1.14 A (2)11.4 V (3)13 W (4)13.65 W (5)0.65 W

1-12  $I_2=1.33\text{ A}$

1-13  $I_1=10\text{ A}$   $I_2=-5\text{ A}$   $I_3=5\text{ A}$

1-14  $I_1=3\text{ mA}$

1-15  $I_2=6\text{ mA}$

1-15  $I_2=3\text{ A}$

1-17  $I_1=30\text{ A}$   $I_2=18\text{ A}$   $I_3=12\text{ A}$

1-18  $I_1=6\text{ A}$

1-19  $I_1=0.4\text{ A}$   $U_{AB}=8\text{ V}$

### 第二章

2-2  $i=0.45\sqrt{2}\sin(314t-45^\circ)\text{ A}$

2-3 (1) $i_m=25\angle 45^\circ\text{ A}$  (2) $u=200\sin(\omega t-80^\circ)\text{ V}$

2-4  $i=7\sin(\omega t-23.1^\circ)\text{ A}$

2-5  $u=381\sqrt{2}\sin(\omega t+30^\circ)\text{ V}$

2-6  $i=33\angle -57.5^\circ\text{ A}$

2-7 (1)0.273 A (2)807  $\Omega$  (3)9 kWh

2-8  $i=70\angle -90^\circ\text{ A}$

$Q_1=15400\text{ Var}$

$X_L=62.8\Omega$

$i=1.59\angle -90^\circ\text{ A}$

2-9  $X_C=63.7\Omega$

$i=3.45\angle 90^\circ\text{ A}$

$Q=759\text{ Var}$

$$I = 69.2 \text{ A}$$

2-10  $u = 100\sqrt{2}\sin\omega t \text{ V}$   $i = 117.9\sqrt{2}\sin(\omega t - 32^\circ) \text{ A}$

2-11  $R = 8.66 \Omega$   $X_L = 5 \Omega$

2-12  $\dot{U}_R = 80 \angle 37^\circ \text{ V}$   $\dot{U}_L = 60 \angle 27^\circ \text{ V}$   $\dot{U}_C = 120 \angle -53^\circ \text{ V}$   $U = 100 \angle 0^\circ \text{ V}$

2-13  $I = 0.367 \text{ A}$   $U_R = 103 \text{ V}$   $U_L = 190 \text{ V}$

2-14 (1)  $P = 80 \text{ W}$   $Q = 60 \text{ var}$   $S = 100 \text{ VA}$  (2)  $\cos\phi = 0.8$

2-15  $I_1 = 0.71 \text{ A}$   $I_2 = 0.25 \text{ A}$   $I = 0.56 \text{ A}$

2-16  $I_1 = 44 \angle -53^\circ \text{ A}$   $P_1 = 5808 \text{ W}$   $Q_1 = 7744 \text{ var}$   $S_1 = 9680 \text{ VA}$   $I_2 = 22 \angle 60^\circ \text{ A}$

$P_2 = 2420 \text{ W}$   $Q_2 = -4190 \text{ var}$   $S_2 = 4840 \text{ VA}$   $I = 40.7 \angle -23.3^\circ \text{ A}$   $P = 8228 \text{ W}$   $Q = 3550 \text{ var}$   $S = 8950 \text{ VA}$

2-17  $I_1 = 15.6 \text{ A}$   $I_2 = 11 \text{ A}$   $U = 220 \text{ V}$   $R = 10 \Omega$   $L = 0.0318 \text{ H}$   $C = 159 \mu\text{F}$

2-18  $22.4 \text{ A}$

2-19  $C = 111.7 \mu\text{F}$   $I = 5.79 \text{ A}$

2-20 (1)  $I_A = 20 \angle 0^\circ \text{ A}$   $I_B = 10 \angle -120^\circ \text{ A}$   $I_C = 10 \angle 120^\circ \text{ A}$   $I_N = 10 \angle 0^\circ \text{ A}$

(2)  $I_A = 11.5 \angle 30^\circ / 30^\circ \text{ A}$   $\dot{U}_A = 127 \angle 30^\circ \text{ V}$   $\dot{U}_N = 254 \angle 30^\circ \text{ V}$

(3)  $I_A = -34.5 \angle 150^\circ \text{ A}$   $I_B = 17.3 \angle -90^\circ \text{ A}$   $I_C = 45.8 \angle -89.5^\circ \angle -89.5^\circ \text{ A}$

2-21  $I_{AN} = 19 \angle 0^\circ \text{ A}$   $I_{BN} = 12.7 \angle -120^\circ \text{ A}$   $I_{CN} = 9.5 \angle 120^\circ \text{ A}$

### 第三章

3-1  $I_1 = 1.47 \text{ A}$   $I_2 = 22 \text{ A}$

3-2  $I_1 = 2 \text{ A}$   $N_2 = 250 \text{ 匝}$

3-3  $I_{1N} = 10 \text{ A}$   $I_{2N} = 434.8 \text{ A}$   $\Delta U = 1.74\%$

3-4  $K = 43.5$   $\cos\phi_0 = 0.08$

3-5  $N = 166 \text{ 匝}$   $I_{1N} = 3.03 \text{ A}$   $I_{2N} = 45.45 \text{ A}$

3-6  $N = 16 \text{ 匝}$

3-9  $S_N = 0.04$

3-12 (1)  $P_1 = 4.65 \text{ kW}$  (2)  $I_{1N} = 8.3 \text{ A}$   $I_{1\Delta} = 14.4 \text{ A}$  (3)  $T_{1N} = 26.4 \text{ N} \cdot \text{m}$   
(4)  $S_N = 0.033$

2-13 (1)  $S_N = 0.01$  (2)  $P_1 = 80.9 \text{ kW}$   $I_{1N} = 139.8 \text{ A}$  (3)  $I_{1\Delta} = 978.6 \text{ A}$   
(4)  $T_{1N} = 482.3 \text{ N} \cdot \text{m}$

3-14  $I_{1N} = 11.64 \text{ A}$   $I_{1\Delta} = 81.5 \text{ A}$   $T_{1N} = 80.3 \text{ N} \cdot \text{m}$   $T_{1\Delta} = 80.3 \text{ N} \cdot \text{m}$

3-15 (1)  $I_{1\Delta} = 230.3 \text{ A}$   $I_{1N} = 76.7 \text{ A}$

### 第四章

4-2  $I = 22 \text{ A}$   $\Delta P = 14.5 \text{ kW}$

4-3  $\Delta P = 47.8 \text{ kW}$   $\Delta P = 132.6 \text{ kW}$

4-7  $S_N = 27.2 \text{ kVA}$   $I_N = 41.3 \text{ A}$

4-8  $P_N = 54 \text{ kW}$   $Q_N = 58 \text{ kvar}$   $S_N = 79 \text{ kVA}$   $I_N = 120 \text{ A}$  选 SJ-100/10 变压器

- 4-9  $P_{js}=524.8 \text{ kW}$   $Q_{js}=347.5 \text{ kvar}$   
4-10  $P_{js}=20.9 \text{ kW}$   $Q_{js}=32.7 \text{ kvar}$   $S_{js}=38.8 \text{ kvA}$   $I_{js}=58.9 \text{ A}$   
4-11  $\Delta U_{0A}=180 \text{ V}$   $\Delta U_{0B}=292 \text{ V}$   $\Delta U_{AB}=112 \text{ V}$   
4-12  $S=26.2 \text{ mm}^2$  选  $35 \text{ mm}^2$  橡皮绝缘铝线  
4-13  $\Delta U_{AB}=26 \text{ V}$   $\delta_1=0.26\%$   
4-14  $I_{js}=45 \text{ A}$  选  $10 \text{ mm}^2$  橡皮铝芯线  
 $I_{js}=71 \text{ A}$  选  $80 \text{ A}$

## 第五章

- 5-2  $E=6.2 \text{ lx}$   $l=55.7 \text{ cd}$   
5-3  $E=116 \text{ lx}$   $l=465 \text{ cd}$   
5-6  $E_{js}=52 \text{ lx}$   $E_{ms}=40 \text{ lx}$   
5-7  $k_f=0.59$   
5-8  $\Sigma P=2189 \text{ W}$   
5-9 2套  
5-10  $N=2$ 套  
5-11  $\Sigma P=720 \text{ W}$   $N=9$ 套  
5-12  $I_{jsA}=28.5 \text{ A}$   $I_{jsB}=27 \text{ A}$   $I_{js}=33 \text{ A}$   $I_{js}=29.7 \text{ A}$   
5-13  $I_{jsr}=160 \text{ cd}$   $I_{jsv}=128 \text{ cd}$

## 第六章

- 6-2  $r_s=52 \text{ m}$  能保护  
6-3  $l=27 \text{ m}$  能保护  
6-4  $r=27 \text{ m}$   
6-5  $\delta_s=11.55 \text{ m}$

## 参 考 文 献

- [1] 秦曾煌主编.《电工学》(第四版).北京:高等教育出版社,1990
- [2] 伍爱莲编.《电工技术》.北京:高等教育出版社,1990
- [3] 孙裕生主编.《电工学基本教程》(第二版).北京:高等教育出版社,1990
- [4] 沈世焯编.《电路与电机》.北京:高等教育出版社,1986
- [5] 刘式虚主编.《建筑电工技术》.上海:上海科学技术文献出版社,1988
- [6] 胡乃定主编.《民用建筑电气技术与设计》.北京:清华大学出版社,1993
- [7] 江苏省建筑工程局编.《建筑电工》.上海:上海科学技术出版社,1988
- [8] 建筑电气设备手册编写组.《建筑电气设备手册》.北京:中国建筑工业出版社,1986
- [9] 高礼魁主编.《电工学》.北京:高等教育出版社,1991
- [10] 鹿毓凤编.《建筑应用电工》.北京:中国建筑工业出版社,1987
- [11] 黄纯华、刘维仲编.《工厂供电》.天津:天津大学出版社,1992
- [12] 汪德澍主编.《城镇工矿企业电气技术工人培训教材》.昆明:云南科技出版社,1990