

# 第一篇 电气工程基础篇

# 第一章 电气工程基础理论

## 第一节 电路及其基本定律

### 一、电路的内涵

#### (一) 电路的物理量

1. 电流 当我们合上电源开关的时候,电灯就会发光,电炉就会发热,电动机就会转动,这是因为在电路中有电流通过的缘故。电流虽然用肉眼看不见,但是可以通过它的各种表现而被人们所觉察。

那么什么叫做电流呢?电流是电荷(带电粒子)有规则的定向运动而形成的。如图 1-1 所示,若将电源开关闭合,灯泡就会发光,从灯泡闪光的一瞬间开始,就发生了电荷向一定方向的移动。

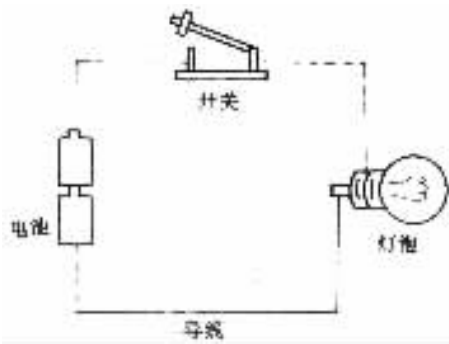


图 1-1 简单电路

(1) 电流的大小和单位 表征电流强弱的物理量叫做电流强度,简称电流,用字母“ $I$ ”或“ $i$ ”表示。

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,即

$$i = dq/dt$$

如果电流不随时间而变化,即  $dq/dt = \text{常数}$ ,则这种电流称为恒定电流,简称直流,常用大写字母  $I$  表示。

即

$$I = q/t$$

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(SI)中,电流的单位名称是安培,简称安,用符号 A 表示。并规定每秒钟通过导线截面的电量为 1 库时的电流为 1 安。电流的单位也可用千安(kA)、毫安(mA)、微安( $\mu\text{A}$ )或纳安(nA)表示,它们之间的换算关系是:

$$1\text{kA} = 1000\text{A}$$

$$1\text{mA} = 10^{-3}\text{A}$$

$$1\mu\text{A} = 10^{-3}\text{mA}$$

$$1\text{nA} = 10^{-3}\mu\text{A}$$

(2) 电流的方向 实际上,导体中的电流是由负电荷在导体中流动形成的,而我们习惯上规定正电荷运动的方向或负电荷运动的相反方向作为电流的方向(实际方向)。

电流的实际方向是一定的,但在实际电路中,电流的实际方向,往往难以确定。为此,在分析与计算电路时,常可任意选定某一方向作为电流的正方向或称为参考方向。所选电流的正方向并不一定与电流的实际方向一致。当电流的实际方向与其正方向一致时,则电流为正值(图 1-2a);反之,电流为负值(图 1-2b)。因此,在正方向选定之后,电流之值才有正负之分,显然,在未标定正方向的情况下,电流的正或负是毫无意义的。

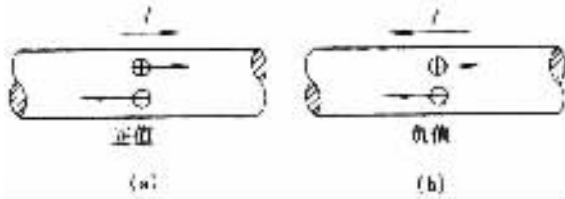


图 1-2 电流的方向

综上所述,导体中的电流不仅具有大小,而且具有方向性。

大小和方向都不随时间而变化的电流为恒定直流,简称直流,如图 1-3a 所示。

方向始终不变,大小随时间而变化的电流称为脉动直流电流,如图 1-3b 所示。

大小和方向均随时间变化的电流称为交流电流,通常其大小和方向随时间作周期性变化,且平均值为零的交流电,简称交流。

工业上普遍应用的交流电流是按正弦函数规律变化的,称为正弦交流电流,如图 1-3c 所示。图 1-3d 所表示的电流,是非正弦交流电流。

2. 电压(电位差)与电位 电路中负载与电源接通后就会有电流通过。电灯发光,是因为电源正负极之间存在电压。电压是电场中两点间的电位差,是变量电场力做功本领的物理量,是产生电流的能力,如图 1-4 所示,在导体内部,单位正电荷自 a 点移动到 b 点,电场力所作的功定义为 a、b 两点间的电压。用  $U_{ab}$  表示。即

$$U_{ab} = \frac{A_{ab}}{Q}$$

式中  $A_{ab}$ ——电场力所做的功,单位为焦(J);

$Q$ ——被移动正电荷的电量,单位为库(C)。

电压有时也叫电位差。电位是电场中某点与零电位之间的电位差,其数值与零电位点的选择有关。供电线路中,通常选择大地的电位为零电位,但在电路中通常以电源的负极作为参考点(零电位)。

若  $\varphi_a$ 、 $\varphi_b$  分别表示 a 点、b 点电位(且 a 点电位高于 b 点电位),若用电压来表示 a、b 两点间的电压,则

$$U_{ab} = \varphi_a - \varphi_b$$

在电路中,习惯上将正电荷受电场力方向即电位降方向,定为电压方向。当正电荷顺电场方向由 a 点移向 b 点,电场力作正功,  $U_{ab} > 0$ , 即 a 点电位高于 b 点电位,反之相反。

电流总是从高电位向低电位流动,就像水从高处流向低处一样,电位差愈大即电压愈高,产生的电流就愈大。

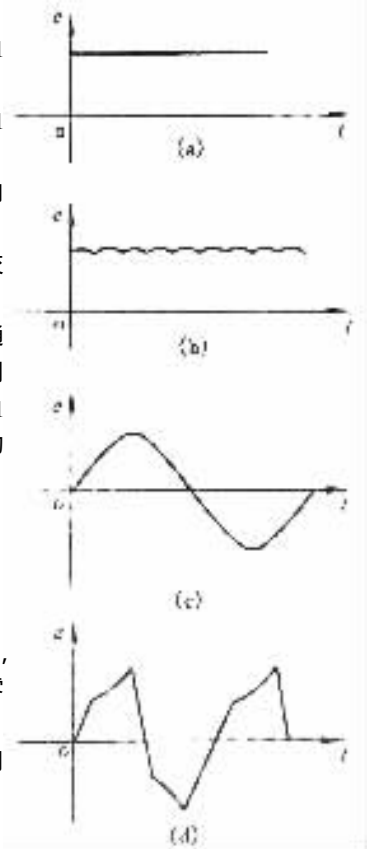


图 1-3 电流的种类

电压通常用  $U$  表示,在国际单位制中,电压的基本单位名称是伏特,简称伏,用字母  $V$  表示。电压的单位也可用千伏(kV)、毫伏(mV)和微伏( $\mu V$ )表示,它们之间的换算关系是:

$$\begin{aligned} 1\text{kV} &= 1000\text{V} \\ 1\text{mV} &= 10^{-3}\text{V} \\ 1\mu\text{V} &= 10^{-3}\text{mV} \end{aligned}$$

3. 电动势 在电路中,电源是维持流过持续的电流,设法不断地向电路补充能量的装置。电源的正、负极之间存在电位差,这是因为电源产生电源力克服电场力所做功的缘故。不同的电源产生电源力的方向不同。例如,蓄电池靠内部的电极与电解液之间的化学反应产生电源力;发电机靠磁场中电磁感应的作用产生电源力。它们分别依靠化学能和机械能将正电荷从低电位(负极)移到高电位(正极)。我们用电动势这个物理量衡量电源力对电荷做功的能力。

在电源内部,电源力把单位正电荷从电源负极(低电位),移到正极(高电位)所做的功叫做电源的电动势,用符号  $E$  表示,单位为伏(V)。即

$$E = \frac{A}{Q}$$

式中  $A$ ——电源力做的功,单位为焦(J);

$Q$ ——被移动电量,单位为库(C)。

在国际单位制中,电动势和电压的单位名称一样,都采用伏特,简称伏(V)。

电源电压与电源电动势在概念上不能混淆。电压指两个电极之间的电位差,它表示电能输出做功的能力;电动势是指电源内部建立电位差的本领,它表明电源依靠化学能或机械能产生电压的能力。

如图 1-5 所示,电源电压  $U_{ab}$ ,也就是  $a$ 、 $b$  两点间的电压,是单位正电荷从  $a$  点(高电位)经导线和负载移到  $b$  点(低电位)所失去的电能。电源电动势  $E$  是在电源内部电源力克服电场力,将单位正电荷从  $b$  点(低电位)移到  $a$  点(高电位)所得到的电能。

通常习惯上,将正电荷所受电源力的方向定为电动势正方向,因此,电动势的正方向是从电源负极到正极的方向,即电位升的方向;电压的正方向是正极到负极的方向,即电位降的方向。因此,电动势的正方向与电压的正方向相反,如图 1-5 所示。

在电路中,电动势的符号如图 1-6 所示。图 1-6a 为电池的表示符号,图 1-6b 为直流发电机的表示符号。电动势和电压的方向如图所示。

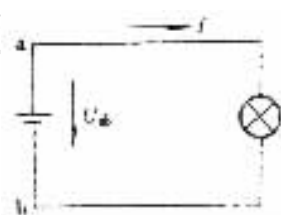


图 1-4 a、b 两点间的电压

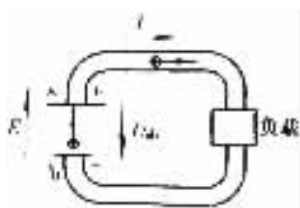


图 1-5 电源电动势和电源电压

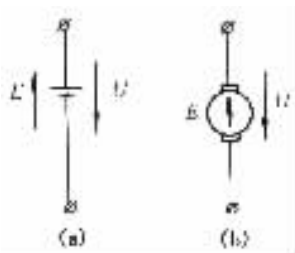


图 1-6 电动势的符号  
(a) 电池 (b) 直流发电机

## (二) 电路的基本参数

电阻、电感和电容是电路的三个基本参数。在电路中,电阻元件发热而消耗能量,是耗能元件;电感元件要产生磁场而储存磁场能量,是储能元件;电容元件要产生电场而储存电场能量,也是储能元件。下面分别介绍电路中电阻、电感、电容的三个基本参数。

1. 电阻 电阻具有阻碍电流流动的本性,表征导体对电流呈现阻碍作用的电路参数叫做电阻,用符号  $R$  表示。电源内部的电阻称为内阻,电源以外导线及负载的电阻称为外电阻。在国际单位制中,电阻的单位

名称是欧姆,简称欧,用希腊字母 $\Omega$ 表示。也可以用千欧( $k\Omega$ )或兆欧( $M\Omega$ )表示。它们之间的关系是

$$1k\Omega = 1000\Omega$$

$$1M\Omega = 1000k\Omega$$

(1) 在一定的温度下,电阻与导体的尺寸及材料有关。

实验证明,金属导体电阻 $R$ 的大小与导体的长度成正比,与导体的截面积成反比,还与材料的导电能力有关。即

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

式中  $l$ ——导体的长度,单位为米(m);

$S$ ——导体的截面积,单位为平方米( $m^2$ );

$\rho$ ——导体的电阻率,单位为欧米( $\Omega \cdot m$ )。

在实际应用时,为了方便,截面 $S$ 的单位常用平方毫米( $mm^2$ );电阻率的单位便是欧平方毫米每米( $\Omega \cdot mm^2/m$ )。计算时,应注意单位的换算。

电阻 $R$ 的倒数称为电导,是表征元件导电能力的电路参数,用符号 $G$ 表示。其国际单位名称是西门子,简称西,用符号 $S$ 表示。即

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

电阻率的倒数叫电导率,用符号 $\gamma$ 表示,单位是西门子每米( $S/m$ )。实际常用西门子米每平方毫米( $S \cdot m/mm^2$ )表示。即

$$G = \gamma \cdot \frac{S}{l}$$

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

不同的材料,有不同的电阻率。表1-1列出了常用电工材料在温度 $20^\circ C$ 时的电阻率。

表1-1 常用电工材料的电阻率和电阻温度系数

用途	材料名称	电阻率 [ $20^\circ C$ ] ( $\Omega \cdot mm^2/m$ )	平均电阻温度系数 $\alpha$ [ $0 \sim 100^\circ C$ ] ( $1/^\circ C$ )
导电材料	碳	10.0	-0.0005
	银	0.0165	0.0036
	铜	0.0175	0.004
	铝	0.0283	0.004
	低碳钢	0.13	0.006
电阻材料	锰铜	0.42	0.000005
	康铜	0.44	0.000005
	镍铬铁	1.0	0.00013
	铝铬铁	1.2	0.00008
	铂	0.106	0.00389

注①表中给出的是近似值。这些数值随着材料纯度和成分的不同而有所变化。

②表中碳的电阻温度系数前有负号,表示碳的电阻值随着温度的升高而降低。

(2) 温度对电阻的影响。实践证明,金属导体的电阻除了决定于材料的性质和导体的几何尺寸外,还受温度的影响。对一般金属来说,温度在 $0 \sim 100^\circ C$ 范围内电阻随着温度的增高而增大,而碳和一些纯净的半导体材料则电阻随着温度的增高而变得愈小。为了计算导体在不同温度下的电阻值,我们把导体温度每升高

1℃时,电阻值增大的百分数叫做电阻的温度系数,用符号 $\alpha$ 表示。在0~100℃之间,导体电阻所增加的相对数值,基本上与温度上升的值成正比。即

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

式中  $R_1$ ——起始温度 $t_1$ 时的导体电阻( $\Omega$ );

$R_2$ ——温度增加到 $t_2$ 时导体电阻( $\Omega$ );

$\alpha$ ——电阻温度系数( $1/^\circ\text{C}$ )。

有些金属或合金,它们处于接近绝对零度(-273℃)时,电阻值会突然下降,甚至变为零,这种现象叫做超导电性。具有这种性质的物体称为超导体。目前,利用低温超导体材料制成的元件,正在广泛应用于电子计算技术、原子能技术等方面。

(3)电阻的种类:电阻分为线性电阻和非线性电阻两种。电阻值 $R$ 只与导体本身的材料和几何尺寸有关,而不随电压或电流的变化而变化,电阻值是一个常量。具有这种特性的电阻元件称为线性电阻。它的电压和电流之间的关系,即伏安特性是一直线,如图1-7a所示。电阻值 $R$ 随电压或电流的变化而变化的电阻元件,称非线性电阻。它的伏安特性是一曲线,图1-7b是二极管的伏安特性。它与直线相差很大,因此,二极管是一种非线性电阻元件。我们提到的电阻,除了特别说明者外均为线性电阻。

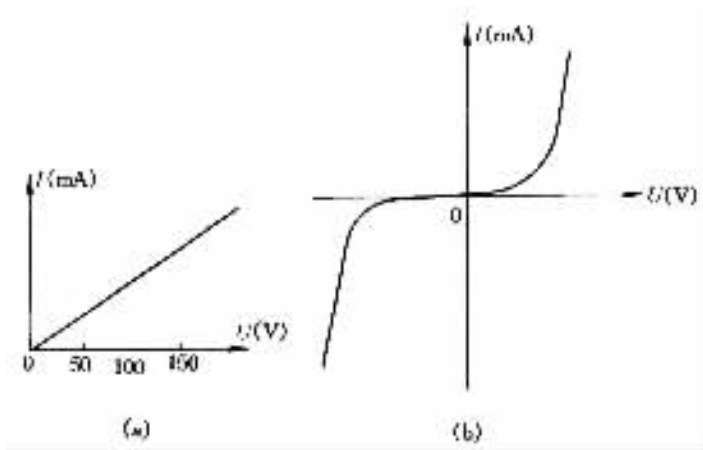


图 1-7 电阻的伏安特性曲线

(a)线性电阻 (b)非线性电阻(二极管)

2. 电感 我们知道,在静止电荷的周围存在着电场,如果电荷运动就形成了电流,在电流的周围就会产生磁场。电和磁是不可分割的统一体,只要有电流存在,它的周围就有磁场。磁场对电流有作用力,载流导体在磁场中受到电磁力的作用,导体在磁场中的运动或变动的磁场能够产生电动势和电流,也就是“动磁生电”。

目前,很多设备如发电机、电动机、继电器、变压器、电工测量仪表等等,都是根据电磁作用原理而制作的。也可以说有电流就有磁现象,有磁现象说明有电流存在,二者既互相联系又互相作用。

为了讲明电感参数,我们首先介绍电磁感应现象和感应电动势的大小和方向。

(1)电磁感应。变动的磁场能够在导体中引起电动势的现象,叫做电磁感应。由电磁感应产生的电动势叫做感应电动势。由感应电动势所引起的电流叫做感应电流。

实验证明,只有在导体作切割磁力线运动时,才会产生电磁感应,而当导体在磁场中平行磁力线左右移动时,是不会产生感应电动势的。

(2)感应电动势的大小和方向。下面分两种情况分别讨论如何确定感应电动势的大小和方向。

①直导体中的感应电动势。当导体对磁场作相对运动而切割磁力线时,导体中感应电动势的大小,取决于磁感强度、导体长度和切割速度。

实验表明,当直导体在均匀磁场中,沿着与磁力线垂直的方向运动时,所产生的感应电动势的大小 $e$ ,与导线的有效长度 $L$ 、导线的运动速度 $V$ 、磁感应强度 $B$ 成正比。即

$$e = B \cdot L \cdot V$$

式中  $B$ ——磁感应强度,单位名称是特斯拉(T),也就是韦伯/米<sup>2</sup>(Wb/m<sup>2</sup>),以前也常用电磁制单位高斯(Gs)表示。它们的关系是

$$1T = 10^4(Gs)$$

$L$ ——导线的有效长度(m);

$V$ ——导线在垂直于磁力线向上运动的速度(m/s)。

磁感应强度的大小

$$B = \frac{F}{I \cdot L}$$

或

$$B = \frac{\Phi}{S}$$

式中  $F$ ——载流导线受到的电磁力(N);

$L$ ——与磁场方向垂直的导线长度(m);

$I$ ——导线中流过的电流(A);

$\Phi$ ——磁通,单位是韦(Wb)。

磁感应强度  $B$  和磁通  $\Phi$  既有联系又有区别。 $B$  是描述磁场内各点性质的物理量,而磁通  $\Phi$  是用来描述磁场内某一个面上磁场状况的物理量。

感应电动势的方向按发电机右手定则确定,如图 1-8 所示。即把右手伸开,手心迎着磁力线,大拇指指向导体运动的方向,其余四指所指的方向就是感应电动势的方向。感应电流的方向与感应电动势的方向一致。

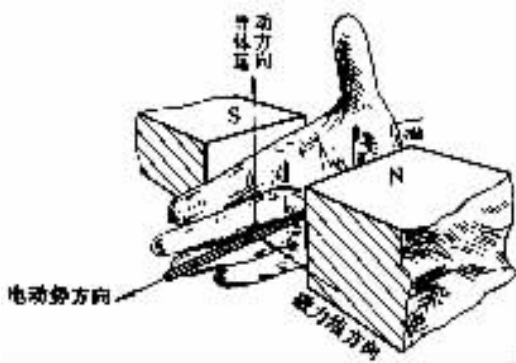


图 1-8 发电机右手定则

必须指出,感应电流只有在闭合回路中才能产生,其大小除了与感应电动势的大小有关外,还与电路中电阻的大小有关。而导体中的感应电动势则不论电路是否闭合,只要切割磁力线就会产生,其大小与回路中的电阻无关。

当导体在磁场中产生感应电动势时,导体便成了电源。若把它的两端和外电路接通形成闭合回路时,它就能输出一定的电能。借助于磁场把机械能转变为电能,这就是发电机的基本原理,如图 1-9 所示。

②线圈中的感应电动势。当线圈回路中的磁通发生变化时,回路中产生的感应电动势的大小,取决于磁通变化的速度(即磁通变化率)和线圈的匝数。

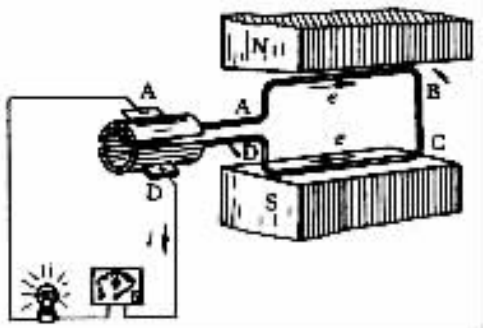


图 1-9 发电机绕组中的感应电动势

实验表明,线圈中的感应电动势的大小与磁通变化率成正比,与线圈的匝数成正比。即

$$e = N \left| \frac{d\Phi}{dt} \right|$$

线圈中产生的感应电动势的方向,可以根据楞次定律应用线圈的右手螺旋定则来确定。

楞次定律指出:感应电动势的方向,总是企图阻止回路中磁通的变化。也就是当磁通要增加时,感应电流要产生新的磁通反抗它的增加;当磁通要减少时,感应电流要产生新的磁通去反抗它的减少。

右手螺旋定则指出:回路中磁通变化时,大拇指指向磁通变化的反方向,四指则指感应电动势的方向。如图 1-10 所示,图中  $\Phi$  为原磁通, $\Phi'$  为感应电动势产生的磁通,图 1-10a 为  $\Phi$  增加时,图 1-10b 为  $\Phi$  减小时。

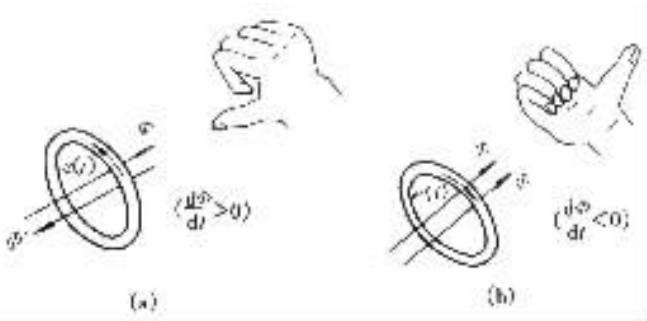


图 1-10 应用楞次定律来确定感应电动势方向

习惯上规定感应电动势的正方向与磁通的正方向之间符号右手螺旋定则(图 1-11),当磁通  $\Phi$  增大时, $e$  为负值,即  $d\Phi/dt > 0$  时, $e < 0$ ;反之,为正值,即  $d\Phi/dt < 0$  时, $e > 0$ 。

因此,感应电动势的公式可写成

$$e = - \frac{d\Phi}{dt}$$

对于  $N$  匝

$$\begin{aligned} e &= - N \frac{d\Phi}{dt} \\ &= - \frac{d\Psi}{dt} \end{aligned}$$

式中  $\Psi$ ——磁链, $\Psi = N\Phi$ ,即与线圈各匝相链的磁通总和。

(3)自感应和电感。线圈中通有电流就产生磁场。当电流变化时,线圈中的磁通也跟着变化,因此线圈内便产生感应电动势。这种由于线圈自身电流变化而产生感应电动势的现象,叫做自感应。由此产生的感应电动势叫做自感电动势,用符号  $e_L$  表示。自感电动势是感应电动势的一种,所以自感电动势的大小和方向可以用电磁感应定律来确定。

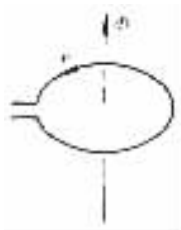


图 1-11  $\Phi$  的正方向与  $e$  的正方向之间符合右螺旋定则

体现线圈自身产生自感电动势能力的物理量,叫做自感量,简称自感,也叫电感,用符号  $L$  表示。在国际单位制中,电感的基本单位名称是亨利,简称亨,用 H 表示。还常用毫亨(mH)或微亨( $\mu\text{H}$ )表示。它们之间的关系是

$$1\text{mH} = 10^{-3}\text{H}$$

$$\mu\text{H} = 10^{-6}\text{H}$$

实验证明,当线圈中没有铁磁材料时,线圈的磁链(或磁通)和电流成正比。即

$$\Psi = N\Phi = Li$$



或

$$L = \frac{\Psi}{i} = \frac{N\Phi}{i}$$

式中  $L$ ——比例常数 称为线圈的电感(自感)。

线圈的匝数  $N$  愈多,其电感愈大,线圈中单位电流产生的磁通量愈大,电感也愈大。可见,电感  $L$  在数值上等于单位电流所产生的磁通链,所以电感  $L$  是表示电感线圈产生磁通链能力的物理量。将磁链  $\Psi = Li$  代入式中,则得

$$e_L = -L \cdot \frac{di}{dt}$$

$e_L$  称为自感电动势。即自感电动势的大小和线圈中电流的变化率成正比。其方向总是阻碍线圈电流的变化。因而,自感电动势实际上总是力图维持线圈内的电流不变。

一个线圈电感的大小决定于线圈的结构。(如匝数、尺寸、有无铁芯、铁芯的形状和磁性质等)。譬如,一个铁芯线圈的电感比空心线圈的电感大得多。所以常常把导体绕成的线圈叫做电感线圈。

实验证明,密绕的长线圈,若截面为  $S(m^2)$ ,长度为  $l(m)$ ,匝数为  $N$ ,介质的磁导率为  $\mu(H/m)$ ,则其电感  $L$  为:

$$L = \frac{\mu \cdot S \cdot N^2}{l}$$

3. 电容 电容器是一种能够储存电荷的元件,在电子电路中利用电容器来实现滤波、移相、隔直、旁路、选频等作用;在电力系统中利用电容器来改善系统的功率因数,以减少电能的损失和提高电气设备的利用率。

两块用绝缘体隔开但又互相接近的金属导体,就构成了一个电容器。组成电容器的金属板叫做极板。两极板间绝缘材料叫做绝缘介质,可采用空气、纸、云母、油、塑料等材料。电容器在电路中的符号用“ $\text{⊕}$ ”表示。

如图 1-12 所示,把电容器的两个极板分别接到电压为  $U$  的直流电源上,于是,在电源电压  $U$  的作用下,就会有电荷流向电容器,形成电流。由于电容器极板间是绝缘的,电荷通不过,因此电荷会聚积在电容器的极板上。正电荷聚积在与电源正极相连的极板上,负电荷聚积在与电源负极相连的极板上。两个极板上的电荷聚积过程,叫做电容器的“充电”过程。相反,电容器极板上电荷的释放过程,叫做电容器的“放电”过程。

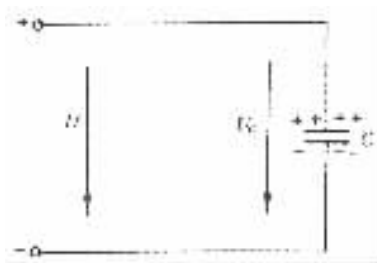


图 1-12 电容器与直流电源接通

由于电容器两个极板上聚积了正、负电荷,在电容器极板间便产生了电位差,用  $U_C$  表示。电源电压  $U$  和电容电压  $U_C$  对电荷来说作用是相反的。电源电压  $U$  是促使电荷向极板上聚积,而电容电压  $U_C$  则阻止电荷的聚积。极板上聚积的电荷越多, $U_C$  越大,电路中流过电流越小。当电容器电压等于电源电压时,电路中再没有电荷的移动,电流就为零,电源电压对电容器的充电就停止。这时电容器的极板上聚积着一定的电荷。

实验证明,电容器所充的电量,即电容器极板上所储集的电量  $Q$  与其极板上电压成正比,即

$$Q = CU \text{ 或 } C = \frac{Q}{U}$$

式中  $C$  为比例常数,称为电容器的电容量,简称电容。它的国际单位名称是法拉,用符号  $F$  表示。工程上多采用微法( $\mu F$ )或皮法( $pF$ )。它们之间关系是:

$$1\mu\text{F} = 10^{-6}\text{F}$$

$$1\text{pF} = 10^{-6}\mu\text{F}$$

电容器电容  $C$  的大小与电容器本身的结构有关。实验证明,平行板电容器的电容  $C$  和极板的面积  $S$  成正比,和极板之间距离  $d$  成反比,还与极板间的绝缘材料( $\epsilon/\text{F/m}$ )有关。即

$$C = \frac{\epsilon \cdot S}{d}$$

当将电容器接于交流电源时,电容器便开始周期性充电和放电。当极板上的电量  $Q$  或电压  $U$  发生变化时,在电路中就要产生电流。即

$$i = \frac{dQ}{dt} = C \cdot \frac{dU}{dt}$$

可见,电容电路中电流与电压的变化率成正比。上式是在  $U$  和  $i$  的正方向相同的情况下得出的,否则要加一负号。

### (三)电路的基本定律

1. 欧姆定律 欧姆定律是在电路中表示电压、电流、电阻之间关系的最基本的电路定律。

(1) 部分电路欧姆定律。部分电路包括一段无源支路和一段有源支路。

① 一段无源支路的欧姆定律。如图 1-13 所示,电阻  $R$  的两端在电压  $U$  的作用下,电阻中会有电流流过。

实验证明,流过电阻  $R$  的电流  $I$ ,与电阻两端的电压  $U$  成正比,与电阻  $R$  成反比。即

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

这一规律称为欧姆定律。式中电流单位名称为安培(A),电压单位名称为伏特(V),电阻单位名称为欧姆( $\Omega$ )。

若引用电导( $G$ )后,欧姆定律还可以写成

$$I = CU$$

式中  $G$ ——电导( $G = 1/R$ ),单位名称为西门子(S)。



图 1-13 一段无源支路

由上式说明,当加在电阻上的电压不变时,电阻越小,通过的电流越大,反之相反,如果电阻保持不变,则外加电压越大,通过的电流也越大。另一方面,当电流流过电阻时,要引起电位的降落。通常电流与电阻的乘积,称为该电阻上的电压降。如

$$IR = U$$

② 一段有源支路的欧姆定律。当电路中有电源时称为有源支路。如图 1-14 所示,在一段有源支路中,电流的大小与电压和电动势的代数和成正比,与支路电阻成反比。即

$$I = \frac{(U + E)}{R}$$

这叫做有源支路的欧姆定律。

应注意的是,在支路中电动势的方向是电位升的方向,而电压的方向是电位降的方向。如果上式中  $E$  或  $U$  与电流  $I$  的参考方向不一致,则  $E$  或  $U$  应加负号,如图 1-14b、c 所示。

(2) 全电路欧姆定律。全电路指一个含有电源的闭合回路。如图 1-15 所示,在含有一个电源的闭合回

路中,电源电动势为  $E$ ,电源内阻为  $R_0$ ,负载电阻为  $R$ 。实验证明,在全电路中,通过电路中的电流与电源电动势成正比,与负载电阻和电源内阻之和成反比。即

$$I = \frac{E}{R + R_0}$$

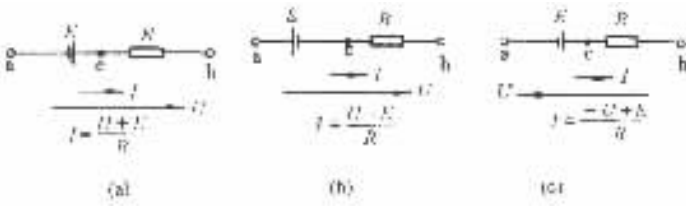


图 1-14 一段有源支路

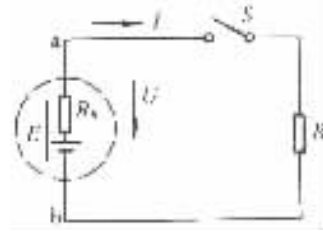


图 1-15 含有一个电源的闭合回路

这叫做全电路欧姆定律。因为  $IR = U$ ,所以上式可写为

$$E = U + IR_0$$

$$U = E - IR_0$$

或

式中  $U$ ——电源的端电压;

$IR_0$ ——电源的内部电压降。

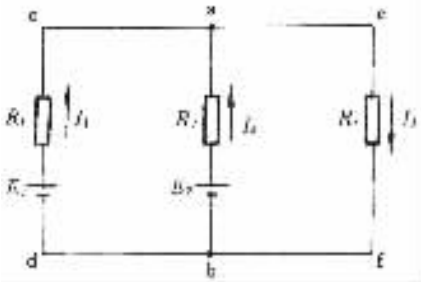


图 1-16 复杂的闭合回路

上式表明,电路闭合时电源的端电压等于电源电动势减去内部电压降。

2. 基尔霍夫定律 基尔霍夫定律是在复杂电路中,表述各支路电流之间、各元件电压之间基本关系的定律。

(1)基尔霍夫电流定律(简称 KCL)。电路中能通过同一电流的每个分支叫做支路,几条支路(三个或三个以上支路)的联接点叫做节点,电路中任一闭合路径叫做回路。如图 1-16 中,有 a 点、b 点两个节点和 cabd、aefb、cefd 三个回路。

基尔霍夫电流定律指出,在任一瞬间流入某一节点的电流的总和等于流出该节点电流的总和。如图 1-16 的节点 a,可写成

$$I_1 + I_2 = I_3$$

由于电流具有方向性,所以一般规定,流入节点的电流为正,流出节点的电流为负。可将上式改写为:

$$I_1 + I_2 - I_3 = 0$$

由于电流的连续性,电路中任何一个节点均不能聚积电荷。因此,任一瞬间电路中任一节点上,电流的代数和恒等于零。即

$$\sum I = 0$$

这就是基尔霍夫电流定律的一般表达式。

在列出节点电流方程之前,先要标定电流的参考方向。电流的代数量,本身有正负值,当电流实际方向与参考方向一致时,电流为正值;反之相反。

如图 1-17 中,  $I_1 = 2A$ ,  $I_2 = -3A$ ,

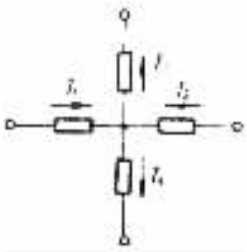


图 1-17 例题中的电路

$I_3 = -2A$  ,试求  $I_4$

解 :由基尔霍夫电流定律可列出

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

$$2A - (-3A) + (-2A) - I_4 = 0$$

$$\text{得 } I_4 = 3A$$

节点电流定律不仅适用于电路中的任意节点,而且还可以推广应用于任意假定的闭合面。即通过任一闭合面的电流的代数和也等于零。

例如 图 1-18 的电路共有三个节点,六个支路,设各支路电流的参考方向如图所示。

解 根据 KCL

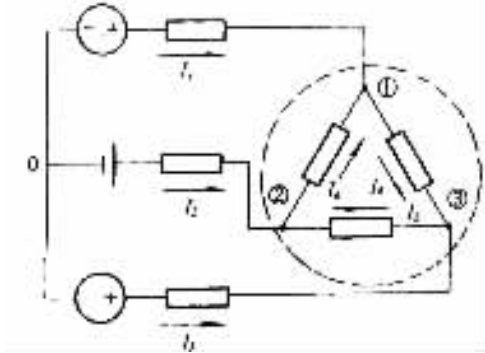


图 1-18 例题中的电路

$$\text{节点① } I_1 = I_4 - I_6$$

$$\text{节点② } I_2 = I_6 - I_5$$

$$\text{节点③ } I_3 = I_5 - I_4$$

将三式相加可得

$$I_1 + I_2 + I_3 = 0$$

可见,对于假想的闭合面

$$\sum I = 0$$

(2)基尔霍夫电压定律(简称 KVL)。其尔霍夫电压定律指出,在任一回路中,沿某一方向绕行回路一周,电位升的总和等于电位降的总和。即回路中各段电压的代数和恒等于零。即

$$\sum U = 0$$

例如 图 1-19 中,如果规定电压升取正号,电压降取负号,按照绕行方向,可列出

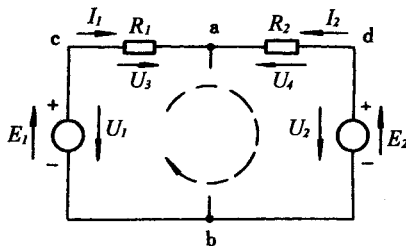


图 1-19 例题中的回路

$$U_1 + U_4 = U_2 + U_3$$

或将上式改写为

$$U_1 - U_2 - U_3 + U_4 = 0$$

$$\sum U = 0$$

即

图 1-19 所示的回路是由电源电动势和电阻构成的,上式可改写为

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

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

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

或  
即

上式为基尔霍夫电压定律在电路中的另一种表达式。由此可见,在电路的任一闭合回路中,电动势的代数和等于电阻上电压降的代数和。

例:有一闭合回路如图 1-20 所示。各支路的元件是任意的,已知:  $U_1 = 4V$ ,  $U_3 = 3V$ ,  $U_4 = -9V$  试求 (1)  $U_2$  (2)  $U_5$ 。

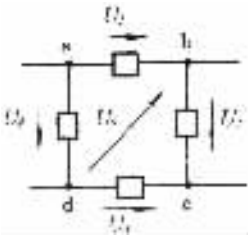
解(1):从 a 点出发,顺时针方向绕行一周,根据基尔霍夫电压定律可得

$$U_1 + U_2 - U_3 - U_4 = 0$$

$$U_2 = U_3 + U_4 - U_1$$

$$= 3V + (-9V) - 4V$$

$$= -10V$$



则

图 1-20 闭合回路

$U_2$  为负值,说明它的实际方向与图中所假设的方向相反。

解(2):abda 虽然不是闭合回路,也可以应用基尔霍夫定律列出

$$U_1 - U_5 - U_4 = 0$$

$$U_5 = U_1 - U_4$$

$$= 4V - (-9V)$$

$$= 13V$$

则

如果循着 bedb 路径也可得

$$U_5 = 13V$$

### (四) 电压源与电流源及其等效变换原理

一个电源可以用两种不同的等效电路来表示。用电压形式表示的电源称电压源,用电流形式表示的电源称电流源。

1. 电压源 任何一个电源,即含有电动势  $E$  和内阻  $R_0$ 。在分析电路中,往往把它们看成由一个电动势  $E$  和一个内阻  $R_0$  串联所构成的等效电源,该电源称为电压源,如图 1-21 所示。

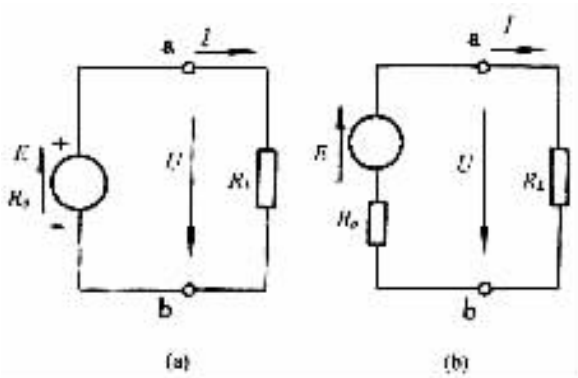


图 1-21 电压源电路

由图(b)所示的电路,可得出

$$U = E - IR_0$$

由此可作出,电压源的外特性曲线,如图 1-22 所示。

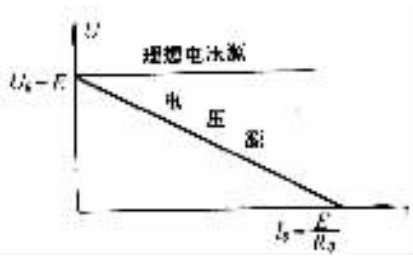


图 1-22 电压源和理想电压源的外特性曲线

当电源内阻  $R_0 \rightarrow 0$  时,电压  $U$  恒等于电动势  $E$ ,是一定值,而其中的电流  $I$  则是任意的,由负载电阻  $R_L$  及电压  $U$  本身确定。这样的电源称为理想电压源或恒压源。其外特性曲线如图 1-22 所示。

理想电压源是理想电源。如果一个电源的内阻远小于负载电阻  $R_L$  时,即  $R_0 \ll R_L$  时,其端电压基本恒定,即  $U \approx E$ ,则可以认为是理想电压源。通常稳压电源也可认为是理想电压源。

2. 电流源 电源除用电动势  $E$  和内阻  $R_0$  串联的等效电路表示外,还可以用另一种等效电路表示,如图 1-23 所示。两条支路并联,其中电流分别为  $I_S$  和  $U/R_0$ 。这种用恒定不变的电流  $I_S$  和内阻  $R_0$  的并联来等效的电源,称为电流源。

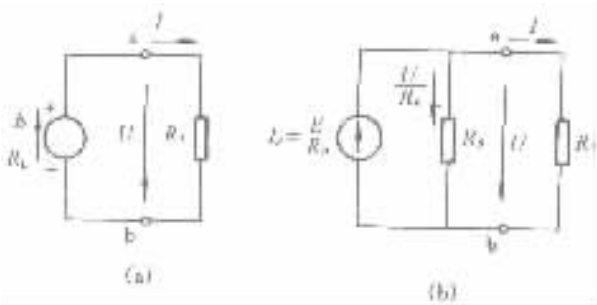


图 1-23 电流源电路

由图 1-23b 所示的电路,可得出

$$I = I_S - \frac{U}{R_0}$$

由此可作出电流源的外特性曲线,如图 1-24 所示。

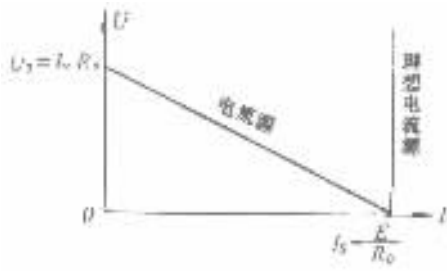


图 1-24 电流源和理想电流源的外特性曲线

理想电流源也是理想电源。如果一个电源的内阻远大于负载电阻  $R_L$  时,即  $R_0 \gg R_L$  时,则  $I \approx I_S = E/R_0$  基本恒定,可以认为是理想电流源。通常晶体管可近似地认为是理想电流源。

3. 等效变换原理 电压源和电流源在对外部电路等效的条件下,即保持外特性不变的条件下,可以等效变换。

由电压源中可知

$$U = E - IR_0$$

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

由电流源中可知

$$U = I_S R'_0 - IR'_0$$

$$I = I_S - \frac{U}{R'_0}$$

比较上面两式,可知,当两种电源外特性相同时,必须

$$E = I_S R'_0$$

$$I_S = \frac{E}{R'_0}$$

显然,当满足  $R'_0 = R_0$ ;  $E = I_S R_0$  或  $I_S = E/R_0$  关系时,两者可以互换。

所以,  $E$  和  $R_0$  串联的电压源,可以等效为  $I_S$  和  $R_0$  并联的电流源,其中  $I_S = E/R_0$  为电源的短路电流;  $I_S$  与  $R_0$  并联的电流源,可以等效为  $E$  和  $R_0$  串联的电压源,其中  $E = I_S R_0$  为电源的开路电压。如图 1-25 所示。

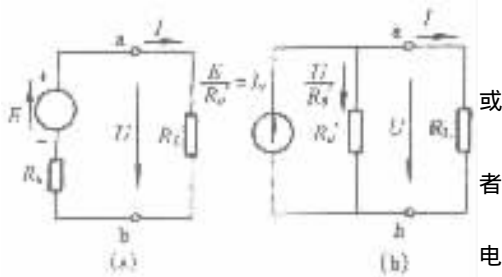


图 1-25 电源的两种等效电路

等效变换时注意以下几点:

- (1) 等效变换只是对外电路而言,对电源内部并不等效。
- (2) 理想电压源与理想电流源之间不能进行等效变换。
- (3) 两种电源中  $R_0$  是一样的,但联接方式不同。
- (4)  $E$  和  $I_S$  的方向应该一致,即电压源电动势的正极应该是电流源的流出端。

上面所讲的电源的两种等效电路,实际上,一种是电动势为  $E$  的理想电压源和内阻  $R_0$  串联的电路(参见图 1-21b);一种是电流为  $I_S$  的理想电流源和  $R_0$  并联的电路(参见图 1-23b)。

因此,在分析与计算电路时,只要一个电动势为  $E$  的理想电压源和某个电阻  $R$  串联的电路,都可以化为一个电流为  $I_S$  的理想电流源和这个电阻并联的电路,等效变换,如图 1-26 所示。其中  $I_S = E/R_0$  或  $E = I_S R_0$ 。

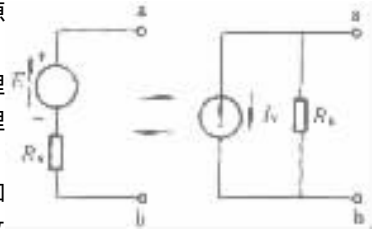


图 1-26 电压源和电流源的等效变换

## 二、电路的基本定律

### (一) 叠加定理

叠加定理阐述线性电路中激励与响应之间的关系,定理内容为:在任何由线性元件组成的电路中,有多个激励时,元件的响应(电压或电流)是各个激励单独作用时所产生的响应的代数和。所谓单独作用是指一个独立电源作用,其他独立电源全部置零,即电压源短路,电流源开路。

若  $f(t)$  表示  $m$  个激励共同作用时的响应,  $f_1(t), f_2(t), \dots, f_m(t)$  分别表示各激励单独作用时产生的响应,则叠加定理的数学表达式为

$$f(t) = f_1(t) + f_2(t) + \dots + f_m(t) = \sum_{k=1}^m f_k(t)$$

应用叠加定理时应注意:

- (1) 叠加定理适用于所有的线性电路,对于非线性电路则不适用;
- (2) 受控源不能作为激励单独作用于电路,除源时也不能简单地开路或短路,而是要保留;

(3) 因为功率不是电压或电流的一次函数,应用叠加定理来计算元件上的功率时,必须用叠加后的电流或电压,否则会失去“交叉乘积项”;

(4) 响应叠加时应注意参考方向。

叠加定理的相量形式为

$$\dot{f} = \dot{f}_1 + \dot{f}_2 + \dots + \dot{f}_m = \sum_{k=1}^m \dot{f}_k$$

复频域形式为

$$f(s) = f_1(s) + f_2(s) + \dots + f_m(s) = \sum_{k=1}^m f_k(s)$$

叠加定理用途很广,在线性电路的分析计算中,几乎到处都可用。例如,非正弦电源作用于电路的响应等于各次谐波电源单独作用时的响应之叠加;又如动态电路瞬态分析,电路的全响应等于零输入响应与零状态响应之叠加。

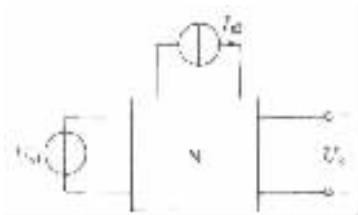


图 1-27 例题的电路图

线性电路的可加性一般称为叠加定理。从叠加定理可推出齐次性原理。在线性电路中,若激励增大(或缩小) $K$ 倍,则响应亦增大(或缩小) $K$ 倍,称为齐次性原理。

例题 如图 1-27 所示电路,设  $N$  为线性无源网络。已知  $U_{s1} = 8V, I_{s2} = 12A$  时,  $U_x = 80V$ ;  $U_{s1} = -8V, I_{s2} = 4A$  时,  $U_x = 0$ 。求  $U_{s1} = 2V, I_{s2} = 2A$  时的  $U_x$ 。

解 解压  $U_x$  与电路中的各独立电源之间的关系,满足叠加定理和齐次性原理。

设  $U_{s1}$  单独作用时,端口处的响应为  $U_{x1}$ ,即,

$$U_{s1} K_1 = U_{x1}$$

上式中  $K_1$  为比例系数。

同样,  $I_{s2}$  单独作用时,响应为  $U_{x2}$ 。若其比例系数为  $K_2$ ,则有

$$I_{s2} K_2 = U_{x2}$$

当  $U_{s1}$  和  $I_{s2}$  共同作用时,由叠加定理可得

$$U_{s1} K_1 + I_{s2} K_2 = U_{x1} + U_{x2} = U_x$$

根据给出的条件,则有

$$\begin{cases} 8K_1 + 12K_2 = 80 \\ -8K_1 + 4K_2 = 0 \end{cases}$$

解上述联立方程,可得  $K_1 = 2.5, K_2 = 5$ 。因此,当  $U_{s1} = 2V$  和  $I_{s2} = 2A$  时,得

$$U_x = 2 \times 2.5 + 2 \times 5 = 15V$$

## (二) 戴维南定理和诺顿定理

### 1. 戴维南定理

任意一个线性有源两端网络  $N_A$  [图 1-28(a)],都可以等效为戴维南网络[图 1-28(b)],图中  $U_0$  为  $N_A$  的开路电压,  $R_0$  为  $N_A$  除源后的等效电阻。定理所说的等效,是对外接负载而言的,即图 1-28(a)和(b)两端接相同的负载时,则端口上有相同的电压和电流,而对于两个网络的内部并不等效。

### 2. 诺顿定理

任何一个线性有源两端网络  $N_A$  [图 1-29(a)],对外接负载电路来说,都可以等效为诺顿网络[图 1-29(b)],图中  $I_s$  为  $N_A$  端口短路时的电流,  $R_0$  为  $N_A$  除源后的等效电阻。



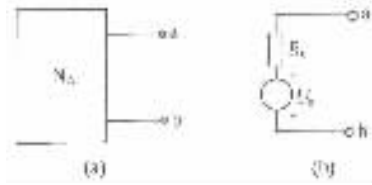


图 1-28 戴维南定理

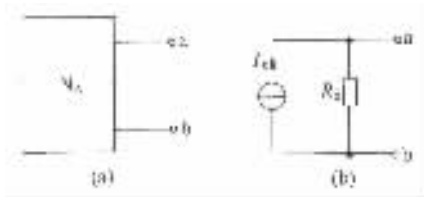


图 1-29 诺顿定理

诺顿定理和戴维南定理是对偶的,是电路中非常有用的两个定理,这两个定理的最大优点是能把一个复杂的有源线性网络等效为一个最简单的有源二端网络,从而极大简化了分析计算工作。例如只需计算网络中某一支路的电压或电流时,可将除掉这一支路外的其余部分用一有源线性二端网络来置换,这样处理后求解则是十分方便的。

应用戴维南(诺顿)定理时应注意的几个问题。

- (1) 定理规定的条件是,被等效置换的有源二端网络必须是线性的,外接电路可以是线性的,也可以是非线性的,有源的。
- (2) 当外接电路与被等效网络之间有磁耦合、控制与受控制关系时,定理不适用。
- (3) 当被等效网络中有受控源时,等效电阻要用“加压求流”或“开路电压除端口短路电流”的方法来求,而不能用串并联法来求,求得的等效电阻可能是正值,也可能是负值。
- (4) 在画等值电压源(电流源)时应注意极性,要与开路电压(短路电流)相一致。

例题 如图 1-30(a) 电路中,  $R_1 = 1\Omega$ ,  $R_2 = 2\Omega$ ,  $I_{s3} = 3A$ ,  $R_4 = 4\Omega$ ,  $\mu = 2$ , 试用戴维南定理求电压  $U_4$ 。

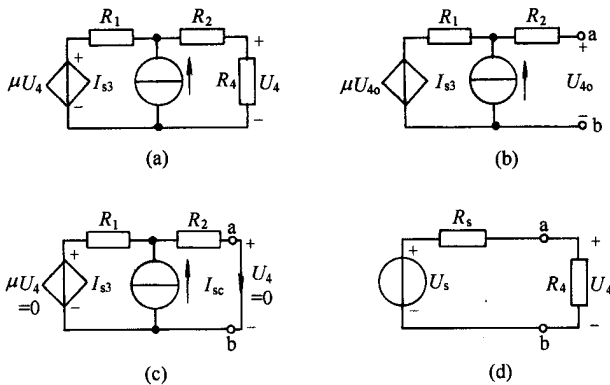


图 1-30 例题的电路图

解 应用戴维南定理求解时必须做三件工作,即求出网络的开路电压  $U_o$ 、等效电阻  $R_o$  和做出其等值电路图。

(1) 开路电压  $U_o$ 。将图(a)网络中  $R_4$  移去,剩下部分为有源二端网络,如图(b)所示。图中

$$U_{4o} = R_1 I_{s3} + \mu U_{4o}$$

$$U_{4o} = \frac{R_1 I_{s3}}{1 - \mu} = \frac{1 \times 3}{1 - 2} = -3V$$

(2) 等效电阻  $R_0$ 。图(b)电路 ab 短接后如图(c)所示, 图中  $U_4 = 0$ , 所以受控源  $\mu U_4 = 0$ , 短路电流  $I_{sc}$  由分流得

$$I_{sc} = \frac{R_1}{R_1 + R_2} \cdot I_{s3} = \frac{1}{1+2} \times 3 = 1\text{A}$$

所以, 等值电阻

$$R_0 = \frac{U_{40}}{I_{sc}} = -\frac{3}{1} = -3\Omega$$

(3) 做出戴维南等值电路 等效网络如图(d)所示。注意极性, 可得

$$U_4 = \frac{R_4 U_s}{R_0 + R_4} = \frac{4}{-3+4}(-3) = -12\text{V}$$

### (三) 特勒根定理

特勒根定理和基尔霍夫定律一样, 是电路理论中一个重要定理。特勒根定理应用很广, 例如可以方便地证明复功率守恒、互易定理等。

#### 1. 特勒根定理一

对于一个具有  $n$  个节点和  $b$  条支路的网络, 若取各支路电流与电压的参考方向一致, 则有

$$\sum_{k=1}^b u_k \cdot i_k = 0$$

式中  $u_k$  和  $i_k$  分别是电路  $n$  的支路电压和支路电流, 它表明在任何瞬间, 一个网络中全部支路吸收(或发出)的功率代数和等于零, 即整个网络的功率是平衡的, 因此特勒根定理一又称为特勒根功率定理。

#### 2. 特勒根定理二

设两个拓扑图相同的集总参数网络  $N$  和  $\hat{N}$ , 取各对应支路电压和电流参考方向一致, 并分别用  $i$ 、 $u$  和  $\hat{i}$ 、 $\hat{u}$  表示, 对于任何瞬间, 有

$$\sum_{k=1}^b u_k \cdot \hat{i}_k = 0$$

和

$$\sum_{k=1}^b \hat{u}_k \cdot i_k = 0$$

上式每一项均为电压和电流相乘, 具有功率的量纲, 但电压和电流不是在同一网络内, 又非真实功率, 因此特勒根定理二习惯上称为似功率定理。

应用特勒根定理时应注意, 电压和电流必须满足 KCL 和 KVL 的约束。

例如图 1-31(a) 和(b) 共有 3 个节点和 4 条支路, 各支路上电压和电流方向如图中所示, 不管支路元件性质如何, 都用一条线段代替, 并分别用  $b_1$ 、 $b_2$ 、 $b_3$  和  $b_4$  表示, 节点用 1、2 和 3 表示, 则图(a) 和(b) 可画成图(c), 具有相同的拓扑结构。设图(a) 为  $N$  网络, 图(b) 为  $\hat{N}$  网络, 根据 KCL 和 KVL, 可得

$$\begin{aligned} \hat{u}_1 i_1 + \hat{u}_2 i_2 + \hat{u}_3 i_3 + \hat{u}_4 i_4 &= 20 \times (-3) + 8 \times 3 + 12 \times 2 + 12 \times 1 \\ &= -60 + 24 + 24 + 12 = 0 \end{aligned}$$

从而验证了特勒根定理二。

很显然, 图 1-31(a) 和(b) 网络中电源发出的功率等于电阻消耗的功率, 也验证了特勒根定理一。

### (四) 电路等效变换

电路等效变换, 是简化电路分析和计算的一种手段。所谓等效变换, 是指将电路中的一部分变成新的电路, 该新电路与原来电路的元件参数、连接方式等不同, 但对未变换部分的电路却保持着原来的电压和电流, 亦即变换前后, 对未变换部分有相同的外特性。

#### 1. 星形网络和三角形网络的等效变换

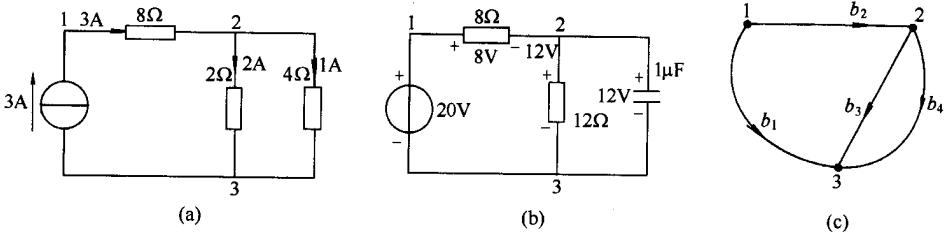


图 1-31 网络图

(a) N 网络 (b) N 网络 (c) 线图

星形网络与三角形网络的等效变换见表 1-2。

表 1-2 星形网络与三角形网络的等效变换

<p>电路图</p>		
<p>变换公式</p>	<p>星形变换为三角形</p> $R_{12} = \frac{R_1 R_2 + R_2 R_3 + R_3 R_1}{R_3}$ $R_{23} = \frac{R_{12} + R_2 R_3 + R_3 R_1}{R_1}$ $R_{31} = \frac{R_{12} + R_2 R_3 + R_3 R_1}{R_2}$	<p>三角形变换为星形</p> $R_1 = \frac{R_{31} R_{12}}{R_{12} + R_{23} + R_{31}}$ $R_2 = \frac{R_{12} R_{23}}{R_{12} + R_{23} + R_{31}}$ $R_3 = \frac{R_{23} R_{31}}{R_{12} + R_{23} + R_{31}}$
<p>参数对称</p>	$R_{12} = R_{23} = R_{31} = R_{\Delta} \quad R_1 = R_2 = R_3 = R_Y$ $R_{\Delta} = 3R_Y$	

2. 对称网络的等效变换

对称网络的等效变换见表 1-3。

表 1-3 对称网络的等效变换

名称	变换前网络	变换后网络	备注
正向对称			与对称轴 Y-Y 相交的支路电流 $i_1$ 、 $i_2$ 和 $i_3$ 为零
反向对称			网络 $N_0$ 对称, 但电源极性相反。与对称轴 Y-Y 相交的各支路间电压为零, 即 $u_{12} = u_{23} = u_{31} = 0$

3. 两种电源模型的等效变换

两种电源模型的等效变换见表 1-4。

表 1-4 两种电源模型的等效变换

电路图	
变换公式	$U_s = I_s \cdot R_0 \text{ 或 } I_s = \frac{U_s}{R_0}$
备注	方框内的实际电源模型进行变换

## 第二节 电场与电磁场

### 一、电场

#### (一) 静电场、恒定电场与磁场的边值问题

1. 场的边值问题 均匀媒质内的静电场、恒定电场与磁场的分析都可归结为求解相应的电位函数  $\varphi$ 、磁位函数  $\varphi_m$  和磁矢位函数  $A$  的拉普拉斯方程或泊松方程。将求满足给定边界条件的位函数的拉普拉斯方程或泊松方程的解的问题称为场的边值问题,它有惟一的解答。

2. 泊松方程与拉普拉斯方程 电位函数  $\varphi$  满足泊松方程:

$$\nabla^2 \varphi = -\frac{\rho}{\epsilon} \quad 1.2-1$$

在电荷体密度  $\rho=0$  的区域,  $\varphi$  满足拉普拉斯方程:

$$\nabla^2 \varphi = 0 \quad 1.2-2$$

磁位函数  $\varphi_m$  满足拉普拉斯方程:

$$\nabla^2 \varphi_m = 0 \quad 1.2-3$$

磁矢位  $A$  满足泊松方程:

$$\nabla^2 A = -\mu J \quad 1.2-4$$

在电流密度  $J=0$  的区域,  $A$  满足拉普拉斯方程:

$$\nabla^2 A = 0$$

3. 位函数的定解条件

(1) 场域边界上的边界条件,分别称为第一、二、三类边界条件:

1) 给定边界上的位函数值  $\varphi = f(s)$

2) 给定位函数在边界上的法向导数值  $\frac{\partial \varphi}{\partial n} = g(s)$

3) 前两者的线性组合  $\varphi + f(s) \frac{\partial \varphi}{\partial n} = f_2(s)$

(2) 两种不同媒质的分界面上的衔接条件

1) 电位函数  $\varphi$  的衔接条件

$$\begin{cases} \varphi_1 = \varphi_2 \\ \epsilon_1 \frac{\partial \varphi_1}{\partial n} - \epsilon_2 \frac{\partial \varphi_2}{\partial n} = \sigma \text{ 或 } \gamma_1 \frac{\partial \varphi_1}{\partial n} - \gamma_2 \frac{\partial \varphi_2}{\partial n} = 0 \end{cases} \quad 1.2-5$$

2) 磁位函数  $\varphi_m$  的衔接条件

$$\begin{cases} \varphi_{m1} = \varphi_{m2} \\ \mu_1 \frac{\partial \varphi_{m1}}{\partial n} = \mu_2 \frac{\partial \varphi_{m2}}{\partial n} \end{cases} \quad 1.2-6$$

3) 磁矢位函数  $A$  的衔接条件

$$\begin{cases} A_1 = A_2 \\ \frac{1}{\mu_1} (\nabla \times A_1)_t - \frac{1}{\mu_2} (\nabla \times A_2)_t = K \end{cases} \quad 1.2-7$$

4. 边值问题的求解方法

(1) 直接积分的方法 当场源与场域的形状比较简单,位函数仅是一个坐标的函数,所求解的泊松方程

和拉普拉斯方程为二阶的常微分方程,可采用直接积分的方法求解。

(2)分离变量法 当位函数是两个或三个坐标的函数,但场域的边界与所选择的坐标系中坐标面相吻合时,常采用分离变量法。

先将待求的位函数如  $\varphi(x, y, z)$  分离成两个或三个各自仅含一个坐标的函数的乘积,组成  $\varphi(x, y, z) = X(x)Y(y)Z(z)$ , 把它代入场方程,借助“分离常数”可得每一变量的常微分方程,并分别求得通解,然后组合成偏微分方程的通解,再由边界条件决定分离常数与积分常数,得到位函数的解。

(3)复位函数法 能用来处理场域边界的几何形状比较复杂的问题,如椭圆、多角形截面的电极、偏芯电缆、电机气隙及波导等电磁场问题。它是利用复变函数中解析函数的实部与虚部在复平面  $Z$  的某一区域  $D$  内都满足拉普拉斯方程的特性,当所求解的二维拉普拉斯场域边界与某一解析函数的图形一致时,则此解析函数的实部或虚部就是所求位函数的解。

(4)保角变换法 是利用解析函数  $w = f(Z)$  的保角变换特性,将  $Z$  平面上的边界形状较复杂的场域  $D$ , 以对应的几何方式变换到边界形状较为简单的  $w$  平面,求解后再反变换到  $Z$  平面,获得原问题的解。

(5)镜像法 是边值问题中一种间接求解法,其理论依据是场的惟一性定理。镜像法的基本原理是在求解的场域之外用虚设的镜像电荷或镜像电流等效替代边界上复杂分布的感应电荷、极化电荷或磁化电流等,只要求解区在等效前后满足同一边值问题,则其解答是惟一的。应用镜像法的关键是找到镜像电荷或电流的位置与大小。注意点是解答适用的区域。

5. 静电场与恒定电场和磁场的类比法 在边值问题的分析计算中,根据位场解答的惟一性定理可以采用类比法,即不论位函数的物理意义是否相同,只要它们具有相似的场方程和相似的边值条件,则它们的解答在形式上必完全相似。因而在理论计算和实验研究时可以把某一位场的分析计算及实验结果根据对应关系推广到相同边值问题的其他位场中去。对于由拉普拉斯方程所描述的静电场、恒定电场和磁场,其基本关系式和物理量之间的类比关系见表 1-5 和表 1-6。

表 1-5 导体内(无源部分)恒定电场与  $\rho=0$  区域静电场间的比拟

导体内恒定电场 (无电源部分)	$\text{rot}E = 0$	$\text{div}J = 0$	$J = \gamma E$	$\nabla^2\varphi = 0$	$I = \int J \cdot dS$
静电场( $\rho=0$ )	$\text{rot}E = 0$	$\text{div}D = 0$	$D = \epsilon E$	$\nabla^2\varphi = 0$	$Q = \int D \cdot dS$
物理量间对应关系	$E - E$	$J - D$	$\gamma - \epsilon$	$\varphi - \varphi$	$I - Q$

表 1-6  $\rho=0$  区域静电场与  $J=0$  区域恒定磁场间的类比

静电场( $\rho=0$ )	$\text{rot}E = 0$	$\text{div}D = 0$	$D = \epsilon E$	$\nabla^2\varphi = 0$	$Q = \int D \cdot dS$
恒定磁场( $J=0$ )	$\text{rot}H = 0$	$\text{div}B = 0$	$B = \mu H$	$\nabla^2\varphi_m = 0$	$\Phi = \int B \cdot dS$
物理量间对应关系	$E - H$	$D - B$	$\epsilon - \mu$	$\varphi - \varphi_m$	$Q - \Phi$

## (二)静电场的数值计算与调整

1. 电气工程中的静电场 相对于观察者静止且量值不随时间变化的电荷所产生的电场称为静电场。在工程上绝大多数电气设备上的电压变化缓慢,设备尺寸远小于相应电磁波的波长。因此,设备上任一瞬间的电场可以按静电场来分析。

电气工程中的电场分布常常是相当复杂的。为了检查电介质中的最大电场强度是否超过临界场强,也为了选择电极形状和绝缘结构,工程上常需要算出电介质中的最大电场强度。高压静电场的计算方法,可分为分析计算法和数值计算法两大类。

2. 静电场的数值计算法 电场的数值计算方法大体分为两大类。一类以微分方程式的形式出现,以离

散整个场域为特征,有有限差分法和有限元法;另一类以积分方程式的形式出现,以离散边界为特征,有模拟电荷法、表面电荷法和边界元法。另外,还有一种利用统计方法的蒙特卡洛法。

(1)有限差分法 将电场空间划分成适当的网格(常用等步距正交网格)空间节点上的电位为未知数。应用差分原理,用各节点电位的差商来近似替代该点的偏导数,并利用电极上电位为已知的边界条件,把求解电场的偏微分方程转化为一组相应的差分方程组。解方程,就得到空间各点的电位,由电位梯度可求得电场强度。

(2)有限元法 根据变分法中的欧拉理论,求解静电场拉普拉斯方程的定解问题与求解静电场能量为最小的极值问题等效。将电场空间划分成有限个单元(二维场为小面积,三维场为小体积),假设单元内的电位可用简单的关系式给出,从而可将静电场的能量表示成有限个节点电位的函数。使电场能量  $W$  取得最小值的条件是  $W$  对各节点电位  $\varphi_i$  的导数为 0,即  $\frac{\partial W}{\partial \varphi_i} = 0$ ,便可建立对电位的方程组。

与差分法相比,有限元法的程序编制及数据输入要繁杂得多,但对电极形状复杂和多种介质的电场处理方便,在提高计算精度方面有一定的灵活性。

(3)模拟电荷法 根据叠加原理和静电场的惟一性定理,将实际上连续分布在电极表面的电荷用置于电极内部的有限个离散的假想电荷(模拟电荷)来替代,这些模拟电荷共同产生的电场与原电场相同。以模拟电荷的电荷量为未知数,在电极表面上适当位置取与模拟电荷数目相等的轮廓点,模拟电荷群在这些轮廓点上产生的电位应等于电极电位,列出方程组,求得各个模拟电荷的电荷量。接着,根据所求得的模拟电荷,就可求出空间任一待求点的电位和电场。

模拟电荷法不需要通过电位的梯度求电场,因而能获得较高的电场精度。但设置模拟电荷凭经验,并对薄电极不易处理。

(4)表面电荷法 表面电荷法的计算步骤与模拟电荷法类似。将电极表面划分成适当的小块,并设各小块内的电荷密度为一定值。以电荷密度为未知数,在电极表面上取与电荷小块数目相等的轮廓点,利用轮廓点的电位等于电极电位的关系,列出方程组,求出各小块的电荷密度,从而计算场域内任一待求点的电位和电场。

与模拟电荷法相比,表面电荷法程序复杂,计算时间长,但可以处理薄层电极和多层介质的界面问题,可以与模拟电荷法混合使用。

(5)边界元法 边界元法是以边界积分方程式和有限元离散手法为基础的一种方法,分为直接法和间接法两种。采用直接法计算时,对于无空间电荷区域,将某一闭合边界划分成  $N$  个单元,并假设各单元的电位  $\varphi$  和  $q = \frac{\partial \varphi}{\partial n}$  的分布。于是,边界上的  $\varphi$ 、 $q$  值就可用各节点  $i$  的值  $\varphi_i$ 、 $q_i$ (作为未知变量)表示出来。以  $N$  个常数单元为例,可对  $N$  个节点建立  $N$  个方程。虽然变量  $\varphi_i$ 、 $q_i$  共有  $2N$  个,但对于每个节点,  $\varphi_i$  和  $q_i$  中总有一个是以边界条件给出的已知数,所以一共只有  $N$  个未知数,可以求出边界上全部节点的  $\varphi_i$ 、 $q_i$ 。从而可用边界积分算出区域内任一点的电位。

与表面电荷法相比,边界元法可取任意曲面为边界,而前者只能取电极表面和介质分界面为边界。

(6)蒙特卡洛法 是运用概率理论来求解静电场的一种方法。基于描述质点作随机游动时增益期望的方程与泊松方程的差分格式有相同的数学描写,并适合已知的边界条件。根据解答的惟一性,用统计试验方法求出质点作随机游动时增益的期望,即为所求静电场电位的数值解。蒙特卡洛法适用于只需计算个别点的电场的情况,对于需要计算整个电场分布的问题,则不如前面几种方法。

3. 电场的测量 从原理上区分,电场测量方法大体可分为二大类。一类是测定相近两点的电位差从而求得电位梯度;另一类是检测与电场有关的物理量,直接指示出电场值或电场分布。前类测量中常用静电探针,后类测量又可分为电气方法和光学方法二种。

电气方法中的检测量有感应电荷、电场力、离子电流等;基于介质的电光效应,光学方法利用光折射率随电场线性变化(波克斯效应)或随电场二次方变化(克尔效应)的介质-偏振片系统,做得能使透光强度随电场作线性或非线性变化的传感器,测定介质中的电场分布。

4. 强电场的产生与调整 工程上,分析解决高压电场问题的主要目的,是在特定的电压和绝缘条件下,如何使最高电场强度不超过规定值。

(1) 边缘效应与尖端效应 导体表面的电场强度,与其表面电荷密度成正比。在电极的边缘或尖端,因其曲率半径最小,表面电荷密度最大,电场强度最高,容易发生局部放电。这种现象称为边缘效应与尖端效应。所以,不论电极处于高电位还是接地,必须改善电极形状,避免曲率半径过小或出现尖端。

(2) 均匀电场与不均匀电场 电场强度的大小和方向在各处都相同的电场称为均匀电场,如平板电容器极板中间部分的电场,其他情况统称不均匀电场。按不均匀程度的差别,常分为稍不均匀电场和极不均匀电场。前者如球间隙不大于球半径的球隙电场;后者如棒-板间隙的电场。棒对棒间隙的电场是对称的不均匀场,但比棒-板间隙的电场要均匀些。间隙距离相同时,电场愈不均匀,击穿电压愈低。而电气设备中的电场多为不均匀电场,为了提高绝缘结构的电气强度,必须设法减少其不均匀度。

## 二、电磁场

### (一) 电磁场的基本定律

1. 库仑定律 它是描述点电荷间相互作用力的定律。无限大真空中,两个相距为  $r$  ( $10^{-7}\text{m} < r < 10^7\text{m}$ ), 电荷分别为  $q_1$  和  $q_2$  的静止点电荷之间相互作用力为

$$f = \frac{q_1 q_2}{4\pi\epsilon_0 r^2} e_r \quad 1.2-8$$

式中  $e_r$ ——两电荷之间连线方向的单位矢量。

2. 高斯定律 在电场中,穿出任意闭合面  $S$  的电位移  $D$  的总量,等于这一闭合面内自由电荷  $q$  的代数和:

$$\oint D \cdot dS = \sum q \quad 1.2-9$$

上式说明  $D$  线起始于正的自由电荷,而终止于负的自由电荷。

3. 磁通连续性原理 在磁场中,穿出任一闭合面的磁感应强度  $B$  的总量恒为零:

$$\oint B \cdot dS = 0 \quad 1.2-10$$

上式说明环绕电流回路的磁力线是连续的闭合线。

4. 安培环路定律 在磁场中,沿任意闭合路径磁场强度  $H$  的线积分等于穿过积分路径所限定面积上的传导电流  $I$  的代数和,即

$$\oint H \cdot dl = \sum I \quad 1.2-11$$

当积分路径的绕行方向和电流的方向符合右手螺旋关系时,则电流为正,反之则为负。

5. 电磁感应定律 通过一闭合回路的磁通量变化时回路中出现电动势的现象叫做电磁感应,所产生的电动势称为感应电动势  $\mathcal{E}$ ,它与穿过回路的磁通量  $\Phi_m$  随时间变化率的负值成正比:

$$\mathcal{E} = - \frac{d\Phi_m}{dt} = - \frac{\partial}{\partial t} \int_s B \cdot dS \quad 1.2-12$$

式中感应电动势的参考方向和磁通量  $\Phi_m$  的参考方向按照右手螺旋关系标定。见图 1-32,即感应电动势总是企图产生感应电流来阻止回路中磁通的变化。

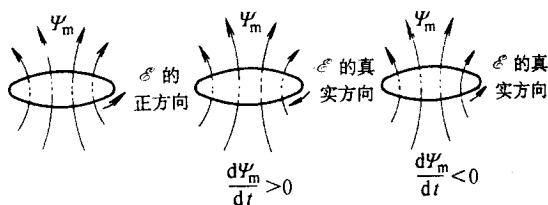


图 1-32 用右手螺旋定则规定  $\mathcal{E}$  和  $\Phi_m$  ( $\Psi_m$ ) 的正方向

由于磁场随时间变化而在一静止回路中产生的感应电动势叫做感生电动势,即

$$\mathcal{E} = - \int_s \frac{\partial B}{\partial t} \cdot dS \quad 1.2-13$$



当回路的整体或局部相对于恒定磁场  $B$  运动产生的感应电动势叫做动生电动势,即

$$\mathcal{E} = \oint (\mathbf{v} \times \mathbf{B}) \cdot d\mathbf{l} \quad 1.2-14$$

在一般情况下,回路中的感应电动势为这两种电动势之和:

$$\mathcal{E} = \oint (\mathbf{v} \times \mathbf{B}) \cdot d\mathbf{l} - \int_s \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \cdot d\mathbf{S} \quad 1.2-15$$

回路中的感应电动势可看作是沿回路上的感应电场力对单位正电荷所作的功,在不考虑回路运动的情况下,有

$$\mathcal{E} = \oint_l \mathbf{E}_i \cdot d\mathbf{l} = - \frac{\partial \Phi_m}{\partial t} = - \int_s \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \cdot d\mathbf{S} \quad 1.2-16$$

式中  $E_i$  为感应电场强度,  $d\mathbf{S}$  的方向和  $l$  绕行方向符合右手螺旋关系。上式说明,电场不仅可由电荷产生,而且它可由随时间变化的磁场产生。

6. 全电流定律 在电磁场中,传导电流与位移电流的总和称为全电流。

(1) 传导电流 导电媒质中自由电荷的定向运动所形成。传导电流密度为

$$\mathbf{J} = \rho \mathbf{v} \quad 1.2-17$$

式中  $\rho$ ——电荷的体密度;

$\mathbf{v}$ ——电荷运动的平均速度。

传导电流服从欧姆定律:

$$\mathbf{J} = \gamma \mathbf{E} \quad 1.2-18$$

(2) 位移电流 电位移  $D$  随时间的变化所形成。位移电流密度为

$$\mathbf{J}_d = \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} \quad 1.2-19$$

全电流具有连续性,即穿过任一闭合面  $S$  的全电流为

$$\oint_s (\mathbf{J} + \mathbf{J}_d) \cdot d\mathbf{S} = 0 \quad 1.2-20$$

位移电流在产生磁场的效应上完全和传导电流等效,这样把安培环路定律中的  $\sum I$  看做全电流,得出全电流定律:

$$\oint_l \mathbf{H} \cdot d\mathbf{l} = \sum I = \int_s \mathbf{J} \cdot d\mathbf{S} + \int_s \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} \cdot d\mathbf{S} \quad 1.2-21$$

上式说明,磁场不仅由传导电流产生,而且也由随时间变化的电场产生。

7. 电磁场的基本方程组 概括电磁场分布变化规律的四个方程式见式(1.2-9)(1.2-10)(1.2-16)和(1.2-21)称为电磁场基本方程组的积分形式,亦称麦克斯韦方程组的积分形式。其相应的微分形式是

$$\begin{cases} \nabla \times \mathbf{H} = \gamma \mathbf{E} + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} \\ \nabla \times \mathbf{E} = - \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \\ \nabla \cdot \mathbf{B} = 0 \\ \nabla \cdot \mathbf{D} = \rho \end{cases} \quad 1.2-22$$

对于各向同性的媒质,其电磁性能方程是

$$\begin{aligned} \mathbf{D} &= \epsilon \mathbf{E} \\ \mathbf{B} &= \mu \mathbf{H} \\ \mathbf{J} &= \gamma \mathbf{E} \end{aligned} \quad 1.2-23$$

电磁场基本方程组全面地描述了电磁场的空间分布和随时间变化所遵循的规律,说明变化的电场会产生磁场,变化的磁场也会产生电场,因此任何电磁扰动都将以有限速度(光速)向空间传播,形成电磁波。

在式(1.2-22)中,若场量不随时间变化,可得静电场、恒定电场和恒定磁场的基本方程的微分形式。即静电场基本方程

$$\begin{cases} \nabla \times \mathbf{E} = 0 \\ \nabla \cdot \mathbf{D} = \rho \end{cases} \quad 1.2-24$$

恒定电场基本方程

$$\begin{cases} \nabla \times E = 0 \\ \nabla \cdot J = 0 \end{cases} \quad 1.2-25$$

恒定磁场基本方程

$$\begin{cases} \nabla \times H = J \\ \nabla \cdot B = 0 \end{cases} \quad 1.2-26$$

8. 电磁场中两种媒质分界面上的衔接条件 电磁场的场量从两种不同媒质分界面的一侧过渡到另一侧时所遵循的变化规律称为衔接条件。用 1、2 表示两种媒质, 则

$$\begin{aligned} H_{1t} - H_{2t} &= K \\ B_{1n} - B_{2n} &= 0 \\ D_{2n} - D_{1n} &= \sigma \\ E_{1t} - E_{2t} &= 0 \\ J_{2n} - J_{1n} &= -\frac{\partial \sigma}{\partial t} \end{aligned} \quad 1.2-27$$

式中,  $K$ 、 $\sigma$  分别为分界面处的电流线密度和自由电荷面密度。场量的切线分量用下标  $t$  表示, 场量的法线分量用下标  $n$  (由 1 媒质指向 2 媒质) 表示。

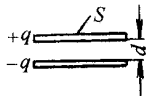
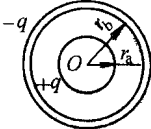
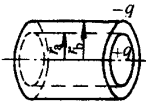
## (二) 电容、电感、能量和力

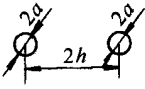
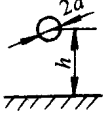
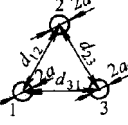
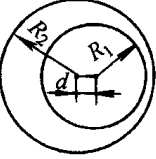
1. 电容 两个导体, 带等量异号电荷  $Q$ , 两导体间的电压为  $U$ , 其电容定义为

$$C = \frac{Q}{U} = \frac{\oint_S D \cdot dS}{\int_l E \cdot dl} \quad 1.2-28$$

电容的大小与两导体的形状、尺寸、相互位置及导体间的介质有关。几种典型结构的电容计算公式见表 1-7。

表 1-7 几种典型结构的电容计算公式

项目	图形	电容 $C/F$	说明
平板电容		$C = \frac{\epsilon S}{d}$	$S$ —极板面积 ( $m^2$ ) $d$ —极板间的距离 ( $m$ ), 且远小于 $S$ 每边的尺寸
球形电容		$C = \frac{4\pi\epsilon r_a r_b}{r_b - r_a}$ $r_b \rightarrow \infty$ 时, 即为孤立导体球的电容 $C = 4\pi\epsilon r_a$	$r_a$ 、 $r_b$ —分别为内球外表面与外球内表面的半径 ( $m$ )
圆柱形电容		$C = \frac{2\pi\epsilon l}{\ln \frac{r_b}{r_a}}$	$l$ —电容器长度 ( $m$ ) $r_a$ 、 $r_b$ —内柱外表面与外柱内表面的半径 ( $m$ )

项目	图形	电容 $C/F$	说明
两输电线间的电容(地面影响忽略不计)		$C = \frac{\pi\epsilon l}{\ln\left[\frac{h}{a} + \sqrt{\left(\frac{h}{a}\right)^2 - 1}\right]}$ $a \ll h: C = \frac{\pi\epsilon l}{\ln\left(\frac{2h}{a}\right)}$	$l$ —输电线长度(m) $2h$ —导线轴线间的距离(m) $a$ —导线的半径(m)
单根架空输电线的对地电容		$C = \frac{2\pi\epsilon l}{\ln\left[\frac{h}{a} + \sqrt{\left(\frac{h}{a}\right)^2 - 1}\right]}$ $a \ll h: C = \frac{2\pi\epsilon l}{\ln\left(\frac{2h}{a}\right)}$	$h$ —导线轴线与地面的距离(m) $a$ —导线的半径(m) $l$ —输电线长度(m)
三相输电线间的电容(地面影响忽略不计)		每相电容 $C_\phi = \frac{2\pi\epsilon l}{\ln\left(\frac{d}{a}\right)}$	$d = \sqrt[3]{d_{12}d_{23}d_{31}}$ , 是导线轴线间距离的几何平均值(m)
偏心电缆:内外导体半径为 $R_1, R_2$ (m), 两轴线间距离 $d$ (m), 电缆长度 $l$ (m)		$C = \frac{2\pi\epsilon l}{\ln\left[\frac{A+B}{A-B} \frac{A-D}{A+D}\right]}$	$A = \left[ \left( \frac{R_2^2 - R_1^2 + d^2}{2d} \right)^2 - R_1^2 \right]^{1/2}$ $B = \frac{R_2^2 - (R_1 + d)^2}{2d}$ $D = \frac{(R_2 - d)^2 - R_1^2}{2d}$

由多个导体组成的系统,它们的电荷与电压的关系要用多个参数(部分电容)描述。

## 2. 电感

(1) 自感 电路中因自身电流变化而出现感应电动势的现象叫自感。自感总是正值。

一个载流线圈的自感  $L/H$  定义为

$$L = \frac{N\Phi_m}{I} = \frac{\Psi_m}{I} \quad (1.2-29)$$

式中  $N$ —线圈匝数;

$\Phi_m$ —穿过该线圈的磁通(Wb);

$\Psi_m$ —与该线圈交链的磁链(Wb);

$I$ —线圈中的电流(A)。

(2) 互感 因一电路中的电流变化在邻近另一个电路中出现感应电动势的现象叫做互感。两个线圈之间的互感  $M_{21}/H$  定义为

$$M_{21} = \frac{\Psi_{21}}{I_1} \quad (1.2-30)$$

式中  $M_{21}$ —线圈1对线圈2的互感;

$\Psi_{21}$ —线圈1中的电流  $I_1$  产生的磁通与线圈2交链的磁链。

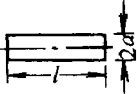
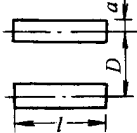
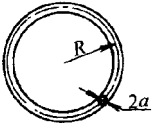
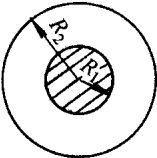
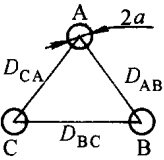
同样,线圈2对线圈1的互感  $M_{12}/H$  是

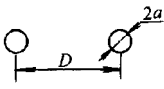
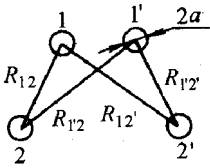
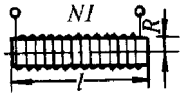
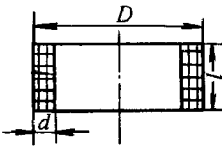
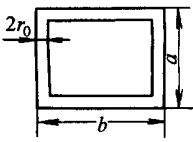
$$M_{12} = \frac{\Psi_{12}}{I_2} \quad (1.2-31)$$

可以证明  $M_{12} = M_{21}$ 。互感有正负。

自感、互感与线圈形状、大小、匝数及媒质分布有关。互感还与两线圈间相互位置有关。几种典型结构的自感和互感计算公式见表 1-8。

表 1-8 几种典型结构的自感和互感计算公式

结构	电感/H
<p>直导线段</p> 	$L = \frac{\mu_0 l}{2\pi} \left( \ln \frac{2l}{a} - 0.75 \right)$ <p>式中, <math>a</math> 为导线半径(m); <math>l</math> 为导线长度(m); <math>l \gg a</math></p>
<p>两平行直导线段</p> 	$M = \frac{\mu_0 l}{2\pi} \left( \ln \frac{2l}{D} - 1 \right)$ <p>式中, <math>l</math> 为导线长度(m); <math>D</math> 为两导线间距离(m)</p>
<p>单线圆环</p> 	$L = \mu_0 R \left( \ln \frac{8R}{a} - 1.75 \right)$ <p>式中, <math>R</math> 为圆环半径(m); <math>a</math> 为导线半径(m); <math>R \gg a</math></p>
<p>同轴电缆</p> 	$L = \frac{\mu_0 l}{2\pi} \left( \frac{1}{4} + \ln \frac{R_2}{R_1} \right)$ <p>式中, <math>l</math> 为电缆长度(m); <math>R_1</math>、<math>R_2</math> 为内、外导体半径(m); 外导体厚度忽略不计</p>
<p>三线传输线</p> 	<p>一相等效自感</p> $L_\phi = \frac{\mu_0 l}{2\pi} \left( \ln \frac{D'}{a} + \frac{1}{4} \right)$ <p>式中, <math>l</math> 为传输线长度(m); <math>a</math> 为导线半径(m); <math>D'</math> 为导线轴线间的距离的几何平均值(m);</p> $L \gg D \gg a;$ $D = \sqrt[3]{D_{AB} D_{BC} D_{CA}}$

结构	电感/H
<p style="text-align: center;">两线传输线</p> 	$l = \frac{\mu_0 l}{\pi} \left( \ln \frac{D}{a} + \frac{1}{4} \right)$ <p>式中 <math>l</math> 为传输线长度(m); <math>D</math> 为导线间距离(m); (<math>D \gg a, l \gg D</math>); <math>a</math> 为导线半径(m)</p>
<p style="text-align: center;">两对传输线</p> 	$M = \frac{\mu_0 l}{2\pi} \ln \frac{R_{12} R_{1'2'}}{R_{12'} R_{1'2}}$ <p>式中 <math>l</math> 为传输线长度(m); <math>R_{12}</math>、<math>R_{1'2'}</math>、<math>R_{12'}</math>、<math>R_{1'2}</math> 为各导线间距离(m); <math>l \gg</math> 线间距离 <math>\gg</math> 导线半径(m)</p>
<p style="text-align: center;">单层长螺管线圈</p> 	$l \approx \frac{\mu_0 N^2 A}{l}$ <p>式中 <math>N</math> 为匝数; <math>A</math> 为线圈截面积(<math>\text{m}^2</math>); <math>l</math> 为线圈长度(m); <math>l/R &gt; 40</math></p>
<p style="text-align: center;">多层螺管线圈</p> 	$L \approx \frac{6.4 \mu_0 N^2 D^2 d - 2.25 d}{3.5 D + 8 l} D$ <p>式中 <math>D</math> 为线圈外径(m); <math>d</math> 为线圈厚度(m); <math>l</math> 为线圈长度(m); <math>N</math> 为线圈匝数</p>
	$L = \frac{\mu_0}{\pi} \left[ a \ln \frac{2ab}{r_0(a+d)} + b \ln \frac{2ab}{r_0(b+d)} - 2(a+b-d) \right] + \frac{\mu_0}{\pi} \left( \frac{a+b}{4} \right)$ <p>式中 <math>r_0</math> 为导线半径(m); <math>a</math>、<math>b</math> 为线框边长(m) <math>d = \sqrt{a^2 + b^2}</math> <math>a \gg r_0, b \gg r_0</math></p>

3. 电阻与接地电阻 导电媒质的电阻  $R$  定义为

$$R = \frac{\int E \cdot dl}{\int J \cdot dS} \quad (1.2-32)$$

根据静电比拟,  $R$  与静电场的电容有如下关系

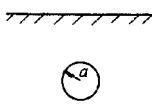
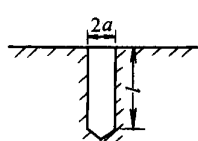
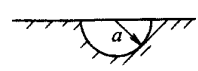
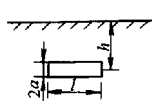
$$CR = \frac{C}{G} = \frac{\epsilon}{\gamma} \quad (1.2-33)$$

实际问题中为了人身与设备的安全, 通常要求接地, 接地电阻主要决定于电流从接地器流经大地的土壤电阻, 其值为:

$$R = \frac{\phi(\text{接地器的电位})}{I(\text{流经接地器的电流})} \quad (1.2-34)$$

表 1-9 列出了几种典型接地器的工频接地电阻。

表 1-9 几种工频接地电阻计算式

类型	结构	电阻/ $\Omega$
深埋球		$R = \frac{1}{4\pi\gamma a}$ 式中, $a$ 为球半径(m)
垂直放置棒形		$R = \frac{1}{2\pi\gamma l} \ln \frac{2l}{a}$ 式中, $a$ 为棒半径(m); $l$ 为棒长度(m)
埋地面半球		$R = \frac{1}{2\pi\gamma a}$ 式中, $a$ 为球半径(m)
水平放置棒形		$R = \frac{1}{2\pi\gamma l} \ln \frac{l^2}{2ah}$ 式中, $a$ 为棒半径(m); $l$ 为棒长度(m); $h$ 为棒与地面距离(m)

当大电流经接地器流入土壤时, 接地器附近地面有较高电场, 人在此区域内两足间的电位差称为跨步电压  $U_0/V$ :

$$U_0 \approx \frac{Ib}{2\pi\gamma l^2} \quad (1.2-35)$$

式中  $b$ ——两足间距离(m);

$l$ ——距接地器中心的距离(m)。

4. 电磁能量 在线性媒质中,电磁场某一点的电磁能量密度瞬时值  $\omega$  为

$$\omega = \frac{D \cdot E}{2} + \frac{B \cdot H}{2} \quad (1.2-36)$$

式中  $(1/2)D \cdot E$ ——电场能量密度;

$(1/2)B \cdot H$ ——磁场能量密度。

电磁场某一体积  $V$  中储存的电磁能量为

$$W = W_e + W_m = \int_V \left( \frac{D \cdot E}{2} + \frac{B \cdot H}{2} \right) dV \quad (1.2-37)$$

5. 电磁力 电荷、电流在电磁场中所受力的总称。

(1) 静电力的计算

1) 两个点电荷之间的相互作用力用库仑定律计算,见式(1.2-8)。

2) 点电荷  $q$  在电场  $E$  中所受到的力

$$f = q \cdot E \quad (1.2-38)$$

3) 带电体或媒质受到的电场力在广义坐标  $g$  方向的分量  $f/N$ , 与静电场的能量  $W$ 。有以下关系。

$$f = - \frac{\partial W_e}{\partial g} \Big|_{q=\text{常数}} \quad f = \frac{\partial W_e}{\partial g} \Big|_{U=\text{常数}} \quad (1.2-39)$$

4) 法拉第观点认为,电场中由  $E$  线组成的每一段电力线管沿轴向的张力和侧面的压力在单位面积上的量值都为

$$f = \frac{1}{2} D \cdot E \quad (1.2-40)$$

(2) 磁场力的计算

1) 点电荷  $q$  在磁场  $B$  中以速度  $v$  运动所受的力称为洛伦兹力,即

$$f = q(v \times B) \quad (1.2-41)$$

2) 磁场作用于载流导线  $l$  上的力

$$f = \int I dl \times B \quad (1.2-42)$$

式中  $I dl$  是载流导线上的电流元

3) 载流导体或媒质受到磁场力在广义坐标  $g$  方向的分量  $f$  与磁场能量  $W_m$  有以下关系

$$f = \frac{\partial W_m}{\partial g} \Big|_{I=\text{常数}} \quad f = - \frac{\partial W_m}{\partial g} \Big|_{\Psi=\text{常数}} \quad (1.2-43)$$

4) 法拉第观点认为,磁场中  $B$  线组成的每一段磁力线管沿轴向的张力和侧面的压力在单位面积上的量值都为

$$f = \frac{1}{2} B \cdot H \quad (1.2-44)$$

### (三) 电磁场的传播、损耗和效应

1. 理想介质中的均匀平面波 在理想介质的无源区,电场强度  $E$  和磁场强度  $H$  均满足波动方程

$$\begin{aligned} \nabla^2 E - \mu\epsilon \frac{\partial^2 E}{\partial t^2} &= 0 \\ \nabla^2 H - \mu\epsilon \frac{\partial^2 H}{\partial t^2} &= 0 \end{aligned} \quad (1.2-45)$$

等相位面为平面,且在等相位面上各点场强相等的电磁波称为均匀平面电磁波。均匀平面电磁波的电场和磁场在空间相互垂直,且都垂直于传播方向,称为横电磁波(TEM波)。

在无限大理想介质中,沿  $x$  方向传播的随时间作正弦变化的均匀平面电磁波(设  $E = E_y e_y$ , 则  $H = H_z e_z$ ) 的表达式为

$$\begin{aligned} E_y(x, t) &= \sqrt{2} E_{y0}^+ \sin(\omega t - \beta x + \theta_E) \\ H_z(x, t) &= \frac{1}{Z_0} \sqrt{2} E_{y0}^+ \sin(\omega t - \beta x + \theta_E) \end{aligned} \quad (1.2-46)$$

式中  $E_{y0}^+$ ——电场入射波有效值；  
 $\theta_E$ ——电场入射波的初相；  
 $\beta$ ——相位常数 (rad/m)  $\beta = \omega \sqrt{\mu\epsilon}$ ；  
 $Z_0$ ——波阻抗 ( $\Omega$ )  $Z_0 = \sqrt{\frac{\mu}{\epsilon}}$ 。

2. 有耗媒质中的均匀平面波 在有耗媒质的无源区,  $E$ 、 $H$  满足的方程为

$$\begin{aligned}\nabla^2 E - \mu\gamma \frac{\partial E}{\partial t} - \mu\epsilon \frac{\partial^2 E}{\partial t^2} &= 0 \\ \nabla^2 H - \mu\gamma \frac{\partial H}{\partial t} - \mu\epsilon \frac{\partial^2 H}{\partial t^2} &= 0\end{aligned}\quad (1.2-47)$$

在无反射情况下, 有耗媒质中沿  $x$  方向传播的正弦均匀平面波的表达式为

$$\begin{cases} E_y(x, t) = \sqrt{2} E_{y0}^+ e^{-\alpha x} \sin(\omega t - \beta x) \\ H_x(x, y) = \frac{1}{|Z_0|} \sqrt{2} E_{y0}^+ e^{-\alpha x} \sin(\omega t - \beta x - \theta_z) \end{cases}\quad (1.2-48)$$

$$\alpha = \omega \sqrt{\frac{\mu\epsilon}{2} \left( \sqrt{1 + \frac{\gamma^2}{\omega^2 \epsilon^2}} - 1 \right)}\quad (1.2-49)$$

$$\beta = \omega \sqrt{\frac{\mu\epsilon}{2} \left( \sqrt{1 + \frac{\gamma^2}{\omega^2 \epsilon^2}} + 1 \right)}\quad (1.2-50)$$

$$Z_0 = \sqrt{\frac{\mu}{\epsilon'}} = |Z_0| \angle \theta_z\quad (1.2-51)$$

$$\epsilon' = \epsilon + \frac{\gamma}{j\omega}\quad (1.2-52)$$

式中  $\alpha$ ——衰减常数 (Np/m)；  
 $\beta$ ——相位常数 (rad/m)；  
 $\epsilon'$ ——等效介电常数 (F/m)。

当波在良导体中传播时, 由于良导体满足  $\frac{\gamma}{\omega\epsilon} \gg 1$  条件, 因而有

$$\alpha \approx \beta = \sqrt{\frac{\omega\mu\gamma}{2}}\quad (1.2-53)$$

$$Z_0 \approx \sqrt{\frac{\omega\mu}{\gamma}} \angle 45^\circ\quad (1.2-54)$$

由于  $\alpha$ 、 $\beta$  都是频率的函数, 因此不同频率的信号经过同一距离后幅值的衰减及相位的滞后量都不同, 这种现象称为色散。具有色散性质的媒质称为色散媒质, 有耗媒质都是色散媒质。

表 1-10 不同频率下几种常用材料的透入深度

(mm)

	铜	铝	铸铁	铸钢	坡莫合金	海水	
电导率 $\gamma$ (MS/m)	57	38	2	9.7	0.563 <sup>①</sup>	$10^{-6}$	
相对磁导率 $\mu_r$	1	1	200	1000	90000	1	
频率 /Hz	50	9.43	11.5	3.56	0.723	0.1	$71.2 \times 10^3$
	1000	2.11	2.58	0.796	0.162	0.0224	$15.9 \times 10^3$
	8000	0.745	0.913	0.281	0.057	0.0079	$5.62 \times 10^3$
	$3 \times 10^8$	$3.58 \times 10^{-3}$	$4.71 \times 10^{-3}$	$1.45 \times 10^{-3}$	$0.295 \times 10^{-3}$	$0.0408 \times 10^{-3}$	50.3

①其单位为 MS/mm。

### 3. 集肤效应 邻近效应和电磁屏蔽



(1) 电磁场在导电媒质中按指数规律衰减。定义电磁波进入导体内场量衰减到表面值的  $1/e$  (即 36.8%) 时的深度  $d$  为透入深度:

$$d = \frac{1}{\alpha} = \sqrt{\frac{2}{\omega\mu\gamma}} \quad (1.2-55)$$

电磁场主要分布在导体表面的这种现象称为集肤效应。它增加了导体的电阻,减少了内电感。几种常用材料在不同频率下的透入深度见表 1-10。

(2) 对多导体系统,由于导体之间电磁场的相互作用,影响了导体中传导电流分布的现象称为邻近效应。当导体截面较大,相距很近或频率很高时需考虑邻近效应。

(3) 电磁屏蔽 防止或者减少电磁波进入空间某些部位的措施。

1) 静电屏蔽 利用接地的导体空腔将空腔内外的场分割为两个互不影响的独立系统。

2) 磁屏蔽 利用铁磁材料  $\mu_r \gg 1$  的特点制成有一定厚度的外壳,使置于其内的设备少受磁干扰。常用屏蔽系数  $k$  来表示屏蔽效果,当  $\mu_r \gg 1$  时

$$k = \frac{4}{\mu_r \left[ 1 - \frac{R_1^2}{R_2^2} \right]} \quad (1.2-56)$$

式中  $R_1, R_2$ ——铁磁壳体的内外半径。

3) 电磁屏蔽 利用良导体能阻止高频电磁波透入这一特性可做电磁屏蔽装置。屏蔽层的厚度必须接近于被屏蔽的电磁波的波长。高频电磁波几乎不能透入铜、铝、铁等金属,所以这些材料常用作电磁屏蔽材料。

4. 涡流损耗,磁滞损耗和电介质损耗

(1) 涡流损耗 交变电磁场中,由于电磁感应在导电媒质里引起的环形电流称为涡流。因涡流引起的损耗称涡流损耗。减小涡流损耗常采用切断涡流路径的办法,如用硅钢片叠制成铁心。宽度为  $2b$  的无限大薄平板中的涡流损耗:

$$P = \frac{H_m^2}{\gamma d} \frac{\sinh \frac{2b}{d} - \sin \frac{2b}{d}}{\cosh \frac{2b}{d} + \cos \frac{2b}{d}} \quad (1.2-57)$$

式中  $H_m$ ——薄板表面磁场强度的最大值;

$d$ ——透入深度。

(2) 磁滞损耗 由于磁性材料在交变磁场作用下存在不可逆的磁化过程而引起的能量损耗称为磁滞损耗。可按下述经验公式计算:

$$P_h = \eta B_m^n fV \quad (1.2-58)$$

式中  $B_m$ ——磁滞回线上磁感应强度的最大值;

$\eta, n$ ——与材料有关的常数;

$V$ ——铁磁物质的体积。

(3) 电介质损耗 可分成两部分,一是由于电介质都存在微弱导电性而引起的电导损耗;二是由与电介质有关的极化而引起的损耗。不同材料的介质损耗均用损耗角  $\delta$  的正切表示

$$\tan \delta = \frac{G}{\omega C} \quad (1.2-59)$$

式中  $G$ ——电介质样品的全部有功电导;

$C$ ——电介质样品的全部电容。

5. 均匀传输线 当传输线(平行双导线或同轴线)的长度  $l$  与线上传递信号的波长  $\lambda$  可比拟时,电磁波沿线传播所需的时间不能忽略,传输线必须用分布参数的电路模型(见图 1-33)来描述。沿线参数均匀分布的传输线称为均匀传输线。线上各点的电压、电流均为  $x$  的函数,模型中  $R_0, L_0, G_0, C_0$  分别是传输线单位长度的电阻、电感、电导和电容,称为传输线的原参数。

(1) 均匀传输线的方程:

$$\begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial x} &= - \left( R_0 i + L_0 \frac{\partial i}{\partial t} \right) \\ \frac{\partial i}{\partial x} &= - \left( G_0 u + C_0 \frac{\partial u}{\partial t} \right) \end{aligned} \quad (1.2-60)$$

如果均匀传输线的  $R_0$ 、 $G_0$  可忽略不计 称为无损耗传输线。其上的电压电流满足如下的波动方程：

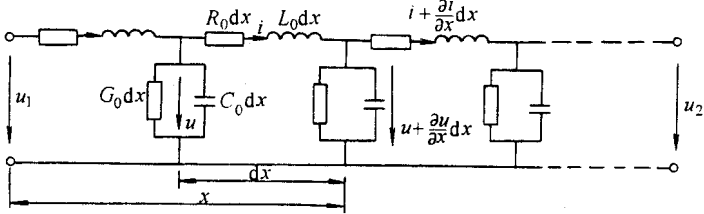


图 1-33 均匀传输线路模型

$$\begin{aligned} \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} &= L_0 C_0 \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = \frac{1}{v^2} \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} \\ \frac{\partial^2 i}{\partial x^2} &= L_0 C_0 \frac{\partial^2 i}{\partial t^2} = \frac{1}{v^2} \frac{\partial^2 i}{\partial t^2} \end{aligned} \quad (1.2-61)$$

(2) 均匀传输线方程的正弦稳态解 在正弦情况下, 沿线电压、电流满足相量形式方程：

$$\begin{cases} \frac{d^2 \dot{U}}{dx^2} = (R_0 + j\omega L_0) \dot{U} - (G_0 + j\omega C_0) \dot{U} = \Gamma^2 \dot{U} \\ \frac{d^2 \dot{I}}{dx^2} = (R_0 + j\omega L_0) \dot{I} - (G_0 + j\omega C_0) \dot{I} = \Gamma^2 \dot{I} \end{cases} \quad (1.2-62)$$

式中  $\Gamma$ ——传输线的传播常数，

$$\Gamma = \sqrt{(R_0 + j\omega L_0)(G_0 + j\omega C_0)} = \alpha + j\beta ;$$

$\alpha$ ——衰减常数；

$\beta$ ——相位常数。

设传输线终端为坐标原点, 如已知线路终端的电压  $\dot{U}_2$  和电流  $\dot{I}_2$  则沿线的电压、电流的分布为：

$$\begin{aligned} \dot{U}(x) &= \dot{U}_2 \cosh \Gamma x - \dot{I}_2 Z_0 \sinh \Gamma x \\ \dot{I}(x) &= -\frac{\dot{U}_2}{Z_0} \sinh \Gamma x + \dot{I}_2 \cosh \Gamma x \end{aligned} \quad (1.2-63)$$

式中  $Z_0$ ——传输线的特性阻抗,  $Z_0 = \sqrt{\frac{R_0 + j\omega L_0}{G_0 + j\omega C_0}}$ 。

对于无损耗传输线有

$$\begin{aligned} \dot{U}(x) &= \dot{U}_2 \cos \beta x - j Z_0 \dot{I}_2 \sin \beta x \\ \dot{I}(x) &= \dot{I}_2 \cos \beta x - j \frac{\dot{U}_2}{Z_0} \sin \beta x \\ \beta &= \omega \sqrt{L_0 C_0} \\ Z_0 &= \sqrt{\frac{L_0}{C_0}} \end{aligned}$$

(3) 均匀传输线的输入阻抗定义：

$$Z_{in} = \frac{\dot{U}(x)}{\dot{I}(x)} = Z_0 \frac{Z_2 - Z_0 \tanh \Gamma x}{Z_0 - Z_2 \tanh \Gamma x} \quad (1.2-64)$$

式中  $Z_2$ ——传输线终端负载阻抗。

显然  $Z_{in}$  是传输线长度和负载的函数。

(4) 反射系数与匹配

1) 反射系数: 定义传输线上某点的反射波电压  $\dot{U}^-$  和入射波电压  $\dot{U}^+$  的比值为反射系数。终端反射系数为

$$\Gamma = \frac{\dot{U}^-}{\dot{U}^+} = \frac{Z_2 - Z_0}{Z_2 + Z_0} \quad (1.2-65)$$

2) 匹配: 如传输线终端所接负载的阻抗  $Z_2 = Z_0$ , 此时反射系数  $\Gamma = 0$ , 即不存在反射波, 这种情况称为负载与线路匹配。匹配时沿线各点的  $Z_{in} = Z_0$ , 线路的传输效率接近最高值,  $\eta = e^{-2\alpha l}$ 。

(5) 无畸变传输线 当有损耗传输线的原参数满足条件:

$$\frac{L_0}{R_0} = \frac{C_0}{G_0} \quad (1.2-66)$$

这时  $\alpha = \sqrt{R_0 G_0}$  为常量,  $\beta = \omega L_0 \sqrt{\frac{G_0}{R_0}}$  与  $\omega$  成正比, 于是对不同频率的信号不会产生振幅及相位畸变。称式 1.2-66 为无畸变条件, 满足无畸变条件的传输线为无畸变线、无损耗线一定是无畸变线。


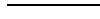








## 第三节 电气识图与电工标准

### 一、电气识图

(一) 电气图用图形符号(见表 1-11、表 1-12)



表 1-11 常用电气原理图用图形符号













1. 限定符号和常用的其他符号

名称	新符号	旧符号
直流		
交流		
交直流		
正极		
负极		

名称	新符号	旧符号
接地一般符号		
接机壳或接底板		
故障		
内络、击穿		
导线间绝缘击穿		
导线对机壳绝缘击穿		
导线对地绝缘击穿		
永久磁铁		


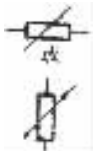






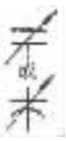




## 2. 导线和连接器件的图形符号

名称	新符号	旧符号
导线、电缆和母线的一般符号		


















名称	新符号	旧符号
三根导线的单线表示		
端子		
导线的连接		
导线的多线连接		
插头和插座	优选形  其他形 	 或 





## 3. 电阻器、电容器和电感器的图形符号

名称	新符号	旧符号
电阻器的一般符号	优选形  其他形 	

名称	新符号	旧符号
可变电阻器		
滑动触点电位器		
电容器的一般符号	<p>优选形</p>  <p>其他形</p> 	
极性电容器	<p>优选形</p>  <p>其他形</p> 	
可变电容器	<p>优选形</p>  <p>其他形</p> 	
电感器、线圈、绕组、扼流圈		
带磁心(铁心)的电感器		

## 4. 半导体管的图形符号

名称	新符号	旧符号
半导体二极管一般符号	优选形  其他形 	
单向击穿二极管(稳压二极管)	优选形  其他形 	 
PNP 型半导体管		
NPN 型半导体管		
集电极接管壳的 NPN 型半导体管		
三极晶体闸流管 注:没必要规定控制极类型时,用于表示反向阻断三极晶闸管	优选形  其他形 	
反向阻断三极晶体闸流管(阴极侧受控)	优选形  其他形 	




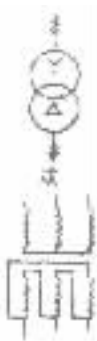








名称	新符号	旧符号
光敏电阻		
光电二极管		

## 5. 绕组、电机、变压器和电抗器的图形符号

名称	新符号	旧符号
电机换向绕组		
电机补偿绕组		
电机串励绕组		
电机并励或他励绕组		
集电环或换向器上的电刷		
		
直流发电机		
直流电动机		



名称	新符号	旧符号
交流发电机		
交流电动机		
并励直流电动机		
他励直流电动机		
三相笼型异步电动机		
三相绕线转子异步电动机		
双绕组变压器一般符号		
电抗器、扼流圈一般符号		




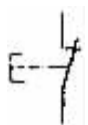


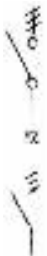


名称	新符号	旧符号
<p>电流互感器、脉冲变压器</p>		<p>单线表示</p>  <p>双线表示</p> 
<p>星形 - 三角形联结的三相变压器</p>		<p>星形表示</p>  <p>三角形表示</p> 
<p>星形 - 星形联结的三相变压器</p>		<p>单线表示</p>  <p>双线表示</p> 
<p>电压互感器</p>		<p>单线表示</p>  <p>双线表示</p> 















## 6. 原电池或蓄电池图形符号



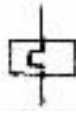










名称	新符号	旧符号
原电池或蓄电池		
蓄电池组或原电池组 注 注明电压值时允许的画法	  	 



## 7. 开关、控制和保护装置的图形符号

名称	新符号	旧符号
动合(常开)触点	 	 
动断(常闭)触点	 	 
开关一般符号	 	 

名称	新符号	旧符号
手动开关一般符号		
动合(常开)按钮		
动断(常闭)按钮		
三极开关(单线表示)		
三极开关(多线表示)		 <p style="text-align: center;">或</p>

名称	新符号	旧符号
接触器(在非动作位置触点断开)		
接触器(在非动作位置触点闭合)		
断路器		  或 
隔离开关		
负荷开关		
三极负荷开关		

名称	新符号	旧符号
继电器和接触器操作器件(线圈)一般符号		
热继电器的驱动元件(发热元件)		
熔断器一般符号		
跌开式熔断器		
熔断器式开关		
熔断器式负荷开关		
火花间隙		

名称	新符号	旧符号
避雷器		

## 8. 常用测量仪表、灯和信号器具图形符号









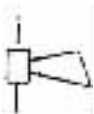
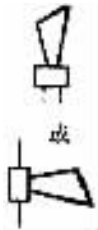
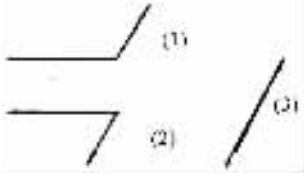

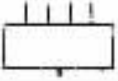

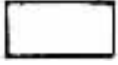

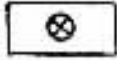

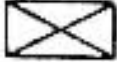

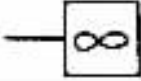
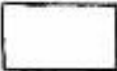

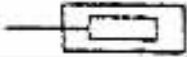
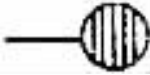



名称	新符号	旧符号
电流表		
电压表		
功率表		
电度表(瓦特小时计)		
电喇叭		






表 1-12 常用电力、照明布置图用图形符号

名称	符号	说明
配线		
配线方向		(1)向上配线 (2)向下配线 (3)垂直通过配线
带配线的用户端		
配电中心		示出 5 根导线管
连接盒或接线盒		
配电箱		
配电箱一般符号		适用于屏、台、箱、柜
动力配电箱		或动力—照明配电箱










名称	符号	说明
信号板、箱		
照明配电箱		需要时允许涂红
事故照明配电箱		
多种电源配电箱		
用电设备		
电风扇		若不引起混淆,方框可不画
空调器		未示出引线
电铃		
电钟		

名称	符号	说明
电阻加热装置		
电热水器		
插座		
插座		插座或插孔的一般符号,表示一个极
单相插座		分别表示明装、暗装、密闭(防水)、防爆
单相三孔插座		分别表示明装、暗装、密闭(防水)、防爆

名称	符号	说明
三相四孔插座		分别表示明装、暗装、密闭(防水)、防爆
多个插座		示出 3 个
带开关插座		装一单极开关
开关		
开关		开关一般符号
单极开关		分别表示明装、暗装、密闭(防水)、防爆

名称	符号	说明
双极开关		分别表示明装、暗装、密闭(防水)、防爆
三极开关		分别表示明装、暗装、密闭(防水)、防爆
单极拉线开关		
单极双控拉线开关		
双控开关		单极三线
带指示灯开关		
多拉开关		如用于不同照度控制
定时开关		如用于延寿节能开关
照明灯		
灯		灯或信号灯的一般符号,与电路图符号相同

名称	符号	说明
投光灯		
荧光灯		示例为 3 管荧光灯
应急灯		自带电源的事故照明灯装置
吸顶灯		
壁灯		
安全灯		
隔爆灯		

## (二) 文字符号

图形符号提供了一类设备或元件的共同符号,为了更明确地区分不同的设备、元件,尤其是区分同类设备或元件中不同功能的设备或元件,还必须在图形符号旁标注相应的文字符号。

1. 基本文字符号 基本文字符号用以表示电气设备、装置和元件以及线路的基本名称、特性,分为单字母符号和双字母符号。

(1) 单字母符号 单字母符号用来表示按国家标准划分的 23 大类电气设备、装置和元器件(见表 1-13)。

表 1-13 单字母符号

字母代码	项目种类	举例
A	组件 部件	分离元件放大器、磁放大器、激光器、微波 激光器、印制电路板 本表其他地方未提及的组件、部件
B	变换器 (从非电量到电量或相反)	热电传感器、热电池、光电池、测功计、晶 体换能器、送话器、拾音器、扬声器、耳机、自 整角机、旋转变压器
C	电容器	
D	二进制单元 延迟器件 存储器件	数字集成电路和器件、延迟线、双稳态元 件、单稳态元件、磁芯存储器、寄存器、磁带 记录机、盘式记录机
E	杂项	光器件、热器件 本表其他地方未提及的元件
F	保护器件	熔断器、过电压放电器件、避雷器
G	发电机电源	旋转发电机、旋转变频器、电池、振荡器、 石英晶体振荡器
H	信号器件	光指示器、声指示器
J	—	—
K	继电器、接触器	—
L	电感器 电抗器	感应线圈、线路陷波器 电抗器(并联和串联)
M	电动机	
N	模拟集成电路	运算放大器、模拟/数字混合器件
P	测量设备 试验设备	指示、记录、积算、测量设备信号发生器、 时钟
Q	电力电路的开关	断路器、隔离开关

字母代码	项目种类	举例
R	电阻器	可变电阻器、电位器、变阻器、分流器、热敏电阻
S	控制电路的开关选择器	控制开关、按钮、限制开关、选择开关、选择器、拨号接触器、连接级
T	变压器	电压互感器、电流互感器
U	调制器 变换器	鉴频器、解调器、变频器、编码器、逆变器、交流器、电报译码器
V	电真空器件 半导体器件	电子管、气体放电管、晶体管、晶闸管、二极管
W	传输通道 波导、天线	导线、电缆、母线、波导、波导定向耦合器、偶极天线、抛物面天线
X	端子 插头 插座	插头和插座、测试塞孔、端子板、焊接端子片、连接片、电缆封端和接头
Y	电气操作的机械装置	制动器、离合器、气阀
Z	终端设备 混合变压器 滤波器、均衡器 限幅器	电缆平衡网络 压缩扩展器 晶体滤波器 网络

(2) 双字母符号: 双字母符号是由表 1-13 中的单字母符号后面加另一个字母组成, 比较详细和更具体地表述电气设备、装置和元器件的名称。

常用双字母符号及新、旧符号对照见表 1-14。

表 1-14 常用双字母符号及新、旧符号对照

序号	名称	新符号		旧符号	序号	名称	新符号		旧符号
		单字母	双字母				单字母	双字母	
1	发电机	G		F	4	变压器	T		B
	直流发电机	G	GD	ZF		电力变压器	T	TM	LB
	交流发电机	G	GA	JF		控制变压器	T	T	KB
	同步发电机	G	GS	TF		升压变压器	T	TU	SB
	异步发电机	G	GA	YF		降压变压器	T	TD	JB
	水磁发电机	G	GM	YCF		自耦变压器	T	TA	OB
	水轮发电机	G	GH	SLF		整流变压器	T	TR	ZB
	汽轮发电机	G	GT	QLF		电炉变压器	T	TF	LB
	励磁机	G	GE	L		稳压器	T	TS	WY
2	电动机	M		D	5	互感器	T		H
	直流电动机	M	MD	ZD		电流互感器	T	TA	LH
	交流电动机	M	MA	JD		电压互感器	T	TV	YH
	同步电动机	M	MS	TD		整流器	U		ZL
	异步电动机	M	MA	YD		变流器	U		BL
	笼型电动机	M	MC	LD		逆变器	U		NB
3	绕组	W		Q	6	变频器	U		BP
	电枢绕组	W	WA	SQ		断路器	Q	QF	DL
	定子绕组	W	WS	DQ		隔离开关	Q	QS	GK
	转子绕组	W	WR	ZQ		自动开关	Q	QA	ZK
	励磁绕组	W	WE	LQ		转换开关	Q	QC	HK
	控制绕组	W	WC	KQ		刀开关	Q	QK	DK
7	控制开关	S	SA	KK	10	电阻器	R		R
	行程开关	S	ST	CK		变阻器	R		R
	限位开关	S	SL	XK		电位器	R	RP	W
	终点开关	S	SE	ZDK		起动电阻器	R	RS	QR
	微动开关	S	SS	WK		制动电阻器	R	RB	ZDR
	脚踏开关	S	SF	TK		频敏电阻器	R	RF	PR
	按钮开关	S	SB	AN		附加电阻器	R	RA	FR
	接近开关	S	SP	JK	11	电容器	C		C



序号	名称	新符号		旧符号	序号	名称	新符号		旧符号
		单字母	双字母				单字母	双字母	
8	继电器	K		J	12	电感器	L		L
	电压继电器	K	KV	YJ		电抗器	L		DK
	电流继电器	K	KA	LJ		起动电抗器	L	LS	QK
	时间继电器	K	KT	SJ		感应线圈	L		GQ
	频率继电器	K	KF	PJ	13	电线	W		DX
	压力继电器	K	KP	YLJ		电缆	W		DL
	控制继电器	K	KC	KJ		母线	W		M
	信号继电器	K	KS	XJ	14	避雷器	F		BL
	接地继电器	K	KE	JDJ		熔断器	F	FU	RD
	接触器	K	KM	C	15	照明灯	E	EL	ZD
9	电磁铁	Y	YA	DT		指示灯	H	HL	SD
	制动电磁铁	Y	YB	ZDT	16	蓄电池	G	GB	XDC
	牵引电磁铁	Y	YT	QYT		光电池	B		GDC
	起重电磁铁	Y	YL	QZT	17	晶体管	V		BG
	电磁离合器	Y	YC	CLH		电子管	V	VE	G
18	调节器	A		T	19	测速发电机	B	BR	CSF
	放大器	A		FD		送话器	B		S
	晶体管放大器	A	AD	BF		受话器	B		SH
	电子管放大器	A	AV	GF		拾声器	B		SS
	磁放大器	A	AM	CF		扬声器	B		Y
19	变换器	B		BH		耳机	B		EJ
	压力变换器	B	BP	YB	21	天线	W		TX
	位置变换器	B	BQ	WZB		接线柱	X		JX
	温度变换器	B	BT	WDB		连接片	X	XB	LP
	速度变换器	B	BV	SDB		插头	X	XP	CT
	自整角机	B		ZZJ	插座	X	XS	CZ	
					22	测量仪表	P		CB

2. 辅助文字符号 辅助文字符号用来表示电气设备装置和元器件以及线路的功能、状态和特征。常用辅助文字符号及新旧符号对照见表 1-15。

表 1-15 常用辅助文字符号及新旧符号对照

序号	名称	新符号	旧符号		序号	名称	新符号	旧符号	
			单组合	多组合				单组合	多组合
1	高	H	G	G	6	辅	AUX	F	F
2	低	L	D	D	7	中	M	Z	Z
3	升	U	S	S	8	正	FW	Z	Z
4	降	D	J	J	9	反	R	F	F
5	主	M	Z	Z	10	红	RD	H	H
11	绿	GN	L	L	21	断开	OFF	DK	D
12	黄	YE	U	U	22	附加	ADD	F	F
13	白	WH	B	B	23	异步	ASY	Y	Y
14	蓝	BL	A	A	24	同步	SYN	T	T
15	直流	DC	ZL	Z	25	自动	A ,AUT	Z	Z
16	交流	AC	JL	J	26	手动	M ,MAN	S	S
17	电压	V	Y	Y	27	起动	ST	Q	Q
18	电流	A	L	L	28	停止	STP	T	T
19	时间	T	S	S	29	控制	C	K	K
20	闭合	ON	BH	B	30	信号	S	X	X

3. 特殊文字符号 在电气工程图中,一些特殊用途的接线端子、导线等,常采用一些专用文字符号标注。常用的一些特殊用途文字符号见表 1-16。

表 1-16 特殊用途文字符号

序号	名称	文字符号	备注	序号	名称	文字符号	备注
1	交流系统电源第 1 相	L <sub>1</sub>	旧符号为 A	7	交流系统设备第 3 相	W	C
2	交流系统电源第 2 相	L <sub>2</sub>	B	8	直流系统电源正极	L <sub>+</sub>	
3	交流系统电源第 3 相	L <sub>3</sub>	C	9	直流系统电源负极	L <sub>-</sub>	
4	中性线	N	0	10	直流系统电源中间线	M	旧符号为 Z
5	交流系统设备第 1 相	U	A	11	接地	E	旧符号为 D
6	交流系统设备第 2 相	V	B	12	保护接地	PE	

序号	名称	文字符号	备注	序号	名称	文字符号	备注
13	不接地保护	PU		16	机壳或机架	MM	
14	保护接地线 和中性线共 用	PEN		17	等电位	CC	
15	无噪声接地	TE		18	交流电	AC	旧符号为 JL
				19	直流电	DC	旧符号为 ZL

## 二、电工标准

### (一) 标准和标准化概述

1. 基本概念、标准的分级和代号、标准专业分类及代号 标准是指为在给定范围内达到最佳秩序,对各种活动或其结果所规定的、共同的和重复使用的规则、指导原则或特性,经过协商根据多数意见制定并经过公认机构批准的一种文件。标准应以科学、技术和经验的综合成果为基础,并以增进社会效益为目的。

标准化是指为在给定范围内达到最佳秩序,对实际的或潜在的问题规定共同的和重复使用的规则的活动。标准化包括标准的制定、发布和实施的整个过程,以改进产品、方法和服务的适应性,并防止贸易壁垒,便于技术合作。

按级别分,标准有国家标准、行业标准、地方标准和企业标准。行业标准不得与国家标准相抵触,地方标准不得与国家标准、行业标准相抵触,企业标准不得与国家标准、行业标准、地方标准相抵触。国家标准、行业标准分为强制性标准和推荐性标准。

表 1-17 标准文献分类与代号

A	综合	N	仪器、仪表
B	农业、林业	P	工程建设
C	医药、卫生劳动保护	Q	建材
D	矿业	R	公路、水路运输
E	石油	S	铁路
F	能源、核技术	T	车辆
G	化工	U	船舶
H	冶金	V	航空、航天
J	机械	W	纺织
K	电工	X	食品
L	电子元器件与信息技术	Y	轻工、文化与生活用品
M	通信、广播	Z	环境保护

国家标准、行业标准、地方标准和企业标准都由标准代号、顺序号和批准发布年号三段组成。国家标准代号及符号有三种:GB××××—××××(强制性国家标准),GB/T××××—××××(推荐性国家标准)和GB/\*××××—××××(降为行业标准而尚未转化的原国家标准)。行业标准代号由国务院标准化行政主管部门规定。例如,强制性电力行业标准代号为DL,推荐性电力行业标准代号为DL/T。地方标准的标准代号为DB加上省、自治区或直辖市的代码前两位数字。例如陕西省强制性地方标准代号为DB61,推荐性地方标准代号为DB61/T。企业标准代号为Q/加企业代号组成。标准分类与代号见表1-17。

## (二) 国际标准和国外先进标准

国际标准、国外先进标准的概念,部分国际标准、国外先进标准名称和代号。国际标准指和国际电工委员会(IEC)所制定的标准,以及国际标准化组织ISO确认并公布的其他国际组织制定的标准。

国外先进标准指未经ISO确认并公布的其他国际组织的标准,发达国家的国家标准,区域性组织的标准,国际上有权威的团体标准和企业(公司)标准中的先进标准。

常见国际标准及一些国家标准见表1-18。IEC标准见表1-19。IEC家用电器安全标准见表1-20。我国基本等效采用IEC家用电器安全标准。

表1-18 常见国际标准及一些国家标准

ANSI	美国国家标准
ASTM	美国试验与材料学会标准
BIPM	国际计量局
BS	英国国家标准
CCIR	国际无线电咨询委员会
CCITT	国际电报电话咨询委员会
CEN	欧洲标准化委员会
CENELEC	欧洲电工标准化委员会
CIE	国际照明委员会
CIS-PR	国际无线电干扰特别委员会
DIN	德国国家标准
DKE	德国电工委员会标准
IEC	国际电工委员会
IEEE	电气电子工程师学会标准
IIW	国际焊接学会
ISO	国际标准化组织
ITU	国际电信联盟
JIS	日本工业标准
MIL	美国军用标准
NEMA	美国电气制造商协会标准
NF	法国国家标准

OIML	国际法制计量组织
SEMI	国际半导体设备和材料组织
UIC	国际铁路联盟
UL	美国保险商实验所安全标准
VDE	德国电气工程师协会标准
TOCT	俄罗斯国家标准

表 1-19 IEC 标准

标准名称	标准号
国际电工词汇	50
标准电压、电流、频率	38, 59, 196
建筑物电气装置	364
建筑物电气装置的电压区段	449
建筑物防雷	1024
电气安全导则	1200
家用电器的安全	335
电热装置安全	519
电流通过人体的效应	479
电气和电子设备防触电保护	536
人机、界面、标志和标识的基本和安全要求—编码规则	73
绝缘导线的标志	391
用颜色或数字识别导体的方法	446
颜色标示代号	757
电气技术用文字符号	27
图用图形符号	417
电工技术中的项目代号	750
绝缘配合	71
避雷器选择和使用导则	99
高压电器	56, 265, 420, 470, 694, 1233, 1633
交流隔离开关	1128
72.5kV 及以上 GIS	517, 1259
72.5kV 及以上 GIS 电缆连接	859

标准名称	标准号
1 ~ 52kV 金属封闭式成套开关与控制装置	298
交流隔离开关及接地开关	129
低压成套开关设备和控制设备	439
高/低压预制变电站	1330
低压控制设备	158
由外壳提供保护的等级( IP 代码 )	529
稳压电源	470 486
铅酸牵引蓄电池	254
镉镍电池	622 623
爆炸危险气体中的电气装置	79
户外严酷条件下( 含露天矿及采石场 )的电气装置	621
环境条件的划分	721
电气测量仪表及其附件	51 145 387 , 521 523 687
电气继电器	255
旋转电机装入式热保护	34 - 11
高压电机起动器	632
油浸及干式变压器、有载调压器应用	76 310 542 606 616 722 726 905
变压器回路高压熔断器熔体选择应用导则	787
电气牵引设备	77
互感器	44 185 186
家用及类似目的熔断器	241
低压熔断器	269
熔断器定义	291
小型熔断器	127
电力系统电容器	143
电容器组保护设备	143 - 2
并联电容器外部保护高压熔断器	549
串联电容器内部熔断器	595
导体载流量	448
电缆选择、载流量、短路温度限值、敷设	287 228 245 183 92 724 853 986
电缆周期性电流及应急电流计算	853
电缆试验方法	885

标 准 名 称	标 准 号
软电缆芯线颜色	173
电缆的阻燃特性	331
射频电缆	96 ,1196
射频连接器	169
光纤电缆、接头、分支器、开关	827 ,874 ,875 ,876
电线电缆穿管	614 ,1035
照明器	598
白炽灯安全规程	432
单盖荧光灯安全规程	1199
常用照明设备抗干扰要求	1547
卤钨灯	357
通用照明用管式荧光灯	81
荧光灯启辉器	155
低压钠灯	192
高压汞灯	188
高压钠灯	662
管式荧光灯镇流器	920 ,921
管式荧光灯直流电子镇流器	924 ,925
放电灯镇流器	922 ,923 ,926 ,927 ,928 ,929
自镇流器	968 ,969
管式荧光灯灯座及启动器座	400
爱迪生螺口灯座	238
各种灯座	838
插头与插座	83 ,309
铝母排	105 ,114
架空线	104 ,888 ,889 ,913 ,1232
架空裸绞线计算方法	1597
架空输电线的荷载及强度	826
架空线绝缘子	305 ,383
架空线金具要求及试验	1284
架空线杆塔荷载试验	652
交流电力系统阻波器	353

标准名称	标准号
电力载波系统耦合装置	481
三相交流系统短路计算	909
放射式低压系统短路电流计算应用导则	781
医用电气设备	601 976 977 ,1262 ,1303
船用电气装置	92
报警系统	839

表 1-20 家用和类似用途电器的安全系列标准一览表

标准名称	IEC 标准号	国家标准号
通用要求	IEC335-1	GB4706.1
电熨斗的特殊要求	IEC335-2-3	GB4706.2
食物搅拌器及类似用途电器的特殊要求	IEC335-2-14	GB4706.3
电水壶的特殊要求	IEC335-2-15	GB4706.4
电炒锅的特殊要求	IEC335-2-13	GB4706.5
自动电饭锅的特殊要求		GB4706.6
真空吸尘器和吸水式清洁器的特殊要求	IEC335-2-2	GB4706.7
电热毯、电热垫和电热褥的特殊要求	IEC335-2-17	GB4706.8
电动剃须刀、电推剪及类似器具的特殊要求	IEC335-2-8	GB4706.9
按摩电器的特殊要求	IEC335-2-32	GB4706.10
快热式热水器的特殊要求	IEC335-2-35	GB4706.11
贮水式电热水器的特殊要求	IEC335-2-21	GB4706.12
电冰箱、食品冷冻箱和制冰机的特殊要求	IEC335-2-4	GB4706.13
面包片烘烤器、烤架、电烤炉及类似用途器具的特殊要求	IEC335-2-9	GB4706.14
皮肤及毛发护理器具的特殊要求	IEC335-2-23	GB4706.15
电池驱动的电动剃须刀、电推剪及其充电和电池组的特殊要求	IEC335-2-19	GB4706.16
电动机—压缩机的特殊要求	IEC335-2-34	GB4706.17
电池充电器的特殊要求	IEC335-2-29	GB4706.18
液体加热器的特殊要求	IEC335-2-15	GB4706.19
滚筒式干衣机的特殊要求	IEC335-2-11	GB4706.20
微波炉的特殊要求	IEC335-2-25	GB4706.21



标准名称	IEC 标准号	国家标准号
家用电灶、灶台、烤炉及类似器具的特殊要求	IEC335-2-6	GB4706.22
室内加热器的特殊要求	IEC335-2-30	GB4706.23
洗衣机的特殊要求	IEC335-2-7	GB4706.24
洗碟机的特殊要求	IEC335-2-5	GB4706.25
离心式脱水机的特殊要求	IEC335-2-4	GB4706.26
电风扇和调速器的特殊要求	IEC342-1	GB4706.27
吸油烟机的特殊要求	IEC335-2-31	GB4706.28
电磁灶的特殊要求	IEC335-2-31	GB4706.29
电动食品加工器具的特殊要求	IEC335-2-14	GB4706.30
房间空气调节器电气设备的安全要求	IEC378	GB5956

### (三) 国家标准中电工标准简介

1. 常用的电工标准 见表 1-21 及表 1-22。

表 1-21 通用电工标准名称、代号

标准代号	标准名称
GB/T762—1996	标准电流
GB/T999—1988	直流电力牵引电压系列
GB/T1980—1996	标准频率
GB/T2421~2424—81~97	电工电子产品环境试验规程
GB/T2900.1~48	电工基本名词术语及各专业名词术语
GB/T3805—1993	特低电压(ELV)限值
GB/T4728—84.85.96	电气图用图形符号
GB/T5094—1985	电气技术中项目代号
GB/T5465.1~2—1996	电气设备用图形符号
GB156—1993	标准电压
GB311.1~7—83~95	高压输变电设备的绝缘配合及高压试验技术
GB3785—83	声级计的电声性能及测量方法
GB3907—83	工业无线电干扰基本测量方法
GB3926—83	中频设备额定电压
GB4026—83	电器接线端子的识别和用字母、数字符号标志接线端子的通则
GB4046—83	电气设备安全设计导则
GB6988.1~7—86.93	电气制图
GB7159	电气技术中的文字符号制订通则
CECS37	工业企业通信工程设计图形及文字符号标准

表 1-22 专业用电工标准名称、代号

标准名称	标准号
供电电压允许偏差,电压允许波动和闪变	GB12325 GB12326
电气装置安装工程电气设备交接试验标准	GB50150
建筑电气安装工程质量检验评定标准	GBJ303
工业企业照明	GB50034
民用建筑照明	GBJ133
城市道路照明	GJJ45
地下建筑照明	GECS45
低压成套开关设备	GB7251
低压抽出式成套开关设备	ZBK36001
电梯技术条件	GBJ/T10058
电梯实验方法	GBJ/T10059
并联电容器用串联电抗器设计选择	CECS32
并联电容器装置的电压、容量系列选择	CECS33
电工名词术语 电气传动及自动控制	GB2900.34—83
电气传动控制设备基本试验方法	GB10233—88
面板、架和柜的基本尺寸系列	GB3047.1—95
电控设备产品型号编制办法	GB3752—84
电控设备第一部分:低压电器电控设备	GB4720—84
电控设备第二部分:装有电子器件的电控设备	GB3797—89
控制电气设备操作件标准运动方向	GB4205—84
电控设备通用辅件产品型号编制办法	GB3345—83
同步电动机半导体励磁装置总技术条件	GB12667—90
交流电动机半导体变频调速装置总技术条件	GB12668—90
半导体变流串级调速装置总技术条件	GB12669—90
电工成套装置中的导线颜色	GB2681—81
导体的颜色或数字标识	GB7947
绝缘导线的标记	GB4884
指示灯和按钮的颜色	GB4025—83
外壳防护等级(IP代码)	GB4208—93
中、短波广播发射台与电缆载波通信系统的防护间距	GBJ142
架空电力线路、变电所对电视差转台、转播台无线电干扰防护间距	GBJ143

2. 标准电压 国家标准 GB156《标准电压》规定了电力系统的标称电压值、电气设备的额定电压值和电气设备的最高电压值,适用于直流和 50Hz 交流的系统 and 电气设备,也适用于电子设备、电信设备和电气器

具,不适用于下列设备,但不予限制:1)电气设备内部的元器件和部件的电压;2)表示信号、传输信号或测量值的电压;3)专用试验设备的电压。

GB156规定的220~1000(1140)V的交流电力系统(三相四线或三相三线)的标称电压值及电气设备(不包括发电机)的额定电压值见表1-23,3kV及以上的三相交流系统的标称电压值和电气设备的最高电压值见表1-24。交流380V及以下和直流2000V及以下的电气设备(不包括发电机)的额定电压值见表1-25;发电机的额定电压值见表1-26。

表1-23 220~1000(1140)V的交流系统的标称电压值及电气设备的额定电压值 (V)

220/380	380/660	1000(1140)
---------	---------	------------

注:1.1140V仅限于煤矿井下使用。

2.斜线之上为相电压,斜线之下为线电压,无斜线为三线系统线电压。

表1-24 3kV及以上的三相交流系统的标称电压值和电气设备的最高电压值 (kV)

系统的标称电压值	设备的最高电压值	系统的标称电压值	设备的最高电压值
3	3.6	110	120(123)
6	7.2	220	250(245)
10	12	330	363
(20)	(24)	500	550
35	40.5	(750)	(800)
66	72.5	—	1200

注:1.括号中的数值为用户有要求时使用。

2.电气设备的额定电压值可从表中选取,由产品标准确定。

表1-25 交流380V及以下和直流2000V及以下的电气设备额定电压值 (V)

直流额定电压值		交流额定电压值	
优先值	补充值	优先值	补充值
—	1.2	—	—
1.5	—	—	—
2	—	—	—
—	2.4	—	—
3	—	—	—
—	4.5	—	—
—	5	—	5
6	—	6	—
—	9	—	—
12	—	12	—

直流额定电压值		交流额定电压值	
—	15	—	15
24	—	24	—
—	30	—	—
36	—	36	—
—	—	—	42
48	—	48	—
60	—	—	60
72	—	—	—
—	—	—	100
110	—	110	—
—	—	—	127
160	—	—	—
220	—	220	—
—	—	380	—
—	400	—	—
440	—	—	—
—	630	—	—
800	—	—	—
1000	—	—	—
—	1250	—	—
1500	—	—	—
2000	—	—	—

中频设备的额定电压在 GB3926《中频设备额定电压》国家标准中规定。船舶和海上石油平台用电工产品的额定电压在 GB4988 中规定。直流电力牵引的额定电压在 GB999 中规定。

原国家标准 GB3805—83《安全电压》已被国家标准 GB3805—93《特低电压(ELV)限值》代替,新标准 GB3805—93 规定的电压限值是指在最不利的情况下允许存在于两个可同时触及的可导电部分间的最高电压。具体规定见 GB3805—93。

表 1-26 发电机的额定电压值

(V)

交流发电机 额定电压值	直流发电机 额定电压值	交流发电机 额定电压值	直流发电机 额定电压值
115	115	13800	—
230	230	15750	—

交流发电机 额定电压值	直流发电机 额定电压值	交流发电机 额定电压值	直流发电机 额定电压值
400	460	18200	—
690	—	20000	—
3100	—	22000	—
6300	—	24000	—
10500	—	26000	—

注：与发电机出线端配套的电气设备额定电压，可采用发电机的额定电压，在产品标准中具体规定。

3. 标准电流 GB762—1996 规定了电气设备电流值，适用于以电流为主要参数的交、直流电气设备，包括电工设备、电子设备以及家用和类似用途的电气器具。GB762—1996 不适用于电气设备内部的控制回路。标准电流值见表 1—27。

4. 标准频率 GB/T1980—1996 规定了电气设备的标准频率值。它适用于频率从 50 ~ 10000Hz 的单相和三相交流电力系统及电气设备（包括电工设备、电子设备、电信设备以及家用和类似用途的电气器具）。本标准不适用于铁道信号控制回路、单台设备或一组设备的内部控制回路。标准频率值见表 1—28。

表 1—27 标准电流值

(A)

电流范围	标准电流值										
	1	1.25	1.6	2	2.5	3.15	4	5	6.3	8	
1 ~ 10000	10	12.5	16	20	25	31.5	40	50	63	80	
	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	
	1000	1250	1600	2000	2500	3150	4000	5000	6300	8000	10000
< 1	0.00001					0.00005					
	0.0001	0.0002	0.000315	0.0004	0.0005	0.00063	0.0008				
	0.001	0.00125	0.0016	0.002	0.0025	0.00315	0.004	0.005	0.0063	0.008	
	0.01	0.0125	0.016	0.02	0.025	0.0315	0.04	0.05	0.063	0.08	
	0.1	0.125	0.16	0.2	0.25	0.315	0.4	0.5	0.63	0.8	
> 10000	12500	16000	20000	25000	31500	40000					
	50000	63000	80000	100000	125000	160000					

表 1—28 标准频率值

<u>50(60)</u>	<u>100</u>	<u>150</u>	<u>200</u>	<u>250</u>	<u>300</u>	<u>400</u>	<u>500</u>	600	750
<u>1000</u>	1200	1500	<u>2000</u>	2400	3000	<u>4000</u>	8000	<u>10000</u>	

注 1. 划有横线的频率值为优先值。

2. 带( )值仅限在用电源系统使用。

3. 由感应电动机驱动的旋转机组所产生的频率，其实际频率略低于上列的数值。

## 第四节 计量单位与单位换算

### 一、计量单位

法定计量单位以国际单位制(SI)的单位为基础,同时选用一些非国际单位制的单位构成的。它包括:1)国际单位制(SI)的基本单位(表1-29);2)国际单位制的辅助单位及国际单位制中具有专门名称的SI导出单位(表1-30);3)可与国际单位制并用的我国法定计量单位(表1-31);4)由词头和以上单位构成的十进倍数和分数单位(表1-32)。

表 1-29 国际单位制的基本单位

计量	单位名称	符号	定义
长度	米	m	米是光在真空中 $1/299792458$ s 时间间隔内所经路径的长度(1983年第17届国际计量大会决议)
质量	千克(公斤)	kg	千克等于国际千克原器的质量(1889年第1届和1901年第3届国际计量大会)
时间	秒	s	秒是铯—133 原子基态的两个超精细能级之间跃迁所对应的辐射 $9192631770$ 个周期的持续时间(1967年第13届国际计量大会决议)
电流	安培]	A	在真空中,截面积可忽略的两根相距 $1\text{m}$ 的无限长平行圆直导线内通以等量恒定电流时,若导线间相互作用力在每米长度上为 $0.2\mu\text{N}$ ,则每根导线中的电流为 $1\text{A}$ (1946年国际计量大会决议 2 第9届国际计量大会批准)
热力学温度	开尔文]	K	开尔文是水三相点热力学温度的 $1/273.16$ (1967年第13届国际计量大会决议 4)
物质的量	摩尔]	mol	摩尔是一系统物质的量,该系统中所包含的基本单元数与 $0.012\text{kg}$ 碳-12 的原子数目相等。使用摩尔时,基本单元应予以指明:可以是原子、分子、离子、电子及其他粒子,或是这些粒子的特定组合(1971年第14届国际计量大会决议 3)

计量	单位名称	符号	定义
发光强度	坎德拉]	cd	坎德拉是一光源(频率为 540THz 的单色辐射)在给 定方向上的发光强度,且该方向上的辐射强度为(1/ 683)W/s(1979 年第 16 届国际计量大会决议 3)

表 1-30 包括 SI 辅助单位在内的具有专门名称的 SI 导出单位

量的名称	SI 导出单位名称	符号	用 SI 基本单位和 SI 导出单位表示
[平面]角	弧度	rad	1rad = 1m/m = 1
立体角	球面度	sr	1sr = 1m <sup>2</sup> /m <sup>2</sup> = 1
频率	赫兹]	Hz	1Hz = 1s <sup>-1</sup>
力	牛顿]	N	1N = 1kg·m/s <sup>2</sup>
压力,压强,应力	帕斯卡]	Pa	1Pa = 1N/m <sup>2</sup>
能量],功,热量	焦耳]	J	1J = 1N·m
功率,辐射能通量	瓦特]	W	1W = 1J/s
电荷量]	库仑]	C	1C = 1A·s
电压,电动势,电位	伏特]	V	1V = 1W/A
电容	法拉]	F	1F = 1C/V
电阻	欧姆]	Ω	1Ω = 1V/A
电导	西门子]	S	1S = 1Ω <sup>-1</sup>
磁通量]	韦伯]	Wb	1Wb = 1V·s
磁通量密度,磁感应强度	特斯拉]	T	1T = 1Wb/m <sup>2</sup>
电感	亨利]	H	1H = 1Wb/A
摄氏温度	摄氏度	°C	1°C = 1K
光通量	流明]	lm	1lm = 1cd·sr
[光照度	勒克斯]	lx	1lx = 1lm/m <sup>2</sup>
[放射性]活度	贝可勒尔]	Bq	1Bq = 1s <sup>-1</sup>
吸收剂量			
比授予能	戈瑞]	Gy	1Gy = 1J/kg
比释动能			
剂量当量	希沃特]	Sv	1Sv = 1J/kg

表 1-31 可与国际单位制单位并用的我国法定计量单位

量的名称	单位名称	单位符号	与 SI 单位的关系
时间	分	min	1min = 60s
	[小时]	h	1h = 60min = 3600s
	日(天)	d	1d = 24h = 86400s
[平面角]	度	°	1° = (π/180)rad
	[角分]	'	1' = (1/60)° = (π/10800)rad
	[角秒]	"	1" = (1/60)' = (π/648000)rad
体积	升	l, L	1l = 1dm <sup>3</sup> = 10 <sup>-3</sup> m <sup>3</sup>
质量	吨	t	1t = 10 <sup>3</sup> kg
	原子质量单位	u	1u ≈ 1.660540 × 10 <sup>-27</sup> kg
旋转速度	转每分	r/min	1r/min = (1/60)s <sup>-1</sup>
长度	海里	n mile	1n mile = 1852m(只用于航行)
速度	节	kn	1kn = 1n mile/h = (1852/3600)m/s(只用于航行)
能	电子伏	eV	1eV ≈ 1.602177 × 10 <sup>-19</sup> J
级差	分贝	dB	
线密度	特[克斯]	tex	1tex = 10 <sup>-6</sup> kg/m
面积	公顷	hm <sup>2</sup>	1hm <sup>2</sup> = 10 <sup>4</sup> m <sup>2</sup>

表 1-32 用于构成十进倍数和分数单位的词头

因数	词头名称		符号
	中文	英文	
10 <sup>24</sup>	尧它]	yotta	Y
10 <sup>21</sup>	泽它]	zetta	Z
10 <sup>18</sup>	艾可萨]	exa	E
10 <sup>15</sup>	拍它]	peta	P
10 <sup>12</sup>	太拉]	tera	T
10 <sup>9</sup>	吉咖]	giga	G
10 <sup>6</sup>	兆	mega	M
10 <sup>3</sup>	千	kilo	k
10 <sup>2</sup>	百	hecto	h
10 <sup>1</sup>	十	deca	da
10 <sup>-1</sup>	分	deci	d
10 <sup>-2</sup>	厘	centi	c



因数	词头名称		符号
	中文	英文	
$10^{-3}$	毫	milli	m
$10^{-6}$	微	micro	$\mu$
$10^{-9}$	纳 [ 诺 ]	nano	n
$10^{-12}$	皮 [ 可 ]	pico	p
$10^{-15}$	飞 [ 母托 ]	femto	f
$10^{-18}$	阿 [ 托 ]	atto	a

说明: 1) 本篇表中圆括号中的量与单位的名称是它前面的名称的同义词; 2) 无方括号的量与单位的名称均为全称, 有方括号的量与单位连续为全称, 去掉方括号中的字即为简称。

## 二、单位换算关系

### (一) 时间和空间的单位换算

1. 长度单位换算 国际单位制长度基本单位是米(m), 长度单位间换算关系见表 1-33。

表 1-33 长度单位换算

单位名称	符号	换算关系	备注
千米(公里)	km	1000m	
厘米	cm	$10^{-2}$ m	
毫米	mm	$10^{-3}$ m	
英里	mile	1609.34m	
码	yd	0.9144m	
英尺	ft	0.3048m	
海里	n mile	1852m	
埃	Å	$10^{-10}$ m	常用于表示光谱线的波长及其他微小长度
费密	fm	$10^{-15}$ m	用于原子核物理学
天文单位	AU	$1.495978 \times 10^{11}$ m	用于天文学
秒差距	pc	$3.0857 \times 10^{16}$ m	用于天文学
光年	1.y.	$9.46053 \times 10^{15}$ m	用于天文学

2. 面积单位换算 法定计量单位是平方米( $m^2$ ), 其他面积单位换算关系见表 1-34。

表 1-34 面积单位换算

平方公里 (km <sup>2</sup> )	公顷 (ha)	公亩 (a)	平方米 (m <sup>2</sup> )	平方厘米 (cm <sup>2</sup> )	平方英里 (mile <sup>2</sup> )	英亩 (acre)	靶恩 (b)	圆密耳	亩
1	10 <sup>2</sup>	10 <sup>4</sup>			0.3861				
	1	10 <sup>2</sup>	10 <sup>4</sup>	10 <sup>6</sup>					
		1	10 <sup>2</sup>			0.02471			
			10 <sup>-4</sup>	1					
			10 <sup>-28</sup>				1		
			5.06707 × 10 <sup>-10</sup>					1	
			666.6						1

3. 体积和容积单位换算 法定计量单位是立方米(m<sup>3</sup>),体积单位换算关系见表 1-35。

表 1-35 体积单位换算

立方米(m <sup>3</sup> )	升(L)	立方厘米(cm <sup>3</sup> )	立方码(yd <sup>3</sup> )	英加仑(Ukgal)	美加仑(Usgal)
1	1000	10 <sup>6</sup>	1.308	220	264.2

4. 时间单位换算(表 1-36)

5. 角速度、转速单位换算(表 1-37)

6. 速度单位换算(表 1-38)

表 1-36 时间单位换算

单位名称	符号	与法定计量单位的关系	备注
周	a	604800(7d)	} 可与法定计 量单位并用
月		2592000(30d)	
年		31536000(365d)	
		31622400(366d)	
回归年	a <sub>trop</sub>	3.15569 × 10 <sup>7</sup> s	d 表示 1 日
恒星年		3.15582 × 10 <sup>7</sup> s	

表 1-37 角速度和转速单位换算

转每分(r/min)	转每秒(r/s)	弧度每秒(rad/s)	度每分[(°)/min]	度每秒[(°)/s]
1	0.0166667	0.104720	360	6
60	1	6.28319	21600	360
9.54930	0.159155	1	3437.75	57.2958

转每分( r/min )	转每秒( r/s )	弧度每秒( rad/s )	度每分( °/min ]	度每秒( °/s ]
0.00277778	$4.62963 \times 10^{-5}$	$2.90888 \times 10^{-4}$	1	0.0166667
0.166667	0.00277778	0.0174533	60	1

表 1-38 速度单位换算

千米每时( km/h )	米每分( m/min )	米每秒( m/s )	厘米每秒( cm/s )	英里每时( mile/h )	海里每时( n. mile/h )
1	16.6667	0.2778	27.7778	0.6214	0.54
0.06	1	0.01667	1.6667	0.03728	0.0324
3.6	60	1	100	2.2369	1.944
0.036	0.6	0.01	1	0.0224	0.01944
1.6093	26.82	0.4470	44.7040	1	0.87
1.852	30.867	0.514	51.4	1.1508	1

## 7. 加速度单位换算(表 1-39)

表 1-39 加速度单位换算

单位名称	符号	与法定计量单位的关系	备注
伽( galileo )	Gal	$10^{-2} \text{m/s}^2$	
毫伽( milligal )	mGal	$10^{-5} \text{m/s}^2$	
英尺每二次方秒	ft/s <sup>2</sup>	0.3048m/s <sup>2</sup>	
标准重力加速度	g <sub>n</sub>	9.80665m/s <sup>2</sup>	

## 8. 平面角单位换算(表 1-40)

表 1-40 平面角单位换算

单位名称	符号	与法定计量单位的关系	备注
圆周角	tripla	6.28318rad	2π rad
转	r	6.28318rad	2π rad
冈	(g) gon gr	0.0157080rad	0.9°或(π/200)rad
直角	L	1.57080rad	0.5π rad

## (二)力学单位换算

1. 质量 法定计量单位为千克( kg )质量单位间换算关系见表 1-41。

2. 密度

常用的线密度换算关系：

$$1 \text{ 特克斯( tex )} = 10^{-6} \text{ kg/m}$$

$$1 \text{ 磅每英尺( lb/ft )} = 1.48816 \text{ kg/m}$$

表 1-41 质量单位换算

单位名称	符号	换算关系
吨	t	1000kg
英吨	ton	1016kg
美吨	sh. ton	907.185kg
斤		0.5kg
磅	lb	0.45359kg
米制克拉		$2 \times 10^{-4}$ kg
盎司	oz	0.02835kg
格令	gr	$6.47989 \times 10^{-5}$ kg

常用的体密度换算关系有：

$$1 \text{ 吨每立方米 (t/m}^3\text{)} = 1000\text{kg/m}^3$$

$$1 \text{ 吨每立方米 (t/m}^3\text{)} = 1000\text{g/L}$$

3. 力和重量 力的 SI 单位制导出单位为牛顿(N)。

$$1 \text{ 牛顿 (N)} = 10^5 \text{ 达因 (dyn)}$$

$$1 \text{ 千克力 (kgf)} = 9.80665 \text{ 牛 (N)}$$

$$1 \text{ 磅力 (lbf)} = 32.1740 \text{ 磅达 (pdl)}$$

$$= 4.44822 \text{ 牛 (N)}$$

4. 压力、压强(表 1-42)

表 1-42 压力、压强单位换算

帕斯卡 (Pa)	微巴 (pbar)	毫巴 (mbar)	巴 (bar)	千克力每 平方毫米 (kgf/mm <sup>2</sup> )	工程大气压 (at)	毫米水柱 (mmH <sub>2</sub> O) (kgf/m <sup>2</sup> )	标准大气压 (atm)	毫米汞柱 (mmHg)
1	10	0.01	$10^{-5}$	$1.02 \times 10^{-7}$	$1.02 \times 10^{-5}$	0.102	$0.99 \times 10^{-5}$	0.0075
0.1	1	0.001				0.102		
100	1000	1	0.001			10.2		0.7501
$10^5$	$10^6$	1000	1	0.0102	1.02	1197	0.9869	750.1
$98.07 \times 10^{-5}$		98067	98.07	1	100	$10^6$	96.78	73556
98067		980.7	0.9807	0.01	1	$10^4$	0.9678	735.6
9.807	98.07	0.0981			0.0001	1	$0.9678 \times 10^{-4}$	0.0736
101325		1013	1.013		1.0332	10332	1	760
133.322	1333	1.333			0.00136	13.6	0.00132	1

5. 力矩和转矩(表 1-43)

表 1-43 力矩和转矩单位换算

牛 顿 米(N·m)	千克力米(kgf·m)	克力厘米(gf·cm)	达因厘米(dyn·cm)
1	0.1020	$0.1020 \times 10^5$	$10^7$
9.807	1	$10^5$	$9.807 \times 10^7$
$9.807 \times 10^{-5}$	$10^{-5}$	1	980.7
$10^{-7}$	$1.020 \times 10^{-8}$	$1.020 \times 10^{-3}$	1

## 6. [ 动力 ]粘度和运动粘度

常用的动力粘度换算有：

1 泊(P)=0.1 帕 斯 卡 秒 Pa·s

1 千克力秒每平方米(kgf·s/m<sup>2</sup>)=9.81Pa·s

常用的运动粘度换算有：

1 斯 托 克 斯 [St]= $10^{-4}$ m<sup>2</sup>/s1 平方英尺每秒(ft<sup>2</sup>/s)= $92.9 \times 10^{-3}$ m<sup>2</sup>/s

## 7. 功和能(表 1-44)

表 1-44 功和能单位换算

尔格 (erg)	焦 耳 ] (J)	千克力·米 (kgf·m)	马力小时	英马力小时 (hp·h)	千瓦时 (kW·h)
1	$10^{-7}$	$0.102 \times 10^7$	$37.77 \times 10^{-15}$	$37.25 \times 10^{-15}$	$27.78 \times 10^{-15}$
$10^7$	1	0.102	$377.7 \times 10^{-9}$	$372.5 \times 10^{-9}$	$277.8 \times 10^{-9}$
$9.807 \times 10^7$	9.807	1	$3.704 \times 10^{-6}$	$3.653 \times 10^{-6}$	$2.724 \times 10^{-6}$
$26.4779 \times 10^{12}$	$2.64779 \times 10^6$	$270 \times 10^3$	1	0.9863	0.7355
$26.8452 \times 10^{12}$	$2.68452 \times 10^6$	$273.8 \times 10^3$	1.014	1	0.7457
$36 \times 10^{12}$	$3.6 \times 10^6$	$367.1 \times 10^3$	1.36	1.341	1

## 8. 功率 常用的功率换算有：

1 瓦 特 [W]=1J/s

1 千克力米每秒(kgf·m/s)=9.80665W

[ 米制 ]马力=735.499W

[ 英制 ]马力(HP)=745.700W

## (三)电学和磁学单位换算

电荷： 1 安培小时(A·h)= $3.6 \times 10^3$ C(库仑)磁通量： 1 麦克斯韦(Mx)= $10^{-5}$ Wb(韦伯)磁通密度： 1 高斯(Gs)= $10^{-4}$ T(特斯拉)

磁场强度：1 奥斯特(Oe)=79.5775A/m

磁通势： 1 吉伯(Gb)=0.795775A

## (四)热学单位换算

1. 温度(表 1-45) 表中 C、F、K 分别表示该温标和该温标单位的任一温度数值。

表 1-45 温度单位换算

摄氏度(°C)	华氏度(F)	开尔文(K)
$C$	$\frac{9}{5}C + 32$	$C + 273.15$
$\frac{5}{9}(F - 32)$	$F$	$\frac{5}{9}(F + 459.67)$
$K - 273.15$	$\frac{9}{5}K - 459.67$	$K$

2. 热导率(表 1-46)

3. 传热系数(表 1-47)

表 1-46 热导率单位换算

千卡每米时开尔文 [kcal/(m·h·K)]	卡每厘米秒开尔文 [cal/(cm·s·K)]	瓦特每米开尔文 [W/(m·K)]	焦耳每厘米秒开尔文 [J/(cm·s·K)]
1	$2.77778 \times 10^{-3}$	1.163	0.0116
360	1	418.68	4.1868
0.859845	$0.238846 \times 10^{-2}$	1	0.01
85.98	0.239	100	1

表 1-47 传热系数单位换算

千卡每平方米时开尔文 [kcal/(m <sup>2</sup> ·h·K)]	卡每平方厘米秒开尔文 [cal/(cm <sup>2</sup> ·s·K)]	瓦特每平方厘米开尔文 [W/(cm <sup>2</sup> ·S·K)]	焦耳每平方米开尔文 [J/(cm <sup>2</sup> ·K)]
1	$2.77778 \times 10^{-5}$	$1.163 \times 10^{-4}$	1.163
36000	1	4.1868	41868
8598.45	0.238	1	$10^{-4}$
0.859845	$0.238846 \times 10^{-4}$	$10^{-4}$	1

4. 比热容和比焓(表 1-48)

表 1-48 比热容和比焓单位换算

焦耳每千克开尔文 [J/(kg·K)]	千卡每千克开尔文 [kcal/(kg·K)]	热化学千卡每千克开尔文 [kcalth/(kg·K)]
1	$0.238846 \times 10^{-3}$	
4186.8	1	
4184		1

### (五)光学和声学单位换算

常用单位与法定计量单位的关系：

光亮度单位 : 1 尼特( nt )= 1cd/m<sup>2</sup>  
 1 熙提( sb )= 10<sup>4</sup>cd/m<sup>2</sup>

光照度单位 : 1 辐透( ph )= 10<sup>4</sup>lx  
 1 烛光/英尺( fc )= 10.76lx

常用的声学单位与法定计量单位的见表( 1-49 )

### (六)核反应和电离辐射单位换算(表 1-50)

表 1-49 声学单位换算

单位名称	单位符号	与法定计量单位的关系	备注
达因每平方米	dyn/cm <sup>2</sup>	0.1Pa	声压,静压力
尔格每立方厘米	erg/cm <sup>3</sup>	0.1J/m <sup>3</sup>	声能密度
尔格每秒	erg/s	10 <sup>-7</sup> W	声功率,声能通量
尔格每秒平方厘米	erg/(s·cm <sup>2</sup> )	0.001W/m <sup>2</sup>	声强度

表 1-50 核反应和电离辐射单位换算

单位名称	单位符号	与法定计量单位的关系	备注
尔格	erg	10 <sup>-7</sup> J	反应能,辐射能,共振能
尔格平方厘米	erg·cm <sup>2</sup>	10 <sup>-11</sup> J·m <sup>2</sup>	总原子阻止本领
尔格平方厘米每克	erg·cm <sup>2</sup> /g	10 <sup>-8</sup> J·m <sup>2</sup> /kg	总质量阻止本领
居里	Ci	37×10 <sup>9</sup> Bq	放射性活度
拉德	Rad rad	0.01Gy	吸收剂量
雷姆	rem	0.01Sv	剂量当量
伦琴	R	0.258×10 <sup>-3</sup> C/kg	照射量

## 第五节 电路分析方法

### 一、交流电路的稳态分析

#### (一)正弦电路

由正弦电源激励的、处于稳态下的线性时不变电路称为正弦电路。

## 1. 正弦稳态电路的相量法

在电气工程中,正弦交流得到极为广泛的应用,分析和计算正弦稳态电路最常用的方法是相量法。相量法最大的优点是将描述电路特性的微分方程转换成代数方程,从而极大地简化了分析和计算工作。

## (1) 正弦量的相量形式

设正弦电流的时域形式为

$$\begin{aligned} i(t) &= I_m \sin(\omega t + \varphi) \\ &= \sqrt{2} I \sin(\omega t + \varphi) \end{aligned}$$

式中  $i$ 、 $I_m$ 、 $I$  是正弦电流的瞬时值、最大值和有效值,它们之间关系为

$$I = \frac{I_m}{\sqrt{2}} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T i^2 dt}$$

$\omega$  为正弦电流的角频率,其值  $\omega = 2\pi f$  是正弦量的频率,其倒数为正弦量的周期  $T$ ,  $\varphi$  是正弦量的初相角。初相角、角频率和最大值称为正弦量的三要素。

当频率一定时,正弦量可以用它的有效值(或最大值)和初相角来表征,这种表征是有一一对应的关系。以电压  $u$  为例,即

$$u = \sqrt{2} U \sin(\omega t + \theta)$$

可表征为

$$\dot{U} = U \angle \theta$$

式中  $\dot{U}$  称为正弦量  $u$  的相量形式。值得注意的是,相量不是普通复数,是专指正弦量的复数,相量只表征了正弦量中的两个要素(有效值和初相角),把正弦时间函数表示成相量形式,仅是一种数学变换。

## (2) 相量图

在复平面上相量的图示,称为相量图。在相量图上清楚地表征了代表某正弦量的模和初相角,若有多个相量,相量图可一目了然地显示出各相量之间超前或滞后的相位关系。在某些场合下,借助相量图来分析和计算正弦稳态电路是十分方便的,校验其结果是否正确也十分简明。

## (3) 相量分析法

把正弦量变换成相量来分析和计算正弦稳态电路的方法,称为相量法。应用相量法来分析和计算时应注意:

- ① 电路中各激励源必须是同频率的;
- ② 不同频率的相量不能画在同一相量图上,也不能进行复数运算;
- ③ 在同一电路分析中,只能用一种系统,即不是  $\sin$  系统就是  $\cos$  系统,它们之间的关系为

$$\cos \omega t = \sin(\omega t + 90^\circ)$$

$$\sin \omega t = \cos(\omega t - 90^\circ)$$

直流电阻电路的分析方法和思路都适用于采用相量法的正弦电路。具体地说,只要将直流电阻电路中的定理和公式中的电阻和电导改换成复阻抗或复导纳,将直流电压和电流改为电压相量和电流相量,便可得到分析正弦电路的定理和公式。但应注意直流电阻电路与正弦电路之间的区别,例如,在正弦电路中由于相位关系,会使分支电流或部分元件电压大于总电流或端口电压。

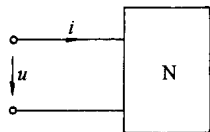


图 1-34 无源

## 2. 正弦电路的功率

## (1) 正弦电路的功率

设无源两端网络(图 1-34)端口

$$u = \sqrt{2} U \sin(\omega t + \theta_u)$$

$$i = \sqrt{2} I \sin(\omega t + \theta_i)$$

式中  $\theta_u$  和  $\theta_i$  分别为电压和电流初相角。 $\varphi = \theta_u - \theta_i$  称为阻抗角(或导纳角),网络的功率和功率因数见表 1-51。



表 1-51 正弦电路的功率和功率因数

名称	数学表达式	说明
瞬时功率	$p = ui$ $= UI \cos \varphi - UI \cos(2\omega t + \theta_u + \theta_i) \text{ (W)}$	瞬时功率是由一个恒定分量和一个 2 倍角频率变动分量组成
平均功率 (有功功率)	$P = \frac{1}{T} \int_0^T p dt$ $= UI \cos \varphi \text{ (W)}$	仅在电阻元件上有平均功率
无功功率	$Q = UI \sin \varphi \text{ (var)}$	其值等于储能元件与电源之间能量交换的最大速率 当 $\varphi > 0$ 时呈感性, 当 $\varphi < 0$ 时呈容性 仅在电感或电容元件上有无功功率
视在功率	$S = UI$ $= \sqrt{P^2 + Q^2} \text{ (VA)}$	视在功率又称表现功率, 它只有正值 一般电工设备的容量都用视在功率表示
功率因数	$\lambda = \frac{P}{S}$ $= \frac{UI \cos \varphi}{UI}$ $= \cos \varphi$	功率因数是负载电压相量和电流相量夹角(阻抗角或导纳角)的余弦值 若负载是感性, 则 $\lambda$ 为落后, 若是容性, 则 $\lambda$ 为超前
复功率	$\tilde{S} = \dot{U}\dot{I}$ $= UI \cos \varphi + jUI \sin \varphi$ $= P + jQ$ $= UI \angle \varphi \text{ (VA)}$	复功率不是真实功率, 引入的目的是为用相量法求得 $\dot{U}$ 和 $\dot{I}$ 后可简便地算出网络的各种功率 在关联参考方向下, 若 $ \varphi  < 90^\circ$ , 则 $N$ 为负载, 当 $ \varphi  > 90^\circ$ , $N$ 为电源

任何复杂正弦稳态电路中的复功率是守恒的, 即

$$\sum \tilde{S} = 0$$

亦即

$$\sum P = 0 \text{ 和 } \sum Q = 0$$

$S$ 、 $P$ 、 $Q$  三者构成如图 1-35 所示的直角三角形, 此直角三角形称为功率三角形。

### (2) 功率因数的提高

电路的功率因数是由负载决定的, 功率因数的高低将影响输电线路中的电流大小、电压损失、功率损失以及发电设备的利用率, 因此, 提高负载的功率因数有重大意义。

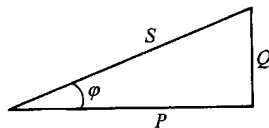


图 1-35 功率三角形

用户负载通常是感性的, 提高其功率因数大多是采用并联补偿电容的方法。设负载的有功功率为  $P$ , 其功率因数为  $\cos \varphi_1$ , 工作电压为  $U$ , 电源角频率为  $\omega$ , 现将整个电路的功率因数提高到  $\cos \varphi_2$ , 由功率三角形

(见图 1-36) 可得补偿电容  $C$  为

$$C = \frac{P}{U^2 \omega} (\tan \varphi_1 - \tan \varphi_2)$$

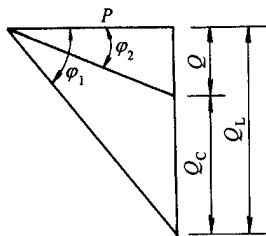


图 1-36 用并联电容提高功率因数

此外,为提高功率因数,应尽量避免电动机、变压器等设备处于空载或轻载运行状态。

### (3) 最大功率传输定理

设图 1-37 所示虚线框内为实际信号源,其内阻抗为  $Z_s = R_s + jX_s$ ,为负载  $Z_L = R_L + jX_L$  供给功率,负载得到最大功率条件为

$$Z_L = R_L + jX_L$$

$$R_s - jX_s = \dot{Z}_s^*$$

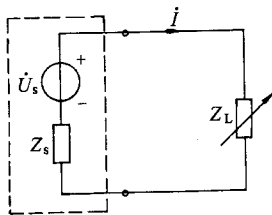


图 1-37 最大功率传输示意图

这时获得最大功率为

$$P_{Lmax} = \frac{U_s^2}{4R_s}$$

在正弦电路中,当  $Z_L = \dot{Z}_s^*$  时,电路是共轭匹配,从而使电路实现了传输功率最大。传输效率为 50%。

### 3. 三相电路

由三个幅值大小相等、频率相同、按照正弦规律变化、相位互差  $120^\circ$  的独立电源所组成的电源称为三相电源。由三相电源供电的电路称为三相电路。每个电源称为一相,各相电压达到最大值的次序称为相序,次序  $ABC$  称为正序,次序  $ACB$  称为负序。

三相电源和负载通常都有两种连接方式:一种是星形(Y形)连接,另一种是三角形( $\Delta$ 形)连接。

由对称的三相电源和对称三相负载组成的电路称为对称三相电路,只要三相电源和三相负载两者之一不对称就称为不对称三相电路。

#### (1) 三相电路的基本关系式

表 1-52 列出了三相电源是对称的三相电路中电流、电压和功率的基本关系式。

表 1-52 三相电路的基本关系式

名称		负载星形连接	负载三角形连接	备注
电路图				对称三相电路 $Z_A = Z_B = Z_C$ $Z_{ab} = Z_{bc} = Z_{ca}$
相电压		$\dot{U}_A, \dot{U}_B, \dot{U}_C$	$\dot{U}_{AB}, \dot{U}_{BC}, \dot{U}_{CA}$	
线电压		$\dot{U}_{AB}, \dot{U}_{BC}, \dot{U}_{CA}$	$\dot{U}_{AB}, \dot{U}_{BC}, \dot{U}_{CA}$	
线电压与相电压的关系	负载不对称	$\dot{U}_{AB} = \dot{U}_A - \dot{U}_B$ $\dot{U}_{BC} = \dot{U}_B - \dot{U}_C$ $\dot{U}_{CA} = \dot{U}_C - \dot{U}_A$	各相电压等于对应的线电压	端线与中性线之间的电压称为相电压,端线之间的电压称为线电压
	负载对称	线电压相等,均为 $U_1$ ,各相相电压相等,均为 $U_p$ $U_1 = \sqrt{3}U_p$	各相电压等于对应的线电压	
相电流		$i_a, i_b, i_c$	$i_{ab}, i_{bc}, i_{ca}$	
线电流		$i_A, i_B, i_C$	$i_A, i_B, i_C$	
线电流与相电流的关系	负载不对称	$I_A = i_a$ $I_B = i_b$ $I_C = i_c$	$I_A = i_{ab} - i_{ca}$ $I_B = i_{bc} - i_{ab}$ $I_C = i_{ca} - i_{bc}$	流过端线的电流称为线电流,流过各相负载的电流称为相电流
	负载对称	各相线电流 $I_1$ 均等于其相应的相电流 $I_p$ $I_1 = I_p$	各相线电流相等,均为 $I_1$ ,各相相电流相等,均为 $I_p$ $I_1 = \sqrt{3}I_p$	
对称三相电路的相量图				负载为电感性

名称		负载星形连接	负载三角形连接	备注
有功功率	负载不对称	$P = U_A I_a \cdot \cos \varphi_a + U_B I_b \cdot \cos \varphi_b + U_C I_c \cdot \cos \varphi_c$ 式中 $U_A$ 、 $U_B$ 和 $U_C$ 、 $I_a$ 、 $I_b$ 和 $I_c$ 分别为 A 相、B 相、C 相的电压和电流， $\varphi_a$ 、 $\varphi_b$ 、 $\varphi_c$ 为相应相的阻抗角		不管是用相电压相电流，还是用线电压线电流计算， $\varphi$ 是阻抗角
	负载对称	$P = 3 U_p I_p \cos \varphi = \sqrt{3} U_l I_l \cos \varphi$		

(2) 对称分量法

对称分量法是分析不对称三相电路、电力电子非正弦三相电路和电力系统不对称运行状态的基本方法。由不对称三相相量分解而得的对称三相相量称为对称分量。以三相电压为例，设不对称三相电压  $\dot{U}_A$ 、 $\dot{U}_B$ 、 $\dot{U}_C$  可以分解为正序对称分量  $\dot{U}_A^+$ 、 $\dot{U}_B^+$ 、 $\dot{U}_C^+$  (相序为 ABC)，负序对称分量  $\dot{U}_A^-$ 、 $\dot{U}_B^-$ 、 $\dot{U}_C^-$  (相序为 ACB) 和零序  $\dot{U}_A^0$ 、 $\dot{U}_B^0$ 、 $\dot{U}_C^0$  (三者大小相等，相位亦相同) 如图 1-38 所示。

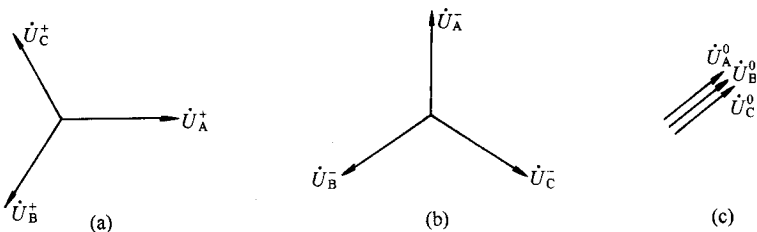


图 1-38 对称分量组

(a) 正序对称分量 (b) 负序对称分量 (c) 零序对称分量

各对称分量与不对称电压之间关系为

$$\left. \begin{aligned} \dot{U}_A &= \dot{U}_A^+ + \dot{U}_A^- + \dot{U}_A^0 \\ \dot{U}_B &= \dot{U}_B^+ + \dot{U}_B^- + \dot{U}_B^0 = \alpha^2 \dot{U}_A^+ + \alpha \dot{U}_A^- + \dot{U}_A^0 \\ \dot{U}_C &= \dot{U}_C^+ + \dot{U}_C^- + \dot{U}_C^0 = \alpha \dot{U}_A^+ + \alpha^2 \dot{U}_A^- + \dot{U}_A^0 \end{aligned} \right\}$$

和

$$\left. \begin{aligned} \dot{U}_{A0} &= \frac{1}{3} (\dot{U}_A + \dot{U}_B + \dot{U}_C) \\ \dot{U}_A^+ &= \frac{1}{3} (\dot{U}_A + \alpha \dot{U}_B + \alpha^2 \dot{U}_C) \\ \dot{U}_A^- &= \frac{1}{3} (\dot{U}_A + \alpha^2 \dot{U}_B + \alpha \dot{U}_C) \end{aligned} \right\}$$

式中  $\alpha = \angle 120^\circ$   $\alpha^2 = \angle 240^\circ$

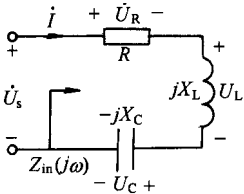
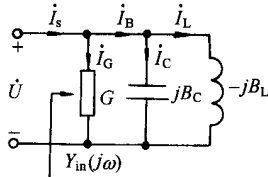
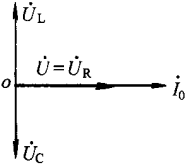
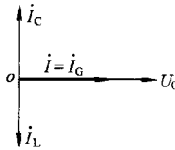
逐一计算正序、负序和零序对称分量组单独作用下的三相电路中的响应，然后应用叠加定理将求出各对称分量的响应合成，便是三相不对称电路的响应。

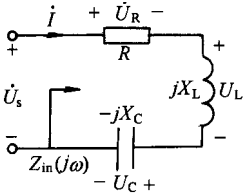
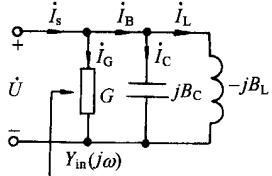
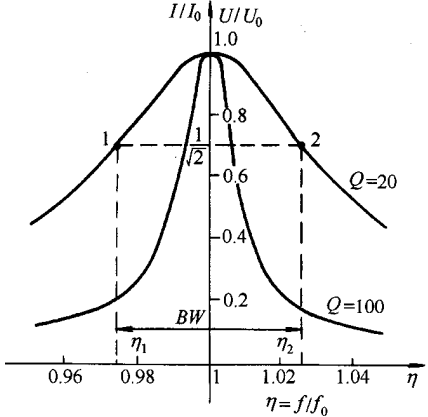
(二) 正弦电路的谐振

在正弦电源激励下，含有电感和电容元件的电路，当它的端口电压和与之相关联的输入电流同相时，电路就发生谐振。谐振分为串联谐振和并联谐振。

1. 串联谐振(见表 1-53)
2. 并联谐振(见表 1-53)

表 1-53 RLC 电路中的谐振

电路形式  特性  项目		
谐振定义	$U_s$ 与 $i$ 同相	$\dot{U}$ 与 $i_s$ 同相
谐振条件	$I_n[Z_{in}(j\omega)] = 0$ , 即 $X = X_L - X_C = 0$ , 亦即 $\omega L = 1/\omega C$	$I_n[Y_{in}(j\omega)] = 0$ , 即 $B = B_C - B_L = 0$ , 亦即 $\omega C = 1/\omega L$
谐振角频率 $\omega_0$ (rad/s)	$\frac{1}{\sqrt{LC}}$	$\frac{1}{\sqrt{LC}}$
特征阻抗 $R(\Omega)$	$\sqrt{\frac{L}{C}}$	$\sqrt{\frac{L}{C}}$
品质因数 $Q$	$\frac{\sqrt{L/C}}{R}$	$\frac{\sqrt{C/L}}{G}$
频带宽 $BW$ (rad/s)	$\frac{\omega_0}{Q} = \frac{R}{L}$	$\frac{\omega_0}{Q} = \frac{G}{C}$
谐振时相量图		
谐振时电路特性	$Z = R \quad \dot{I}_0 = \dot{U}_0/R$ 电路中的电流最大 $\dot{U}_L - \dot{U}_C = 0$ $U_C = U_L = QU_s$ ( $Q \gg 1$ 时出现过电压) 电感电压与电容电压相互抵消, 所以称电压谐振	$Y = G \quad U_0 = I/G$ 电路端口电压最大 $\dot{I}_L - \dot{I}_C = 0$ $I_L = I_C = QI_s$ ( $Q \gg 1$ 时出现过流) 电容电流与电感电流相互抵消, 所以称电流谐振

<p>电路形式</p> <p>特性</p> <p>项目</p>		
	<p>谐振曲线公式</p> $\frac{I}{I_0} = \frac{1}{\sqrt{1 + Q^2 \left( \eta + \frac{1}{\eta} \right)^2}}$	<p>谐振曲线公式</p> $\frac{U}{U_0} = \frac{1}{\sqrt{1 + Q^2 \left( \eta + \frac{1}{\eta} \right)^2}}$
<p>谐振曲线及其特点</p>	 <p>串联谐振时纵坐标用 <math>I/I_0</math>，并联谐振时用 <math>U/U_0</math>  <math>Q</math> 越大，曲线越尖，电路的选频特性越好</p>	

注：下标 0 表示电路谐振时的值

### (三) 非正弦电路

#### 1. 非正弦周期量的函数表达式

电流或电压随时间作非正弦周期变化的电路，称为非正弦周期电路。例如，含有电力电子器件的整流电路，电路中电压或电流便具有按非正弦作周期变化的波形。

一个非正弦周期电流（或电压） $i(t)$ ，借助傅立叶级数，可写成

$$i(t) = \frac{I_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} (a_n \cos n\omega_1 t + b_n \sin n\omega_1 t)$$

或

$$i(t) = \frac{I_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} A_{nm} \sin(n\omega_1 t + \phi_n)$$

式中  $\omega_1 = 2\pi/T$  为  $i(t)$  的角频率， $a_n = A_{nm} \cdot \sin\phi_n$ ， $b_n = A_{nm} \cdot \cos\phi_n$ ， $A_{nm} = \sqrt{a_n^2 + b_n^2}$ ， $\phi_n = \tan^{-1} \frac{a_n}{b_n}$ 。常数项  $I_0$  代表直流分量； $A_{1m} \sin(\omega_1 t + \phi_1)$  称为基波； $A_{nm} \sin(n\omega_1 t + \phi_n)$  称为第  $n$  次谐波。

#### 2. 非正弦量的有效值和功率

设非正弦周期量  $x(t)$ （如电压、电流和电动势等）的瞬时值

$$x(T) = X_0 + x_1 + x_2 + \dots$$

式中  $X_0$  是直流分量,  $x_1, x_2, \dots$  是一次谐波、二次谐波……的瞬时值, 则其有效值为

$$X = \sqrt{X_0^2 + X_1^2 + X_2^2 + \dots}$$

式中  $X_1, X_2, \dots$  为一次谐波、二次谐波……的有效值。

非正弦周期电路中的功率见表 1-54。

表 1-54 非正弦周期电路中的功率

名称	定义及计算公式	备注
瞬时功率	$p = ui = U_0 I_0 + \sum_{n=1}^{\infty} U_{nm} \sin(n\omega_1 t + \psi_n) \times I_{nm} \sin(n\omega_1 t + \theta_n) + \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{\substack{R=1 \\ (n \neq R)}}^{\infty} U_0 I_{nm} \sin(n\omega_1 t + \theta_n) + \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{\substack{R=1 \\ (n \neq R)}}^{\infty} U_{nm} \sin(n\omega_1 t + \psi_n) \sin(R\omega_1 t + \theta_R)$	电路中瞬时功率是同频率和不同频率的谐波电压、谐波电流形成的瞬时功率之和
平均功率 (有功功率)	$P = \frac{1}{T} \int_0^T p dt = U_0 I_0 + U_1 I_1 \cos \varphi_1 + U_2 I_2 \cos \varphi_2 + \dots + U_n I_n \cos \varphi_n + \dots = \sum_{n=0}^{\infty} P_n \quad (W)$ <p>式中 <math>P_0</math>——直流电压和直流电流形成的功率, <math>P_0 = U_0 I_0</math>  <math>P_n</math>——第 <math>n</math> 次谐波电压与谐波电流形成的平均功率, <math>P_n = U_n I_n \cos \varphi_n</math></p>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 电路中的平均功率, 等于各次谐波各自形成的平均(有功)功率之代数和</li> <li>2. 不同频率的谐波电压与谐波电流不构成平均功率</li> <li>3. 同频率的谐波电压与谐波电流构成的功率称为谐波功率</li> </ol>
无功功率	$Q = U_1 I_1 \sin \varphi_1 + U_2 I_2 \sin \varphi_2 + \dots + U_n I_n \sin \varphi_n + \dots = \sum_{n=1}^{\infty} Q_n \quad (\text{var})$ <p>式中 <math>Q_n</math>——第 <math>n</math> 次谐波形成的无功功率,  <math>Q_n = U_n I_n \sin \varphi_n</math></p>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 电路中的无功功率是各次谐波各自形成的无功功率之代数和</li> <li>2. 直流分量不形成无功功率</li> </ol>
视在功率	$S = UI = \sqrt{\sum_{n=0}^{\infty} U_n^2} \sqrt{\sum_{n=0}^{\infty} I_n^2} \quad (\text{VA})$ <p>式中 <math>U_n, I_n</math>——第 <math>n</math> 次谐波电压和谐波电流的有效值</p>	电路中视在功率是同频率和不同频率的谐波电压、谐波电流形成的视在功率之和
功率因数	$\lambda \approx \cos \varphi = \frac{P}{S} = \frac{\sum_{n=0}^{\infty} P_n}{\sqrt{\sum_{n=0}^{\infty} U_n^2} \sqrt{\sum_{n=0}^{\infty} I_n^2}}$	
畸变功率	$T = \sqrt{S^2 - (P^2 + Q^2)} \quad (\text{VA})$	畸变功率的 $T$ 的大小表征波形偏离正弦波的程度

### 3. 非正弦电路的稳态分析

稳态分析的基本思路是叠加法, 其步骤为:

(1) 将给定的非正弦周期电源分解为各次谐波。例如, 设电路的激励为电压, 则其傅立叶级数为

$$u = U_0 + \sum_{n=1}^{\infty} U_{nm} \sin(n\omega_1 t + \psi_n)$$

截取谐波的次数根据要求的计算精确度来确定;

(2) 画出不同频率时的电路, 逐一计算不同频率的谐波电源单独激励时的稳态响应;

(3) 将上项的各次谐波稳态响应的时域(而不是频域)中进行叠加, 便得出所要求的稳态响应。

需要注意的问题如下。

(1) 对不同频率的谐波,感抗和容抗有不同的数值。例如,直流电源激励时,电感短接,电容开路; $n$ 次谐波激励时,感抗为  $X_{Ln} = n\omega_1 L$ ,容抗为  $X_{Cn} = 1/n\omega_1 C$ 。

(2) 相同频率谐波形成的平均功率或相量值可以叠加。

例题 如图 1-39(a) 所示电路中,已知  $R_1 = 1\Omega$ ,  $R_2 = 2\Omega$ ,  $L_1 = 1\text{H}$ ,  $L_2 = 2\text{H}$ ,  $C = 1/4\text{F}$ ,  $\omega = 2\text{rad/s}$ ,  $E = 4\text{V}$ ,  $u_s = 10\sqrt{2}\sin\omega t\text{V}$ 。试求:

(1) 电流  $i_2$ 、电压  $u_C$  及其有效值;

(2) 电源发出的有功功率。

解 图(a)电路中有两个不同频率的电源激励,所以用叠加法来计算。

(1) 电源  $E$  单独激励的电路如图(b)所示,得

$$I_{20} = -E/R_2 = -4/2 = -2\text{A}$$

$$I_{10} = E/R_1 = 4/1 = 4\text{A}$$

$$I_E = I_{10} - I_{20} = 4 - (-2) = 6\text{A}$$

$$U_{C0} = E = 4\text{V}$$

电源  $E$  发出的有功功率为

$$P_E = EI_E = 4 \times 6 = 24\text{W}$$

(2) 电源  $u_s$  单独作用的电路如图(c)所示,图中

$$\omega L_1 = 2 \times 1 = 2\Omega; \frac{1}{\omega C} = \frac{1}{(2 \times \frac{1}{4})} = 2\Omega$$

$$\omega L_2 = 2 \times 2 = 4\Omega$$

$$Z_{LC} = \frac{j\omega L_1 \left[ -j \frac{1}{\omega C} \right]}{j\omega L_1 - j \frac{1}{\omega C}} = \frac{(j2)(-j2)}{j2 - j2} = \infty$$

$L_1$  与  $C$  发生并联谐振,  $I_B = 0$  (见表 1-53 中谐振时电路特征)

$$\dot{I}_{21} = \dot{I}_{R1} = \frac{\dot{U}_s}{R_1 + R_2 + j\omega L_2} = \frac{10 \angle 0^\circ}{1 + 2 + j4} = 2 \angle -53.1^\circ \text{A}$$

$$\dot{U}_{C1} = R_1 \dot{I}_{R1} = 1 \times 2 \angle -53.1^\circ = 2 \angle -53.1^\circ \text{V}$$

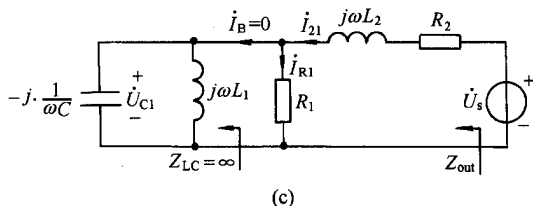
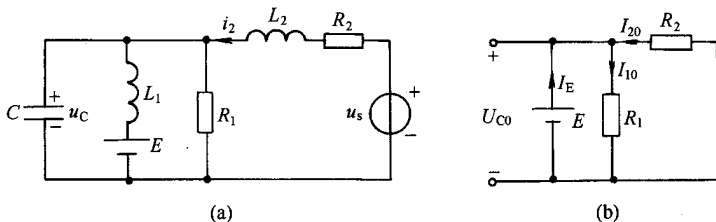


图 1-39 例题的电路图

电压源  $U_s$  发出的功率为



$$P_{U_s} = U_s I_{21} \cdot \cos \varphi = 10 \times 2 \cos 53.1^\circ = 12 \text{ W}$$

(3)  $i_2$ 、 $u_C$  及其有效值和电源发出的功率  $P$

$$i_2 = I_{20} + i_{21} = -2 + 2\sqrt{2} \sin(2t - 53.1^\circ) \text{ A}$$

$$I_2 = \sqrt{2^2 + 2^2} = \sqrt{8} = 2.83 \text{ A}$$

$$u_C = U_{C0} + u_{C1} = 4 + 2\sqrt{2} \sin(2t - 53.1^\circ) \text{ V}$$

$$U_C = \sqrt{4^2 + 2^2} = \sqrt{20} = 4.47 \text{ V}$$

$$P = P_E + P_{U_s} = 24 + 12 = 36 \text{ W}$$

## 第六节 电路的动态分析

### 一、动态电路概述

#### (一) 动态电路的类型

电路工作状态可分为稳定状态和瞬变状态(简称瞬态或动态)。电容元件和电感元件是储能元件,由于它们的伏安特性都涉及对电流、电压的微分,所以又称这两种元件为动态元件。至少含有一个动态元件的电路称为动态电路。

动态元件的储能状态一般不会发生突变,由于换路,动态电路从一个稳态过渡到另一个稳态需要一定的时间,在这个时间内动态电路将发生瞬态。电阻电路则不会发生瞬态。

动态电路的类型见表 1-55。

表 1-55 动态电路的类型

名称	电路数学方程	电路结构特征
一阶电路	线性、常系数一阶微分方程	仅含有一个动态元件和电阻的电路,或经过简化能化为此形式的电路
二阶电路	线性、常系数二阶微分方程	电路中除电阻元件外,包含一个电容和一个电感;或线性无关的两个电容,或线性无关的两个电感
高阶电路	线性、常系数 $n$ 阶微分方程	对正规的 RLC 元件电路,电路阶数 $n$ 等于储能元件数。若存在电容与电压源形成的回路,或存在电感与电流源形成的割集,阶数将减少

#### (二) 动态电路分析

动态电路分析又称电路的瞬态分析。瞬态分析的目的是察看在电路中外加激励后所出现的响应。电路的瞬态响应与如下三个因素有关:

1. 激励函数;
2. 电路的拓扑结构及其所含元件类型;
3. 动态元件的初始状态,即储能元件的储能状态,一般称为初始条件。

动态电路瞬态分析常用的方法有:

1. 时域分析法；
2. 变换域分析法；
3. 状态空间分析法。

其中状态分析法是选择电路中一组状态变量(如电容电压和电感电流)根据基尔霍夫定律对给定电路写出状态方程组,状态方程组是用向量表示的一阶微分方程组,借助计算机可以在时域中求解,也可以在复频域中求解,也可以方便地用数值法来求解,这种方法称为状态空间分析法。高阶电路常用这种方法来分析。

动态电路的瞬态分析在电力电子技术中有着重要意义。因为电力电子电路本身是含有多种元件、多种激励的复杂电路,进行开关操作时,电路瞬间可能会出现过电压、过电流,因此设计时应采用预防或保护措施,以免造成危害。

## 二、动态电路的时域分析

### (一)一阶电路的三要素法

#### 1. 换路定律

电路与电源接通、断开,电路参数或电路结构突然变化,统称为换路。换路定律是用来确定电路的初始条件的,其内容如下。

(1)换路前后,电容器上电压(电荷)不能突变,即  $u_C(0^-) = u_C(0^+)$ 。如果电流  $i_C$  中含有冲激函数,则电容电压要发生突变。

(2)换路前后,流过电感器的电流(磁链)不能发生突变,即  $i_L(0^-) = i_L(0^+)$ 。如果电压  $u_L$  中含有冲激函数,则电感器电流要突变。

要注意的是,换路前后电容电流要突变,电感端电压也要突变。

#### 2. 时间常数

时间常数是用来表征电路暂态过程长短的一个参数,也是描述电路特性的微分方程中自由分量变化快慢的一个量。

在 RC 电路中,其时间常数  $\tau = RC$ ; 在 RL 电路中,  $\tau = L/R$ 。 $\tau$  公式中  $R$  是动态元件  $C$  或  $L$  两端的等效电阻。

时间常数  $\tau$  是电路固有的参数,与初始条件、外加激励等无关,仅与电路结构和参数有关。工程上认为,经过  $(3 \sim 5)\tau$  的时间后,电路的暂态基本结束,电路进入稳态。

#### 3. 三要素法

一阶电路的特性方程为

$$\frac{dy(t)}{dt} + ay(t) = f(t)$$

式中  $a$  为常数,  $f(t)$  为已知激励函数,  $y(t)$  为电路的响应(微分方程的解),即电路的全响应,其表达式为

$$y(t) = y(\infty) + [y(0^+) - y(\infty)]e^{-\frac{t}{\tau}}$$

式中  $y(\infty)$  为响应的稳态值,即  $t = \infty$  时的  $y(t)$  值;  $y(0^+)$  为  $t = 0^+$  时  $y(t)$  值,称为  $y(t)$  的初始值;  $\tau$  是电路的时间常数。一阶电路只要知道  $y(\infty)$ 、 $y(0^+)$  和  $\tau$  这三个要素,便可求得电路的全响应,并绘出其波形图,这种分析方法称为“三要素”分析法。

用三要素法求解电路响应的一般过程是：

- (1)画出  $t = 0^-$  时的等值电路,确定  $u_C(0^-)$  和  $i_L(0^-)$ ,从而得到初始条件  $u_C(0^+)$  和  $i_L(0^+)$ ;
- (2)画出  $t = 0^+$  时的等值电路,求得  $y(0^+)$ ;
- (3)画出  $t = \infty$  时的等值电路,求得  $y(\infty)$ ;
- (4)画出  $t \geq 0$  时的等值电路,求得  $\tau$ 。

根据求得的  $y(\infty)$ 、 $y(0^+)$  和  $\tau$ , 代入三要素的表达式, 即可求得全响应  $y(t)$ 。

#### 4. 一阶电路的响应

一阶电路的各种响应见表 1-56。

表 1-56 一阶电路的各种响应

名称	表达式	备注
稳态响应	$y(\infty)$	能长时间存在, 且和激励波形相同
暂态响应	$[y(0^+) - y(\infty)]e^{-\frac{t}{\tau}}$	随时间衰减, 当 $t \rightarrow \infty$ 时其值为零
零输入响应	$y(0^+)e^{-\frac{t}{\tau}}$	无外加激励, 仅有初始储能 [即 $i_L(0^+) \neq 0$ 或 $u_C(0^+) \neq 0$ ] 作用时的响应 响应由电路结构、元件参数和储能情况决定 是初始值的线性函数
零状态响应	$y(\infty)(1 - e^{-\frac{t}{\tau}})$	电路在零初始 [即 $i_L(0^-) = 0$ , $u_C(0^-) = 0$ ] 只有激励作用时的响应 响应由电路结构、元件参数和外加激励决定 是输入的线性函数
全响应	$y(\infty) + [y(0^+) - y(\infty)]e^{-\frac{t}{\tau}}$	既有外加激励作用, 又有初始值作用时产生的响应 是稳态响应和暂态响应之和, 也可以是零输入响应和零状态响应之和

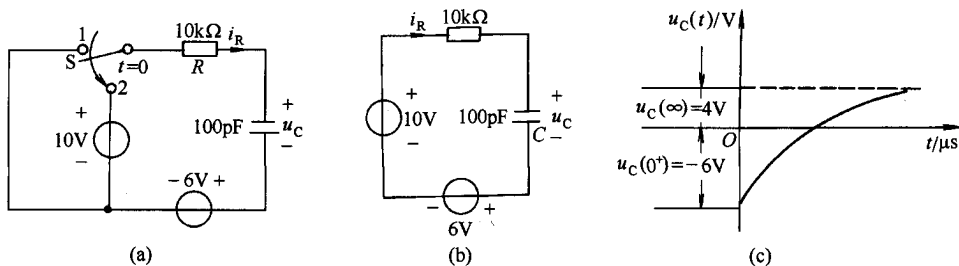


图 1-40 例题的电路和波形图

例 题 图 1-40(a) 所示电路中, 开关 S 原先在“1”位置上, 电容器 C 已充电结束。在  $t=0$  时, 开关 S 切换到“2”位置上, 试用三要素法求  $t \geq 0$  时全响应  $u_C(t)$ 。

解 ① 求  $u_C(0^+)$

$t < 0$  时电路如图(a) (开关 S 在“1”位置上), 由图得

$$u_C(0^+) = u_C(0^-) = -6V$$

② 求  $u_C(\infty)$

$t = \infty$  时电路如图(b) 所示, 显然

$$u_C(\infty) = 10 - 6 = 4V$$

③ 求  $\tau$

由图(b) 得

$$\tau = RC = 10 \times 10^3 \times 100 \times 10^{-12} = 1\mu s$$

因而, 全响应

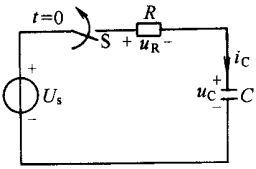
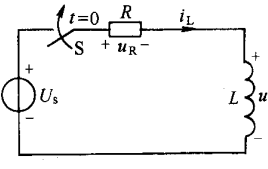
$$u_C(t) = 4 + [-6 - 4]e^{-t} = 4 - 10e^{-t} \text{ V}$$

按照  $u_C(0^+) = -6\text{V}$  ,  $u_C(\infty) = 4\text{V}$  及  $\tau = 1\mu\text{s}$  绘出全响应  $u_C(t)$  的波形如图(c)所示。

(二) RC 电路的响应(见表 1-57)

(三) RL 电路的响应(见表 1-57)

表 1-57 简单的 RC 电路和 RL 电路的响应

<p>电路图</p>		
<p>零输入响应</p>	$u_C(t) = u_C(0^+) e^{-t/RC}$ $u_R(t) = -u_C(0^+) e^{-t/RC}$ $i_C(t) = \frac{-u_C(0^+)}{R} e^{-t/RC}$	$i_L(t) = i_L(0^+) e^{-Rt/L}$ $u_R(t) = i_L(0^+) e^{-Rt/L}$ $u_L(t) = i_L(0^+) R e^{-Rt/L}$
<p>零状态响应</p>	$u_C(t) = U_s(1 - e^{-t/RC})$ $u_R(t) = -U_s e^{-t/RC}$ $i_C(t) = \frac{U_s}{R} e^{-t/RC}$	$i_L(t) = \frac{U_s(1 - e^{-Rt/L})}{R}$ $u_R(t) = U_s(1 - e^{-Rt/L})$ $u_L(t) = U_s e^{-Rt/L}$
<p>全响应</p>	$u_C(t) = u_C(0^+) e^{-t/RC} + U_s(1 - e^{-t/RC})$ $i_C(t) = \frac{U_s - u_C(0^+)}{R} e^{-t/RC}$ $u_R(t) = [U_s - u_C(0^+)] e^{-t/RC}$	$i_L(t) = i_L(0^+) e^{-Rt/L} + \frac{U_s(1 - e^{-Rt/L})}{R}$ $u_R(t) = i_L(0^+) R e^{-Rt/L} + U_s(1 - e^{-Rt/L})$ $u_L(t) = -i_L(0^+) R e^{-Rt/L} + U_s e^{-Rt/L}$
<p>备注</p>	<p><math>u_C(0^+)</math> , <math>i_L(0^+)</math> 分别为电容电压和电感电流的初始值  <math>RC \times L/R</math> 分别为 RC 电路和 RL 电路的时间常数</p>	

(四) 二阶 RLC 电路的零输入响应

二阶 RLC 电路的输入响应 其瞬态是振荡放电。图 1-41 电路 ,  $t < 0$  时开关 S 合在 '1' 端 , 使电容充电至  $U_0$  ,  $t = 0$  时开关 S 倒向 '2' 端 , 电容 C 通过 R 与 L 实现振荡放电。电路的初始值  $u_C(0) = U_0$  其特性方程为

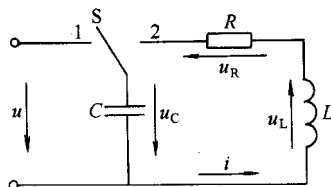


图 1-41 RLC 电路

$$LC \frac{d^2 u_C}{dt^2} + RC \frac{du_C}{dt} + u_C = 0$$

上式为二阶常系数齐次方程,其特征方程式为

$$LCs^2 + RCs + 1 = 0$$

特征根为

$$s_{1,2} = \frac{-R}{2L} \pm \sqrt{\left(\frac{R}{2L}\right)^2 - \frac{1}{LC}} = -\alpha \pm \sqrt{\alpha^2 - \omega_0^2}$$

式中  $\alpha = -R/2L$  称为衰减系数或阻尼系数;  $\omega_0 = 1/\sqrt{LC}$  为 RLC 串联电路的谐振角频率或称固有频率。

微分方程式的通解为

$$u_C = A_1 e^{s_1 t} + A_2 e^{s_2 t}$$

和

$$i = C \frac{du_C}{dt} = CA_1 s_1 e^{s_1 t} + CA_2 s_2 e^{s_2 t}$$

式中  $A_1$  和  $A_2$  是常数。根据换路定律和电路的初始条件,得到电路响应  $u_C$  和  $i$  分别为

$$u_C(t) = \frac{U_0}{s_1 - s_2} (s e^{s_1 t} - e^{s_2 t})$$

$$i(t) = \frac{Cs_1 s_2 U_0}{s_2 - s_1} (e^{s_1 t} - e^{s_2 t}) = \frac{U_0}{K} \frac{s_2 - s_1}{s_2 - s_1} (e^{s_1 t} - e^{s_2 t})$$

根据电路的参数不同,其响应可分为如下四种形式。

1.  $\alpha > \omega_0$  即  $R > 2\sqrt{L/C}$  特征根  $s_1 \neq s_2$  (有不同的实根),电路呈现过阻尼,瞬态过程是非周期性的。响应  $u_C$ 、 $i$  和  $u_L$  的波形如图 1-4(a) 所示。

2.  $\alpha = \omega_0$  即  $R = 2\sqrt{L/C}$  特征根  $s_1 = s_2 = s = -\alpha = -R/2L$  (有相同的实根),电路呈现临界阻尼,瞬态过程也是非周期性的。 $u_C$ 、 $i$  和  $u_L$  波形如图 1-4(b) 所示。

3.  $\alpha < \omega_0$  即  $R < 2\sqrt{L/C}$  特征根  $s_1$  与  $s_2$  为共轭复数,电路呈现欠阻尼,瞬态过程是阻尼振荡,衰减振荡角频率  $\omega_d = \sqrt{\omega_0^2 - \alpha^2}$ 。 $u_C$ 、 $i$  和  $u_L$  波形如图 1-4(c) 所示。

3.  $\alpha = 0$  即  $R = 0$  特征根  $s_1$  与  $s_2$  为两正负虚根,即  $s_1 = j\omega_0$ ,  $s_2 = -j\omega_0$ 。电路为无阻尼,瞬态过程是等幅振荡。 $u_C$ 、 $i$  和  $u_L$  波形如图 1-4(c) 所示。

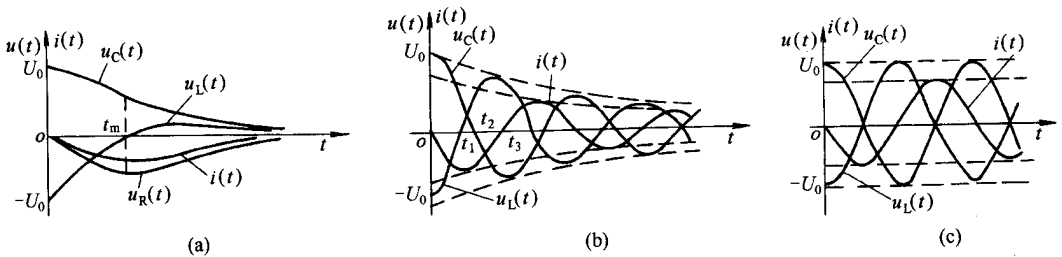


图 1-42 电压和电流曲线

### 三、一阶电路的阶跃响应和冲激响应

#### (一) 阶跃响应

零状态电路(或非零状态电路)对阶跃函数  $Ki(t)$  的响应称为阶跃响应,并用  $y(t)$  表示。

如果在  $Ki(t)$  激励下的电路为零状态,则有

$$y(t) = Kx(t)$$

式中  $K$  为常数,  $s(t)$  为单位阶跃响应。

在单位延时阶跃信号  $u(t-t_0)$  作用下, 则有

$$y(t) = s(t-t_0)$$

例题 RC 电路如图 1-43(a) 所示, 已知激励为  $5u(t-2)$  V,  $u_C(0) = 10$  V, 求电流  $i$ 。

解 ① 先求零输入响应

$u_C(0) = 10$  V 激励时

$$\begin{aligned} i'(t) &= -\frac{u_C(0)}{R} e^{-\frac{t}{\tau}} \cdot u(t) \\ &= -5e^{-0.5t} u(t) \end{aligned}$$

其中  $\tau = RC = 2 \times 1 = 2$  s。

② 求零状态响应, 即  $5u(t-2)$  作用时响应

$$\begin{aligned} i'' &= \frac{5}{R} e^{-\frac{(t-2)}{\tau}} \cdot u(t-2) \\ &= 2.5e^{-0.5(t-2)} \cdot u(t-2) \end{aligned}$$

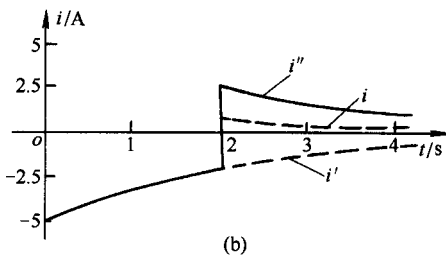
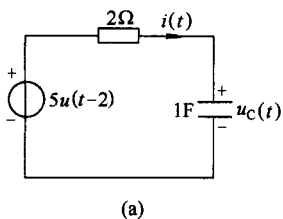


图 1-43 例题的图

③ 求  $i$  全响应。由叠加定理得

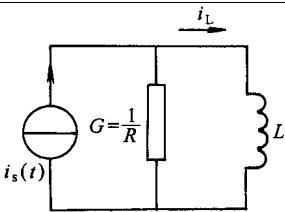
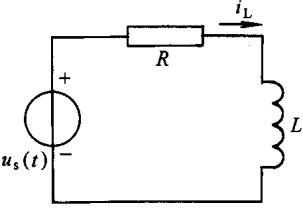
$$\begin{aligned} i(t) &= i'(t) + i''(t) \\ &= -5e^{-0.5t} \cdot u(t) + 2.5e^{-0.5(t-2)} \cdot u(t-2) \text{ A} \end{aligned}$$

$i$ 、 $i'$  及  $i''$  波形如图 (b) 所示。在  $t = 2$  s 时电流  $i$  是不连续的。

简单电路的单位阶跃响应见表 1-58。

表 1-58 简单电路的单位阶跃和单位冲激响应

电路图	零状态响应	
	阶路响应 $s(t)$	冲激响应 $h(t)$
	$\begin{aligned} i_s &= u(t)u_C = R(1 - e^{-\frac{t}{\tau}}) \\ &= \frac{1}{G}(1 - e^{-\frac{t}{\tau}})u(t) \end{aligned}$	$i_s(t) = \delta(t)u_C = \left(\frac{1}{C}e^{-\frac{t}{\tau}}\right)u(t)$
	$\begin{aligned} u_s &= u(t) \\ u_C &= (1 - e^{-\frac{t}{\tau}})u(t) \end{aligned}$	$\begin{aligned} u_s &= \delta(t) \\ u_C &= \left(\frac{1}{RC}e^{-\frac{t}{\tau}}\right)u(t) \end{aligned}$

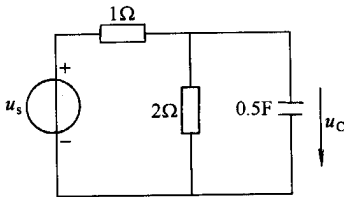
电路图	零状态响应	
	阶跃响应 $s(t)$	冲激响应 $h(t)$
	$i_s = u(t)$ $i_L = (1 - e^{-\frac{t}{\tau}})u(t)$	$i_s(t) = \delta(t)$ $i_L = \left(\frac{R}{L} e^{-\frac{t}{\tau}}\right)u(t)$ $= \left(\frac{1}{GL} e^{-\frac{t}{\tau}}\right)u(t)$
	$u_s(t) = u(t)$ $i_L = \frac{1}{R}(1 - e^{-\frac{t}{\tau}})u(t)$	$u_s = \delta(t)$ $i_L = \left(\frac{1}{L} e^{-\frac{t}{\tau}}\right)u(t)$

## (二) 冲激响应

激励为单位冲激函数  $\delta(t)$  时, 电路的零状态响应称为冲激响应, 用符号  $h(t)$  表示。

冲激信号可视为幅值为无限大, 持续时间为零(从极限意义看)的信号, 因此当冲激函数激励于电路时, 在  $0^- < t < 0^+$  区间内, 冲激激励使动态元件储能, 并立即为电路建立了初始条件,  $t > 0^+$  电路的响应即由刚储存的能量(即初始值)产生, 也就是冲激响应  $h(t)$  是零输入响应。这就为计算  $h(t)$  提供了一种方法, 称为零输入响应法。

求  $h(t)$  的另一种方法如下。



冲激函数是单位阶跃函数的导数, 即

$$\delta = \frac{du(t)}{dt}$$

而冲激响应  $h(t)$  可以看做是单位阶跃响应  $s(t)$  的导数, 即

$$h(t) = \frac{ds(t)}{dt}$$

因而, 求解电路的冲激响应  $h(t)$ , 可先求电路的阶跃响应  $s(t)$ , 然后利用  $ds(t)/dt$  即可求得  $h(t)$ 。

图 1-44 例题的图

例题 图 1-44 所示电路, 已知  $u_s = \delta(t)$ ,  $u_c(0^-) = 0$ , 求冲激响应  $h(t)$ 。

解 方法一 用  $ds(t)/dt$  法求解

$$u_c(0^+) = u_c(0^-) = 0$$

$$u_c(\infty) = \frac{2}{3} \text{V}$$

$$\tau = R \cdot C = \frac{2 \times 1}{2 + 1} \cdot \frac{1}{2} = \frac{1}{3} \text{S}$$

因此, 阶跃响应

$$s(t) = \frac{2}{3}(1 - e^{-3t})$$

冲激响应为

$$h(t) = \frac{ds(t)}{dt} = 2e^{-3t} \cdot u(t)$$

方法二 用零输入响应法求解

$$u_C(0^-) = 0$$

$$\begin{aligned} u_C(0^+) &= u_C(0^-) + \frac{1}{C} \int_{0^-}^{0^+} i(\tau) d\tau \\ &= u_C(0^-) + \frac{1}{C} = 2V \end{aligned}$$

$t > 0^+$  后冲激消失,  $u_s = 0$ , 所以

$$h(t) = 2e^{-3t} \cdot u(t)$$

简单电路的冲激响应见表 1-58。

### (三) 卷积

卷积积分是用来分析电路瞬态响应的一个重要方法。在线性电路中, 对任意激励函数的响应就等于该电路的单位冲激响应与激励函数的卷积积分, 即

$$r(t) = \epsilon(t) * h(t) = \int_{0^-}^t \epsilon(\tau) \cdot h(t - \tau) d\tau$$

或

$$r(t) = h(t) * \epsilon(t) = \int_{0^-}^t h(\tau) \cdot \epsilon(t - \tau) d\tau$$

式中  $h(t)$  为单位冲激响应,  $\epsilon(t)$  为任意波形的激励,  $r(t)$  为零状态响应,  $\tau$  是虚设变量,  $t$  是指定时间, 对  $\tau$  积分时,  $t$  当作常数。

例题 在图 1-45(a) 所示电路中,  $u_s(t)$  波形如 (b) 所示, 试用卷积积分计算零状态响应  $i(t)$ 。

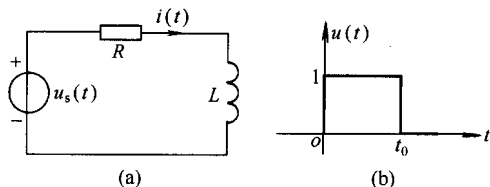


图 1-45 例题电路

解 图 (b) 激励的表达式为

$$u_s(t) = u(t) - u(t - t_0)$$

电路的冲激响应, 查表 1-49 得

$$h(t) = \frac{1}{L} e^{-\frac{R}{L}t} u(t)$$

响应  $i$  卷积为

$$\begin{aligned} r(t) &= i(t) = \int_{-\infty}^{\infty} u(\tau) - u(\tau - t_0) \cdot \frac{1}{L} e^{-\frac{R}{L}(t-\tau)} d\tau \\ &= \frac{1}{R} (1 - e^{-\frac{R}{L}t}) u(t) - \frac{1}{R} [1 - e^{-\frac{R}{L}(t-t_0)}] u(t - t_0) \end{aligned}$$

## 四、动态电路的变换域分析

在变换域中, 傅立叶变换 (简称傅氏变换) 和拉普拉斯变换 (简称拉氏变换) 均为积分变换, 它们都能将时域中描述动态电路的线性微分方程转换成线性代数方程组, 从而极大地简化了动态电路的瞬态分析。因为, 激励函数的变换、分析和计算均在频域 ( $j\omega$ ) 或复频域 ( $s = \sigma + j\omega$ ) 范围内进行, 所以又称为频域分析和复频域分析。



## (一) 频域分析

### 1. 傅立叶变换

非周期信号  $f(t)$  满足某些条件时,也可以展开为正弦形式的谐波和。这时,由傅立叶级数的式令重复周期  $T \rightarrow \infty$ , 重复频率  $\omega \rightarrow 0$ , 谱线间隔  $\Delta(\omega) \rightarrow d\omega$ , 在这种情况下,非周期信号的傅立叶正变换定义为

$$F(j\omega) = \mathcal{F}[f(t)] = \int_{-\infty}^{\infty} f(t) e^{-j\omega t} dt$$

其反变换为

$$f(t) = \mathcal{F}^{-1}[F(j\omega)] = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} F(j\omega) e^{j\omega t} d\omega$$

时间函数  $f(t)$  称为原函数。 $F(j\omega)$  是  $f(t)$  的频谱函数,它一般是复函数。 $f(t)$  和  $F(j\omega)$  是变换对,记作  $f(t) \longleftrightarrow F(j\omega)$

常用函数的傅立叶变换见表 1-59。

表 1-59 常用函数的傅立叶变换表

名称	时间函数 $f(t)$	傅立叶变换 $F(j\omega)$
直流	$E$	$2\pi E\delta(\omega)$
阶跃函数	$Eu(t)$	$\frac{E}{j\omega} + \pi E\delta(\omega)$
冲激函数	$E\delta(t)$	$E$
复指数	$Ee^{j\omega_0 t}$	$2\pi E\delta(\omega - \omega_0)$
正弦	$E\sin\omega_0 t$	$j\pi E[\delta(\omega + \omega_0) - \delta(\omega - \omega_0)]$
余弦	$E\cos\omega_0 t$	$E\pi[\delta(\omega + \omega_0) + \delta(\omega - \omega_0)]$

### 2. 傅立叶变换的基本性质

傅立叶变换的基本性质见表 1-60。

表 1-60 傅立叶变换的基本性质

序	性质	时域函数 $f(t)$	频谱函数 $f(\omega)$
1	线性	$a_1 f_1(t) + a_2 f_2(t)$	$a_1 F_1(\omega) + a_2 F_2(\omega)$
2	尺度变换	$f(at)$	$\frac{1}{ a } F\left(\frac{\omega}{a}\right)$
3	延时	$f(t - t_0)$	$F(\omega) e^{-j\omega t_0}$
4	频移	$f(t) e^{j\omega_0 t}$	$F(\omega - \omega_0)$
5	微分	$\frac{d f(t)}{dt}$	$j\omega F(\omega)$
6	积分	$\int_{-\infty}^t f(\tau) d\tau$	$\frac{F(\omega)}{j\omega}$
7	卷积	$f_1(t) * f_2(t)$	$F_1(\omega) \cdot F_2(\omega)$
8	对称	若 $x(t) \longleftrightarrow X(f)$ , 则 $x(t) \longleftrightarrow X(-f)$	

### 3. 动态电路的傅立叶变换分析法

分析步骤:

- (1) 列写动态电路的微分方程(时域形式);
- (2) 借助傅氏变换将微分方程变换为频域方程, 求出频域形式的响应;
- (3) 将频域形式的响应反变换为时域形式。

例题 单位阶跃电压  $u_s(t) = u(t)$  加在 RL 串联电路 [图 1-45(a)] 上, 求瞬态电流  $i(t)$ 。

解 电路的微分方程为

$$L \frac{di(t)}{dt} + Ri(t) = u(t)$$

等式两边取傅氏变换, 即  $i(t) \longleftrightarrow I(j\omega)$ , 由微分定理 (表 1-60 第五项) 得

$$j\omega LI(j\omega) + RI(j\omega) = \frac{1}{j\omega} + \frac{1}{2} \delta\left(\frac{\omega}{2\pi}\right)$$

所以

$$\begin{aligned} I(j\omega) &= \left[ \frac{1}{j\omega} + \frac{1}{2} \delta\left(\frac{\omega}{2\pi}\right) \right] / (R + j\omega L) \\ &= \frac{1}{j\omega} \cdot \frac{1}{R + j\omega L} + \frac{1}{2} \delta\left(\frac{\omega}{2\pi}\right) / R \\ &= \frac{1/j\omega L}{R} - \frac{L/R}{R + j\omega L} + \frac{1}{2} \delta\left(\frac{\omega}{2\pi}\right) / R \end{aligned}$$

上式中利用  $\delta$  函数的筛分性, 即  $\delta(\omega) f(\omega) = \delta(\omega) \cdot f(0)$ , 现将上式反变换得

$$i(t) = \frac{1}{R} (1 - e^{-\frac{R}{L}t}) u(t)$$

傅氏变换一般多用于信号分析、系统分析和通信系统。傅氏级数是傅氏变换的特例。

## (二) 复频域分析

### 1. 拉普拉斯变换

在  $[0^-, \infty]$  区间内的时间函数  $f(t)$ , 拉普拉斯正变换定义为

$$F(s) = \mathcal{L}[f(t)] = \int_{0^-}^{\infty} f(t) e^{-st} dt$$

式中  $F(s)$  是  $f(t)$  的象函数,  $s = \sigma + j\omega$  称为复频率,  $\sigma$  为使函数  $f(t)$  在  $[0^-, \infty]$  内积分收敛而选定的一个常数,  $\omega$  为角频率, 是变量, 积分的下限取  $0^-$  是使此积分能计及在  $t = 0$  时刻可能包含的冲激函数。

拉氏反变换定义为

$$f(t) = \mathcal{L}^{-1}[F(s)] = \frac{1}{2\pi j} \int_{\sigma_1 - j\infty}^{\sigma_1 + j\infty} F(s) e^{st} ds$$

式中  $\sigma < \sigma_1$ 。

与傅氏变换式

$$F(j\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t) e^{-j\omega t} dt$$

相比, 可知与拉氏变换不同之处在于:

- (1) 拉氏变换是  $0^-$  到  $\infty$  区间定义, 这样便于考虑初始条件;
- (2) 拉氏变换多  $3e^{-\sigma t}$  因子, 使更多的函数存在拉氏变换式;
- (3) 傅氏变换只是拉氏变换中  $s = j\omega$  的一种特殊情况。

常用函数的拉普拉斯变换见表 1-61。

表 1-61 常用函数的拉普拉斯变换表

$f(t) = \mathcal{L}^{-1}[F(s)]$	$F(s) = \mathcal{L}[f(t)]$	$f(t) = \mathcal{L}^{-1}[F(s)]$	$F(s) = \mathcal{L}[f(t)]$
$\delta(t)$	1	$\cos \omega t$	$\frac{s}{s^2 + \omega^2}$
$u(t)$	$\frac{1}{s}$		
$e^{at}$	$\frac{1}{s-a}$	$e^{at} \cdot \sin \omega t$	$\frac{\omega}{(s-a)^2 + \omega^2}$
$\sin \omega t$	$\frac{\omega}{s^2 + \omega^2}$	$e^{at} \cdot \cos \omega t$	$\frac{s-a}{(s-a)^2 + \omega^2}$

## 2. 拉普拉斯反变换

设  $F(s)$  为两个  $s$  的多项式之比的有理函数, 即

$$F(s) = \frac{R(s)}{Q(s)} = \frac{b_m s^m + b_{m-1} s^{m-1} + \dots + b_1 s + b_0}{a_n s^n + a_{n-1} s^{n-1} + \dots + a_1 s + a_0}$$

式中, 系数  $a_i$  和  $b_i$  都为实数,  $m$  和  $n$  是正整数, 且  $m < n$  (对于  $m > n$  情况, 可用长除法化为真分式), 按  $Q(s)$  根的情况, 可分为:

(1)  $Q(s) = 0$  的根无重根

$$\begin{aligned} F(s) &= \frac{R(s)}{Q(s)} = \frac{R(s)}{(s-p_1)(s-p_2)\dots(s-p_k)\dots(s-p_n)} \\ &= \frac{A_1}{s-p_1} + \frac{A_2}{s-p_2} + \dots + \frac{A_k}{s-p_k} + \dots + \frac{A_n}{s-p_n} \end{aligned}$$

式中  $p_1, p_2, \dots, p_k, \dots, p_n$  是  $Q(s) = 0$  时的根, 彼此都是不相等的,  $A_1, A_2, \dots, A_k, \dots, A_n$  为待定系数。

计算  $A_k$  的公式为

$$A_k = \left[ (s-p_k) \frac{R(s)}{Q(s)} \right]_{s=p_k}$$

系数确定后, 就可以逐项求取拉氏反变换, 即

$$\begin{aligned} f(t) &= \mathcal{L}^{-1}[F(s)] \\ &= A_1 e^{p_1 t} + A_2 e^{p_2 t} + \dots + A_k e^{p_k t} + \dots + A_n e^{p_n t} \\ &= \sum_{k=1}^n A_k e^{p_k t} \end{aligned}$$

若  $Q(s) = 0$  中有共轭复数根时, 例如  $p_k = \overset{*}{p}_{k-1}$ , 则其相应的系数  $A_k$  和  $A_{k-1}$  也有共轭, 即  $A_k = \overset{*}{A}_{k-1}$ 。

(2)  $Q(s) = 0$  的根有重根的情况

$$F(s) = \frac{R(s)}{Q(s)} = \frac{R(s)}{(s-p_1)^r D(s)}$$

式中, 在  $s = p_1$  处分母多项式  $Q(s)$  有  $r$  重根,  $F(s)$  的展开式为

$$F(s) = \frac{A_{11}}{(s-p_1)^r} + \frac{A_{12}}{(s-p_1)^{r-1}} + \dots + \frac{A_{1r}}{(s-p_1)} + \frac{R(s)}{D(s)}$$

式中  $R(s)/D(s)$  表示展开式中与  $p_1$  无关的其余部分,  $A_{11}$  仍可用原来的方法来求, 即

$$A_{11} = (s-p_1)^r \cdot F(s) \Big|_{s=p_1}$$

其余的, 与下标“1”有关系数的计算公式为

$$A_{1i} = \frac{1}{(r-i)!} \frac{d^{r-i}}{ds^{r-i}} \left[ (s-p_1)^r F(s) \right] \Big|_{s=p_1}$$

其中  $i = 1, 2, \dots, r$ 。

## 3. 拉普拉斯变换的基本性质

表 1-62 列出了拉氏变换的一些基本性质。

表 1-62 拉普拉斯变换的基本性质

序号	性质	时域 $f(t) t \geq 0$	复频域 $F(s)$	序号	性质	时域 $f(t) t \geq 0$	复频域 $F(s)$
1	惟一性	$f(t)$	$F(s)$	6	微分	$\frac{d(f(t))}{dt}$	$sF(s) - f(0)$
2	线性	$a_1 f_1(t) + a_2 f_2(t)$	$a_1 F_1(s) + a_2 F_2(s)$	7	积分	$\int_{-\infty}^t f(\tau) d\tau$	$\frac{F(s)}{s} +$
3	尺度变换	$f(at) a > 0$	$F\left(\frac{s}{a}\right)$				$\frac{\int_{-\infty}^t f(\tau) d\tau}{s}$
4	延时	$f(t - t_0)$	$e^{-st_0} F(s)$	8	卷积	$f_1(t) * f_2(t)$	$F_1(s) \cdot F_2(s)$
5	复频率平移	$f(t)e^{-at}$	$F(s+a)$	9	初值	$f(0^+) = \lim_{t \rightarrow 0^+} f(t) = \lim_{s \rightarrow \infty} sF(s)$	
				10	终值	$f(\infty) = \lim_{t \rightarrow \infty} f(t) = \lim_{s \rightarrow 0} sF(s)$	

4. 动态电路的拉普拉斯变换分析法

应用拉氏变换来分析和计算动态电路的瞬态, 优点是不必建立动态电路的微分方程(时域形式)并且在建立运算电路(也称  $s$  域模型)时已将电路的初始状态用附加电源形式包括进去。拉氏变换分析法又称复频域分析法, 其主要步骤是:

(1) 在  $t = 0^-$  等值电路中确定动态元件的初始值 [即  $i_L(0^-)$  和  $u_C(0^-)$ ], 从而确定反映电路中初始值的附加电源。

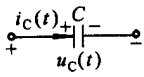
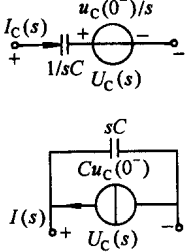
(2) 在换路 ( $t > 0^-$ ) 的电路中, 将激励函数  $f(t)$  变换为象函数  $F(s)$ , 每个元件变换成相应的运算形式(参见表 1-63)从而建立起换路后的运算电路(若电路是零初始状态, 频域电路参数中的  $j\omega$  换成  $s$  即可)。

(3) 仿照正弦稳态分析的相量法, 经过代数运算, 求出响应的象函数。

(4) 对响应的象函数进行拉氏反变换, 求得响应的原函数  $f(t)$ , 也即响应的时域解。

表 1-63 无源元件的运算形式

项目 名称	时域电路	特性方程 时域形式	特性方程 复频域形式	运算形式 电路
电阻		$u = Ri$ $i = Gu$	$U(s) = R I(s)$ $I(s) = G U(s)$	
电感		$u_L(t) = \frac{di_L(t)}{dt} \cdot L$ $= i_L(0^-) + \frac{1}{L} \int_0^t u_L(t) dt$	$U_L(s) = sL I_L(s) - Li_L(0^-)$ $I_L(s) = \frac{i_L(0^-)}{s} + \frac{1}{sL} U_L(s)$	

项目 名称	时域电路	特性方程 时域形式	特性方程 复频域形式	运算形式 电路
电容		$u_C(t) = u_C(0^-) + \frac{1}{C} \int_0^t i_C(t) dt$ $i_C(t) = C \frac{du_C(t)}{dt}$	$U_C(s) = \frac{u_C(0^-)}{s} + \frac{1}{sC} I_C(s)$ $I_C(s) = sU_C(s) - Cu_C(0^-)$	

图中 附加电流源—— $\frac{i_C(0^-)}{s}$ ,  $Cu_C(0^-)$  其中  $i_C(0^-)$ 、 $u_C(0^-)$  为初始电流和初始电压；

附加电压源—— $Li_C(0^-)$ ,  $\frac{u_C(0^-)}{s}$ ；

运算感抗—— $sL$ ；

运算容抗—— $1/sC$ 。

例题 如图 1-46(a) 所示电路, 已知开关 S 未合上时电路已达稳态, 且  $u_C(0^-) = 100V$ , 开关 S 在  $t = 0$  时合上, 求电感电流  $i_L(t)$ 。

解 换路前, 电感电流为

$$i_L(0^-) = \frac{220}{30 + 10} + 0.55A$$

电压源

$$Li_L(0^-) = 0.55$$

$$\frac{u_C(0^-)}{s} = \frac{100}{s}$$

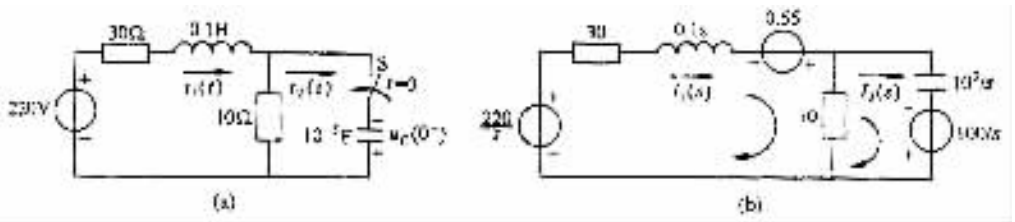


图 1-46 例题电路

运算感抗  $sL = 0.1s$ , 运算容抗  $1/sC = 10^3/s$  由上述数画出运算形式电路如图 (b) 所示。

根据图示参考方向, 运算电路的回路方程

$$\frac{220}{s} + 0.55 = (40 + 0.1s)I_L(s) - 10I_C(s)$$

$$\frac{100}{s} = -10I_L(s) + \left(100 + \frac{1000}{s}\right)I_C(s)$$

解得

$$I_L(s) = \frac{5 \cdot 3s^2 + 682s + 40000}{s(s + 200)^2}$$

$$= \frac{A_1}{s} + \frac{A_2}{s + 200} + \frac{A_3}{(s + 200)^2}$$

分母有重根。运用部分分式展开式可求得

$$I(s) = \frac{8.5}{s} + \frac{0}{s+200} + \frac{1551}{(s+200)}$$

取  $I(s)$  的拉氏反变换

$$i(t) = 5.5 + 1551te^{-200t} \quad A \quad t \geq 0$$

## 第七节 电磁路分析

### 一、恒定磁通磁路

#### (一) 恒定磁通磁路的顺问题与逆问题

恒定磁通磁路中,激励电流为直流,即恒定量,所以磁路中  $B$ 、 $H$ 、 $\Phi$  等均不随时间而变化。在铁磁性物质中, $B$  与  $H$  的关系服从于铁磁性材料的基本磁化曲线,因此是非线性函数关系。

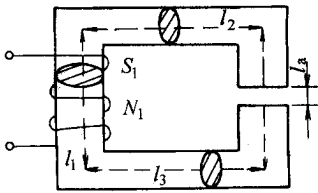


图 1-47 无分支磁路

磁路中的顺(正)问题是给定某一支磁路中的磁通(或磁感应强度),然后按照所给定的磁通及磁路各段的尺寸和材料去求激励线圈中的电流或磁通势。磁路中的逆(反)问题是预先给定线圈的磁通势  $Ni$ ,求各分支磁路中的磁通。

#### (二) 无分支磁路的计算

无分支磁路由铁磁材料和空气隙组成,如图 1-47 所示,无分支磁路的主要特点是在不计及漏磁通时,磁路中处处都有相等的(主)磁通  $\Phi$  对于顺(正)问题,其计算步骤如下:

1. 根据磁路中各部分的材料和截面进行分段,要求每一段磁路是均匀的,即具有相同材料的截面积。

2. 根据给定的磁通  $\Phi$ ,求该段材料中的  $B$ 。 $B = \Phi/S$ ,  $S$  为该段材料的有效横截面积,对于铁磁叠片构成的磁路,其有效截面积等于由几何尺寸决定的视在面积乘以叠压系数  $K$ 。故有效截面积小于材料截面积;而在空气隙中,磁通会向外扩张,空气隙的有效截面积  $S$  可按下列近似公式计算(其气隙长度为  $\delta$ ):

边长为  $a$ 、 $b$  的矩形铁心:  $S = ab + (a + b)\delta$

半径为  $r$  的圆形铁心:  $S = \pi r^2 + \pi r\delta$

3. 根据磁路基尔霍夫第一定律,由各段磁路中的磁感应强度  $B$ ,求出相应的磁场强度  $H$ 。对于铁磁材料, $B$  和  $H$  服从于基本磁化曲线(见图 1-48);对于空气隙中的磁场,有

$$H_a = 0.8 \times 10^6 B_a$$

式中  $H_a$ ——气隙磁场强度(A/m);

$B_a$ ——气隙磁感应强度(T)。

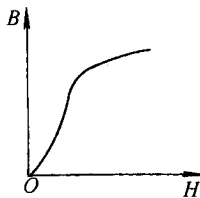


图 1-48 基本磁化曲线

4. 根据每段磁路中心线长度求出每段磁路的磁位差  $H_1 l_1$ 、 $H_2 l_2$ 、...

5. 根据磁路基尔霍夫第二定律,求得磁通势:

$$IN = H_a l_a + H_1 l_1 + \dots = \sum Hl$$

对于磁路的逆(反)问题,一般应用图解法或试探法来求解。

## 二、交变磁通磁路

### (一) 交变磁通磁路的分析

无分支交变磁通磁路如图 1-51(a)所示。在交变磁通下,铁心有损耗。铁心中的磁通随时间变化时,铁磁性物质有磁滞损耗和涡流损耗,统称为铁心损耗。当磁通作周期变化时,磁滞损耗与变化的频率成正比,涡流损耗则与频率的平方成正比。且它们都与变化磁通的最大值有关。国家冶金部制定的电工钢片(带)最大比铁损耗值用带下标的字母  $P$  表示,下标两个数字用斜线隔开,第一个数字表示磁感应强度的最大值  $B_m$  单位为 T,第二个数字表示测试频率,单位为 Hz。例  $P_{1.0/50}$  说明在  $f = 50\text{Hz}$ ,  $B_m = 1.0\text{T}$  时的最大铁损耗值。 $P$  的单位为  $\text{W/kg}$ 。比铁损耗值乘以铁磁性材料的质量,为总铁损耗值,即

$$P_{\text{Fe}} = \sum_k m_k P_{\text{Fek}}$$

式中  $m_k$ —— $k$  段磁路的重量;

$P_{\text{Fek}}$ —— $k$  段磁路的比铁损耗。

当  $B_m$  与  $f$  不同于给定值时,损耗  $P$  ( $\text{W/kg}$ ) 可按下式计算

$$P = P_{1.0/50} \left( \frac{B_m}{1.0} \right)^n \left( \frac{f}{50} \right)^{1.3}$$

式中  $B_m$ ——最大磁感应强度(T);当  $B_m < 1.0\text{T}$  时,  $n = 1.6$ ; 当  $1.0\text{T} < B_m < 1.6\text{T}$  时,  $n = 2.0$ 。

交变磁通在线圈中将产生感应电压。当磁通为  $\Phi = \Phi_m \cos \omega t$  时,则感应电压为  $u = \omega N \Phi_m \cos \left( \omega t + \frac{\pi}{2} \right)$ ,

其电压有效值为  $U = \frac{\omega N \Phi_m}{\sqrt{2}} = \sqrt{2} \pi f N \Phi_m = 4.44 f N \Phi_m$ , 式中  $N$  为线圈的匝数。

当考虑到铁磁性物质的  $BH$  关系为图 1-48 所示基本磁化曲线时,  $\Phi$  为正弦波而  $i$  为非正弦波,如图 1-49b 所示。如果考虑铁磁性物质  $BH$  关系为图 1-50a 所示动态磁滞回线(包括涡流耗),则  $\Phi$ 、 $i$  除波形开上的差异外,在时间轴上过零的时间也不同,如图 1-50b 所示。

如果线圈中的电流为正弦电流,而磁通  $\Phi(t)$  的波形将因磁饱和而呈现平顶状;当磁通  $\Phi(t)$  为正弦波时,而电流  $i$  为尖顶的非正弦波。

计算交变磁通时,可根据给定电工钢片的有功功率  $P$  和无功功率  $Q$  与磁感应强度  $B_m$  的数据(通常由曲线或表格给出),从给定的  $\Phi_m$ 、 $B_m$  查出  $P$  与  $Q$ , 然后根据下列公式求得磁化电流的有功分量与无功分量:

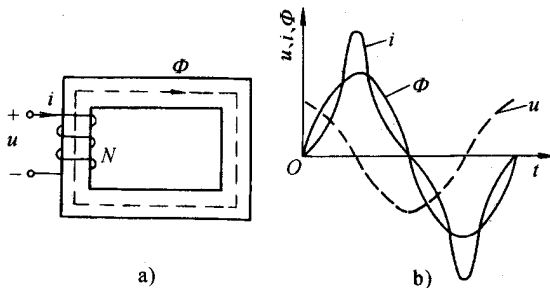


图 1-49 铁心线圈的电压、电流的波形  
a) 铁心线圈 b) 电压  $u$ 、电流  $i$ 、磁通  $\Phi$  波形

$$I_a \frac{P_{\text{Fe}}}{4.44 f N B_m S} = \frac{mP}{4.44 f N B_m S}$$

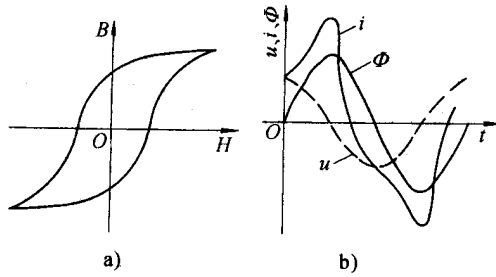


图 1-50 磁滞回线与电压、电流的波形

a) 磁滞回线 b) 电流  $i$ 、电压  $u$ 、磁通  $\Phi$  波形

$$I_{\tau} \frac{P_{Fe}}{4.44fNB_m S} = \frac{mP}{4.44fNB_m S}$$

式中  $m$  为铁磁材料的质量,  $P$  与  $Q$  为单位质量的比铁损耗有功值和无功值。

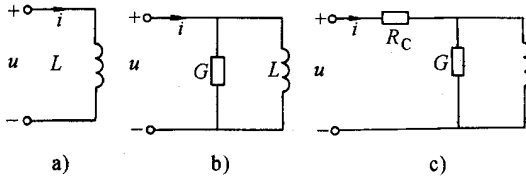


图 1-51 铁心线圈的电路模型

a) 无铁耗 b) 有铁耗 c) 有铁耗及铜耗

## (二) 铁心线圈的电路模型

当铁心损耗被忽略不计时, 将电流  $i$  视为正弦波, 则磁通  $\phi(t)$  为与电流  $i(t)$  同相位的正弦波, 所以  $i(t)$  在相位上滞后于外施电压  $u(t)$   $90^\circ$ , 其电路模型如图 1-51a 所示。

当计及铁心损耗时,  $\phi$  与  $i$  的关系由动态磁滞回线来决定, 电流  $i(t)$  仍视为正弦波, 但这时磁通  $\phi(t)$  与电流  $i(t)$  不同相, 因此  $u$  与  $i$  的相位差小于  $90^\circ$  而大于零, 其电路模型如图 1-51b 所示。

当还须计及铜线损耗时, 因为铜损是由于电流流过导线而产生的, 所以可用串入电路中的电阻表示, 其电路模型如图 1-51c 所示。

上述三种情况下铁心线圈的电压、电流与磁通的相量图见图 1-52。

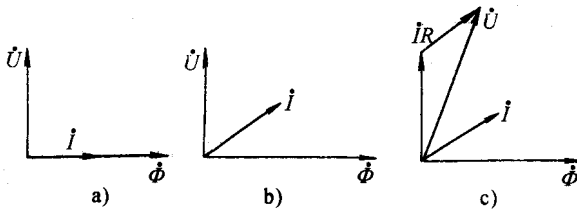


图 1-52 铁心线圈的相量图

a) 无铁心损耗 b) 计及铁心损耗 c) 计及铁心损耗和铜耗

## 三、永久磁铁磁路

### (一) 永久磁铁磁路

由永久磁钢与气隙组成, 如图 1-53 所示, 永久磁钢的磁滞回线具有较大剩余磁感应强度  $B$  与矫顽磁力  $H$ , 这是永久磁钢的一个特点。因此在分析永久磁铁磁路时, 应用磁滞回线在第二象限的去磁段。



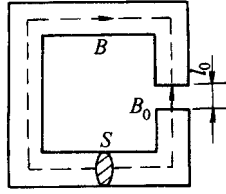


图 1-53 永久磁铁磁路

1. 永久磁铁磁路的顺问题是给定空气隙中的磁通  $\Phi$  ,求永久磁铁的尺寸。当给出空气隙中的  $B_0$  ,且知空气隙有效截面积  $S_0$  ,则可先由磁路求得磁感应强度  $B = B_0 \frac{S_0}{S} - \frac{\Phi_0}{S}$  ,再从永磁材料的  $BH$  的特性求得  $H$  (由于其工作点在第二象限,故  $H_0$  为负值),再由磁路基尔霍夫第二定律得到永久磁铁的长度为  $l = -\left(\frac{H_0}{H}l_0\right)$  ,从而得出永久磁铁的体积为

$$V = sl = -\frac{B_0 H_0}{BH} S_0 l_0 = -\frac{\Phi^2}{\mu_0 S_0} \cdot \frac{1}{BH}$$

为节省铁磁材料应使  $V$  最小,设计时应使上式分母中  $BH$  乘积值为最大。

2. 永久磁铁的逆(反)问题是根据给定磁路结构求  $\Phi$  ,通常采用图解法。

## 第二章 电工材料与电线电缆

### 第一节 绝缘材料

#### 一、绝缘材料简介

##### (一) 绝缘材料的介电性能

电介质(绝缘体)是其中正负电荷在电场中响应电场作用的方式主要是极化的一大类物质。电介质禁带宽度  $E_g$  较大 ( $>4\text{eV}$ , 参见本篇第 27 条), 价带中的电子难以跃迁到导带, 其中正、负电荷处于束缚状态, 因而在电场中只能极化而难以参加导电。电介质的基本特性(介电特性)和表 2-1。

表 2-1 电介质的介电特性

特性	名 词 术 语	说 明
介质极化	电介质极化 电极化强度 $P$ 相对介电常数 $\epsilon_r$ (相对电容率)	电介质中正负电荷响应外电场作用时发生的可逆、有限位移现象, 极化后产生电偶极矩, 并在电介质表面出现净束缚电荷 单位体积电介质内的电偶极矩矢量和 $P$ 通常与电场强度 $E$ 成正比, 但铁电体的 $P$ 与 $E$ 间呈非线性关系而且有电滞效应。参见第 2 篇第 23 条 介电常数 $\epsilon$ 与真空介电常数 $\epsilon_0$ 的比值或极化引起电容量增大的倍数。 $\epsilon_r > 1$ 。气体 $\epsilon_r$ 接近 1, 非极性电介质约 2~2.5, 极性电介质约 5~10 <sup>2</sup> , 晶体约 5~10 <sup>5</sup>
绝缘电阻	介质电导 $G$ 电导率 $\sigma$ 绝缘电阻 $R$ 体积电阻率 $\rho_v$ 表面电阻率 $\rho_s$	$G = I_L/U$ , 式中 $I_L$ 为联系松散的载流子在直流电压 $U$ 作用下形成的泄漏电流 $\sigma = j_L/E$ , $\sigma = ne\mu$ , 式中 $j_L$ 为泄漏电流密度, $n$ 为载流子浓度, $\mu$ 为迁移率 $R = 1/G = U/I_L$ , 绝缘电阻率 $\rho = 1/\sigma = E/j_L$ 与泄漏电流中体积电流相应的电阻率 ( $\Omega \cdot m$ )。绝缘材料的 $\rho_v \geq 1M\Omega \cdot m$ 与泄漏电流中表面电流相应的电阻率 ( $\Omega$ )

特性	名 词 术 语	说 明
介质 损耗	损耗角 $\delta$ 损耗因数 $\tan\delta$ 损耗指数 $\epsilon_r \tan\delta$ 介质损耗 $P$	<p>流过电介质中电流相位角的余角</p> <p>非极性电介质约 <math>10^{-4}</math> , 极性电介质 <math>\geq 10^{-3}</math></p> <p>电介质单位体积介质损耗 <math>P = \omega \epsilon_0 E^2 \epsilon_r \tan\delta</math></p> <p><math>P = \omega CU^2 \tan\delta</math> , <math>\omega</math> 为电场角频率 , <math>p</math> 包含由缓慢松弛极化引起的松弛损耗和由泄漏电流引起的电导损耗 <math>PR = U^2 R</math></p>
介质 击穿	介质击穿(电击穿) 击穿电压 $U_b$ 介电强度 $E_b$ 热击穿	<p>当电压高于临界值时 , 通过介质内部的电流剧增 , 发生电介质由绝缘状态转变为导电状态的突变现象(电击穿)</p> <p>击穿时的电压值。交流击穿电压有有效值和峰值之分</p> <p><math>E_b = U_b/d</math> , 式中 <math>d</math> 为击穿处厚度 , <math>E_b</math> 又称为击穿强度 , 气体介质 <math>E_b</math> 可达到几个 <math>MV/m</math> , 纯净液体 <math>E_b</math> 接近 <math>10^2 MV/m</math> , 实际液体 <math>E_b</math> 较低 , 固体介质 <math>E_b</math> 可达 <math>10^2 \sim 10^3 MV/m</math> , 以云母片和聚合物薄膜为最高</p> <p>固体介质局部由介质损耗引起的发热速率高于散热速率时 , 出现热不平衡使温度无限上升导致介质热破坏的现象 , 热击穿时 <math>E_b</math> 比电击穿时低得多</p>

介电性能与环境条件(指温度、湿度、电压频率等)有密切关系,通常不能用某一确定环境条件下测得的性能代表全部工作范围内的性能。此外,测量条件、所用试验方法对绝缘材料介电性能测量值等有强烈影响,而且要注意介电性能往往与材料的方向有关。

电工、电子设备必须用绝缘材料来达到隔离不同电位的导体、限制电流流向的目的,这时主要利用电介质的电绝缘性,因此绝缘材料都具有  $E_b$  和  $\rho_v$  高、 $\tan\delta$  低的特点,在应用中往往还需要它同时起机械支撑和固定、散热冷却、灭弧等作用,本章主要介绍这一类材料。电介质作为电气功能材料应用时,则将利用它的各种特性,而不同于电绝缘性。随着高新技术的发展,功能电介质发展很快,并且得到了越来越广的应用。

绝缘材料有不同的分类法,例如可按材料凝聚状态、化学组成、材料结构、材料来源、加工工艺等进行分类,而本章则根据手册要求主要按材料的应用特性和应用形式分类。

## (二) 绝缘材料的老化

绝缘材料老化直接影响电工、电子设备的可靠性和使用寿命。

1. 老化概述 与金属等材料比较,绝缘材料的性能相当容易随时间延长而变化。在电工、电子设备长期运行中或长期贮存时,在不同的老化因子作用下,绝缘材料特别是有机绝缘材料会发生一系列化学(降解、氧化和交联等)、物理(结晶形态、相转变和挥发等)变化,导致绝缘材料分解、产生低分子挥发物、出现气孔、液体粘度变化、固体材料表面发粘、脆化、碳化、极性增大、变色、发生龟裂和变形等,从而使性能发生不可逆变化,逐步丧失原有的功能特性,这种现象称为老化。

绝缘材料的老化有热老化、大气老化、电老化和机械老化等。热老化主要是热和氧长期联合对绝缘材料作用;大气老化主要是光(特别是紫外线)、氧、臭氧、水和其他化学因素的长期联合作用;电老化主要是电场、热、臭氧和氧的长期联合作用;机械老化主要是机械力、热和氧的联合作用。此外,高能射线、生物和微生物作用等也是不可忽视的老化因素。老化中出现的各种自由基对老化的发展有重要作用。

2. 耐热等级和寿命试验 温度是影响绝缘材料正常老化速率的最重要因素。各种绝缘系统,要按规定的老化试验方法,分别评定绝缘材料的耐热指数和绝缘系统的耐热等级,参见 IEC 出版物 216。耐热指数由温度指数和半寿命温差两个参数构成,温度指数是在特定试验条件下,对应规定寿命(通常为 20000h)的摄氏温度,对应减半寿命有另一温度指数,半寿命温差是两个温度指数的差值。绝缘系统耐热等级为 90℃(Y)

级、105℃(A)级、120℃(E)级、130℃(B)级、155℃(F)级和180℃(H)级,180℃以上为C级,C级又分200、220和250℃等级。绝缘材料耐热性也往往借用绝缘系统的耐热等级。

例如漆包线耐热等级评定,采用漆包线绞线样品在不同温度下进行长期老化试验,每隔一定时间取一批试样进行击穿试验,当某批试样性能达到寿命终点时,则该样品所经过的实际老化时间定为该温度下的平均寿命,用数理统计方法作出不同温度与对应平均寿命之间的关系曲线作为热寿命—温度曲线,在对数坐标纸上通常为直线,如图2-1所示,将线外推到20000h和10000h,从所对应的温度得出样品的温度指数和半寿命温差。

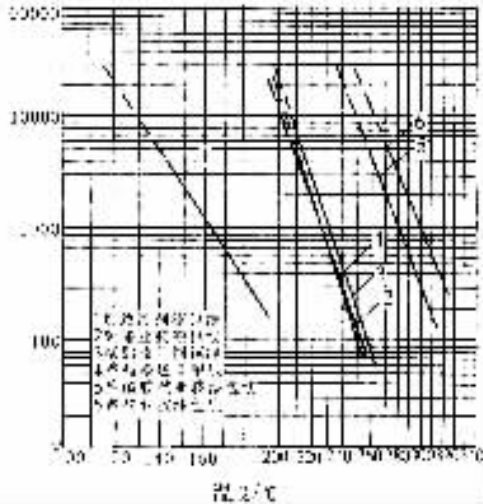


图 2-1 漆包线热寿命—温度曲线

3. 电老化 放电类型是影响绝缘材料电老化速率的重要因素。在强的法向电场作用下,绝缘材料内部气隙将发生局部放电,表面间隙发生电晕放电,在强发散电场作用下,绝缘材料内部将在不同运行条件下分别发生电树枝化、水树枝化和化学树枝化放电,引起放电老化击穿,在强沿面电场作用下,绝缘材料表面将随电压的上升而分别发生沿面电晕放电、电火花放电和电弧放电,引起绝缘材料表面腐蚀、树枝状电痕化、碳化直至表面上导体间发生短路。电老化后的击穿与化学反应有关,其介电强度 $E_b$ 更低,是决定绝缘体系长期工作场强的主要因素。

绝缘材料的耐电性根据规定的电老化试验方法进行评定。例如根据电晕试验得到的材料在一定的电晕放电或局部放电条件下直到击穿的时间长短表示材料的耐电晕性,根据电痕化试验得到的材料在规定电压和表面污秽条件下形成规定电痕所需的时间长短表示材料的耐电痕性,根据电弧试验得到的材料在规定电压和电流下形成导电层直至电弧熄灭的时间长短表示材料的耐电弧性。参见 IEC 出版物 343、112、587 和 628,ASTMD2275-68、D3756-79。绝缘材料的寿命与多种因素有关,与绝缘体系结构紧密联系,因此多因子老化试验最好通过接近相应绝缘体系的运行条件进行。

### (三) 绝缘材料应用中的一般问题

#### 1. 绝缘材料相容性

指绝缘系统内各绝缘材料间能相互容纳、彼此不会出现有害影响的特性。绝缘系统多数是由几种绝缘材料组成的,相容性差时,通过材料间分子相互扩散、电荷交换、材料运行中产生的老化产物的作用等使材料发生一系列物理、化学反应,使绝缘系统出现严重的缺陷,因而组合后性能显著降低。要根据产品结构特点和要求,通过规定的试验方法,评价不同绝缘材料组合时的相容性,以确定合理的绝缘系统。

2. 选用绝缘材料要有利于优化绝缘系统电场和热场分布绝缘材料串联组合时,绝缘系统电场与各组成材料阻抗成比例分布,把 $E_r$ 大、 $\rho_v$ 较小的绝缘材料放在电场强的部位,有利于改善电场分布,使绝缘材料所承受的最大场强降低。绝缘中气泡的 $E_b$ 低,但它 $\epsilon_r$ 小,而 $\rho_v$ 高,承受的电场高,因而最易击穿,要力求消除它。绝缘系统中选用导热性高的材料可以降低绝缘层所承受的温度差,根据温度分布情况可以采用耐热指

数较低的绝缘材料以降低成本,实现绝缘系统设计的优化。

3. 选用的绝缘材料要注意对环境的影响有些材料虽然性能好,但因危害环境或人们的健康而不宜选用,例如不宜选用多氯联苯绝缘油、氟利昂气体、电缆料、绝缘灌注胶等要尽量采用阻燃料,并且要考虑到燃烧时所产生的烟雾对环境和人健康的影响,尽量采用无卤低烟阻燃料。

4. 要通过确定合理的绝缘工艺参数确保绝缘系统的综合性能能取决于材料结构,而绝缘材料内的化学结构和绝缘系统中材料的真正组合结构实际上是由绝缘工艺确定的,制备工艺中要尽量防止产生沿电场方向的长气隙和绝缘层皱折。合理的绝缘工艺是达到绝缘系统综合性能指标的可靠保证。

## 第二节 电线电缆

电线电缆的品种很多,应用较广泛的有裸导线、电磁线、绝缘电线和电缆等。

### 一、裸导线和裸导体制品

这类产品只有导体部分,没有绝缘和护层结构,分软连接、圆单线、型线和裸绞线四种,安装电工常用的是下面三种:

#### (一)圆单线

圆单线主要用作各种电线、电缆的导电线芯,也可以直接作为产品用作架空的通讯广播线等。常用的有TY型硬圆铜线、TR型软圆铜线、LY型硬圆铝线及LR型软圆铝线。

#### (二)型线

非圆形截面的裸导线称为型线。它主要用于安装配电设备及其他电工制品,如输配电的汇流排等,常用的为矩形截面的TMY型铜排和LMY型铝排。

#### (三)裸绞线

它是将多根圆单线绞合在一起的绞合导线,这种线较软并有足够的机械强度,所以架空电力线路都用裸绞线架设。“常用的有LJ型硬铝绞线、LGJ型钢芯铝绞线和TJ型硬铜绞线等。

### 二、绝缘电线及电缆

电气装备内部的安装连接、电气设备与电源之间的连接,以及电力的输配等,都要使用各类绝缘电线及电缆。绝缘电线和电缆一般由导电线芯、绝缘层和保护层构成。

#### (一)导电线芯

按使用要求可分为硬型、软型,以及用于移动式电线和电缆芯线的特软型几种结构,按导线的线芯数分有单芯、双芯、三芯和四芯等。

#### (二)绝缘层

绝缘层主要作用在于防止漏电和放电。一般由包裹在导电线芯外的一层橡皮、塑料或抽纸等绝缘物构成。

#### (三)保护层

保护层主要起机械保护作用,保护绝缘。它分为金属的和非金属的保护层两种,绝缘电线通常用纤维编织物、塑料等作为保护层,固定敷设的电缆多采用金属保护层,有铅套、铝套、绞绞金属套和金属纺织套等。

在金属保护层外面还有外被层,用以保护金属护层免受外界机械和腐蚀等的损伤,移动电缆多采用非金属护层。有橡皮、塑料等。

绝缘电线的品种很多,常用的绝缘电线的型号见表 2-2。

表 2-2 常用绝缘电线型号

型号	名称	主要用途
BX	铜芯橡皮线	固定敷设用
BLX	铝芯橡皮线	
BV	铜芯聚氯乙烯塑料线	
BLV	铝芯聚氯乙烯塑料线	
BVV	铜芯聚氯乙烯绝缘、护套线	
BLVV	铝芯聚氯乙烯绝缘、护套线	
RVS	铜芯聚氯乙烯型软线	灯头、收音机等引线
RVB	铜芯聚氯乙烯平行软线	

### 三、导线截面的选择

导线的使用,通常按导线的载流量、线路允许的电压损失、导线的机械强度等来选择导线的截面。在不需考虑允许的电压损失和导线机械强度的情况下,可只按导线的连续允许通过电流(安全电流或称安全载流量)来选择导线的截面。导线具有电阻,在通过持续负荷电流时会使导线发热,从而使导线的温度升高,一般导线的最高允许工作温度为 65℃,若超过这个温度,导线的绝缘层将加速老化,甚至变质损坏而引起火灾。按工作环境的温度,使导线通过的电流在安全电流之内,就可避免导线在工作时出现温升超过最高允许值的情况,从而保证导线的安全运行。导线因敷设方式和使用环境的不同,其散热条件也不同,所以同样的导线,明敷和暗敷时其安全载流量就不相同。同样的敷设方式,也会因导线数目的不同,其安全载流量也不同,如导线穿管敷设时,情况就是这样。导线使用场所的环境温度越高,其安全载流量就越小,因此要准确确定导线的安全载流量,就要全面考虑以上各种因素的影响。

导线的允许温升,是指导线的最高允许工作温度与环境温度之差。例如,当环境温度为 25℃时,导线的允许温升为 65℃ - 25℃ = 40℃。

常用的 500V 铝芯绝缘导线长期连续负荷允许载流量见表 2-3,500V 铜芯绝缘线长期连续负荷允许载流量见表 2-4。表中的 25℃、30℃表示使用环境温度为 25℃和 30℃。

500V 塑料绝缘塑料护套线在空气中敷设的长期连续负荷允许载流量,见表 2-5。

另外,利用口诀和一些简单的心算方法,也可直接求得导线截面积的估算值,而且并不影响使用。铝芯绝缘导线载流量与截面积倍数的关系口诀如下:

- 10 下五,100 上二;
- 25、35 四、三界;
- 70、95 两倍半;
- 穿管、温度,八冬折;
- 裸线加一半,铜线升级算。







此口诀以铝芯绝缘导线明敷、环境温度为 25℃ 的条件为准,口诀对各种截面导线的载流量(A),用“截面面积(mm<sup>2</sup>)乘以一定的倍数”来表示,为此,要熟悉导线芯线截面排列,把口诀的“截面面积与倍数关系”排列起来,表示为:

$\underbrace{\dots\dots 10}_{\text{五倍}} \quad \underbrace{16 \sim 25}_{\text{四倍}} \quad \underbrace{35 \sim 50}_{\text{三倍}} \quad \underbrace{70 \sim 95}_{\text{二倍半}} \quad \underbrace{100 \dots\dots \text{以上}}_{\text{二倍}}$

此外,口诀中的“穿管、温度八九折”是指导线不明敷,温度超过 25℃ 较多时才予以考虑。若两种条件都已改变,则载流量应打八折后再打九折,或简单地一次以七折计算(即  $0.8 \times 0.9 = 0.72$ )。口诀中的“裸线加一半”是指按一般计算得出的载流量再加一半(即乘 1.5);口诀中的“铜线升级算”是指将铜线的截面按截面排列顺序提升一级,然后再按相应的铝线条件计算。

表 2-5 500V 护套线(BW、BLW)在空气中敷设,长期连续负荷允许载流量

截面面积 (mm <sup>2</sup> )	一芯		二芯		三芯	
	铝芯	铜芯	铝芯	铜芯	铝芯	铜芯
1.0	—	19	—	15	—	11
1.5	—	24	—	19	—	14
2.5	25	32	20	26	16	20
4.0	34	42	26	36	22	26
6.0	43	55	33	49	25	32
10.0	59	75	51	65	40	52

## 第三节 通信(光纤)电缆

### 一、通信电缆结构和传输特性

#### (一)通信电缆概述

通信电缆和光纤光缆是通过导线(有线通信)传输电磁波信息(包括电话、电报、电视、广播、传真、数据、网络信息等电磁信息)的传输元件。通信电缆包括市内、长途、射频、CATV、泄漏通信、海底通信等通信电缆;光纤光缆包括架空、海底、管道、光电综合通信、电力系统用和软光缆等。按通信电缆结构可分为:对称通信电缆、同轴通信电缆、波导管、光纤光缆等。不同通信电缆(含光缆)具有不同的通信传输能力:1)对称结构:传输  $10^6 \text{ Hz}$  以下音频和超声波信号;2)同轴结构:传输  $10^6 \sim 10^9 \text{ Hz}$  范围内超高频信号;3)波导结构:传输  $10^9 \sim 10^{12} \text{ Hz}$  范围内微波频段的信号;4)光缆:传输  $10^{12} \sim 10^{17} \text{ Hz}$  范围内信号。

#### (二)对称通信电缆结构元件

对称通信电缆由导电线芯、绝缘、线组、电缆芯及护层组成。通信回路由相同外径及相同结构的两根绝缘线芯组成。

对称通信电缆要求导电性能好、高频损耗小,具有足够的机械强度和良好的柔软性。线芯结构通常为单芯圆柱形。导电线芯采用铜或电工铝,电工铝线芯直径是铜线芯的 1.28 ~ 1.30 倍。电阻率  $\rho(20^\circ \text{C})$  和电阻

温度系数分别为 :铜导体  $\rho \leq 17.241\text{n}\Omega \cdot \text{m}$  和  $0.00393/\text{K}$  ,铝导体  $\rho \leq 28.264\text{n}\Omega \cdot \text{m}$  和  $0.00403/\text{K}$ 。

通信电缆要求绝缘材料体积电阻系数  $P_V$  高、相对介电常数  $\epsilon_r$  和介质损耗角正切  $\tan\delta$  小 ,同时要求具有良好的柔软性和机械加工性能。单纯的空气是一种通信电缆用的理想的介质 ,因此 ,应使电缆绝缘中空气所占的比例尽可能大。空气 - 纸绝缘采用较早 ,但目前已 被塑料和塑料 - 空气绝缘结构所代替 ,主要有 :聚氯乙烯、聚乙烯、聚丙烯、聚苯乙烯、泡沫聚乙烯、聚乙烯绳管、聚乙烯鱼泡、聚苯乙烯绳带等。线芯绝缘应带不同颜色 ,普遍采用全色谱。对称通信电缆两根绝缘线绞合可减少线组间的电磁耦合、降低回路串音、提高回路的抗干扰能力。绞合方式有 :1)对绞 :两根不同颜色的绝缘线芯绞合成对 2)星绞 :四根不同颜色的绝缘线芯绞合而成 3)复对绞 :由两个不同节距的对绞组再合成 ,见图 2-2。

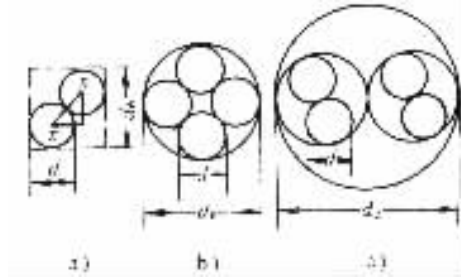


图 2-2 常见绞合方式剖面结构示意图

a)对绞 b)星绞 c)复对绞 d)—绝缘线外径  
 $d_e$ —绞合后有效直径

对称通信电缆的缆芯由一定数量线组按一定规律和方式绞合而成 :1)同心式方式将若干线组从中心开始有规律地一层一层的绞合成缆 ,相邻层绞合方向相反 2)单位式方式由若干基本单位绞合成缆 ,分 50 对单位和 100 对单位两种 ,各层绞合方向相同 3)无规绞合是一种新的绞合方式 ,它是利用随机脉冲信号控制缆芯的绞合过程 ,使线对的相对位置一直处于变化状态 ,由于相邻缆芯出现重复的概率很小 ,因此大大降低了线对间的串音。

### (三)同轴通信电缆结构元件

同轴通信电缆主体有内导体、绝缘、外导体三部分 ,外部为综合护层。内导体要求电导率高 ,因此采用电工铜 ,镀锡、镀银、镀镍后可用于高频、高温场合。内导体结构可采用实心体、绞线、空管、波纹管等形式。

绝缘介质要求电绝缘性能和力学性能高、吸水性低 ,结构稳定、保证内外导体严格同心 ,主要采用聚乙烯 ,也可采用交联聚乙烯、氟塑料等。绝缘型式 :1)实心绝缘 2)空气 - 塑料组合绝缘 ,介质与空气的体积比为  $1/10 \sim 1/20$ 。结构型式有垫片绝缘、鱼泡绝缘、绳管绝缘、螺旋绝缘、竹节绝缘和泡沫绝缘等 ,如图 2-3 所示 ,等效  $\epsilon_{nl}$  和等效  $\tan\delta$  见表 2-6。

表 2-6 各种绝缘型式的等效  $\epsilon_{nl}$  和等效  $\tan\delta_d$

绝缘型式	实心聚乙烯	聚苯乙烯绳	泡沫聚乙烯	聚乙烯鱼泡	聚乙烯垫片	聚乙烯螺旋带
$\epsilon_{nl}$	2.3	1.25 ~ 1.27	1.3 ~ 1.5	1.17 ~ 1.2	1.08 ~ 1.135	1.08 ~ 1.10
$\tan\delta_a/10^{-3}$	0.3 ~ 0.5	1 ~ 3 <sup>①</sup>	0.1	0.1	0.03 ~ 0.04	0.04

① 250kHz 下测量值 ,其他为 1MHz 下测量值。

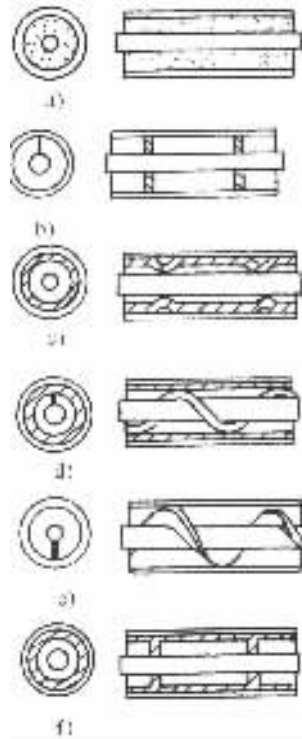


图 2-3 同轴通信电缆的绝缘结构示意图  
 a) 泡沫聚乙烯 b) 聚乙烯垫片 c) 聚乙烯鱼泡  
 d) 内扎绳管 e) 螺旋带 f) 竹节式

同轴通信电缆的外导体一般用铜,起电气回路和屏蔽双重作用。理想结构是空心圆导体,实际生产中常有:锁齿式外导体、皱边式外导体、压痕式外导体、铜钢复合双层外导体、编织外导体、光滑管外导体、皱纹金属管外导体、绕包外导体、电镀外导体等,见图 2-4。

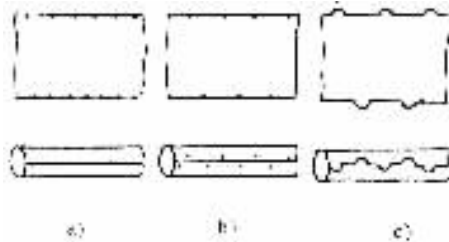


图 2-4 典型同轴电缆外导体结构示意图  
 a) 皱边式 b) 压痕式 c) 锁齿式

#### (四) 通信电缆护层

通信电缆护层起机械扰的作用。主要有 1) 金属套:有铅套、铝套、焊接钢管护层等,特点是密封性好、不透水、不透潮,有良好的电磁屏蔽作用 2) 橡胶和塑套:有聚乙烯、聚氯乙烯、氯丁橡胶等,也可采用硅橡胶、氟塑料,特点是柔软轻便,但易老化且防潮性较差 3) 组合护层:防潮性超过塑套,目前广泛采用的是铝-塑自粘结构,是一种双面涂敷有自粘性塑料的铝带,纵包后经局部加热自粘而成,也有采用钢-塑自粘结构或铝、钢、塑料综合护层结构。

根据防霉、防白蚁、防鼠、防雷、防辐射等要求,可设计专用特种护层。

### (五) 通信电缆传输理论和传输参数

通信电缆理论基础是麦克斯韦方程。对称通信电缆和同轴通信电缆中主要传输平面电磁波(TEM波),波导中主要传输横电波(TE波)和横磁波(TM波)。在分析通信电缆的传输特性时,常用均匀传输线的概念,均匀传输线基本方程式为

$$U = U_1 \operatorname{ch} \Gamma x + I_1 Z_c \operatorname{sh} \Gamma x$$

$$I = I_1 \operatorname{ch} \Gamma x + \frac{U_1}{Z_c} \operatorname{sh} \Gamma x$$

式中  $U_1$ ——终端电压;  
 $I_1$ ——终端电流;  
 $\Gamma$ ——传播常数;  
 $Z_c$ ——特性阻抗。

通信电缆的一次参数(或原参数,见表2-7由传输线的结构所确定,有线芯有效电阻  $R$ 、总电感  $L$ (包括回路内电感和回路外电感)、两根导体间电容  $C$  以及两根导体间绝缘的电导  $G$ 。通信电缆的传输参数(二次参数,或付参数,见表2-7由一次参数计算得,有衰减常数、相移常数、传播常数、特性阻抗等,反映电磁波在线路中的传输尽量。

表2-7 通信电缆一次参数计算公式

	参数	理论计算公式	实用计算公式
对称通信电缆 <sup>①</sup>	电阻 $R(\Omega/\text{km})$	直流电阻 $R_0 = 2000\rho \frac{l}{A}$	有效电阻 $R = R_0 + R_{\sim} \approx \lambda\rho \frac{200}{\pi r^2} + R_{\sim}$
	电感 $L(\text{H}/\text{km})$	$L = \left( \mu_r + 2 \ln \frac{a-r}{r} \right) \times 10^{-4}$	总电感 $L = \lambda \left[ 4 \ln \frac{a-r}{r} + Q(kr) \right] \times 10^{-4}$
	电导 $C(\text{F}/\text{km})$	$C_0 = \epsilon_r \times 10^{-9} [36 \ln(a-r)/r]$	$C = \lambda \epsilon_r \times 10^{-6} [36 \ln(a-r)/r]$
	电导 $G(\text{S}/\text{km})$	直流电导 $G_0 = 100\pi \sigma_i \lambda \ln(a-r)/r]$	绝缘电导 $G = 1000\pi \sigma_i \lambda \ln(a-r)/r] + \omega C \tan \delta$
	电阻 $R(\Omega/\text{km})$	内导体直流电阻 $R_a = 1000\rho_a/\pi a^2$ 外导体直流电阻 $R_b = 1000\rho_b/2\pi b t$	有效电阻 $R = \frac{1}{4\pi r^2 \sigma_a} + \sqrt{\frac{f}{\pi}} \left( \frac{1}{2r} \sqrt{\frac{\mu_0}{\sigma_a}} + \frac{1}{2b} \sqrt{\frac{\mu_b}{\sigma_b}} \right)$
	电感 $L(\text{H}/\text{km})$	$L = \frac{\mu_a}{8\pi} + \frac{\mu_i}{2\pi} \ln \frac{b}{a} \left[ \frac{\mu_b}{2\pi} \left( \frac{c^2}{c^2-b} \right)^2 \ln \frac{c}{b} - \frac{\mu_b c^2}{2\pi c^2-b} + \frac{\mu_b c^2 + b^2}{8\pi c^2 - b^2} \right]$	总电感 $L = \frac{\mu_i}{2\pi} \ln \frac{b}{c} + \frac{1}{2\pi \sqrt{\pi f}} \left( \frac{1}{a} \sqrt{\frac{\mu_a}{\sigma_a}} + \frac{1}{b} \sqrt{\frac{\mu_b}{\sigma_b}} \right)$
	电容 $C(\text{F}/\text{km})$	$C = \epsilon_r \times 10^{-6} (18 \ln b/a)$	$C = \epsilon_r \times 10^{-6} (18 \ln b/a)$
	电容 $G(\text{S}/\text{km})$	直流电导 $G_0 = 2\pi \sigma_i \lambda (\ln b/a)$	绝缘电导 $G = \omega C \tan \delta$

① 式中  $l$  为线芯长度(km);  $a$  为导体间距(mm);  $r$  为导体半径(mm);  $A$  为导线截面( $\text{mm}^2$ );  $\rho$  为线芯电阻率( $\Omega \cdot \text{km}$ );  $\mu_r$  为导体相对磁导率;  $\sigma_i$  为绝缘电导率;  $\lambda$  为线芯总绞合系数,  $R_{\sim}$  为附加电阻(由集肤效应电阻、邻近效应电阻和附加金属损耗电阻组成),  $Q(kr)$  为对称结构内电感参量( $k = \sqrt{\omega \mu r}$ 。

② 式中  $a$  为内导体半径;  $b$  为外导体内表面半径;  $c$  为外导体外表面半径;  $t$  为外导体厚度;  $\rho_a$  为内导体电阻率;  $\rho_b$  为外导体电阻率;  $\mu_a, \mu_b$  为内、外导体磁导率;  $\mu_i$  为绝缘磁导率;  $\sigma_a$  为内导体电导率;  $\sigma_b$  为外导体电导率;  $\sigma_i$  为绝缘电导率;  $f$  为传输的电磁波频率。

表 2-8 通信电缆二次参数计算公式

$f/\text{Hz}$	0 ~ 800	800 ~ 30000	30000 以上
衰减常数 $\alpha$ (dB/km)	$\sqrt{\frac{\omega CR}{2}}$	$\left\{ \frac{1}{2} \left[ \sqrt{(R^2 + \omega^2 L^2)(G^2 + \omega^2 C^2)} - (\omega^2 LC - RG) \right] \right\}^{\frac{1}{2}}$	$\frac{R}{2} \sqrt{\frac{C}{L}} + \frac{G}{2} \sqrt{\frac{L}{C}}$
相移常数 $\beta$ (rad/km)	$\sqrt{\frac{\omega CR}{2}}$	$\left\{ \frac{1}{2} \left[ \sqrt{(R^2 + \omega^2 L^2)(G^2 + \omega^2 C^2)} - (\omega^2 LC - RG) \right] \right\}^{\frac{1}{2}}$	$\omega \sqrt{LC}$
特性阻抗 $Z_c/\Omega$	$\sqrt{\frac{R}{\omega C}} e^{j \frac{\pi}{4}}$	$\sqrt{\frac{R + j\omega L}{G + j\omega C}}$	$\sqrt{\frac{L}{C}}$

## (六) 影响通信电缆传输质量的因素

主要影响因素有: 1) 匹配, 包括①传输线与网络或转换器等接口对接时的匹配, 要求负载或负载网络的入端阻抗等于传输线的特性阻抗; ②传输线自身匹配, 通常采用各种匹配电路或多个四分之一波长线段来匹配; 2) 色散, 绝缘层引起色散, 改善方法是选用介电性能好的绝缘材料如聚乙烯、聚苯乙烯和聚四氟乙烯等; 3) 振幅失真, 采用衰减均衡器(RLC元件组成的四端网络)来改善; 4) 相位失真, 采用相位均衡器(LC元件组成的四端网络)来消除; 5) 特性阻抗不均匀性, 有三种改善方法: 缩小制造公差、电缆制造长度内同轴对的分组和同轴电缆施工中的配盘。

## (七) 通信电缆串音、衰减和屏蔽

使电磁波的传输产生变化的电磁影响称为串音。串音途径有回路间相互串音、外来电磁信号直接串入和通过第三回路串入。回路间串音有: 1) 近端串音, 与主串回路的信号源同一端受到的串音; 2) 远端串音, 另一端所受到的串音。

对称通信电缆回路间串音主要是由于主串回路的横向电磁场与被串回路间的电磁耦合, 并在被串回路中感生电压电流。产生串音的途径有直接串音和间接串音, 在低频时, 间接串音影响很小, 可以忽略不计。同轴电缆串音由沿同轴对外导体表面存在着电场的纵向分量引起, 它作用在由两个同轴对外导体所组成的第三回路上产生电流和电压降, 在被串回路中产生串音电流, 当频率增高时, 同轴对间串音电流减少。串音衰减表示能量从主串回路串入被串回路时衰减的程度。串音衰减越大, 表示串音的影响越小。串音衰减分为:

1. 近端串音衰减, 为主串回路的发送功率  $P_{10}$  串至被串回路近端时的衰减值 (dB):  $A_0 = 10 \lg(P_{10}/P_{20})$ , 其中  $P_{20}$  为串至被串回路近端的串音功率;

2. 远端串音衰减, 为主串回路的发送功率  $P_{11}$  串至被串回路远端时的衰减值 (dB):  $A_{12} = 10 \lg(P_{10}/P_{21})$ , 其中  $P_{21}$  为串至被串回路远端的串音功率。远端串音防卫度表示受串音影响的程度, 是被串回路远端(接收端)收到的信号电平与串到该接收端的串音电平之差 (dB):  $A_{12} = P_{11} - P_{21} = 20 \lg |U_{11} - U_{21}|$ , 其中  $P_{11}$  为主串回路电平,  $P_{21}$  为被串回路远端电平,  $U_{11}$  为主串回路电压,  $U_{21}$  为被串回路远端电压。

消除串音方法有: 1) 交叉: 通过沿电缆制造长度定距离交叉线芯, 使串音电流相互抵消; 2) 扭绞: 在电缆生产过程中通过不同钱组采用不同的绞合节距以减小组间的电磁耦合和改善组内回路的间接耦合, 但较好的方法是通过无规绞合; 3) 平衡: 一般在短段电缆上先采用交叉法进行平衡, 在较大的制造长度上用交叉法平衡后, 剩余的不对称采用附加电容法进行平衡, 在敷设好的长线路中, 采用集中平衡法进行最后平衡。

采用金属带绕包或纵包结构或金属丝编织结构进行屏蔽是减少通信电缆回路间的相互干扰和外部干扰的根本方法, 主要屏蔽用材料有钢、铜、铝、铅、金属复合纸或铝塑复合带等。

## 二、主要通信电缆品种

### (一) 市内通信电缆和全塑市话电缆

用于市内、近郊和局部区域信息传输,主要品种是全塑市话电缆(聚烯烃绝缘铝—塑综合防潮层电缆),应用最广。品种和结构见表 2-9。

市内通信电缆还有缆芯绞合油膏填充式聚烯烃绝缘电缆、全部线对脉码调制(PCM)通信电缆、市内同轴电缆等。市内通信电缆的电气性能指标请参见 GB/T13849。

### (二) 长途对称通信电缆

主要用于远距离信息传输。品种和结构见表 2-10。

长途对称通信电缆还有纸绝缘低频对称通信电缆、纸绝缘高低频综合通信电缆、泡沫聚乙烯低频综合通信电缆、数字传输对称通信电缆、数模综合对称通信电缆等,它们的电气性能指标比市内通信电缆高。这类产品已逐步被光纤光缆所替代。

表 2-9 市内通信电缆主要品种和结构

结构品种	型号	导线直径/mm	标称对数	线芯绝缘	线对绞合	缆芯绞合
全塑市话电缆	HYA	0.32 0.4 0.5 0.6 0.8	10~3600	聚乙烯或聚丙烯	对绞	同心式或单位式
纸绝缘对绞电缆	HQ	0.4 0.5 0.6 0.7	5~2400	空气-纸		
自承式塑料电缆	HYVC	0.5	5~100	聚乙烯		

表 2-10 长途对称电缆主要品种和结构<sup>①</sup>

品种类型	型号	导线直径/mm	标称组数	线芯绝缘
纸绝缘星绞高频	HEQ-252 或 156 123	1.2	1 3 4 7	空气-纸
纸绝缘星绞低频电缆	HEQ	0.8 0.9 1.0 1.2	3~37	空气-纸
泡沫聚乙烯绝缘 高低频电缆	HYFQ、HYFL	0.9 1.2	高频组数 3 4 低频组数 4~11	泡沫聚乙烯

① 线对绞合:星绞 缆芯绞合:层绞式。

表 2-11 向轴干线通信电缆主要品种和结构

品种	型号	导线直径	标称线对	线芯绝缘	缆芯绞合
小同轴综合通信电缆	HOQ、HOL	1.2/4.4	4 8	聚乙烯鱼泡	层绞式
同轴综合通信电缆	HOQ、HOL	2.6/9.5	4 8	聚乙烯垫片	层绞式

### (三) 同轴(干线)通信电缆

用于通信干线和城市间信息传输。品种和结构见表 2-11。

此外还有 1.2/4.4 和 2.6/9.5 双同轴对的综合通信电缆、0.7/2.9 微同轴综合通信电缆等。

### (四) 射频电缆

主要用于无线电设备、电子仪器的配套和电气测量的信号传输等,目前已有数百个品种。按结构形式分

为同轴型、对称型和带状型射频电缆,按绝缘形式分为实心绝缘、半空气绝缘和空气绝缘三类。1)同轴射频电缆主要用于无线电设备连接、小型无线电发射或接收馈线、电气测量信号传输线等,采用单心内导体、实心绝缘结构,特性阻抗有 $50\Omega$ 、 $75\Omega$ 和 $100\Omega$ 。2)大功率射频电缆主要用于给发射天线传输大功率射频能量,相对结构尺寸较大,并采用空气绝缘。3)匹配电缆用于满足不同输入阻抗仪器的匹配,利用螺旋内导体来提高电感量,使特性阻抗增大( $500\sim 1000\Omega$ )。4)延迟电缆用于产生时间延迟的信号,用高磁导率内芯和螺旋结构制成。5)射频船用电缆用于舰船内部通信和控制。射频的物理机械性能具体要求参见射频电缆总规范(GB12269)和射频电缆试验方法(GB4098)。

### (五)局域网(LAN)用数据传输电缆

用于局部网络信息传输的专用电缆,按传输频率分 $1.04\text{Mb/s}$ 、 $5\text{Mb/s}$ 、 $16\text{Mb/s}$ 、 $20\text{Mb/s}$ 、 $100\text{Mb/s}$ 、 $200\sim 400\text{Mb/s}$ 、 $500\sim 600\text{Mb/s}$ 共7类。随着计算机技术的发展,前4类已逐步淘汰,目前第5类电缆正大量用于高速信息网络(特别是智能化大楼内的布线),而今后方向是发展并采用第6、7类电缆。第5类电缆常见对数有2、4、8、16、25,对绞和成缆节距短( $12\sim 25\text{mm}$ )且恒定( $\leq 0.5\sim 0.7\text{mm}$ ),主要品种有:1)UTP电缆,非屏蔽扭绞线对电缆;2)STP电缆,屏蔽扭绞线对电缆;3)S-UTP电缆,屏蔽/对绞线电缆;4)S-STP电缆,屏蔽/屏蔽扭绞线对电缆。

### (六)CATV电视电缆

共用天线电视系统(CATV)是用同轴电缆进行宽频带传的图像信号系统,CATV电视电缆是CATV的重要组成部分,包括干线电缆、配线电缆、用户引入线和用户室内线,特性阻抗均为 $75\pm 3\Omega$ 。CATV电视电缆特性阻抗高度均匀、温度特性良好、损耗低、电压驻波比小、电气机械性能长期工作稳定性好。CATV电视电缆外导体结构有金属编织外导体、金属管外导体、皱纹金属管外导体、铝复合带外导体结构等,绝缘结构有纵孔聚乙烯绝缘、发泡聚乙烯绝缘、聚乙烯垫片小管绝缘、聚乙烯螺旋绝缘等。

### (七)泄漏通信电缆

是一种屏蔽不完善的电缆,当电信号沿电缆轴向传输时能向电缆径向周围发射泄漏电磁波信号,或者进行相反的过程。泄漏电缆主要用于坑道、隧道、井下、地铁沿线等电磁波难以覆盖区域的通信,列车、汽车、袖珍移动电台等移动通信,以及频域覆盖和区域监控保护等。泄漏通信电缆同轴结构的外导体是不封闭结构:在封闭外导体上开槽(八字槽式、纵向开槽式、打孔式)、金属丝螺旋缠绕、金属丝松编织等。

### (八)海底通信电缆

主要用于大陆和岛屿、岛屿写岛屿、跨海和洲际通信。它是一种供电电压较高(最高可达 $6.5\text{kV}$ )、宽频带的通信电缆,特性阻抗一般为 $50\Omega$ ,最高传输频率可达 $45\text{MHz}$ ,可通5500话路。有对称和同轴两种结构。浅海通信电缆由于敷设时要承受较大的拉力和为了防止舰船作业时造成的外力损伤,需要采用钢丝铠装,深海通信电缆为了减小结构尺寸,常采用钢丝内铠装结构。

## 三、通信电缆敷设和测试

### (一)通信电缆敷设

通信电缆的敷设分1)架空敷设,用吊线(钢绞线)和挂钩将电缆吊挂架空,架空线路要有防雷保护;2)管道敷设,电缆表面先涂凡士林或黄油,以减小摩擦,并起防腐作用,敷设时电缆的弯曲半径应不小于电缆盘的半径;3)直埋敷设,直埋深度不小于 $1\text{m}$ ,并保证电缆有足够的弯曲半径;4)水下敷设,应留有足够的富裕量。

通信电缆的接续质量对传输质量影响很大,电缆接续后,各制造长度要尽量保持原有电性能、力学性能、防潮能力、不能损伤绝缘层。

### (二)通信电缆测试

测试项目有电气性能测试和物理机械性能测试。试验形式有型式试验、抽样试验和例行试验。

主要电气性能测试项目包括:导体直流电阻、回路不平衡电阻测试、绝缘电阻、交直流耐压测试、工作电容

测试、电容耦合与电容不平衡测试、特性阻抗及衰减常数测试、串音衰减及串音防卫度测试、特性阻抗不均匀性测试、衰减温度系数测试、屏蔽系数测试、故障测试等。主要物理机械性能测试项目包括：抗张强度试验、断裂伸长率测试、空气热老化试验、耐环境应力开裂试验、结构尺寸检查等。

## 四、光纤光缆

### (一) 光纤光缆概述

光纤由纤芯、包层和被覆层构成，纤芯折射率比周围包层的折射率略高，光信号主要在纤芯中传输，包层为光信号提供反射边界并起机械保护作用，被覆层起增强保护作用。光缆由传输光信号的纤维光纤、承受拉力的抗张元件和外部保护层组成。

光波在光纤中的传输理论基础是射线光学(几何光学)和波动光学。射线光学可以较好地解释多模光纤的传输过程；波动光学将光作为电磁波、光纤作为光波导，从麦克斯韦方程出发，用电磁波传输的模式理论来解释光波在光纤中的传输过程。

衡量光纤传输质量的关键指标是损耗。光纤产生损耗的原因有：1) 吸收损耗：由固有光吸收、杂质吸收引起；2) 散射损耗：由固有散射、结构不完整散射引起；3) 辐射损耗：由弯曲损耗、耦合辐射引起。光纤中存在着一些低损耗窗口，开发和利用这些窗口可以提高光纤的传输质量。目前，最新研制的光纤产品在  $1.55\mu\text{m}$  处的损耗只有  $0.188\text{dB/km}$ 。

光纤中光的传输存在着色散现象，使传播常数随频率变化。它有三种类型：模式色散、材料色散和波导色散。光纤的色散引起传输脉冲的展宽，从而限制了通信容量。单模光纤不存在模间色散，且在一定波长下，材料色散和波导色散可以相互抵消，使色散大幅度降低；多模光纤中影响最大的是模间色散，可通过将光纤设计成渐变折射率型光纤，使模式色散达到最小。在实际应用中，常采用一些色散补偿技术，以减少色散的影响。

光纤应具有足够的抗拉强度和剪切强度，且在恶劣环境下不会因疲劳而破坏。光纤机械强度下降主要由光纤中的裂纹引起，光纤裂纹来自光纤预制棒中存在的固有裂纹和光纤制造过程产生的裂纹。

### (二) 光纤的结构与分类

通常光纤由裸光纤、一次被覆、二次被覆组成，裸光纤由纤芯和包层组成。按裸光纤纤芯折射率分布规律可分为：1) 阶跃型光纤：折射率在纤芯中均匀分布，但在纤芯和包层界面上发生突变；2) 渐变型光纤：折射率在纤芯中连续变化，分布通常呈抛物线型。按光纤传输的电磁波模式数量可分为单模光纤和多模光纤。

按组成裸光纤的材料可分四类，见表 2-12。

表 2-12 裸光纤的组成材料

裸光纤材料	组成和特点
石英系光纤	纤芯和包层由不同的石英制成，高纯度石英中因分别掺入不同的杂质( $\text{GeO}_2$ 、 $\text{P}_2\text{O}_5$ 、 $\text{B}_2\text{O}_3$ 、 $2\text{F}$ 等)而有不同的折射率；目前产量最大、性能最佳、在通信系统中应用最广泛
多组分玻璃光纤	以多种氧化物成分玻璃作为纤芯材料，较容易制成廉价的大芯径大数值孔径光纤，应用于中短距离光通信系统
聚合物包层光纤	由 $\text{SiO}_2$ 和折射率较小的聚合物(硅树脂、聚四氟乙烯)包层组成，包层材料折射率低，具有较大的芯径和较大的数值孔径；用于计算机网络和专用仪器设备



裸光纤材料	组成和特点
塑料光纤	由折射率高的透明塑料纤芯与折射率低的透明塑料包层组成,常用材料有聚甲基丙烯酸甲酯、聚苯乙烯等;特点是数值孔径较大、芯径大,柔韧性好、耐冲击、重量轻、易加工、省电、使用方便、使用寿命长、价格便宜(约为玻璃光纤的1/10),可用于工作环境恶劣的各种短距离通信系统,能大大降低整个系统的成本,并且由于近年提高了传输带域超过了同型玻璃光纤,传输损耗从3500降到20db/km,因此应用愈来愈广。近年来,中红外光纤、传感器用光纤、大芯径大数值孔径光纤、耐辐照光纤等也有较大的发展 <sup>①</sup>

① 秦大甲. 光纤光缆国外发展动态. 光纤与电缆及其应用技术, 199(2).

徐乃英. 通信用. 光纤光缆的最新发展动态. 光纤与电缆及其应用技术, 199(3). 徐乃英. 通信用光纤光缆的最新发展动态(续). 光纤与电缆及其应用技术, 199(4).

光纤被覆有一次被覆和二次被覆。一次被覆层是为了增加光纤强度,常用改性硅树脂、丙烯酸脂、环氧树脂等;二次被覆是为了减少光纤受到侧压力时产生的微弯曲和使用方便,常用尼龙、聚乙烯、聚酯类材料等。为了改善光纤的温度特性,常在一次被覆和二次被覆间增加一个缓冲层,或二次被覆采用松套结构。单心结构直接在一次被覆后进行二次被覆,或采用松套结构,多心结构可在一次被覆后,将多根光纤先组成光纤组再进行二次被覆。

### (三) 光缆的结构与设计

光纤是光通信的基本单元,实用传输线路需要将光纤制成光缆,光缆通常是由光纤单元、抗张加强芯、金属铠装层和外护套组成。设计光缆时要做到以下几点:1)为光纤提供足够的机械保护;2)传输特性不恶化;3)合理设计结构尺寸,降低重量;4)具有柔韧性和一定的弯曲半径;5)连接、敷设方便,维护容易。

常见光缆基本结构见表2-13。

表2-13 光缆基本结构

基本结构	特点
层绞式光缆	由多根光纤分层绞合而成,适合于制作芯数较少的光缆
骨架式光缆	用骨架保护光纤,有一槽一芯和一槽多芯结构,光纤在槽内有一定的活动余地
单元式光缆	把几根光纤以层绞或骨架式结构制成光缆单元(每个单元芯数小于10),然后把若干光缆单元绞合成光缆,可制作成包含几百根光纤的光缆
中心管式光缆	将若干组光缆单元放入塑料绝缘管后填充石油膏等胶状物以相对固定,最后铠装成缆
带状光缆	先将多根光纤制成光纤带,然后把多组光纤带绞合成光缆或多组光纤带置于骨架中成缆,具有光纤分布密度高和便于接续等优点,带状光缆与骨架式结构相结合,可生产4000芯以上的大芯数光缆,这将成为未来光缆的主要品种
综合光缆	由光纤与通信电缆、电力电缆或电气装备线组成

光缆抗张加强芯通常用高强度钢丝,在有强电干扰或对光缆重量有限的情况下可采用多股芳纶丝或纤维增强塑料,金属铠装层可采用钢丝铠装、钢带铠装、皱纹钢管、铝管等,外护套可采用聚乙烯等材料,也可采用芳纶加强护套等。

## (四) 光缆的分类

光缆可用于广域网(WAN,包括公共通信网和专用通信网)、通信设备、信号测量、光电技术仪器仪表等。光缆主要品种见表2-14。

## (五) 光缆的敷设与测试

光缆在城市内一般敷设在建造好的专门沟道或管道中,在管道中敷设时可采用润滑材料以减少摩擦力,在沟道中敷设时需在沟井口采用易弯钢管保护,在野外通常将带有铠装外护套的光缆直接埋于1~2m深的土壤中;在特殊条件下,可将光缆吊挂在电线杆或建筑物墙上。光缆敷设时,应尽可能减少光缆的弯曲和扭转。

表2-14 光缆主要品种<sup>①~⑤</sup>

光缆品种	特点与应用
直埋光缆	有防水层和铠装层,用于长途光通信干线,是目前主要生产品种
管道光缆	采用铝带复合护层,用于市内光通信干线
架空光缆	有轻型铠装,能防外力损伤,用于区域通信线路
海底光缆	铠装护套要求高,能承受敷设、打捞时的张力和海底高压,将替代海底通信电缆
水下光缆	具有良好的径向和纵向密封性;用于过水光通信线路软光缆具有良好的弯曲性能和足够的抗拉伸能力;用于非固定场合室内光缆具有阻燃性能;用于大楼内局域网中
设备内光缆	结构轻巧,芯径较大,用于设备内光路连接
光电综合通信光缆	由光纤与同轴通信与电缆组成,用于区域通信
航空航天和军用光缆	主要有飞机用光缆、航天飞行器用光缆、舰船用光缆、水下遥控用光缆、野战用光缆、制导用光缆、导弹火箭用光缆、核试验用光缆等
电力系统用光缆	1) 光纤复合架空地线(OPGW)由铝管保护的光纤和电力线路架空线(铝包钢线或铝合金线组成) 2) 架空地线卷绕光缆(GWWOP)是一种卷绕在现有架空地线上的耐热高强度光缆
光电复合缆	已开发的品种有1) 深海无人运载工具用光电复合缆、2) 深海无人运载工具用脐带光电复合缆、3) 遥控深潜器光电复合缆、4) 遥控深潜器用脐带光电复合缆、5) 通用拖曳光电复合缆、6) 导弹发射用脐带光电复合缆等

① 见表2-12注。

② 秦大甲,国外陆上军用光缆发展动态,光纤与电缆及其应用技术,1997(1)。

③ 秦大甲,国外海洋军用光缆发展动态,光纤与电缆及其应用技术,1997(2)。

④ 秦大甲,国外航空航天军用光缆发展动态,光纤与电缆及其应用技术,1997(3)。

⑤ 王福锦等。无金属自承式光缆及其设计。光子电缆及其应用技术,1998(3)。

光缆敷设中的关键是光纤光缆的接续,它对光纤损耗的影响很大,引起接续损耗的主要原因有:两根光纤数值孔径和芯径不同、端面反射、端面质量以及各种机械偏移(纵向偏移、横向偏移、角度偏移),因此光缆接续中,端面处理、中心轴对准、光纤熔接技术至关重要。

光缆的试验内容包括光纤尺寸检测、光纤光学性能测量、光纤传输特性测量、光缆力学性能测量、光环境性能测量等。光纤尺寸检测方法和标准见GB8402、IEC60793-1-2(1995)和TU-T/G650,光纤的光学性能和

传输特性测量方法和标准见 GB8401、IEC60793-1-4(1995)和 ITU-T/G650,光缆的力学性能试验方法和标准见 GB7425、IEC60793-1-3(1995),光缆的环境性能试验方法和标准见 GB8405 和 GB3048.10、IEC60793-1-5(1995)。

## 第三章 仪器仪表及其检测

### 第一节 电工仪表的基本知识

#### 一、电工仪表的分类

电工仪表是用来测量电流、电压、电阻、电能、功率、相位角、频率等电气参数的仪表。其分类见表 3-1。

表 3-1 电工仪表的分类

按工作原理分	磁电式 电磁式 电动式 感应式 铁磁电动式 整流式 静电式 热电式 电子式等
按测量对象分	电流表 电压表 电度表 功率表 欧姆表 高阻表(兆欧表) 相位表 频率表 万用表 电桥
按测量电流种类分	直流电表 交流电表 交直流两用电表
按使用方法分	固定(板式)仪表 便携式(实验室用)仪表

农村常用的电工仪表有电流表、电压表、电度表、功率表、钳形电表、兆欧表、万用表等。

#### 二、电工仪表的准确度等级

仪表的准确度等级是指仪表在规定条件下工作时,可能产生的最大基本误差占满刻度的百分数。仪表的准确度等级是用来表示基本误差的大小的。仪表的准确度越高,其基本误差就越小。各级仪表的准确度等级和基本误差见表 3-2。




表 3-2 仪表的准确度等级和基本误差


















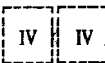



准确度等级	0.1	0.2	0.5	1.0	1.5	2.5	5.0
基本误差(%)	±0.1	±0.2	±0.5	±1.0	±1.5	±2.5	±5.0

## 三、电工仪表的表面符号及其意义(见表 3-3)

表 3-3 常用电测量指示仪表和附件的符号

A. 测量单位的符号		名 称	符 号
名 称	符 号	太 欧	$T\Omega$
千 安	kA	兆 欧	$M\Omega$
安 培	A	千 欧	$K\Omega$
毫 安	mA	欧 姆	$\Omega$
微 安	$\mu A$	毫 欧	$m\Omega$
千 伏	kV	微欧	$\mu\Omega$
伏 特	V	相位角	$\varphi$
毫 伏	mV	功率因数	$\cos\varphi$
微 伏	$\mu V$	无功功率因数	$\sin\varphi$
兆 瓦	MW	库伦	C
千 瓦	kW	毫韦伯	mWb
瓦 特	W	毫 特	mT
兆 乏	Mvar	微法	$\mu F$
千 乏	kvar	皮 法	pF
乏	var	亨	H
兆 赫	MHz	毫 亨	mH
千 赫	kHz	微 亨	$\mu H$
赫 兹	Hz	摄氏温度	$^{\circ}C$

B. 仪表工作原理的图形符号		名称	符号
名称	符号		
磁电系仪表		整流系仪表(带半导体整流器和磁电系测量机构)	
磁电系比率表			
电磁系仪表		热电系仪表(带接触式热变换器和磁电系测量机构)	
电磁系比率表			
电动系仪表		C. 电流种类的符号	
电动系比率表		名称	符号
铁磁电动系仪表		直流	
铁磁电动系比率表		交流(单相)	
感应系仪表		直流和交流两用	
静电系仪表		具有单元件的三相平衡负载交流	
电子系仪表		D. 准确度等级的符号	
		名称	符号
		以标度尺长度百分数表示的准确度等级, 例如 1.5 级	1.5
		以标度尺量限百分数表示的准确度等级, 例如 1.5 级	

名称	符号	名称	符号
以指示值的百分数表示的准确度等级,例如 1.5 级		公共端钮(多量限仪表和复用电表)	
E. 工作位置的符号		接地用的端钮(螺钉或螺杆)	
标度尺位置为垂直的		与屏蔽相连接的端钮	
标度尺位置为水平的		与外壳相连接的端钮	
标度尺位置与水平面倾斜成一角度,例如 60°		调零器	
F. 绝缘强度的符号		H. 按外界条件分组的符号	
名称	符号	名称	符号
不进行绝缘强度试验		I 级防外磁场(例如磁电系)	
绝缘强度试验电压为 2kV		I 级防外电场(例如静电系)	
G. 端钮、调零器的符号		II 级防外磁场及电场	
负端钮		III 级防外磁场及电场	
正端钮		IV 级防外磁场及电场	
A 组仪表		C 组仪表	
B 组仪表			

#### 四、常用仪表的结构及工作原理(见表 3-4)





续 3-4

## 第二节 常用电气测量仪表

### 一、电测仪表

#### (一) 模拟仪表

模拟仪表(电测量指示仪表)的特点是将被测电量转换为仪表可动部分的机械偏转角,并通过指示器示出被测量的大小。模拟指示仪表分类和应用范围见表 3-5。

#### (二) 数字电压表

数字电压表(DVM)的基本功能部件是模数转换器(A/D转换器)和数字显示器。通常按 A/D 转换器结构特点进行分类。主要技术指标可参阅专业标准 ZBY095—82《直流数字电压表技术条件》。典型数字电压表的工作原理及分类见表 3-6。

### 二、电位差计和电桥

#### (一) 电位差计

电位差计和电桥是将被测量与其标准量进行对比的比较式仪表,主要用来精密测量电压、电路参数以及与它们具有函数关系的电量和非电量。

1. 直流电位差计 可直接测量直流电动势或电压,也可间接测量电流、电阻、功率。它具有测量结果稳定和不改变被测对象工作状态的优点。准确度一般为  $10^{-4} \sim 10^{-5}$ ,最高可达  $10^{-7}$ 数量级,主要分为电阻比例式和直流电流比较仪式两种。

2. 交流电位差计(交流补偿器) 该仪器必须具有调节已知电压幅值和相位的装置,它分为直角坐标式和极坐标式两种类型。

#### (二) 无源电桥

电桥的原理和应用范围与电位差计类似。

1. 直流电桥 是测量直流电阻的仪器。通常分为电阻比例臂电桥(包括单电桥和双电桥)和直流电流比较仪式电桥。直流单电桥特点:线路简单,适宜测量  $10 \sim 10^6 \Omega$  的电阻;直流双电桥特点:引线电阻和接线电阻对其测量影响小,适宜测量  $10^{-6} \sim 10^4 \Omega$  的电阻;直流电流比较仪式电桥特点:分辨力、线性和准确度可达  $10^{-7}$ 数量级,用于量子霍尔电阻和直流精密的电测量。

2. 交流电桥 交流电桥通常分为阻抗比例臂电桥和变压器比例臂电桥两大类。多用于精密测量交流电阻、时间常数、电容、损耗因数、自感、互感、品质因数等参数。





续 3-6

### (三)有源电桥

是一种新型电桥,其桥臂包含有源元件和无源元件,它改善了电桥的性能,降低了对屏蔽和防护的要求。该电桥多制成自动数字电桥和微机化电桥。

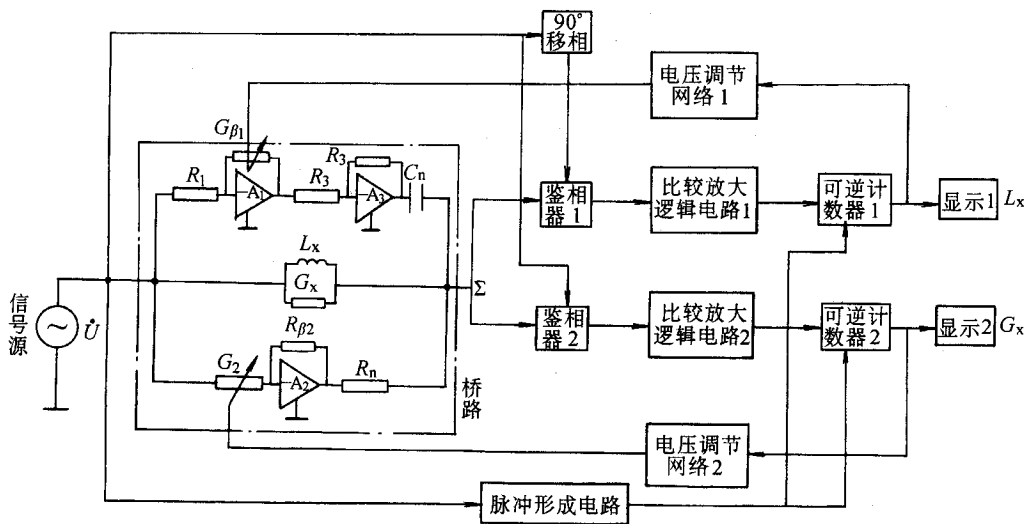


图 3-1 数字式电感电桥原理

1. 数字式电桥 数字式电感电桥原理如图 3-1 所示,点划框中为桥路部分,中间支路为被测电感  $L_x$  和电导  $G_x$ ,上面支路为反相运算放大器  $A_1$ 、反相器  $A_3$  和标准电容  $C_n$ ,下面支路为反相运算放大器  $A_2$  与标准电阻  $R_n$ 。当电桥尚未达到平衡时,失衡信号的实部分量和虚部分量被同时送至鉴相器 1 与 2。由于鉴相参考信号相位差  $90^\circ$ ,使得上支路检出虚部分量,下支路检出实部分量。被检出的信号经比较放大和逻辑电路,分别控制可逆计数器形成电路输出的脉冲进行计数。若  $L_x$  或  $G_x$  处于欠补偿,则可逆计数器正向计数。反之,反向计数。可逆计数器 1 和 2 通过电压调节网络 1 和 2 分别控制电导  $C_{\beta 1}$  和  $C_2$ ,使电桥平衡,这时有  $\Sigma_1 = 0$ ,由此得

$$L_x = R_1 G_{\beta 1} \frac{1}{\omega_2 C_n}$$

$$G_x = G_2 R_{\beta 2} \frac{1}{R_n}$$

其值分别由显示器 1 和 2 用数字形式显示出来。数字式电容电桥原理与其相同。

2. 微机化电桥 内含专用微处理器,在软件支持下能自动完成全部测量工作。其优点除具有数据处理、自校准、自修正和自诊断功能外,还带有 IEEE-488 仪器通用标准接口,用以把电桥与其他仪器设备以及计算机连接在一起,构成自动测试系统。

(1) 阻抗-电压变换式电桥 原理见图 3-2 图中晶体振荡器用来产生高频方波信号。晶体振荡器信号经分频,用来提供微处理器的时钟、自由轴坐标参考线和测试用的各种信号。正弦测试信号  $\dot{U}$  经限流电阻  $R_0$  加到被测阻抗  $Z_x$  上。点划线框中是一个简化的有源半桥,它输出相量电压  $\dot{U}_1 = c + jd$  和  $\dot{U}_2 = d + jb$ ,他们经选择开关  $S$  输入到相敏检波器。相敏检波器的参考信号来自自由轴坐标发生器,后者在微处理器控制下产生任意方向的、准确正交的直角坐标系。 $S$  先后接通  $\dot{U}_1$  和  $\dot{U}_2$ ,从而得到两者在坐标轴上的四个投影值  $a, b, c$  和  $d$ ,再由双斜 A/D 转换器转换成相应的数字量送到 RAM 中暂存。最后,微处理器根据由键盘键入的信息,按下式求得被测阻抗,即

$$Z_x = -R_n \frac{\dot{U}_1}{\dot{U}} = R_n \left( \frac{ac + bd}{a^2 + b^2} + j \frac{ad - bc}{a^2 + b^2} \right)$$

如被测电感线圈的阻抗为  $Z_x = R_x + j\omega L_x$  则有

$$R_x = -R_n \frac{ac + bd}{a^2 + b^2}$$

$$L_x = -\frac{R_n}{\omega} \frac{ad - bc}{a^2 + b^2}$$

$$Q_x = -\frac{ad - bc}{ac + bd}$$

被测参数由显示器给出。

(2) 双数字交流电源平衡式电桥 前述阻抗 - 电压变换式电桥目前最高准确度仅为 0.02% , 而双数字交流电源平衡式电桥 , 其准确度可达到  $1.1 \times 10^{-6}$  。其原理如图 3-3 所示。它与普通阻抗电桥不同之处 , 在于它的比例臂是由两个数字合成正弦电压发生器 I 和 II 构成。电桥的平衡检测器包括相敏检波器和 A/D 转换器两部分。

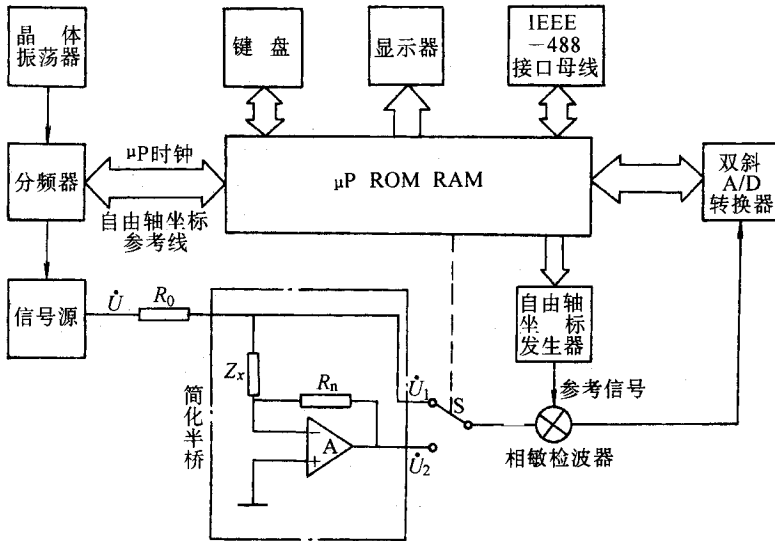


图 3-2 阻抗 - 电压变换式电桥原理框图

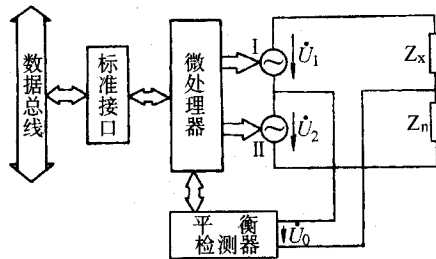


图 3-3 双数字交流电源平衡式电桥原理图

当电桥尚未平衡时 , 平衡检测器检测出失衡电压的实部与虚部并送至微处理器 , 再由微处理器计算出实现平衡时所需的相量电压  $\dot{U}_2$  , 然后通过调节正弦电压发生器 II 使电桥达到平衡 :

$$Z_x = \frac{U_1}{U_2} Z_n$$

$Z_x$  的虚部与实部分量由微处理顺计算得到。

## 三、信号发生器和标准源

### (一) 信号发生器

信号发生器是产生电信号的仪器,主要要求是输出信号的波形和频率。通用信号发生器的分类见表 3-7。

### (二) 标准源

标准源也是产生电信号的仪器,但以输出电信号幅值为主要要求,标准源的分类见表 3-8。

表 3-7 通用信号发生器分类

分 类		范 围	用 途
正弦信号 发生器	超低频型	$1 \times 10^{-3} \sim 1 \times 10^4 \text{Hz}$ 一般兼有方波、锯齿波等波形	在各种无线电设备和仪器仪表测试工作中作为信号源
	低频型		
函数信号 发生器	高频型	$10 \sim 1 \times 10^6 \text{Hz}$	各种无线电设备和仪器仪表测试
	超高频型	$10^3 \sim 3 \times 10^4 \text{kHz}$ 有时兼有调幅波输出	
脉冲信号 发生器	微波型	$30 \sim 300 \text{MHz}$ 一般兼有调幅和(或)调频功能	逻辑电路、换流器调试、大功率晶体管测试等
	通用型	$> 300 \text{MHz}$ 一般兼有调幅和(或)调频功能	
任意波形 发生器	函数信号发生器	输出波形:正弦波、方波、三角波、锯齿波、矩形脉冲波、尖脉冲波等多种波形 频率范围: $1 \sim 1 \times 10^8 \text{Hz}$	用于数字通信等领域
	任意波形发生器	输出波形:除函数信号发生器的输出波形外,还可以输出用户定义的任意波形以及群脉冲等 频率范围: $1 \sim 1 \times 10^5 \text{Hz}$	
编码型	通用型	$1 \sim 1 \times 10^8 \text{Hz}$ ,脉冲前、后沿、脉宽延时可变,一般可输出双脉冲	用于数字通信等领域
	编码型	$0.001 \sim 1 \times 10^8 \text{Hz}$ ,输出脉冲按一定的规律编码	



表 3-8 标准源分类

分 类		输出分段及频率范围	准确度等级	用 途
直流标准源	直流标准电压源	0 ~ 0.1 ~ 1000V	0.0005 0.001 0.002 0.005 0.01 0.02 0.05 0.1 级	作为标准仪器校准直流指针式电表和数字电表,在自动测试系统中作为标准信号源
	直流标准电流源	0 ~ $1 \times 10^{-4}$ ~ 10A	0.01 0.02 0.05 0.0 0.2 级	
交流标准源	交流标准电压源	0 ~ 100mV 至 1000V 20Hz <sub>z</sub> 至 1MHz <sub>z</sub>	0.005 0.01 0.02 0.05 , 0.1 0.2 0.5 级	作为标准仪器,校准交流指针式电表和数字电表,在自动测试系统中作为正弦波交流标准信号源
	交流标准电流源	0 ~ 100 $\mu$ A 至 10A 20Hz <sub>z</sub> 至 1MHz <sub>z</sub>	0.02 0.05 0.1 0.2 0.5 级	
交直流标准源		交直流电压、电流指标同前 电阻 :1 $\Omega$ ,10 $\Omega$ ,100 $\Omega$ ,... ,1M $\Omega$ 电阻准确度等级 0.0005 ~ 0.1 级		主要用于校准指针式和数字式万用表

注 按控制方式不同,每种标准源都可分为手动和程控两种,程控方式一般有自校准、输出量扫描功能,并带有 CP-IB 接口。标准电流源在 1A 及以上量程往往需配用跨导放大器。

## 四、计数器和示波器

### (一)电子计数器

由计数电路组成,用于脉冲计数。通过被测信号频率或周期与已知标准频率(如晶体振荡器)相比较的方法,可用于测频、测周期、测时间间隔等,具有准确度高、速度快、自动化程度高、显示直观、操作方便等特点。

电子计数器按用途分有:1)测量用计数器包括通用计数器、频率计数器、时间计数器等;2)控制用计数器主要是具有特种功能的特种计数器,包括可逆计数器、预置计数器、序列计数器、差值计数器等。

1.通用计数器 许多产品带 GP-IB 接口,有数据压缩、自动触发功能。主要性能为

频率测量范围:一般为 DC ~ 100MHz,扩展后可达 1GHz;

频率分辨率:每秒闸门 1Hz;

灵敏度:约 10 ~ 20mV;

单次时间间隔分辨率:1ns;

平均时间间隔分辨率:10ps。

2.高速计数器 可高速测量,便于直读测量结果。目前最高计数频率可达 15001MHz。

3.倒数计数器 也可高速测量,其特点是先测周期,然后自动计算并显示被测频率。

4.集成化电子计数器 采用大规模集成电路,实现电子计数器小型化、低成本。

### (二)电子示波器

是综合性电信号特性测试仪,可测信号的幅度、频率、周期和相位,还可测信号参数,估计信号的非线性失真,对电信号进行时域分析等。特别是可用于测试脉冲信号。配合各种传感器,它可广泛用于测量各种非电量。

示波器还是一种良好的信号比较仪,能够显示任意两个互相关联的电量关系,可用作直角坐标或极坐标

显示器,可用它组成自动或半自动测试仪器或测试系统,例如晶体管视特性图示仪、阻抗图示仪、频谱分析仪、自动网络分析仪、逻辑分析仪等。

电子示波器的品种及其特点见表 3-9。

表 3-9 常用电子示波器的原理特点及框图

	特 点	应 用
通 用 示 波 器	采用单束示波管,电子射线的垂直偏转距离正比于信号瞬时值,水平偏转距离正比于时间	用于定性和定量观测一般时域信号的波形
双 踪 示 波 器	有两个垂直通道,由电子开关控制,轮流接通 A 门和 B 门在荧光屏上显示两路波形	用来比较被测系统的输出和输入信号,研究波形变换的各级信号,观察脉冲电路各点波形、信号通过网络时的波形畸变,测量相移等
双扫描 示 波 器	有两个独立的触发电路和扫描电路,两路扫描速度可以相差很多倍	特别适用于在观测脉冲序列的同时,仔细观察其中一个或部分脉冲的细节
数字存储 示 波 器	由控制、取样存储和读出显示三部分组成。具有进行数据处理、存储波形、捕捉和显示瞬态单次信号的功能。在观察触发点之前的信号,具有模拟示波器无法相比的重复性和准确度,并具有计算机 I/O 口和硬拷贝功能	长期存储波形、进行负延迟、观测单次过程和缓慢变化的信号、多种显示方式、数据处理及进行功能扩展等
取 样 示 波 器	增设了取样电路。利用非实时取样技术将高频、快速的重复信号变换为低频、慢速的信号,用通用示波器显示方法将取样变换后的信号显示出来,解决了通用示波器的频带受限问题,频带可达 50GHz	用于高频重复信号的采样

### (三) 频谱分析仪

用于分析电信号的频率分量(频率分布),即频域分析。频谱分析仪是频域分析不可缺少的仪器。

1. 模拟式频谱仪 以模拟滤波器为基础,经过放大的信号被中心频率不同的大量窄带选频滤波器所分离,从而得出频谱图。由于只用了一个检波器,因此是非实时分析。

外差式频谱仪中频固定,采用外差方法选择所需频率分量,通过扫频振荡器达到选频目的。因此可省去大量选频滤波器。该频谱仪也是非实时分析。

2. 数字式频谱仪 1) 数字滤波法 以数字滤波器为基础,中心频率由控制器与时基电路使之顺序改变 2) 傅里叶分析法 以快速傅里叶变换为基础,用电子计算机按快速傅里叶变换(FFT)计算方法求出  $u(t)$  的频谱,该频谱仪可得到被测信号的幅度和相位信息,且通常做成多通道形式,这样不但可以同时分析多个信号的频谱,而且可测得各信号间的关系,例如相关函数、

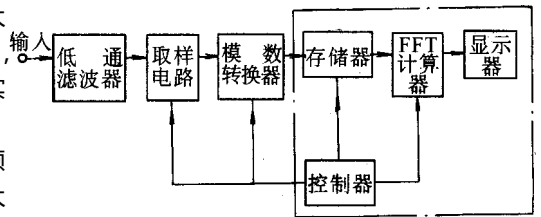


图 3-4 快速傅里叶分析仪框图

交叉频谱等。图 3-4 为快速傅里叶分析仪框图,图中点划线框内各单元的功能可用计算机和相应软件来实现,即构成了虚拟频谱分析仪。

## 五、常用电能仪表

### (一) 电能仪表

电能仪表是对交直流电能及对电能进行管理的仪表。目前感应式原理的电能表在安装式电能表中占主导地位。电子电能表具有低功耗、高准确度、节约金属材料、防窃电、寿命较长等优点,还可集多费率、预付费、最大需量、电力定量等多种功能于一表。与微处理器结合还能实现电能计量的智能化与联网管理,因此目前正逐步取代感应式电能表。电能仪表可以按表 3-10 进行分类。

### (二) 直流电能仪表

是计量任一时间内直流电能的仪表。目前常用的有电动式和电子式直流电能表,主要用于金属冶炼、电力拖动中的直流电能的计量值。

1. 电动式直流电能表 一般这种原理的直流电能表准确度不高。

2. 电子式直流电能表 为了改善直流电能表的准确度、温度特性、抗干扰能力,通常使用电子式直流电能表。其功率转换部分采用霍尔元件乘法器和时分分割乘法器。

表 3-10 电能仪表的分类

分类方式	电能仪表的种类
按测量对象	直流电能表、交流电能表
按工作原理	感应式、电动式、热电式、电子式、霍尔效应式等
按用途	安装式、标准式、特殊用途仪表、电能管理仪表及系统等

### (三) 感应式电能表

分类与应用: 1. 单相电能表 有①单相有功电能表,用于计量单向有功电能,②单相无功电能表,用于计量单向无功电能; 2) 三相电能表 有①三相有功电能表,又有三相四线有功电能表(三元件)和三相三线有功电能表(二元件)两类,用于计量三相有功电能,②三相无功电能表,用于计量三相无功电能。

当负载电流很大时,感应式电能表需与互感器配合使用。

### (四) 电子式电能表

核心部分是乘法器(功率转换),目前应用较多的有:变跨导乘法器、时分分割乘法器、霍尔效应乘法器、数字乘法器和模拟数字混合乘法器。

电子式电能表原理框图见图 3-5。电压输入级采用电阻分压器或电压互感器,电流输入级采用分流器或电流互感器,功率转换器主要是实现电压电流相乘得出与被测功率成正比的模拟量,频率转换主要是采用  $U-f$  转换器或  $I-f$  转换器,把模拟量转换成与功率成正比的脉冲量,计数部分利用机械计数器或电子计数器,完成功率对时间的积分并显示。

### (五) 用热电比较仪测量交流有功功率

热电比较仪原理见图 3-6。图中桥式线路的上桥臂由两个电阻  $R$  组成,下桥臂由两个热偶加热丝  $r_1$ 、 $r_2$  组成。热电偶的热电势与加热电流平方成正比,并且特性完全一致。两热电偶对接时,热电动势差值正比于功率,用记忆电位差计记忆两热电动势的差值。以直流量代替交流量接入比较仪,调整直流量,使热电动势差值与接入交流量时相等,用电位差计测此直流功率即得交流功率值。

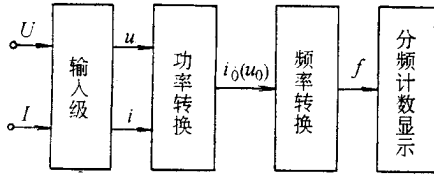


图 3-5 电子式电能表原理框图

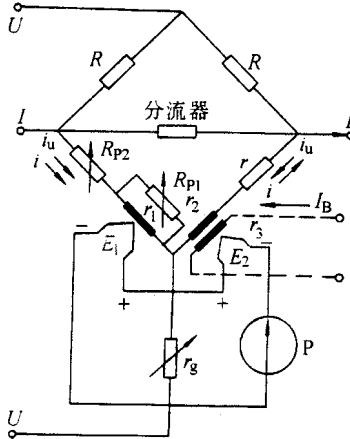


图 3-6 热电比较仪原理图

$U$ —电压端钮  $I$ —电流端钮  $R$ —分流电阻  $i_u$ —电压分路电流  $j$ —电流分路电流  
 $E_1$ 、 $E_2$ —热电偶输出电动势  $r_1$ 、 $r_2$ —串于桥臂的热电偶加热丝电阻  $r_3$ —补差加  
 热丝  $I$ —补差电流  $r$ — $r_2$ —桥臂附加电阻  $r_g$ —电压线路附加  
 电阻  $P$ —检流计

### (六) 电量测量仪表的校验装置

电量测量仪表校组装置是用来校验电测仪表误差的装置,它能向被校仪表提供电信号,并能准确地测量该信号的所有设备的组合,它也可能是一台单独的仪表。

## 第三节 电流表与电压表

### 一、电流表

#### (一) 直、交流电流表

1. 直流电流表 直流电流表多为磁电式仪表。磁电式表头直接串入电路,因动圈导线很细,负载电流通过游丝,所以表头只允许通过小电流,一般为几十微安到几十毫安。测量较大电流时,须将测量机构并联分流器来扩大电流表量程,然后再串入被测电路中。分流器有内附和外附两种形式,如图 3-7 所示。测量电流在 50A 以下采用内附分流器,大于 50A 采用外附分流器。

为了减小接触电阻对分流的影响,外附分流器采用四个接头,大的  $C_1$ 、 $C_2$  称为电流接头,串接于被测的

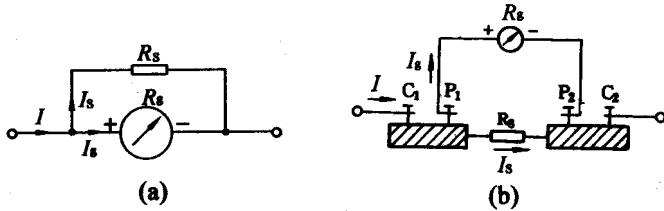


图 3-7 分流器

(a)内附分流器 (b)外附分流器

大电流回路中,小的  $P_1$ 、 $P_2$  称为电位接头,通过外附定值导线与测量机构并联。两者不可接错。

分流电阻的计算:设表头灵敏度(满偏电流)为  $I_g$ ,表头内阻为  $R_g$ ,需要扩大量程至电流  $I$ ,计算分流电阻  $R$ (图 3-7a)。因

$$R_a I_s = R_g I_g$$

故

$$\begin{aligned} R_a &= \frac{I_g}{I - I_g} R_g = \frac{I_g}{n - 1} R_g \\ &= \frac{1}{\frac{I}{I_g} - 1} R_g = \frac{1}{n - 1} R_g \end{aligned}$$

式中  $n = I/I_g$

2. 交流电流表 交流电流表多为电磁式仪表,固定线圈可以直接通入被测电流,扩大量程时,可采用加粗线径,减少匝数的办法。若要测更大电流,一般采用测量用电流互感器,将大电流变为小电流(5A以下)再进行测量。

电磁式电流表有时制成双量程,如 2.5/5A。这种表的线圈用两根同样的铜线并绕,此二线圈串联时,量程为 2.5A,并联时量程为 5A。图 3-8a 是这类表的线路,四个接线柱如图 3-8b 和图 3-8c 所示,利用线圈串联或并联可以改换表的量程。

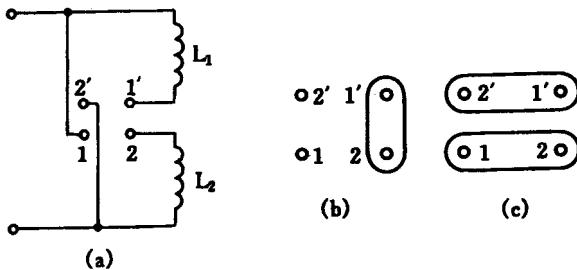


图 3-8 双量程电磁式电流的线路及改换量程示意图

(a)电路的线路图 (b)(c)接线柱示意图

### 3. 使用方法

(1) 合理选择量程:电流表用来测量电路中的电流,因表的量程不同,有千安表、安培表、毫安表和微安表。在使用前,要先估算被测电流的大小,合理选择表的量程。如事先难以估计,应尽量选用大量程作初步测试,然后根据读数,选用适当量程进行实际测量。

(2) 串联:测量电流时,电流表必须串联在电路中。

(3) 注意极性:测量直流电流时,要注意正、负极性的接法。直流表的接线柱旁标有“+”、“-”符号,电流从“+”流进,表针正向偏转。反之,表针反向偏转,不能读数,且易损坏指针。

### 4. 接线方式

(1) 直流电流表测量接线如图 3-9 所示。

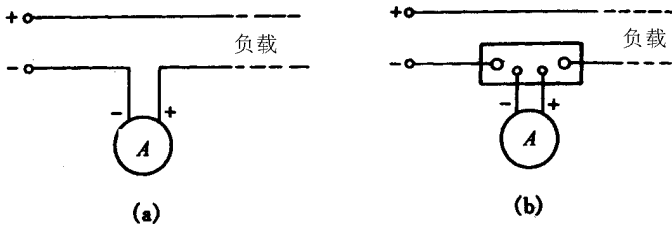


图 3-9 直流电流表的测量接线

(a) 电流表直接接入电路 (b) 电流表经分流器接入电路

(2) 交流电流表的测量接线如图 3-10 所示。

(3) 测三相电流的接线如图 3-11 所示。

## (二) 钳形电流表

钳形电流表由电流互感器、磁电式电流表、整流器和分流器等组成。其外形如图 3-12 所示。电流互感器的铁芯可以开合, 被测量的电流导线作为互感器的原边绕组。

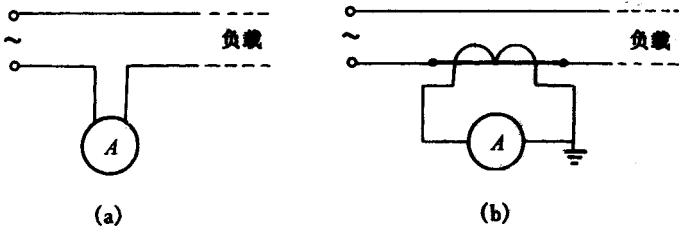


图 3-10 交流电流表的测量接线

(a) 交流电流表直接接入电路 (b) 交流电流表经电流互感器接入电路

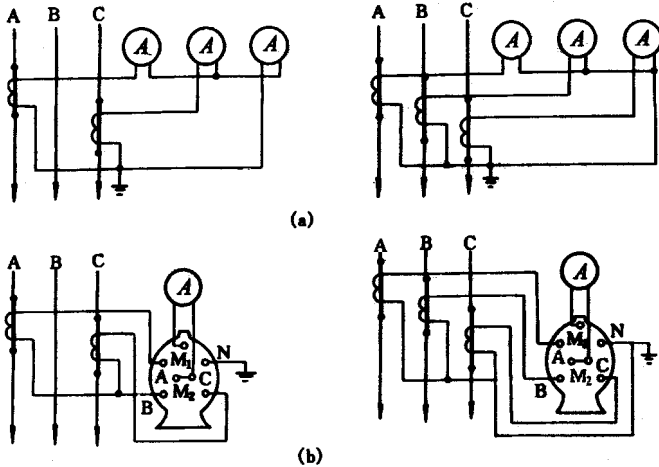


图 3-11 测三相电流的接线

(a) 用三只电流表测三相电流的接线

(b) 用一只电流表与电流转换开关连接测三相电流的接线

1. 用途 钳形电流表用于在不切断电路而进行测量电流的场合。

2. 使用注意事项

(1) 正确选择类别。根据被测对象的不同, 选择不同型号的钳形表。

(2) 正确选择表的量程。测量前应先估量被测电流的大小, 将转换开关拨到正确的量程。或由大量程到小量程试测, 直到转换开关拨到适当位置为止。在改换量程时, 应在不带电情况下进行, 以免损坏仪表。

(3) 测量时,应使被测导线放在钳口的中央,以免发生误差。

(4) 每次测量后,要把调节电流量程的转换开关放在最高档位,防止下次使用时,因未经选择量程就进行测量而损坏仪表。

(5) 测量 5A 以下电流时,为了测量的准确性,在条件允许的情况下,可将被测量导线多绕几匝放进钳口进行测量。将读取的电流值,除以匝数,即得实际电流。

(6) 不得测量无绝缘的导线。

(7) 测量中,操作人员应注意与带电部位的安全距离,以防触电或发生短路。对高压设备不能直接使用,必须使用相应绝缘等级的绝缘杆辅助,才能进行测量。

(8) 钳形表的钳口必须保持清洁、干燥。

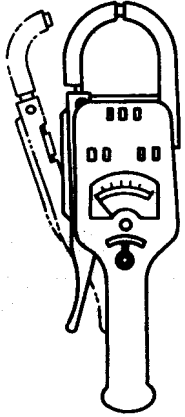


图 3-12 钳形电流表

## 二、电压表

### (一) 直流电压表

直流电压表是用电流表串联附加电阻,将表盘以电压刻度而组成的测量仪表。

若用表头直接测电压,由于表头灵敏度限制,允许通过表头的电流很小,表头内阻又很小,只能测量很小的电压,一般只能做成 mV 表。扩大量程的方法是在表头串联一个较大的电阻,称为附加电阻。

附加电阻的大小由表头灵敏度(电流的程)和欲扩大的程确定。设表头的灵敏度为  $I_g$ 、内阻为  $R_g$ ,欲扩大到电压表的程为  $V$ ,所需串联的附加电阻为  $R_m$ ,因

$$V = I_g (R_g + R_m)$$

$$R_m = \frac{V}{I_g} + R_g$$

附加电阻一般是内附式,当电压很高时也有外附式。接线如图 3-13 所示。

### (二) 交流电压表

交流电压表由交流电流表串联附加电阻组成。但所用交流电流表中,线圈的匝数要多,导线要细。在高电压测量时,用电压互感器来扩大电压表的程。其接线如图 3-14 所示。

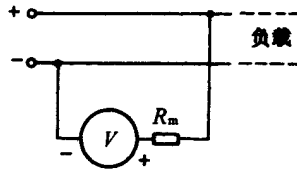


图 3-13 直流电压表经分压器接入电路

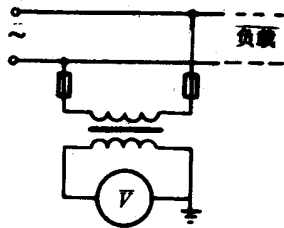


图 3-14 交流电压表经电压互感器接入电路

测量三相交流电压的接线常用两种方法:一种测三相大电流,用电压互感器和三只电压表测量(如图 3-15a),另一种电流相对较小,可用一只电压表与电压转换开关配合进行测量,如图 3-15b 所示。

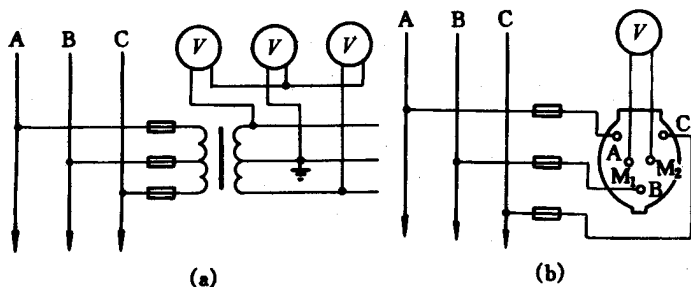


图 3-15 测三相交流电压的接线

(a) 用三只电压表测三相电压的接线

(b) 用一只电压表与电压转换开关连接测三相电压的接线

### (三) 使用方法

使用电压表应注意以下几个方面：

1. 注意极性 测量直流电压时，正、负极性必须正确。接线时，电压表的“+”极接被测电压的高电位，“-”极接低电位。
2. 选择适当量程 正确估量被测量的数值范围，选择适当量程的仪表，以被测量处于仪表最大量程的三分之二左右为准确。
3. 高压交流测量 测量高压交流时，需采用电压互感器，电压表的量程应与互感器二次额定电压相符合，一般电压为 100V。

## 第四节 万用表与功率表

### 一、万用表

#### (一) 万用表的用途、结构和工作原理

万用表是电工经常使用的多用途测量仪表。普通万用表可以测量交流电压、直流电压、直流电流和电阻，有的还可以测量交流电流、电感、电容和音频电平。万用表性能的好坏主要以测量电压时每伏若干欧来衡量。一般为  $1000 \sim 20000 \Omega/V$ ，此值越大，该万用表越灵敏。

1. 万用表测量直流电流的线路 如图 3-16 所示， $\mu A$  为万用表的磁电系微安表头， $R_1$ 、 $R_2$ 、 $R_3$ 、 $R_4$  是为扩大量程而并联的分流电阻， $S$  为转换开关，“+”、“-”为测试棒插孔。当转换开关  $S$  由位置 1 依次置于 2、3、4 时，分流电阻则逐渐减小，而量程范围却不断扩大，从而可以实现不同范围的直流电流的测量。

2. 万用表测量直流电压的线路 如图 3-17 所示， $R_1$ 、 $R_2$ 、 $R_3$ 、 $R_4$  是为扩大量程而串联的附加电阻。当转换开关  $S$  由位置 1 依次置于位置 2、3、4 时，附加电阻值不断减小，于是测量电压的量程也随之减小，从而可以实现不同范围的直流电压的测量。

3. 万用表测量交流电压的线路 如图 3-18 所示，它与测量直流电压的原理和方法相同，所不同的是增加了一个桥式整流器，使交流电流经过整流后再通过表头。



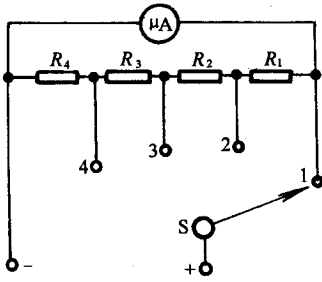


图 3-16 万用表测量直流电流的线路

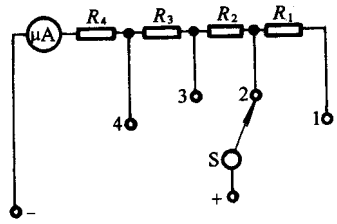


图 3-17 万用表测量直流电压的线路

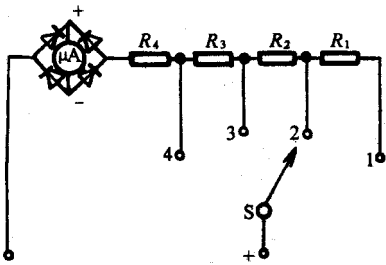


图 3-18 万用表测量交流电压的线路

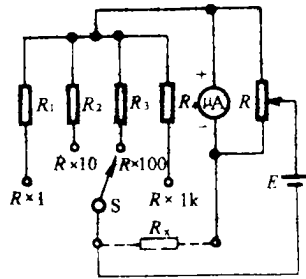


图 3-19 万用表测量电阻的线路

4. 万用表测量电阻的线路 如图 3-19 所示,  $E$  为万用表的内部电源(干电池),  $R_1, R_2, R_3, R_4$  为扩大量程而采用的可调电阻,  $R_x$  为被测电阻, 整个测量电阻回路接成一个桥形电路。当转换开关置于  $R \times 10, R \times 100, R \times 1k$  等不同位置时, 可以实现不同范围的电阻的测量。

(二)常用万用表的主要技术数据(见表 3-11)

表 3-11 常用万用表的主要技术数据

型号	测量范围	灵敏度 ( $\Omega/V$ )	基本误差
100 型	直流电流 (mA)	0 ~ 0.1 ~ 1 ~ 10 ~ 50 ~ 250 ~ 500 ~ 1000	$\leq$ 量程之 $\pm 3\%$
	直流电压 (V)	0 ~ 1 ~ 10 ~ 50 ~ 250 ~ 500 ~ 1000 ~ 2500	
	交流电压 (V)	0 ~ 10 ~ 50 ~ 250 ~ 500 ~ 1000 ~ 2500	$\leq$ 量程之 $\pm 4\%$
	电阻 (k $\Omega$ )	0 ~ 2 ~ 20 ~ 200 ~ 2000 ~ 20000	$\leq$ 刻度 R 全长之 $\pm 4\%$

型 号	测 量 范 围		灵敏度 ( $\Omega/V$ )	基 本 误 差	
105 型	直流电流 (mA)	0 ~ 3 ~ 30 ~ 300	2000	$\leq$ 量程之 $\pm 3\%$	
	直流电压 (V)	0 ~ 6 ~ 30 ~ 150 ~ 600 ~ 3000			
	交流电压 (V)	0 ~ 6 ~ 30 ~ 150 ~ 600 ~ 3000	2000	$\leq$ 量程之 $\pm 4\%$	
	电 阻 ( $\Omega$ )	0 ~ 2 ~ 20 ~ 200 ~ 2000 ~ 20000		$\leq$ 刻度 R 全长之 $\pm 4\%$	
108 - T - 1 型	直流电流 (mA)	0 ~ 0.5 ~ 5 ~ 50 ~ 500	5000	$\leq$ 量程之 $\pm 2.5\%$	
	直流电压 (V)	0 ~ 2.5 ~ 10 ~ 50 ~ 250 ~ 500 ~ 2500			
	交流电压 (V)	0 ~ 10 ~ 50 ~ 100 ~ 250 ~ 500 ~ 2500	5000	$\leq$ 量程之 $\pm 4\%$	
	电 阻 ( $k\Omega$ )	0 ~ 2 ~ 20 ~ 2000 ~ 20000		$\leq$ 刻度 R 工作部分之 $\pm 2.5\%$	
500 型	直流电流 (mA)	0 ~ 0.05 ~ 1 ~ 10 ~ 100 ~ 500			
	直流电压 (V)	0 ~ 2.5 ~ 10 ~ 50 ~ 250 ~ 500 ~ 2500	20000	$\pm 2.5$	以刻度只工作部分上量限的百分数表示
			4000	$\pm 4$	
	交流电压 (V)	0 ~ 10 ~ 50 ~ 250 ~ 500 ~ 2500	4000	$\pm 4$	
			4000	$\pm 5$	
电 阻 ( $k\Omega$ )	0 ~ 2 ~ 20 ~ 200 ~ 2000 ~ 30000		$\pm 2.5$	以标度 R 工作部分长度的百分数表示	
音频电子 (dB)	- 10 ~ + 22 ~ + 36 ~ + 50				
505 型	直流电流 (mA)	0 ~ 0.15 ~ 3 ~ 30 ~ 150 ~ 300		$\leq$ 量程之 $\pm 3\%$	
	直流电压 (V)	0 ~ 6 ~ 30 ~ 150 ~ 300 ~ 600 ~ 1500	2000	$\leq$ 量限之 $\pm 4\%$	
	交流电压 (V)	0 ~ 6 ~ 30 ~ 150 ~ 300 ~ 600 ~ 1500	3000		
	交流电流 (A)	0 ~ 1.5 ~ 3 ~ 6			
	电 阻 ( $\Omega$ )	0 ~ 2 ~ 20 ~ 200 ~ 2000 ~ 20000			

型 号	测 量 范 围		灵敏度 ( $\Omega/V$ )	基 本 误 差
508 型	直流电流 (mA)	0 ~ 0.25 ~ 1 ~ 10 ~ 100 ~ 500		$\leq$ 量程之 $\pm 3\%$
	直流电压 (V)	0 ~ 10 ~ 50 ~ 150 ~ 250 ~ 500 ~ 2500	2000	
	交流电压 (V)	0 ~ 10 ~ 50 ~ 150 ~ 250 ~ 500 ~ 2500	2000	$\leq$ 量程之 $\pm 4\%$
	电 阻 (k $\Omega$ )	0 ~ 2 ~ 20 ~ 200 ~ 20000		$\leq$ 刻度 R 全长之 $\pm 3\%$
	电 容 (kF)	0.0001 ~ 1		
	电 感 (H)	100 ~ 10000		
U-6 型	直流电流 (mA)	0 ~ 0.5 ~ 5 ~ 500		$\leq$ 满刻度之 $\pm 3\%$
	直流电压 (V)	0 ~ 10 ~ 50 ~ 250 ~ 500 ~ 1000 ~ 2500	2000	
	交流电压 (V)	0 ~ 10 ~ 50 ~ 250 ~ 500 ~ 1000 ~ 2500	2000	$\leq$ 满刻度之 $\pm 4\%$
	电 阻 (k $\Omega$ )	0 ~ 20 ~ 200 ~ 2000 ~ 20000		$\leq$ 指示值之 $\pm 10\%$

型 号	测 量 范 围		灵敏度 ( $\Omega/V$ )	基 本 误 差	
U-10	直流电流 (mA)	0~0.5~2.5~25~250	2000	$\pm 2.5$	以满刻度的百分数计算
	直流电压 (V)	0~0.5~2.5~5~25~250~500	—		
	交流电压 (V)	0~5~25~100~250~500	2000	$\pm 4.0$	
	电 阻 (k $\Omega$ )	0~5	40 $\Omega$ (中心)	$\pm 2.5$	以表盘弧度线长度百分数计算
		0~50	400 $\Omega$ (中心)		
		0~500	4k $\Omega$ (中心)		
0~5000		40k $\Omega$ (中心)			
电 容 ( $\mu F$ )	0.0001~0.3 0.05~1	—	$\pm 5$		
音频电平 (dB)	-10~+56	—			
天津袖珍 万用表	直流电流 (mA)	0~0.1~1~10~100		$\leq$ 量程之 $\pm 3\%$	
	直流电压 (V)	0~10~100~250~500~1000	10000		
	交流电压 (V)	0~10~100~250~500~1000	4000	$\leq$ 量程之 $\pm 4\%$	
	电 阻 ( $\Omega$ )	0~2~20~200~2000		$\leq$ 刻度 R 全长之 $\pm 5\%$	
	电 容 ( $\mu F$ )	0.0001~0.05 (用交流 250 伏档)			
		0.01~0.5 (用交流 10 伏档)			
	电 感 (H)	5~100 (用交流 10V 档)			
音频电平 (dB)	-10~+62				

型 号	测 量 范 围		灵敏度 ( $\Omega/V$ )	基 本 误 差		
MF-7 型	直流电流 (mA)	0~0.1~0.5~5~50~500~5000		$\pm 2.5$	上量限的百分数表示	
	直流电压 (V)	0~2~10~50~250~500~1000	10000	$\pm 2.5$	以刻度 R 工作部分的百分数表示	
	交流电压 (V)	0~10~50~250~500~1000	4000	$\pm 4$		
	交流电流 (mA)	0~0.5~5~50~500~5000				
	电 阻 (k $\Omega$ )	0~2~20~200~2000~20000			$\leq$ 刻度 R 长度之 $\pm 2.5\%$	
	音频电平 (dB)	-10~+22				
MF-9 型	直流电压 (V)	0~0.5~2.5~10~50~250~500	20000		$\leq$ 上量限之 $\pm 2.5\%$	
	直流电流 (mA)	0~0.05~0.5~5~50~500				
	交流电压 (V)	0~10~50~250~500	4000		$\leq$ 上量限之 $\pm 4\%$	
	电 阻 (k $\Omega$ )	0~4~40~4000~40000			$\leq$ 刻度 R 全长之 $\pm 2.5\%$	
	音频电平 (dB)	-10~+22				
MF-10 型	直流电压 (V)	0~0.5~1~2.5~10~50~100	100000	$\leq$ 上量限之 $\pm 2.5\%$		
		0~250~500	20000			
	直流电流 (mA)	0~0.01~0.05~0.1~1~10~100~1000				
	交流电压 (V)	0~10~50~250~500	20000		$\leq$ 上量限之 $\pm 4\%$	
	电 阻 (k $\Omega$ )	0~2~20~200~2000~20000~200000			$\leq$ 刻度 R 全长之 $\pm 2.5\%$	
	音频电平 (dB)	-10~+22			$\leq$ 刻度 R 全长之 $\pm 4\%$	

型 号	测 量 范 围		灵敏度 ( $\Omega/V$ )	基 本 误 差	
MF-11 型	直流电压 (V)	0~2.5~10~250~500	10000	$\pm 2.5$	以上量限之百分数表示
	交流电压 (V)	0~10~250~500	4000	$\pm 4.0$	
	直流电流 (mA)	0~0.1~1~10~100		$\pm 2.5$	
	电 阻 (k $\Omega$ )	0~20~200~20000		$\pm 2.5$	以刻度 R 全长的百分数表示
	音频电平 (dB)	-10~+22		$\pm 4.0$	
MF-12 型	直流电压 (V)	0~0.075~3~7.5~15~30~150 ~300~600	20000	$\pm 1.5$	以上量限的百分数表示
	交流电压 (V)	0~3~7.5	1000	$\pm 2.5$	
		0~15~30~150~300~600	2000	$\pm 2.5$	
	直流电流 (mA)	0~0.05~0.15~0.6~3~15~60 ~300~1500		$\pm 1.5$	
	交流电流 (mA)	0~3~15~60~300~1500		$\pm 2.5$	
	电阻(k $\Omega$ )	0~20~200~2000~20000		$\pm 1.5$	
	电 容 ( $\mu F$ )	0.005~20		$\pm 2.5$	以刻度 R 全长的百分数表示
音频电平 (dB)	-10~+12		$\pm 2.5$		
MF-14 型	直流电压 (V)	0~2.5~10~25~100~250~500 ~10000	1000	$\pm 1.5$	以上量限的百分数表示
	交流电压 (V)	0~10~25~100~250~500~ 1000	400	$\pm 2.5$	
	直流电流 (mA)	0~1~2.5~10~25~100~250~ 1000~5000		$\pm 1.5$	
	交流电流 (mA)	0~2.5~10~25~100~250~ 1000~5000		$\pm 2.5$	
	电 阻 (k $\Omega$ )	0~10~100~1000~10000		$\pm 1.5$	以刻度 R 全长的百分数表示

型 号	测 量 范 围		灵敏度 ( $\Omega/V$ )	基 本 误 差		
MF-18 型	直流电流 (mA)	0~0.06~1.5~7.5~15~75~300~1500		$\pm 1.0$	以上量程的百分数表示	
	直流电压 (V)	0~0.15		$\pm 1.0$		
		0~1.5~7.5~15~75~300~600	20000			
	交流电压 (V)	0~7.5~15		133		$\pm 1.5$
		0~75~300~600		2000		
	交流电流 (mA)	0~1.5~7.5~15~75~300~1500			$\pm 1.5$	
电 阻 ( $k\Omega$ )	0~2~20~200~2000~20000			$\pm 1.0$	以弧长的百分数计算	
MF-27 型	直流电流 (mA)	0~1~10~100		$\leq$ 上量程之 $\pm 5\%$		
	直流电压 (V)	0~2.5~10~50~250~500	2000			
	交流电压 (V)	0~2.5~10~50~250~500	2000			
	电 阻 ( $k\Omega$ )	0.001~10 0.1~1000				
	电 容 ( $\mu F$ )	0.0001~0.03				
MF-30 型	交流电压 (V)	0~0.015~0.06~0.3~1.5	333000	$\pm 4.0$	以上量程的百分数表示	
		0~6~30~150~600	总阻 1 兆欧			
	交流电流 (mA)	0~0.006~0.03~0.15~0.3				
		0~0.6~1.5~6~30				
	直流电压 (V)	0~1.5~6~30~150~600	20000		$\pm 2.5$	
	直流电压 (V)	0~0.06~0.3~1.5~6~30			$\pm 2.5$	
	电阻 ( $k\Omega$ )	0~2~20~200~2000~2000			$\pm 2.5$	以弧长的百分数计算
音频电平 (dB)	~70 - +57					

型 号	测 量 范 围		灵敏度 ( $\Omega/V$ )	基 本 误 差	
MF368	直流电压 (V)	0 ~ 0.5 ~ 2.5 ~ 10 ~ 50 ~ 250	20000	$\pm 2.5$	上量限的百分数 表示
		~ 500 ~ 1500	9000	$\pm 2.5$	
	交流电压 (V)	0 ~ 2.5 ~ 10 ~ 30 ~ 50 ~ 250 ~ 500 ~ 1500	9000	$\pm 5.0$	
	直流电流 (mA)	0 ~ 0.05 ~ 2.5 ~ 25 ~ 250 ~ 2500		$\pm 2.5$	
	电 阻 ( $\Omega$ )	$\times 1, \times 10, \times 100, \times 1k, \times 10k$		$\pm 2.5$	
	音频电平 (dB)	- 10 ~ + 22		$\pm 5.0$	
	晶体管直流 放大系数	0 ~ 1000			
MF368A	直流电压 (V)	0 ~ 0.25 ~ 2.5 ~ 12.5 ~ 50 ~ 2.50	20000	$\pm 2.5$	上量限的百分数表 示
		~ 500 ~ 1000	9000	$\pm 2.5$	
	交流电压 (V)	0 ~ 10 ~ 50 ~ 250 ~ 500 ~ 1000	9000	$\pm 5.0$	
	直流电流 (mA)	0 ~ 0.05 ~ 5 ~ 50 ~ 500 ~ 5000		$\pm 2.5$	
	交流电流 (A)	0 ~ 0.5 ~ 5			
音频电平 (dB)	- 10 ~ 22		$\pm 5$		

### (三) 万用表的使用方法及其注意事项

1. 插孔的正确接线 应将红色和黑色测试棒的连接插头分别插入红色插孔(或标有“+”号)和黑色插孔(或标有“-”号)。

2. 用转换开关正确选择测量种类和量程 根据被测对象,首先选择测量种类。严禁当转换开关置于电流档或电阻档去测量电压,否则,将损坏万用表。测量种类选择妥当后,再选择该种类的量程。测量电压、电流时应使指针的偏转在量程的一半或三分之二以上,读数较为正确。若预先不知被测量的大小范围,为避免量程选得过小而损坏万用表,应选择该种类最大量程预测,然后再选择合适的量程。

3. 正确读数 万用表的标度盘上有多条标度尺,它们代表不同的测量种类。测量时应根据转换开关所选择的种类及量程,在对应的标度尺上读数,并注意所选择的量程与标度尺上读数的倍率关系。

#### 4. 电阻的测量

(1) 应选择合适的倍率位置,由于电阻档的标度尺是反刻度方向的,即左边是“ $\infty$ ”(无穷大),最右边是“0”,并且刻度不均匀,越往右,刻度越密,读数准确度越差,因此应使指针偏转在刻度较稀处,且以偏转在标度尺的中间附近为好。

(2) 测量以前,应进行“调零”,将红黑两根测试棒短接,同时转动“调零旋钮”,使指针指到电阻标度尺的



“0”刻度上。每更换一次倍率档,都应先“调零”,才能进行测量。指针调不到零位,应更换新的电池。

(3)不能带电测量电阻,防止万用表的损坏。被测电路不能有并联支路,以免影响精度。

(4)在使用万用表欧姆档判别仪表的正负端钮或半导体元件的极性时,从万用表的接线图中可以看出,万用表内部电池的负极性是和“+”插孔直接连接,这时“-”插孔的电位高于“+”插孔的电位。

(5)测低值电阻时,注意表笔与被测物要接触好。测量高值电阻时,手不要接触表笔和被测物的引线。

(6)测量完毕后,应将“选择与量程开关”转到“V”部分的最高量程。

#### 5. 测量交流电压

(1)调指针于机械零位。

(2)置“选择与量程开关”于“V”部分的最高量程。或根据被测电压的概略数值选择适当量程。

(3)测量交流电压时,把表笔并联于被测的电路。改变量程,直到指针移到满刻度的三分之二左右为止。不要带电转换量程。

(4)测量1000V以上的高压时,必须采用专测高压的高级绝缘表笔和引线,并分别置于“1500V $\approx$ ”和“-”插孔。不要两只手同时拿两支表笔。必要时,应使用绝缘橡皮手套和绝缘垫。

6. 测量直流电压 与测量交流电压的步骤基本相同。注意应把“选择与量程开关”置于“V”部分,并注意仪表的极性。

#### 7. 测量直流电流

(1)调指针于机械零位。

(2)置“选择与量程开关”于“mA”部分的最高量程。或根据被测电流的概略数值,选择“mA”部分的适当量程。

(3)然后进行测量。此时仪表应串接于被测的电路中,电流应从仪表的“+”极流到“-”极。改变量程,直到指针指向满刻度的三分之二左右为止。最好不要带电转换量程。

(4)测量完毕,将“选择与量程开关”转到“V”部分的最高量程。

(5)应注意万用表电流的最高量程。使用时不要超过此值。在测量电流时,绝对不能把表笔跨接于被测的电路。

8. 使用时注意操作安全 不能用手接触测试棒的金属部分,以保证安全。仪表在测试较高电压和较大电流时,不能带电转动开关旋钮。

在使用万用表后,应将转换开关旋至“关”(OFF)的位置。没有这档位置,则应置于交流电压的最高档。这样防止转换开关在欧姆档时测试棒短路,更重要的是在下一次测量时,不注意转换开关的位置去测量电压,便有可能将万用表损坏。

### (四)万用表常见故障及处理方法(见表3-12)

表3-12 万用表常见故障及处理方法

故障位置	故障现象	可能产生的原因及处理方法
表头	摇动表头时,指针摆动不正常	1. 表头动圈被异物卡住,轴尖与宝石螺丝间有锈迹或相互配合过紧。需去除异物或锈迹,重新调节配合间隙 2. 游丝绞住或脱焊。用细针拨开绞住部位或焊住脱开点 3. 机械平衡破坏,需重新调整 4. 表头线圈脱开或分流电阻断开,更换表头线圈、焊牢断开电阻

故障位置	故障现象	可能产生的原因及处理方法
直流电 流档	无指示	1. 表头被短路 2. 表头线圈脱焊或动圈断路 3. 表头串联的电阻损坏或脱焊 4. 分档开关未接通,如接触不良可用细金相纸轻轻打磨,若开关损坏应调换
	指针来回摆动不易停下	分流电阻断开,应更换分流电阻或重新焊牢
	各档测量值偏高	由与表头串联电阻或分流电阻的数值变化引起
	各档测量偏低	1. 由与表头串联电阻值变化引起 2. 表头灵敏度降低,应对表头磁钢重新充磁
直流电 压档	无指示	电压部分开关公共点脱焊,或最小量程档的分压电阻开路或损坏
	小量程误差大,随量程增大误差变小	小量程分流电阻变值或损坏
	某档量程不通或不准确,该档前各档正常,该档后随量程增大误差变小	某档量程不通或不准确时,该档的分压电阻已变值或损坏
交流电 压档	指针轻微摆动或指示值极小	整流器击穿,需调换
	读数小一半左右	部分整流器损坏,全波整流变成半波整流
	各档测量值偏低	整流元件反向阻值变小,需更换整流器或调整交流电压档的灵敏度
	小量程误差大,随量程增大误差变小	该档分压电阻有误差

故障位置	故障现象	可能产生的原因及处理方法
电阻档	无指示	1. 转换开关公共接触点引线断开 2. 调零电位器中心点引线脱焊 3. 电池无电压输出 检查电池有无电压或使电池与引出线弹片保持接触良好
	正、负表棒短路时 指针调不到零位	1. 电池容量不足 2. 串联电阻值变大 3. 转换开关接触电阻增大
	调节零位时, 指针跳跃不稳	调节调零电位器的滑动臂与线绕电阻接触松紧程度
	某量程不通	1. 转换开关接触点接触不良, 需调整 2. 串联电阻断开
	某量程误差较大	该档分流电阻变值 需调整或更换

## 二、功率表

### (一) 功率表的用途、分类和工作原理

功率表是用来测量电功率的电工仪表。功率表可分为单相功率表和三相功率表。

功率表大多采用电动式测量机构。

电动式功率表与电动式电流表、电压表的不同之处在于 固定线圈和可动线圈不是串联起来构成一条支路, 而是分别将固定线圈与负载串联, 将可动线圈与附加电阻串联后再并接至负载。由于仪表指针的偏转角度与负载电流和电压的乘积成正比, 故可测量负载的功率。

### (二) 功率表的主要技术数据

单相功率表的主要技术数据见表 3-13。三相功率表的主要技术数据见表 3-14。

表 3-13 单相功率表的主要技术数据

型号	准确度等级	作用原理	额定频率	额定功率因数	量 限
D34-W	0.5 (25/50/ 100V 为 1.0 级)	空气式 电动系	直流和交流 50Hz	0.2	电流 0.25 ~ 0.5 0.5 ~ 1.0, 1 ~ 2 2. 5 ~ 5 5 ~ 10A 电压 25 ~ 50 ~ 100, 50 ~ 100 ~ 200, 75 ~ 150 ~ 300, 150 ~ 300 ~ 600V

型 号	准确度等级	作用原理	额定频率	额定功率因数	量 限
D37 - W	0.5	电动系	直流或交流 45 ~ 65 ~ 500Hz	0.1	电流 0.1 ~ 0.2 0.25 ~ 0.5 0.5 ~ 1 , 1 ~ 2 2.5 ~ 5.5 ~ 10A 电压 30 ~ 75 ~ 150 ~ 300 ~ 600 ,30 ~ 45 ~ 75 ~ 150 ~ 300V
D39 - W	0.5	空气式 电动系	直流或交流 45 ~ 65 , 90 ~ 500Hz	0.2	电流 0.25 ~ 5 0.5 ~ 1.0 2.5 ~ 5 5 ~ 10A 电压 25 ~ 50 ~ 100 ~ 200 ,75 ~ 150 ~ 300 ~ 450 ,125 ~ 250 ~ 375 ~ 500 ,150 ~ 300 ~ 450 ~ 600V
D51 - W	0.5	电动系	直流或交流 45 ~ 65Hz		电流 2.5 ~ 5A 电压 :75 ~ 150 ~ 300 ~ 600 ,48 ~ 120 ~ 240 ~ 480V

表 3 - 14 三相功率表的主要技术数据

型 号	准确度等级	作用原理	量 限	接入方式
1D1 - W	2.5	铁磁 电动系	额定电压 :100 ,127 220V 额定电流 5A	直接接入可 经互感器接入
1D5 - W VAR	2.5	铁磁 电动系	有功(W) 无功(ver) 额定电压 :100 ,127 220V 额定电流 5A 7.5 ~ 6000/5A 380 ~ 220000/100V	直接接入 经互感器接入
1L2 - W	2.5	磁电系	额定电压 :127 220 380V 5 ~ 10000/5A 或 0.5A 380 ~ 380000/100V 或 /50V	直接接入 经互感器接入
6L2 - W VAR	2.5	磁电系	额定电压 50 ,100 380V 额定电流 0.5 5A 外附功率变换器	外附功率变换器 可经互感器接入
12L1 - W	2.5	磁电系	额定电压 50 ,100 220V 5 ~ 10000/5A 或 0.5A 220 ~ 220000/100V 或 50V	直接接入 经互感器接入

型 号	准确度等级	作用原理	量 限	接入方式
16D3 - W VAR	2.5	铁磁 电动系	额定电压 :100 ,127 ,220V 额定电流 5A0.5 , 5 ~ 10000/5A 380 ~ 220000/100V	直接接入 经互感器接入
42L6 - W VAR	2.5	磁电系	额定电压 50 ,100 ,220V 额定电流 0.5 ,5A	直接接入
16L1 - W VAR	2.5	磁电系	额定电压 :127 ,220 ,380V 额定电流 5A 380 ~ 380000/100V 或 50V 5 ~ 10000/5A 或 0.5A	直接接入 经互感器接入
59L2 - W VAR	2.5	磁电系	额定电压 :127 ,220 ,380V 额定电流 5A 380 ~ 380000/100V 或 50V 5 ~ 10000/5A 或 /0.5A	直接接入 经互感器接入

### (三)单相电功率的测量

#### 1. 直流电路功率的测量

(1) 用电流表、电压表测量 :用电流表和电压表分别测出负载电阻上的电流和电压 ,间接测得直流功率为  $P = UI$ 。测量线路如图 3-20 所示。请注意 a 图和 b 图两种接法的不同 ,其测量结果略有误差。

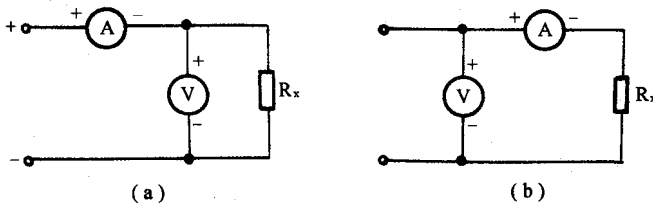


图 3-20 用电压表和电流表测量功率

(a) 电压表内阻  $\gg$  负载电阻时的接线

(b) 电流表内阻  $\ll$  负载电阻时的接线

(2) 用功率表测量 :正确的接线见图 3-21。在功率表的电流线圈的一端和电压线圈的一端标有 \*、± 或 ↑ 等标记。接线时必须将标有 \* 号的电流端钮接至电源的一端 ,而另一个电流端钮接至负载端 ,这时电流线圈是串联接在电路中 ,标有 \* 号的电压端钮 ,可以接至电流端钮的任一端 ,而另一个电压端钮则应该接至负载的另一端 ,功率表的电压线圈是并联接在电路中的。图 3-21a 适用于负载电阻远比功率表串流线圈电阻大得多的情况、图 3-21b 适用于负载电阻远比功率表电压线圈电阻小得多的情况。

2. 单相交流电路有功功率的测量 单相交流电路有功功率常用单相功率表测量 ,接线方法与用功率表测量直流电路的功率(见图 3-21 相同)。

如果需要用功率表测量高电压、大电流交流电路的电功率时 ,就要用电压互感器和电流互感器 ,如图 3-22 所示。此时 ,电路实测有功功率  $P$  为

$$P = K_V K_I P'$$



图 3-21 用功率表测量功率

式中  $P'$ ——功率表指示值(W);  
 $K_I$ ——电流互感器的变比;  
 $K_U$ ——电压互感器的变比。

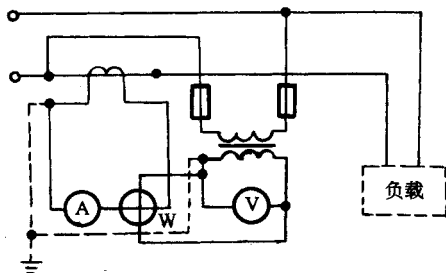


图 3-22 功率表经电流互感器、电压互感器的接线

#### (四)三相交流电路有功功率的测量

(1)当三相负载对称时,可用一只单相功率表测量三相有功功率,接线如图 3-23 所示。三相交流电功率为功率表指示值  $P'$  的 3 倍,即  $P = 3P'$  (W)。

(2)在三相三线制交流电路中,不论负载对称与否,都可用两只单相功率表测量有功功率,如图 3-24 所示。三相有功电功率为两只单相功率表指示值之和。某些情况下(与负载性质有关),如果发现功率表反偏转而无法读数时,可将该表的电流线圈接头反接(见图 3-25),但不可将电压线圈接头反接以免引起静电误差甚至导致仪表损坏。这时所测得的功率应为二读数之差。有功功率的测量接线

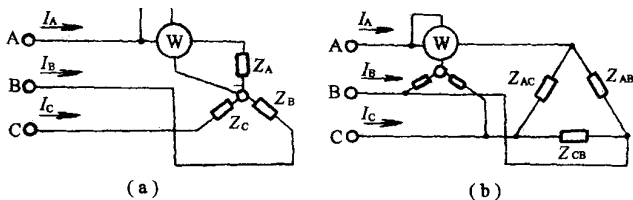


图 3-23 用一只功率表测量对称三相有功功率  
 (a)星形负载 (b)三角形负载

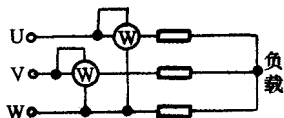


图 3-24 三相三线制电路

(3)三相四线制电路中负载不对称时,可采用三只单相功率表,分别测量各相的有功电功率,测得的各相电功率之和就是三相交流电路实际的有功电功率,如图 3-26 所示。

(4)三相有功功率表只能测量三相三线制或对称三相四线制交流电路的功率。测量电路如图 3-27 所示。当采用电流互感器时(见图 3-27b),电路的实际有功功率为电表读数乘以电流互感器的电流比。

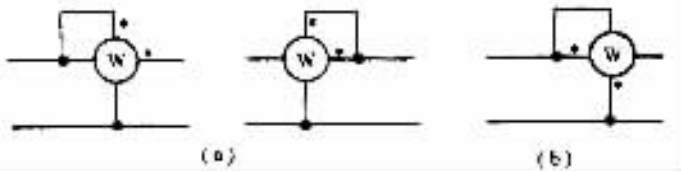


图 3-25 功率 GE 的接线换接圈  
(a)正确换接 (b)不正确换接

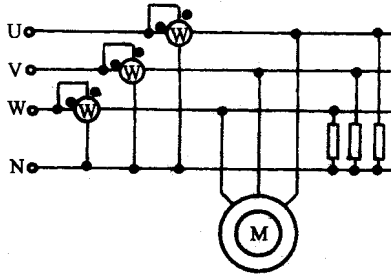


图 3-26 三相四线制电路功率的测量接线

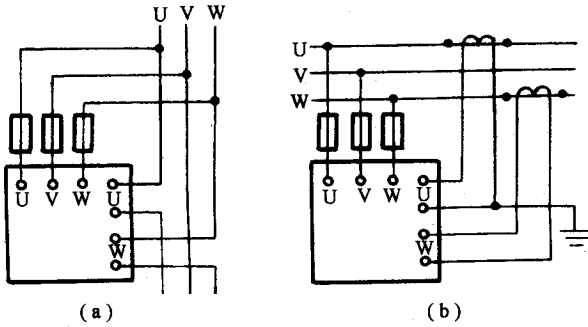


图 3-27 三相有功功率表的接线

(a)直接接入 (b)经电流互感器接入

### (五)功率表的使用注意事项

(1)正确选择电流、电压的量限 选择时,除了要注意测量功率的量限,也要注意电流、电压量限的选择。要保证电压、电流量限都能承受负载电压、电流。

(2)正确接线 根据要测电路接线制及负载电阻大小,正确选择接线方法。

(3)正确计算 功率表只标注有分格数,选用不同量限时,每一分格代表不同的瓦数。因此,测量功率时,要注意被测量的实际值与指针读数之间的计算方法,如果功率表读数为  $W$  格,被测功率值为

$$P = CW(W)$$

$$C = \frac{U_N I_N}{W_N}$$

式中  $C$ ——每格多少瓦;

$U_N$ —功率表选用电压线圈额定值;

$I_N$ —功率表选用电流线圈额定值;

$W_N$ —功率表标度尺的满刻度格数。

(4)在交流电路中,测量高电压、大电流时,应配用电压、电流互感器,实际功率应用功率表的读数乘以电流互感器和电压互感器的变比值。

## 第五节 测量仪表附件(钳形电表与电度表)

### 一、钳形电表

#### (一) 钳形电表的结构和原理

钳形电流表可以在不断开电路的情况下测量电流。

用电磁系测量机构制成的钳形电流表,可以交直流两用,其外形如图 3-28 所示。

在铁心钳口中的被测电流导线相当于电磁系测量机构中的固定线圈,它在铁心钳口中产生磁场,位于铁心缺口中间的可动铁片受此磁场的作用而偏转,从而带动指针指示被测电流的数值。

由电流互感器和电流表组成的钳形电流表,只能测量交流电流,有的可以测量交流电压。

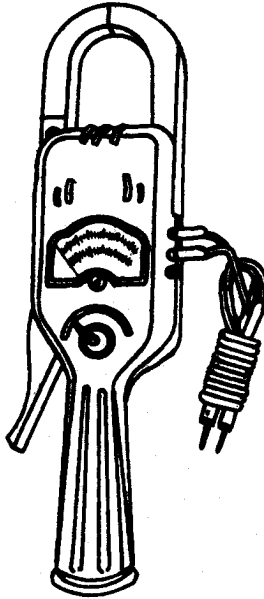


图 3-28 钳形电流表外形

#### (二) 钳形电表的主要技术数据(见表 3-15)

表 3-15 钳形电表的主要技术数据

型号和名称	准确度等级	量 限
MG4 型 电流电压表	2.5	电压 0 ~ 150 ~ 300 ~ 600V 电流 0 ~ 10 ~ 30 ~ 100 ~ 300 ~ 1000A
交直流 电流表	5.0	电流 0 ~ 100 ~ 200 ~ 300 ~ 400 ~ 500 ~ 600A 电流 0 ~ 750 ~ 1000 ~ 1500A



型号和名称	准确度等级	量 限
MG24 型 交流电流 电压表	2.5	1. 电流 $0 \sim 5 \sim 25 \sim 50\text{A}$ 电压 $0 \sim 300 \sim 600\text{V}$ 2. 电流 $0 \sim 5 \sim 50 \sim 250\text{A}$ 电压 $0 \sim 300 \sim 600\text{V}$
MG27 型袖珍 多用电表	2.5 5.0	交流电流 $0 \sim 10 \sim 50 \sim 250\text{A}$ 交流电压 $0 \sim 300 \sim 600\text{V}$ 直流电阻 $0 \sim 300\text{k}\Omega$
MG28 型 多用钳形表	5.0	交流电流 $0 \sim 5 \sim 25 \sim 50 \sim 100 \sim 250 \sim 500\text{A}$ 直流电流 $0 \sim 0.5 \sim 10 \sim 100\text{A}$ 交、直流电压 $0 \sim 50 \sim 250 \sim 500\text{V}$ 直流电阻 $0 \sim 1 \sim 10 \sim 100\text{k}\Omega$
MG31 型 袖珍钳形表	5.0	1. 交流电流 $0 \sim 5 \sim 25 \sim 50\text{A}$ 交流电压 $0 \sim 450\text{V}$ 直流电阻 $0 \sim 50\text{k}\Omega$ 2. 交流电流 $0 \sim 50 \sim 125 \sim 250\text{A}$ 交流电压 $0 \sim 450\text{V}$ 直流电阻 $0 \sim 50\text{k}\Omega$
MG33 型 袖珍钳形表	5.0	交流电流 $0 \sim 5 \sim 50, 0 \sim 25 \sim 100, 0 \sim 50 \sim 250\text{A}$ 交流电压 $0 \sim 150 \sim 300 \sim 600\text{V}$ 直流电阻 $0 \sim 300\Omega$
MG34 型叉式 多用钳形表	2.5	交流大电流 $0 \sim 1 \sim 5 \sim 25 \sim 100 \sim 250 \sim 1000\text{A}$ 交流小电流 $0 \sim 1 \sim 5 \sim 25 \sim 100\text{mA}$ 直流小电流 $0 \sim 1 \sim 5 \sim 25 \sim 100\text{mA}$ 交、直流电压 $0 \sim 50 \sim 250 \sim 500\text{V}$ 电阻(输出电流 $100\mu\text{A}$ , 中值 $10\Omega$ ): $\times 10, \times 1\text{k}$
MG41 - VAW 电压电流功率 三用表	2.5 (V、A) (W)	交流电压 $0 \sim 150 \sim 300 \sim 600\text{V}$ 交流电流 $0 \sim 10 \sim 30 \sim 100 \sim 300 \sim 1000\text{A}$ 交流功率( $U_e = 200\text{V} \cos\varphi = 1$ ): $0 \sim 1 \sim 3 \sim 10 \sim 30 \sim 100\text{kW}$

### (三) 钳形电表的使用注意事项

1. 测量前 应检查仪表指针是否在零位, 若不在零位 应调至零位。
2. 测量时 应将转换开关置于合适量程, 对被测量大小心中无数时 应将转换开关置于最高档 然后根据测量值的大小 变换到合适量程。应注意不要在测量过程中切换量程。
3. 进行电流测量时 被测导线的位置应放在钳口中央。钳口两个面应接合良好, 如有杂声, 可将钳口重新开合一次。钳口有污垢, 可用汽油擦净。
4. 测量小于 5A 以下电流时, 为获得准确的读数, 可将导线多绕几圈放进钳口进行测量, 但实际的电流数值为读数除以放进钳口内的导线根数。

5. 不可用钳形电流表测量高压电路中的电流, 以免发生事故。

## 二、电度表

电度表就是测量在某一段时间  $t_1$  至  $t_2$  内, 负载消耗电能的数量。

### (一) 单相电度表

单相电度表也叫单相瓦时计, 是用来测量单相交流电路有功电能的仪表。单相电度表一般采用感应式仪表, 各种型号的基本结构类似。

电度表的主要组成部分可分为:

1. 驱动元件 指产生电磁转动力的元件, 由铁芯、电压线圈、电流线圈等组成。铁芯由硅钢片叠成; 电压线圈由匝数很多而截面较小的细绝缘导线绕成, 它与负载并联; 电流线圈由匝数较少而截面较大的绝缘粗导线绕成, 它与负载串联。电压线圈和电流线圈产生三个交变磁通, 都穿过铝盘, 故称“三通式”仪表。三个磁通在铝盘内感应产生各自的涡流, 并与磁通作用产生转动力矩, 驱动铝盘转动。

2. 转动元件 由铝盘和转轴组成。在转轴上装有传递转速的蜗杆, 铝盘在转动力矩的作用下连续转动, 并通过蜗杆将铝盘转数传递给计数器记录。

3. 制动元件 为使得铝盘在不同转动力矩下产生不同的转速, 必须对铝盘有一个与速度成一定比例的制动力矩。制动元件由磁铁和铝盘组成, 铝盘在永久磁铁磁场中转动, 产生阻尼力矩, 铝盘转动愈快, 阻尼力矩愈大。

4. 积算机构 用于积算铝盘的转数, 达到指示负载消耗电能的目的。由转轴上的蜗杆、蜗轮及计数器组成。

另外, 电度表还有校正装置, 接线端子、轴承、支架等。

### (二) 三相电度表

三相电度表有两元件和三元件两种形式。两元件三相电度表由两只单相电度表组成, 铝盘有两个或一个两种形式, 只有一个积算机构读出三相总电能, 适用于三相三线制电能的测量。三元件三相电度表由三只单相电度表组成, 铝盘有三个或一个两种形式, 也只有一个积算机构, 适用于三相四线制电能的测量。

### (三) 单相、三相电度表型号及规格

常用单相、三相电度表型号及规格见表 3-16 所示。

表 3-16 常用电度表型号规格

名称	型号	级别	额定电压(V)	额定电流(A)	备注
直流电度表	DJ1	2.0	6, 12, 24, 48, 110	5 ~ 300	配用分流器、分压器可扩大量程
单相电度表	nD1	2.5	110, 127, 220	2.5, 5, 10	配用次级为 5A、100V 互感器可扩大量程, 另有 DD10、DD14 等型号
三相三线电度表	DS1	2.0	127, 220, 380	10, 20	用次级为 5A、电压为 100V 电流电压互感器, 可扩大量程, 另有 DS8 等型号
		2.5			
三相四线电度表	DT2	2.0	220, 380	5, 10, 25	配用电流、电压互感器可扩大量程, 另有 TNP-3、DT8 等型号
		2.5			
三相三线无功电度表	DX2	2.5	100, 380	5	配用电流、电压互感器可扩大量程, 另有 DX8、DK9、DX10、JNP-2 等型号
		4.0			
	DX1	2.5	127, 220, 380	10, 20	

## (四) 电度表的使用

1. 电度表的选择 首先,根据所测量的负载情况,选用单相或三相电度表,然后选择电度表铭牌上额定电压、额定电流,使它们等于或略大于负载的电压、电流。

2. 电度表的接线 接线方式如图 3-29 所示。

3. 电度表的读数 其读数可由计数器上获得,在某段时间内负载消耗的电能,为两次计数器读数之差。电度表接线采用互感器后,电度表又没有标明配套互感器和乘率时,负载消耗的电能应为表的读数与互感器的变流比和变压比之积。表上注明互感器变比及乘率时,使用互感器与表上注明一致,则负载消耗的电能应为表的读数与乘率之积。使用互感器与表所标明不一致时,应先将乘率进行换算,负载消耗的电能应为表的读数与新乘率之积。新乘率换算方式如下:

$$\text{新乘率} = \frac{\text{原乘率} \times \text{新变流比} \times \text{新变压比}}{\text{原变流比} \times \text{原变压比}}$$

4. 注意事项 电度表不允许安装在 10% 的额定负载以下电路中使用。电度表的电路中不允许经常短路或负载超载 15%。否则,电度表的误差不在规定范围之内。

## (五) 电度表的安装场所及位置选择

1. 电度表的安装场所 电度表应安装在干燥、清洁及不受震动的地方,距热力管线在 0.5 米以上,环境温度一般在 0~40℃ 之间,要方便安装、试验和抄表工作;可安装在开关柜内、电度表板上或电度表箱及配电盘上;应安装在供电方案所确定的位置处。

2. 电度表不能安装的场所

- (1) 有易燃、易爆危险的场所。
- (2) 有磁场影响及多灰尘的场所。
- (3) 有腐蚀性气体或高温的场所。
- (4) 比较潮湿的场所。

3. 电度表位置的选择

(1) 低层(六层及以下)居民楼房电度表的安装位置,若在进线电度表上方装有表外线专用维护分界刀开关时,电度表可分别装在各单元内。否则,应分别集中装在进线口的单元内。

(2) 高层(七层以上)及综合楼电度表的安装位置,在距进线口 15 米以内,应装有表外线专用维护分界刀开关;居民公用电度表原则上分层装设,表位应设在楼梯间附近,其安装方式为:塔式楼每 1~2 层装一个公用电度表;内廊式楼房每超过 15 户时,可安装两只公用电度表;楼内下是单元式,上有通廊,应分别按单元式及通廊式安装公用电度表。每个公用电度表所带户数以不超过 15 户为宜。

- (3) 居民楼动力电度表集中安装在配电间内。
- (4) 综合楼商店的电度表,可按经济核算单位分别装在本店内。

4. 电度表的安装要求

- (1) 电度表明装时,应距离地面 1.8~2.2m,装于立式盘或成套开关柜内时,不应低于 0.7m。
- (2) 电度表应垂直安装,允许误差不得超过 2°。

# 第六节 自动化测量仪表

## 一、自动化测量仪表和 Smart 变送器

测量仪表能将温度、压力、流量、物位、机械量等工业过程参数自动转换为标准化信号,并传送至显示或

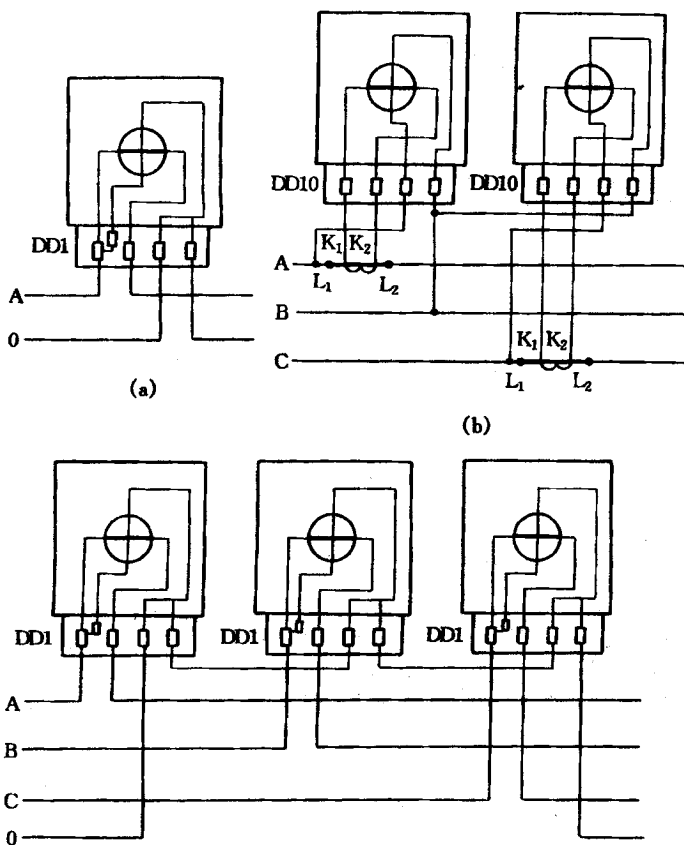


图 3-29 电度表的接线方式

(a) 测单相电路电能时的接线 (b) 用两块单相电度

表测三相三线电路电能的接线

(c) 用三块单相电度表测三相四线电路电能时的接线

控制仪表,实现对过程参数的自动显示或自动控制。发展方向是开发以微处理器为核心、实现高准确度、多功能的 Smart 变送器。

## 二、Smart 温度变送器

由输入测量部和变送部件组成,工作原理如图 3-30 所示。Smart 温度变送器主要性能:1)测量准确度可达  $\pm 0.1\% \sim \pm 0.05\%$  2)量程选择 一台温度变送器可以和 20 多种温度传感器在任意量程下相适配; 3)远距离标定 可通过现场通信器,以通信的方式在很宽范围内对变送器进行远程组态、调整量程、远距离标定等,并具有自检测和自诊断等功能。

## 三、Smart 差压变送器

由测量与变送两大部件组成,其工作原理见图 3-31。Smart 差压变送器主要性能:1)测量准确度 可达  $\pm 0.1\%$  2)量程调整比 可扩大到 400:1 3)远距离标定:可通过现场通信器进行远距离标定,最大通信距离为 1500m。

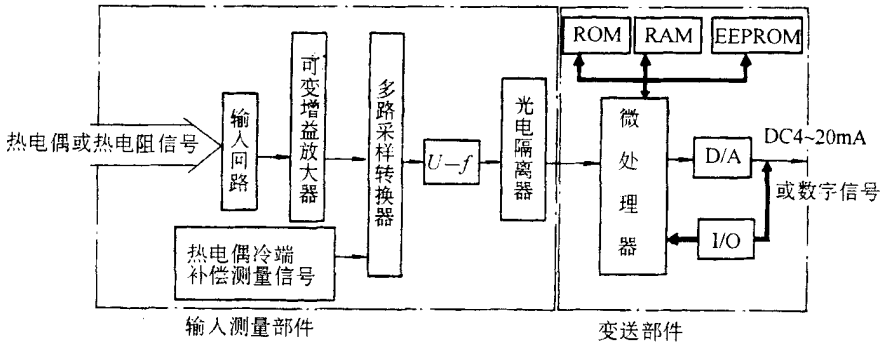


图 3-30 Smart 温度变送器的工作原理框图

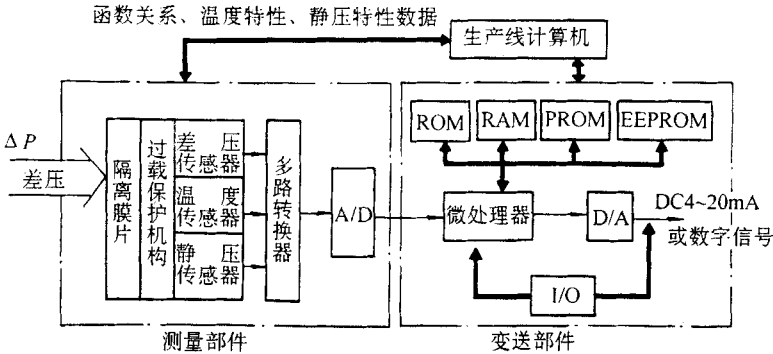


图 3-31 Smart 差压变送器的工作原理框图

## 第七节 仪器仪表检测技术

### 一、绝缘故障检测诊断

电力设备在制造、运输和检修过程中,有可能因发生意外事故而残留有潜伏性缺陷,在长期运行过程中,又会受到电场的作用、导体发热的作用、机械力损伤与化学腐蚀作用以及大气条件的影响等,在这些外界因素的影响下,可能逐渐产生缺陷,使其绝缘性能变坏,这就是通常所说的劣化。劣化的绝缘有的是可逆的,有的是不可逆的。例如绝缘受潮后,其性能下降,但进行干燥后,又恢复其原有的绝缘性能,显然它是可逆的。再如,某些工程塑料在湿度、温度不同的条件下,其机械性能呈可逆的起伏变化,这类可逆的变化,实质上一种物理变化,是一种没有触及化学结构的变化。若绝缘在各种因素的长期作用下发生一系列的化学、物理变化,导致绝缘性能和机械性能等不断下降,这种劣化为老化,它是不可逆的劣化。例如局部放电时会产生臭氧,很容易使绝缘材料发生臭氧裂变,导致材料性能老化,油在电弧的高温作用下,能分解出碳粒,油被氧化而生成水和酸,都会使油逐渐老化。正确区分绝缘的可逆劣化和不可逆劣化,在预防性试验中具有重要意义。

#### (一) 绝缘缺陷分类

##### 1. 集中性缺陷

指缺陷集中于绝缘的某个或某几个部分。例如局部受潮、局部机械损伤、绝缘内部气泡、瓷介质裂纹等,它又分为贯穿性缺陷和非贯穿性缺陷,这类缺陷的发展速度较快,因而具有较大的危险性。

## 2. 分布性缺陷

指由于受潮、过热、动力负荷及长时间过电压的作用导致的电力设备整体绝缘性能下降,例如绝缘整体受潮、充油设备的油变质等,它是一种普遍性的劣化,是缓慢演变而发展的。

既然电力设备绝缘有缺陷,那么它的绝缘性能就要发生变化。就可以通过某种试验手段,测量表征其性能的有关参数,以查找绝缘存在的缺陷。

## (二) 试验分类

### 1. 电力设备试验通常按其对被试验绝缘的危险性进行分类

(1) 非破坏性试验。在较低电压(低于或接近额定电压)下进行的试验称为非破坏性试验。主要指测量绝缘电阻、泄漏电流和介质损耗因数等电气试验项目。由于这类试验施加的电压较低,故不会损伤设备的绝缘性能,其目的是判断绝缘状态,及时发现可能的劣化现象。

(2) 破坏性试验。在高于工作电压下所进行的试验称为破坏性试验。试验时在设备绝缘上加上规定的试验电压,考验绝缘对此电压的耐受能力,因此也叫耐压试验。它主要指交流耐压和直流耐压试验。由于这类试验所加电压较高,考验比较直接和严格,但也有可能在试验过程中给绝缘造成一定的损伤,故而得名。

应当指出,这两类试验是有一定顺序的,应首先进行非破坏性试验,然后再进行破坏性试验,这样可以避免不应有的击穿事件。例如进行变压器预防性试验时,当用非破坏性试验检测出其受潮后,应当先进行干燥,然后再进行破坏性试验,这样可以避免变压器一开始试验就被打坏,造成修复困难。

### 2. 按停电与否进行分类

#### (1) 常规停电试验。

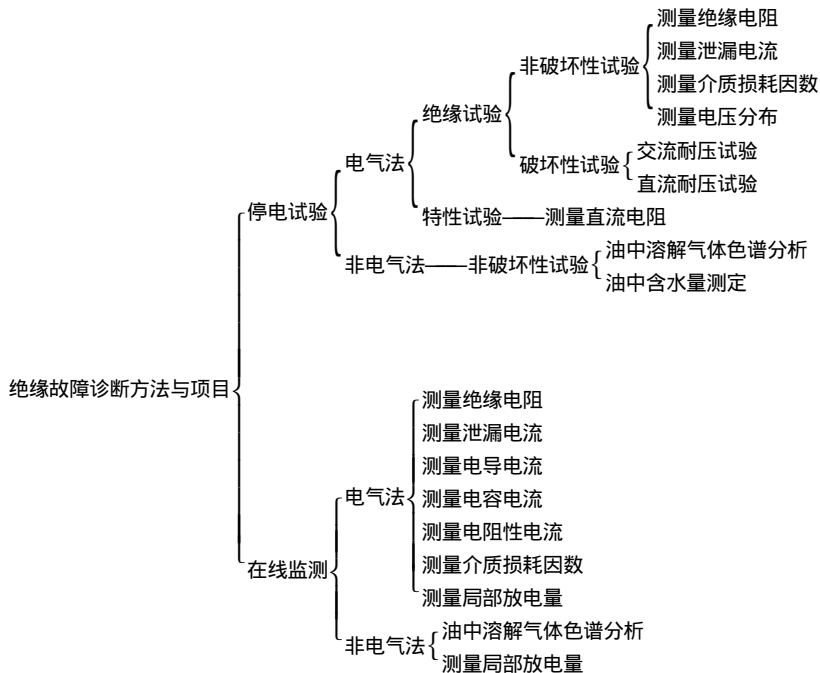
(2) 在线监测。它是指在不影响电力设备运行的条件下,即不停电对电力设备的运行工况和(或)健康状况连续或定时进行的监测,通常是自动进行的。为了便于区别,将对运行电压下的设备,采用专门仪器,由人员参与进行的测量称为带电测量。究其本质,测试都是在运行电压下进行的,只是“自动”程度不同而已。在线监测是试验的重要组成部分,是发展的最高形式。

### 3. 按测量的信息进行分类

(1) 电气法。是指测量各种电信息的方法。如测量泄漏电流、介质损耗因数  $\text{tg}\delta$  等。

(2) 非电气法。是指测量各种非电信息的方法。如油中溶解气体色谱分析和油中含水测定等。

为了清晰,可将上述方法和项目归纳如下:



多年来,常规停电试验对保证电力设备安全运行起到积极的作用,但是随着电力设备的大容量化、高电压化、结构多样化及密封化,对常规停电试验而言,传统的简易诊断方法已显得不太适应。

充油电气设备绝缘诊断管理系统见图 3-32。

新的试验检测参数与方法。色谱分析、局部放电等试验项目的引入,使检测的有效性明显提高,但是对有些缺陷仍难以及时发现。这就需要继续引入一些新的检测参数、新方法和新技术。

4. 绝缘试验数据的环境修正

为了保证试验方法的正确性及试验数据的准确性,应注意气象环境的影响。

(1) 低温试验。温度较低时,绝缘试验结果的准确性较差,不易作出正确判断。表 3-17 为某单位在低温(小于 +50℃)下进行的充油设备的  $t_{g\delta}$  值测试情况。经过在较高温度(13~20℃)下进行复试验,得出结论为约有 58.5% 的设备难以根据低温试验结果作出正确判断。当设备的油中有水时,易发生这种情况,甚至还会造成设备损坏事故。

如一台 SW<sub>6</sub>-220 型油断路器的端部密封不良,使油中含水,试验 B 相油的击穿电压仅为 18.8kV,冬季复试油的击穿电压却合格了(其间未作任何处理),而次年春季该相断路器即发生爆炸。

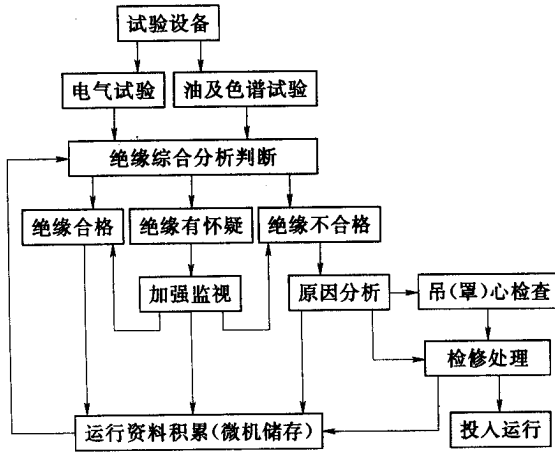


图 3-32 充油电气设备绝缘诊断框图

表 3-17 低温设备绝缘试验结论分析

单位	试验设备数量	高温、低温下均良好	试验结果不一致情况				
			低温不良 高温良好	低温良好 高温不良	低温良好 高温可运行	低温不良 高温可运行	低温不能 作结论
件	106	44	14	8	4	2	34
%	100	41.5	13.6	7.4	3.76	1.89	32.1

又如一台 35kV 油纸电容型套管爆炸,事故后发现套管中有冰渣,而此套管在上年冬季试验为合格。

国际电工委员会(IEC)及我国国标规定,在试验室进行设备绝缘试验的温度为 +10℃,有关规程规定,绝缘试验应在良好的天气、且周围空气温度不低于 +5℃ 的条件下进行。因此,应尽量避免在低温下进行设备的绝缘试验。

(2) 空气相对湿度的影响。空气相对湿度,对设备绝缘试验结果影响较大,甚至会引起误判断。表 3-18 为 LCLWD-220 型电流互感器在不同湿度下的  $t_{g\delta}$  值测试结果。

表 3-18 不同空气相对湿度下电流互感器的  $t_{g\delta}$  测试值

相 别	不同空气相对湿度下的 $t_{g\delta}$ 值(%)		
	空气相对湿度 70% ~ 80%(32℃晴)		气相对湿度 36% (19℃晴)
	瓷套表面未屏蔽时	瓷套表面屏蔽时	
A	1.255	1.198	0.433
B	1.525	1.425	0.525
C	1.215	1.215	0.627

注 两次试验间对电流互感器未进行过检修处理。

从表中可以看出,两种相对湿度下测得  $t_{g\delta}$  值相差 2 倍以上。当空气相对湿度低时,试验结果正常,当湿度大时往往不合格,特别当表面脏污时相差更大。因此,为避免湿度影响试验结果的准确性,绝缘试验应在天气良好、干燥环境条件下进行,有关规程中暂定天气相对湿度不高于 80%。试验中除记录环境温度外,还应记录湿度,以便积累经验。

(3)对试验结果的温度换算。随着经验的积累,不少地区发现推荐的温度换算系数或公式都是近似的。当温差越大时,换算值的误差越大,绝缘受潮程度不同的设备,温度换算系数也不相同。如某地区曾发现在套管试验中,按照温度换算系数换算后的数值与标准值相比,在冬天试验的结果容易合格,夏天则不容易合格。某单位对套管的温度换算系数进行试验验证:当温度大于 20℃ 时温度换算系数偏高,当温度小于 20℃ 时温度换算系数又偏低。当温差在 20℃ 以内是适合的,超过这一范围,则误差较大。

影响温度换算的因素较多,如设备的新旧程度、绝缘的受潮程度、材质的性能以及制造工艺等。因此,对温度换算系数,一般只能作为综合分析绝缘状况时的参考。

规程中一般仅规定了一定温度下的“标准值”,即要求尽可能在相近温度下进行设备的绝缘试验,以减少由于温度换算引起的误差。

#### 5. 加强对试验结果的综合分析和判断

对试验结果必须全面地、历史地进行综合分析,掌握设备性能的变化规律和趋势。对试验结果的综合分析和判断,就是通过设备历次全部试验项目和同类型设备的试验结果进行比较分析,及与规程规定值比较;与设备历年(次)的试验结果比较;与同类型设备的试验结果比较,进行全面衡量。按这些要求进行综合分析,设备正常时,绝缘特性不应有显著差别,否则,应判断为不合格。对怀疑有不合格的设备,可采取缩短试验周期的措施,加强监视绝缘的变化趋势。

表 3-19 为充油电气设备试验结果的综合分析和判断实例。从表中可以看出,有的设备绝缘试验值并未超过规程规定值,但经综合分析,能及时发现缺陷。也有的设备,由于未进行综合分析,误认为合格,投运后不久即发生损坏事故。



表 3-19 少油设备绝缘试验结果的综合分析和判断实例

设备名称	绝缘特性				规程 规定值	油的击穿 电压 (kV)	绝缘变化 趋势	综合分 析结论	
	绝缘 电阻 (MΩ)	泄漏 电流 ( $\mu$ A)	tg $\alpha$ (%)						
			上年	本年					
220kV 电流互 感器( LCL - -WD-220 型)	10000		0.41	1.4	tg $\delta$ 值 不大于 1.5%	30.35 (从互感 器内放 出 3.5 ~ 4kg 油 和水后 的测得 值)	(1)tg $\delta$ 值 增长 2.4 倍 (2)C <sub>x</sub> 值 增长约 10% (3)色谱分 析不合格	绝缘不合格	
66kV 电 流互感 器(AOF 型)	A	10000		0.58	2.98	tg $\delta$ 值不 大于 3%	50	tg $\delta$ 值增 长 4.1 倍	绝 缘 不 合格
	C	10000		0.58	7.4		50	tg $\delta$ 值增 长 11.8 倍且超过 规定值的 1.5 倍	绝 缘 不 合格
少油断 路器(SW <sub>6</sub> - 220 型)	A	10000	2			泄 漏 电 流 一 般 不 大 于 10 $\mu$ A	B 相 18. 8	B 相泄 漏电 流异 常,油 击 穿电 压 仅 为 18. 5kV, 油 中 有 水	绝 缘 不 合格
	B	5000	7						
	C	10000	2						
少油断 路器(SW <sub>2</sub> - 60 型)	A	800	7			泄 漏 电 流 一 般 不 大 于 10 $\mu$ A		A 相泄 漏电 流 值 异 常, 经 5 个 月 后 增 至 62 $\mu$ A	绝 缘 不 合格
	B	5000	1						
	C	5000	1						

设备名称		绝缘特性			规程 规定值	油的击穿 电压 (kV)	绝缘变化 趋势	综合分 析结论	
		绝缘 电阻 (MΩ)	泄漏 电流 (μA)	tgα (%)					
				上午					本年
110kV 电 流互感器	A	10000		0.213	0.96	tgδ 值不 大于 3%	A 相 tgδ 值增长 4.1 倍, 比 B、C 相增长 7.4 倍	绝缘不 合格	
	B	10000		0.128	0.125				
	C	10000		0.152	0.173				

如表中的 220kV 电流互感器的  $\text{tg}\delta$  值为 1.4%，未超过规定值（不大于 1.5%），但投运 10h 后发生爆炸。

综合分析如下：①互感器的  $\text{tg}\delta$  值虽未超过规定值，但比上年的 0.41% 增长 2.4 倍，在取油样试验时，曾从互感器中放出 3.5 ~ 4kg 油和水后，油的击穿电压才合格，说明  $\text{tg}\delta$  值的增长是由于进水受潮所致；②互感器的电容量  $C_x$  值比上年增长 10，与油中气体色谱分析结果相吻合（油样是事故前取），分析结果：氢  $57 \times 10^{-6}$ ，烷  $14 \times 10^{-6}$ ，乙烯  $1.6 \times 10^{-6}$ ，乙烷  $11 \times 10^{-6}$ ，总烃  $60.5 \times 10^{-6}$ ，这个组成表明互感器的电容屏之间可能存在击穿短路故障。

事故后查明受潮原因：①互感器端部密封胶囊的连接处压偏；②加装的防雨帽在运行中掉下后，未能及时装上，致使密封不良进水。

综合分析和判断设备绝缘状况时，注意下列各点：

（1）运行中的国产少油设备，较普遍存在端部结构密封不良，易进水受潮的薄弱环节，应予以特别注意。对不合格的设备，应加强分解试验，以便查找缺陷部位。

（2）油中气体色谱分析是判断充油设备内部是否存在潜伏性故障的重要手段，较为方便、灵敏，应将其结果与电气试验结果相配合进行分析判断。

（3）图 3-32 示出充油电气设备绝缘诊断全过程的管理系统框图，图中给出了全过程中各个环节间的次序和相互关系。

### （三）在线监测

由于绝大多数故障在事故前都有先兆，这就要求发展一种连续或选时的监视技术，在线监测就是在这种情况下产生的。由于现在不少设备的运行电压已远高于停电后的试验电压，如能利用运行电压本身对高压电力设备绝缘情况进行试验，这样就可以大大提高试验的真实性和灵敏度，以便及时发现绝缘缺陷，这是在线监测的一个重要出发点。

随着传感技术、光纤技术、计算机技术等的发展和应用，为在线监测技术揭开了新的篇章。图 3-33 示出了在线监测中一个最基本的流程示意图。由各种传感器系统所获得和各种信号（采集到的可能是电气参量，也可能是温度、压力、超声等非电气参量）经过必要的转换后，统一送进数据处理、分析系统。当然，为了采集及处理不同的参量，还需要相应的硬件与软件来支持。在综合分析判断后给出结果，既可以用微型打印机打印，也可以直接存盘或屏幕显示，如有“超标”，可立刻发出警报，也可与上一级检测中心相连，即形成多级监控系统的一部分。这时，为轻便起见，在设备旁边的在线监测仪一般可用单片（或单板）机来完成，而在变电站里另用个人计算机即可对各设备、各参量统一进行分析处理，实现存贮、分析、对比、诊断等功能。

#### 1. 在线监测类型

（1）集中式实时在线监测系统。这类系统通常是由安装在设备上的传感器、信号转换装置、信号传输电缆、信号显示和信号分析装置组成。为了实现整座变电站的在线监测，常常将各种监测信号集中传送到一台

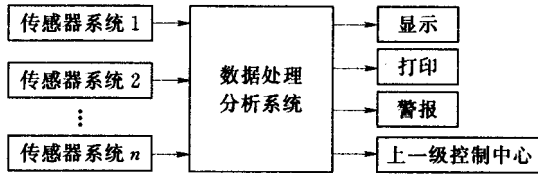


图 3-33 在线监测示意图

微机,由微机来承担各类数据的采集、处理、分析、显示和报警等方面的工作。发展成为多功能、全自动的绝缘在线监测系统。

(2)便携式在线监测系统。这类系统可以由安装在运行设备上的传感器、信号转换器和专用便携式信号接收机组成。某些便携式绝缘监测仪还可以自成系统独立完成对运行设备的探测,无需在运行设备上安装传感器。

集中式实时在线监测系统与便携式在线监测系统所取得的实际效果相近,但在经济效益、稳定性和运行维护等方面,便携式在线监测技术具有明显的优势,因此在同等的情况下,目前宜大力推广便携式在线监测技术和监测装置,具体如下:

(1)变压器:变压器油中气体在线监测装置。油浸变压器实时分析仪,在线油中分析仪,变压器局放监测仪,声电局放监测仪。

(2)断路器:GIS 局部放电的超高频法,电磁结合法和静电结合法(电气法),局放的振动法,声测法,光学和化学诊断法。

(3)电缆:XLPE 电缆的直流成分法,直流重叠法,在线  $\text{tg}\delta$  法,低频法,零相电流法及复合判定法;XLPE 电缆局部放电的磁轭线圈法,超声波法,射频探测法,其电缆接头的局部放电的金属箔电极法,超声波法。

(4)避雷器:MOA 的带电监测阻性泄漏电流的补偿法,谐波法,避雷器的在线泄漏电流监测。

(5)电容型设备:电容型设备的数采谐波分析法。

## 2. 人工智能在绝缘诊断中的应用

20 世纪 80 年代以来,人工智能专家系统,神经网络及模糊集等技术引入电气设备的绝缘诊断。具体如下:

变压器:高压变压器油气分析专家系统,变压器油中气体分析故障诊断专家系统,国内电力变压器故障诊断专家系统,变压器的模糊诊断法。

断路器:基于声测法的 GIS 绝缘异常诊断专家系统。

## 二、化学诊断

化学诊断技术就是通过润滑油磨损颗粒,绝缘油和绝缘材料产物的分析,离线和在线化学监测仪表等的化学分析技术。并通过此来诊断设备状态,预测设备寿命。

电力设备化学诊断技术主要有:绝缘油溶解气体分析,润滑油油样,绝缘劣化产物,汽水质量监测,腐蚀等。

### (一)绝缘油溶解气体的检测诊断

#### 1. 变压器内析出气体的原因和特征

利用气相色谱法预测变压器的潜伏性故障是通过定性、定量分析溶于变压器油中的气体来实现的。运行中的油浸变压器,其变压器油和有机绝缘材料在热和电的作用下,会逐渐老化和分解,产生少量的各种低分子烃类及二氧化碳、一氧化碳等气体,当存在潜伏性过热或放电故障时,会加快这些气体产生的速度。随着故障的发展,分解出的气体形成的气泡在油里经对流、扩散,不断溶解在油中。当产气量大于溶解量时,还会有一部分气体进入气体继电器。由于故障气体的组成和含量与故障的类型和故障的严重性有密切关系,所以定期分析溶解于变压器油中的气体就能及早发现变压器内部存在的潜伏性故障,并随时掌握故障的发

展情况。

在一般情况下,变压器油中是含有溶解气体的,新油含有的气体最大值约为  $\text{CO}$ — $100\mu\text{L/L}$ ,  $\text{CO}_2$ — $35\mu\text{L/L}$ ,  $\text{H}_2$ — $15\mu\text{L/L}$ ,  $\text{CH}_4$ — $2.5\mu\text{L/L}$ 。运行中有少量的  $\text{CO}$  和烃类气体。但是,当变压器有内部故障时油中溶解气体的含量就大不相同的。变压器内部故障时产生的气体及其产生的原因如表 3-20 所示。

表 3-20 特征气体产生的原因

气体	产生的原因	气体	产生的原因
$\text{H}_2$	电晕放电、油和固体绝缘热分解、水分	$\text{CH}_4$	油和固体绝缘热分解、放电
$\text{CO}$	固体绝缘受热及热分解	$\text{C}_2\text{H}_4$	固体绝缘分解、放电
$\text{CO}_2$	固体绝缘受热及热分解	$\text{C}_2\text{H}_4$	高温热点下油和固体绝缘热分解、放电
烃类气体		$\text{C}_2\text{H}_2$	强弧光放电、油和固体绝缘热分解

根据模拟试验和大量的现场试验,电弧放电(电流大)使油主要分解出乙炔、氧及较少的甲烷;局部放电(电流较小)主要分解出氢和甲烷;变压器油过热时分解进氢和甲烷、乙烯、丙烯等,而纸和某些绝缘材料过热时还分解出一氧化碳和二氧化碳等。表 3-21 列出了各种故障下放出的主要气体成分。

表 3-21 各种故障下油和绝缘材料放出的主要气体成分

气体成分	强烈过热		电弧放电		局部放电	
	油	油和绝缘材料	油	油和绝缘材料	油	油和绝缘材料
氢( $\text{H}_2$ )	△	△	△	△	△	△
甲烷( $\text{CH}_4$ )	△	△	○	○	△	△
乙烷( $\text{C}_2\text{H}_6$ )	○	○				
乙炔( $\text{C}_2\text{H}_4$ )	△	△	○	○		
乙炔( $\text{C}_2\text{H}_2$ )			△	△		
丙烷( $\text{C}_3\text{H}_8$ )	○	○				
丙炔( $\text{C}_3\text{H}_4$ )	△	△				
一氧化碳( $\text{CO}$ )		△		△		○
二氧化碳( $\text{CO}_2$ )		△		○		○

注:△表示主要成分;○表示次要成分。

试验研究及实践均表明,故障点温度较低时,油中深解气体的组成主要是  $\text{CH}_4$ 。随着温度升高,产气率最大的气体依次是  $\text{CH}_4$ 、 $\text{C}_2\text{H}_6$ 、 $\text{C}_2\text{H}_2$ 。通常油中的  $\text{C}_2\text{H}_6$  含量小于  $\text{CH}_4$ ,这是由于  $\text{C}_2\text{H}_6$  不稳定,在一定的温度下易分解为



可见  $\text{C}_2\text{H}_4$  与  $\text{H}_2$  是相伴而生的。

## 2. 根据气体含量比值分析判断

气体含量比值分析方法的原理是基于油和固体绝缘材料在不同的温度、不同的放电形式下产生的气体也不同。当总烃含量超过正常值,计算  $\text{C}_2\text{H}_2/\text{C}_2\text{H}_4$  的比值小于 0.1 时为过热性故障,大于 0.1 时为放电性故障。计算  $\text{C}_2\text{H}_2/\text{C}_2\text{H}_6$  的比值可确定其故障性质,当比值小于 1 时一般为低温过热,比值大于 1 时小于 3 时,

为中温过热,大于3时为高温过热故障。而计算  $\text{CH}_4/\text{H}_2$  的比值可确定是纯放电还是放电兼过热故障,比值小于1时放电故障,大于1为放电兼过热故障。

电路故障和磁路的故障的产气特征有差异。如果故障在导电回路,往往产生  $\text{C}_2\text{H}_2$ ,且含量较高, $\text{C}_2\text{H}_4/\text{C}_2\text{H}_6$  比值也较高, $\text{C}_2\text{H}_4$  的产气速度往往高于  $\text{CH}_4$  的产气速率。磁路故障一般无  $\text{C}_2\text{H}_2$  (或者很少,只占氢炔总量的2%以下),而且  $\text{C}_2\text{H}_4/\text{C}_2\text{H}_6$  的比值较小,一般在6以下。

计算  $\text{CO}$  和  $\text{CO}_2$  气体含量的比值,可判断固体绝缘中的含水量,含水量大时, $\text{CO}/\text{CO}_2$  气体含量比值小。故障温度高且时间长时, $\text{CO}/\text{CO}_2$  气体含量的比值大。而严重故障时,生成的  $\text{CO}$  来不及溶解而导致故障,这在  $\text{CO}/\text{CO}_2$  气体含量的比值上得少到反映。IEC 导则推荐以  $\text{CO}/\text{CO}_2$  气体含量比值作为判据,认为该比值大于0.33或小于0.99时,很可能有纤维绝缘分解故障。

烃类气体比值判断方法如表3-22所示。

表3-22 故障性质与气体含量比值的关糸

故障性质	$\text{C}_2\text{H}_2/\text{C}_2\text{H}_4$	$\text{C}_2\text{H}_4/\text{C}_2\text{H}_6$	$\text{CH}_4/\text{H}_2$
低温过热 < 300℃	< 0.1	< 1	无关
中温过热 300 ~ 700℃	< 0.1	< 1 比值 < 3	无关
高温过热 > 700℃	< 0.1	> 3	无关
高能量放电	< 0.1 比值 < 3	无关	< 1
高能量放电兼过热	< 0.1 比值 < 3	无关	> 1
低能量放电	> 3	无关	< 1
低能量放电	> 3	无关	> 1

### 3. 根据三比值法分析判断

基于油中溶解气体类型与内部故障性质的对应关系,人们先后提出了多种以油中特征气体为依据来判断设备故障的方法。1970年道奈堡提出了区分热性故障和电性故障的  $\text{C}_2\text{H}_2\text{CH}_4/\text{H}_2$  与  $\text{CH}_4/\text{H}_2$  的两比值法;1974年大卫斯提出的氢氧碳元素三角图判断法;同年杜威提出了以  $\text{CH}_4$ 、 $\text{C}_2\text{H}_4$ 、 $\text{C}_2\text{H}_2$  三成分的相对含量为基础的三角图法,又称 PEM 法;1977年罗杰斯提出了三比值法,我国目前普遍推广应用的是 IEC 推荐的三比值法。

所谓的 IEC 三比值法实际上是罗杰斯比值法的一种改进方法。通过计算  $\text{C}_2\text{H}_2/\text{C}_2\text{H}_4$ 、 $\text{CH}_4/\text{H}_2$ 、 $\text{C}_2\text{H}_4/\text{C}_2\text{H}_6$ ,将选用的5种特征气体构成三对比值,在相同的情况下将这些比值以不同的编码表示,如表3-23所示。根据测试结果计算得出编码,并把三对比值换算成对应的编码组,然后查表对应得出故障类型和故障的性质,如表3-24所示。但该法所给编码组并不全,给实际分析工作带来诸多不便。如通过对变压器故障案例分析得出所有编码组与设备故障的对应关系,按三比值法“0、0、0”编码属设备正常老化,没有故障。即根据编码规则和分类方法得到的编码超出了已知的编码列表,因而无法确定故障性质;同时,当多种故障一起发生时,三比值法也难以区分。当气体含量或产气速率尚未达注意值时,应注意不宜应用三比值法进行判断。

表3-23 IEC 三比值法编码规则和分类

特征气体的比值	比值范围编码			特征气体的比值	比值范围编码		
	$\text{C}_2\text{H}_2/\text{C}_2\text{H}_4$	$\text{CH}_4/\text{H}_2$	$\text{C}_2\text{H}_4/\text{C}_2\text{H}_4/\text{C}_2\text{H}_6$		$\text{C}_2\text{H}_2/\text{C}_2\text{H}_4$	$\text{CH}_4/\text{H}_2$	$\text{C}_2\text{H}_4/\text{C}_2\text{H}_4/\text{C}_2\text{H}_6$
< 0.1	0	1	0	1~3	1	2	1
0.1~1	1	0	0	> 3	2	2	2

表 3-24 三比值法故障性质对照表

故障性质	比值范围编码		
	$C_2H_2/C_2H_4$	$CH_4/H_2$	$C_2H_4/C_2H_4/C_2H_6$
无故障	0	0	0
低能量密度的局部放电	0	1	0
高能量密度的局部放电	1	1	0
低能量的放电	1→2	0	1→2
高能量放电	1	0	2
低温过热( < 150℃ )	0	0	1
低温过热( 150 ~ 300℃ )	0	2	0
中温过热( 300 ~ 700℃ )	0	2	1
高温过热( > 700℃ )	0	2	2

由于三比值法的表示方法是每组比值如大于 1 用 1 表示,如小于 1,则用 0 表示,每组比值在 1 左右,表示故障性质的暴露不太明显,比值越大,则故障性质的暴露越明显。若同时有两种性质的故障存在,如 1011,则可解释为连续电火花放电与过热。

4. 根据 TD 图对故障发展趋势判断

当变压器内部存在高温过热和放电性故障时,绝大多数情况下  $C_2H_4/C_2H_6 > 3$ ,编码为 2。于是,可选用三比值中的其余两项构成直角坐标系,以  $CH_4/H_2$  为纵轴, $C_2H_2/C_2H_4$  为横轴,即构成了 T(过热)D(放电)图。由此可见,TD 图判断法主要用于区分变压器是存在过热性故障还是放电性故障,它兼有气体成分谱图法和三比值法的优点。根据历次比值作图,能迅速正确地判断故障性质,有的根据运行经验将其划分成几个区域,能非常直观地反映出故障的发展趋势,如图 3-34 所示。

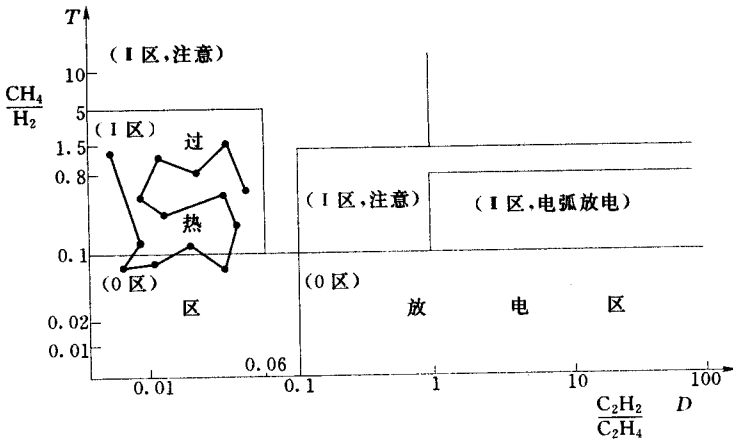


图 3-34 某电力变压器色谱分析的 TD 图

图 3-34 过热区中 0 区为轻微过热。I 区为放电故障的注意区域,应加强跟踪监测。II 区为电弧放电区域,一般已比较重要停电检查。

TD 图法最大的优点,就是根据多次检测的结果可能在图上显示出故障的发展趋势和严重程度。如在图 3-34 中的折线为某变压器 14 次色谱分析的结果,从图中可看出该变压器存在一般性局部发热,并未发展成放电性故障。

### 5. 根据总烃含量及产气速率判断

绝对产气速率能较好地反映出故障性质和发展程度,不论纵比(与历史数据比)横比(与同类产品比),均有较好的可比性。但在实际应用中往往难以求得,因而多采用相对产气速度分析判断。当设备经过真空滤油脱气后,应及时作好绝对产气速率的测量,并根据有关建议利用如下判断标准:

(1) 总烃的绝对值小于注意值、总烃产气速率小于注意值,则变压器正常。

(2) 总烃大于注意值、但不超过注意值的3倍,总烃产气速率小于注意值,则变压器有故障,但发展缓慢,可继续运行并注意观察。

(3) 总烃大于注意值、但不超过注意值的3倍,总烃产气速率为注意值的1~2倍,则变压器有故障,应缩短试验周期,密切注意故障发展。

(4) 总烃大于注意值的3倍,总烃产气速率大于注意值的3倍,则设备有严重故障,发展迅速,应立即采取必要的措施,有条件时可进行吊罩检修。

### 6. 根据总烃变化趋势(总烃随时间的变化曲线)判断

对大量过热性故障变压器的色谱试验分析结果表明,变压器内部存在潜伏性故障时,总烃在随时间的变化曲线上主要有两种表现形式:一种是总烃与时间大致成正比增长关系;另一种是总烃随时间变化没有明显的递增关系,而是出现时增时减的现象。对于第一种曲线,过热常常会从低温逐步发展成为高温,甚至有的迅速发展为电弧放电而造成变压器损坏事故。因此,对这种故障应及时采取措施。对于第二种曲线,可继续运行,但应注意监督。

变压器内部存在高能量放电性故障时,宜根据故障的发展情况来决定检修时间。如果条件允许,在近期内进行检查、消除。如果近期内没有条件,应缩短色谱分析周期,追踪分析,密切注视故障的发展趋势。

故障类型属于过热性的变压器,宜根据电压等级、故障程度、故障发展速度和油中气体的饱和程度来决定维修时间。对于220kV及以下的变压器,首先应考虑产气速率,并且计算油中气体的饱和水平。有时即使油中气体没有饱和,也应创造条件对变压器进行检修。

油中气体分析检测出变压器存在问题时,应结合其他试验,如电气试验、油简化分析试验,以及局部放电测量等进行综合性分析判断。

### 7. 特征气体变化与变压器内部故障的关系

特征气体变化与变压器内部故障的关系,如表3-25所示。

表3-25 特征气体与变压器内部故障的关系

主要特征气体	故障类型	主要特征气体	故障类型
H <sub>2</sub> 高,总烃不高,CH <sub>4</sub> 为总烃的主要成分,有微量 C <sub>2</sub> H <sub>2</sub>	油中电晕(火花放电时总烃高)	C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> 、H <sub>2</sub> 、CO、CO <sub>2</sub> 及总烃均较高	绝缘局部过热或固体绝缘散热不良
C <sub>2</sub> H <sub>2</sub> 高,总烃和 H <sub>2</sub> 较高,C <sub>2</sub> H <sub>2</sub> 为总烃的主要成分	高温电弧放电	总烃高,H <sub>2</sub> 和 C <sub>2</sub> H <sub>2</sub> 均较高	油中裸金属过热并有电弧放电,固体绝缘损伤
总烃及 H <sub>2</sub> 较高,但 C <sub>2</sub> H <sub>2</sub> 未构成总烃中的主要成分	高温热点或局部高温过热	总烃不高,H <sub>2</sub> > 100, CH <sub>4</sub> 占总烃主要成分	局部放电

产生的特征气体如表3-25中所示的常见故障为:引线焊接不良,开关接触不良,导线有毛刺,引线有短路,绕组匝间、层间有短路,铁心穿心螺杆短路或有多点接地,局部过热等。

此外,与油中溶解气体相类似,判断变压器内部故障的方法,是用气体继电器积聚的气体来判断。不过,它只有在变压器内部已有故障时才能判断,而不能发现早期潜伏性故障。这种方法通常是以气体继电器中的气体颜色和故障性质的关系来判断变压器内部故障,如表 3-26 所示。

表 3-26 气体继电器中气体颜色和故障性质的关系

气体继电器中气体颜色	内部故障的性质
黄色不易燃	木质故障
灰白色有臭味、可燃	纸及纸板故障
灰黑色易燃	油故障(放电造成分解)

单以气体有无颜色,或可燃不可燃来判断变压器故障的性质并不大理想。因为在故障初期分解出的气体将与油中溶解的空气相混和,此时聚集在气体继电器中的气体,其成分和故障处的气体成分并不一致,应多取几次气样。

#### 8. 常规色谱分析判断变压器故障的方法

(1)与正常值比较。与油中溶解气体的正常极限的注意值作比较,判定有无故障。溶解气体正常极限注意值也可参见表 3-27。

若氢的烃类气体不超过表 3-27 所列的含量,且气体成分含量一直比较稳定,没有发展趋势,则认为电力变压器运行正常。

表 3-27 油中溶解气体的正常极限的注意值

气体成分	H <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub>	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	C <sub>2</sub> H <sub>2</sub>	总烃(C <sub>1</sub> +C <sub>2</sub> )
正常极限值(μL/L)	150	45	35	65	5	150

(2)根据总烃产气速率判断。当总烃含量超过正常值时,应考虑采用绝对产气速率和相对产气速率判断有无故障。规程规定了由这两种方式(或其中任一种)来表示产气速率。

#### 1) 绝对产气率。每个运行小时产生某种气体的平均值,单位为 mL/h,计算公式为

$$\gamma_a = \frac{C_{i2} - C_{i1}}{\Delta t} \frac{G}{d}$$

式中  $\gamma_a$ ——绝对产气速率, mL/h;

$C_{i2}$ ——第二次取样测得油中某气体的体积分数;

$C_{i1}$ ——第一次取样测得油中某气体的体积分数;

$\Delta t$ ——两次取样时间间隔中的实际运行时间, h;

$G$ ——设备总油量, L;

$d$ ——油的比重,  $\mu/m^3$ 。

2) 相对产气速率。每个月(或折算到每个月)某种气体含量增加值的百分数的平均值,单位为%/月。计算公式为

$$\gamma_r = \frac{C_{i2} - C_{i1}}{C_{i1}} \frac{1}{\Delta t} \times 100\%$$

式中  $\gamma_r$ ——绝对产气速率, %/月;

$C_{i2}$ ——第二次取样测得油中某气体的体积分数;

$C_{i1}$ ——第一次取样测得油中某气体的体积分数;

$\Delta t$ ——两次取样时间间隔中的实际运行时间, 月。



根据规程要求,变压器的开烃绝对产气速率,总放式大于  $0.25\text{mL/h}$ ,密封式大于  $0.5\text{mL/h}$  和相对产气速率大于  $10\%/月$  时的电气设备可判定有故障存在。

产气速率与故障性的关系,如表 3-28 所示

表 3-28 产气速率与故障性质的关系

绝对产气速率( $\text{mL/h}$ )	故障特征
$\geq 10$	带有烧伤痕迹
$> 5$	严重过热性故障,但未损坏绝缘
$> 1$	过热故障

尽管根据气体成分变化分析判断变压器故障尚存在一些不确定性,以及如三比值法中的编码缺损等问题,但油色谱分析的有效性已为大量故障诊断的实践所肯定。

如变压器中的溶解气体  $\text{CO}$  和  $\text{CO}_2$  能够反映一定的纸绝缘故障,上述气体的产气速率也能反映故障的发展情况,并且部分比较成熟的内容已经被列入相关的规程和导则中。

油中特征气体变化与变压器内部故障的关系及判断方法,在变压器故障诊断中虽仍存在有不足,但这些不足正逐步解决,并不断得到现场经验积累的补充和完善。

色谱分析诊断程序见图 3-35。

#### 9. 故障热点温的估算

国际电工委员会 IDC 标准指出,若  $\text{CO}/\text{CO}_2$  的比值大于  $0.33$  或小于  $0.09$ ,及  $\text{CO}_2/\text{CO}$  的比值低于  $3$  或高于  $11$ ,则认为可能存在纤维分解故障,即固体绝缘的劣化。当涉及到固体绝缘裂解时,绝缘纸过热温度判断的经验公式为

$$300^\circ\text{C 以下} \quad T = -241\text{g} \frac{\text{CO}_2}{\text{CO}} + 373$$

$$300^\circ\text{C 以上} \quad T = -1196\text{g} \frac{\text{CO}_2}{\text{CO}} + 660$$

#### 10. 故障回路的总烃安伏法判断

根据上述色谱分析,通过变压器油中含气量的变化,采用三比值法、含量比值法、产气速率法,只能判断变压器的故障程度或发热点的温度范围,但不能判断出故障的回路。而变压器磁路过热故障或导电回路过热故障时,利用总烃含量与电压平方或电流平方成正比关系的总烃安伏法,能比较准确地判断过热故障回路。

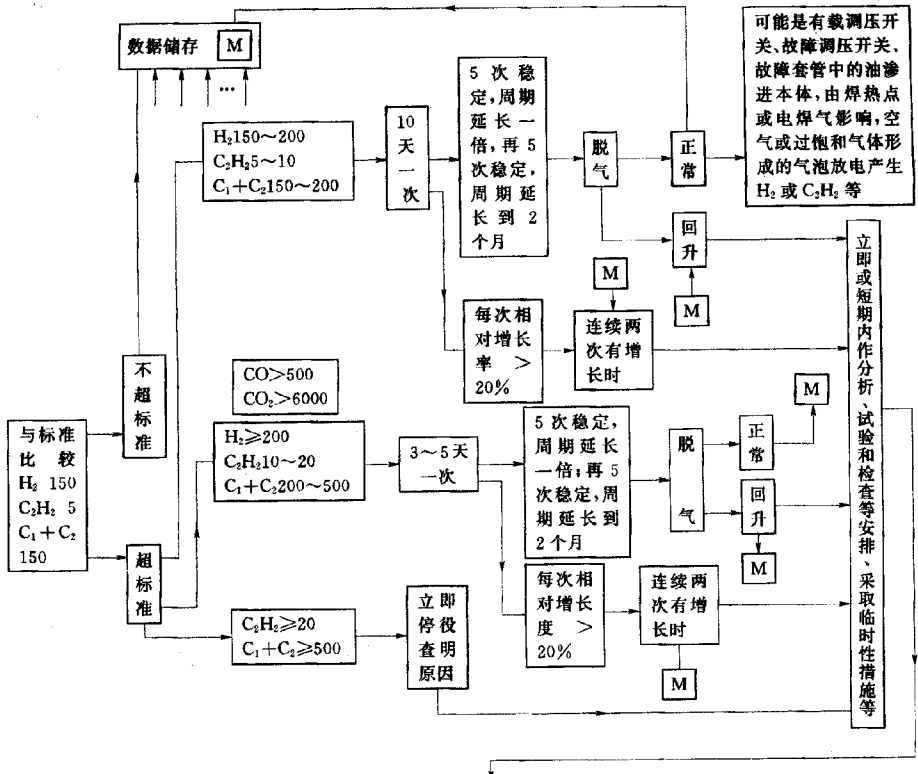
变压器过热故障,导电回路与非导电回路故障时的气体成分无较大区别,这是由于两者温度相近,色谱分析发现在裂解出的气体中主要是甲烷  $\text{CH}_4$  和乙烯  $\text{C}_2\text{H}_4$ ,据此很难判断故障回路。总烃安伏法利用了变压器磁路故障时,油色谱气体各个成分、气体组合、总和及总烃的含量或它们的变化量和速率均大致上与电压平方成正比,而导电回路过热故障时,这些量与电流平方成正比的规律。因此可根据总烃含量与变压器某段时间内每日平均电压及电流变化的关系,来判断故障回路。

总烃安伏法有曲线比较、直线拟合及相关系数三种基本分析方法,可单独使用任一方法。

## (二) 腐蚀诊断

### 1. 腐蚀损伤的分类和腐蚀部位测量与检测

(1) 腐蚀损伤的分类如表 3-29 所示。



应用特征气体法和三比值等法判定故障性质，查阅全部油和电气试验记录。了解运行历史；负荷、温升、短路冲击、内外过电压、过励磁、冷却系统、变压器结构等

过热性故障

放电性故障

一、检查	一、检查
(1) 潜油泵试验(直流电阻,空载试验) (2) 全部潜油泵解体检查(轴承、风扇等磨损) (3) 箱底和铁心底部是否有铁屑 (4) 铁心上部的定位销是否与箱壳接触 (5) 箱壳表面和内部结构上是否有漏磁场引起过热的地方 (6) 低压绕组有统包绝缘的变压器是否有过热的现象(负荷大、温升高、运行年限等) (7) 套管到绕组引线的螺丝帽是否松动, 低压引线的所有接头有否接触不良的情况	(1) 分接开关 (2) 铁心多点接地试验 (3) 所有引线离箱壳的距离 (4) 套管穿心线与铜导管之间有否放电痕迹, 套管上部有否悬浮电位存在 (5) 检查围屏是否有树枝状放电(必要时) (6) 潜油泵检查 (7) 套管到绕组的引线螺帽是否松动 (8) 流量继电器触点是否接触不良
二、试验	二、试验
(1) 停役前测量铁心外引线上的电流(环流)或开路电压 (2) 测量绕组直流电阻, 检查电气回路故障 (3) 铁心试验: 1) 三相和单相(低电压)空载试验, 检查磁回路故障位置 2) 测量穿心螺杆、夹件和钢压环对地的绝缘电阻 3) 测量铁心外表面分布电压, 检查叠片质量 4) 测量铁心内外表面的电压, 检查铁心内外表面有否短路	可考虑和选择的试验项目 (1) 局部放电测试 (2) 超声波探测与定位 (3) 3倍频率感应耐压试验或操作波耐压试验(许可时, 必要时) (4) 铁心叠片试验, 铁心多点接地试验 (5) 变压器受潮试验(绕组的绝缘电阻、介质损失和泄漏油的微水和耐压试验)

图 3-35 色谱分析诊断程序表(气体含量单位: ppm)

表 3-29 腐蚀损伤分类及腐蚀形态

分 类	项 目	腐 蚀 形 态
按腐蚀环境分类	(1)液体环境中 (2)气体环境中	(1)湿蚀 (2)干蚀
实际环境的湿蚀分类	(1)水溶液环境中 (2)大气环境中 (3)土壤环境中	(1)淡水中腐蚀 海水中腐蚀 酸、碱、盐类腐蚀 (2)大气腐蚀 (3)土壤腐蚀(细菌腐蚀)杂散电流腐蚀
按腐蚀面的凹凸形状分类	(1)表面均匀减薄 (2)局部腐蚀	(1)全面腐蚀 点蚀 (2)晶界腐蚀 间隙腐蚀
与腐蚀机构相关的因素分类	(1)与生物有关的腐蚀 (2)与力学因素有关的腐蚀 (3)电化学因素引起的腐蚀	(1)细菌腐蚀(铁、氢、硫磺等) 硫酸还原腐蚀 (2)应力腐蚀 汽蚀 (3)电腐蚀

## (2)腐蚀部位测量与检测。

如表 3-30 所列为根据不同目的对腐蚀部位测量与检测的一般方法。

## 2. 发电机和输变电设备的腐蚀和诊断

发电机输变电设备腐蚀部位及腐蚀模式如表 3-31 所示。

其诊断方法 通过目测检测,超声波图像探伤仪对腐蚀范围、减薄量测量。对给水冷线圈的冷却管可由其他参数的监测,诊断其设备腐蚀情况。

表 3-30 腐蚀部位测量、检测方法

测量目的	测量方法	概 要
厚度测量	(1)超声波厚度计 (2)放射线透视摄影法 (3)电阻法 (4)涡流探伤法	(1)在厚度测量方面这种方法用得较多,精度可达到 0.1mm 左右。局部腐蚀可以测量达数毫米左右 (2)通过放射线同位元素 X 射线图的底片图像求厚度和腐蚀形状分布 (3)向被测物体通一定电流,根据两点间的电位差进行检测 (4)用对比试片与壁厚减薄、裂纹、点蚀比较 进行检测
重量测定	重量测定法	测定单位物件的重量 检测腐蚀损耗量时效变化
腐蚀裂纹的测定	探伤法	对于应力腐蚀裂纹及晶界腐蚀的检测,通常采用超声探伤法、AE 磁探伤、浸透探伤等探伤方法
腐蚀范围等的测量	目视检查	是定性评价腐蚀范围、深度、状态等的基本检查法

表 3-31 发电机输变电设备的腐蚀和诊断

名称部位( 材质 )		腐蚀原因和腐蚀模式
发电机	冷却器	磷铜管 淡水 :低速 :孔蚀 高速 :进出口化学腐蚀 海水 :低速的紊流腐蚀
		黄铜管 淡水 :低速 :附作物堆积脱铝应力腐蚀 高速 :应力腐蚀 海水 :低速 :异物附着腐蚀 高速 :入口腐蚀
		铜镍合金管 淡水 :低速 :附作物堆积局部腐蚀 海水 :低速 :附作物堆积局部腐蚀 高速 :进出口化学腐蚀
		钛管 海水 :异种金属接触电化学腐蚀 ,氢脆腐蚀
		不锈钢管 淡水 :低速 :晶粒、孔蚀 ,SCC 断裂 高速 :局部腐蚀 海水 :低速 :局部腐蚀 高速 :SCC
	水冷线圈	钢管 不锈钢 水中空气 ,pH 影响化学腐蚀结垢 ,电压影响电化学腐蚀 水中空气 ,pH 影响化学腐蚀结垢 ,电压影响电化学腐蚀
转子	护环 高速运转应力 ,结雾 ,产生 SCC	
变压器	密封连接部	受空气、氧气、水的腐蚀
断路器、配电盘、控制盘		受空气、氧气、水的腐蚀

### 三、温度诊断

温度、振动和润滑油是传统的通用机械设备监测的三种方法。利用温度测量对设备的热状态进行监测是一种历史的监测方法。对于热力设备和电气设备的故障诊断 ,采用温度和热象技术确实发挥了不可估量的作用。

#### (一)传统的温度监测及诊断

##### 1. 温度的标定

温度是反映物体冷热程度的物理量。物体冷热程度是与组成物体的分子与原子永不停息的无规则运行 ,即于热运行密切相关的。定量地确定温度是通过引入温标来实现的。通常有摄氏温标和绝对温标。

##### 2. 常规测温装置

(1)接触式测温装置原理及种类。接触式测温装置的工作原理是使测温元件与被测对象有良好接触 ,通过传导和对流达到热平衡而测温。一个完整的接触式测温装置包括 :由感温元件组成的传感器 ,能反映输出信息的显示仪表 ,以及盘式或桶式记录仪表。

1)液体膨胀式温度计。通常利用水银和酒精等测温物质受热后体积膨胀的特性。温度范围 :水银 - 35

~ +350℃,酒精 -200 ~ +300℃。

2) 压力推动式温度计。利用在封闭温包中的液态气体或低沸点液体的饱和蒸汽受热及体积膨胀或压力变化推动传动机构,带动指针并显示温度值。温度范围随系统介质而不同。

3) 热电阻温度计。利用电阻与温度之间呈一定函数关系的金属导体或半导体材料制成感应元件,当温度变化时,电阻随温度变化并通过测量回路的转换,在显示器(二次仪表)示出温度值。金属导体的感温元件多由铂、铜、镍制成,而半导体感温元件则为热敏电阻。金属热电阻元件与温度之间有良好的线性度,复现性好,但热惯性较大,灵敏度为  $1\text{mV}/^\circ\text{C}$ 。半导体热元件可小型化,灵敏度高,电阻温度关系是非线性,复现性差,灵敏差为  $10\text{mV}/^\circ\text{C}$ 。

4) 热电偶温度计。利用两种导体接触部位的温度差所产生的热电势来测温的。电势温度关系线性较好。热电势可用普通电压表(毫伏表)、电位差计或电子电压表测出。常用热电偶为铜/康铜,镍铬合金/镍铝合金等,灵敏高为  $40\mu\text{V}/^\circ\text{C}$ 。

5) 示温片、示温漆、示温涂料。这是当测温要求不高,或在测定复杂形体、运动或旋转体的表面温度时,也常采用的一种快速而经济的方法。通常利用视觉式测温材料制成示温片,根据涂料等变色的程度,可知物体表面温度。

(2) 非接触式测温装置。非接触式测温装置原理是测温元件与被测对象不需接触,而是通过接受热辐射的能量来实现测温。

非接触式测温装置的优点是,由于测温时不会破坏被测对象的温度场,也不必与被测对象达热平衡,故测温装置可大大低于被测对象的温度,且动态特性好,可测运动着的,或小目标及热容量小或温度变化迅速的对象表面温度。其缺点是易受物体辐射率、周围环境状况的影响,难以使测温达到高的精度。

非接触式测温装置的种类繁多,主要有亮度测温 and 比色测温两大类。亮度测温仪的原理是由被测对象在某一波段内辐射亮度的大小来确定,如光学高温计、全辐射温度计。比色测温是根据被测对象对辐射亮度的波长分布规律来确定温度的。如比色温度计、热外测温仪等。

常用非接触式测温仪表种类精度及分度值如下:

1) 光学高温计。光学高温计的结构原理是:利用物体在  $500^\circ\text{C}$  左右时其热辐射进入可见光范围,将物体表面颜色同仪器内加热的灯丝作亮度对比而测温。

2) 全辐射温度计。全辐射温度计的结构原理是:利用热电元件或硫化铝元件测量发热物体表面的辐射能。

3) 比色测温仪。比色测温仪的结构原理是:根据物体辐射功率随光谱波长的变化规律来测温。比色测温仪分别接收两个窄波段处目标辐射率的不同比值,经探测器和电路即可测温。

4) 红外测温仪。它的结构原理是被测物体发出红外线,通过透镜聚集后入射到红外探测器,产生一个正比于辐射能的电信号,经放大处理后即显示温度。

### 3. 常规测温装置的选用

测温仪表的选用首先根据作业条件选择接触式或非接触式,表 3-32 示出两者的比较,然

表 3-32 接触式与非接触式测温方法比较

项 目	接 触 系 统	非 接 触 系 统
保证精确测量的主要要求	(1) 测温设备与被测物体间要求良好的热接触 (2) 测温设备与被测物体接触时,物体温度不发生变化	(1) 要知道被测物体的发射率 (2) 物体的辐射能充分抵达检测器(或充分吸收) (3) 要消除背底噪声

项 目	接 触 系 统	非 接 触 系 统
优 点	(1) 可测物体内部温度 (2) 测量精度要求相对简单	(1) 由于是非接触,对物体无影响,且仅有 $10\mu\text{m}$ 的微小表面也可测量 (2) 易于测量运行物体 (3) 响应时间快,适于测量温度的瞬间变化 (4) 机械式扫描,易于线或面的测温 (5) 对同种材料,可以反复测温,对相对温度测量也能适用
缺 点	(1) 由于测温器的接触,小物体的温度会发生变化,此外因测温器的尺寸受到限制,小于一定限制的物体不能测温 (2) 不能测量运动物体 (3) 响应时间慢,不适于测瞬态现象 (4) 测量范围宽时需要较多的检测器 (5) 在生产过程中,同时测量多个物体时不实用	(1) 仅限于表面温度测量 (2) 当要求精度时,测量过程必须严格

后根据测温范围选定合适产品。

## (二) 电力设备温度诊断

### 1. 电力设备温度诊断的运用范围

温度监测和诊断是一种通用监测手段。除在热力设备和电气设备生产运行作为主要的监测参数外,在热力设备、电力设备的故障诊断中获得广泛运行。如表 3-33 所示。

表 3-33 温度诊断技术在电力设备诊断中应用

主 要 设 备	状 态 特 征
电气设备 (1) 电力变压器 (2) 旋转电机 (3) 输电线路(电缆) (4) 断路器	(1) 接头松,套管过热,接触不良,绕组过热,过负荷,三相不平衡,冷却管堵塞或不畅 (2) 轴承过热,负荷不平衡,绕组断路或短路,电刷,集电环向器发热,过负荷,绝缘状态劣化,接头焊接不牢,冷凝管堵塞等 (3) 接头松动或接触不良,负荷不平衡,过负荷,过热 (4) 接触不良,过负荷,过热
热力设备 (1) 锅炉 (2) 汽轮机及蒸汽系统	(1) 炉管堵塞,结垢,泡包上下壁温差大,耐火材料破损,空预器管堵塞 (2) 汽轮机缸壁温差大,润滑及冷却系统堵塞,轴承过热
辅助机械设备 (球磨机、引送风、机、泵、热交换器)	轴承过热,油温高,热交换器堵塞

## 2. 诊断方法(包括简易诊断 精密诊断)

简易诊断一般系指使用便携式仪器和感官,在工作现场由操作人员进行测试和分析,其目的在于发现热故障,并作出初步判断。一般常规测温装置如接触式的测温装置,不论是液体膨胀式或压力推动式温度计,热电阻式或热电偶式温度计,以及示温计、示温漆、示温漆料等都是适用于简易诊断。而非接触式测温装置的光学高温计、全辐射温度计,比色高温计,虽测温原理不同,但也属于简易诊断。

精密诊断,一般是指使用高精度的测试分析仪器,在工作现场由专职的诊断人员对设备采样的初步分析后,再在实验室中进行精确分析和识别,其目的在于确切分析的判断经过简易诊断难以判断和识别的热故障问题。

通常使用成套的红外热成像系统,即可以构成一个温度的精密诊断系统,进行采集、存贮、处理和分析设备表面的温度场,诊断出设备的热状态的异常原因。

# 四、振动、噪声诊断

## (一) 振动诊断技术

振动诊断技术,以振动信息为特征参数,进行检测和解析,从而判定其劣化状态的方法称为振动诊断技术。

### 1. 简单诊断

目的:检测运动中振动水平及其变化,及早发现异常振动的征兆。

方法:定时、定点巡回监测,使用携带式测振仪或数据采集器,并用磁带记录振动信号。

远距离集中监测固定要装传感器及监测仪,连续记录并超限报警。

### 2. 精密诊断

目的:查清振动异常和超限的原因,确定故障部位并作处理决策。

方法:用精密诊断流程。

## (二) 噪声诊断

在通常情况下,电力设备的噪声如同振动一样是平稳的具有随机过程特性的复合噪声。一旦设备发生故障,则会产生非平稳的随机噪声。因此噪声诊断技术就是通过噪声分析(频谱分析、声级和声强分析)从而确定噪声源,以此来发现设备故障原因的一种诊断技术。

### 1. 调查性噪声测试

测量目的是检验噪声是否超过规定限值,或操作场所的总噪声是否超过允许限值,测量无论在消声室、混响室、试验站或运行现场进行,所需测量仪器一只A计权声级计已能满足要求,测量时只要测出总声功率 $dB(A)$ 就够了。

### 2. 噪声的简易诊断

对于噪声测量有特殊要求的场合,噪声总声功率级超过规定限值或有异常噪声时,除了测定噪声A计权总声功率级之外,往往还需要进行噪声的频谱分析,分析噪声中的主要频率成分,分析主要噪声源,各种测试是属于噪声的简易诊断。

噪声简易诊断的测试系统通常由传声器、声级计、倍频程滤波器(或实时频谱分析仪)和电平记录仪组成。这种测量和分析方法主要用于平稳的随机噪声的分析,一般在试验站或运行现场进行。声级计测量出声压级并计算出总声功率级,而且还可将放大的噪声信号输入倍频程滤波器或实时频谱分析仪,噪声的时域信号或频谱信号,由电平记录仪记录下来,以供分析。

### 3. 噪声的精密诊断

特殊情况下产生非平稳的随机噪声,这种噪声又往往和某些故障直接有关,有些则对噪声有严格的要求,必须对噪声进行精密诊断。对噪声信号进行详细的记录和分析,通过噪声分析来发现某些故障产生的原因。噪声的精密诊断通常分两个步骤,分别在不同地方和时间进行。

## 第四章 电子器件与电子电路

### 第一节 电子器件

#### 一、电子器件简介

##### (一) 电子器件的分类

电力电子器件既是电力电子技术的基础,也是电力电子技术发展的强大动力。电力电子器件的种类和特性直接影响到电力电子系统的体积、价格、性能和发展。

按电力电子器件开通、关断的控制方式,电力电子器件可分为三类,见表 4-1。

表 4-1 电力电子器件的类型

类 型	器 件 名 称	说 明
不控型	大功率二极管	工作机理类似于信号二极管,但它能承受高电压和大电流
半控型	普通晶闸管(SCR)及其派生器件	只能通过控制极控制器件开通,而不能控制其关断
全控型	可关断晶闸管(GTO) 双极型大功率晶体管(GTR,也可缩写为BJT) 功率场效应管(MOSFET) 绝缘栅双极型晶体管(IGBT) 静电感应晶体管(SIT) 静电感应晶闸管(SITH) MOS晶闸管(MCT) MOS晶体管(MGT)	通过控制极可以控制器件的开通和关断 这类器件也被称作自关断器件

图 4-1 给出了电力电子器件的发展概况及趋势。图中示出了自 20 世纪 80 年代后以 GTR、GTO 及功率 MOS 为代表的自关断器件的较大发展,这使得电力电子技术面目一新,与此同时也涌现出许多新颖的器件。值得指出,80 年代末出现的 IGBT,容量较大,开关速度快,易驱动,是较理想的器件,有代替 GTR、GTO 的趋势。另外,功率集成电路(PowerIC)把驱动、保护及控制电路和器件集成在一片芯片上,这给电力电子技术广泛用于家用电器、办公自动化设备等开辟了广阔的前景。

电力电子器件的主要发展趋势如下。



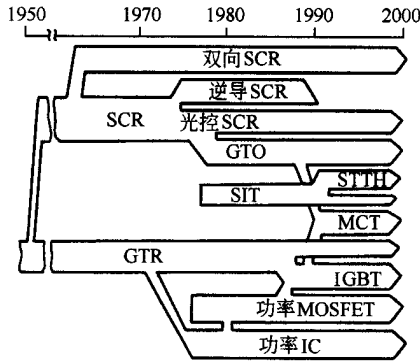


图 4-1 电力电子器件的发展

1. 全控型开关器件向易驱动、大功率、高电流密度和提高开关频率的方向发展,但器件内部结构向微细化方向发展。

2. 器件智能模块化、集成化。在现有 IGBT 芯片和优化集成电路的基础上,通过封装新技术将器件驱动功能、信号传感、自保护、自诊断功能(过电流、过热、短路、欠压等保护)及控制电路等集成为一体,形成一个完整的系统。例如,近年来开发出的以 IGBT 为功率开关器件的模块 IPM,与一般功率模块相比,抗干扰性能、可靠性等均有较大的提高,从而加快了电力电子技术在各个领域的推广应用。

3. 器件材料更新。目前器件所用的半导体材料几乎都是硅,但砷化镓、碳化硅及合成金刚石等新型半导体材料则具有良好的特性。砷化镓(参见第二部分第一章 3.4 节)、碳化硅及合成金刚石都有很宽的频带、很高的载流子迁移率及很好的导电率和导热率。例如,用合成金刚石制成的功率 MOSFET 比硅器件的工作频率高 50 倍,容量提高几个数量级,导通压降低一个数量级,工作结温可达 600℃。

## (二) 电力电子器件的应用

随着电力电子技术的不断发展,一些新颖器件的不断涌现,原有器件的性能逐渐改进,用电力电子器件构成的各种电力电子电路的应用范围与日俱增。表 4-2 给出了部分电力电子器件在某些领域的应用情况。

表 4-2 部分电力电子器件的应用

器件名称	主要应用
功率二极管	可构成各种变换电路,用途极为广泛
普通晶闸管(SCR)	直流电机调速装置、交流电机调速装置、高压直流输电、静止无功补偿、电焊机、照明、电解电源、交流开关、直流开关
可关断晶闸管(GTO)	直流电机调速(斩波)装置、交流电机调速装置、不间断电源(UPS)装置、机车牵引、感应加热
大功率晶体管(GTR)	直流电机调速装置、交流电机调速装置、开关电源装置、不间断电源(UPS)装置、构成 GTR 模块可作录像机和音频电源及其他家电用品
绝缘栅双极型晶体管(IGBT)	直流电机调速装置、交流电机调速装置、不间断电源(UPS)装置、电焊机、感应加热
功率 MOSFET	直流电机调速装置、交流电机调速装置、开关电源装置、不间断电源装置(UPS)、电焊机、录像机、音频电源、汽车电子电器、电子检测、感应加热

## 二、整流二极管

### (一) 工作原理和伏安特性

PN 结具有单向导电特性,利用一个 PN 结可以构成二极管。制造二极管的材料有硅和锗,其伏安特性曲线如图 4-2 所示。二极管的工作原理和一般二极管一样,即加上正向偏置时二极管导通,导通时硅管压降为 0.6~0.8V,锗管为 0.2~0.3V。在 PN 结上加上反向偏置时,二极管阻断,呈现出极大的反向电阻。当加在 PN 结上的反向偏置增加到一定程度时(如大于  $U_{rsm}$ ),二极管将被反向击穿而损坏。

整流二极管的开通和关断总伴随着内部载流子分布的改变,因此开通和关断都需要一定的延迟时间。二极管在反向阻断状态下,当外加电压极性改变时(这时 PN 结为正偏),载流子从高掺杂部分注入 PN 结(这称之为导通惯性),这一过程所需时间被定义为开通时间,开通时间是很小的,但如果这段时间阳极电流增长过快,即  $di_a/dt$  很大,将使载流子来不及沿 PN 结截面均匀扩散,致使器件局部热击穿而损坏。当二极管从正向偏置改为反向偏置时,器件中正向电流减小到零,并有较大的反向电流(即恢复电流)流过,直至基区的载流子释放完,接着承受反向电压,反向电流急剧地降低到零值附近,二极管才接受阻断电压,这种现象称之为阻断惯性。由于载流子释放而造成反向电流的这段时间称之为存储时间  $t_{sig}$ (图 4-3),图中,阴影线部分所示面积为储存电荷  $Q_{sig}$ 。 $Q_{sig}$  与阻断层温度、导通电流和换流电流的陡度成正比。

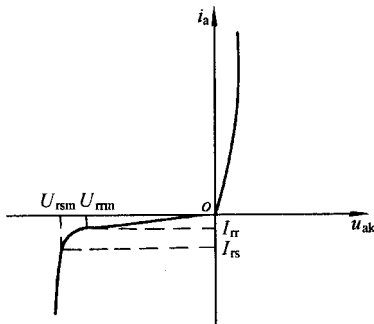


图 4-2 二极管的伏安特性曲线

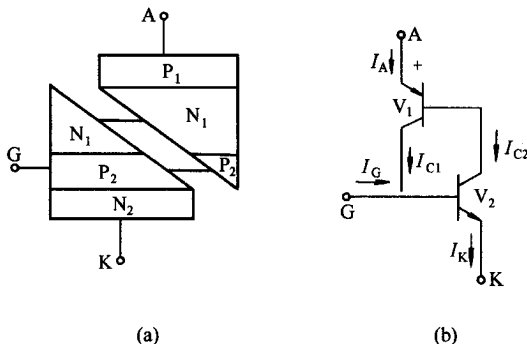


图 4-3 整流二极管的切换过程

图 4-3 中  $t_{rr}$  称为反向恢复时间,它与反向电流上升率、结温以及开关前最大正向电流有关。图中,  $I_{RM}$  称为反向峰值电流。

开通和关断都有延迟时间,这延迟时间都限制了二极管的开关速度。在工频整流电路中,对二极管开关速度要求不高,因而影响不大,在高频电力电子电路中,必须采用恢复时间短的二极管。

综上所述,与普通二极管相比,大功率二极管特点是:

1. 开通和关断都有延迟时间;
2. 关断过程中会出现瞬时反向电流。

目前,用于电力电子电路中的功率二极管及其特点见表 4-3。

表 4-3 常用的功率二极管

类 型	特 点
普通二极管	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 有较大的功率承载能力</li> <li>2. 开通和关断延迟时间较长,因此常用于低频大功率能量变换中</li> </ol>
快恢复二极管(FRD)	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 反向恢复时间短,反向恢复电流也小</li> <li>2. 常用作高频电路中的单向开关</li> <li>3. 由于恢复时间短,<math>di/dt</math>可能过高,因此在某些情况下要采取保护措施</li> </ol>
肖特基二极管(SBD)	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 它不是利用 PN 结,而是利用金属导体和半导体接触时在接触面上产生势垒,这个势垒类似 PN 结,故它又称势垒二极管</li> <li>2. 通态压降很低,约 0.3V,但反向电压也较低,为 50~100V</li> <li>3. 常用于低电压整流电路中。主要用于低压大电流直流电源中</li> </ol>

## (二)主要技术参数

1. 额定正向平均电流  $I_A$ (额定电流) 在规定的使用条件下,容许长时间连续流过工频正弦半波电流的平均值。

2. 反向重复峰值电压  $U_{RM}$ (额定电压) 二极管工作时所能施加的反向最高峰值电压(见图 4-2)。

3. 反向漏电流 反向不重复峰值电压  $U_{RSM}$ 作用下的平均漏电流,称为反向不重复平均电流  $I_{RS}$ ;对应于反向重复峰值电压  $U_{RM}$ 下的平均漏电流,称为反向重复平均电流  $I_{RM}$ 。

4. 正向平均电压  $U_F$  在规定的使用条件下,元件通以工频正弦波额定正向平均电流时,元件阳、阴极间平均值,有时亦称管压降。

5. 浪涌电流 是指连续几个工频周波的过电流。一般用额定正向平均电流的倍数和相应的浪涌时间(工频周波数)来规定浪涌电流。在选择继电器保护时要考虑此值。

## 三、晶闸管及其派生器件

晶闸管俗称可控硅。它是能从断态转入通态,或由通态转入断态的双稳态电力电子器件。晶闸管具有体积小、容量大、耐压高、寿命长、无噪声、控制方便等特点,较广泛应用于大功率的整流、逆变和变换电路,随着应用领域的拓展,还派生出许多不同类型的晶闸管。目前,晶闸管正朝着高电压、大电流、快速、模块化、功率集成化、廉价的方向发展。

### (一)晶闸管的工作原理和伏安特性

#### 1. 工作原理

晶闸管是三端四层器件,在其内部有三个 PN 结( $J_1$ 、 $J_2$ 和 $J_3$ )。从外部看,有阳极 A、阴极 K 和门极 G 三端,如图 4-4(a)所示,图(b)为图形符号。从内部结构来看,晶闸管可以等效为两个互补的共基极连接的晶体管,如图 4-5(a)所示,其等效电路如图(b)所示。设  $T_1$  为 PNP 管,共基极电流放大系数为  $\alpha_1$ , $T_2$  为 NPN 管,

共基极电流放大系数为  $\alpha_2$ 。当器件承受阳极正向电压时,  $J_1$ 、 $J_3$  结正向偏置,  $J_2$  结反向偏置, 器件不能导通, 这种状态称为正向阻断状态(简称断态), 相当于“高阻态”。这时共基连接的晶体管有如下关系式:

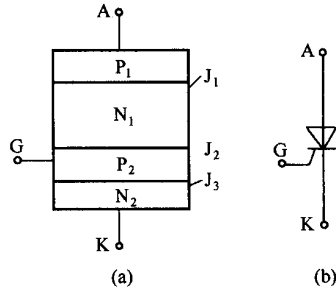


图 4-4 晶闸管结构及符号  
(a) 结构 (b) 图形符号

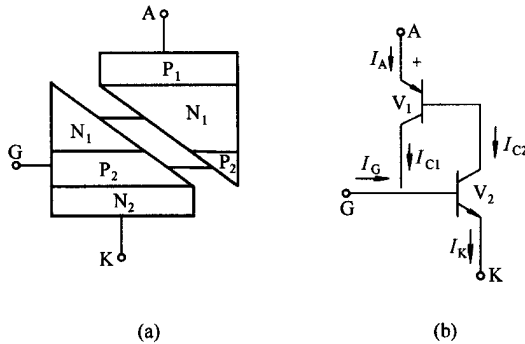


图 4-5 两晶体管的等值电路  
(a) 结构 (b) 等值电路

$$I_c = \alpha I_E + I_{CBO} \tag{4-1}$$

式中  $I_C$  为集电极电流,  $I_E$  是发射极电流,  $I_{CBO}$  为发射极开路时集电极、基极间的漏电流,  $\alpha$  为晶体管共基极放大系数。对于图 4-5(b) 有:

$$I_{C1} = \alpha_1 I_A + I_{CBO1}$$

$$I_{C2} = \alpha_2 I_K + I_{CBO2} = \alpha_2 (I_A + I_G) + I_{CBO2}$$

在门极开路,  $I_G = 0$  时

$$I_A = I_{C1} + I_{C2}$$

$$= \alpha_1 I_A + \alpha_2 I_K + I_{CBO1} + I_{CBO2}$$

$$= (\alpha_1 + \alpha_2) I_A + I_{CBO1} + I_{CBO2}$$

所以

$$I_A = \frac{I_{CBO1} + I_{CBO2}}{1 - (\alpha_1 + \alpha_2)} \tag{4-2}$$

式(4-2)表明电流非常小, 晶闸管中仅流过正向漏电流。

如果在正向阻断状态下, 注入门极电流  $I_G$ , 则式(4-2)变成

$$I_A = \frac{\alpha_2 I_G + I_{CBO1} + I_{CBO2}}{1 - (\alpha_1 + \alpha_2)} \tag{4-3}$$

若  $\alpha_1 + \alpha_2 = 1$ , 由上式可知,  $I_A$  为无限大, 则晶闸管变成导通状态, 实际上  $I_A$  数值由外接负载决定。一旦晶闸管导通, 三个 PN 结均为正偏置, 晶闸管的压降是非常小的, 通常为 1~2V。因此晶闸管导通后相当于“低阻态”。

当晶闸管施加反向电压时(即阳极 A 为负,阴极 K 为正), $J_1$ 、 $J_3$  结处于反偏置状态,器件不导通。

综上所述,晶闸管有如下特性:

(1)晶闸管导通的条件是,阳阴极间必须施加正向电压,门极对阴极施加正向电压(即  $u_{GK} > 0$ ),使门极有  $I_G$ ;

(2)晶闸管在正向电压时,其导通时刻是可控的,在反向电压时则始终处于关断状态,也就是说它有单向导电性质;

(3)晶闸管一旦触发导通,由于内部正反馈,造成了晶闸管处于深饱和状态,门极便失去控制作用,所以晶闸管关断是不可控的。

## 2. 伏安特性

晶闸管阳极和阴极之间的电压  $U_{AK}$  与阳极电流  $I_A$  的关系称为元件的伏安特性,如图 4-6 所示。

(1)正向伏安特性 在这一区可分为正向阻断状态及正向导通状态。当器件施加一定的正向阳极电压,在  $I_G = \alpha$  (即门极开路)的情况下,器件处于正向阻断状态,但是正向阳极电压增加到正向转折电压时,内部  $J_2$  结被击穿,使器件进入开通状态,造成器件失效。在器件导通之前,在很大范围内有很小的正向漏电流。

当外施电压小于正向转折电压时,只要在门极注入规定的电流(一般为 mA 级),器件将在较低的  $U_{AK}$  下进入正向导通状态。正向导通以后的伏安特性与一般二极管正向特性一样,但正向管压降约为 1.5V。

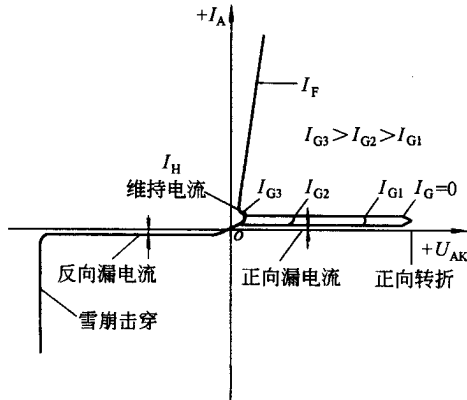


图 4-6 晶闸管伏安特性

(2)反向伏安特性 在反向阳极电压作用下, $J_1$ 、 $J_3$  结反向偏置,器件反向被阻断,只有很小的反向漏电流流过,特性呈“高阻态”,但当反向阳极电压大于反向击穿电压时,反向漏电流剧烈增加,晶闸管发生雪崩击穿。

## (三)晶闸管的主要技术参数

正确使用晶闸管,必须对器件主要技术参数的概念有明确的认识。

### 1. 主要电压参数

(1)断态重复峰值电压。正向阻断状态下可重复施加而不使器件导通的最大电压。一般定义为 90% 正向转折电压,也就是晶闸管额定正向电压。

(2)反向重复峰值电压。重复施加而不使器件反向击穿的最大反向电压。通常定义为 90% 反向击穿电压,也是器件反向电压的额定值。

(3)反向击穿电压。使元件反向雪崩击穿的阳极反向电压。在反向电压达到或超过这个电压时,将造成器件的永久性破坏。

(4)通态平均电压(管压降)。在额定结温条件下,器件通过额定通态电流的管压降平均值。

(5)断态电压临界上升率  $du/dt$ 。在额定结温和门极开路条件下,使器件从断态转入通态的最低电压上升率。

### 2. 主要电流参数

(1) 通态平均电流。在环境温度为  $+40^{\circ}\text{C}$  ,规定的冷却条件下 ,晶闸管器件在电阻性负载的单相、工频、正弦半波 ,导通角不小于  $170^{\circ}$  的电路中 ,当结温稳定在额定值  $125^{\circ}\text{C}$  时所允许的最大平均电流 ,也是器件的额定电流。

(2) 断态平均电流。额定结温下 ,门极开路 ,分别施加  $50\text{Hz}$  正向和反向重复峰压时的器件电流平均值。

(3) 维持电流。在室温和门极开路时 ,在已导通状态下逐渐减小阳极电流 ,最后能维持晶闸管继续导通所需的最小阳极电流。这个电流一般为几十毫安。

(4) 掣住电流。晶闸管从门极触发 ,使其从断态变为通态 ,撤除门极信号后仍能维持导通的最小电流 ,一般为  $2\sim 4$  倍的维持电流。

(5) 浪涌电流。在额定通态电流下稳定工作时 ,器件在一个工频半周中能承受的最大电流。在器件使用寿命期内 ,浪涌次数不能超过允许值。在元件寿命期内 ,浪涌可出现  $100$  次。

(6) 开通阳极电流临界上升率  $di/dt$ 。晶闸管门极触发导通时 ,管子能够承受而不损坏的阳极电流的最大上升率。

## 2. 门极参数

(1) 门极触发电压和触发电流。室温下 ,晶闸管施加  $6\text{V}$  的正向阳极电压时 ,能使器件完全导通所需的最小门极电压和电流。

(2) 门极正向峰值电压和峰值电流。门极允许施加的电压、电流的最大值。

(3) 门极控制的开通时间。晶闸管触发导通时 ,从门极触发脉冲前沿的  $10\%$  到阳极电压下降至  $10\%$  的时间间隔。

## (二) 晶闸管的驱动电路

当晶闸管施加阳极正向电压后 ,器件的开通是通过提供足够的门极触发电流来实现的 ,而门极脉冲的质量对器件开通性能有很大影响 ,特别在大容量装置中采用晶闸管串并联运行方式时 ,有更重要的意义。

晶闸管驱动电路的作用就是向管子门极提供足够的触发电流 ,这种触发电流往往是脉冲形式 ,故称为触发脉冲或触发信号。

### 1. 对触发脉冲的基本要求

(1) 触发脉冲应有合适的功率。为使晶闸管可靠触发 ,触发脉冲必须有足够大的电压、电流 ,但其数值不能超过参数规定的极限。

(2) 触发脉冲要与主电路的交流电源电压同步 ,并且有一定的移相范围。

(3) 足够的脉冲宽度 ,以保证晶闸管在触发脉冲作用期间完全开通。

(4) 足够大的脉冲前沿电流幅值  $I_{\text{CM}}$  和前沿电流上升率  $di_{\text{C}}/dt$  , $di_{\text{C}}/dt$  越大 ,就越能提高触发时刻的正确性。

(5) 晶闸管驱动电路应有较强的抗干扰能力 ,一般与晶闸管控制电路间应有有效的电隔离。

门极触发信号有直流信号、交流信号和脉冲信号三种基本形式。由于直流信号和交流信号存在门极损耗大、精度低等缺点 ,在工程中广泛应用的是脉冲信号。脉冲信号形式很多 ,常用的有尖脉冲、宽脉冲、脉冲列、双脉冲和强脉冲。图 4-7 为典型强触发脉冲波形。图中脉冲幅值为  $I_{\text{CM}}$  ,表示强触发工作幅度 , $I_{\text{CM}} = mI_{\text{GT0}}$  ( $I_{\text{GT0}}$  为正常触发电流 , $m$  为强触发倍数) , $\tau$  为脉冲宽度 ,它与电路结构、换流模式、负载性质和控制方式等因素有关。

2. 驱动电路举例 图 4-8 为驱动电路实例(电压控制型驱动电路) ,电路中 MOS-FET 为功放元件 ,其开关状态由入端信号电平决定。T 为脉冲变压器 ,其任务是把触发信号传输到晶闸管上去 ,并实现触发控制电路与晶闸管电路的电隔离。电路工作原理是 :当入端 S 为高电平时 , $\text{VT}_1$  导通 ,MOSFET 加上正栅压而导通 ,输入电容  $C_{\text{in}}$  被充电 ,且使  $u_{\text{g}} > 0$  ;当 S 端为低电平时 , $\text{VT}_1$  截止 , $\text{VT}_2$  导通 , $C_{\text{in}}$  上电荷沿  $R_{\text{g}}$ 、 $\text{VT}_2$  释放 ,使 MOSFET 迅速关断。

本例输入部分与门极控制电路之间用变压器隔离。高压直流输电用的整流器大多采用光电隔离器(光控晶闸管) ,在这种电路中 ,采用发光二极管和光纤传送门极触发信号 ,有较强的抗干扰能力。

随着微电子技术的发展 ,晶闸管的触发电路已实现了集成化 ,国产 KC(KJ)系列集成触发电路已广泛用

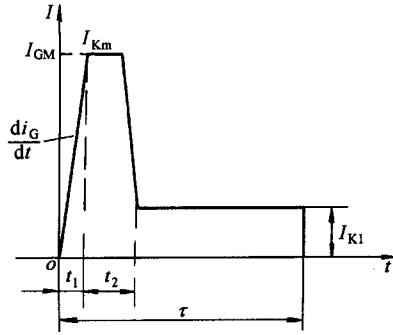


图 4-7 强触发脉冲波形

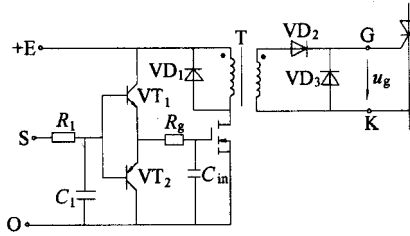


图 4-8 电压控制型驱动电路

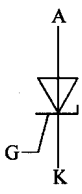
于工业上。

#### (四) 晶闸管的派生器件

为了满足各种电力电子电路的要求,人们利用半导体器件 PN 结复合作用的原理,研制出了性能各异的晶闸管派生器件。其中主要的有门极可关断晶闸管、双向晶闸管和逆导晶闸管等,它们的特性及主要用途见表 4-4。

表 4-4 几种主要的派生晶闸管

名称	特性	型号	图形符号	主要用途
门极可关断晶闸管 (GTO)	门极正信号开通,负信号关断	KG		变频器、逆变器、斩波器、直流开关
双向晶闸管	两个方向均可由门极信号开通(相当于两只普通晶闸管反并联)	KS		交流电路、交流调压、交流调功、无触点开关

名称	特性	型号	图形符号	主要用途
逆导晶闸管 (RCT)	反向导通,门极信号开通(相当于普通晶闸管与功率二极管反并联)	KN		斩波器、逆变器

1. 门极可关断晶闸管(GTO)

门极可关断晶闸管(Gate Turn-off Thyristor),简称 GTO。GTO 内部结构如图 4-9 所示。与普通晶闸管不同之处是门极区范围大大增加,使阴极区被门极区环抱,两个区交叉配置于管芯的一侧,形成多门极、多阴极的梳状结构。因此,从结构上看,普通晶闸管是一个器件,只含有一个晶闸管,而 GTO 则是集成器件,即一个器件是由许多小 GTO 集成在一片硅晶片上构成的。

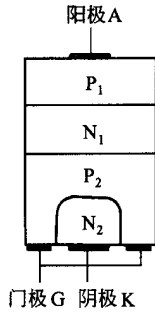


图 4-9 单元 GTO 的结构示意图

GTO 可用正门极信号触发导通,导通后,可用负门极信号控制其关断,因此,它是一种“全控型器件”。与普通晶闸管相比,其优点如下:

- ①用 GTO 构成电力电子装置时,主电路器件少,无需采用换相装置,故装置简单,损耗小,效率高;
- ②GTO 有比普通晶闸管高得多的  $di/dt$  承受能力;
- ③易实现脉宽调制,可改善输出波形。

近年来,随着微电子技术发展,开发了多种 GTO,如逆阻 GTO、无反压 GTO、逆导 GTO、掩埋门极 GTO、放大门极 GTO 和 MOSGTO 等。这些新开发 GTO 的性能都比原有的 GTO 有所改善,例如 MOSGTO,它是 MOSFET 与 GTO 组成的复合型器件,它既有 MOSFET 的高输入阻抗、小控制功率的优点,简化了门极电路,同时又保持了传统晶闸管耐高压,电容量大的优点。

综上所述,目前 GTO 的发展较快,已逐步取代了普通晶闸管,成为大、中容量 10kHz 以下频率的逆变器和斩波器的主要开关器件。

(1) GTO 的工作原理

①开通机理。门极可关断晶闸管开通机理与普通晶闸管类机。如图 4-10(a)所示等值电路,在正向阻断状态下,GTO 门极注入正向电流  $I_G$  后,在图示两个晶体管间发生如下的过程:

$$I_G \uparrow \rightarrow I_K \uparrow \rightarrow \alpha_2 \uparrow \rightarrow I_{C2} \uparrow \rightarrow I_A \uparrow \rightarrow \alpha_1 \uparrow \rightarrow I_{C1}$$

这是一个正反馈过程,其中  $\alpha_1$  和  $\alpha_2$  分别是两个晶体管的共基电流放大系数,它们是随其射极电流增加而增大的变量,当门极电流  $I_G$  满足一定条件后,  $\alpha_1 + \alpha_2$  通过正反馈增加到接近于 1 时,GTO 完全开通。一旦 GTO 进入稳态导通,即使  $I_G = 0$  也不会改变 GTO 的导通状态。



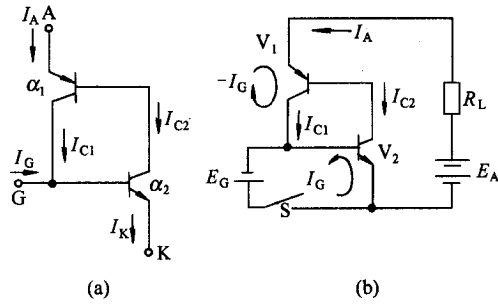


图 4-10 GTO 等值电路

(a) 开通等值电路 (b) 关断等值电路

②关断机理 GTO 的关断机理与普通晶闸管不同。图 4-10(b) 示出其关断等值电路, 当 GTO 加上负电压  $E_G$  (将开关 S 闭合) 后, 晶体管  $V_1$  的集电流  $I_{C1}$  被抽出, 形成门极负电流—— $I_G$ , 此时  $I_{C1}$  减少, 造成  $I_K$  减小, 晶体管  $V_2$  的  $\alpha_2$  也减小, 这样就形成了一个正反馈过程:

$$I_{C1} \downarrow \rightarrow I_K \downarrow \rightarrow \alpha_2 \downarrow \rightarrow I_{C1} \downarrow \rightarrow I_A \downarrow \rightarrow \alpha_1$$

上述过程使  $I_A$  迅速下降, 当  $\alpha_1 + \alpha_2$  降到小于 1 时, 正反馈过程就停止, GTO 内部不再满足自己维持导通的条件, 阳极电流就逐渐下降到零而关断。因此 GTO 的关断是由门极负脉冲完成的。

(2) GTO 的门极特性

GTO 关断时的门极特性与普通二极管一样, 如图 4-11 中曲线①所示。曲线①为关断状态的门极特性, 即阳极电流  $I_A = 0$ 。当门极正向电压增加, 门极电流  $I_g$  也随之增加到曲线 A 点时  $I_g = I_{GA}$ , 晶闸管开始出现正反馈, 因此 A 点是 GTO 由关断变为开通的转折点, 称为导通点。其特性曲线从①段跳到②段, GTO 导通。导通时门极电压的跳变大小与阳极电流大小有关,  $I_A$  越大, 跃增幅度越大。要使 GTO 导通,  $I_g$  应大于  $I_{GA}$ 。

在导通情况下欲关断 GTO, 可给门极施加反向电压, 曲线②为 GTO 由导通到关断所对应的门极特性。从图中看出, 随着门极负向电压的增加, 负门极电流也逐渐增大, 当到达曲线 B 点时, 门极电流  $I_g = I_{GB}$ , GTO 内的正反馈停止, GTO 开始关断, 因此 B 点是 GTO 从导通到关断的转折点, 称为关断点。

当门极负电压继续增长(即为曲线②的虚线部分), 到达 C 点后  $I_A = 0$ , 这时 GTO 才完全关断, C 点所对应的门极负电压  $U_{GC}$  称为门极关断电压。 $U_{GR}$  是雪崩电压。

GTO 的阳极电流  $I_A$  越大, 关断时所需的门极电流也越大, 图 4-11 中曲线③对应的  $I_{A3}$  必定大于曲线②所对应的  $I_{A2}$ 。

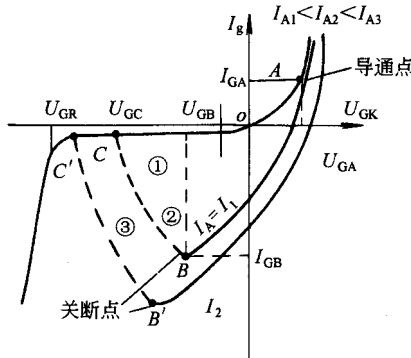


图 4-11 GTO 门极静态伏安特性

(3) GTO 的主要参数

下面只介绍与普通晶闸管有不同意义的参数。

①可关断峰值电流。它是 GTO 的额定电流, 实质上是阳极可关断的最大电流。GTO 的额定电流不完全

是一个恒定值,它与门极负电流、电路参数及运行状态等有关。 $GTO$  工作时阳极电流不能超过产品样本所给出的额定电流值。

②通态电压(管压降)。一般为  $1.5 \sim 3V$ 。

③门极反向关断电流。由导通状态切换至阻断状态所需要的瞬时最大反向门极电流值。一般其值为可关断峰电流的  $1/3 \sim 1/4$ 。

$GTO$  的开关速度远比普通晶闸管高,其工作频率甚至可达  $100kHz$ 。

### 2. 逆导晶闸管

在基本电力电子电路(第三章)中的逆变电路( $DC/AC$ )和变换电路中,经常有晶闸管与整流管反并联使用的情况。根据这种复合使用的要求,人们将晶闸管和整流管制作在同一芯片上,从而派生出逆导晶闸管这一新型晶闸管元件。

逆导晶闸管简称  $RCT$  (Reverse Conducting Thyristor),它的正向具有可控的闸流特性,而反向呈低阻导通特性。其结构示意图见图 4-12(a),工人原理可用图 4-12(b)所示的普通晶闸管的阴阳极间反向并联一只二极管的等值电路来理解。 $RCT$  的伏安特性见图 4-12(c)。

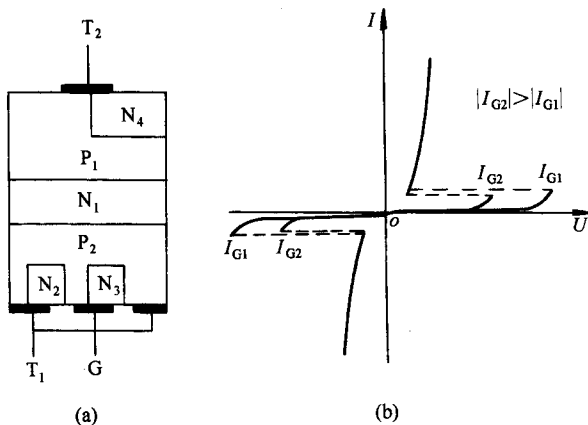


图 4-12 逆导晶闸管( $RCT$ )

(a) 结构示意图 (b) 等值电路 (c) 伏安特性

与普通晶闸管相比较, $RCT$  具有正向压降小、关断时间短、高温特性好、额定结温高等特点。

### 3. 双向晶闸管

双向晶闸管是一个  $NPNP$  五层结构两个方向都可触发导通的器件,其结构示意和伏安特性如图 4-13 所示。

当外施电压使主电极  $T_2$  相对于  $T_1$  为正时,工作于第 I 象限;当外施电压极性反向时,工作于第 III 象限[见图 4-13(b)],不论工作在哪一象限,用不同的门极触发信号(门极  $G$  相对于  $T_1$  可为正也可为负)均可使双向晶闸管导通。

双向晶闸管的灵敏度较低,关断时间较长,容量也较小,所以实际应用时大多仍用两个普通晶闸管反向并联。

## 四、功率晶体管

功率晶体管(*Giant Transistor*,简称  $GTR$ ),也称电力晶体管(*Power Transistor*,缩写为  $PT$ ),又称双结型晶体管(*Bi-Junction Transistor*)。通过基极信号电流可方便地进行开关控制,是一种电流控制型的全控开关器件。

在电力电子装置中,为了减少基极驱动功率,常把  $GTR$  接成达林顿(*Darlington*)电路。近年来,为使用方

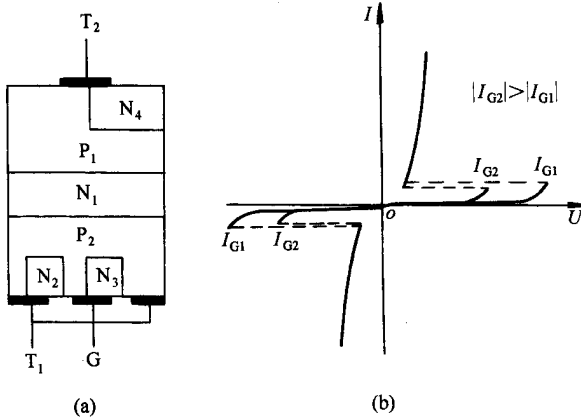


图 4-13 双向晶闸管  
(a) 结构示意图 (b) 伏安特性

便和提高其可靠性,常常又采用模块式封装。

与晶闸管相比,GTR的容量小,过载能力较差,制造工艺也较复杂,但GTR是全控型(自关断)器件,而晶闸管是半控型器件。

### (一)工作原理和伏安特性

#### 1. 工作原理

GTR是由三层两个PN结构成的。三层半导体结构可以是PNP,也可以是NPN,但作为电力电子开关器件,由于NPN型易于制造,故大多采用NPN型GTR。图4-14示出了GTR的内部结构和图形符号。

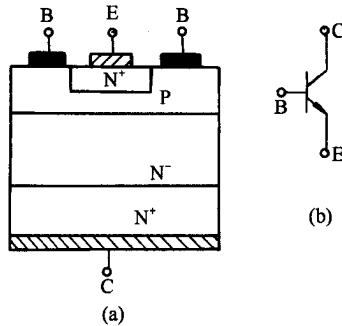


图 4-14 功率晶体管  
(a) 结构示意图 (b) 图形符号

在电力电子电路中,GTR总是工作在开关状态,即有导通(饱和)和阻断(截止)两种状态。其内部载流子运动过程、偏置等与小信号晶体管类似,请参阅有关电子技术书籍,这里不再讨论。

#### 2. 伏安特性

功率晶体管运行时大多采用共射极线路,如图4-15(a)所示,其输出伏安特性如图4-15(b)所示。由图(b)可看出,曲线平面可分为三个区:阻断区(截止区)、饱和区和线性区(放大区)。在电力电子电路中,GTR稳定运行时,因功率损耗的原因,它应工作于截止区和饱和区。晶体管进入饱和区后的饱和压降大小直接关系到器件导通时的功率损耗,所以在大功率运行时,这是十分重要的指标。

此外,晶体管必须用基极连续的电流驱动信号才能维持在导通状态,当移去这个信号时,GTR便自动关断,故它具有自关断性能。

#### 3. 开关特性

图4-16(a)为共射极电路基极加正阶跃信号,GTR由截止状态转为饱和和导通状态的变化过程。设这时

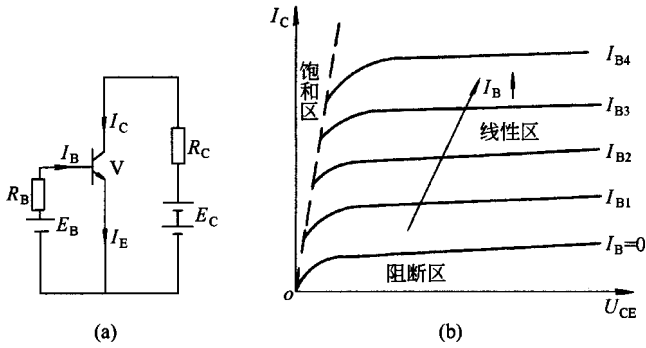


图 4-15 功率晶体管的伏安特性

(a) 共射极接法 (b) 输出伏安特性

集电极电流为  $i_C$ 、集电极电压  $u_{CE}$ ，则动态功率损耗  $P = u_{CE} \cdot i_C$ 。由于结电容和过剩载流子的存在，集电极电流的变化总是滞后于基极电流的变化，而且波形倾斜。GTR 由截止到饱和和导通的过程所用的时间称为开通时间，即

$$t_{on} = t_d + t_r$$

式中  $t_d$  为从基极输入脉冲开始到  $i_C$  仍保持为截止时的小电流 (10%  $I_{CS}$ ,  $I_{CS}$  为集电极饱和电流) 所需的时间，也称延迟时间。 $t_r$  为从  $t_d$  开始  $i_C$  增大到接近饱和值  $I_{CS}$  的 90% 所需的时间，也称上升时间。图中曲线  $u_{CE}$  和  $P$  为 GTR 集电极电压和功率损耗在开通过程中的变化情况。

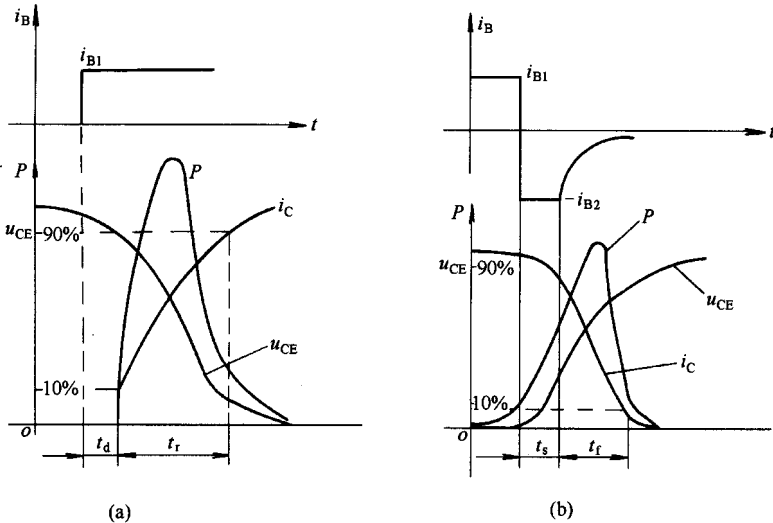


图 4-16 功率晶体管的开关特性

(a) 开通过程 (b) 关断过程

图 4-16(b) 为共射极电路在饱和和导通状态时基极加负信号，GTR 由导通到关断的变化过程。刚开始  $i_C$  不是立即减少，要经过  $t_s$  时间后  $i_C$  才减小到 90%， $t_s$  称为存储时间，通常为  $3 \sim 8 \mu s$ ，然后集电极电流开始减小，直到下降到截止状态时的电流 (约 10%  $I_{CS}$ )，这一过程所需要的时间称为下降时间  $t_f$  (约  $1 \mu s$ )。从反向信号加到基极，晶体管经过存储和下降阶段才返回到截止区，称为关断时间，用  $t_{off}$  表示，即

$$t_{off} = t_s + t_f$$

大功率晶体管的关断时间为几十纳秒至几微秒。

## (二) 主要技术参数

制造厂提供的参数，一类为性能参数，另一类为极限参数。使用时不能超过极限参数，否则将损坏晶体

管。

1. 最高工作电压  $GTR$  有两个  $PN$  结, 它的所有电压定额都与这两个  $PN$  结 ( $BC$  结和  $BE$  结) 有关。如反向电压超过额定值,  $PN$  结可能被击穿。若  $PN$  结击穿后电流过大, 结温过高, 会导致晶体管烧毁; 若击穿后引起的损耗使结温未超过最大允许值, 则一般不会损坏晶体管。

图 4-17 示出了共射连接的  $GTR$  不同的基极电路接线状态下的集电极击穿特性。图中  $BU_{CEO}$  为基极开路, 集电极-发射极之间允许的最高电压;  $BU_{CER}$  为基-射极间外接电阻  $R$ , 集电极-发射极之间允许的最高电压;  $BU_{CES}$  为基-射极短路时, 集电极-发射极之间允许的最高电压;  $BU_{CEV}$  为基-射极反偏, 集电极-发射极之间允许的最高电压;  $BU_{CBO}$  为发射极开路, 集电极-基极之间的反向击穿电压。

由上述可知, 集电极击穿电压基本上满足:

$$BU_{CBO} > BU_{CEV} > BU_{CES} > BU_{CER} > BU_{CEO}$$

由图 4-17 可知, 一旦一次击穿后器件将出现负阻效应。

2. 最大允许电流  $I_{CM}$  ( $I_C$ )  $I_{CM}$  表示集电极脉冲电流的最大允许峰值,  $I_C$  为集电极最大允许连续电流。

3. 最大耗散功率  $P_{CM}$   $P_{CM}$  表示集电极最大允许功耗, 集电极功耗  $P_C = U_{CE} \cdot I_C$ , 式中  $U_{CE}$  为工作时集电极-发射极之间压降,  $I_C$  为集电极电流。

4. 最高工作结温  $T_{JM}$   $GTR$  的最高工作结温是指正常工作时不损坏器件所允许的最高结温。一般金属封装的硅管  $T_{JM}$  在  $175 \sim 200^\circ\text{C}$ , 塑料封装的硅管  $T_{JM}$  为  $150^\circ\text{C}$ 。

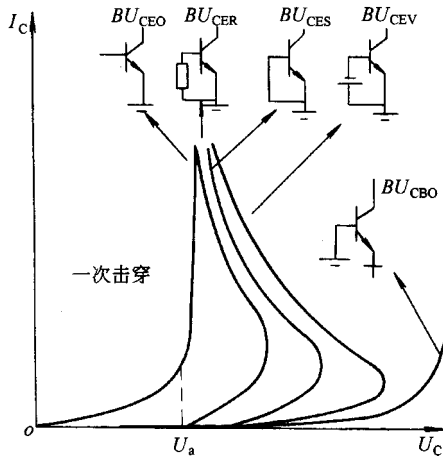


图 4-17 集电极击穿电压与基极状态关系

5. 开通时间  $t_{on}$  和关断时间  $t_{off}$  其物理意义参见上节。

6. 共射极电流增益  $\beta$  其值为

$$\beta = \frac{I_C}{I_B}$$

式中  $I_C$  为集电极电流,  $I_B$  为基极电流。

7. 集电极电压上升率  $du/dt$   $GTR$  的  $du/dt$  是一个重要的动态参数。

### (三) 功率晶体管的驱动电路

按信号要求使功率晶体管导通或截止的基极控制电路, 称为功率晶体管基极驱动电路。在电力电子电路中,  $GTR$  均作开关元件使用, 因所控制的功率较大, 基极控制电路与一般晶体管基极控制电路不同。要提供正向和反向基流, 图 4-18 为功率晶体管基极驱动电流  $I_b$  的波形。其中  $I_{b1}$  为正向偏置电流,  $I_{b2}$  为反向偏置电流。

对基极驱动电流的基本要求如下。

(1) 导通时, 要求提供较大的驱动电流, 以缩短开通时间和降低饱和压降, 从而降低开通功率的损耗; 关

断时,为使晶体管可靠截止和缩短关断时间,要求在晶体管基极上加上反向偏置电压,以产生如图 4-18 所示形状的基极驱动电流。

(2)对主电路应提供快速保护,并注意它与控制电路之间的可靠电气隔离。

(3)注意提高控制电路的抗干扰能力。

在满足上述基本要求的条件下,实际应用的 GTR 基极驱动电路很多,现仅举两个例子来简单说明电路的一般结构。

1. 基极驱动电流自适应式驱动电路 图 4-19 为一简单实用的 GTR 驱动电路。该电路的驱动电路输入端与前置信号电路间采用了光电隔离,供电采用了正、负双电源。当输入信号为高电平时,三极管  $V_1$ 、 $V_2$  和  $V_3$  导通, $V_4$  截止,从而  $V_5$  就导通。二极管  $VD_3$  可保证 GTR 导通时工作在临界饱和状态。流过  $VD_3$  的电流随 GTR 的临界饱和程度而改变,自动调节基极电流。当输入低电平时, $V_1$ 、 $V_2$  和  $V_3$  截止,而  $V_4$  导通,这就给 GTR 基极一个负电流,使 GTR 截止。在  $V_4$  导通期间,GTR 的基极-发射极一直处于负偏置状态,从而避免了反向电流通过,这样就能防止同一桥臂另一 GTR 导通而产生过电流。

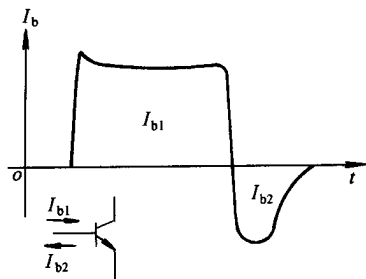


图 4-18 基极驱动电流波形

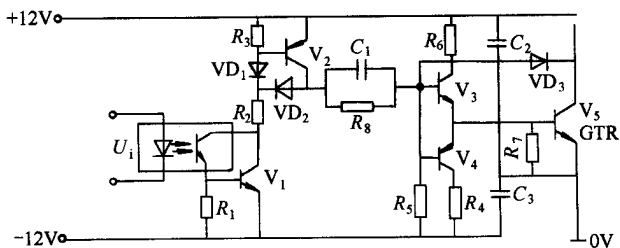


图 4-19 实用 GTR 驱动电路

该驱动电路由于  $I_B$  能自动适应  $I_C$  的变化,所以驱动电路不采用稳压电源供电,只采用简单的二极管整流和滤波电路就可以了,不会影响驱动电路的基本功能。

2. 集成化驱动电路 图 4-20 为集成化驱动电路图。这种电路具有电路简单、稳定性好、使用方便和有自身保护等特点,是基极驱动芯片中具有代表性的集成块。集成块 UAA4002 各引脚的功能如下。

(1)输出端。脚 1( $I_{B2}$ )是反向基极驱动电流输出端,直接与驱动 GTR 基极相连。脚 16( $I_{B1}$ )是正向基极驱动电流输出端,通过一外接电阻  $R_B$  与基极相连接。

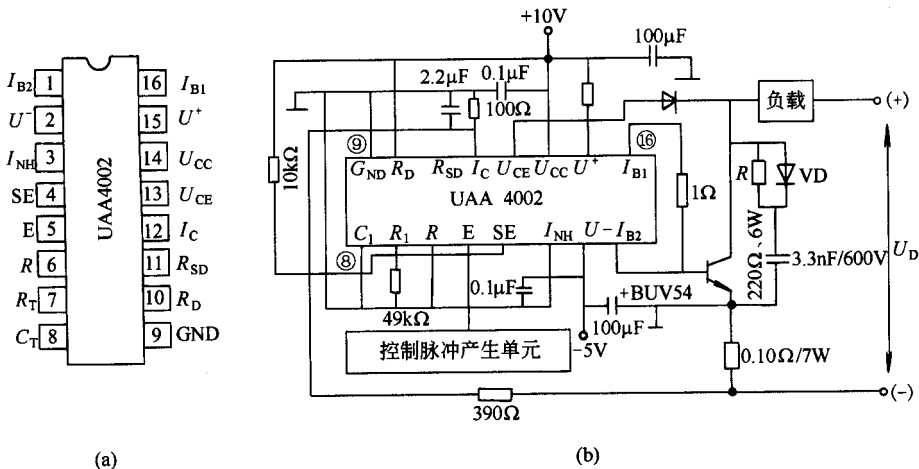


图 4-20 集成化基极驱动电路

(a)UAA4002 管脚排列图 (b)驱动电路图

(2) 控制端。脚 7 ( $R_T$ ) 通过一外接电阻  $R_T$  接地。它决定了集成块工作偏置电流的大小和最小导通时间  $t_{on, min}$ 。  $I = 5/R_T$  (mA)  $t_{on, min} = 0.06R_T$  (s) 可在  $1 \sim 12\mu s$  间调节 (以上两式中  $R_T$  的单位为  $k\Omega$ )。脚 8 ( $C_T$ ) 是最大导通时间设置端, 通过电容接地,  $C_T$ 、 $R_T$  决定了最大导通时间  $t_{on, max} = 2 \times R_T \times C_T$ 。如不需  $t_{on, max}$  保护功能, 只需用短路代替  $R_T$ 。脚 4 ( $SE$ ) 是工作方式选择控制端。  $SE$  接高电平或通过电阻值最小 ( $4.7 k\Omega$ ) 的电阻, 接正电源, 则为“电平”工作模式;  $SE$  接低电平时, 为“脉冲”工作模式。脚 3 ( $I_{NH}$ ) 为封锁端。高电平时完全封锁输出信号, 低电平时解除封锁。脚 1 ( $R_D$ ) 接地时, 可使输出端电压前沿相对输入端电压前沿推迟  $T_D = 0.05 \times R_D$ , 其值可在  $1 \sim 12\mu s$  间调节。接正电源时, 则无此功能。

(3) 输入端。脚 6 ( $R^-$ ) 通过  $R^-$  接负电源。  $R^-$  和  $R_T$  一起决定负电源欠电压保护的门限  $|U^-|_{min}$ 。

$$R^- = \frac{R_T}{2} \left( 1 + \frac{|U^-|_{min}}{5} \right)$$

如果不使用对负电源监控, 脚 6 可直接接地或接负电源。脚 1 ( $R_{SD}$ ) 通过电阻  $R_{SD}$  接地。

$$U_{RSD} = 10 \times R_{SD}/R_T$$

可调范围为  $1 \sim 5.5V$ , 是被驱动  $GTR$  的  $U_{CE}$  电压检测输入端。通过一正极接到该脚、负极接到  $GTR$  集电极的二极管与  $GTR$  相连, 若  $U_{CE}$  大于  $U_{RSD}$ , 则封锁输出脉冲来保护  $GTR$  (欠饱和和保护)。此保护功能通过直接接负电源来禁止。脚 12 ( $I_C$ )  $GTR$  集电极电流, 限制保护输入端。该端直接接到晶体管发射极的分流器或电流互感器的一个输出端 (其另一个端接地)。若不用时,  $I_C$  直接接地可禁止。脚 5 ( $E$ )  $GTR$  基极驱动信号输入端。一般接光电耦合器或脉冲变压器副边。

(4) 电源端。脚 14 ( $U_{CC}$ ) 接正电源 (推荐值为  $10V$ ) ; 脚 2 ( $U^-$ ) 接负电源 (推荐值为  $-5V$ ) ; 脚 15 ( $U^+$ ) 通过  $R$  接正电源, 其阻值  $R$  决定了正向基极驱动电流可达到的值。

(5) 接地端。脚 9 ( $GND$ ) 是提供整个  $UAA4002$  工作的参考地电平。

图 4-20 (b) 为  $UAA4002$  实际应用时的基极驱动电路图。  $UAA4002$  为“电平”工作模式, 时间常数  $t_{on, min}$  设定为  $2.8s$ , 提供的最大正向基极电流为  $0.45A$ , 最大集电极电流为  $10A$ 。

## 五、功率场效应管

功率场效应管是一种单极型的电压控制器件, 它大多采用垂直导电型  $MOS$  结构 (即  $VMOS$ )。其基本结构有  $VVMOS$  (Vertical V-Groove  $MOS$ ) 和  $VDMOS$  (Vertical Double-Diffused  $MOS$ ) 等, 如图 4-21 所示。

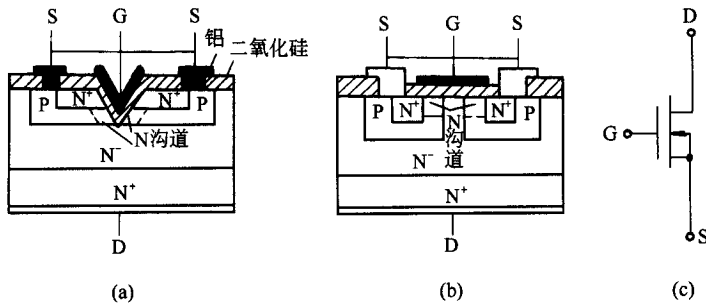


图 4-21  $VMOS$  结构示意图及图形符号

(a)  $VVMOS$  (b)  $VDMOS$  (c) 图形符号

功率  $MOSFET$  的优点是: 能与集成电路直接相连; 开关频率高 (比  $GTR$  高 10 倍以上); 由于不存在少数载流子积蓄效应, 故开关速度快; 驱动功率小, 通过器件的合理设计可避免产生二次击穿等。它的缺点是: 输入阻抗高, 抗静电干扰能力低, 在阻断电压较高时, 限制了它的承载能力和工作电压, 功率损耗高于  $GTR$ 。

功率  $MOSFET$  是 20 世纪 70 年代末开始应用的器件, 目前大多用于电压  $500V$  以下的低功率高频能量变换装置, 如开关电源、 $UPS$  等。近年来发展较快的功率集成电路中, 开关器件几乎都采用了低通态电阻的功

率 MOSFET。

## (一) 工作原理和伏安特性

### 1. 工作原理

功率 MOSFET 的导电机理与信号电路中的 MOS 场效应管基本相同,但在结构上有很大区别。以 N 沟道 VDMOS 为例,一个 VDMOS 元件是多元结构,是由许多小元并联组成,如图 4-22 所示。一个元件的小元密度很高(可达数百乃至上万个),所以 VDMOS 是一种功率集成器件。

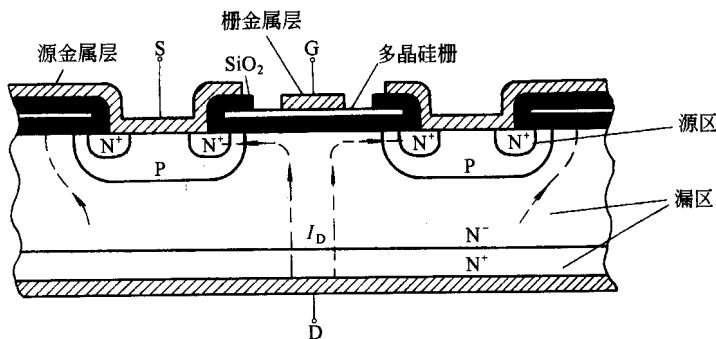


图 4-22 N 沟道 VDMOS 管小元结构示意图

从本质上说,功率 MOSFET 的导电沟道是电场作用下形成的。对 N 沟道的器件,其导电沟道是电子形成的,漏极电流  $I_D$  大小受到栅源电压  $U_{GS}$  和漏源电压  $U_{DS}$  两个因素的影响。当  $U_{GS} > U_T$  ( $U_T$  为器件栅极阈值电压)时,  $U_{DS} > 0$ , 沟道中载流子在电场作用下形成从源极到漏极的漂移电流(如图 4-22 中虚线所示)  $I_D$ , 外加电压  $U_{GS}$  越高,电子定向运动速度越快,电流也越大。

综上所述,功率 MOSFET 的漏极电流  $I_D$  受控于  $U_{GS}$  和  $U_{DS}$ ,  $I_D$  在沟道电阻上的压降就等于功率 MOSFET 的管压降。

### 2. 伏安特性

功率 MOSFET 的栅极是绝缘的,  $I_G = 0$ 。因此,它的伏安特性包括漏极电流  $I_D$  与栅源电压  $U_{GS}$ 、 $I_D$  与漏源电压  $U_{DS}$  之间的关系,前者称为转移特性,后者称为输出特性,如图 4-23 所示。

增强型 MOSFET 在  $U_{GS} = 0$  时没有导电沟道,只有外加一定的  $U_{GS}$  才会出现导电沟道,在漏源电压作用下有  $I_D$  流过。通常  $|I_D| = 1\text{mA}$  时的  $U_{GS}$  值  $U_T$  称为开启电压,见图 4-23(a)。

图 4-23(b) 示出了输出特性有四个区。

A 区:可变电阻区(非饱和区)。在这个区内,当  $U_{GS}$  为常数时,  $I_D$  几乎随  $U_{DS}$  的增大而线性增大,但  $U_{DS} < U_{GS} - U_T$ 。

B 区:线性放大区(饱和区)。在这个区内,  $U_{DS} > U_{GS} - U_T$ ,  $I_D$  几乎不随  $U_{DS}$  增大而变化,但在一定的  $U_{DS}$  下,  $I_D$  随  $U_{GS}$  的增加而增长,故这一区称为线性放大区或恒流区。

C 区:雪崩区。  $U_{DS}$  大于某一值以后,器件雪崩击穿,使用时要避开这一区。

$U_{DS}$  轴:截止区。这一区内,  $U_{GS} \leq U_T$ ,  $I_D = 0$ 。

功率 MOSFET 开启电压(阈值电压)的典型值为 2~4V。工作时,为保证器件进入可变电阻区,栅源电压  $U_{GS}$  要足够大,通常大于 10V。

### 3. 开关特性

功率 MOSFET 是单极型器件,不存在少子存储的问题,所以它的开关速度很高,开关时间约为数十至数百纳秒。

## (二) 主要技术参数

1. 漏源击穿电压  $BU_D$ 。  $BU_D$  是指  $U_{GS} = 0$  时,不使器件雪崩击穿的极限参数。  $BU_D$  是结温的正温度系数的函数,即结温上升,耐压值上升(双极型晶体管则相反)。这也是这种管子的优点之一。

2. 漏极额定电流  $I_D$  和峰值电流  $I_{DM}$ 。  $I_D$  是流过漏极的最大允许连续电流,  $I_{DM}$  为流过漏极的最大允许



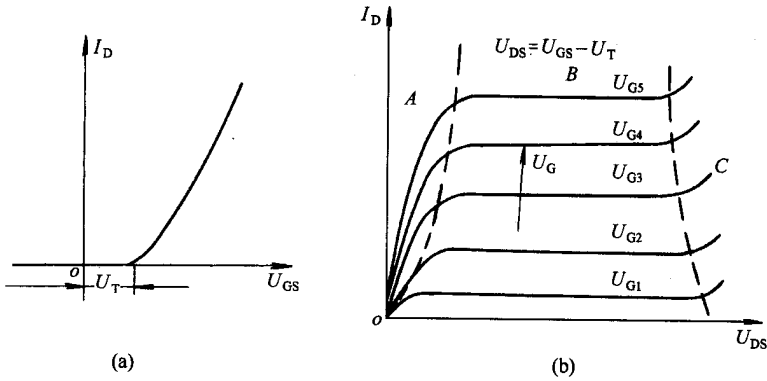


图 4-23 功率 MOSFET 的伏安特性

(a) 转移特性 (b) 输出特性

的脉冲电流。这两个参数主要受允许结温的限制。

3. 栅极开启电压 又称阈值电压。实际应用中通常将漏极短接条件下  $I_D$  为  $1mA$  时的栅极电压定义为开启电压。当环境噪声较高时,可以选用开启电压较高的管子,以提高抗干扰能力。

4. 漏源通态电阻  $R_{on}$   $R_{on}$  是非常重要的参数,  $R_{on}$  越大,  $I_D$  流过产生的耗散功率也越大,这样就限制了功率 MOSFET 在大容量场合的使用。  $R_{on}$  随栅源电压升高而降低,随结温升高而增大。

5. 极间电容 漏极与栅极之间的电容为  $C_{DG}$ ,漏极与源极之间的电容为  $C_{DS}$ ,栅极与源极之间的电容为  $C_{GS}$  这些极间电容是影响开关速度的主要因素。

6. 开通时间  $t_{on}$  和关断时间  $t_{off}$  功率 MOSFET 一般  $t_{on}$  为几十纳秒,  $t_{off}$  为几百纳秒。

### (三) 功率场效应管的驱动电路

能使功率场效应管按信号的要求导通或截止的电路,称为功率场效应管栅极驱动电路。功率 MOSFET 是电压控制器件,只要栅极驱动电路提供合适的栅极电压,就能使 MOSFET 可靠地通断。因栅极驱动电流较小,所以驱动电路比较简单。在工作频率较低的应用场合,常用集成驱动电路。

常见的功率 MOSFET 驱动电路有以下几种。

(1) 采用 TTL 栅极的驱动电路。图 4-24 为典型的 TTL 驱动电路,它可用于要求不高的功率 MOSFET 驱动。其工作原理是:当  $V_1$  基极高电平输入,  $V_1$  导通,  $V_2$  关断,  $15V$  的电源通过  $R_2$  对  $VM_1$  栅极充电,当栅源电压达到  $+15V$  时,  $VM_1$  导通;当  $V_1$  基极输入低电平时,  $V_1$  关断,  $+5V$  加在  $V_2$  的基极与发射极之间,  $V_2$  流过瞬态栅极放电电流,  $VM_1$  的栅源电压变为低电平而关断。这个电路缺点是通过  $R_2$  充电,延长了功率 MOSFET 开通时间,也增加了开通损耗。

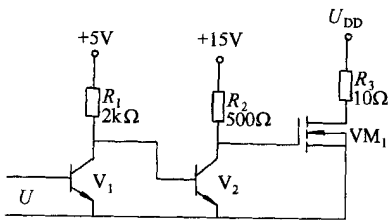


图 4-24 TTL 驱动 MOSFET 电路

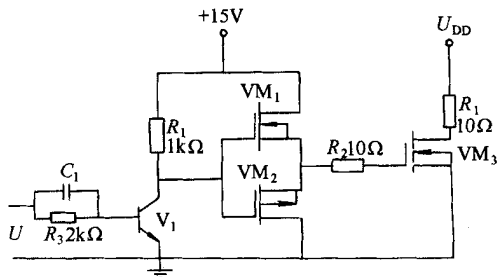


图 4-25 小功率 MOS 驱动电路

(2) 小功率 MOSFET 驱动电路。由于 MOS 元件传输速度快,在 MOSFET 驱动电路中可用它来替代双极

型晶体管,如图 4-25 所示。电路的工作原理与图 4-24 相似,只是用  $VM_1$  和  $VM_2$  小功率互补电路替换了图 4-24 中的  $V_2$ 。这个驱动电路的开关频率很高,可达到 100 kHz 以上。

(3)集成驱动电路。美国国际整流公司(IR 公司)生产的 IR2110 高压浮动 MOS 栅极驱动集成电路,是一种具有代表性的集成驱动电路。它的特点是具有很高的开关速度,较低的功耗,采取一定措施后可作大功率 MOSFET 驱动电路。此外,这种驱动电路还提供了可靠的电流保护。

图 4-26 是 IR2110 作为驱动电路的一个例子,该电路本身具有信号的隔离功能和利用泵升原理形成另一组驱动电路电源的功能。由图可知,这种集成驱动电路在实际应用时电路十分简单,只需一个直流稳压电源(+15V)和外接一些元件后,即可驱动一组桥臂 MOSFET。

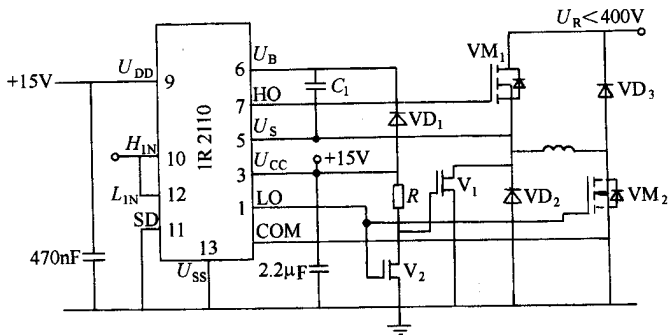


图 4-26 IR2110 用于驱动开关磁阻电机的电路

## 六、绝缘栅双极晶体管

绝缘栅双极晶体管简称 IGBT(Insulated Gate Bipolar Transistor),是 20 世纪 80 年代初新发展起来的复合型电力电子器件。IGBT 兼有 GTR 和 MOSFET 的优点,既具有通态压降小、耐高压和能承受较大电流的特点,又具有输入阻抗高、开关速度快、热稳定性好和驱动电路简单的优点。

目前,IGBT 发展极为迅速,广泛用于 20 kHz 左右的功率变换装置中,并为电路设计者创造了如下条件:

- (1)扩展了高频、高压大功率应用范围;
- (2)可使用功率变换子系统模块,使产品小型化,缩短研发周期;
- (3)几乎可完全替代 GTR 的应用,部分取代功率 MOSFET 和 GTO 晶闸管的应用。

### (一)工作原理和伏安特性

#### 1. 工作原理

IGBT 是一种多元结构的功率集成器件。图 4-27(a)为它的一个小元结构示意图。与 VDMOS 管[图 4-21(b)]相比,它在漏极  $N^+$  区下面多了一个  $P^+$  层。图 4-27(b)和(c)分别为 IGBT 的等值电路和图形符号。由图(b)可知,IGBT 实质上是以 GTR 为主导元件, MOSFET 为驱动元件的达林顿结构器件。该器件 MOSFET 为 N 沟道型, GTR 为 PNP 型。

IGBT 的开通和关断是受栅极电压控制的。当栅极外施电压为正向时, MOSFET 内形成导电沟道,并为 PNP 管提供基极电流,从而使 IGBT 开通。在栅极外施反向电压时, MOSFET 内的沟道消失, PNP 管内基极电流被切断, IGBT 即为关断。

#### 2. 伏安特性

图 4-28 为典型的 IGBT 的输出特性和转移特性曲线。它们分别描述了器件的工作状态和控制能力。由图(a)看出,输出特性曲线零点稍偏离原点,原因是 MOSFET 的开启电压引起的。IGBT 同 GTR 一样,其输出特性可分为饱和区、线性区和阻断区。另外, IGBT 的开启电压一般为 3~6V。

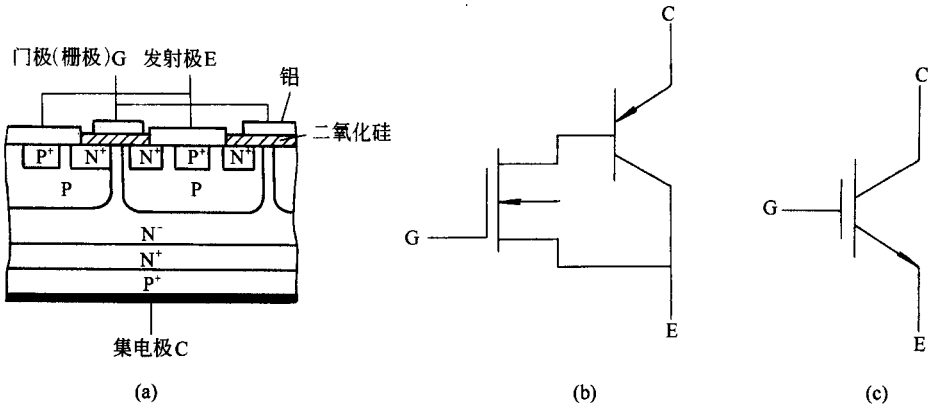


图 4-27 绝缘栅双极晶体管

(a)小元结构示意图 (b)等值电路 (c)图形符号

## (二) 主要技术参数

- (1) 集-射极间阻断电压  $U_{CES}$  集-射极短路条件下,集电极最大允许阻断电压。
- (2) 门-射极间电压  $U_{GES}$  集-射极短路条件下,最大允许的门-射极电压。
- (3) 集电极电流  $I_C$  集电极最大允许直流工作电流。
- (4) 集电极功耗  $P_C$  最大允许的单管峰值功耗( $T_L = 25^\circ\text{C}$ )。
- (5) 结温  $T_j$  允许的工作结温值。
- (6) 反并联二极管电流  $I_E$  最大允许二极管直流正向电流( $T_j \leq 25^\circ\text{C}$ )。

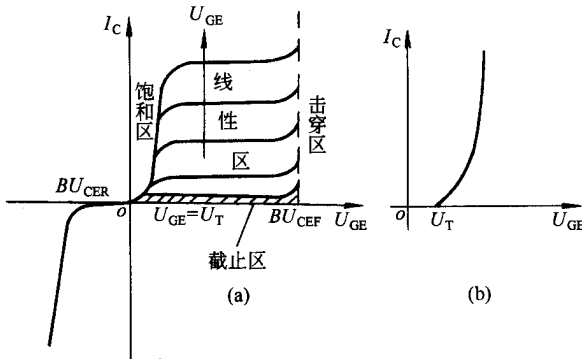


图 4-28 IGBT 的伏安特性

(a) 输出特性 (b) 转移特性

- (7) 门-射极阈值电压  $U_{GE(th)}$   $U_{CE} = 10\text{V}$   $I_C =$  集电极额定电流  $\times 10^{-4}$  时的门-射极间电压。
- (8) 集-射极饱和压降 在指定条件下,额定工作电流时的导通管压降。
- (9) 正向压降  $U_{CE}$  额定条件下,集电极和发射极间的压降。
- (10) 开通时间  $t_{on}$  额定条件下,电阻性负载开关开通时间。
- (11) 关断时间  $t_{off}$  额定条件下,电阻性负载开关关断时间。
- (12) 恢复时间  $t_{rr}$  感性负载开关动作续流二极管反向恢复时间。

## (三) 绝缘栅双极晶体管的驱动电路

由于 IGBT 是以 MOSFET 为输入级的,因此, MOSFET 驱动电路原则上都可适用于 IGBT。IGBT 典型驱动电路如图 4-29 所示。

应当指出,IGBT 的正、反偏栅压( $\pm U_{GS}$ )及栅极串联电阻  $R_G$  对器件的运行性能有很大影响,如表 4-5

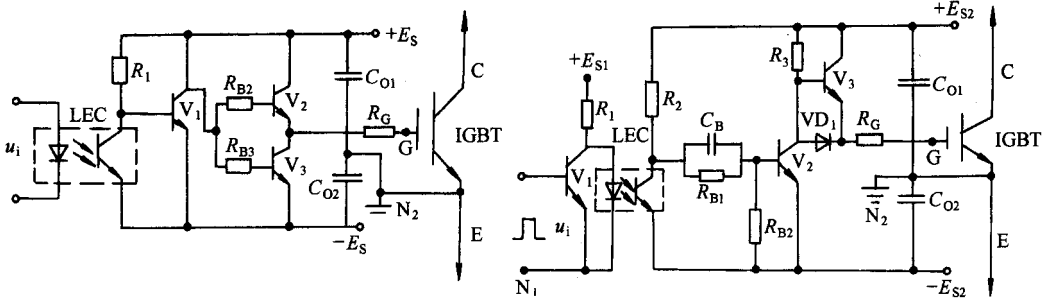


图 4-29 两种典型的 IGBT 驱动电路

所示。

表 4-5 栅极驱动电压及串联电阻  $R_G$  对 IGBT 运行性能的影响

特性	集-射饱和电压 $U_{CES}$	开通时间 $t_{on}$	关断时间 $t_{off}$	$dU_{CE}/dt$ 位移电流	负载承受短路的能力
$+U_{GE}$ 增加	降低	降低	略增加	—	降低
$-U_{GE}$ 增加	—	—	略降低	减少	—
$R_G$ 增加	—	增加	增加	减少	增加

注：一般取的参数是  $+U_{GE} = 12 \sim 15 V$ ， $-U_{GE} = -1 \sim -10V$ 。

近年来，较广泛使用 EXB 系列集成模块驱动 IGBT。该专用模块比分立元件组成的驱动电路工作更可靠，效率更高。图 4-30 示出了这种模块的框图，其各脚功能如表 4-6 所示。

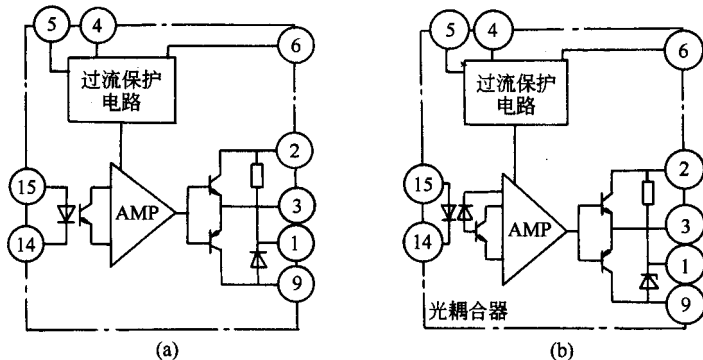


图 4-30 EXB 系列集成驱动器内部框图

(a) EXB 850/851(标准型) (b) EXB 840/841(高速型)

表 4-6 EXB 系列各脚功能表

脚号	功能说明	脚号	功能说明
1	与 IGBT 的发射极相接 ; $\pm U_C$ 的地	7,8	可不接
2	电源端 ,一般为 20V	9	电源地端
3	驱动输出 经栅极电阻 $R_G$ 与 IGBT 相连	10,11	可不接
4	外接电容器 ,防止过电流保护环节误动作	12,13	
5	内设的过电流保护电路输出端	14	驱动信号输入( - )
6	经快速二极管连到 IGBT 集电极。监视集电极电平 ,作为过流信号之一	15	驱动信号输入( + )
		16	

图 4-31 为应用 EXB 系列集成模块驱动 IGBT 的例子。该例具有过流检测、保护及软关断功能。当 IGBT 出现过流时,脚 5 出现低电平,光耦 SOI 有输出,从而提供一个封锁信号。该信号使 PWM 驱动脉冲输出转化成一系列窄脉冲,对 EXB 840 实行软关断。

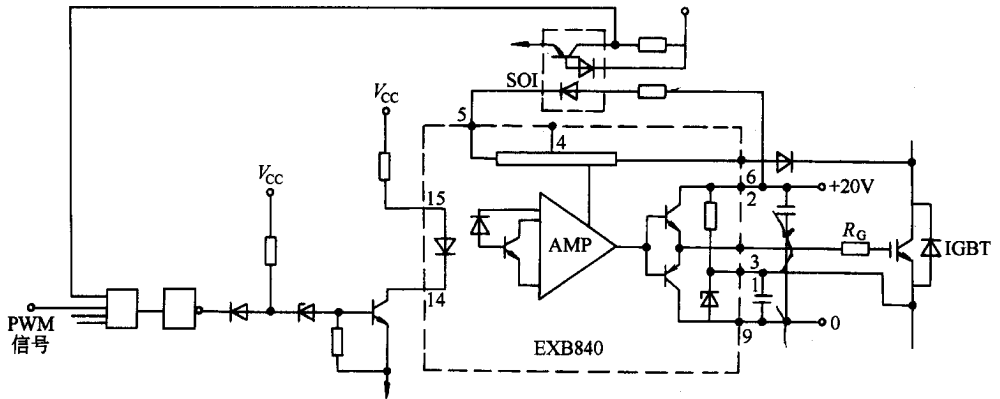


图 4-31 EXB 840 用于 IGBT 的驱动电路

## 七、几种全控型电力电子器件性能的比较

全控型电力电子器件的种类很多,其发展也非常迅速,现将本书涉及的三种全控型电力电子器件的主要性能进行比较,见表 4-7 所示。

表 4-7 几种全控型电力电子器件主要性能的比较

器件名称	GTR	功率 MOSFET	IGBT
结构	三层半导体两个 PN 结	(1) MOS 结构(金属-氧化物-半导体) (2) 多元结构	(1) 在 MOS 基础上增加一个 $P^+$ 层 (2) 多元结构

器件名称	GTR	功率 MOSFET	IGBT
工作原理	(1)多子和少子均参与导电 (2)电流型开关器件 (3)通过基极信号控制管子的开通和关断	(1)仅多子参与导电 (2)电压型全控开关器件 (3)开通与关断受栅极电压控制	(1)开通和关断受栅极电压控制 (2)大功率可控开关器件
驱动电路	(1)电流型 (2)电路复杂 (3)要求功率大	(1)电压型 (2)电路简单 (3)要求功率小	(1)电压型 (2)电路简单 (3)要求功率小
开关性能	(1)速度为 $1 \sim 5 \mu\text{s}/\text{次}$ (2)不适合快速切换	(1)速度为 $0.1 \sim 0.5 \mu\text{s}/\text{次}$ (2)最适合于快速切换	(1)速度为 $0.1 \sim 0.5 \mu\text{s}/\text{次}$ (2)适合快速切换
饱和压降	低	高	中
安全工作区	很宽	宽	中

## 第二节 半导体电路

### 一、半导体导电特性及其 PN 结的单向导电性

#### (一) 半导体的导电特性

常用半导体材料有硅和锗。纯净的硅或锗单晶体(又称本征半导体)其导电性能很差,介于绝缘体和导体之间。

半导体中有两种载流子参与导电,一种是自由电子;另一种是空穴。空穴可看成是带正电荷的载流子。因此在外电场的作用下半导体中的电流是由两部分电流构成,即逆电场方向运动的自由电子电流和顺电场方向运动的空穴电流。

纯净半导体的导电能力还受温度、光照和掺入杂质元素的影响。随温度的升高其导电能力增强,受到光照其导电能力也增强,因此用半导体可制成热敏元件和光敏元件。特别是在纯净半导体中掺入适当的微量杂质的元素可大大提高半导体的导电能力。常用的杂质半导体有以空穴导电为主的 P 型半导体和以自由电子导电为主的 N 型半导体。

物质的导电能力的大小决定于参与导电的载流子的多少,而载流子的多少又决定于物质内部原子之间的结合方式和原子本身的结构特点。绝缘材料原子的最外层电子受原子核的束缚力很大,其外层电子很难挣脱束缚而成为能够导电的自由电子,故绝缘材料几乎不导电。金属材料原子的最外层电子受原子核的束缚力很小,因此有大量的电子能够挣脱束缚而成为导电的自由电子,所以金属导体的导电能力很强。半导体硅和锗的原子结构比较特殊,它们是 4 价元素,每个原子的最外层有 4 个价电子。纯净的半导体的原子排列整齐,每个原子的 4 个价电子不仅受自身原子核的束缚,而且每一个与相邻原子的价电子构成共价键结构,即这样两个价电子属于两个相邻原子所共有。实际形成了每一个原子最外层有 8 个价电子的稳定原子结

构,所以最外层电子不太容易挣脱束缚而成为自由电子。但又不像绝缘材料束缚的那样紧,在一定的温度下,由于热运动,其中少数电子可能挣脱束缚而成为自由电子。

共价键电子挣脱束缚后,在共价键上就留下一个待填补的价电子“空位”,这就是空穴。当某个自由电子落入空位,则该自由电子和空穴同时消失,这称为复合。可见,自由电子和空穴总是成对的产生又成对的复合。在一定的温度下,半导体内保持一定数量的自由电子、空穴对。温度和升高或光照,使更多的束缚电子获得能量而挣脱束缚,从而使自由电子空穴对数量增加,导电能力增强。

有空穴的原子,因少了一个电子而成为带正电的离子,即空穴相当于一个正电荷。由于空穴很容易被附近的束缚价电子来填补,使空穴消失,同时也在原束缚电子所在处又留下了一个新的空穴。如果在电场的作用下,使附近的束缚电子形成依次填补空穴的移动,其效果等效于空穴在做定向运动,从而形成了空穴电流。这就好比在礼堂中有人离开前排座位到处走动成为“自由电子”,而后面的人依次向前占据空位,形成空位向后移动。

## (二)PN结的单向导电性

**P型半导体:**在4价的单晶硅或锗中,掺入微量的3价元素(如硼、铟等)就形成P型半导体。因为每一个3价元素的原子与四周相邻的4价硅或锗原子构成共价键时少一个价电子,而自然留下一个空位,即每一个3价原子都提供一个空穴。因而在P型半导体中的空穴数量远远大于自由电子,主要靠空穴导电。空穴是P型半导体的多数载流子,自由电子是少数载流子。但P型半导体本身对外并不显带电性,因为总的正负电荷相等,是电的中性体。

**N型半导体:**在4价的单晶硅或锗中,掺入微量的5价元素(如磷、锑等)形成N型半导体。每一个5价元素的原子与四周的4价硅或锗的原子组成共价键时都多一个没有共价键的电子,即每一个5价原子都提供一个自由电子。因而在N型半导体中的自由电子数量远远大于空穴,主要靠自由电子导电。空穴是N型半导体的少数载流子,自由电子是多数载流子。N型半导体本身也是电中性的。

**PN结:**在同一半导体基片上,半边掺入3价元素形成P型半导体,另半边掺入5价元素形成N型半导体,如图4-32所示。在P型和N型的界面处所形成的一个阻碍导电的空间电荷层(或称阻挡层)称为PN结。由于两边空穴的浓度相差悬殊,两边自由电子的浓度也相差悬殊,因而形成两边多数载流子的相互扩散运动。自由电子由N边向P边运动,空穴由P边向N边运动。在交界处,N边的原子因少了自由电子而变成正离子;P边原子因少了空穴而变成负离子。相互扩散的数量越多,正负离子数量越多,阻挡层越宽。随着扩散运动的进行,正负离子之间形成电场,称为内电场,其方向由N边指向P边,如图(b)所示。由于内电场力的作用,将阻止载流子的进一步相互扩散。因此在一定的载流子浓度的条件下,阻挡层保持一定的宽度。

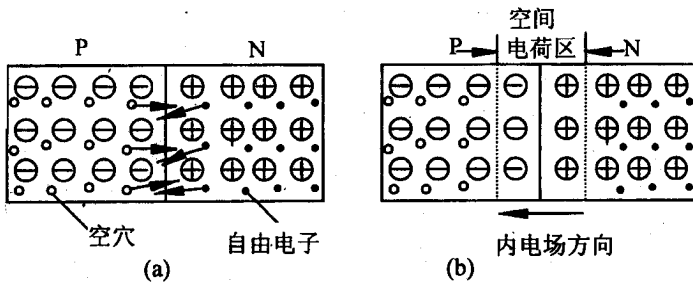


图4-32 PN结的形成

**PN结的特性:**PN结的基本特性就是它的单向导电性。当PN结加正向电压,如图4-33所示,P端接高电位(+),N端接低电位(-),则PN结变成低阻导通状态,PN结可通过较大的电流。当PN结加反向电压,如图4-34所示,P端接低电位(-),N端接高电位(+),PN结呈现高阻截止状态。

因为加正向电压时,外加电场的方向与PN结的内电场方向相反,内电场被削弱,阻挡层变窄,有助于两边多数载流子大量的相互扩散运动,在电源的支持下形成导通的回路电流。加反向电压,外电场与内电场方向一致,阻挡层变宽,阻碍多数载流子的相互扩散。只有两边的少数载流子在电场力的作用下越过阻挡层,

形成极微小的可忽略的反向电流,这种状态称为  $PN$  结的截止状态。

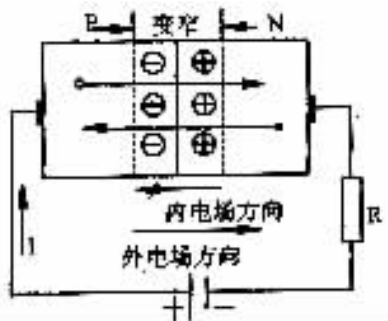


图 4-33  $PN$  结加正向电压

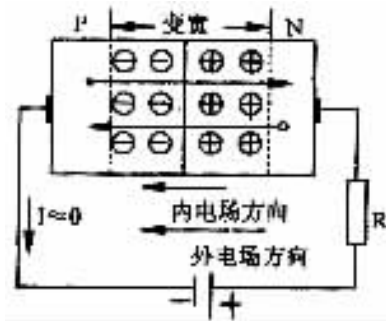


图 4-34  $PN$  结加反向电压

## 二、整流电路与电源

### (一) 电子技术导论

#### 1. 电子技术与信息

第 1 章根据电能的不同用途,将电、气工程学分为两个分支:电力和电子技术。电力行业用煤和水能等初级能源产生电能,最后转变为热能、光能、机械能以及其他形式的能量。在电子技术中,电能用于表示、传递和处理信息。在电话系统、收音机、计算机或是交通控制系统中,都是用电能来传递、处理和使用信息。

在电子技术中,电压和电流变成了电信号,即它们用来表示其他一些东西,这一点从它的词根中可以看出(“信号”一词的英文单词为“signal”,其词根“sign”是“标记”、“符号”的意思。——译者注)。人们对着电话机讲话时产生的电压就是一个信号,因为它可以在空气中再生出声音振动。这些声音是有意义的,在对话中交流了信息。

该领域当前的发展速度很快,所以对其发展情况进行预测非常困难。但是如果理解了其中的一些主要内容,就可以领会电子技术的实质。本书要讨论的重要内容包括(1)模拟和数字表示法与信息处理(2)频段的应用扩展(3)半导体材料电特性的应用(4)反馈(5)电路中非线性效应的应用。

#### 2. 电子技术的历史

第二次世界大战前,电子技术的商业重要性主要体现在无线电广播、电话和电报等行业。活跃在这些领域中的人们,包括很多物理学者和电气工程师都是通过实践获得电子技术的知识。当时,在大学里学习电气工程学就是学习电力、电动机、发电机、照明设备、变压器和传输线等。

第二次世界大战深刻地改变了电子技术。除了发展无线电通信这一明显需要之外,盟军的一个绝密工程也将焦点集中在电子技术。每个人都知道曼哈顿工程和原子弹。科学家和工程人员在“辐射”实验室为发展微波雷达所做的工作,为结束战争做出了相当重要的贡献。这两个工程雇用了美国最好的技术人员,并且都取得了极大的成功。

曼哈顿工程在战后的成果只是一些更多、更大的原子弹,而且即使是核技术的和平应用也会引起争议。而“辐射”实验室的战后成果则是其技术的迅速普及,而且绝大部分应用于和平目的。为雷达显示器研制的阴极射线管变成了电视的图像显像管,并且很快就有了可供欣赏的高保真唱片。为探测敌机发展的雷达技术可以使商用飞机全天候飞行。还可以直接拨打长途电话,不用大声叫喊就可以让对方听到你的声音。

在 20 世纪 50 年代早期,晶体管的发展开始了第一个“固态革命”。接着是集成电路,再后面是集成于一块“芯片”上的微型计算机。微电子技术的发展似乎永无止境。

有人在战前就开始构思电子计算机的思想,但即使在战争中也只是做了一些普通应用。当时研制了一种模拟计算机用来控制军舰上的重型炮,并且出现了一些简单的“逻辑”电路。真正的计算机是在战后出现



的。第一个数字计算机是用真空管技术制造的。如果按照现在的标准来衡量,它体积庞大、速度很慢,并且不易于编程。但当数字计算机的思想与晶体管以及后来的集成电路思想结合在一起时,计算机的发展速度变得激动人心了。而且直到今天,它仍然保持着这样的发展速度。

### 3. 电子技术的实质

电子技术中充满了诀窍。电路理论的发展经历了一个有序的、合理的过程。电子技术与电路理论不同,它应用了多种不同器件、技术和方法。电子技术基础知识的应用是非常困难的,因为电子电路太复杂了。例如,如果应用前面刚学到的知识,如欧姆定律、基尔霍夫定律和一些诸如阻抗的概念、戴维南等效电路的概念等等,来研究电视机的电路图(示意图)会发现根本不会取得什么进展。

本书第 II 部分的目的就是研究现在推动电子技术发展的主要思想。将学习当前电子技术的一些诀窍,但通过这些诀窍只能初步理解电子技术的实质。不要指望掌握了这部分的内容之后就可以修理收音机或是计算机的接口。不过,到那时就可以理解这些系统如何工作了。

### 4. 本书的电子技术内容

本章解释二极管和晶体管的物理作用,并讨论一些应用这些器件的基本电路。“数字电子技术”,说明如何应用这些基本电路以数字形式处理信息。“模拟电路”,详细介绍如何应用这些基本电路以模拟形式处理信息,并将电路理论的处理方法扩展到信号分析中。如何将模拟和数字电路集成到监视、控制或通信系统中。最后,“功率电子系统”详细介绍了用于控制电力的器件和电路。

## (二) 理想二极管

### 1. 非线性器件

第 1 章~第 6 章研究的电路理论都是应用于线性电路的。对电阻、电感和电容进行定义的方程描述了电压和电流之间的线性关系。描述电路中能量守恒和电荷守恒的基尔霍夫定律也是线性方程。本书中的许多方法都是建立在这些线性特性的基础上——叠加原理和戴维南等效电路都是很明显的例子。

电子技术中也使用电阻、电感和电容,基尔霍夫定律也仍然有效。但电子技术应用了很多有非线性特性的器件。二极管、晶体管和硅控管整流电路都是这类非线性器件的例子。非线性并没有成为应用这些器件以及其他器件的障碍。相反,它们因为非线性特性而变得非常有用。

### 2. 图解分析

因为非线性器件非常重要,所以电子技术中采用了很多图解分析。很多种电路的求解方法都是基于图解方法的。而且从图解形式可以得到很多关于器件特性的信息。图 4-35 给出了一个电阻和两种极端情况(开路  $R = \infty$ )和短路( $R = 0$ )的图解特性。当然,欧姆定律的图解形式为一条直线。

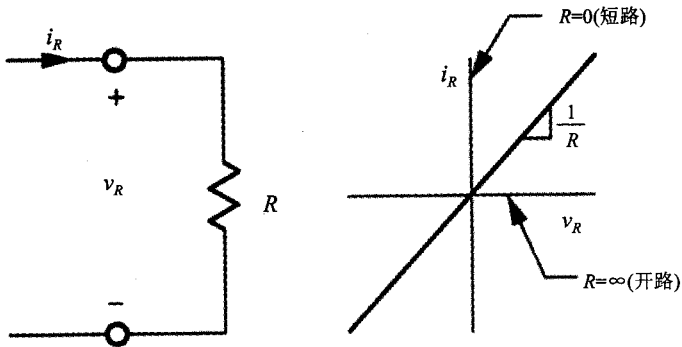


图 4-35 电阻的符号和图解定义

### 3. 理想二极管的特性曲线

图 4-36 给出了理想二极管的电路符号和相关的图解特性,该特性曲线是非线性的。理想二极管的特性曲线分为两个区域:垂直区域叫做正向偏置区域,水平区域叫做反向偏置区域。与图 4-35 对比可以看出:二极管正向偏置相当于短路;反向偏置相当于开路。

### 4. 导通和截止

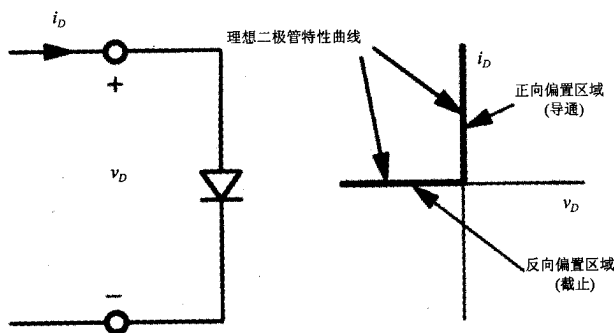


图 4-36 理想二极管的符号和图解定义

二极管的性能用电流表示为：如果电流的正方向与二极管电路符号的箭头方向相同，二极管相当于短路，电流可以顺畅地流动，二极管导通；如果电流的正方向与二极管箭头的方向相反，二极管相当于开路，没有电流通过，二极管截止。因此，电流可以沿箭头的正方向通过，而不能沿箭头的反方向通过。

### 5. 力学类比

二极管类似于机械棘轮。机械棘轮可用于拉紧网球场边的围网。机械棘轮只允许向一个方向移动或旋转。与此类似，二极管只允许电荷向一个方向移动，另一个类似情况是只允许液体向一个方向流动的单向阀。

### 6. 二极管 = 开关

二极管也可以看做是一个由电压控制的开关。当输入电压为正时（电压的“+”号在箭头的上端），开关闭合，电流通过，二极管导通。一旦电压的极性反转，开关断开，没有电流通过，二极管截止。

前面描述的是理想二极管的特性。实际二极管的特性与这一理想特性不同，详细对此进行介绍。但二极管的多数常见应用可以用这种理想特性理解。在研究半导体二极管的物理过程之前，先来介绍一些应用。

## （三）整流电路

### 1. 直流和电子技术

第4章首先提到了关于直流和交流之间的争论，看哪一种电能形式会主宰新兴电力行业。当然，交流成为电能的生产、分配和消费的通用模式。

但是，直流在电子技术中又占据了重要地位。几乎所有的电子电路都要求采用直流电源。读者可能会因此猜想每个电子设备中都有一个电池，事实并非如此。电池价格贵、重量大、寿命短、体积庞大，并且充满了腐蚀性的化学材料。因此，设计者都避免使用电池组件，除非是便携性是第一位的要求。

因为这个原因，多数电子设备都包含一个电源电路。电源的功能如图4-37所示。例如，插上插头并打开电视机时，交流电就会进入电子电路的电源部分，并转换成直流电。直流电由电源部分流入电路的其他部分。这种电源电路应用了整流电路中二极管的非线性特性。

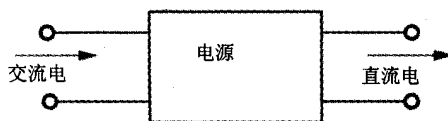


图 4-37 多数电子电路需要电源

### 2. 半波整流电路

电源在整流电路中用二极管将交流变为直流。二极管对交流进行了“整流”。图4-38是一个基本整流电路。因为它仅将输入电压的正半周连接到负载，所以称这个电路为半波整流电路。交流电压用正弦函数表示，整流电路是一个理想二极管，负载用电阻表示。实际中负载可能是一个需要直流电的电子电路。

图4-39显示了二极管的整流效果。当输出电压为正时，二极管导通，其中通过正弦电流。但输出电压

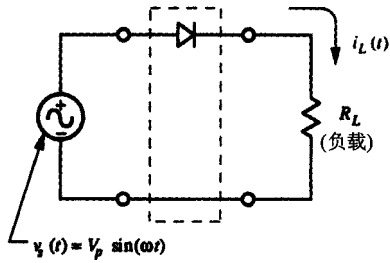


图 4-38 半波整流电路

为负时,二极管截止,没有电流通过。结果,电流变成了脉冲形式,负载两端的电压是正弦输入电压的正半周。二极管阻止了交流波的负半周。

### 3. 直流成分

当然,半波整流电路的输出并不是纯粹的直流电。但其输出确实含有直流成分。事实上,如果定义的时间平均值来定义输出的直流部分,得到直流成分为:

$$I_{dc} = \frac{1}{T} \int_0^T i_L(t) dt = \frac{1}{T} \left[ \int_0^{T/2} \frac{V_p}{R_L} \sin(\omega t) dt + \int_{T/2}^T 0 dt \right] = \frac{V_p}{\pi R_L}$$

式中  $\omega = 2\pi/T$ 。如果与负载串联一个直流安培表,安培表的示数就是此电流。负载电压的直流成分为:

$$V_{dc} = I_{dc} R_L = \frac{V_p}{\pi}$$

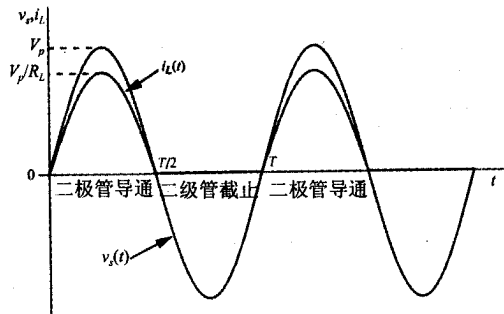


图 4-39 半波整流电路的波形

#### 例 半波整流电路

一个 24V(均方根值)交流电源通过半波整流电路的二极管与一个  $20\Omega$  电阻连接。求负载电流的峰值和平均值。

解 图 4-38 给出了电路。因为二极管在电源电压为正时导通,所以峰值电流等于正峰值电压除以电阻。

$$I_{\text{峰值}} = \frac{V_p}{R_L} = \frac{24\sqrt{2}}{20}$$

由式给出的直流电流为:

$$I_{dc} = \frac{V_p}{\pi R_L} = \frac{I_p}{\pi} = \frac{1.07}{\pi} = 0.540\text{A}$$

思考题:如果二极管反向连接,结果如何?

#### 4. 全波整流电路

图 4-40(a) 的电路称为全波桥式整流电路, 这是因为它对输入电压的负半周和正半周都进行整流。

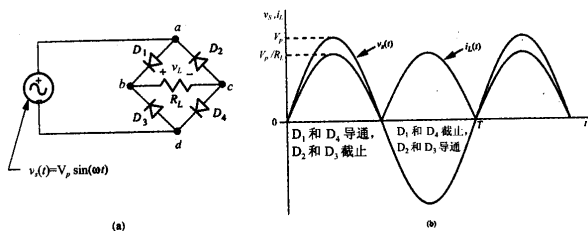


图 4-40 (a) 桥式全波整流电路 (b) 桥式全波整流电路的波形

#### 5. 桥式整流电路的工作原理

电源电压为正时, 电流试图经过整流电路由 a 流到 d。二极管  $D_1$  导通, 但  $D_2$  不能使电流由 a 流到 c, 所以它处于截止状态。在 b 点, 因为  $D_3$  不允许电流直接由 b 流到 d, 所以电流必须流经电阻。最后,  $D_4$  导通, 电流由 c 流到 d。因此, 当电源电压为正时, 正电流由电源的“+”端流出, 经过  $D_1$  和负载电阻, 最后经过  $D_4$  返回电源。在周期的这一部分, 二极管  $D_2$  和  $D_3$  截止。当电源电压为负时,  $D_2$  和  $D_3$  导通, 而  $D_1$  和  $D_4$  截止。因此在周期的第二部分, 正电流由电源的负极流出, 由 d 点经过  $D_3$  到达 b 点, 经负载电阻、 $D_2$  返回电源。电流的这两条路径如图 4-41 所示。在周期的正负两部分内, 负载的电流都是由 b 到 c。流过负载的电流如图 4-40 所示。电流仍然是脉动形式, 但全波整流电路没有两个脉冲之间留有空闲时间, 这一点与半波整流电路不同。

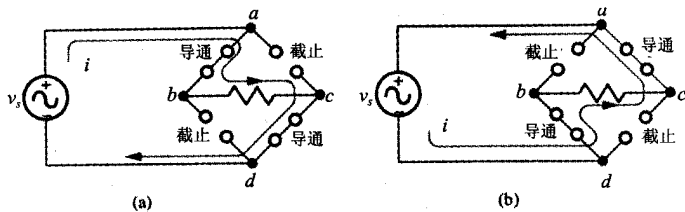


图 4-41 桥式整流电路的电流路径 (s)  $V_s$  为正 (b)  $V_s$  为负

作为电源电路, 全波整流电路的性能要优于半波整流电路。通过将输出电压的负半周倒转, 电路使输出的直流成分加倍。因为电流的直流成分为:

$$I_{dc} = \frac{1}{T} \int_0^T i(t) dt = \frac{2}{T} \int_0^{T/2} \frac{V_p}{R_L} \sin(\omega t) dt = \frac{2V_p}{\pi R_L}$$

直流负载电压为:

$$V_{dc} = I_{dc} R_L = \frac{2}{\pi} V_p$$

#### 例 全波整流电路

一个全波整流电路需要向负载提供 50V 直流电压和 2A 直流电流。求负载电阻和所需交流电压的方均根值。

解: 图 4-42 重画了图 4-40(a) 的桥式整流电路, 并将其负载移到了右边。负载电阻根据欧姆定律, 由直流电压和电流计算得出:

$$R_L = \frac{V_{dc}}{I_{dc}} = \frac{50}{2} = 25\Omega$$

峰值交流电压由式给出:

$$V_p = \frac{\pi(50)}{2} = 78.5V$$

所以 均方根电压为  $78.5/\sqrt{2} = 55.5V$

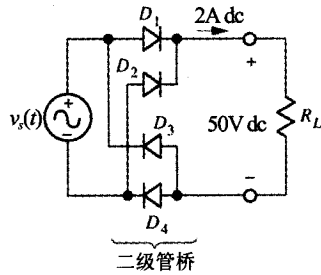


图 4-42 按常规方式画出的二极管桥

思考题: 如果有一个二极管被烧毁, 变成开路, 结果如何?

#### 6. 二极管桥用作开关

二极管桥相当于由电压控制的开关。当电源电压为正时,  $D_1$  和  $D_4$  导通,  $b$  点和  $c$  点分别连接到电源的“+”端和“-”端。当电源电压变成负值时,  $D_2$  和  $D_3$  导通,  $b$  点和  $c$  点仍然与电源相连, 这一次是  $b$  与“-”端相连,  $c$  与“+”端相连。因此,  $b$  点自动与电源的实际正端相连, 而  $c$  点自动与电源的负端相连。这种自动开关作用与电源电压的波形无关——波形可以是正弦波、三角波或者无线电电路中不可预知的通信信号。二极管桥在负载两端形成的电压是输入电压的绝对值:  $v_L(t) = |V_s(t)|$ 。

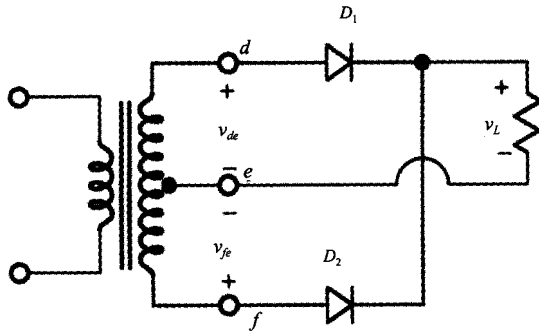


图 4-43 采用中心抽头变压器的全波整流电路

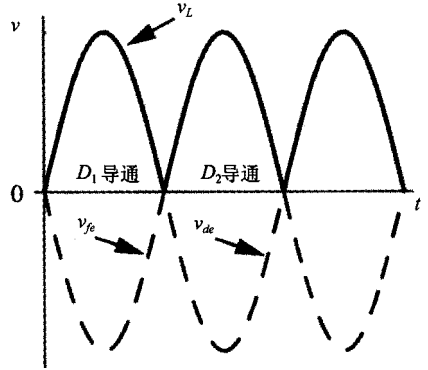


图 4-44 全波整流电路的波形

#### 7. 带有中心抽头变压器的全波整流电路

图 4-43 是采用一个变压器和两个二极管的全波整流电路。变压器的次级是中心抽头, 向两个二极管提供等值反向的电压。每个二极管相当于一个半波整流电路:  $D_1$  提供  $v_{de}$  的正半周,  $D_2$  提供  $v_{fe}$  的正半周, 如图 4-44 所示。改变变压器的匝数比, 变压器就可以提供任意所需直流电压, 从而提高了电路的通用性。它还可以使交流输入和直流输出都能接地, 在桥式电路中无法做到这一点。

### (四) 带有滤波电容的整流电路

#### 1. 滤除脉动

前面描述的这三种整流电路的输出中都包括直流成分。其输出可以表示为一个希望得到的直流成分加上一个不希望出现的波形, 如图 4-45 所示。如图 4-46 滤波器电路的作用就是去除电路中不希望存在的信号。本例中需要一个滤波器来消除这些信号, 至少是大幅减小整流器输出中的脉动成分。第 9 章将全面研究滤波器, 这里只介绍最简单的滤波器——只是在负载两端连接一个电容, 如图 4-47 所示。后面将会看到, 电容稳定了负载电阻两端的电压。

#### 2. 为电容充电

电源为  $V_{psin}(\omega t)$ , 所以在  $t=0$  时经过零电压, 如图 4-48 所示。电压上升时, 二极管  $D_1$  和  $D_4$  导通, 电

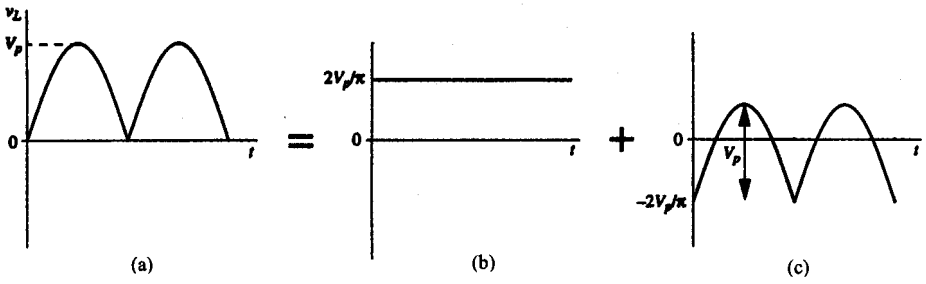


图 4-45 脉动是输出中不希望出现的成分。

(a) 整流器输出 (b) 直流成分 (c) 脉动成分

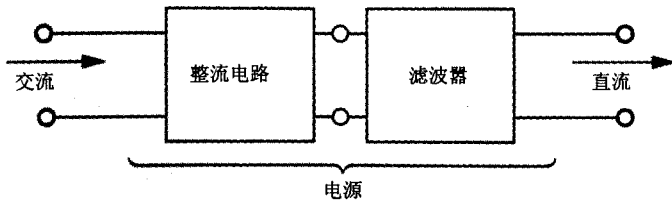


图 4-46 用于降低脉动的滤波器

流流过负载的方式与前面讨论的方式相同。电流也会流向电容并为其充电,直到电容电压达到输入交流电压的峰值。因为这是第一次对电容充电,所以图 4-48 中电流的第一个脉动相对较大。

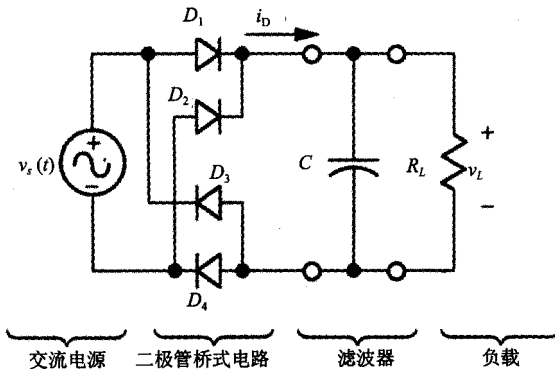


图 4-47 带有电容滤波器的全波桥式整流电路

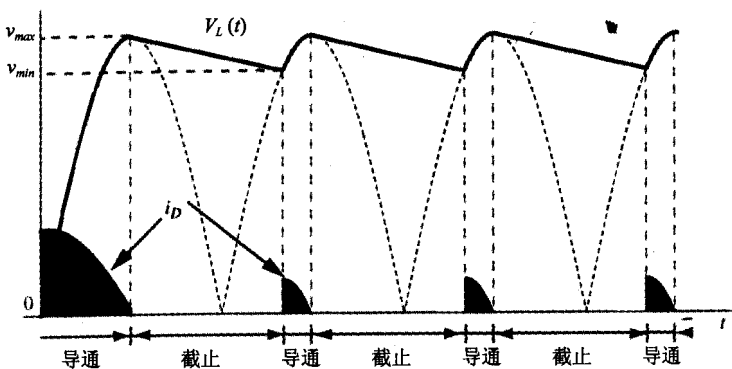


图 4-48 带有电容滤波器的全波整流电路的波形

### 3. 保持电荷

峰值过后, 输入电压急剧下降。如果电容电压也随着输入电压下降, 必然会发生快速放电。但是当输入电压低于电容电压时, 二极管反向偏置, 所以二极管截止, 从而不允许电容通过输入电源放电。因此, 滤波电容和负载电阻与电源断开, 在电源波形的负半周也是这种情况。

### 4. 放电

电容器将通过负载电阻放电, 如图 4-49 所示。为写出电压关于时间的函数, 需要知道时间常数、初始值和终值。时间常数为  $R_L C$ , 初始值为  $V_p$ , 如果允许放电永远持续下去, 终值将为零。因此, 当二极管截止时, 负载和电容两端的电压在放电周期内为:

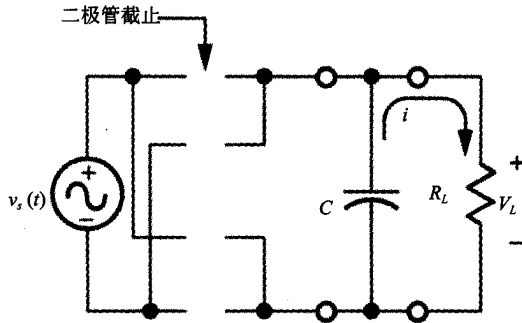


图 4-49 当桥式电路的二极管截止时, 电容通过负载放电

$$v_L(t) = 0 + (V_p - 0)e^{-(t'/R_L C)} = V_p e^{-(t'/R_L C)}$$

式中  $t'$  由峰值测得。

### 5. 再充电

为了很好地完成滤波功能, 电路的时间常数  $R_L C$  应远大于交流输入电压的周期, 输入电压的周期通常为  $1/60\text{s}$ 。因此, 负载电压只会由峰值略微下降一点。图 4-48 中的下降值比实际中的下降值要大。在输入电压等于降低后的负载电压之前, 二极管仍然保持截止。当输入电压再次超过负载电压时,  $D_2$  和  $D_3$  导通, 电流再次流过整流电路。大部分电流都流向电容以补充在周期的放电期间失去的电荷。对电容初次充电的脉冲电流过后, 二极管仅在再充电期间有电流通过, 这一期间是非常短暂的, 如图 4-48 所示。

### 6. 直流负载电压

如果负载电压在交流波的周期内只是略微下降, 如图 4-48 所示, 电源的输出电压与输入交流波的峰值近似相等。因此, 滤波电容的第一个好处就是将直流输出由  $(2/\pi)V_p$  上升到  $V_p$ 。第二个好处是滤波电容大幅降低了脉动电压。在本例中,  $R_L C \gg$  周期。将负载电压降低的指数函数用级数展开后取前两项, 可以看出该指数函数可以很好地近似于一条直线。

$$V_L(t') = V_p e^{-(t'/R_L C)} = V_p \left[ 1 - \frac{t'}{R_L C} + \dots \right]$$

式中  $t'$  由峰值测得。由电压最大值  $V_p$  下降到的最小值大约是:

$$V_{\min} \approx V_p \left[ 1 - \frac{T/2}{R_L C} \right] = V_p \left[ 1 - \frac{1}{2fR_L C} \right]$$

此时, 二极管导通, 允许对电容再充电。在式 (7.11) 中,  $f$  表示交流频率——周期的倒数。峰值—峰值之间的脉动为:

$$V_r = V_{\max} - V_{\min} = \frac{V_p}{2fR_L C}$$

由图 4-48 可以看出, 输出电压进行滤波后的直流成分, 可以用电压最大值和最小值的平均值更好地近似。

$$V_{\text{dc}} \approx \frac{V_{\max} + V_{\min}}{2} = V_p \frac{1}{4fR_L C}$$

## 例 全波整流电路

求图 4-50 所示滤波全波电路中输出电压的脉动电压和直流电压。

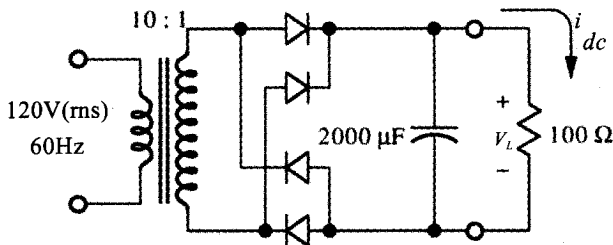


图 4-50 带有电容滤波器的全波整流电路

解 需要整流的输入交流电压为 12V、60Hz。所以其峰值为  $12\sqrt{2} = 17.0\text{V}$ 。时间常数为：

$$\tau = R_L C = 100 \times 2000 \times 10^{-6} = 200\text{ms}$$

它远大于交流波的周期 16.7ms。因此可以采用近似分析方法。负载两端的最大电压为  $12\sqrt{2} = 17.0\text{V}$ 。最小电压由式给出：

$$V_{\min} \approx 17.0 \left[ 1 - \frac{1}{2 \times 60(0.2)} \right] = 16.3\text{V}$$

因此 峰值 - 峰值之间的脉动电压为  $17.0 - 16.3 = 0.71\text{V}$ 。负载的直流(时间平均)电压为最大值与最小值的平均值 16.3V。负载的直流电流等于 16.3V 除以负载电阻, 为 163mA。思考题 如果用半波整流电路代替全波整流电路, 结果如何?

## 7. 性能更好的滤波器

前面研究了最简单滤波器的好处。这种滤波器的性能对于很多应用已经足够了, 但高质量的电源采用的滤波电路更为先进。一些滤波器增加了电感和其他电容来降低脉动, 还有一些滤波器采用电子电路来消除脉动。

## 三、PN 结二极管

### 1. 讨论二极管实际工作原理的原因

作为电子器件, 二极管有很多用途。已经知道二极管如何在电源中将交流变换为直流, 但这只是二极管众多用途中的一个。二极管在收音机、音频系统之类的模拟电子设备中应用非常广泛。在计算和数字手表之类的数字系统中更为重要。

因为二极管是一个简单的电子器件, 所以它在电子技术的学习过程中扮演着重要角色。由它开始学习电子技术是非常合适的。二极管对于电子技术的教学也非常重要, 因为它提供了研究半导体电子技术的物理基础的机会。实际上, 生活和工作中所需要的所有电子设备都是根据这些半导体过程生产的。本节描述了很多这类半导体过程。

### 2. 二极管工作原理

要使读者理解二极管的工作原理是一个非常困难的问题。通常都是用已掌握的知识来解释未知的知识, 这也是非常合理的方法。但解释二极管如何工作时, 要用到其他一些未知的知识, 也就是一些诸如空穴、漂移电流、裸露电荷和耗尽层之类的半导体过程。换句话说, 在搞清楚一个简单的 PN 结二极管工作原理前, 要考虑很多物理过程。理解二极管需要花费很多精力, 但通过这些努力会得到很多其他知识。现代电子技术的基础就是通过此类物理过程控制半导体材料中的电荷。

### (一) 半导体过程和 PN 结

#### 1. 固定的晶体类型

物质共有四种形态: 气态、等离子态、液态和固态。通过构成物质的各原子或分子之间的相互作用可以



理解这些形态。固态物质中,原子相互之间的位置保持不变。原子通常保持规则的晶体次序,通过在共价键中共享电子而结合在一起。图 4-51 是这种晶格的两维表示。带有数字的大圆圈表示原子核,圆点表示价电子,曲线表示电子的共价键效应。电子带负电,原子核带正电。当然,在每个原子核周围有很多个电子,但图中没有表示这些内层结构,因为它们与所要研究的键过程或半导体过程无关。图中的最外层电子层有四个电子,这是半导体(如硅)的典型情况。因为各原子是电中性的,所以原子核的多数电荷都被内层电子中和,剩余的正电荷是电子电荷的四倍,这就是原子核的有效电荷。在图 4-51 中用 +4 表示这些有效电荷。

### 2. 绝缘体和导体

在零绝对温度时,固体不是电导体就是绝缘体。图 4-51 所示材料的所有电子都处于共价键中,所以它是绝缘体。如果将这样一种材料放在电路中,因为没有可以自由移动的电子,所以不会有电流通过。在导体中,每个原子至少有一个没有处于共价键中的多余电子。这些多余电子就是人们熟知的传导电子,它们在电力的作用下可以自由移动。

### 3. 半导体

热能对固体的导电性能有很大影响。热能分布在材料中的所有电子和原子核中,或者说热能贮存在电子和原子核的物理运动和振动中。这种振动可能使一些价电子从其键位中解脱出来而变成传导电子。

一些材料中没有多余电子,并且在常温下其所有电子都保留在共价键中,这些材料都是很好的绝缘体。以方形晶格形式排列的碳、许多塑料和瓷器在常温下都是很好的绝缘体。还有另外一些材料,它们在零绝对温度时是很好的绝缘体,但它们的电子在共价键中束缚得不是很牢固。这些材料在常温时,一部分电子会脱离共价键而成为传导电子。图 4-52 表示有两个电子脱离共价键位置的情况。由于存在可以变成传导电子的电子,这种材料在常温下变成了导体,所以称之为半导体。

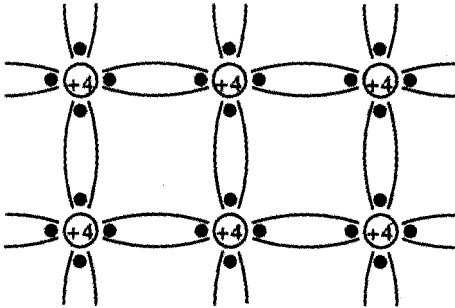


图 4-51 绝缘体

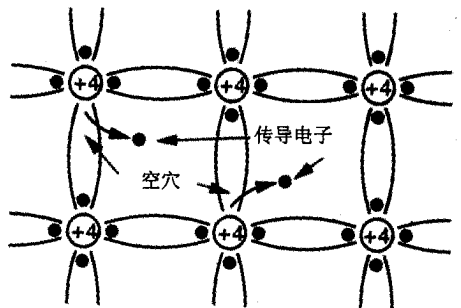


图 4-52 显示空穴和电子的半导体

### 4. 空穴和空穴移动

当一个电子离开其键位时,会留下一个空位,这个位置称作空穴。失去价电子后,原子核有一部分电荷未被中和,从而带有正电荷。因此,可以把空穴当做一个正电荷。因为在电作用力的影响下,其他束缚电子可以填补空穴,从而在别的位置留在新的空穴,所以空穴也可以自由移动。如果在图 4-52 中有一个电作用力试图使电子由左向右移动,传导电子会在力的作用下相应运动。但空位附近的电子也试图向右移动,移动后可能会使另一个键位成为空位。可以想象如图 4-53 所示的过程。首先,电子挣脱共价键的束缚变为传导电子,并产生一个空穴。因为存在电作用力试图使电子向左移动,所以共价键内的电子也有由左向右移动的趋势。因此,会产生由 2 到 5 的转移,空穴向左移动。因为存在与空穴关联的多余正电荷,所以空穴的移动效果相当于一个正电荷由右向左移动。

如果将半导体置于电路中,电压会产生电流,电流由空穴和电子共同传导。空穴和电子称作载流子。注意:由空穴移动传导的电流和由电子传导的电流是可以累加的。向左运动的空穴传导向左的正电流,向右运动的电子传导向右的负电流,也就是向左的正电流。在典型半导体中,空穴的移动速度是电子移动速度的三分之一,所以由空穴传导的电流占总电流的四分之一。

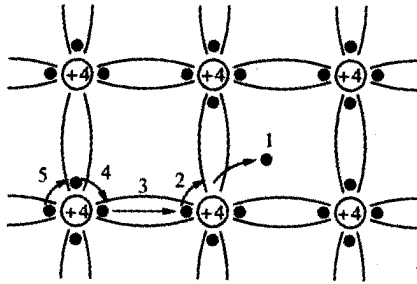


图 4-53 束缚电子的移动产生空穴移动

### 5. 热能的重要性

前面已经说明热能产生了空穴 - 电子对。并表明了电子如何因为热振动而改变键位,其效果相当于一个可以移动的正电荷。在描述这些过程时好像它们很有序、很稳定,但事实并非如此。对于温度为 300K 的纯净硅,每立方米中大约有  $1.5 \times 10^{16}$  个传导电子。因为热运动,每秒内产生和因复合而消失的空穴 - 电子对约为  $10^{22}$  个。

因此,半导体内传导电子的随机热运动是非常剧烈的。在短时间时会有很多空穴 - 电子对产生,也会有很多空穴和电子因复合而消失。

### 6. N 型掺杂

向纯净的本征半导体中加入少量杂质可以提高载流子的浓度。假定有一块本征硅,每个原子有 4 个价电子。如果向硅的晶体中掺入少量 5 价元素杂质(如磷),杂质的原子核将与晶格结合,余下一个电子。这个电子成为传导电子,如图 4-54 所示。因为杂质原子的原子核中有附加电荷,所以在原子核的晶格中也会有多余电荷。这一增加杂质的过程称为“掺杂”,图 4-54 所示为 N 型掺杂,之所以称为 N 型掺杂,是因为附加载流子为负电荷。这种掺杂过程提高了电子的浓度,所以产生了 N 型半导体。在这种情况下,杂质向半导体贡献了传导电子,所以称为施主原子。

### 7. P 型半导体

同理,如果向本征半导体中 3 价元素杂质,每个杂质的原子中会产生一个空穴,如图 4-55 所示。图中给出了空穴,并将缺少一个正电荷的原子核记为 +3。如果空穴被一个传导电子填充,半导体的晶格结构将带有一个负电荷。这种杂质接受半导体的传导电子,形成一个多余空穴,所以称为受主原子。掺杂有受主原子的半导体称为 P 型半导体,因为它具有相当于可移动正电荷的多余空穴。

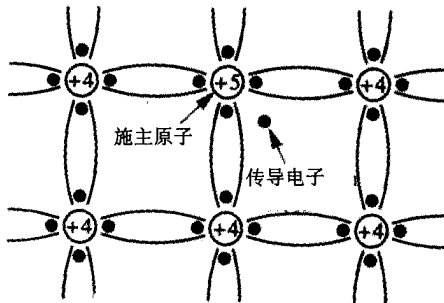


图 4-54 N 型半导体中具有多余传导电子

施主原子贡献的电子和由受主原子产生的空穴并不停留在相关原子核的周围,而是参与到所有载流子的热运动中。对半导体进行掺杂可以提高载流子的浓度,并能控制哪一种载流子在半导体传导过程中起主要作用。

### 8. 漂移电流

前面描述了一个半导体被置于电路中的情况。空穴和电子的移动形成电流。如果半导体是 P 型的,多

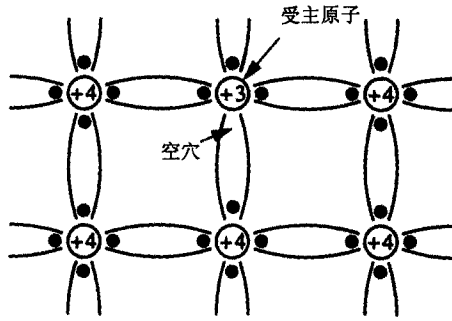


图 4-55 P 型半导体中具有多余空穴

多数电流由空穴传导。如果半导体为 N 型,多数电流由电子传导。因为载流子总是按照外部电压的特定方向漂移,所以这种电流称为漂移电流,漂移电流由有序过程引起。

### 9. 扩散电流

然而,由于存在热运动,某一特定区域内的多余载流子倾向于在整个材料中均匀分布。这样的流动称为扩散。在房间内打开一只装有刺激性气味化学药品的瓶子时,会发生扩散流动。接近瓶子的人先闻到味道,距瓶子稍远一些的人后闻到。最终,房间中的每个人都会闻到气味,这是因为分子在热运动的作用下均匀分布于整个房间之中。同样,载流子也会因为热运动而远离浓度较高的区域,从而产生了扩散电流。该电流与载流子随距离的浓度变化率成正比。因为扩散是由热运动引起的,所以它是一种无序过程。

### 10. 小结

本征半导体中,热能使电子离开其键位变成传导电子而留下了空穴,所以本征半导体中有很多空穴和电子,两者的数目相等。向纯净半导体中掺杂受主杂质原子或施主杂质原子可以形成 P 型或 N 型半导体。新增的空穴或电子会参与原有载流子的随机热运动。载流子既可以通过有序过程——漂移形成电流,也可以通过无序过程——扩散形成电流。

### 11. 束缚电荷

在受主或施主原子的晶格结构中也束缚有电荷。受主原子相对于邻近原子来说缺少一个正电荷,所以受主原子相当于静态的负电荷。施主原子相对于周围原子多了一个正电荷,所以施主原子相当于静态的正电荷。因为多余的移动载流子中和了杂质原子中的束缚电荷,所以半导体在整体上是电中性的。PN 结中会发生所有这些过程。

### 12. 结构

PN 结形成于 P 型半导体和 N 型半导体的结合区域,如图 4-56 所示。形成这样的结后,将很快发生图 4-57 所示的系列事件。

(1) 扩散电流。N 型材料的电子向 P 型材料中扩散,P 型材料中的空穴向 N 型材料扩散。因为载流子的浓度不同,并且处于激烈的热运动中,所以会形成很强的扩散电流。

(2) 复合。在下面的情况下将马上发生复合:电子扩散到 P 型材料中遇到可以填充的空穴;空穴扩散到 N 型材料中被传导电子填充。

(3) 耗尽层。PN 结两侧的区域因为发生空穴与电子的复合而缺少载流子。这个区域称为耗尽层。可以预测,向耗尽层大量倾注载流子不会发生其他过程。

(4) 裸露电荷。在 PN 结 P 型材料一侧的耗尽层中,束缚在晶格结构中的受主原子现在是裸露的。来自 N 型材料一侧的电子已经与很多空穴复合,所以受主原子中缺少电荷的原子核相当于固定在这个区域的多余负电荷。同理,具有多余正电荷的施主原子核相当于束缚在晶格结构中的正电荷。因为这些原子的一些电子已经与来自 P 型材料一侧的空穴复合,所以这些原子也是裸露的。因此,在耗尽层中的晶格结构中束缚着一些裸露电荷,如图 4-58 所示。

(5) 电池-电容效应。这种电荷分布与电容非常类似,如图 4-59 所示。一个电池为电容的两端充上电荷。电容下极板上具有正电荷,上极板上具有负电荷。如果两个极板之间有一个电荷,它将受到下面正电荷

的吸引和上面负电荷的排斥而向下运动。与此类似,如果一个正电荷位于两极板之间,它将向上运动。如果极板之间存在着电子或者正电荷,该区域会形成有序过程而产生漂移电流。与此类似,图 4-58 中耗尽层内的多余载流子也会受到裸露束缚电荷的作用力。

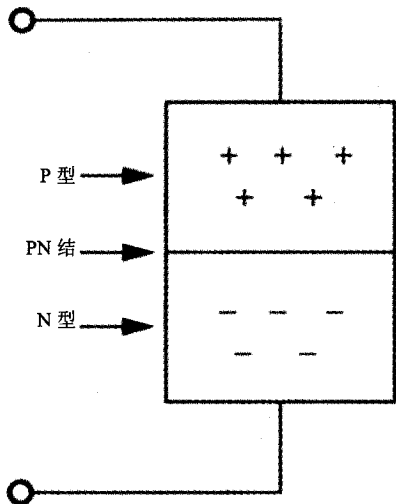


图 4-56 PN 结

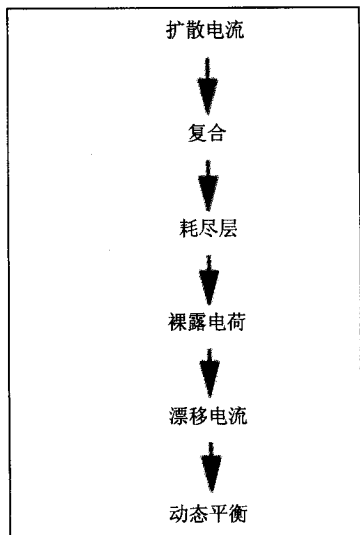


图 4-57 PN 结形成时的过程

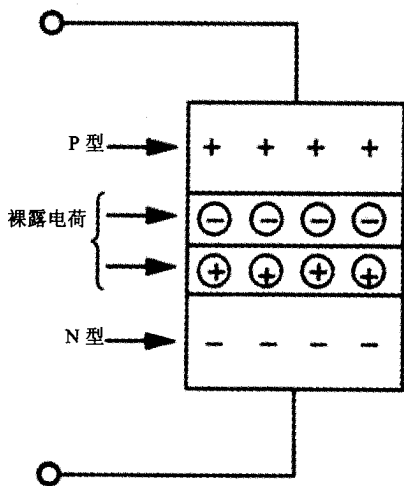


图 4-58 裸露电荷

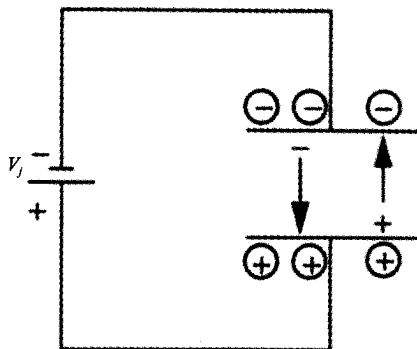


图 4-59 裸露电荷相当于一个已充电的电容

(6) 漂移电流。这些作用力试图形成一个向上的漂移电流, 希望将电子送回 N 型材料中, 将空穴送回 P 型材料中。因此, 可以想像: 空穴和电子因为扩散而通过 PN 结, 由于裸露电荷形成的漂移电流又会向反方向移动。

(7) 这两个过程会很快达到动态平衡。另一种观察这种动态平衡的方法是假定裸露电荷形成了一个内部的电池 - 电池效应, 该效应通过自我调节使扩散电流停止。因此, 在有无序过程(扩散过程)和有序过程(电池 - 电容效应)之间会达到动态平衡。

### 13. 束缚电荷

因为存在裸露电荷, PN 结两端大约有 0.7V 的内部电压, 但整个二极管外部不会形成电压。如果没有外部电压打破这种平衡, 不会有电流流动。

## 14. 正向偏置特性

如果给二极管加一个外部电池,如图 4-60 所示,并且外部电池的极性与内部电池-电容效应相反,平衡将被打破,电流会持续流过二极管。这种情况下,电池使 P 型材料中的空穴和 N 型材料中的电子向 PN 结运动。因为试图阻止电流通过耗尽层的漂移过程已被外部电压抑制,所以在扩散电流的作用下,PN 结中会有电流通过。因为此电流是由载离子的高能热运动驱动的,所以随着外部电压的升高,这个电流会急剧增大。如果外部电压超过了内部电池-电容效应的电压,PN 结中会通过很大的电流,二极管导通。对于硅二极管来说,这个电压只有 0.7V,所以二极管的正向偏置特性近似于理想二极管的特性。锗二极管只需要 0.2V 就可以导通,所以它比硅二极管更为理想。

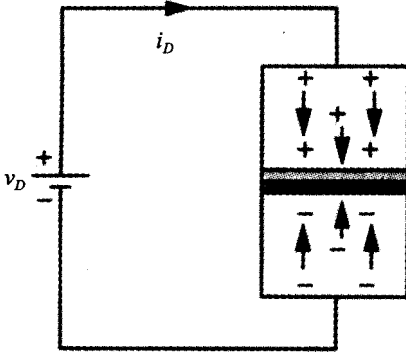


图 4-60 正向偏置 PN 结

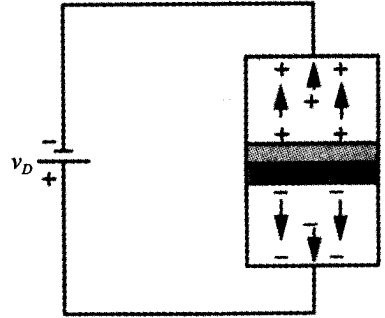


图 4-61 正向偏置 PN 结

## 15. 反向偏置特性

如果外部电压的极性增大了内部电池-电容效应的影响,P 型半导体中的空穴和 N 型半导体中的电子将试图远离 PN 结,如图 4-61 所示。外部电压只会加宽耗尽层,从而增加内部电池-电容的效应。对于此种极性的外部电压,只有很少的电流流过二极管,这与理想二极管非常近似,二极管截止。PN 结反向偏置时,由于存在因裸露电荷而分离的电荷,所以 PN 结相当于一个电容。下一节将给出 PN 结二极管的方程,可以看出理想二极管与半导体 PN 结是多么近似。

## (二) 实际二极管的物理特性

## 1. PN 结方程

PN 结的伏安特性可以由下式很好地描述:

$$i_D = I_0 \left[ \exp \left[ \frac{qV_D}{\eta kT} \right] - 1 \right]$$

式中:

$$\exp(x) = e^x$$

$i_D$  = 二极管电流, A

$v_D$  = 二极管电压, V

$I_0$  = 一个称作反向偏置饱和电流的常数, 决定于半导体的材料、PN 结的形成形式和 PN 结的大小

$q = |e|$ , 电子电荷的大小,  $1.60 \times 10^{-19}$  C

$k$  = 玻尔兹曼常数,  $1.38 \times 10^{-23}$  J/K

$T$  = 绝对温度, K

$\eta$  = 介于 1、2 之间的一个常数, 称为理想因子, 它决定于 PN 结的材料和形成方法。

图 4-62 给出了式的曲线, 其中的参数值为:  $\eta = 1.5$ ,  $I_0 = 10^{-9}$  A。这是硅二极管在室温下的典型参数值。如果要手工绘制 PN 结方程的曲线, 那么  $V_D$  关于  $i_D$  的函数关系非常有用:

$$V_D = \eta V_T \ln \left[ \frac{i_D}{I_0} + 1 \right]$$

其中  $V_T = kT/q$  是温度的等效电压,  $T = 300\text{K}$  时, 其大小为  $25.9\text{mV}$ 。

### 2. 温度的等效电压

如果将图 4-62 所示 PN 结二极管的特性与图 4-63 所示的理想二极管特性相比较, 可以看出: 实际二极管的特性是非常不理想的。之所以产生这种现象, 是因为在绘制 PN 结特性曲线时对电压刻度进行了扩展。图 4-63 采用相同的电压刻度同时给出了二极管和  $1\text{k}\Omega$  电阻的伏安特性。

### 3. 结特性

PN 结的特性可以总结如下: 在反向偏置区域, 电流基本为零; 正向偏置时, 电压低于一个很小的门限电压时, 电流可以忽略不计。当电压超过门限电压的大小后, 电流会急剧增大。电流开始增大后, PN 结两端的电压保持相对恒定。硅二极管的门限电压约为  $0.7\text{V}$ 。

但在许多二极管应用中, 可以用门限电压的概念简化分析。在本章前面提到的整流电路中, 可以假定二极管导通时两端有  $0.7\text{V}$  的电压, 所以整流器输出电压和电流会相应减小。采用门限电压作为模型后, 二极管的电压降可以很容易地包括在二极管电路的设计和分析中。

### 4. 功率限制和热传导

温度会强烈影响二极管赖以工作的半导体内部过程。温度在式中以指数形式出现。温度对反向饱和电流  $I_0$  的影响也非常大。因此, 电子设计师必须防止二极管变得过热。输入二极管的电能不能产生热。

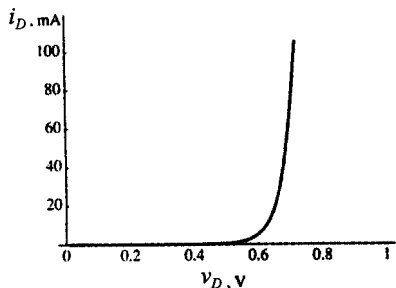


图 4-62 硅二极管的典型伏安特性

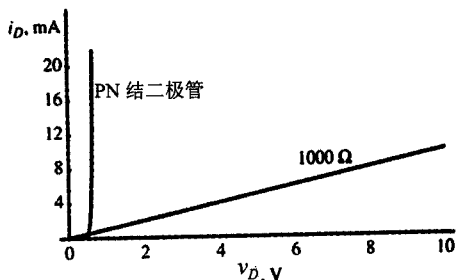


图 4-63 PN 结二极管与  $1\text{k}\Omega$  特性的对比

输入器件的功率为：

$$p = vi$$

理想二极管功率为零。因为正向偏置时其电压为零, 反向偏置时电流为零, 所以电压和电流的乘积总是零。实际二极管吸收的能量也很小, 因为正向偏置时, 电流很强, 它两端的电压较小, 反向偏置时电压很高, 但电流较弱。但即使如此, 输入二极管的少量功率也是非常重要的, 因为热能主要产生在 PN 结部分, 而 PN 结区域非常小, 所以很小的功率就可以使 PN 结的温度显著升高, 从而影响二极管的特性。因此, 设计电源的二极管时, PN 结与外部之间必须有良好的热导体。二极管的封装方式必须能增强二极管与周围环境的热传导。热交换器, 甚至风扇常用于提高二极管的冷却性能。有时在大型供电设备中还会用水来冷却二极管。图 4-64 是一个封装了散热器的功率半导体。

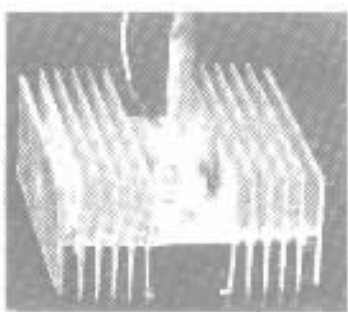


图 4-64 封装了散热器的功率半导体

### 5. 击穿

实际二极管能够承受的反向电压的大小也会限制二极管的应用。反向偏置时,外部电压会增加耗尽层裸露电荷的效应。在此情况下,二极管中应该没有电流,如图 4-61 所示。但是,当耗尽层两端的电压太大时,作用于这个区域内束缚电子上的作用力会变得非常大,以致于束缚电子能够从所在键位中挣脱出来。在这种情况下,会在短时间内形成很强的电流,如图 4-65 所示。在反向击穿电压  $-V_B$  时迅速产生的电流会增大注入 PN 结内的功率,使二极管失效。

### 6. 电源中的击穿

在供电操作中,必须避免反向击穿。一些二极管的击穿电压可以超过  $-1000V$ 。设计者可以选用这类二极管。在图 4-38 所示的不带滤波器的半波整流电路中,二极管截止、电源达到其最大负值时,二极管两端的电压达到最大,为  $-V_p$ 。为了在电源中正常工作,二极管的 PIV 必须大于这一电压。

在图 4-43 所示的带有电容的电源中,二极管两端的最大电压约为  $-2V_p$ ,如图 4-66 所示。电容使负载电压保持为约  $+V_p$ ,当电源电压变为  $-V_p$  时,二极管两端的电压达到最大值。为了能在这样的电源中正常工作,二极管必须能够承受的反向电压为  $-V_p$ 。

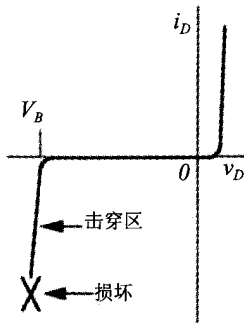


图 4-65 当反向电压超过击穿电压时,电流迅速增大

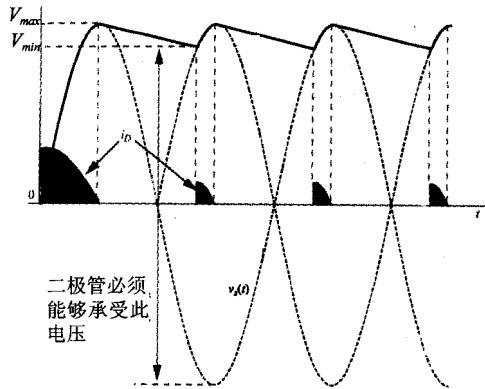


图 4-66 为了能够在整流电路中正常工作,二极管两端的电压不能超过其击穿电压

## 四、晶体管及其电流放大原理

[ 考试内容 ]晶体管及其电流放大原理。

[ 评价标准 ]熟悉晶体管的结构及其电流放大原理和晶体管的三种工作状态,能说明简单、交流电压放大电路中各元器件的作用。

### (一) 晶体管的结构

晶体管是具有两个 PN 结、三个电极的电流控制型半导体器件。根据 PN 结的组合方式不同,晶体管有 NPN 型和 PNP 型两种类型。这两种类型又都有硅管和锗管,但硅管多为 NPN 型,锗管多为 PNP 型。图 4-67 是它们的结构示意图和电路符号。晶体管的三个不同的导电区分别称为发射区、基区和集电区。由三个区引出的电极分别称为发射极 E、基极 B 和集电极 C。发射区与基区之间的 PN 结称为发射结,集电区与基区之间的 PN 结称为集电结。其结构特点是发射区掺杂浓度大、基区很薄且掺杂浓度小和集电结面积大,这是晶体管具有电流放大作用的结构基础。这就是为什么两个二极管对接起来引出三个电极没有电流放大作用的结构原因。

### (二) 晶体管电流放大原理

晶体管的电流放大作用实质是基极电流与集电极电流按比例分配,使集电极电流随基极电流成正比变化、且集电极电流远大于基极电流,故有以小(基极输入电流)控大(集电极输出电流)的所谓放大作用。

晶体管能有电流放大作用除具备上述的内部结构条件外,还需要外部的电压条件。即必须是发射结加正向电压(称为正向偏置,简称正偏),集电结加反向电压(称为反向偏置,简称反偏)。在这种偏置条件下,晶体管才处于放大工作状态。NPN 型晶体管在放大工作状态时三个电极的电位关系是  $V_C > V_R > V_E$ 。

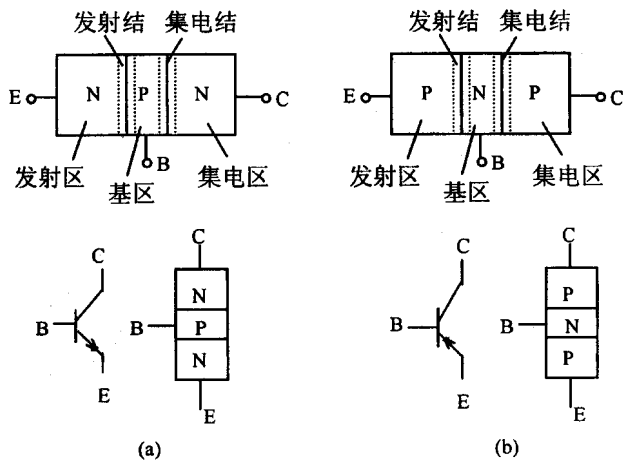


图 4-67 晶体管结构示意图和电路符号

图 4-68 表示 NPN 型晶体管处于放大工作状态时电流放大(即电流按比例分配)的原理。较高电压的集电极电源  $E_C$  和较低电压的基极电源  $E_B$ 。使晶体管满足放大的外部电压条件。由于发射结正偏,有利于发射结两边多数载流子的扩散。浓度较大的发射区自由电子向基区扩散,并由电源  $E_C$  不断地向发射区补充自由电子,从而形成发射极电流  $I_E$ 。扩散到基区的自由电子在继续向集电结运动的过程中,一部分被基区的空穴俘获而复合。由于基极电源  $E_B$  不断地将与复合的数量相等的自由电子拉走,以保持电的平衡,从而形成基极电流  $I_B$ 。由于集电结反偏,内外电场方向一致,在这种电场力的作用下,使到达集电结的自由电子不断地跑向集电区。电源  $E_C$  又将这些跑向集电区的自由电子拉走,从而形成集电极电流  $I_C$ 。 $I_B$  与  $I_C$  的大小比例主要决定于在基区复合的自由电子的数量。由于基区掺杂浓度小,空穴数量少,而且基区很薄,自由电子在基区过渡的时间很短,所以自由电子与空穴复合的机会很少,大量的自由电子都跑向集电区,所以  $I_C \gg I_B$ 。发射结的伏安特性曲线和二极管的相似,偏置电压  $U_{RE}$  增加,发射区向基区扩散的自由电子数量增多,跑向集电区的和在基区复合的数量也按比例增加,所以  $I_C \propto I_B$ 。即  $I_C$  随  $I_B$  成正比的增加或减小。这就是晶体管的电流放大作用。如果发射结的偏置电压  $U_{BE}$  保持不变,则由发射区向基区扩散的自由电子的数量就保持不变,也即  $I_B$  和  $I_C$  的大小保持不变,改变  $V_C$  的大小(只要保持集电结反偏)对  $I_B$ 、 $I_C$  几乎没有影响,  $I_C$  只与  $I_B$  成正比变化。三个极的电流关系为  $I_E = I_B + I_C = (1 + \beta) I_B$ 。



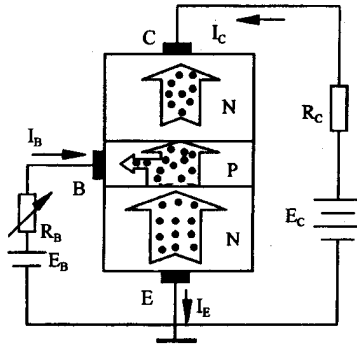


图 4-68 晶体管电流分配(放大)原理

晶体管处于放大工作状态时,集电极电流与基极电流的关系是:  $\Delta I_C = \beta \Delta I_B$  ( $i_c = \beta i_b$ ) 和  $I_C \approx \beta I_B$ 。  $\beta$  称为晶体管的电流放大系数。

### (三) 晶体管的三种工作状态

1. 放大工作状态: 发射结正偏、集电结反偏。  $\Delta I_C = \beta \Delta I_B$  和  $I_C \approx \beta I_B$ 。
2. 饱和工作状态: 发射结和集电结均正偏。由于集电结正偏,集电极电压  $U_{CE} < U_{BE}$ , 削弱了集电极吸引电子的能力,这时  $I_C$  不再随  $I_B$  的增加而增加,晶体管失去放大能力。此时集电极的最大电流称为集电极饱和电流  $I_{CS}$ 。
3. 截止工作状态: 发射结和集电结均反偏。实际上当  $U_{BE}$  小于死区电压时,  $I_B$ 、 $I_C$  均已近似为零,管子已经处于截止状态,所以也就失去了放大的作用。

### (四) 晶体管的主要参数

1. 电流放大系数  $\beta$  在使用上通常选择  $\beta = 20 \sim 100$  的晶体管为宜。
2. 质量参数有集-基反向漏电流  $I_{CBO}$  和集-射穿透电流  $I_{CEO}$ 。  $I_{CBO}$  是当放大器的射极断开时集电结的反向电流,  $I_{CEO}$  是当断开基极时集电极和射极之间的电流。这两个电流均随温度而变化,影响放大器的稳定性,因此它们越小越好。
3. 极限参数有集电极最大允许电流  $I_{CM}$ 、集-射(基极开路时)最大允许电压,或称集-射击穿电压  $BU_{CEO}$  和集电极最大允许耗功率  $P_{CM}$  ( $= U_{CE} I_C$ )。超过这些极限值使用都将导致晶体管过热而损坏。

### (五) 晶体管的交流放大电路及各元器件的作用

交流电压放大器主要用来放大交流信号电压的幅度。在工业电子技术应用中,信号电压的频率通常在  $20 \sim 10\,000\text{Hz}$  之间,属于低频电压放大器。

#### 1. 电压放大器的组成及各元器件的作用

在工业电子技术中,应用较多的是共射极交流电压放大器,即输入信号回路与输出信号回路以发射极为公共端,如图 4-69 所示。图中  $u_i$  为输入信号电压, $u_o$  为输出信号电压。放大电路的输入端可以直接接信号源,或是多级放大电路的前级放大电路的输出端,放大电路的输出端可以直接接负载  $R_L$ ,或接后级放大电路的输入端。各组成元件及其作用:

- (1) 晶体管:是放大元件。利用其电流的放大作用,将输入信号电压  $u_i$  引起的基极信号电流  $i_b$  放大为  $i_c = \beta i_b$ ,从而使较大的集电极电流  $i_c$  受输入电压  $u_i$  的控制。
- (2) 集电极电阻  $R_C$ :通过  $R_C$  将放大的集电极电流  $i_c$  转换为较大幅度的电压信号,从而实现电压放大。
- (3) 集电极电源  $E_C$ :是放大电路的能源,同时它也是保证晶体管处于放大工作状态的必要条件之一,即  $E_C$  可使集电结反偏。
- (4) 基极偏置电阻  $R_B$ :用来调整放大电路的静态工作点。在  $E_C$  ( $E_C$  兼作基极偏置电源  $E_B$ ) 一定的情况下,通过改变  $R_B$  来改变晶体管的基极直流偏置电流(简称偏流)  $I_B$ ,从而改变它的直流  $I_C$  和  $U_{CE}$ 。只有放大电路获得合适的静态工作点( $I_B$ 、 $I_C$  和  $U_{CE}$ ),才能保证信号不失真的放大。

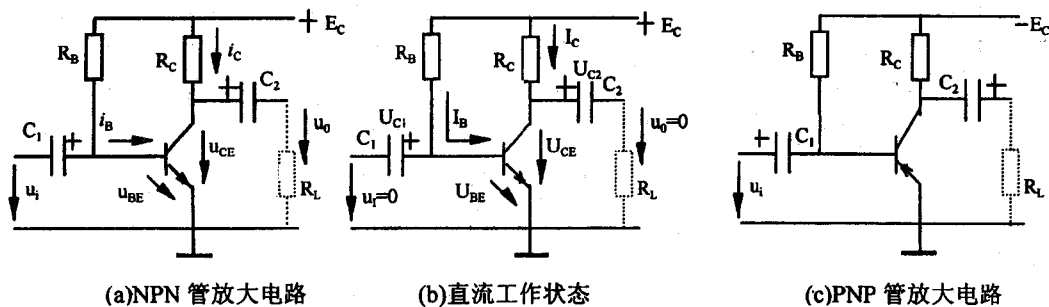


图 4-69 单管交流电压放大电路

(5) 耦合电容  $C_1$ 、 $C_2$ ： $C_1$ 、 $C_2$  分别接到放大电路的输入端和输出端。它们具有隔断直流和沟通交流信号的双重作用。利用电容不通直流的特点，隔断放大电路输入端与信号源之间、输出端与负载之间的直流通路，以保证放大电路的直流静态工作点不受前后级的影响，同时又使电容对交流信号具有很小的容抗，使信号电压几乎不衰减地通过电容（耦合电容对交流信号可视为短路）。

### (六) 放大电路的基本工作原理

1. 静态工作情况 输入信号电压  $u_i = 0$ ，也即相当于输入端短路时的情况，称为放大电路的静态。静态时各极电流和电压均为恒定直流，故又称直流工作状态。直流工作状态通常用基极直流电流（即基极偏流） $I_B$ 、集电极直流电流  $I_C$  和集-射极直流电压  $U_{CE}$  来描述， $I_B$ 、 $I_C$  和  $U_{CE}$  是相关联的三个量，称为放大器的静态工作点。基-射之间的电流与电压之间的关系特性曲线与图 4-68 二极管的伏安特性曲线相似，称为晶体管管的输入特性曲线。晶体管处于放大状态时，也工作于特性曲线的近似直线部分。因此硅管静止工作状态的基-射电压  $U_{BE} \approx 0.6V$ 。

直流工作点的计算 根据 KVL， $E_C = I_B R_B + U_{BE}$ ，所以基极偏流

$$I_B = (E_C - U_{BE}) / R_B$$

当  $E_C \gg U_{BE}$  时，可忽略  $U_{BE}$ ，因此  $I_B \approx E_C / R_B$ 。

根据晶体管的电流放大作用，集电极直流电流  $I_C = \beta I_B$

根据 KVL， $E_C = I_C R_C + U_{CE}$ ，所以

$$U_{CE} = E_C - I_C R_C$$

由以上关系可见，通过改变偏置电阻  $R_B$ ，可改变  $I_B$ 、 $I_C$  和  $U_{CE}$ ，即通过改变  $R_B$  可改变放大器的直流工作点。

在信号电压  $u_i = 0$  时  $u_o = 0$ 。此时耦合电容  $C_1$  和  $C_2$  的电压分别为  $U_{C1} = U_{BE}$  和  $U_{C2} = U_{CE}$ 。

[例]  $E_C = 12V$ ， $R_C = 12k\Omega$ ， $R_B = 300k\Omega$ ， $\beta = 37.5$ ，试求放大器的静态工作点。

解： $I_B = (E_C - U_{BE}) / R_B \approx E_C / R_B = 12 / 300 = 0.04mA$

$$I_C = \beta I_B = 37.5 \times 0.04 = 1.5mA$$

$$U_{CE} = E_C - I_C R_C = 12 - 1.5 \times 12 = 6V$$

2. 动态工作情况 在放大电路的直流工作状态的基础上，如果输入端输入交流信号电压  $u_i$ ，设  $u_i = U_{im} \sin \omega t$ ，则在基-射两端又增加了一个交流信号电压  $u_i$ ，此时的基-射电压  $u_{BE} = U_{C1} + u_i = U_{BE} + u_i$ ，是一个交直流叠加的单方向的直流脉动电压。由于直流偏流  $I_B$  使晶体管工作在输入特性曲线的直线部分， $i_b \propto u_i$ ，故使有信号时的基射电流  $i_{BE} = I_{BE} + i_b$ ，集电极电流  $i_c = \beta (I_B + i_b) = I_C + i_c$ 。电压  $u_{CE} = (E_C - I_C R_C) - i_c R_C = U_{CE} - u_{ce}$ ； $u_o = u_{CE} - U_{C2} = U_{CE} - u_{ce} - U_{C2} = -u_{ce}$ 。上述各极动态电流、电压波形如图 4-70 所示。

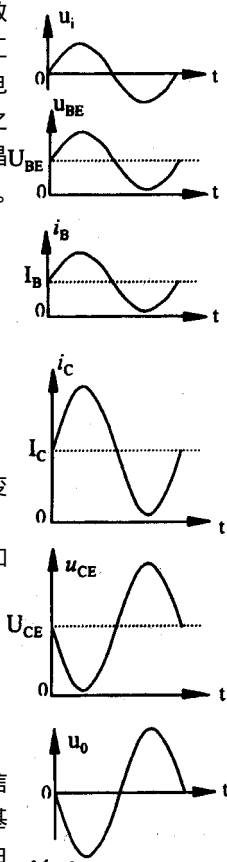


图 4-70 放大电路的动态情况

综上所述分析可知,各动态量都是由交流信号分量和静态直流分量的叠加。输出信号电压  $u_o$  的有效值与输入信号电压  $u_i$  有效值之比,即  $A_u = U_o/U_i$  称为放大电路的电压放大倍数。但  $u_o$  与  $u_i$  相位相反。

### 3. 放大电路的非线性失真

放大器的最大集电极,也就是饱和电流  $I_{CS} \approx E_C/R_C$ ,饱和管压降  $U_{CES} = 0.2 \sim 0.3V \approx 0$ ,而此时的基极电流  $I_{BS} = I_{CS}/\beta_o$ 。所以当基极电流  $i_B \geq I_{BS}$  时,集电极电流将保持  $I_{CS}$  不变。如果基极偏置电流  $I_B$  过高,使  $i_B$  的最大幅度超过  $I_{BS}$ ,则输入信号电压  $u_i$  的正半波将由于饱和而不能被正确的放大,使输出电压  $u_o$  的负半波被削顶。因此静态工作点太高,会产生非线性饱和失真(图 4-71(a))。如果基极偏置电流  $I_B$  过低, $I_B$  小于信号电流的最大值时,这将由于管子的截止而使信号电流的负半周被削顶,也即使输出电压  $u_o$  的正半周被削顶,这就产生了非线性的截止失真(图 4-71(b))。

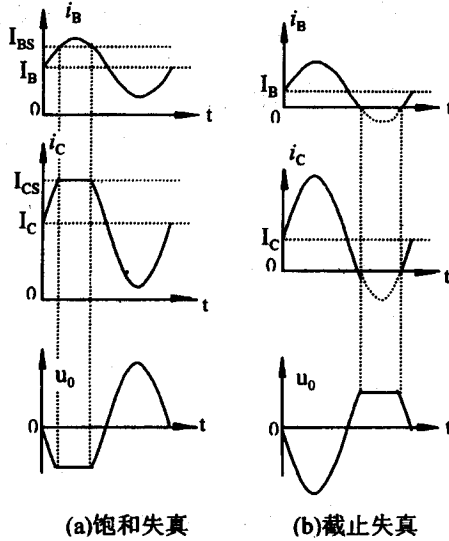


图 4-71 静态工作点与非线性失真

如果发生上述非线性饱和失真或截止失真,应通过改变偏置电阻  $R_B$  来降低或升高偏置电流  $I_B$ ,以消除发生饱和或截止失真。

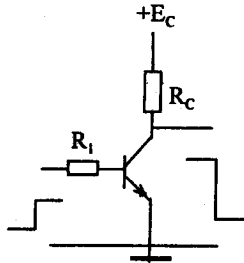


图 4-72 晶体管开关工作状态

## (七) 晶体管的开关电路

图 4-72 为晶体管开关电路。输入端接控制电压  $U_i$ ,当  $U_i$  为高电平时,使基极电流  $I_B > I_{BS}$ ,晶体管饱和导通,管压降  $U_{CES} \approx 0$  相当于一个开关短路接通;当  $U_i$  为低电平时( $U_i \leq 0$ ),晶体管截止, $I_C = 0$ ,相当于开关断开,截止时管压降  $U_{CE} = E_C$  相当于开路电压。所以晶体管开关电路只工作于饱和导通或截止两种工作状态。由于输入为高电平时,输出为低电平,而输入为低电平时,输出为高电平,所以晶体管开关也是一个反相器。这种阶跃性的电压信号称为开关量信号。

## 五、晶闸管及其应用

### (一) 晶闸管的结构

晶闸管(也称可控硅 SCR)是一种由 PNPN 四层半导体、三个 PN 结和三个电极组成的半导体器件,其结构、电路符号和外形如图 4-73 所示。三个电极分别称为阳极(A)、阴极(K)和控制极(G)。

### (二) 晶闸管的可控单向导电性

#### 1. 导通条件

在正常使用情况下,无论在阳极和阴极间加正向或反向电压,均不能使晶闸管导通,因为这三个 PN 结中总有反向偏置的。因此要使晶闸管由关断转为导通必须同时满足两个条件,即(1)阳极-阴极间加正向电压(即  $u_{AK} > 0$ ) (2)控制极-阴极间加正向电压( $U_{GK} > 0$ )。

#### 2. 控制极的作用

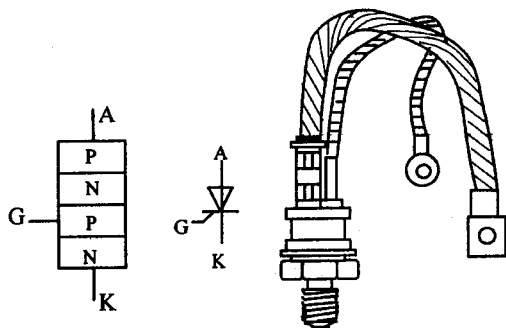


图 4-73 晶闸管的结构、电路符号和外形图

控制极加正向电压是使晶闸管由关断转为导通的必要条件之一,但对于普通晶闸管一旦触发导通后控制极便失去控制作用,即它不能控制晶闸管的关断。因此控制极的电压既可以是脉冲触发电压,也可以是恒定的直流电压。如果触发电压是脉冲列,则只要有一个脉冲起作用使晶闸管导通,则后面的脉冲都将失去触发作用。

晶闸管导通条件和控制极作用实验电路如图 4-74 所示。

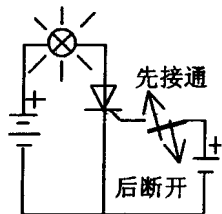


图 4-74 晶闸管导通条件和控制极作用实验电路

#### 3. 晶闸管的关断

保持晶闸管导通的最小阳极电流称为晶闸管的维持电流( $I_H$ )。只要使阳极电流小于维持电流晶闸管便自行关断。通常是当阳极电压  $U_{AK} = 0$  时或加反向电压( $U_{AK} < 0$ )时晶闸管便自行关断。如果阳极电压是交流电压,则当交流电压过零时晶闸管就自行关断,如果阳极电压是直流电压,则还需要单独设置关断电路,对晶闸管加反向电压使其关断。

#### 4. 晶闸管的两个主要参数

是额定正向平均电流和正向阻断峰值电压。正常使用时都不应超过其参数值。

### (三) 晶闸管的应用

#### 1. 可控整流

单相可控整流主电路的组成与二极管整流基本相同。主电路是由整流变压器副边、晶闸管的阳极-阴极和负载构成的闭合回路。主电路的作用是将固定幅度的交流电压转换为幅度可控的负载所需要的直流电压。为控制晶闸管的导通,在晶闸管的控制极和阴极之间还要联接产生触发电压的电路,称为触发电路。所以晶闸管是导通可控的无触点“开关”。

图 4-75 为单相半波可控整流电路,在交流电压  $u$  的正半周期间,虽然它受正向阳极电压但并不导通,只有当在控制极再施加正向电压触发后才开始导通。当交流电压过零或反向(负半周)时自行关断。由于可在  $0 \sim \pi$  之间的任一相位角  $\alpha$  下施加触发电压,因此可控整流负载的平均直流电压  $U_0$  的大小就决定于控制角  $\alpha$ 。当控制角  $\alpha = 0$  时,直流平均电压与二极管整流的相同,即  $U_0 = 0.45U$ 。当  $\alpha = \pi$  时  $U_0 = 0$ 。当  $0 < \alpha < \pi$  时,其直流平均电压将小于二极管整流输出的平均电压。所以输出的直流平均电压的大小可以用控制角  $\alpha$  进行控制。

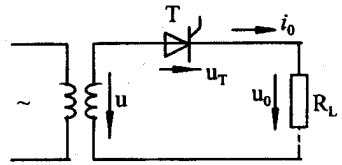


图 4-75 单相半波可控整流

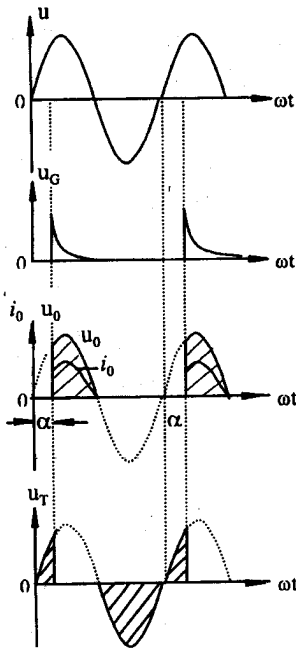


图 4-76 单相半波可控整流波形图

图 4-76 波形图中,  $u$  为输入的正弦交流电压,  $u_G$  为控制极触发电压,  $u_0$ 、 $i_0$  为负载电阻上的直流电压和电流,  $u_T$  为晶闸管两端的电压。

负载的平均直流电压  $U_0$  与输入交流电压有效值  $U$  的一般关系为

$$U_0 = \frac{\sqrt{2}U}{2\pi} \int_{\alpha}^{\pi} \sin\omega t d\omega t = \frac{\sqrt{2}U}{2} \cdot \frac{1 + \cos\alpha}{2} = 0.45U \frac{1 + \cos\alpha}{2}$$

将上式与二极管整流的直流平均电压表示式相比较,多了一项与控制角  $\alpha$  有关的系数项。控制角  $\alpha$  越大,直流平均电压  $U_0$  越小。同样,全波和桥式可控整流输出的直流平均电压等于相应方式二极管整流平均电压  $0.9U$  乘以与上式相同的系数项。所以可控整流在直流调压和调速方面得到广泛的应用。

#### 2. 晶闸管交流开关(交流调压)

晶闸管作为无触点开关,与闸刀开关、接触器、继电器等有触点开关相比,它具有动作快、无火花,广泛应用于要求防爆的场所。利用它的导通可控性,也常用于交流调压装置。交流调压就是通过晶闸管改变交流电压的有效值。图 4-77 为两只反并联晶闸管作为无触点可控开关实现交流调压的电路。当电源电压  $u$  正半波时,控制晶闸管  $T_1$  触发导通,当电压  $u$  过零时  $T_1$  自行关断,负半波时,以相同的控制角  $\alpha$  触发晶闸管  $T_2$  导通,电压过零时  $T_2$  自行关断。负载上得到正负波形相同的交变电压  $u_0$ ,但输出电压的有效值  $U_0$  小于输入正弦电压的有效值  $U$ 。控制角  $\alpha$  越大,输出电压的有效值  $U_0$  越小。图 4-78 分别为输入电压  $u$ 、两晶闸管的触发脉冲电压  $u_{G1}$  和  $u_{G2}$  和负载电压  $u_0$  的波形图。

#### 3. 直流开关

图 4-79 为晶闸管直流开关电路,直流电源  $U$ 、晶闸管  $T_1$  和负载电阻  $R_L$  构成主电路。晶闸管  $T_2$ 、电容  $C$  和电阻  $R$  为晶闸管的关断电路。

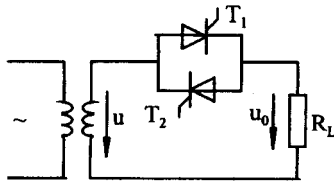


图 4-77 单相交流开关电路

$T_1$  触发导通后,负载电流由电源正极经  $T_1$ 、 $R_L$  回电源负极;与此同时,电容通过  $T_1$  和  $R$  与直流电源构成充电回路。当电容充电到电压  $u_c = U$  时,  $T_1$  中只流过负载电流  $I_L$ 。需要关断  $T_1$  时,使触发晶闸管  $T_2$  导通,  $T_2$  的导通(相当于开关接通)使电容  $C$  与  $T_1$  并联,反向电压  $u_c$  施加于  $T_1$  两端,因此  $T_1$  关断。

$T_1$  关断时,  $C$  通过  $R_L$ 、电源和  $T_2$  放电,继而反向充电,为  $T_1$  再次导通时关断  $T_2$  作好准备。

晶闸管直流开关在“船舶轴带直流发电机的自动调压”和“直流闪光灯”等电路都有广泛的应用。

#### 4. 晶闸管逆变器概念

逆变器是整流器的反方向转换,逆变器是将直流电转换为交流电。图 4-80 为单相并联逆变器原理电路,图(a)中两个开关  $T_1$ 、 $T_2$  表示两个晶闸管的导通和关断的开关作用,逆变变压器的原边和中心抽头,接直流电源电压  $U$ 。当晶闸管  $T_1$  触发导通、 $T_2$  关断时,电流  $i_1$  由直流电源的(+)极→经变压器原边下半绕组→晶闸管  $T_1$ →直流电源的(-)极构成回路,由于原边绕组电流和磁通由零增加,从而在变压器的原边和副边引起感应电动势。副边负载上得到某一方向的感应电压。当使  $T_1$  关断和触发晶闸管  $T_2$  导通时,电流  $i_2$  由直流电源的(+)极→经变压器原边上半绕组→晶闸管  $T_2$ →直流电源的(-)极构成回路。由于  $i_2$  与  $i_1$  的方向相反,故在变压器中引起的感应电动势的方向与前者相反。因此当晶闸管  $T_1$ 、 $T_2$  轮流交替地关断和导通时,在变压器副边的负载上便得到交变电压,如图 4-81 所示。如果在电路中接入滤波电抗器,可使输出的交变电压接近于正弦波。控制  $T_1$ 、 $T_2$  每秒交替导通的次数,以得到所要求频率的交变电压。简单晶闸管并联逆变器如图 4-80(b)所示,图中电容  $C$  用于关断晶闸管,因为在此晶闸管为直流开关。

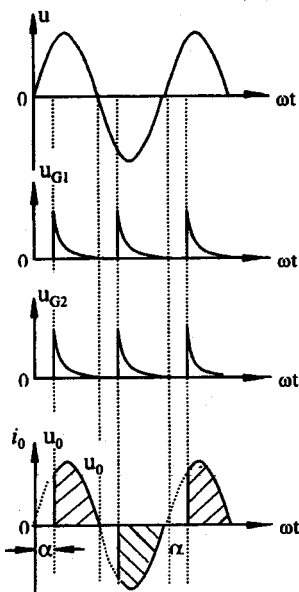


图 4-78 单相交流调压的波形图

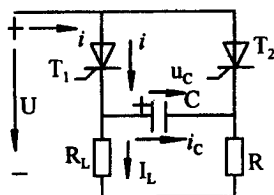


图 4-79 晶闸管直流开关

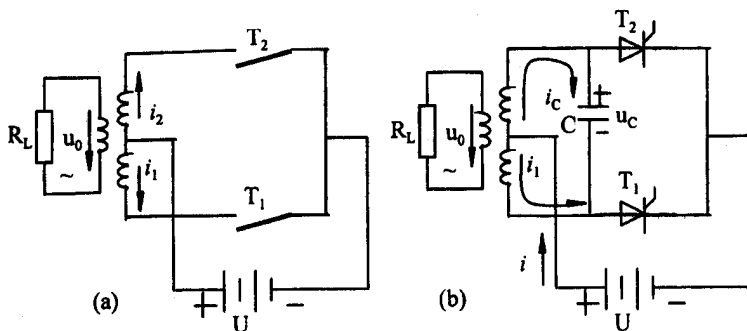


图 4-80 简单并联逆变原理

逆变器在交流电动机的变频调速和轴带发电机的频率补偿等方面都有广泛的应用。

## 六、运算放大器及其应用

运算放大器是具有高开环电压放大倍数并带有深度负反馈的多级直接耦合放大电路。它首先应用于电子模拟计算机上,作为基本运算单元,可以完成加减、积分和微分等数学运算。同时在信号运算、信号处理、信号测量及波形产生等方面也获得广泛的应用。现在的运算放大器均为集成电路的,即把整个电路的各个元件以及相互之间的联接同时制造在一块半导体芯片上,组成一个不可分割的整体,故又称集成运算放大器,简称集成运放。

### (一)集成运放的电路模型

#### 1. 集成运算放大器的电路结构

集成运算放大器电路常可分为输入级、中间级、输出级和偏置电路四个基本组成部分。输入级要求有高的输入电阻和热稳定性,是运算放大器质量的关键部分;中间级主要进行电压放大,要求有足够高的电压放大倍数;输出级与负载相接,要求输出电阻低、带负载的能力强,输出足够大的电压和电流;偏置电路的作用是为上述各级电路提供稳定和合适的偏置电流,决定各级的静态工作点。

2. 集成运放的外形结构:大致有三种,金属圆壳封装型,塑料外壳封装的扁平型和塑料封装的双列直插型,如图 4-82 所示。不同结构的集成电路管脚引线数量也不同。

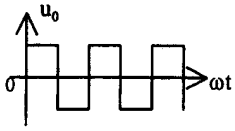


图 4-81 逆变器输出电压波形

#### 3. 主要管脚引线有:

(1) 反相输入端。由此端接输入信号,则输出信号与输入信号反相(或两者极性相反)。

(2) 同相输入端。由此端接输入信号,则输出信号与输入信号同相(或两者极性相同)。

(3) 正、负电源端。分别接正电源和负电源,如 +15V 和 -15V。

(4) 输出端。

(5) 其他还有接调零电阻、相位补偿等的接线端。

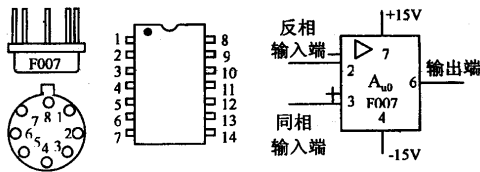


图 4-82 集成运放的外形及主要引脚

4. 运算放大器的电路模型:尽管运算放大器是一个多级直接耦合的复杂电路,但就其外部输入与输出之间的关系而言,可用图 4-83 所示的简单的电路模型表示。其中  $r_{id}$  表示(差模)输入阻抗,  $r_o$  表示输出阻抗,  $A_{u0}$  表示开环电压放大倍数,  $e = A_{u0} \cdot (u_+ - u_-)$  是一个与  $A_{u0}$  和两输入端的电位差有关的等效电压源(即受控电压源)。

### (二)集成运放的理想化条件

在实际分析运算放大器时,常常把实际运放的电路模型进行理想化,理想化所带来的误差一般是很小的,在工程上是允许的,但它却大大简化了运算放大器的分析。

#### 1. 理想运算放大器的条件主要是:

(1) 开环电压放大倍数  $A_{u0} \rightarrow \infty$  (实际都在  $10^5$  以上);

(2) 输入电阻  $r_{id} \rightarrow \infty$  (实际为  $100k\Omega \sim 1 M\Omega$ );

(3) 开环输出电阻  $r_o \rightarrow \infty$  (实际只有  $10\Omega \sim 1k\Omega$ )。

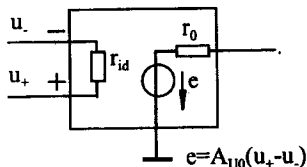


图 4-83 集成运放的电路模型

图 4-84(b) 表示运算放大器的输出与输入关系的特性曲线，称为传输特性曲线。其中实线为理想运放的传输特性，虚线为实际运放的传输特性。

由于开环电压放大倍数很高，即使输入毫伏级以下的信号，也足以使输出电压饱和，其饱和值  $+U_{0s}$  或  $-U_{0s}$  达到接近于正的电源电压或负的电源电压值；甚至由于干扰电压就可以使其由正（或负）的饱和状态变到负（或正）的饱和状态，难于稳定。因此在使用中，为使运算放大器稳定的工作在直线区，通常都要引入深度电压负反馈。负反馈电路是通过反馈电路元件（如电阻  $R_f$ ）将其输出端与反相输入端（必须是反相输入端）联接。

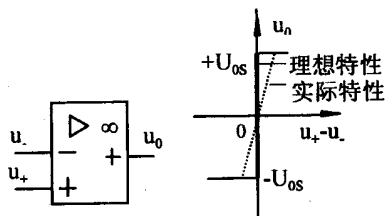


图 4-84 理想运放的

电路图形符号和传输特性曲线

2. 运算放大器工作于线性区时，简化分析的主要依据为如下两点：

(1) 由于  $r_{id} \rightarrow \infty$ ，故可认为两输入端的电流  $i_+ \approx 0, i_- \approx 0$ 。即把两输入端看成“虚断路”；

(2) 由于  $A_{u0}$ ，而输出电压  $u_o$  是一个有限值，故  $u_+ - u_- = u_o / A_{u0} \approx 0$ ，即  $u_+ \approx u_-$ 。这样就可以把两输入端看成等电位，称为“虚等电位”。

在对负反馈线性运算放大器进行一般分析时，都是应用“虚断路和”虚等电位”的理想化条件。

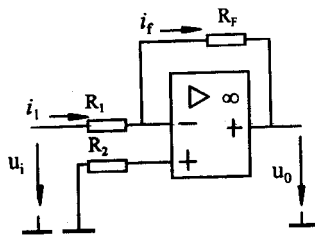


图 4-85 反相比例运算

### (三) 运算放大器应用举例

1. 反相输入，实现比例运算（图 4-86）

根据图 4-86 电路和“虚断路”理想条件  $i_+ = 0, i_- = 0$ ，故  $i_1 \sim i_f$

根据虚等电位条件

$$u_- = u_+ = 0$$

$$\text{因为 } i_1 = (u_i - u_-) / R_1 = (u_i - 0) / R_1 = u_i / R_1$$

$$i_f = (u_- - u_o) / R_f = (0 - u_o) / R_f = -u_o / R_f$$



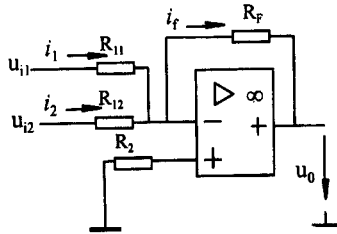


图 4-86 反相加法运算

所以  $u_i/R_1 = -u_0/R_f$

由此得到输出与输入的比例关系为：

$$u_0 = -(R_f/R_1) u_i$$

可通过改变外部电阻  $R_f$  与  $R_1$  的比例以获得不同比例的运算。 $R_f/R_1$  又称运算放大器的闭环电压放大倍数。上式中的负号表示输出与输入相位相反或极性相反。

### 2. 反相输入, 实现反相加法运算(图 4-86)

根据简化分析条件及图 4-86 电路

$$i_1 + i_2 = i_f \text{ 和 } u_- = u_+ = 0$$

$$i_1 = \frac{u_{i1} - u_-}{R_{11}} = \frac{u_{i1} - 0}{R_{11}} = \frac{u_{i1}}{R_{11}}$$

$$i_2 = \frac{u_{i2} - u_-}{R_{12}} = \frac{u_{i2} - 0}{R_{12}} = \frac{u_{i2}}{R_{12}}$$

$$i_f = \frac{u_- - u_0}{R_f} = \frac{0 - u_0}{R_f} = -\frac{u_0}{R_f}$$

$$\frac{u_{i1}}{R_{11}} + \frac{u_{i2}}{R_{12}} = -\frac{u_0}{R_f}$$

故

$$u_0 = -\left(\frac{R_f}{R_{11}} u_{i1} + \frac{R_f}{R_{12}} u_{i2}\right)$$

如果  $R_{11} = R_{12} = R_f$  则  $u_0 = -(u_{i1} + u_{i2})$ , 即输出电压等于各输入电压相加, 但符号相反。

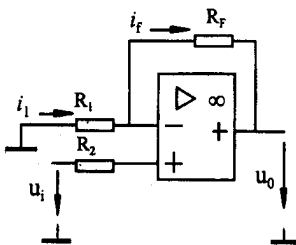


图 4-87 同相比例运算

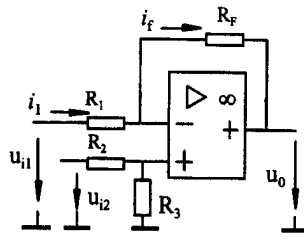


图 4-88 差动减法运算

### 3. 同相输入, 实现同相比例运算(图 4-87)

根据简化分析条件和图 4-87 电路

$$u_- = u_+ = u_i \text{ 和 } i_1 = i_f$$

$$i_1 = \frac{0 - u_-}{R_1} = -\frac{u_i}{R_1}$$

$$i_f = \frac{u_- - u_0}{R_f} = \frac{u_i - u_0}{R_f}$$

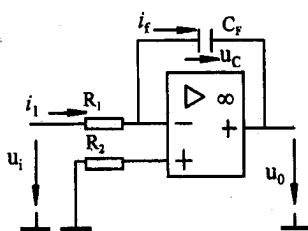
故

$$u_0 = \left(1 + \frac{R_f}{R_1}\right) u_i$$

可见,同相端输入时,输出与输入成正比。其比例常数(即闭环电压放大倍数)恒大于1,且输出、输入同相位(或同极性)。

4. 双端差动输入,实现减法运算(图4-88)

根据电路及简化分析条件



$$u_- = u_+ = \frac{R_3}{R_2 + R_3} u_{i2} \text{ 和 } i_1 = i_f$$

$$i_1 = \frac{u_{i1} - u_-}{R_1} = \frac{u_{i1}}{R_1} - \frac{u_{i2}}{R_1} \cdot \frac{R_3}{R_2 + R_3}$$

$$i_f = \frac{u_- - u_0}{R_f} = \frac{u_{i2}}{R_f} \cdot \frac{R_3}{R_2 + R_3} - \frac{u_0}{R_f}$$

$$u_0 = \left(1 + \frac{R_f}{R_1}\right) \frac{R_3}{R_2 + R_3} u_{i2} - \frac{R_f}{R_1} u_{i1}$$

图4-89 积分运算电路

上式表明,双端差动输入的运算结果,可看成是同相端和反相端分别单独输入结果的叠加。这种双端差动输入方式在测量和控制系统中应用很多。当外部电路参数  $R_1 = R_2 = R_3 = R_f$  时,则  $u_0 = u_{i2} - u_{i1}$ ,从而实现直接减法运算。

5. 积分运算(图4-89)

若将反相比例运算电路的反馈电阻  $R_f$  用电容  $C_f$  代替,则为积分运算电路。

根据图4-87电路和简化分析条件

$$u_- = u_+ = 0 \text{ 和 } i_1 = \frac{u_i}{R_1} = i_f$$

$$i_f = C_f \frac{du_0}{dt} = C_f \frac{d}{dt}(u_- - u_0) = -C_f \frac{du_0}{dt}$$

$$-C_f \frac{du_0}{dt} = \frac{u_i}{R_1}$$

$$u_0 = -\frac{1}{C_f R_1} \int u_i dt$$

故

上式表明  $u_0$  与  $u_i$  的积分成比例,但两者相位相反。 $C_f R_1$  为积分常数。

6. 微分运算(图4-90)

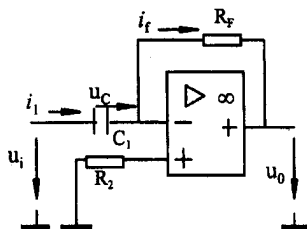


图4-90 微分运算电路

微分运算是积分的逆运算,只须将反相输入端的电阻与反馈电容调换位置,就成为微分电路。由图可知

$$u_- = u_+ = 0 \text{ 和 } i_1 = i_f$$

$$i_1 = C_1 \frac{du_c}{dt} = C_1 \frac{d(u_i - u_+)}{dt} = C_1 \frac{d(u_i - 0)}{dt} = C_1 \frac{du_i}{dt}$$

$$i_f = \frac{u_- - u_0}{R_f} = -\frac{u_0}{R_f}$$

$$u_0 = -C_1 R_f \frac{du_i}{dt}$$

故

即输出电压与输入电压对时间的一次微分成正比。

7. 电压比较器(运算放大器的开环应用)

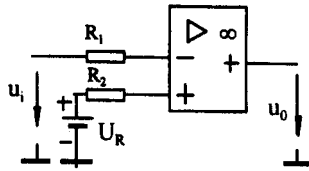


图 4-91 电压比较器

电压比较器(图 4-91)的作用是用来将输入电压信号和参考电压相比较,以给出输入电压是否“越限”的输出信号。 $U_R$  是参考电压,加在同相输入端,输入电压  $u_i$  加在反相输入端。由于开环电压放大倍数很高,输入电压与参考电压稍有差别,就会使输出电压达到正的或负的饱和电压。因此,运算放大器用作比较器时,它工作在饱和区。当  $u_i < U_R$  时  $u_o = +U_{0s}$ ; 当  $u_i > U_R$  时  $u_o = -U_{0s}$ 。可见,在比较器的输入端进行模拟信号大小的比较,在输出端则以高电平或低电平给出比较的结果的信号。这种信号可作为“越限”报警信号或控制信号。

当参考电压  $U_R = 0$  时,称为过零比较器或零电平检测器。 $U_R$  也可接在反相端,由同相端输入信号电压,图 4-92 即为同相输入的过零比较器的输入输出波形图。

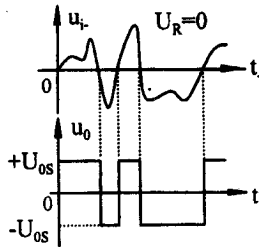


图 4-92 过零比较器输入输出波形图

## 第三节 数字电路

### 一、数字电路基础

#### (一) 数制

即计数的方法,我们把多位数码中每一位的构成方法以及从低位到高位进位的规则称为数制。

数字电路中常用的数制有二、八、十六进制。二进制只用 0 和 1 两个数码来表示数,基数是“二”;逢二进一。八进制有 0、1、2、3、...、7 八个数码,基数是“八”;逢八进一。十六进制有 0、1、2、3、...、9、A、B、C、D、E、F 十六个数码(A~F 分别对应十进制中的 10~15),基数是“十六”;逢十六进一。各种常用数制的对照如表 4-8 所示。

通常在十进制、二进制、八进制、十六进制后分别标记英文字母 D、B、O、H 加以区分。例如  $(16)_D$ 、 $(16)_B$ 、 $(16)_H$  分别表示十进制 16、八进制数 16、十六进制数 16。不同制式之间可以相互转换。例如二进制数  $(11010)_B$  转换为十进制等于

$$(11010)_B = 1 \times 2^4 + 1 \times 2^3 + 0 + 1 \times 2^1 + 0 = (26)_D$$

表 4-8 几种数制的对照

十进制数	二进制数	八进制数	十六进制数
0	0000	0	0
1	0001	1	1
2	0010	2	2
3	0011	3	3
4	0100	4	4
5	0101	5	5
6	0110	6	6
7	0111	7	7
8	1000	10	8
9	1001	11	9
10	1010	12	A
11	1011	13	B
12	1100	14	C
13	1101	15	D
14	1110	16	E
15	1111	17	F
16	10000	20	10
17	10001	21	11
18	10010	22	12
19	10011	23	13
20	10100	24	14

## (二) 基本逻辑运算和逻辑门

数字电路中的信息具有二值性,即只有两个可能的取值“0”或“1”,它们不表示数量的大小,而是表示完全对立的两个状态。由取值“0”或“1”的逻辑变量 A 和 B 构成的基本逻辑运算主要有:与(AND)“或(OR)和非(NOT),常用的还有:与非(NAND)“或非(NOR)“异或(ExclusiveOR)和“异或非(Exclusive NOR,也称为“同或”等。

实现上述逻辑运算的电路叫逻辑门,常用逻辑门的符号及逻辑函数如表 4-9 所示,运算关系如表 4-10 所示。

六种 TTL 系列门的主要性能比较,如表 4-11 所示,例如,74LS00 为低功耗肖特基四二输入与非门,其中 LS 为后缀。其他以此类推,但后缀 N 可不写。CT 为国标,与国际通用的 74 系列完全相同。国标 CT 又分为 CT100(74××),CT200(74H××),CT300(74S××),CT400(74LS××)。

在数字系统中,各种信息都表现为一系列的高、低电平信号。若将高电平(H)规定为逻辑“1”,低电平(L)规定为逻辑“0”,则为正逻辑;反之若将高电平规定为逻辑“0”,低电平规定为逻辑“1”,则为负逻辑。在同一系统中,只能采用一种逻辑体制,数字电路一般都采用正逻辑。

表 4-9 常用逻辑门符号

名称	国标符号	曾用符号	国外常用符号	逻辑函数
与门				$L = A \cdot B$
或门				$L = A + B$
非门				$L = \bar{A}$
与非门				$L = \overline{A \cdot B}$
或非门				$L = \overline{A + B}$
异或门				$L = A \otimes B$ ( $= \bar{A}B + A\bar{B}$ )
同或门 (异或非门)				$L = A \odot B$ ( $= \bar{A}\bar{B} + AB$ )

表 4-10 常用逻辑运算

A	B	与	或	A 的非	B 的非	与非	或非	异或	异或非
0	0	0	0	1	1	1	1	0	1
0	1	0	1	1	0	1	0	1	0
1	0	0	1	0	1	1	0	1	0
1	1	1	1	0	0	0	0	0	1

表 4-11 六种 TTL 系列门的主要性能比较

名称	后缀	传输延时间 /ns	$I_{ILmax}$ /mA	$I_{OLmax}$ /mA	功耗/门 /mW	计数速度 /MHz
标准	None 或 N	10	1.6	16	10	20
低功耗	L	33	0.18	3.6	1	5
高速	H	6	2	20	22	40
肖特基	S	3	2	20	19	70
低功耗肖特基	LS	9.5	0.36	8	2	30
先进低功耗肖特基	ALS	4	—	—	2	—

### (三) 逻辑代数

又称为布尔代数,是分析数字系统的重要数学工具,它构成了数字系统的设计基础。在逻辑代数中的变量(即逻辑变量)的取值只有两种可能性:即“真(true)和假(false)”。常把“真”简记作“1”,表示条件成立、事情发生;把“假”简记作“0”,表示条件不成立、事情不发生。

逻辑代数中最常用的基本逻辑运算是“与”运算、“或”运算和“非”运算。常用的定理和定律如表 4-12 所示,几个常用公式如表 4-13 所示。

表 4-12 逻辑代数常用定理和定律

名称	公 式	
“0”“1” 律	$A + 0 = A$	$A \cdot 0 = 0$
	$A + 1 = 1$	$A \cdot 1 = A$
互补律	$A + \bar{A} = 1$	$A \cdot \bar{A} = 0$
重迭律	$A + A = A$	$A \cdot A = A$
交换律	$A + B = B + A$	$A \cdot B = B \cdot A$
结合律	$(A + B) + C$	$(A \cdot B) \cdot C$
	$= A + (B + C)$	$= A \cdot (B \cdot C)$
分配律	$A + B \cdot C$	$A \cdot (B + C)$
	$= (A + B) \cdot (A + C)$	$= A \cdot B + A \cdot C$
吸收律	$A + A \cdot B = A$	$A \cdot (A + B) = A$
摩根定理	$\overline{A + B} = \bar{A} \cdot \bar{B}$	$\overline{A \cdot B} = \bar{A} + \bar{B}$

表 4-13 几个常用公式

名称	公式
合并公式	$AB + A\bar{B} = A$
冗余公式	$AB + \bar{A}C + BC = AB + \bar{A}C$
异或同或	$\overline{A\bar{B} + \bar{A}B} = \overline{AB} + AB$
公式	即 $A \otimes B = A \odot B$

### (四) 集成逻辑门

工程上对门的功能、工作速度、抗干扰能力等要求有所不同,所以除了标准型 TTL 门系列外,还有许多其他类型的集成逻辑门,如:

TTL 集电极开路逻辑门(OC 门)是一种能够实现门输出逻辑上“线”与“线”连接的集成门,电路结构与逻辑符号如图 4-93 所示,由图可见 OC 与非门采用集电极开路的三极管作输出级。必须强调指出,OC 门只有在外接负载电阻  $R_C$  和电源  $V_{CC}$  相连后才能正常工作。几个 OC 门输出线与如图 4-93 所示  $L = \overline{AB \cdot CD \cdot EG}$ 。

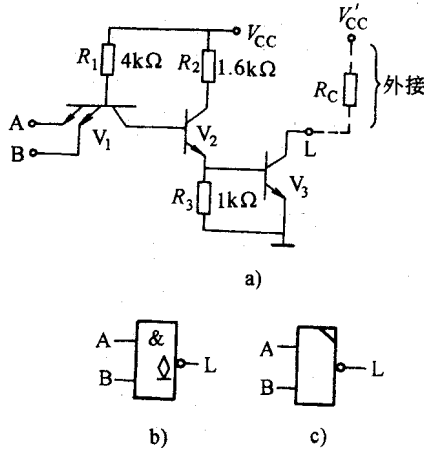


图 4-93 集电极开路与非门

a) 电路结构 b) 国标逻辑符号  
c) 常用逻辑符号

如果有  $n$  个 OC 门线与,每个门输出管的截止漏电流为  $I_{OH}$ ,最大灌入电流为  $I_{OL}$ ,若带  $m$  个同类门,这些负载的输入端总数为  $M$ ,每个负载门的低电平输入电流为  $I_{IL}$ ,高电平输入电流为  $I_{IH}$ ,此时外接电阻  $R_C$  按下式选取:

$$\frac{V_{CC} - U_{OLmax}}{I_{OL} - mI_{IL}} < R_C < \frac{V_{CC} - U_{OHmin}}{nI_{OH} + MI_{IH}}$$

TTL 三态逻辑门(TSL)是用于数字控制系统和微型计算机总线结构的器件,它的特点是输出有三种状态,除通常的逻辑 0 和逻辑 1 外,还有第三种状态,即高阻状态。如三态 TTL 与非门,电路如图 4-94 所示,当控制端  $\overline{EN} = 0$  时,与普通的 TTL 与非门一样,实现  $L = \overline{AB}$ ,当  $\overline{EN} = 1$  时,输出呈高阻抗。

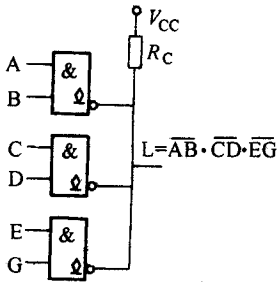


图 4-94 用 OC 门进行线与

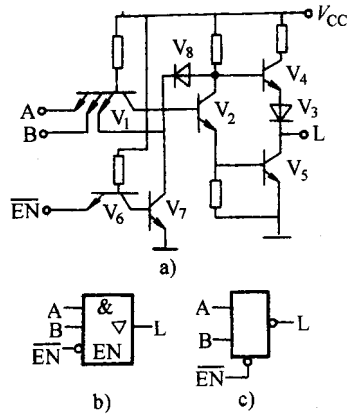


图 4-95 TTL 三态与非门

a) 电路结构 b) 国标逻辑符号  
c) 常用逻辑符号

另外还有高阈值逻辑门(HTL门)和发射极耦合逻辑门(ECL门)等双极型集成门及 CMOS 门。HTL 门的特点是抗干扰能力比 TTL 集成与非门高得多,缺点是速度较低,功耗较大。ECL 门的特点是带负载能力强,具有极高的工作速度,缺点是抗干扰能力差,功耗大。CMOS 集成逻辑电路是一种互补对称 MOS 场效应管集成电路,它的特点是静态功耗低,电源电压范围宽,抗干扰能力强,扇出系数(即最多能带同类门的个数)大。

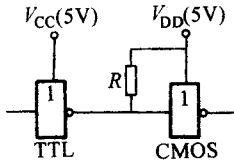


图 4-96 TTL 驱动 CMOS

**TTL 和 CMOS 电路的接口** TTL 电路驱动 CMOS 电路,当两者电源电压均为 5V 时,为了保证 TTL 电路能正常工作,可靠地驱动 CMOS 电路,必须在 TTL 电路输出和电源之间加一上拉电阻,电阻取值在 3.3~4.7kΩ 之间,如图 4-96 所示。若 TTL 电路驱动高速型 HCMOS 器件不需要外接上拉电阻,可直接连接。

**TTL 驱动 CMOS 电路** 若两者使用电源电压不同,解决办法之一是将 TTL 电路改为输出端耐压较高的 OC 门或增加一级 OC 门。将外接上拉电阻  $R_C$  取值 10kΩ 接到 CMOS 电路的电源  $V_{DD}$ ,电路如图 4-97 所示。

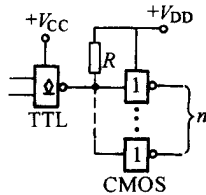


图 4-97 使用 OC 门做 TTL 到 CMOS 的接口

**CMOS 电路驱动 TTL 电路** 两者电源电压为 5V 时,CMOS 门电路、触发器直接带 TTL 电路负载能力很差,只能带 1~2 个 TTL LS 系列门。可在 CMOS 与 TTL 电路之间加一级晶体管反相器或 CMOS 缓冲器,以加大 CMOS 带负载的能力。若两者使用的电源电压不同,常用的方法是将同一芯片内的 CMOS 门电路并联使用,降低电源电压至 5V,同时提高吸收电流能力,电路如图 4-98 所示。另外也可在 CMOS 和 TTL 电路之间增加一级 CMOS 驱动器,还可以用分立元件的电流放大器实现电流扩展。



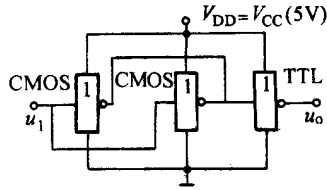


图 4-98 用多个 CMOS 门并联驱动 TTL 门的电路

## 二、组合逻辑电路

### (一) 逻辑符号和逻辑系列

#### 1. 逻辑符号

数字系统中包括大量的“与”门、“与非”门、“或”门、“或非”门、“异或”门和“非”门,此外还有存储器和后面将要讨论的定时电路。这些电路互相连接在一起可以完成一些有用的任务,如计数、显示时间、测量电压或执行算术运算。在画这样一个系统的电路图时,如果要画出所有的电阻、二极管、晶体管及内部连接,工作量是非常大的,而且也不必要这样做。因为人们在读电路图时都会将各器件组合成标准电路,按照各门电路的“系统”功能进行思考。因此,人们用标准逻辑符号的设计并画出了一些数字电路,如图 4-99 所示。

逻辑符号输出处的小圆圈表示对信号取反。所以如果没有小圆圈,“非”门的三角形表示一个输出 = 输入的放大器(或缓冲器),第二个符号表示“或”门。但如前所述的那样,常用电路具有反转作用。这些逻辑符号只给出了输入和输出之间的连接。连到电路中后,这些门电路还会与电源电压  $V_{CC}$  和“地”连接。图 4-99 的芯片中有四个二输入“与非”门电路。电源电压加于管脚 14 和 7 之间,其中管脚 7 接地。

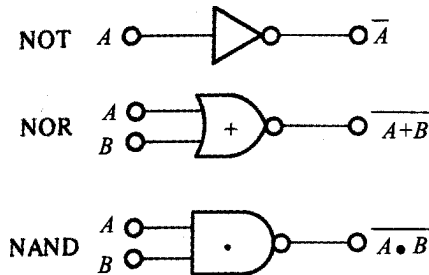


图 4-99 “非”、“或非”、“与非”电路的逻辑门符号

#### 2. 逻辑系列

制作一个数字电路时,并不需要很多很多的二极管、电阻、晶体管连接起来。而是首先组成标准门电路,再组成较大的功能器件。制作数字电路时,可以采用已经集成在集成电路(IC)中,并用塑料封装的门电路,如图 4-101 所示。图中这个商用集成芯片中包括 4 个封装在一起的“与非”门电路。在设计数字电路前期,就需要选择合适的逻辑系列,这是一个非常重要的步骤。逻辑系列的选择决定于最终电路的功能和实际工作环境。逻辑系列由很多互相兼容的电路组成,这些电路可以连接起来组成数字系统。逻辑系列不同,用于执行逻辑操作的电路也不同。下面是一些逻辑系列。

(1) 二极管—晶体管逻辑(DTL)电路。现在已经不再使用这些电路。这些简单类型的逻辑仅用于说明逻辑门的原理。

(2) 高阈值逻辑(HTL)电路。这类电路与 DTL 门类似,并且采用的电源电压  $V_{CC}$  较高。特殊二极管升高了晶体管开关的门限电压,使数字 1 和 0 之间的隔离电压范围增大为 10V。电子干扰可能会泄露到电路中,影响电路的功能。这一逻辑系列可以有效地防止电子干扰。如果设计的电路需要与直流发动机或者电弧焊

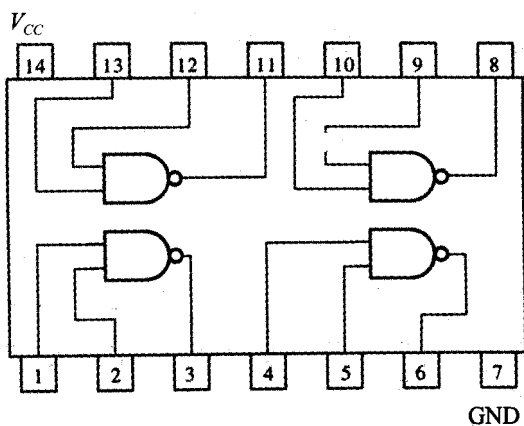


图 4-100 四‘与非’门芯片

机器相连,就应该选用 HTL 电路。

(3) 晶体管—晶体管逻辑(TTL)电路。这种电路用专用晶体管代替了二极管。这种电路的开关速度快,工作需要的功率适当,价格便宜,所以其应用非常广泛。这一逻辑系列中采用的电路要比 DTL 电路复杂得多。

(4) 互补金属氧化物半导体(CMOS)逻辑电路。这种电路采用场效应晶体管(FET),工作需要的功率很小,用于要求低功耗的电路中,如用电池供电的计算器。

(5) 射极耦合逻辑(ECL)门。这种电路开关速度很快,可用于高速电路,如高频计数器中。

逻辑电路的设计非常复杂,这一领域的专家必须熟悉某一时期内所有可用的产品和逻辑系列。



图 4-101 逻辑芯片的外观

## (二) 逻辑功能的实现

### 1. “非”功能

当电路中需要“非”电路时,设计者经常应用“或非”电路或“与非”电路来得到“非”电路。图 4-102 是利用“与非”电路实现“非”功能的两种方法。在第 2 个实现方法中,要求一下输入固定为数字 1。用一个电阻将输入与电源  $V_{CC}$  连接起来即可实现。同理,如果要使输入固定为 0,可将它接地。用“或非”门实现“非”功能时,需要将输入接地,该问题留在本章后面的习题中完成。

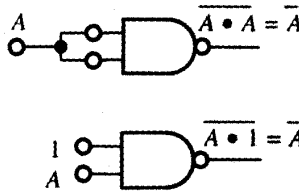


图 4-102 由“与非”门实现“非”功能

### 2. 实现电梯门功能

用前面给出的表示方法表示该逻辑表达式如图 4-103 所示。首先用“与非”门和(或)或非“门实现该功能。图 4-103 的实现方法中用了 6 个门电路：一个“或非”门、一个“与非”门和 4 个“非”门。“非”门由“与非”门实现。这种实现方法将逻辑表达式直接变换为逻辑门符号。

### 3. 使用德摩尔根定理

对  $D$  的表达式进行处理,可以使其实现更简单。图 4-103 的给出了处理过程。

$$\overline{(\overline{T+B}) \cdot \overline{S}} = \overline{\overline{T+B} + \overline{S}} = \overline{\overline{T+B}} + \overline{\overline{S}} = T+B+S \quad (4.3.1)$$

公式 4.3.1 中的第一项与图 4-103 中  $D$  的表达式相同,只是对它进行了两次求“非”。这样做的目的是将  $D$  的最终结果变为某个结果的“非”,以便于用“或非”门或“与非”门实现。第二项是根据德摩尔根定理,将其中一个“非”分配给各项后得到。第三项与第二项相同,只是移去了  $S$  的两次求补。这一最终形式为用“或非”门实现提供了方便。图 4-103 给出了这种实现方法。这里用“或非”门实现了“非”功能,其方法与前面用“与非”门实现是类似的。因此,根据德摩尔根定理得到了一种简单的实现方法。

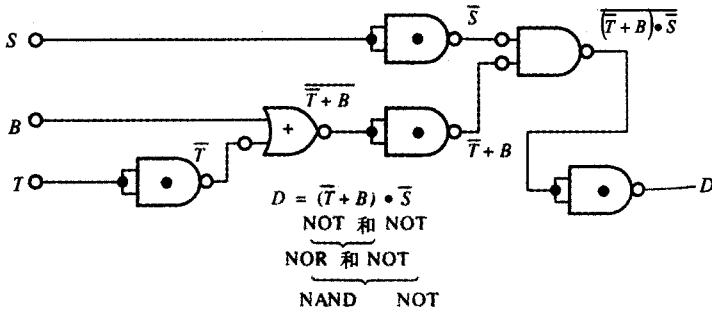


图 4-103 用“与非”门和“或非”门直接实现电梯门功能

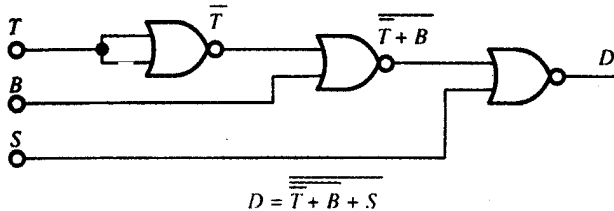


图 4-104 用“或非”门实现电梯门功能的简单方法

例:用最少数目的门电路实现逻辑功能

用“与非”门或“或非”门实现  $A + BC$ ,最少需要几个门电路?

解:对表达式两次求“非”,并对下面的求“非”应用德摩尔根定理:

$$\overline{A + BC} = \overline{A} \cdot \overline{BC} \quad (4.3.2)$$

第二项需要两个“与非”门和一个“非”门。“非”门可以由一个“与非”门实现。因此答案是 3 个“与非”门。思考题:如果要实现  $A(B + C)$  呢?

### (三) 二进制运算

#### 1. 以 2 为基数的数

高速运算是数字电子技术的一个惊人成就。计算机将数字表示为二进制数字(以 2 为基数的形式),并用逻辑门电路实现算术运算。本节将研究如何用数字电路实现二进制运算。

由于缺乏表示数字的方便方法,所以几个世纪以来都未能发展出高效的运算方法。后来用 10 个阿拉伯数字以 10 为基数表示数字后,运算方法的发展有了突破。这种表示方法就是允许重复使用数码,而用位置表示 10 的幂。例如数字 806.1 的意思是:

$$806.1_{10} = 8 \times 10^2 + 0 \times 10^1 + 6 \times 10^0 + 1 \times 10^{-1} \quad (4.3.3)$$

这一系统的好处是其加法表和乘法表的大小合理。而且其运算法则的方式也比较简单。

这种以 10 为基数的数字系统非常成功,所以在最近几个年代之前,很少有人能用其他基数形式书写数字并进行运算。但现在这一状况已经发生了改变,中学的“现代数学”中已经包括了以非十进制数为基数的运算。在那个表中,第一行表示 0,第二行为 1,第七行表示二进制形式的 6:

$$6_{10} = 110_2 = 1 \times 2^2 + 1 \times 2^1 + 0 \times 2^0 \quad (4.3.4)$$

以 2 为基数(二进制形式)表示 6 需要三个二进制数字(“位”)。一般情况下, $n$  位可以表示 0 到  $2^n - 1$  的数字。如果需要考虑正数或负数,就必须用其他的位来表示符号。一有序二进制信息,也就是一组位,称为“字”。因此,如果一个计算机中用 32 位字表示数字,那么它的最大数将小于 4 000 000。这里所说的范围是指数的整数形式或其二进制形式。当然可以用浮点形式或指数形式表示更大范围的数字。

例:需要多少位?

以二进制形式表示  $10^6$  需要多少位信息?

解: $n$  位可以表示的最大数为  $2^n - 1$ 。因此  $2^n$  必须大于  $10^6$  取对数  $\log$ :

$$n \log 2 > \log 10^6 = 6 \Rightarrow n > 19.9 \quad (4.3.5)$$

因此需要 20 位。

思考题:如果想要表示英语字母表,包括大写字母和 10 个数码,共需要多少位?

#### 2. 以二进制编码的十进制(BCD)

到目前为止,已经给出了用纯十进制和纯二进制表示数字的方法。而计算器和数字仪器中常用到混合系统——以二进制编码的十进制(BCD)。采用 BCD 时,数字仍然保持十进制格式,但各个数码由二进制形式表示,要表示 10 个数码(0, 1, 2, ..., 9)需要用 4 个数位信息表示一个数码。图 4-105 是一个例子,将  $906_{10}$  表示为一个 12 位的 BCD 字。由图 4-105 可以推导出, $n$  位数字以 BCD 形式表示的最大数字为  $10^{n/4} - 1$ ,其中  $n$  是 4 的倍数。这是一种用纯二进制表示数字的简化形式,为系统与操作者之间的输入、输出提供了方便。例如,人们一般用十进制进行思考,所以希望计算器上有 10 个键用来输入数字,并且希望计算器的输出也用十进制表示。计算器内部用 BCD 形式处理二进制信息则比较复杂,但这是计算器设计者的问题,他们完全能够解决这个难题。

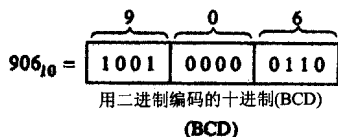


图 4-105 用 BCD 方法表示十进制数 906

#### 3. 十六进制

微型计算机中的每个“字”为 8 位或 16 位,因此,随着微型计算机的出现,十六进制也得到了重视。十六进制是以 16 为基数,除了已有的 10 个阿拉伯数码外,还需要 6 个“新”的数字符号。为便于使用标准打印机,字母 A 至 F 被分别用来表示 10 到 15。因此十六进制数 A8F 的表示:

$$A8F_{16} = 10 \times 16^2 + 8 \times 16^1 + 15 \times 16^0 = 2703_{10} \quad (4.3.6)$$

表 4-14 分别用十进制、十六进制和二进制表示了 0 到 16。

表 4-14 用十进制、十六进制和二进制表示的数

十进制	十六进制	二进制
0	0	0000
1	1	0001
2	2	0010
3	3	0011
4	4	0100
5	5	0101
6	6	0110
7	7	0111
8	8	1000
9	9	1001
10	A	1010
11	B	1011
12	C	1100
13	D	1101
14	E	1110
15	F	1111
16	10	10000

## (四) 数字运算电路

### 1. BCD 加法器

为举例说明数字运算,设计了一个逻辑电路用来求两个用 BCD 形式表示的十进制数之和。问题可用以下符号表示:

$$A + B = S \Rightarrow A_4 A_3 A_2 A_1 + B_4 B_3 B_2 B_1 = S_4 S_3 S_2 S_1 \quad (4.3.7)$$

第二项中带有下标的  $A$  和  $B$  是二进制变量,也就是 BCD 表示法所需的 4 个数位;“+”表示加法。

### 2. 加法器的第一级

二进制加法如公式所示:

$$\begin{array}{r} 1 \\ 1001_2 \\ 0101_2 \\ \hline 1110_2 \end{array} \quad (4.3.8)$$

式中用传统方式给出了二进制加法的进位,以此强调在设计电路时必须考虑进位。对低位的两个 1 求和时,得到  $10_2$  写作:一个 0 和一个进位 1。因此,二进制电路对低位求和时必须产生两个二进制输出:低位的和以及要加到高一级的进位。图 4-106 说明了加法的第一级必须完成的任务。第一级有两个二进制输入  $A_1$  和  $B_1$ ,并有两个输出——低位的和  $S_1$  与向高级加法的进位  $C_2$ 。观察图 4-107 的真值表可以看出,进位是两个输入的“与”,两个低位的和是两个输入的“异或”:

$$C_2 = A_1 B_1 \quad \text{和} \quad S_1 = A_1 \oplus B_1$$

(4.3.9)

因此,要进行该计算需要实现“异或”。

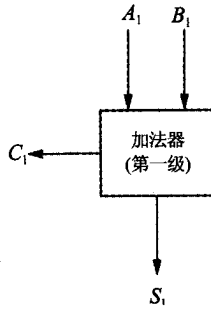


图 4-106 加法器的第一级有两个输入和两个输出

输入		输出	
A <sub>1</sub>	B <sub>1</sub>	C <sub>2</sub>	S <sub>1</sub>
0	0	0	0
0	1	0	1
1	0	0	1
1	1	1	0

图 4-107 用真值表表示单  
位加法器的输入与输出关系

### 3. 实现“异或”

通过以下任一等效形式,可以用“或”和“与”来实现“异或”:

$$A_1 \oplus B_1 = A_1 \bar{B}_1 + \bar{A}_1 B_1 = (A_1 + B_1) \overline{A_1 B_1}$$

(4.3.10)

第一种形式表示函数为 1 的两个情况: A<sub>1</sub> 为 1 且 B<sub>1</sub> 为 0, 或者 A<sub>1</sub> 为 0 且 B<sub>1</sub> 为 1。第二种形式应用普通“或”运算,通过和 A<sub>1</sub>B<sub>1</sub> 求“与”消除了 A<sub>1</sub> 和 B<sub>1</sub> 都为 1 的情况。可以对任意一种形式进行变换以便于用“与非”门和“或非”门实现。但在本例中应当选择第二个表达式,因为其中有两个输入的“与”,可以利用它来得到进位。利用两次求“非”和德摩尔根规则,将“异或”表示为以下形式:

$$\overline{(A_1 + B_1) A_1 B_1} = \overline{(A_1 + B_1)} + \overline{A_1 B_1}$$

(4.3.11)

该表达式的实现只用到了“与非”门和“或非”门,所以消去 A<sub>1</sub>B<sub>1</sub> 上面的两次求“非”没有什么好处。图 4-108 给出了最低位加法器的实现并详细表示了图 4-106 所指示的各项内容。

### 4. 加法器的较高级

加法器的第二级和更高级必须考虑前级的进位。因此,这些级必然有三个输入、两个输出。图 4-109 给出了第二级的形式。图 4-110 给出了两个输出与三个输入之间的关系。对于 BCD 加法器高级部分的设计,仅推导其输出的布尔表达式

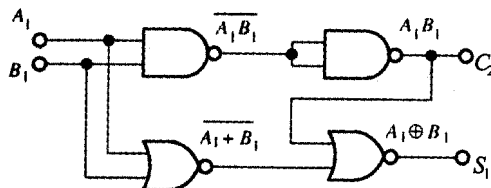


图 4-108 加法器第一级的实现

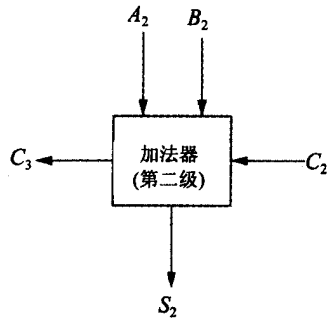


图 4-109 加法器的第二级有三个输入和两个输出

输入			输出	
$A_2$	$B_2$	$C_2$	$C_3$	$S_2$
0	0	0	0	0
0	0	1	0	1
0	1	0	0	1
0	1	1	1	0
1	0	0	0	1
1	0	1	1	0
1	1	0	1	0
1	1	1	1	1

图 4-110 第二级输入与输出之间的真值表

由真值表可以看出,输出位  $S_2$  在四种情况下为 1,分别与  $S_2$  列中的四个 1 相对应。最后一种情况非常容易理解,因为三个变量都为 1 时  $A_2 B_2 C_2 = 1$ 。第一种为 1 的情况要求  $A_2 = 0, B_2 = 0, C_2 = 1$ ,因此由  $A_2 B_2 C_2$  得到 1。然后对“与”之后的变量再求“或”。这种形式称为“乘积的和”。在此形式下,和的第二个输出位为:

$$S_2 = \overline{A_2} \overline{B_2} C_2 + \overline{A_2} B_2 \overline{C_2} + A_2 \overline{B_2} \overline{C_2} + A_2 B_2 C_2 \quad (4.3.12)$$

类似可得,由第二级产生的进位可以表示为:

$$C_3 = \overline{A_2} B_2 C_2 + A_2 \overline{B_2} C_2 + A_2 B_2 \overline{C_2} + A_2 B_2 C_2 \quad (4.3.13)$$

利用布尔运算法则化简式(4.3.13)。最后两项可以像式(4.3.14)那样结合在一起。因此可以将这两项用一个简单的项来表示。

$$A_2 B_2 \overline{C_2} + A_2 B_2 C_2 = A_2 B_2 (\overline{C_2} + C_2) = A_2 B_2 (1) = A_2 B_2 \quad (4.3.14)$$

用同样的方法可以将最后一项与前两项中的任意一项结合。根据布尔运算法则,可以在式(4.3.13)中插入两个  $A_2 B_2 C_2$  项。然后按式(4.3.14)中的方式将它们与前两个分别结合。从而将式(4.3.13)化简为:

$$C_3 = B_2 C_2 + A_2 C_2 + A_2 B_2 \quad (4.3.15)$$

化简式(4.3.13)后,可以尝试用同样的方法化简式(4.3.12)。但因为式(4.3.12)已经是最简形式,所以这种方法不再奏效。显然,像式(4.3.11)那样,将加法器较高级的和与进位,用适当的形式表示后,就可以用“与非”门或“或非”门实现 BCD 加法器。

## (五)卡诺图

上一节应用布尔代数法则将式(4.3.13)化简为式(4.3.15)。但是并不清楚在什么情况下,可以对表达式进行化简。卡诺图提供了一种化简布尔表达式的方法。将真值表以某种几何形式表示后,就可以通过 1 和 0 的形式看出变量间的代数关系。

### 1. 绘图

绘制卡诺图的步骤非常简单,画一个方格,其中方格的个数为 4、8、16、……等等。图 4-111 是  $C_3$  的一张

卡诺图  $C_3$  是关于  $A_2$ 、 $B_2$  和  $C_2$  的函数。因为要表示 8 种状态, 所以这个图共有 8 个方格。每个方格与真值表的一行相对应, 并在每一格的上方和旁边标出了其坐标。例如, 卡诺图右下角的方格与  $A_2 = 1$ 、 $B_2 = 0$ 、 $C_2 = 1$  相对应, 同其上方和旁边的标志一致。

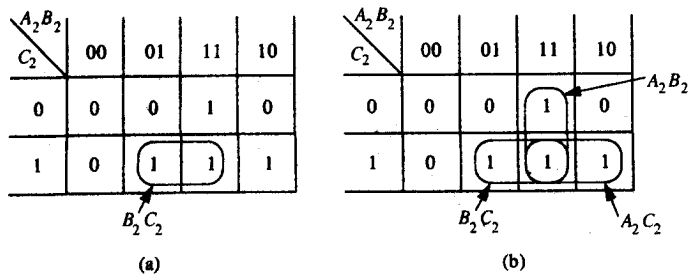


图 4-111 (b)用卡诺图表示  $A_2$ 、 $B_2$  和  $C_2$  的函数  $C_3$  ;

(b)这个卡诺图中有三个方格是相同的

在满足以下条件的前提下, 各方格的次序是任意的 (1)所有的组合在图中只表示一次 (2)相连的两个方格之间只有一个数位不同。因此, 在卡诺图顶端的标记中, 不能按通常的方式 (00, 01, 10, 11) 计数, 因为第 2 个和第 3 个状态间同时改变了两位。坐标的第二条安排规则保证了空间上相邻与代数相近之间的一致。

2. 为给出“乘积”形式的表达式, 对 1 进行分组

真值表中  $C_3$  的值已被添入方格中。因为在图 4-110 中  $C_3$  列中有四个 1, 所以在图 4-111 的八个方格中也相应地有四个 1。四个 1 所在的方格表示真值表中这些 1 所在的行。现在来寻找 1 的正方形和长方形图。在图 4-111(a) 中圈出了这样一个图形, 并将其标记为  $B_2C_2$ , 这是因为  $B_2 = 1$  和  $C_2 = 1$  唯一确定了这两个相邻的方格。换句话说, 因为  $A_2$  在这个长方形中既为 0, 又为 1, 所以它被消去了。但不能同时圈住三个相邻 1, 其原因是: 只有当长方形包括 2 个、4 个、8 个 ( $2^n$ ) 相邻方格时才能应用此性质。

图 4-111(b) 是同一张卡诺图, 其中标出了三个圈。可以看出图中的 1 可以表示为  $B_2C_2$  或  $A_2B_2$  或  $A_2C_2$ , 由此可以直接得到式 (4.3.15)。

3. 为“和积”形式的表达式, 对 0 进行分组

将卡诺图中的 0 分组, 可以得到  $C_3$  的另一种表示式。图 4-111(a) 将图 4-111 中卡诺图中的 0 用长方形圈了起来。因为  $C_2$  和  $A_2$  都为零时, 这个长方形才能取 0, 所以这一组可以表示为  $C_2 + A_2$ 。图 4-111(b) 将卡诺图中所有的 0 都圈了起来, 并标出了这些长方形中等于 0 的变量。因为这些组成部分中有一个为 0, 函数的值就为 0, 所以函数可以表示为这些组成部分的“与”。由此得到  $C_3$  的“和积”形式:

$$C_3 = (C_2 + A_2)(C_2 + B_2)(A_2 + B_2) \quad (4.3.16)$$

$C_3$  的“和积”形式与式 (4.3.15) 中的“乘积”形式是等效的。将式 (4.3.16) 展开, 并应用图 4-112 中的规则就可以得到式 (4.3.15)。但是直接实现式 (4.3.16) 的电路与式 (4.3.15) 的实现电路不同。尽管在本例中, 该电路并不简单, 但在某些情况下式 (4.3.16) 的实现电路可能会简单一些。

例: 无关项

精确电子振荡器使用的晶体必须放置在一个稳定工作的恒温箱中。振荡器有三种状态: 关闭、备用和工作。振荡器处于备用或工作状态时, 恒温箱应保持工作状态。用数字编码表示这些状态:  $S_1S_2 = 00$  (关闭),  $01$  (备用) 和  $10$  (工作)。设计恒温箱工作状态 ( $OV = 1$ ) 的逻辑。

解: 图 4-112(a) 是真值表, 图 4-112(b) 是卡诺图。两者中的 X 都表示“无关”状态, 也就是不可能发生的状态。因为这些状态不可能发生, 所以在设计过程中, 为了得到最简单的实现电路, 可以任意设这些无关项为 0 或者为 1。

图 4-112(a) 恒温箱工作的真值表, X 表示无关项, 在实际中不会发生;

(b) 恒温箱函数的卡诺图, 为了得到最简单的表达式, 可以将无关项任意设为 0 或者 1

由卡诺图可以得到实现函数。如果设无关项为 0, 就得不到可以化简的长方形, 但如果设为 1, 就可以得到基于 0 的简单“和积”形式。因为  $X = 1$ , 所以 0 可以表示为  $OV = S_1 + S_2$ 。实现电路为“或”门。



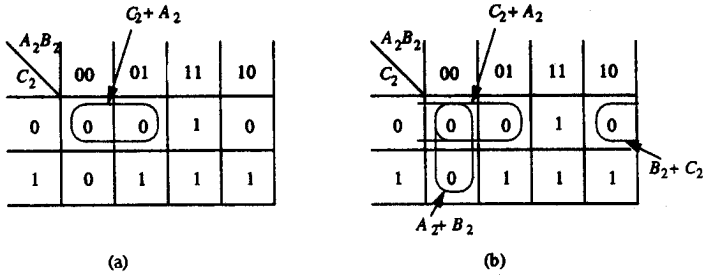


图 4-112 (a) 在  $C_3$  的卡诺图中将 0 用长方形圈起来：  
(b) 确定卡诺图中所有的长方形。从而得到  $C_3$  的“和积”形式。

### 三、时序逻辑电路

#### (一) 双稳态电路

##### 1. 两级放大器

基本存储电路是一个双稳态电路。图 4-114 是串联在一起的两个放大器—开并电路。第一级电路  $T_1$  的输出为第二级电路  $T_2$  提供输入。这是一个两级放大器，两个不同级都对信号进行放大。

##### 2. 放大器的输入—输出特性

各级放大器的原始放大器—开关电路是相同的。两级放大器串联后，可将第一级的输出作为第二级的输入。图 4-115 给出了较 4-114 所示放大器的整体输入—输出特性。由 0 开始，逐渐增大输入电压就可以推导出这个输入—输出特性。输入电压为 0 时，第一个晶体管  $T_1$  截止，第二个晶体管  $T_2$  饱和。输入电压逐渐升高并超过 0.7V 时， $T_1$  脱离截止状态。但在第一级输出电压降到 4V 左右之前， $T_2$  仍然保持饱和状态。要使第一级电路的输出低于 4V，其输入约为 3V 见图 4-114 所示，因此  $T_1$  的输入电压必须升高到大约 3V， $T_2$  才会脱离饱和区，整个两级放大器的输出电压才会开始上升。在这一区域内，两个晶体管都工作于放大区，放大器输出急剧上升。 $T_1$  的输入电压大于 4V 时，其输出降低到 0.7V 以下，第二个晶体管截止。所以当整个放大器电路的输入电压介于 3V 到 4V 之间时，两个晶体管同时工作于放大区，如图 4-115 所示。

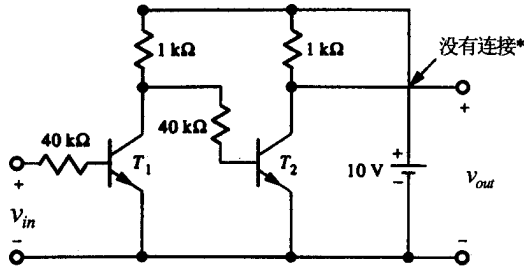


图 4-114 两级放大器

##### 3. 锁存电路

如果将两级放大器的输出与输入连接在一起，会发生什么现象呢？在图 4-116(a) 中画出了这一连接。并将晶体管  $T_1$  反转过来，以强调电路的对称性。图中还增加了两个输入，稍后将对之进行讨论。这一连接要求  $V_{in} = V_{out}$ ，这是一条经过原点、斜率为单位 1 的直线。图 4-116(b) 将这条线放到了放大器的特性曲线中。放大器应同时满足这两条曲线。尽管这条直线不是负载线，但负载线的思想可同样应用于这条直线：为同时满足这两条曲线，最终解必然是两条曲线的交点。分别标有  $S_1$  和  $S_2$  的交点是稳定解，而标有  $U$  的交点是不稳定的，或者说是亚稳定的。

4. 力学类比

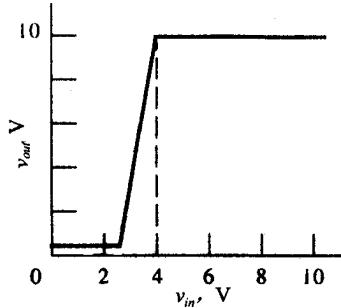


图 4-115 两级放大器的输入—输出特性

图 4-11(c) 是锁存电路的一个力学类比。靠在任意一侧墙上时，杠杆都处于稳定平衡状态。如果转轴是无摩擦的，平衡位置是不稳定的，实际中的杠杆不会停留在该处。

5. 锁存功能

晶体管  $T_2$  饱和、 $T_1$  截止时，电路处于稳定位置  $T_1$ 。晶体管  $T_2$  截止、 $T_1$  饱和时，电路处于稳定位置  $S_2$ 。如果没有外部信号使电路改变状态，电路将永远保持在这两种稳定状态中的一种状态。就像图 4-11(c) 中的杠杆，如果没有外力移动，杠杆将永远靠在一侧墙上。当晶体管处于截止状态时，在其输入端施加足够大的正电压，就可以使电路的状态发生变换。输入端的二极管是为了将输入驱动器与电路状态隔离开来。

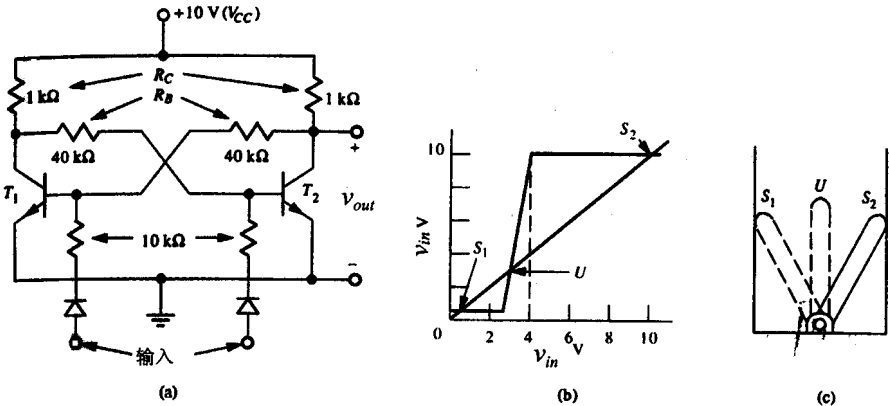


图 4-116 (a) 输入与输出连在一起的两级放大器；  
(b) 电路具有两个稳定工作点和一个不稳定工作点 (c) 力学类比

6. 锁存功能

图 4-11(c) 所示电路称为锁存电路，它可以提供电子记忆功能。按下计算器上的按键时，输入信号使计算器中的锁存电路工作，松开按键后锁存电路仍然保留键入信息。这样，可以在输入所有数字信息后，再对这些保留信息进行处理。

(二) 锁存器与触发器

1. SR 锁存器

锁存功能可以用标准逻辑门电路实现。图 4-117 的锁存电路由两个“或非”门构成。每个“或非”门的输出作为另一个“或非”门的一个输入。其他输入分别标有  $S$  (置位) 和  $R$  (复位)。电路的输出分别标有  $Q$  和  $\bar{Q}$ ，这是因为锁存器的两个输出是互补的。此电路被称为 SR 锁存器，其原理与图 4-11(c) 中的电路类似。

2. 锁存状态

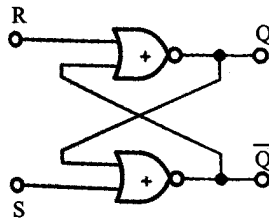
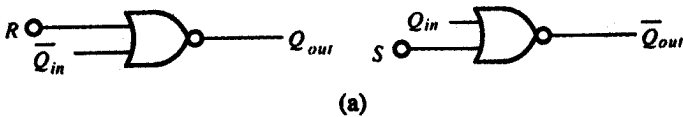


图 4-117 “或非”门组成的锁存器

假定图 4-117 中电路的输入与输出无关,如图 4-118(a)所示,这样就可以对该电路进行分析。于是,“或非”门的输入分别为  $R$ 、 $S$ 、 $Q_{in}$  和  $\bar{Q}_{in}$ 。有了这些“输入”就可以根据“或非”门的特性决定输出口  $Q_{out}$  和  $\bar{Q}_{out}$  的取值。图 4-116 中的触发器中只能存在自相容的状态。图 4-118(b)给出了最后结果。电路有四个输入变量和两个输出变量  $Q_{out}$  和  $\bar{Q}_{out}$ ,真值表中共需要 16 行。利用常用二进制计数法,在真值表的前四列中添入 0 或 1,以包括所有输入状态。



R	S	$Q_{in}$	$\bar{Q}_{in}$	$Q_{out}$	$\bar{Q}_{out}$	说明
0	0	0	0	1	1	不相容
0	0	0	1	0	1	相容, 存贮 $Q_{out}=0$
0	0	1	0	1	0	相容, 存贮 $Q_{out}=1$
0	0	1	1	0	0	不相容
0	1	0	0	1	0	不相容
0	1	0	1	0	0	不相容
0	1	1	0	1	0	相容, 置位
0	1	1	1	0	0	不相容
1	0	0	0	0	1	不相容
1	0	0	1	0	1	相容, 复位
1	0	1	0	0	0	不相容
1	0	1	1	0	0	不相容
1	1	0	0	0	0	相容, 但禁止
1	1	0	1	0	0	不相容
1	1	1	0	0	0	不相容
1	1	1	1	0	0	不相容

(b)

图 4-118 (a)输入与输出无关的 SR 锁存器;

(b)SR 锁存器的真值表,确定了各可能状态并给出了说明

例如,在第二行中, $R=0$ 、 $\bar{Q}_{in}=1$ ,所以  $Q_{out}=0$ ;  $S=0$ 、 $Q_{in}=0$ ,所以  $\bar{Q}_{out}=1$ 。在表中添入所有 0 和 1 后,比较输入的  $Q$  值与输出的  $Q$  值。如果两者不同,那么该状态就是不可能的。将不可能存在的状态标记为“不相容”。3. 稳定状态的解释

表中共有 5 种相容状态,这 5 种状态就是电路的稳定状态。已经指出其中有两种状态为存贮状态;一种状态被标为置位,一个为复位,还有一个为禁止出现的状态。将图 4-118(b)中的真值表简化为图 4-119(a)。

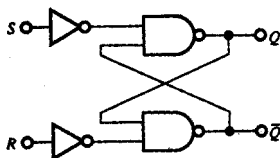
对图 4-119(b)和图 4-119(a)的解释可以这样理解:锁存器  $S$  或  $R$  端的输入信息为脉冲 1。如果脉冲到达  $S$  端,锁存器的输出  $Q$  被置为 1。脉冲到达  $R$  端,锁存器的输入被置为 0。如果两个输入端都没有脉冲,锁存器的输出保持(或者说记忆)当前状态。如果脉冲同时到达  $S$  端和  $R$  端,两个输出都将变为 0。这种状态不会损坏任何东西,但当输入变为 0 时,电路将处于一种不确定状态。因为这种状态将导致不可预料的结果,所以不希望出现这种状态。因此,这种状态被称为禁止状态。

图 4-119(b)中的 SR 锁存器由“非”门和“与非”门构成。它的性质与前面分析的 SR 锁存器的性质相

同,只是当两个输入端同时为 1 时,其输出为 1。这种册锁存器构成了选通锁存器的基础。

R	S	Q	$\bar{Q}$	说明
0	0	0	1	存贮 Q=0
0	0	1	0	存贮 Q=1
0	1	1	0	将 Q 置为 1
1	0	0	1	将 Q 复为 0
1	1	0	0	禁止出现 $Q=\bar{Q}=0$

(a)



(b)

图 4-119 (a)由‘或非’门构成的 SR 锁存器真值表 (b)由‘与非’门组成的 SR 锁存器,其性质与 (a)中锁存器的性质相同,只是在禁止状态下其输出为  $Q=0, \bar{Q}=1$ 。

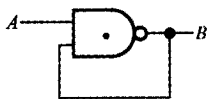
例 稳定状态

求图 4-120(a)中逻辑电路的稳定状态

解:图 4-120(b)将 A 和 B 看作独立输入变量,由它们可以推得‘与非’门输入的真值表如图 4-120(b)所示。由真值表可以看出,只有一种稳定状态:  $A=0, B=1$ 。思考题:如果门电路为‘或非’门,结果如何?

4. 选通触发器

为了充分发挥 SR 锁存器在数字信号处理中作为存储器的作用,需要对其进行一些改进。一个问题是 SR 锁存器在任何时候总是对其 S 和 R 的输入信号马上做出响应。这样就存在一个问题:如果逻辑信号应该同时到达,但由于分离延迟,它们的到达时间会稍微不同,这样就会产生时间问题。这种时间问题可能导致不希望出现的短脉冲,称作脉冲毛刺。



(a)

A	B <sub>in</sub>	$B_{out} = \overline{AB_{in}}$	结果
0	0	1	不相容
0	1	1	相容
1	0	1	不相容
1	1	0	不相容

(b)

图 4-120 (a)满足输入和‘与非’门的要求时,电路处于稳定状态 (b)输入与输出无关时的真值表

图 4-121(a)中的选通触发器仅在选通信号到达 G 门输入端时,才对 R 或 S 输入做出响应。这样就给‘与非’门增加了一个控制信号。在此形式下,交叉耦合‘与非’门的禁止输入状态为 00,对应于 R 和 S 输入就是前面所说的 11。锁存器还可以具有‘预置位’和‘清零’输入,这些输入信号使锁存器独立于控制门电路。图 4-121(b)逻辑符号图中输入信号的圆圈表示:这些输入信号为零状态时有效。图 4-121(c)列出了选通脉冲  $Q_{n+1}$  之后的输出状态。 $Q_{n+1}$  是 R、S 输入以及前一个选通脉冲  $Q_n$  的函数。例如,RS = 00 时,选通信号不会使输出状态发生改变,  $Q_{n+1} = Q_n$ 。如果对选通输入进行反转,就可以在  $G=0$  时,使门电路选通。图 4-121(b)触发电路符号的选通输入(G)中的圆圈表明该电路是零触发的。

选通输入信号为 1 时, R 和 S 输入有效。通常,整个数字系统中的定时或同步信号是图 4-121 所示的

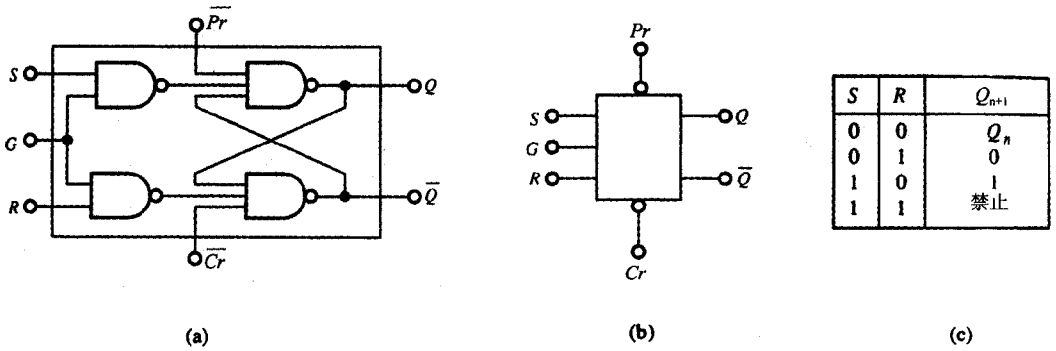


图 4-121 (a)选通触发器 (b)逻辑符号 (c)真值表

时钟脉冲信号。同步时钟信号在完成翻转的一个周期时有两个时段,即  $CK \Rightarrow 1$  和  $\overline{CK} \Rightarrow 1$ 。

### 5. 边沿触发触发器

如果使时钟输入仅对时间信号的暂态过程敏感,那么输入选通时间可以被进一步缩减,这也就是人们熟知的边沿触发。根据设计不同,触发器可以在时钟信号的上升沿触发,也可以在下降沿触发。边沿触发的区别标志是输入端的一个三角形。用波形的边沿触发限制了输入信号有效的的时间,从而可以消除脉冲毛刺。如果电路既可以用上升沿触发,也可以用下降沿触发,那么信号在一个时钟周期内可以通过电路两次。

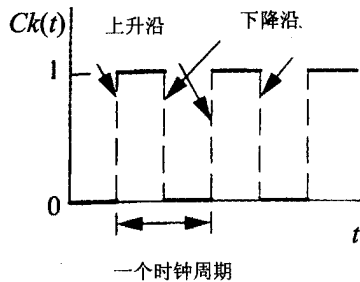


图 4-122 时钟信号

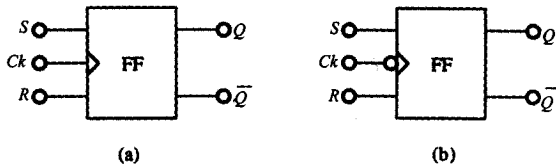


图 4-123 边沿触发器的逻辑符号:

(a)上升沿触发 (b)下降沿触发

### 6. JK 触发器

基本 SR 锁存器的另一个问题与其输入的禁止状态有关。将触发器的输入与输出求“与”就可以消除这种状态,这一操作使其中一个信号不能到达触发器,如图 4-124 所示。当电路输入为 1 时,新增的两个门电路可以防止 1 输入加到门电路。所在,当  $J=1, K=1$  时,输入信号总会改变输出的状态。图 4-125 是 JK 触发器的真值表,它与图 4-12(c)的真值表相同,只是将原来禁止输入状态对应的输出改为了  $Q_{n+1} = Q_n$ 。因此,JK 触发器不仅能够对输入进行锁存,还可以提供翻转功能,即两个输入都为 1、并有时钟脉冲时,输出状态进行翻转。这一翻转特性说明了为什么这种触发器必须使用边沿触发:如果时钟脉冲持续一段时间,电路状态将会来回振荡,最终的输出状态将是不确定的。JK 触发器的翻转模式对于计数器和分频器非常有用。

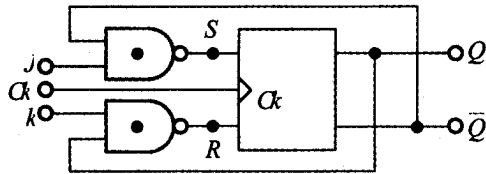


图 4-124 JK 触发器

$J$	$K$	$Q_{n+1}$	说明
0	0	$Q_n$	存储
0	1	0	复位
1	0	1	置位
1	1	$\bar{Q}_n$	翻转

图 4-125 JK 触发器的真值表。 $Q_{n+1}$ 表示时钟脉冲之前的状态, $Q_n$ 表示时钟脉冲之后的状态

### 7. D 型触发器

在两个输入之间加一个“非”门,就可以将 JK 触发器转换为 D 型触发器,如图 4-125 所示。其作用是将输入移位至下一个有效时钟沿输出,如图 4-127 所示。

### 8. T 型触发器

将 JK 触发器的 JK 输入连在一起就得到 T 型触发器。 $T=1$  时, T 型触发器的状态随时钟脉冲翻转, $T=0$  时,状态不会翻转。这一特性对于计数器和 2 分频应用都很有用。图 4-127 是 T 型触发器的逻辑符号和真值表。

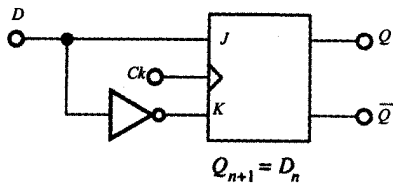


图 4-126 D 型触发器

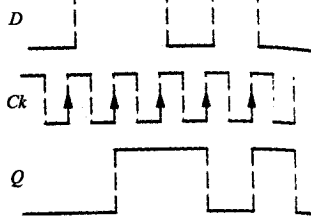


图 4-127 将输入延迟到下一个有效时钟沿,得到输出信号

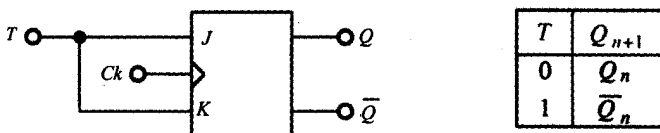


图 4-128 T 型触发器及其真值表

### 9. 小结

本节介绍了逻辑电路的基本存储元件——SR 锁存器。并对它进行了一些改进,得到了 JK 触发器、D 型触发器和 T 型触发器。在所有情况下,对于不同触发器的特性都只给出了一种实现方法。在各种逻辑系列中,特定系列的性质不同,这些电路可以用不同的方法实现。下一节将说明如何在数字系统中应用触发器。

### (三) 触发器应用

#### 1. 分频器

当 T 型触发器的 T 输入设置为 1,使触发器的输出状态随着时钟信号翻转,就可以实现时钟频率 2 等分。重复此过程可以得 4 等分、8 等分等等。

#### 2. 计数器

图 4-129 说明了计数过程。设开始时计数器已清零,也就是所有输出 Q 值都为零。前面已经说明,时钟脉冲的每个下降沿都会改变 FF0 状态,因此,FF0 的输出频率是时钟频率的一半。因为此输出用作 FF1 的时钟信号,所以频率被再次 2 分,下面各级计数器都是如此。图中画出了两条虚线,用它们可以验证:反复进行 2 分频操作就能完成对输入时钟脉冲的计数。例如,  $Q_0$  被看作最低位时,在第 7 个输入脉冲之后, Q 的输出状态为 0111 ( $=7_{10}$ )。读者可以对 12 个脉冲之后的状态进行验证。注意,即使时钟脉冲之间的间距不规则,计数器也会以二进制形式对输入脉冲进行计数。

如果被除数不是 2 的整数次幂,可以用“与”门检测合适的状态。图 4-130 给出了一个 3 分频计数器。如果两个触发器开始时都已清零(两个 Q 都等于 0),那么在第 3 个时钟周期末,两个 Q 值都将为 1,这使得“与”门的输出为 1。这个 1 对触发器清零,并当作电路的输出。因此,每 3 个输入脉冲将得到一个输出脉冲。

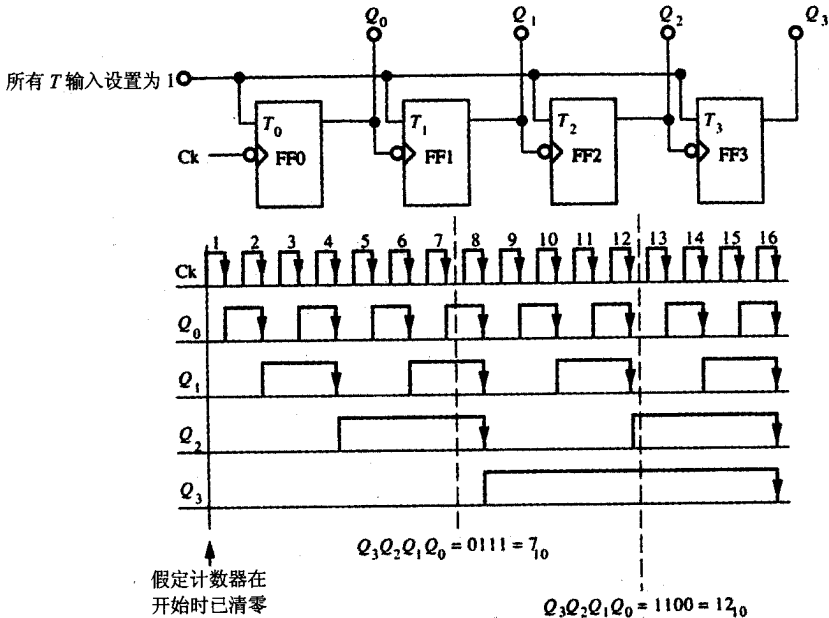


图 4-129 基本计数操作。以二进制计数,  $Q_0$  表示最低位

#### 3. 十进制计数器

图 4-131 说明如何将一个二进制计数器转换为十进制计数器。“与”门检测 10 个脉冲后,  $Q_3Q_2Q_1 = 1$  使计数器清零,并为下一级提供一个输入。当计数器对另一组输入采样计数时,计数器的输出口  $Q_3Q_2Q_1Q_0$  可以传递给 BCD 十进制显示。

前面介绍的这种计数器称为行波计数器,因为触发器的暂态过程是按照由左至右的次序依次通过计数器的。相反,同步计数器给所有触发器同时加一个时钟脉冲,用外部门电路控制计数过程。还有一种计数器叫双向计数器,这种计数器的计数可以根据输入命令增大或减小。

LSI(大规模集成电路)芯片中已经集成了分频器、计数器和其他很多有用的系统功能,数字设计者可以

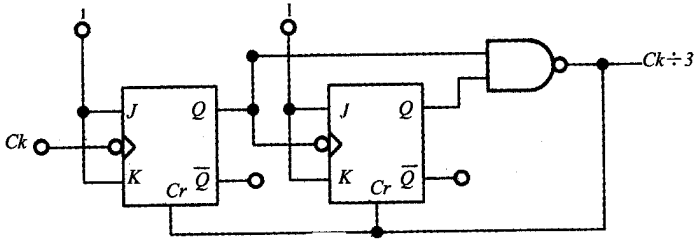


图 4-130 3 分频电路

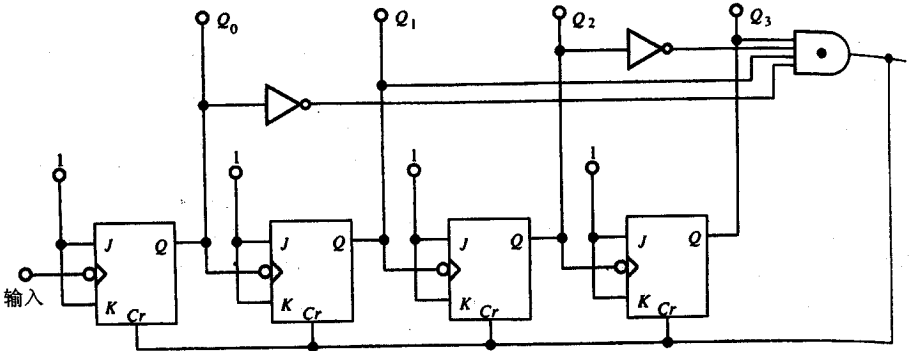


图 4-131 十进制计数器的一级

直接使用。这些 LSI 电路在内部完成连接,提供外部输入与输出接口。

#### 4. 寄存器

寄存器是一连串用来存储或处理二进制信息的触发器。在介绍几种寄存器之前,需要先介绍一些与计算机中寄存器应用有关的概念。

在计算机中,信息是由一组组称为“字”的 1 和 0 表示。在 8 位微处理器中的一个字可能是 01101101,或用十六进制数表示为 6D。一个 8 位“字”也常称为一个字节,它非常适于做数字信息的单位。一个字节可以表示两个 BCD 位或一个 ASCII(美国信息交换标准码)字母数字符号。当前微处理器中的字通常为 4 位、8 位、16 位或 32 位,大一些计算机的字通常为 32 位或者更多。采用 8 位字的计算机中的寄存器需要八个触发器同时存储或处理 8 位信息。

信息字通过总线在计算机或其他数字系统中来回移动。在城市的公共汽车线路中,乘客可以在沿途的多个不同点进入或离开。与此类似,计算机总线可以由任意几个寄存器开始,也可以到达任意几个目的寄存器。总线自身包括所需数目的导线,这些导线与所有可能的源寄存器和所有可能的目的寄存器相连。

图 4-132 是一个与 4 个 D 型触发器的目的寄存器相连的四线总线。在“加载”信号的上升沿时,总线中的信息被存入寄存器。这些信息并不是离开总线再进入寄存器,而是在整个总线上同时出现,并同时输入几个寄存器中。

#### 5. 三态门

多个寄存器可以同时从总线上获取数据,而在同一时间只能有一个寄存器向总线上输出数据。需要有一种方法将所有源寄存器的输出连接到总线上,又能保证在任一时间只能有一个寄存器向总线输出字。普通门电路的输出要么为 1,要么为 0。将所有源寄存器的输出都连在一起会导致冲突,所以普通门电路不能满足要求。这就需要图 4-133 所示的三态门电路。在没有“使能”信号时,门电路的输出相当于开路,门电路与总线断开。有“使能”信号时,门电路与总线连在一起,其输出根据输入取 1 或 0。所以,可以用三态门将所有的源寄存器与总线连在一起,在某一时间,使一个寄存器能够向总线传递数据。

#### 6. 移位寄存器

前面描述的数据存储寄存器以并行输入和并行输出传递信息。有时,数字信息必须通过一个信道发送,电话电路即是如此。在这种情况下,位信息必须以时间顺序或串行形式发送。如果数字信息必须以串行形



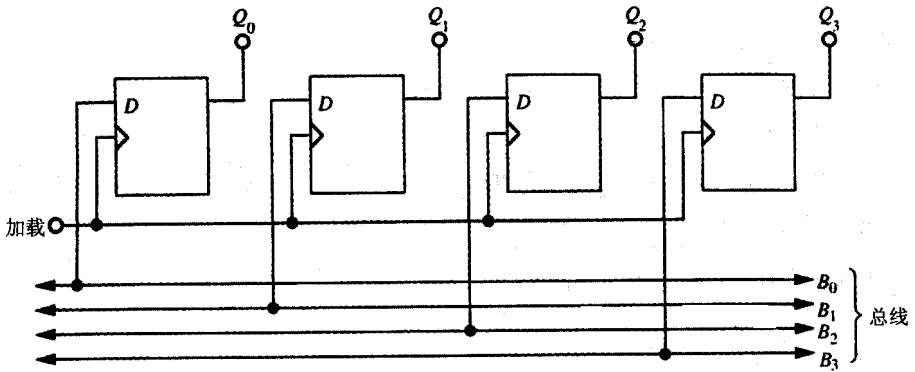


图 4-132 由总线向寄存器加载数据

式接收,就需要用移位寄存器接收串行信息再将它转换为并行形式。

图 4-133 中的 D 型触发器可以用作移位寄存器。前面已经说过, D 型触发器通过时钟脉冲将输入移到输出。所以  $D_3$  的输入在一个时钟脉冲之后到达  $Q_3$ , 在两个时钟脉冲之后到达  $Q_2$ , 三个时钟脉冲之后到达  $Q_1$ , 四个时钟脉冲之后到达  $Q_0$ 。因此,  $D_3$  的 4 位序列(字)输入将在四个时钟脉冲之后充满寄存器  $Q_3 Q_2 Q_1 Q_0$ 。然后就可以通过三态门将字传递给并行总线。

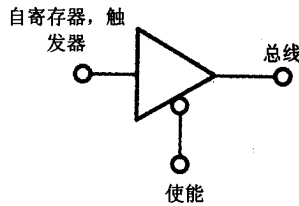


图 4-133 三态门,当“使能”信号为 0 时,输出与总线断开

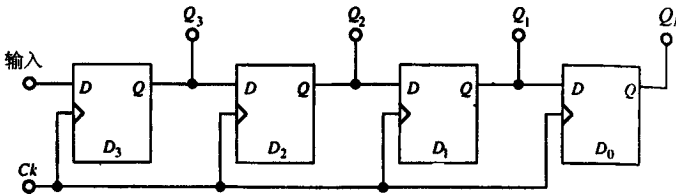


图 4-134 移位寄存器

例 移位寄存器

图 4-134 中的移位寄存器在其输入端以串行形式接收到一个十六进制数  $R = 1111$ 。假定寄存器已被初始清零,二个时钟脉冲之后寄存器的状态是怎样的?

解:假定低位数字首先到达,所以在一个时钟脉冲之后,最低位到达  $Q_3$ ,而  $Q_2, Q_1$  和  $Q_0$  仍然为零。此时的状态为  $Q_3 Q_2 Q_1 Q_0 = 1000$ 。两个时钟脉冲之后,寄存器的状态为 1100。

思考题:如果正在加载的数是以十六进制表示的十进制数  $9_{10}$ ,三个时钟脉冲之后寄存器的状态如何?

移位寄存器以图 4-134 方式工作时,其输入为串行,输出为并行。同一寄存器可以在触发器的预置位输入端接收一个并行字。时钟信号将这个字由  $Q_0$  以串行方式输出。

7. 二进制乘法

每个时钟脉冲到来时,图 4-134 中的移位寄存器向右移动一个单位。如果在触发器输入端的左边或右边连接“门”电路,得到的寄存器将更为通用。这种寄存器既可以向右移位也可以向左移位,这取决于哪一组门电路被“使能”。这种结构在算法运算中非常有用。十进制数中的乘 10 运算可通过将小数点向右移动一位实现。同理,二进制中的乘 2 运算可以通过将某一位置的二进制点向左移动来完成。在硬件实现中,只要

将寄存器中某一位置的所有位向左移动即可实现。显然,乘以 $2^n$ 只需左移 $n$ 位。当乘数不是2的整数次幂时,需要同时用到移位和加法。用同样的方式,可以通过将移位寄存器向右移位完成除法。

## 第四节 案例分析

### 一、功率集成电路举例

#### (一) 智能功率模块的应用

智能功率模块(Intelligent Power Module,以下简称IPM)以IGBT为功率开关器件,把驱动电路、控制电路和保护电路(过电压、过电流和过热)集成在一起,形成一个完整的系统。这种IPM若发生负载故障或使用不当,可将监测到的故障信号送给CPU,从而使IPM自身不受损坏。

图4-135为采用IPM制作的逆变器框图。逆变器中的功率放大部分采用IGBT模块,每一个IGBT元件都设置各自独立的驱动电路和多种保护电路(过流、过电压、欠电压及过热),一旦保护电路动作,即使有控制输入信号,IPM的输入信号也被禁止,而向CPU反馈输出误动作信号,若要IPM工作,这时必须按复位开关后才能重新工作。

IPM具有可靠性高、用户使用方便等优点,尤其适宜制作驱动电动机的变频器,是一种较为理想的颇有发展前途的电力电子器件。

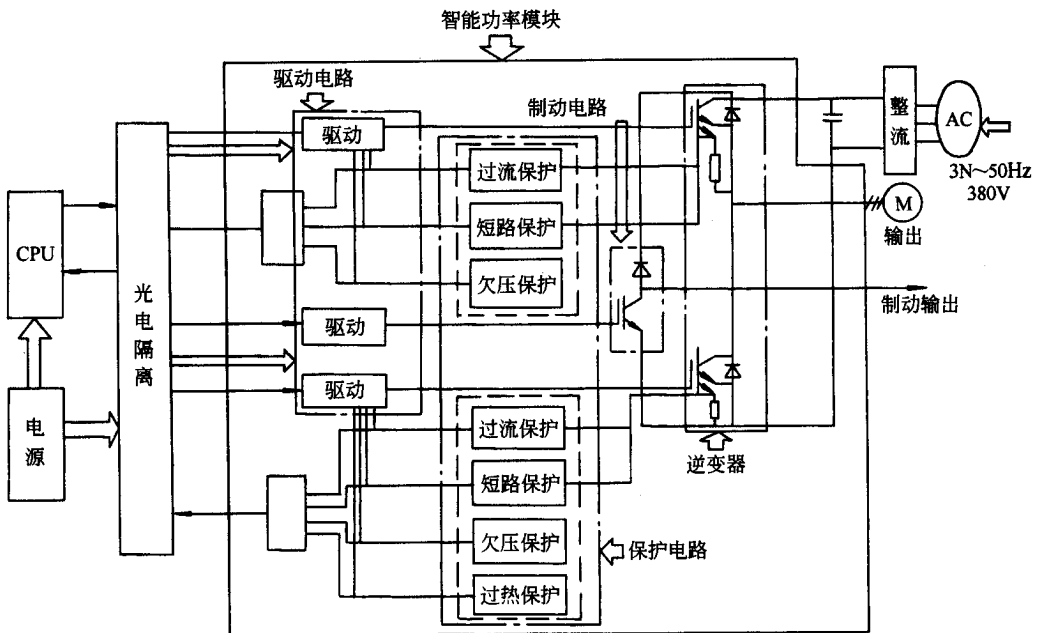


图 4-135 采用 IPM 制作的逆变器框图

#### (二) 无刷直流电机专用 PIC

图4-136为一种驱动无刷直流电机的专用PIC的原理框图。此电路用来对仪表电风扇的两个电机绕组进行供电。通过施密特触发电路和控制与转换逻辑电路,对两个GTR进行控制。电路的输出功率虽不大,但功能齐全。过热、过流信号均可通过控制与逻辑电路封锁其输出信号,强迫GTR关断。电路还通过霍尔元件的集成,提供电机转速自动检测和信息输出,以便调节速度。另外,此电路还可对电机的安装和运行

情况进行监控。

### (三) 智能功率开关

比较典型的有德国西门子公司生产的 *BTS-412A* 型智能单片功率开关,其结构框图如图 4-137 所示。它具有高压侧开关能力,电流额定值为 12A,工作电压在 7~35V 之间。内部逻辑电路采用低压 CMOS 器件,充电泵电路采用高压 CMOS 电路。输出功率开关接成射极跟随器,内部充电泵使功率 MOSFET 的栅极电压

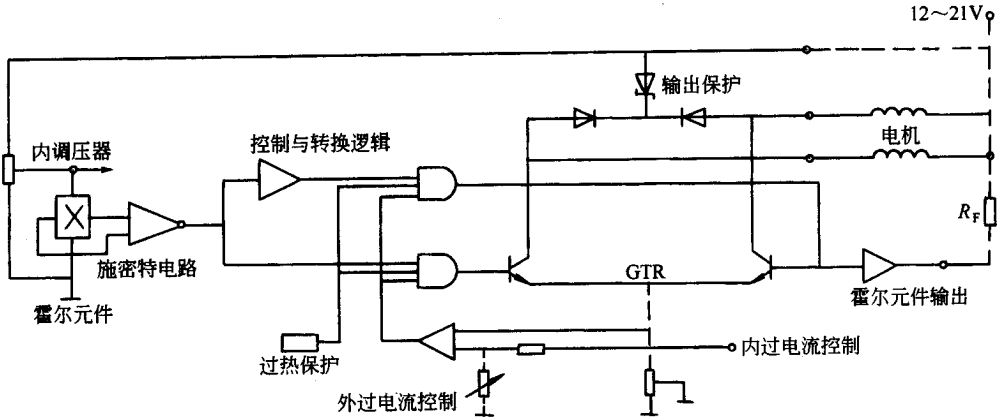


图 4-136 无刷直流电机专用 PIC

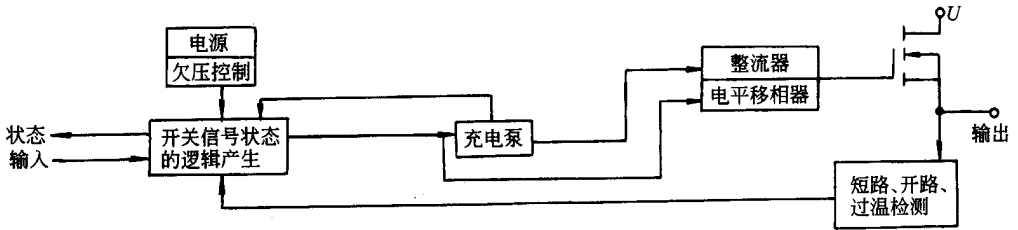


图 4-137 *BTS-412A* 型单片功率开关框图

保持比正电源电压约高 6V。*BTS-412A* 型单片具有多种保护功能:短路时,约 40/s 后电流即被切断;过流时,结温超过 150℃ 时,敏感元件即产生信号使器件关断;欠压时,器件也会自动立即关断。该单片的输出端还设有 10V 稳压管,它使器件关断时帮助感性负载释放能量。此外,该片还设有状态输出端,为微处理器系统提供故障信息。

## 二、控制集成电路举例

国外 20 世纪 70 年代中期开始研制集成控制器,并很快进入实用阶段。其中较有代表性的是 *LM1524* 系列以及后来的 *LM1525*、*LM1526* 等。我国在 80 年代初已进行集成化控制器的研制。现在已经能生产 *GW3520*、*GW3420*、*GW1524* 以及 *SL-64* 等系列产品。

本节主要介绍 *LM1524* 系列产品。此系列产品共有三种型号,即 *LM1524*、*LM2524*、*LM3524*,其外形均为双列直插式 16 脚封装。*1524* 系 I 类军用品,适于 -55~+125℃ 环境温度;*2524* 系 II 类工业品,适于 -40~+85℃ 环境温度;*3524* 系 III 类民用产品,适于 -10~+70℃ 环境温度。它们的内部电路、外部电路使用方法相同。

### (一) *1524/2524/3524* 简介

1. 这个系列的特点

(1) 完整的 PWM 控制电路的功能。

- (2) 有交变输出开关对,可实现推挽输出或单端输出。
- (3) 频率可调范围为  $100 \sim 350\text{kHz}$  频率的温度稳定性  $\leq 2\%$ 。
- (4) 有超结温保护和过流保护。
- (5) 总的静态电流  $\leq 10\text{mA}$ 。
- (6) 可为用户提供  $5\text{V } 50\text{mA}$  的直流稳压输出。

2. 极限使用值

- (1) 输入电压  $40\text{V}$ 。
- (2) 外加基准电压  $6\text{V}$ 。
- (3) 输出基准电流  $50\text{mA}$ 。
- (4) 输出电流(单个输出)  $100\text{mA}$ 。
- (5) 振荡器充电电流(6脚或7脚)  $5\text{mA}$ 。
- (6) 内部功耗  $1\text{W}$ 。
- (7) 最高结温: J 封装  $150^\circ\text{C}$ ; N 封装  $125^\circ\text{C}$ 。

3. 主要单元的电性能 见表 4-15。

表 4-15 1524 ~ 3524 主要单元的电性能

序号	参数	测试条件	LM1524 LM2524			LM3524			单位
			最小值	典型值	最大值	最小值	典型值	最大值	
基准电压部分									
1	输出电压	$U_s = 8 \sim 40\text{V}$ $I_L = 0 \sim 20\text{mA}$ $f = 120\text{Hz}$ $T_A = 25^\circ\text{C}$ $U_{nf} = 0$ $T_A = 25^\circ\text{C}$ 工作温度范围 $T_A = 25^\circ\text{C}$	4.8	5.0	5.2	4.6	5.0	5.4	V
	电压调整率			10	20		10	30	mV
	负载调整率			20	50		20	50	mV
	纹波抑制比				66		66		dB
	输出短路电流				100		100		mA
	温度稳定性			0.3	1		0.3	1	%
	长时间稳定				20			20	mV/kh
	振荡部分								
2	最高频率	$C = 0.001 \mu\text{F}$ $R_f = 2\text{k}\Omega$ $U_s = 8 \sim 40\text{V}$ $T_A = 25^\circ\text{C}$ 工作温度范围	350			350			kHz
	对电压稳定度				1			1	%
	对温度稳定度				2			2	%
	输出幅度			3.5			3.5		V
	输出宽度			0.5			0.5		$\mu\text{s}$

序号	参数	测试条件	LM1524 LM2524			LM3524			单位
			最小值	典型值	最大值	最小值	典型值	最大值	
误差放大部分									
3	输入失调电压	$U_{CM} = 2.5V$ $U_{CM} = 2.5V$ $T_A = 25^\circ C$ $A_V = 0dB$ $T_A = 25^\circ C$		0.5	5		2	10	mV
	输入偏量电流			2	10		2	10	$\mu A$
	开环电压增益			72	80		60	80	dB
	共模抑制比				70			70	dB
	小信号带宽				3			3	MHz
4	比较部分最大占空比	每一个输出导通	45			45			%
5	电流限制检测电压	$V_2$ 脚 - $V_1$ 脚 $\geq$ $50mV$ $V_9$ 脚 = $2V$	190	200	210	180	200	220	mV
	上升时间	$U_{CE} = 40V$ $R_C = 2k\Omega$ $T_A = 25^\circ C$		0.2			0.2		$\mu s$
6	下降时间	$RC = 2k\Omega$ $T_A = 25^\circ C$		0.1			0.1		$\mu s$

## (二) 外形和内部结构

1524、2524、3524 的外形和内部结构如图 4-138 所示。下面对框图中的主要单元部分作简要说明。

1. 基准调整器 基准电压调整器参数是  $5V$   $50mA$  , 内有短路电流保护的电压调整器。它供电给所有的内电路, 同时又可作为外部基准参考电压。若输入电压低于  $6V$  , 可把 15、16 脚短接为输入电压  $U_{in}$  , 这时  $5V$  电压调整器不起作用。

2. 振荡器 振荡器的频率由外接阻容  $R_T$ 、 $C_T$  决定。一般  $R_T$  取  $1.8 \sim 100k\Omega$  ,  $C_T$  取  $0.001 \sim 0.1\mu F$  , 振荡频率可达  $350kHz$  , 可直接带负载。

3. 误差放大器 误差放大器是差动输入的放大器。它的增益标称值为  $80dB$  , 其大小由反馈或输出负载来决定。输出负载可以是纯电阻, 也可以是阻容元件。该放大器共模输入电压范围在  $1.8 \sim 3.4V$  。接线时, 需要将基准电压分压送至误差放大器 1 脚或 2 脚。为使系统能稳定, 在 9 脚与地之间接阻容网络, 以补偿系统的幅频、相频响应特性。本控制器无专门的死区时间控制端, 而是靠基准电压分压至误差放大器的输出端脚 9 , 限制 9 脚的高电平数值则控制了死区。为了不影响内部性能, 在 9 脚与分压端间串联二极管, 使 9 脚电位低于分压端电压时, 分压回路就不起作用。如果做开环系统工作, 在 9 脚加控制电压即能工作。

4. 电流限制器 电流限制器  $A1$  输出的功能是代替误差放大器的输出, 控制脉冲的宽度。当运放“+”端与“-”端之间加  $200mV$  的限流检测电压时, 输出占空比下降到 25% 左右, 再增加检测电压约 5% , 就得到输出占空比为 0% 的脉冲, 所以必须小心整定输入信号电压。一般不要超过  $-0.7 \sim 1.0V$  的输入共模范围。

5. 闭锁控制端 (10 脚) 利用外部电路控制 10 脚电位, 当它有高电平时, 可关闭误差放大器的输出。因此, 它可作为软起动和过电压保护。

6. 输出端 由两个中功率  $NPN$  管组成 [ 即图 4-138(b) 图中  $A$  管和  $B$  管 ], 最大电流容量为  $100mA$  。两晶体管的驱动信号之间有  $180^\circ$  的相位差, 其集电极和发射极都开路, 可外接电源和其他元件。

## (三) 芯片工作机理

如图 4-138(b) 所示, 输入的直流电源  $U_S$  从 15 脚引入分两路, 一路加到“或非”门, 另一路至基准调整

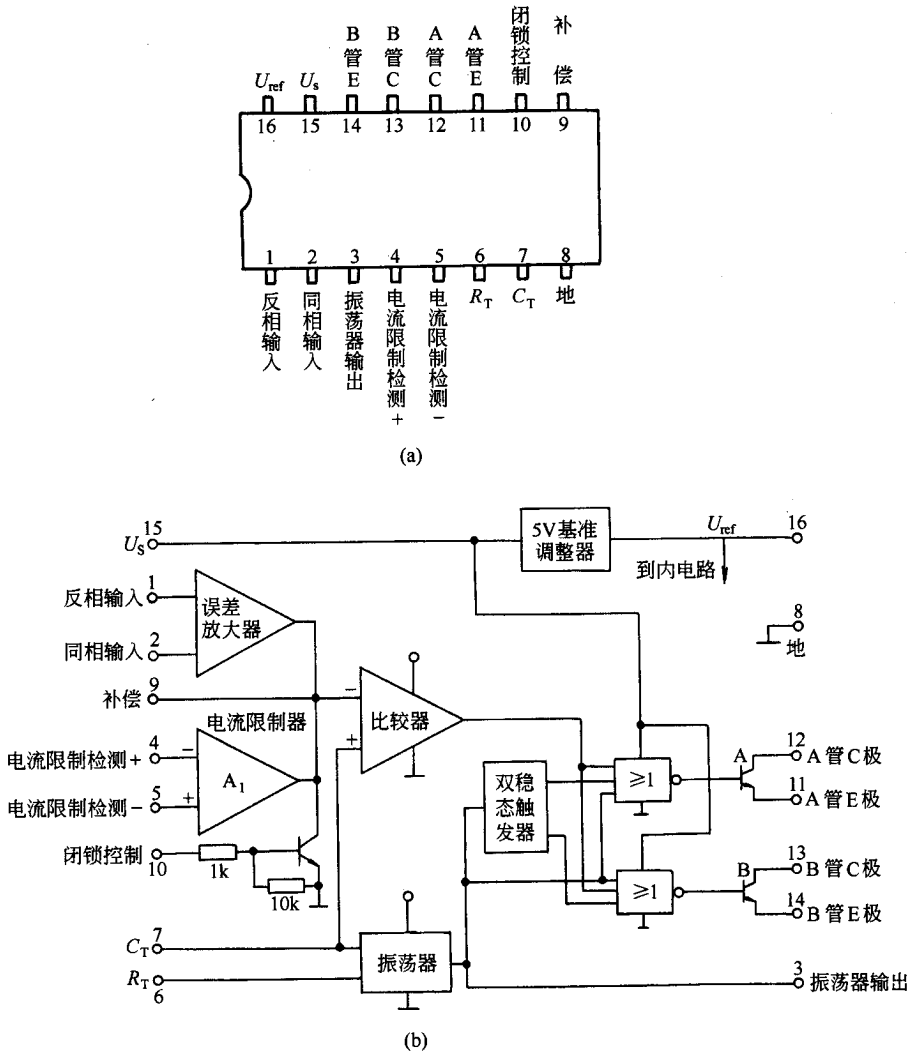


图 4-138 控制集成电路 1524、2524、3524 的外形和内部结构

(a) 外形 (b) 内部结构

器,调整器便产生稳定的 +5V 基准电压作为电路其他元件的电源。振荡器 7 脚外接电容  $C_T$ , 6 脚外接电阻  $R_T$ , 选用不同的  $C_T$ 、 $R_T$ , 即可调节振荡器的输出频率。振荡器的输出分两路, 一路以时钟脉冲形式送至双稳态触发器及两个“或非”门, 另一路以锯齿波形式送至比较器的同相端, 其反相端与误差放大器输出端相连接。误差放大器实际上是个差分放大器, 其脚 1 为反相输入端, 脚 2 为同相输入端, 这两个输入端可根据应用时情况来连接。如脚 1 可接到输出电压的取样电路上(取样信号约 2.5V), 脚 2 可连到脚 16 的分压电路上(取得 2.5V 的电压), 其输出(脚 9)与地之间接 R 与 C, 进行频率补偿。误差放大器的输出与三角波电压在比较器中进行比较, 从而输出一个随误差放大器输出电压高低而改变宽度的方波脉冲, 此方波脉冲送到“或非”门的一个输入端, 控制着“或非”门的输出电压  $U$ 。最后, 在晶体管 A 和 B 上分别出现两串随  $U$  变化而变化宽度的脉冲波, 两者相位差为  $180^\circ$ 。



# 第二篇 电气工程 安装与维护篇

# 第五章 电机及其安装维护技术

## 第一节 电机设计技术

### 一、设计技术要求

#### (一) 电机设计依据

电机一般依据下列技术要求进行设计: 1) 电机的类型或用途(电动机、发电机、特殊用途电机)。2) 与之连接的电系统对电机的要求(电流、电压、频率、相数等)。3) 与之连接的电机械系统及工作环境对电机的要求(几何尺寸、质量、结构及安装型式、防护类型、冷却方式、飞逸转速或超速转速、转动惯量等)。4) 额定数据, 运行方式和不同用途所要求的各种性能指标(功率、转速、工作制、效率、功率因数、起动性能、换向性能、励磁性能、电压变化率、电压波形畸变率、振动与噪声限值以及电机对无线电干扰的限值等)。5) 电机及各组成部分承受电气、机械、热负载的能力(如绕组绝缘等级及各部分温升限值、绕组绝缘的介电强度、转子的机械强度等)。6) 有关国家标准、专业标准、设计任务书以及用户提出的其他要求。此外, 还应考虑生产的可能性和经济的合理性。电机常用的国家标准列于表 5-1。

表 5-1 电机常用标准

序号	标准编号	标准名称	对应国际标准
1	GB755	旋转电机——定额和性能 <sup>①</sup>	IEC34—1
2	GB756	旋转电机圆柱形轴伸	ISOR775
3	GB757	电机圆锥形轴伸	ISOR775
4	GB997	电机结构及安装型式代号	IEC34—7
5	GB1971	电机线端标志与旋转方向	IEC34—8
6	GB1993	电机冷却方法	IEC34—6
7	GB3667	交流电动机电容器	
8	GB4772.1	电机尺寸及公差机座号 36 ~ 400 凸缘号 FF55 ~ FF1080 或 FT55 ~ FT1080 的电机	
9	GB4772.2	电机尺寸及公差机座号 355 ~ 1000 的电机	IEC72



序号	标准编号	标准名称	对应国际标准
10	GB4772.3	电机尺寸及公差凸缘号 BF10 ~ BF50 小型装入式电动机	
11	GB4826	电机功率等级	IEC72
12	GB4831	电机产品型号编制方法	
13	GB4832	大电机振动测定方法	
14	GB4942.1	电机外壳防护分级	
15	GB4942.2	低压电器外壳防护等级	IEC34—5
16	GB5171	小功率电动机通用技术条件	
17	GB5840	换向器与集电环的定义和术语	IEC276
18	GB5841	电机用刷握的定义和术语	IEC560
19	GB8564	水轮发电机组安装技术规范	
20	GB8916	三相异步电动机负载率现场测试方法	
21	GB9926	小功率单相串励电动机通用技术条件	
22	GB10068.1	旋转电机振动测定方法及限值振动测定方法	
23	GB10068.2	旋转电机振动测定方法及限值振动限值	IEC34—4
24	GB10069.1	旋转电机噪声测定方法及限值噪声工程测定方法	
25	GB10069.2	旋转电机噪声测定方法及限值噪声简易测定方法	
26	GB10069.3	旋转电机噪声测定方法及限值噪声限值	IEC34—9
27	GB10585	中小型同步电机励磁系统基本技术要求	
28	GB12350	小功率电动机的安全要求	
29	GB12351	热带型旋转电机环境技术要求	
30	GB12665	电机在一般环境条件下使用的湿热试验要求	
31	GB1029	三相同步电机试验方法	
32	GB5089	交流台扇电动机通用技术条件	
33	GB7064	汽轮发电机通用技术条件	
34	GB8409	大中型同步发电机励磁系统基本技术条件	
35	GB7894	水轮发电机基本技术条件	
36	GB761	三相异步电动机额定功率、电压及转速(功率自 0.6 ~ 100kW)	
37	GB1032	三相异步电动机试验方法	
38	GB2818	YQS 系列并用潜水泵三相异步电动机技术条件	
39	GB5321	用量热法测定大型交流电机的损耗及效率	IEC34—(A)
40	GB5767	电压为 660V 及以下单速三相笼型异步电动机的起动机性能	IEC34—12
41	GB6828	吊扇电容运转电动机通过技术条件	

序号	标准编号	标准名称	对应国际标准
42	GB9651	单相异步电动机试验方法	IEC34—13
43	GB1311	直流电机试验方法	
44	GB4997	永磁式低速直流测速发电机	
45	GB6656	铁氧体永磁直流电动机	
46	GB1585	微型驱动电机名词术语及代号	
47	GB2658	小型交流风机通用技术条件	
48	GB5872	控制微电机包装技术条件	
49	GB7344	交流伺服电动机通用技术条件	
50	GB7345	控制微电机基本技术要求	
51	GB7346	控制微电机基本外形结构型式	
52	GB8128	单相串励电动机试验方法	
53	GB10241	旋转变压器通用技术条件	
54	GB10242	录音机用永磁直流电动机通用技术条件	
55	GB10401	永磁式直流力矩电动机通用技术条件	
56	GB10402	磁阻式步进电动机通用技术条件	
57	GB10403	多极和双通道感应移相器通用技术条件	
58	GB10404	多极和双通道旋转变压器通用技术条件	
59	GB10405	控制微电机型号命名方法	
60	GB10761	热带微电机基本技术条件	
61	GB3537	洗衣机用 XD 型电机技术条件	
62	GB5227	轧机辅传动直流电动机	
63	GB7060	船用电机基本技术要求	
64	GB10760.1	小型风力发电机技术条件	
65	JB/T8160—95	CK 系列空心转子异步测速发电机	
66	JB/T8161—95	S - C 系列交流伺服测速机组	
67	GB13138—91	自整角机	
68	GBn62	笼型转子交流伺服电动机	
69	GBn63	内转子磁滞同步电动机	
70	GBn94	微特驱动电机型号命名方法	
71	JB/T6225—92	感应移相器	
72	GB2900.25	电工名词术语电机	
73	GB2900.26	电工名词术语控制电机	
74	GB/T13957—92	大型三相异步电动机基本系列技术条件	

①国家标准 GB755—87《旋转电机基本技术要求》的修订版本,已上报待批。

## (二)电机设计基本内容

电机设计一般包括电磁设计和结构设计两部分。电磁设计是根据设计技术要求确定电机的电磁负荷、

与电磁性能有关的有效部分的尺寸和绕组数据,选定材料,并核算电磁性能及有关参数。

电机设计一般需要进行多种方案的分析、比较,或采用优化设计方法,考虑电机性能、运行费用、制造成本、运行可靠性等因素,决定最优的设计。对于生产量大,使用面广的电机,一般都成系列设计及制造,设计时应充分考虑标准化、通用化、系列化的要求,对于多品种小批量生产的电机产品,应重视模块化设计。

### (三) 电机设计标么值

为了便于计算和对不同设计方案或运行状态进行比较,电机设计时通常用标么值表示电机参量。电机各参量的标么值为其以物理量单位表示的实际值与所选定的基准值之比。基准值的选定是任意的,通常选用的各参量的基准值见表 5-2。

表 5-2 电机各参量的基准值

参量	基准值
电压	额定相电压 $U_N/V$
电流	额定相电流 $I_N$ 或功电流 $I_w = P_N \times 10^3 / mU_N$
功率	额定视在功率 $S_N = mU_N I_N$ 或额定输出功率 $P_N \times 10^3$
频率	额定频率 $f_N/Hz$
阻抗	$U_N/I_N$ 或 $U_N/I_w/\Omega$

- 注 1.  $I_N$ 、 $I_w$  以 A 计;  $S_N$  以 VA 计;  $P_N$  以 kW 计;  $m$  为相数。  
 2. 各量的标么值常用物理量符号右上角带“\*”表示。  
 3. 同步电机常用  $I_N$ 、 $S_N$  为基准值;异步电机常用  $I_w$ 、 $P_N \times 10^3$  为基准值。

### (四) 计算机在电机设计中的应用

计算机由于其突出的快速运算功能、存储功能以及逻辑判断功能,在电机设计中得到了广泛使用,使传统的电机设计方法发生了深刻变化。

作为电机设计基础的电磁设计程序,应用了计算机代替繁杂的手工计算后,便可采用更加符合实际的数学模型,改进现有设计计算公式,从而提高产品设计的精度。例如,异步电动机的等效电路原是 T 型等效电路,以前为了适应手工计算需要,将其简化为  $\Gamma$  形等效电路。在使用电子计算机后就可以方便地使用 T 型电路,计算精度可提高。如果再考虑高次谐波作用,采用链形等效电路,则设计计算就更为精确。

另外,由于运用了计算机,可对较复杂的数学模型进行数值求解,从而使过去只能作粗略估算或无法计算的项目(例如稳态和瞬态热计算、瞬态现象研究、机械强度及轴承承载能力、临界转速及铁心固有频率等许多项目)的计算成为可能。这些项目正在纳入电机设计程序中,从而使电机设计计算建立在更加可靠的科学基础上。

电机设计的最终结果是要形成图样和有关文件供制造用。由于计算机绘图技术的迅速发展,如光笔图形显示器使设计人员能在屏幕上或数字化仪上进行具体的结构设计绘图,并可能通过人机对话,进行实时修改,再如精密的自动绘图机可把设计结果直接以图样的形式输出,从而使电机设计从电磁设计到结构设计,并包括绘制图样的整个过程均可以借助于计算机的辅助而完成。

计算机辅助设计可显著提高电机设计的效率与计算精度,缩短产品的研制周期,能生成标准的图样和文件,因此,这种方法正在逐步取代以经验设计和手工绘图为特征的传统设计方法。另外,当计算机辅助设计系统(CAD)与计算机辅助制造系统(CAM)结合在一起时,可把电机产品的设计和制造过程变成一个完整的集成系统,使许多技术工作实现自动化,因此,CAD/CAM 将为电机制造厂的计算集成化提供技术基础。

## 二、电机的主要尺寸

### (一) 电机利用系数

表示电机有效部分单位体积、单位同步转速(或额定转速)的计算视在功率(或计算功率),即

$$C = \frac{S_c}{d^2 l' n} \approx 0.116 K_{dp} A B_\delta \times 10^{-3} \quad (5.1.1)$$

式中  $C$ ——电机利用系数 (kVA·min/m<sup>3</sup> 或 kW·min/m<sup>3</sup>);  
 $D$ ——交流电机定子铁心内径或直流电机电枢外径(m);  
 $l'$ ——交流电机定子铁心有效长度或直流电机电枢有效长度(m);  
 $n$ ——交流电机同步转速或直流电机额定转速(r/min);  
 $K_{dp}$ ——绕组因数;  
 $A$ ——线负荷(A/m);  
 $B_\delta$ ——气隙磁通密度(T);  
 $S_c$ ——计算视在功率(或计算功率)(kVA 或 kW)。

对交流电机

$$S_c = m E I_N \times 10^{-3}$$

式中  $S_c$ ——计算视在功率(kVA);  
 $m$ ——定子相数;  
 $I_N$ ——定子额定相电流(A);  
 $E$ ——满载定子绕组每相电动势(V)。

对于直流电机

$$S_c = E_a I_a \times 10^{-3}$$

式中  $S_c$ ——计算功率(kW);  
 $E_a$ ——电枢绕组电动势(V);  
 $I_a$ ——电枢绕组电流(A)。

由式(7.2-1)可见,电机利用系数正比于电磁负荷( $A$ 与 $B_\delta$ 的乘积),反映了材料的利用水平。随着电机冷却技术的发展,材料、工艺和设计水平的提高,利用系数也有了相应的提高。另外,随着电机的特性、用途以及功率大小的不同,利用系数也在一个较大的范围内变动。对于一般空气冷却的电机,其利用系数约为1.5~9,而对于直接氢冷或水冷的电机,其利用系数约为3~20。由于利用系数值对不同功率、不同冷却方式的电机变化范围颇大,主要的并不着重于其具体数值的大小,而着重于研究其随电磁负荷如何变化,以及明确其物理意义。

### (二) 电磁负荷和主要尺寸比

电磁负荷 $A$ 、 $B_\delta$ 值不仅决定电机的利用系数,直接影响电机有效材料用量,更为重要的是 $A$ 、 $B_\delta$ 值与电机的运行参数和性能(功率因数、起动性能、过载能力和直流电机的换向性能等)密切相关。

电负荷 $A$ (A/m)表示沿定子内腔(或电枢)圆周上单位长度的安培导体数,即

$$A = \frac{Q Z_Q I}{\pi D a}$$

式中  $Q$ ——槽数;  
 $Z_Q$ ——每槽导体数;  
 $I$ ——电流(A);  
 $a$ ——并联支路数。

气隙磁通密度 $B_\delta/T$ 为

$$B_{\delta} = \frac{2P\Phi}{\pi D l a}$$

式中  $P$ ——极对数；

$\Phi$ ——每极磁通(Wb)；

$a$ ——平均磁通密度(对应于每极磁通  $\Phi$ )与最大磁通密度之比。对于正弦分布气隙磁场,其值等于  $2/\pi$ 。

提高电磁负荷乘积  $AB_{\delta}$ ,可提高有效材料的利用率,但磁负荷  $B_{\delta}$ 受到铁心磁路饱和以及铁心中损耗的限制,而电负荷  $A$ ,则受导体中产生的损耗、温升及大部分由槽深所影响的漏抗的限制。电磁负荷推荐值见表 5-3。

表 5-3 电磁负荷  $A$ 、 $B_{\delta}$  推荐值

电磁负荷		同步电机	异步电机	直流电机
$B_{\delta}/T$		0.6~1.1	0.5~0.85	0.5~1.1
$A/(kA/m)$	空冷	30~90	20~90	20~80
	水冷	90~110	—	—
	导体直接冷却	80~250	—	—

电磁负荷及其相互关系很难用固定的原则来确定,在实际设计中,较多参考采用已有的同类产品的统计平均值。

电机主要尺寸比是指电机有效部分长度与直径或极距之比,其比值用  $\lambda$  表示。

对交流电机为定子铁心有效长度与极距之比,而对直流电机常指电枢铁心长度与直径之比。当电磁负荷  $A$ 、 $B_{\delta}$  范围初定后,按式 5.1.1 即可初步确定有效部分体积  $D^2 l'$ 。故  $\lambda$  值一旦选定后,即可确定电机有效部分的尺寸  $D$  和  $l'$ 。比值  $\lambda$  较大的电机呈细长形,一般较经济,尤其对希望转动惯量较小的调速电机较合适,但其通风冷却条件往往相对较差,比值  $\lambda$  较小的电机呈粗短形,具有较长的端部绕组,通风冷却条件相对较好。 $\lambda$  值的选择往往参考实际同类电机的平均值。根据不同种类和不同用途,电机  $\lambda$  值的变化范围较大,通常为 0.5~4,甚至更大。

### (三) 电机输出功率的限制

随着电机单机容量的增长,单位功率的有效材料消耗降低,电机效率提高。提高发电机的单机容量有很大经济意义,大型设备的电力传动,也要求电动机单机容量愈来愈大。

大型同步发电机转动部件在运行中承受很大的离心力作用,转子圆周速度受现有材料的强度限制,单机容量受最大转子直径的限制,而单位体积容量的增加受到冷却条件或铁磁材料饱和的限制。随着冷却技术的发展,单机容量不断增长。采用超导体作励磁绕组能大大提高电机的磁负荷,是增加单位体积容量的一个重要途径。

直流电机单机容量的增加受到允许的电枢圆周速度及换向条件的限制。

异步电动机运行时要从电网吸取无功功率,大容量的电力驱动采用同步电动机更合理,因而目前生产的异步电动机最大功率约为几兆瓦。

## 三、电机绕组

### (一) 电机绕组分类

根据所起作用不同,绕组主要分两大类:一类是为了产生气隙主磁通的主极励磁绕组;另一类是与主磁通相对运动感生电动势的电枢绕组。异步电机的定子绕组兼起励磁绕组的作用,转子绕组则感生电动势与电流。直流电机除电枢绕组和励磁绕组外,为了改善换向,大都装有换向极绕组和补偿绕组;同步电机,为了防止振荡和改善某些性能,或因起动需要,一般装有阻尼绕组或起动绕组,但对于小型电机,这些绕组往往可以省略。

交流电机中的电枢或定子绕组,简称为交流绕组;直流电机中的电枢绕组,称为直流电枢绕组。

交流绕组有多种分类方法:按绕组布置分类有集中绕组及分布绕组;按相带分类,有 $120^\circ$ 、 $60^\circ$ 和 $30^\circ$ 相带绕组;按每极每相槽数 $q$ 分类,有整数槽绕组及分数槽绕组;按槽内线圈边层数分类,有单层绕组、双层绕组和单双层绕组;按线圈形状和端部连接方式分类,有叠绕组、波绕组以及同心式、链式、交叉式绕组;按绕组产生磁势波形分类,有正弦绕组和梯形绕组。

直流电枢绕组,一般按绕组元件与换向片之间连接规律不同而分为叠绕组、波绕组和蛙绕组。

### (二) 电机交流绕组

绕组的构成原则是:1) 在一定的导体数下,绕组的合成磁动势及电动势在空间波形分布上力求接近正弦波形,在数量上力求获得较大的基波磁动势和基波电动势,而且绕组的损耗要小,用铜量要省;2) 对多相绕组各相磁动势和电动势要对称,电阻和电抗要平衡。

交流绕组根据相数,有单相、两相、三相和六相等接线方法,大多采用三相,但在小功率电机中,单相采用较多。

常用的三相交流绕组型式有单层同心式、单层交叉式、单层链式、双层叠绕、双层波绕和单双层绕组。

单层绕组每槽放一个线圈边,它等效于全距分布绕组。单层同心式绕组由几何尺寸和节距不等的线圈连成同心形状的线圈组构成。单层交叉式绕组用于 $q$ 为奇数时,绕组由线圈个数和节距不等的两种线圈构成。单层链式绕组由形状、几何尺寸和节距相同的线圈连成。

双层绕组每槽分上下两层放两个线圈边。双层绕组所有线圈的形状、几何尺寸相同,端部排列整齐,可选择有利节距,以改善电动势和磁动势波形。双层绕组分叠绕组及波绕组。叠绕组线圈的合成节距 $Y_s = Y_1 - Y_2$ ,常取1;波绕组 $Y_s = Y_1 + Y_2 \approx 2(\tau$ 为极距)。线圈节距可分为整距( $Y_1 = \tau$ )、短距( $Y_1 < \tau$ )或长距( $Y_1 > \tau$ ),但一般不用长距线圈。

双层叠绕组广泛用于大、中、小型同步电机及异步电机的定子绕组。双层波绕组可减少线圈组之间的连接线,常用于多极数凸极同步电机,特别是水轮发电机的定子绕组及绕线转子异步电机的转子绕组。

单相交流绕组用于单相电机,一般由两个轴线在空间错开 $90^\circ$ (电角度)的绕组组成:一个称为工作绕组或主绕组,从电源输入功率,用以产生主磁场;另外一个称为起动绕组或辅助绕组。起动时,两个绕组磁动势在气隙中建立合成旋转磁动势,起动电动机。根据不同的运行特性要求,有些单相电机的主、辅绕组占总槽数的比例分别为 $2/3$ 和 $1/3$ ,有些单相电机则是两个绕组所占槽数相等。

单相绕组有单层、双层和正弦绕组等不同型式。单层绕组在小功率电机中使用较多,一般做成同心式绕组。双层绕组一般采用链式绕组,当采用节距为 $2\tau/3$ 时,可以消除绕组磁动势中的三次谐波,有利于起动。正弦绕组从线圈的形状来看,与单层同心式绕组相似。但定子每槽内导体数不等,其目的是使磁动势分布接近于正弦波形。

正弦绕组能显著地削弱高次谐波,从而改善电动机的运行性能,对控制电机,则可提高电气精度,但有些槽的槽满率较低,绕组因数较小,影响了铁心和绕组的利用率。为此,近年来出现了具有大小不同槽形的设计。

### (三) 绕组感应电动势及绕组因数

绕组每个线圈的感应电动势可按电磁感应定律求得,若每极磁通  $\Phi$  以频率  $f$  相对于匝数为  $N_c$  的线圈作周期性变化,则线圈的感应电动势平均值  $E/V$  为

$$E = 4fN_c\Phi \quad (5.1.2)$$

对交流电机,感应电动势按有效值计算,若绕组每相串联匝数为  $N$ ,并用绕组因数  $K_{dp}$  来考虑线圈分布和短距的影响,则绕组感应电动势  $E/V$  为

$$E = 4K_w\Phi NK_{dp} \quad (5.1.3)$$

式中  $K_w$ ——波形因数,若气隙磁场为正弦分布, $K_w = \pi(2\sqrt{2}) = 1.11$ 。

感应电动势的谐波分量为

$$E_v = 4.44f_v\Phi_vNK_{d_{pv}} \quad (5.1.4)$$

式中  $f_v$ 、 $\Phi_v$ 、 $K_{d_{pv}}$ ——对应于  $v$  次谐波的频率、磁通和绕组因数。

绕组因数  $K_{d_{pv}}$  是分布因数  $K_d$  和短距因数  $K_p$  的乘积,对于基波

$$K_{dp} = K_d K_p \quad (5.1.5)$$

对于  $v$  次谐波

$$K_{d_{pv}} = K_{dv} K_{pv} \quad (5.1.6)$$

对于整数槽绕组,分布因数可用下式表示:

$$K_d = \frac{\sin(\pi/2m)}{q \sin(\pi/2mq)} \quad (5.1.7)$$

$$K_{dv} = \frac{\sin(v\pi/2m)}{q \sin(v\pi/2mq)} \quad (5.1.8)$$

短距因数可用下式表示:

$$K_p = \sin(\beta\pi/2) \quad (5.1.9)$$

$$K_{pv} = \sin(v\beta\pi/2) \quad (5.1.10)$$

式中  $\beta$ ——绕组节距比,  $\beta = \frac{y}{\tau}$  ( $y$ ——节距,  $\tau$ ——极距,均以槽数计)。

### (四) 直流电枢绕组、短路绕组与磁极绕组

直流电枢绕组属于闭合绕组,通过换向器被正负电刷分成若干并联支路,并通过电刷与外电路相连。

直流电枢绕组可分为叠绕组和波绕组,以叠绕组为基础与波绕组复合还可组成蛙绕组。根据并联支路数的多少,直流电枢绕组又可分为单绕组和复绕组,如单波绕组、复波绕组等。

电枢绕组各对支路的对应元件在磁场中的位置都相同时,称为对称绕组。对称绕组的特点是:在磁极对称分布的情况下,各对支路的电动势都相等,而每对支路内部环路中的电动势之和等于零,因此,空载时绕组内部没有环流。

实际上,由于材料的不均匀性,以及各极下气隙的大小的偏差,使各极下的总磁通不等,引起各对支路内感应电动势之间彼此不平衡,引起环流而使电机性能恶化。为此,可将电枢绕组中电位相等的“等电位点”用均压线连接起来,以消除各对支路间的不平衡现象。

各种绕组的应用范围如下:单波绕组主要用于正常电压、电枢电流小于 700~1000A 的中小型直流电机中;单叠和复波绕组主要用于电枢电流大于 700~1000A、容量为几百千瓦的电机,两极电机一般都用单叠绕组,并联支路数为 2,不用均压线;复叠绕组并联支路较多,用于低电压、大电流的直流电机中;蛙绕组不需接均压线,其换向性能较好,但散热条件较差,按其基本绕组(叠绕组)确定适用范围。

异步电机的笼型转子绕组及同步电机的阻尼绕组一般自成闭合回路,统称为短路绕组。

异步电机笼型转子绕组由置于铁心槽中的导条及将导条短接的端环组成。导条形状有圆形、矩形、梯形、特殊形状以及双笼导条,主要根据电机起动性能的要求选定。常用的有铸铝笼及焊接铜(或铝)笼。随着变频技术的发展,特殊槽形和双笼导条日趋少用。

应该指出,为了避免谐波附加转矩和单向磁拉力,转子槽数的选择非常重要。同时为了改善起动性能和降低噪声,可采用导条偏斜 1~2 个定子槽距离的斜槽转子。

同步电机的阻尼绕组结构与异步电机笼型绕组结构相似。阻尼绕组可对负序电流起阻尼作用,并可抑制同步电机的振荡,提高电机运行的可靠性。对于同步电动机还可作为起动绕组使用。

主磁极绕组流过直流电流建立励磁磁场,它按所需的励磁磁动势设计。隐极同步电机的励磁绕组为同心式分布绕组,嵌在转子槽中,其励磁磁动势的波形为阶梯形波。凸极同步电机和直流电机的磁极绕组为安装在磁极铁心上的集中绕组,其磁动势的波形为矩形。

## 四、气隙磁场与磁路

### (一) 交流绕组磁动势

交流绕组建立的基波磁动势,在同步电机内是电枢反应磁动势,而在异步电机内,它的一个分量是产生空载气隙磁场的励磁磁动势,另一个分量用以补偿转子磁动势。

单相分布绕组中流过频率为  $f$  的交流电流时,产生一个在空间呈阶梯形分布、轴线相对于绕组固定不动、大小随时间交变的脉振磁动势,其脉振频率等于绕组中的电流频率。该脉振磁动势在空间的分布可分解为基波及一系列高次谐波,其表达式为

$$\begin{aligned} F(\theta, t) &= \frac{2\sqrt{2}}{\pi} \frac{N}{P} \left[ K_{dp} \cos p\theta + \sum_{\nu} \frac{1}{\nu} K_{d\nu} \cos \nu p\theta \right] \sin \omega t \\ &= \frac{\sqrt{2}}{\pi} \frac{NK_{dp}}{P} \left[ \sin(\omega t - p\theta) \right. \\ &\quad \left. + \sin(\omega t + p\theta) \right] + \sum_{\nu} \frac{\sqrt{2}}{\pi} \times \frac{NK_{d\nu}}{\nu P} \left[ \sin(\omega t - \nu p\theta) + \sin(\omega t + \nu p\theta) \right] \end{aligned} \quad (5.1.11)$$

式中  $N$ ——相绕组串联匝数;

$I$ ——相电流有效值;

$\theta$ ——距离相绕组轴线的空间角度;

$\nu$  及  $K_{d\nu}$ ——高次谐波的次数及其绕组因数;

$\omega$ ——电流角频率,  $\omega = 2\pi f$ 。

由式(5.1.11)可知,任何一次脉振磁动势都是由振幅相等、旋转方向相反的两个旋转磁动势波合成的。

对称三相绕组流过三相对称电流时,磁动势是三个在时间相位和空间相位都互相间隔  $120^\circ$  电角度的脉振磁动势合成磁动势。其空间分布是一个旋转阶梯,见图 5-1,以 A 相绕组轴线为坐标起轴,三相绕组合成磁动势表达式为

$$\begin{aligned} F(\theta, t) &= \frac{3\sqrt{2}}{\pi} \frac{NI}{P} \left[ K_{dp} \sin(\omega t - p\theta) - \frac{1}{5} \right. \\ &\quad \left. \times K_{d5} \sin(\omega t - 5p\theta) - \frac{1}{7} K_{d7} \times \sin(\omega t - 7p\theta) - \dots \right] \end{aligned} \quad (5.1.12)$$

由式(5.1.12)可知,合成基波磁动势是一个正弦分布、波幅恒定的旋转磁动势。电流在时间相位上变化的电角度数,等于磁动势在空间移过的电角度数,其转向由超前相滞后相的方向旋转。当某电流达最大值时,合成磁动势幅值就与该相绕组轴线重合。合成基波磁动势的极对数为  $p$ ,幅值为

$$F_1 = \frac{3\sqrt{2}NK_{dp}I}{\pi P} \quad (5.1.13)$$

其转速即为同步转速  $n_s$  (r/min)

$$n_s = \frac{60f}{P} \quad (5.1.14)$$

合成  $\nu$  次谐波磁动势的极对数为  $\nu p$ ,幅值为

$$F_\nu = \frac{3\sqrt{2}}{\pi} \frac{NK_{d\nu}I}{\nu P} \quad (5.1.15)$$

其同步转速为



$$n_{sv} = \frac{60f}{\nu p} = \frac{n_s}{\nu} \tag{5.1.16}$$

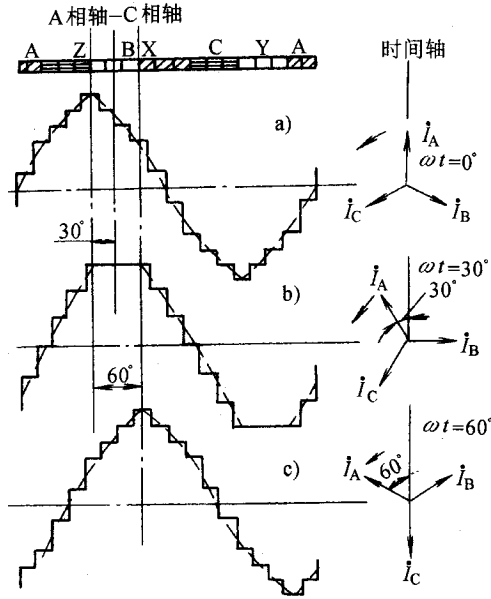


图 5-1 三合成磁动势在三个瞬时的空间分布波形

对于不同的三相绕组,其所含谐波磁动势的次数见表 5-4。

表 5-4 三相绕组谐波磁动势次数

相带	谐波次数 <sup>①</sup>	特点
120°	$\nu = 3k + 1$	存在奇次及偶次谐波
60°相带整数槽	$\nu = 6k + 1$	存在 5 次及以上的奇次谐波
60°相带分数槽 $q = b + \frac{c}{d}$	$d$ 奇数时 $\nu = \frac{1}{d}(6k + 1)$ $d$ 偶数时 $\nu = \frac{2}{d}(3k + 1)$	存在奇次、偶次及分数次谐波
30°相带	$\nu = 12k + 1$ <sup>②</sup>	存在 11 次及以上的奇次谐波

①  $k = \pm 1, \pm 2, \pm 3, \dots$

② 要求星-三角混合联结法的星形联结部分和三角形联结部分的合成磁动势相等,空间互差 30°电角度。

## (二) 电机空载气隙磁场

在直流电机和同步电机中,由磁极绕组的直流励磁动势建立;而在异步电机中,则由定子绕组的交流磁动势建立。

直流电机主极极弧形状大致有:1) 均匀气隙; 2) 偏心气隙(极弧与电枢外圆不同心,使气隙从主极中心向

极尖处逐渐增大)3)极尖削角的均匀气隙(气隙从极弧两端约1/6长度处至极尖逐渐增大)。后两种极弧形状可削弱由电枢反应所引起的气隙磁场畸变。

凸极同步电机的磁极极弧形状大致有两种:1)沿极弧范围内气隙是变化的,得到接近正弦波形的磁场分布,要求气隙按照  $\delta(x) = \delta / \cos\left(\frac{\pi}{\tau}\right)$  ( $\delta$  为磁极中心处气隙长度)变化;2)气隙均匀,得到近似的矩形磁场分布。

在异步电机中,气隙是均匀的,当铁心不饱和时,气隙磁场沿定子内圆的分布与每极下的励磁磁动势的分布波形基本一致,近似为正弦形。但在实际电机中,铁心有些饱和,因此,每极下的磁场分布呈平顶波形。

### (三)电机磁路计算原理

磁路计算是按给定的电机端电压求得所需的每极主磁通,进而求取磁路各部分磁通密度和磁位降,计算所需的磁动势、励磁电流以及空载特性。

磁路计算方法的依据是全电流定律  $F = \oint H \cdot dl$ ,即所需的总磁动势可由磁场强度的线积分求得,通常取沿磁通密度最大的路径作为积分回路。实际计算是通过求各段磁路,例如气隙、齿、轭、极身等部位磁位降的总和  $2H_x l_x$ 。代替积分,求得总磁动势。图5-2表示一凸极同步电机的磁路,其磁路可分为下列5段:空气隙、定子齿、定子轭、磁极、转子轭。由于电机磁路中磁通变化频率一般不高,计算时都按似稳场处理。

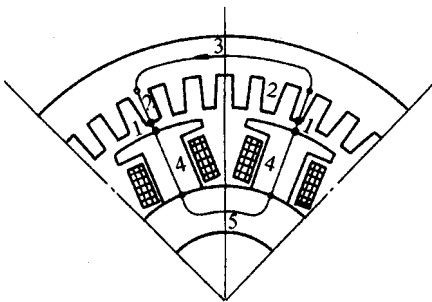


图5-2 凸极同步电机的磁路

每极磁路中,空气隙的磁位降通常占较大的比例(约占60%~80%或以上)。

## 五、电感与电抗

### (一)电机绕组主电抗与漏电抗

多相交流绕组的每相主电抗  $X_m/\Omega$  由下式计算:

$$X_m = \frac{4f\mu_0 n^2 N K_{dp} \tau l'}{\pi p K'_s \delta'}$$

式中  $K_s$ ——电机磁路总磁位降与气隙磁位降之比。

对异步电机,主电抗即为励磁电抗;对同步电机,主电抗为电枢反应电抗,其中隐极电机  $x_a = x_m$ ,而对凸极电机,应分解为直轴及交轴电枢反应电抗  $x_{ad}$  及  $x_{aq}$ 。

如果以  $U_N/I_N$  为基准,主电抗的标么值为

$$x_m = \frac{\sqrt{2}\mu_0 k_{dp} \tau}{\pi k'_s \delta'} \cdot \frac{A}{B_\delta}$$

漏磁通是绕组所产生总磁通的一部分,也能在绕组中感生电动势,该电动势频率与产生该磁通的电流频率相同,并通常用漏抗压降表示,因而每一漏抗都与某一部分漏磁通相对应。漏磁通不参与能量转换,相应的漏抗有槽、端部、齿冠漏抗和谐波漏抗。漏抗  $X_a/\Omega$  可用下式计算:

$$x_\sigma = 4\pi f \mu_0 \frac{N^2}{qp} l' \sum \lambda$$

式中  $\sum \lambda$ ——单位铁心有效长度的各部分比漏磁导之和,其中 $\lambda$ 的计算见参考文献[2]。

以  $U_N/I_N$  为基准值的漏电抗标么值为

$$x_{\sigma}^* = \frac{\sqrt{2}\pi\mu_0 A}{K_{dp}mq B_{\delta}} \sum \lambda$$

漏电抗与  $A/B_{\delta}$  成正比。正确选择电磁负荷和通过调整电磁负荷的比值来使漏电抗值符合性能要求。例如,增加绕组匝数  $N$ ,使  $A$  增大而使  $B_{\delta}$  降低,则漏电抗将增大;反之减少匝数,漏电抗将减小。另外改变各部分漏磁导  $\sum \lambda$  也可改变漏电抗的大小。

## (二) 机电电抗对电机运行性能的影响

电抗对交流电机稳态运行性能的影响见表 5-5。直流电机电枢绕组漏磁通因换向过程中电流的变化而变化,在换向元件中感生电抗电动势,它阻止换向电流变化,对换向不利。与该漏磁通相应的漏磁导减小,则电抗电动势越小,能改善换向。

表 5-5 电抗对交流电机稳态运行性能的影响

电抗	影响的参量或性能	影响情况
同步电抗 $X_d = X_{ad} + X_o$ (对同步电机)	短路比 $K_c$ 与静过载系数 $K_M$	$K_M \propto K_c \propto 1/X_d$ 越小,静态运行稳定性越高
	电压变化率	$X_d$ 越小,电压变化率越小
	线路充电容量	$X_d$ 越小,允许的线路充电容量越大
	稳态短路电流	$X_d$ 越小,稳态短路电流越大
漏电抗 $X_{\sigma}$ (对异步电机)	过载能力(最大转矩 $T_{max}$ )	$T_{max} \propto 1/X_{\sigma}$ ,故 $X_{\sigma}$ 越小,过载能力越大
	起动性能(起动转矩 $T_{st}$ 及起动电流 $I_{st}$ )	$T_{st} \propto 1/X_{\sigma}$ ,故 $X_{\sigma}$ 越小,起动转矩越大,但起动电流也越大
	功率因数	$X_{\sigma}$ 不功率因数般较高 <sup>①</sup>

① 若调整电磁负荷比值使  $X_o$  减小,这时  $X$  也减小,使励磁电流增大,则功率因数有可能降低。

## 六、损耗

### (一) 电机基本铁耗

在铁心中主磁通交变引起磁滞及涡流损耗  $P_{Fe}/W$ ,常按下式计算:

$$P_{Fe} = KP_{1/50} B^2 \left( \frac{f}{50} \right)^{1.3} G_{Fe}$$

式中  $K$ ——考虑铁心加工、磁通密度分布不均匀等因素使铁损耗增加的修正系数;

$P_{1/50}$ ——频率为 50Hz 磁通密度为 1T 时铁心材料(硅钢片)的单位损耗(W/kg);

$B$ ——铁心磁通密度(T);

$f$ ——磁通交变频率(Hz);

$G_{Fe}$ ——铁心质量(kg)。

应分别计算定子或电枢铁心的齿、轭部铁损耗,然后相加。正常运行时,同步电机的磁极极身主磁通不变,异步电机转子内的磁通变化频率很低,基本铁损耗均可忽略。

## (二)电机绕组电阻损耗

绕组电阻损耗是电流流过绕组电阻所产生的  $I^2R$  损耗(铜损耗)。按国家标准规定计算损耗时,绕组电阻应折算到与绕组绝缘等级相对应的基准工作温度。

对多相交流电机,应为各相绕组损耗之和,其电阻为直流电阻值;对直流电机,除电枢绕组的电阻损耗外,还应包括与之串联的换向极绕组及补偿绕组的电阻损耗。

对带励磁绕组的同步电机或直流电机,应计入励磁绕组的损耗。

若电机有电刷与集电环或换向器时,还应计算电刷接触损耗。

## (三)电机杂散损耗

由定、转子绕组中电流产生的漏磁场及高次谐波磁场,以及由气隙磁导变化产生的气隙磁场变化而引起的损耗称为杂散损耗。

杂散损耗,按产生损耗有效部位,分为杂散铁损耗和杂散铜损耗;按产生时的工作状况,可分为空载和负载杂散损耗。空载杂散损耗基本上是杂散铁损耗,常与基本铁损耗一起包括在空载铁损耗中。

杂散铁损耗主要为表面损耗和脉振损耗。空载杂散铁损耗是因定子(或转子)开槽导致磁导变化引起气隙磁通脉动,在转子(定子)表面上所产生的表面损耗和进入齿中磁通脉振所产生的脉振损耗。负载杂散铁损耗主要是由定子(或转子)负载电流所引起的磁动势谐波磁通,在转子(或定子)上产生的表面损耗和脉振损耗,还有由端部漏磁在金属构件中产生的涡流损耗和斜槽笼型转子导条间横向电流在叠片铁心中引起的损耗。

杂散铜损耗包括由槽漏磁通引起导体中电流集肤效应使绕组电阻值增大,以及导体由多股线并联时,因各股线所处位置不同,感生的漏磁电动势不同,以致在股线间产生环流而引起的损耗。对异步电机,还包括由定子谐波磁通在转子绕组中感生的谐波电流所产生的损耗,以及斜槽笼型转子因流动于导条间的横向电流而在导条中所产生的损耗。

应该指出,影响杂散损耗的因素较多,很难正确计算,其测试也不易精确,往往是通过测定总损耗,然后从中减去所测定的各基本损耗之和来确定。

## (四)电机风摩损耗

风扇及通风系统损耗取决于风扇的型式及尺寸、通风系统结构以及冷却介质密度等。电机转子表面与冷却介质的摩擦损耗取决于转子直径、长度及圆周速度,约与转子直径的五次方、转速的三次方成正比。轴承损耗取决于轴承型式、承受的比压力、轴颈圆周速度及润滑情况。电刷摩擦损耗取决于电刷的形式、比压力、接触面积、集电环或换向器的圆周速度。风摩损耗一般情况下为上述各损耗之和。

# 七、结构设计

## (一)电机定子机座

按安装结构型式可分为卧式和立式两种,从国家标准 GB997《电机结构及安装型式代号》中可看出电机各种安装结构型式。

对电机机座有以下基本要求:

1. 机座应具有足够的强度和刚度,使其在加工、运输、起吊、分瓣放置和运行中能承受各种机械作用力、

电磁力而不致产生有害变形。通常具有足够刚度的机座,也能满足强度要求。

2. 机座应便于加工、运输、安装和检修。
3. 机座内圆空间应得到充分利用,并应满足通风冷却的要求,直流电机机座还应满足磁路要求。
4. 机座的中心高和底脚安装尺寸应符合有关标准和技术条件的规定。
5. 大型两极汽轮发电机铁心振动的双倍振幅如达到或超过  $30 \sim 40/\mu\text{m}$  时,应采用隔振措施。氢冷汽轮发电机的机座应满足密封和氢爆安全的要求。
6. 大型水轮发电机的机座应能适应铁心热膨胀的要求,刚度应满足运输、吊装要求。
7. 微特电机的机座除应具有足够的强度外,还应能承受潮湿、盐雾、霉菌、温度骤变、强冲击等严酷环境条件的影响。其材料的热膨胀系数应与定子铁心的接近。

## (二)电机定子受力分析及变形

电机运行时定子铁心承受切向力及径向力,并传递到机座,同时承受自身的重量,机座的变形影响电机气隙均匀度,因此机座应有足够的刚度。对气隙较大的一般同步电机和直流电机,机座小量变形是允许的,可不进行精确计算。对于异步电机和功率较大的卧式同步电机以及直流电机,应计算机座变形量,机座最大变形量一般不应超过气隙长度的  $1/10$ 。

中、大型电机应计算定子的固有振动频率,以避免气隙谐波磁场产生的径向力频率接近而产生共振。

## (三)电机定子绕组受力分析

定子槽部绕组承受两倍电流频率的交变电磁力,其大小正比于上、下层线圈边电流的乘积以及槽内线圈边的长度。当同槽的两线圈边电流方向相同时,电磁力将使两线圈边向槽底挤压;当两线圈边电流方向相反时,电磁力将上层线圈边压向槽楔,下层线圈边压向槽底。该电磁力使槽部绕组周期性振动,特别在发电机电线端短路及电动机转子堵转时更为严重。因此,必须使导体与绝缘形成坚固的整体,防止出现事故时因绕组受力产生有害变形而损伤绝缘,以及在正常运行时避免由于振动导致槽楔松动和绝缘磨损。

绕组端部磁场与流过线圈端部的电流相互作用产生电磁力,线圈端部某单元承受的力与流过该单元的电流量、单元长度及该单元处磁密成正比。短路时绕组端部承受非常大的应力,应注意绑扎牢靠或用端箍、支架固定。

## (四)电机转轴

是电机转动部分的关键部件。它要传递转矩,承受转子全部重力和单边磁拉力,还要承受弯矩、轴向推力和扭振时所产生的交变力矩等。因此,转轴必须满足下列基本要求:

1. 有足够的强度,能承受运行中可能遇到的各种负载而不致产生残余变形和疲劳破坏。
2. 有足够的刚度。通常转轴的最大挠度不超过单边气隙的  $5\% \sim 10\%$ 。防止定、转子偏心引起不平衡磁拉力,进一步增大偏心值而产生振动或定、转子相擦。
3. 转轴的临界转速至少应离开电机额定转速的  $20\%$ 。变速电机应工作在第一临界转速之下,汽轮发电机和高速大容量异步电机则常工作在第一和第二临界转速之间,也有工作在第二和第三临界转速之间的。
4. 大型电机和承受周期性脉振转矩的电机(如柴油发电机)的轴系,必须使其扭振固有频率离开交变转矩频率。特别是交流变频调速的电机,因其频率随转速和负载变化,应综合考虑这一问题。

中小型电机轴的材料,常用 35、40、45 号钢,大型电机的轴常用 45 号钢或合金钢,并且轴的材料一般都应经热处理,以提高材料的机械强度和韧性。有些微型控制电机的轴用不导磁的不锈钢制成。

转轴常用结构钢的力学性能见表 5-6。

表 5-6 转轴常用结构钢的力学性能

钢种	热处理方式	截面直径 /mm	抗拉强度 $\sigma_b$ ( $N/mm^2$ )	屈服点 $\sigma_s$ ( $N/mm^2$ )	冲击韧度 $ak$ ( $J/cm^2$ )	伸长率 $\alpha$ (%)		断面收缩率 (%)	
						锻造比			
						< 5	$\geq 5$	< 5	$\geq 5$
30	正火	$\leq 100$	450	235	29	14	12	38	29
		101 ~ 300	440	225	29	14	12	37	28
		301 ~ 500	430	215	29	14	12	32	24
		501 ~ 750	420	205	25	13	11	28	21
35	正火	$\leq 100$	480	254	29	14	12	34	26
		101 ~ 300	470	245	25	14	12	32	24
		301 ~ 500	450	225	25	13	11	30	22
		501 ~ 750	430	215	20	12	10	26	19
		751 ~ 1000	410	205	20	11	9	24	17
40	正火	$\leq 100$	560	284	25	11	9	30	23
		101 ~ 300	540	274	20	11	9	28	21
		301 ~ 500	520	260	20	11	9	26	19
		501 ~ 750	500	254	15	10	9	24	18
		751 ~ 1000	450	245	15	11	9	22	16
45	正火	$\leq 100$	560	284	25	11	9	30	23
		101 ~ 300	540	274	20	11	9	28	21
		301 ~ 500	520	260	20	11	9	26	19
		501 ~ 750	500	254	15	10	8	24	18
		751 ~ 1000	480	245	15	9	7	22	16
20SiMn	回火	—	450	225	20	—	14	—	22

## 第二节 三相异步电机安装与维护

### 一、异步电动机安装前的检查及干燥处理

#### (一) 电动机的一般检查

对于容量在 40kW 及以上电动机应进行解体抽芯检查,即将电机转子从定子内抽出进行检查。其检查主要内容如下:

1. 检查定子槽楔有无断裂, 定子绕组绝缘是否符合标准要求;
2. 检查转子铁芯、轴颈、滑环、电刷等是否清洁, 有无伤痕和锈蚀现象。绕线式转子绕组的绝缘是否符合绝缘标准, 绑线是否牢靠, 应无松弛现象。鼠笼式转子导条和短路端环有无断裂, 是否连接良好等;
3. 冷却风扇应紧固、无裂痕, 与风扇壳罩应无撞击等;
4. 对于同步电机和直流电机, 还应检查磁极磁轭是否固定良好, 励磁绕组在磁极上应不松动。

同时, 用压力小于 2 个大气压的清洁、干燥和无油渍的压缩空气将电机内、外吹干净, 再用干净砂布擦拭一遍。

在进行电机解体抽芯检查之前, 还需做转动检查、轴承检查和气隙检查等。所谓转动检查就是在电动机转子尚未与所驱动的工作机械连接时, 用手转动转子进行检查。用手可轻松自如地转动转子, 应无卡阻现象, 不应有机械摩擦碰击声和其他异常声响。

轴承检查就是将轴承内的润滑油先用煤油或其他清洁剂冲洗干净, 轴承滚珠(柱)表面应光滑, 无裂纹和锈蚀斑点。轴承内套不应在轴上滑动松脱, 轴承外套应均匀地压住滚动轴承的外圈上, 应无歪扭现象。轴承外套与滚动轴承应有不大于 0.1mm 的间隙。如果发现轴承锈蚀, 磨损严重, 则应采用专用拆卸轴承的工具进行更换。安装轴承多采用“热套法”, 即将轴承浸入 80~90℃ 的变压器油内 30min, 再将轴承的钢印牌号朝外进行热套。轴承安装完毕, 再用变压器油清洗干净后, 在轴承内加入内空间约 2/3 的润滑油即可。

气隙检查即用塞尺检测电机定、转子间的气隙是否符合规定要求, 定转子间上、下、左、右的气隙不均匀度  $\delta_{\text{xd}}$  是否在允许范围之内。凸极电机应在各磁极下测定, 隐极电机则为“四点”测定, 即在电机定、转子一侧或两侧各测量四次, 每次测量后转过 90° 再进行下次测量。对直流电机磁场极下的气隙不均匀度  $\delta_{\text{xd}}$  的要求是, 当气隙  $\delta < 3\text{mm}$  时,  $\delta \leq 20\%$ ;  $\delta \geq 30\%$  时,  $\delta \leq 10\%$ 。交流电机的气隙不均匀度则不能超过表 5-7 的规定值。

表 5-7 异步电动机气隙不均匀度  $\delta_{\text{xd}}$  的最大允许值

气隙公称值( mm )	不均匀度( % )	气隙公称值( m )	不均匀度( % )
0.25	25.5	0.70	18.5
0.30	24.5	0.75	18.0
0.35	23.5	0.80	17.5
0.40	23.0	0.85	17.0
0.45	22.0	0.90	16.0
0.50	21.5	0.95	15.5
0.55	20.5	1.00	15.0
0.60	19.7	> 1	10.0
0.65	19.0		

气隙不均匀度定义为

$$\delta_{\text{xd}} = \frac{\delta_{\text{max}} - \delta_{\text{min}}}{\delta_{\text{pj}}} \times 100\% \quad (5.2.1)$$

式中  $\delta_{\text{max}}$  —— 测量四点气隙中的最大值, mm;

$\delta_{\text{min}}$  —— 测量四点气隙中的最小值, mm;

$\delta_{\text{pj}}$  —— 测量四点气隙的平均值, mm。设四点所测气隙大小分别为  $\delta_1$ 、 $\delta_2$ 、 $\delta_3$  和  $\delta_4$ , 则  $\delta_{\text{pj}} = (\delta_1 + \delta_2 + \delta_3 + \delta_4) / 4$

如果所测量的气隙不均匀度超过不均匀度最大允许值, 则应在解体抽芯检查后的回装过程中加以调整。

如所安装的电动机功率不超过 40kW,可不用抽出转子检查,而只需做一般检查即可,其主要检查内容为:

1. 检查电动机外壳有无损伤,防锈漆是否有脱落之处,如防锈漆脱落应及时补漆;
2. 风扇壳罩、风扇叶片是否完好,有无摩擦碰撞,转子的转动是否灵活自如,轴向窜动是否超过规定范围;
3. 检查电动机的型号、功率、电压等是否与设计图纸相符;
4. 测量电动机的绝缘电阻应大于或等于规范要求的最低电阻值。

## (二)电动机的干燥处理

电动机长期存放而不通电运行,很易受潮而使绝缘强度降低,因此,在安装电动机之前,应选用合适的兆欧表测量电动机的各相绕组之间以及各相绕组与机壳之间的绝缘电阻。

在实际测量中,应根据被测电机的额定电压和绝缘电阻的大致范围选用兆欧表。一般 1000V 以下电机,选用 500~1000V,量程为 0~250MΩ 的兆欧表,常温下所测得的绝缘电阻值均应在 0.5MΩ 以上为合格;而 1000V 及以上的电动机,其定子绕组选用 2500V,量程为 0~2500MΩ 的兆欧表测量绝缘电阻,在运行温度时所测得的绝缘电阻应不低于 1MΩ/kV,转子绕组则选用 500~1000V,量程为 0~250MΩ 的兆欧表测量,转子绕组的绝缘电阻应不低于 0.5MΩ/kV。如果所测得的绝缘电阻低于上述数值时,应对电动机进行干燥处理。

电动机的干燥处理方法很多,下面介绍其中两种常用干燥处理方法。

### 1. 铁损法

所谓铁损法,就是利用在电机定子铁芯或机壳上临时缠绕线圈,并通以交流电流,在铁芯机壳内产生交变磁场,并感生出涡流,从而使铁芯机壳温度升高,达到电机干燥的目的。对于小型电机,可把转子从定子内抽出,在定子上缠绕数匝线圈;对于大中型电机,可直接在机壳上缠绕数匝线圈进行干燥处理,如图 5-3 所示。

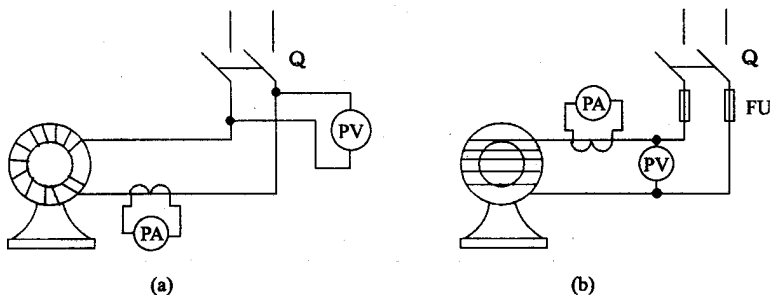


图 5-3 电机铁损法干燥处理线路图

(a) 抽出转子 (b) 带转子

铁损干燥线圈匝数可按下列公式计算

$$W = \frac{45V}{SB} \times 10^{-5} \text{ (匝)} \quad (5.2.2)$$

式中  $W$ ——铁损干燥线圈匝数,匝;

$V$ ——交流电源电压,一般可用 220V 或 380V 电压;

$B$ ——磁通密度  $\mu$ (特斯拉),一般可取  $B = 0.7 \sim 0.9T$ ;

$S$ ——定子铁芯的有效截面积  $m^2$ 。 $S = kL_1 h_1$ ,其中  $k$  为铁芯填充系数,取  $k = 0.9 \sim 0.95$ ;  $L_1$  为定子的有效铁芯长度  $m$ ;  $h_1$  为定子的有效铁芯厚度  $m$ 。

铁损干燥线圈中通过的励磁电流可按下列公式计算:

$$I = \frac{\pi D_1 A_w}{W} \quad (5.2.3)$$

式中  $I_1$ ——铁损线圈电流  $A$ ;

$D$ ——定子铁芯的平均直径  $m$ ;

$A_w$ ——电机铁损干燥时,铁芯单位长度所需安匝数,见表 5-8。



表 5-8 电机干燥时  $A_w$  的选择范围

$B(T)$	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9
$A_w$ (安匝/m)	70 ~ 85	100 ~ 120	130 ~ 145	170 ~ 200	215 ~ 280

例题 一台 Y280M-4 型异步电动机,  $P_N = 90\text{kW}$ ,  $n_N = 1480\text{r/min}$ ,  $\eta_N = 93.9\%$ ,  $\cos\phi = 0.89$ 。现要进行铁损干燥处理, 试计算铁损线圈匝数, 并选择合适的导线。

解 由《实用中小电机手册》中查得 Y280M-4 型三相异步电动机的定子铁芯长度 325mm, 定子外径 445mm, 内径 300mm。如取铁芯填充系数  $k = 0.9$ , 则定子铁芯的有效截面积为:

$$S = kL_1 h_1 = 0.9 \times 0.325 \times Q \frac{0.445 - 0.3}{2} = 0.0212\text{m}^2$$

铁损干燥电源电压取 380V, 铁芯磁通密度取  $B = 0.7\text{T}$ , 由式(5.2.2)求得所需线圈匝数为:

$$W = \frac{45V}{SB} \times 10^{-5} = \frac{45 \times 380}{0.0212 \times 0.7} \times 10^{-5} = 11.5 \text{ 匝}$$

取  $W = 12 \text{ 匝}$

当取  $B = 0.7\text{T}$  时, 由表 4-8 查得  $A_w = 145 \text{ 安匝/m}$ , 则由式(5.2.3)求得线圈通过的励磁电流为:

$$I = \frac{\pi D_1 A_w}{W} = \frac{314 \times \frac{0.445 + 0.30}{2} \times 145}{12} = 14.13\text{A}$$

一般可采用 BX 或 BV 型导线, 并按允许载流量的 60 ~ 70% 来选用导线截面。故选用 BV-500 型, 截面  $2.5\text{mm}^2$ , 允许载流量为 29A, 即  $29 \times 60\% = 17.4\text{A}$ , 符合要求。

## 2. 铜损法

铜损法是直接将交流电流或直流电流通入电机绕组, 通过电机绕组本身发热达到电机干燥的目的。铜损法包括交流干燥法和直流干燥法两种。

1) 交流干燥法。对于鼠笼式三相异步电动机, 可在电动机定子绕组中通入较低的三相交流电流。例如, 3 ~ 6kV 电动机可接入 380V 三相电源, 使电动机空载缓慢旋转; 也可将电动机堵转, 即使电动机处于短路运行状态, 但应使定子电流不超过 (50 ~ 70)% 的额定电流。每隔 2h 应暂时切断电源, 并将转子旋转 180°, 以防其轴长时间受热不均匀而弯曲。这样, 干燥一段时间后再松开转子, 使其空载缓慢旋转, 以散热除潮。然后再将电动机堵转, 如此反复干燥处理, 使电机满足绝缘强度的要求。

对于绕线式异步电动机, 应通过电刷将转子三相绕组的三端短接后, 再采用上述方法对电机进行干燥处理。

2) 直流干燥法。在电动机绕组中通入直流电流, 这种方法适用于带有轴承和通风孔较大的交流电动机的干燥处理。可将是电动机的定子(绕线式电动机还应包括转子)三相绕组串联或并联后, 再通入直流电, 但应注意不应使电流超过其额定电流。

对于严重受潮的电动机不宜采用直流干燥法, 因为直流电对于严重受潮的绕组有一定的电解作用。

## 二、电动机的机体安装技术

中小型电动机一般与工作机械配套整体安装, 用螺栓安装在金属底板或导轨上, 也有些电动机直接安装在混凝土基础上, 用预埋的底脚螺栓固定电动机, 其就位、找平、连接传动轮等工作均在混凝土基础上进行。

### (一) 混凝土基础

钢筋混凝土基础的平面尺寸一般按金属底板或电动机的机座尺寸外加 100mm 左右, 基础深度可按底脚螺栓长度的 1.5 ~ 2 倍选取, 但应大于当地土壤的冻土层厚度。在易受振动的地方, 基础还应做成锯齿状, 以

增加抗振性能。

## (二) 底脚螺栓的埋设

应先将底脚螺栓的埋设端加工成弯钩状。在制作基础时,按金属底板或电动机的机座安装孔尺寸,在基础上预留埋设度脚螺栓的孔洞,孔洞应较底脚螺栓弯钩适当加大一些。待基础凝固拆模后,再将底脚螺栓按金属底板或电动机的机座安装孔尺寸安放在基础孔眼内,并用 1:1 水泥砂浆埋设。待彻底凝固后,即可安装机组或电动机。

## (三) 机组或电动机的安装

用起重机械或人工将机组的金属底板或电动机在基础上安装就位,并用水准仪或水平尺进行纵向、横向水平校正,用 0.5~5mm 厚的钢垫片找平。然后再用水泥砂浆二次浇筑,将安装面缝隙填实,抹平基础平面,同时用底脚螺栓将底板及电动机紧固。

## (四) 电动机传动装置的调整

在电动机与被驱动的生产机械通过传动装置连接之前,必须对传动装置进行精细的调整,才能保证电动机和被驱动生产机械的安全运行。常用的传动装置有皮带传动装置、联轴器传动装置和齿轮传动装置等三种,其调整方法分别介绍如下:

1. 皮带传动装置的调整。在进行皮带传动装置调整时,应使电动机的皮带轮轴与被驱动机械的皮带轮轴相平行,其二者轮面中心线应在同一条直线上。在调整时,先在两轮面上用色笔画出中心圆周线,如图 5-4 所示的皮带轮中心圆周线 1、2 和 3、4,然后用一条细绳绳校验。如果两轮面中心圆周线均与绳线重合,则表明两皮带轮轴平行,否则应进行调整,直到轴面中心圆周线与绳线完全重合时为止。

2. 联轴器传动装置的调整。联轴器俗称“靠背轮”,当电动机与被驱动机械采用联轴器联接时,必须使两轴的轴线在同一条直线上,以保证电动机和被传动机械平稳安全运行。否则,将会产生很大振动和噪声,甚至会使传动装置及设备损坏。

在调整联轴器传动装置时,常用的方法是先在联轴器的主动轴轮上装设找中心卡子,如图 5-5 所示,并在主动轮和被动轮之间穿 1~2 个联轴螺栓(不用拧紧),以使两轮能同时转动,有相对固定的位置。然后将被动轮按圆周划分为 4 等份,用色笔画上记号,用千分表或塞尺在轮面上的 4 个测试位置分别进行径向和轴向测量,两轮面圆周间的安装公差,即径向测试点的间隙  $a$  一般在 1~2mm 以内为宜。两轮端面间的间隙,即轴向测试点的间隙  $b$ ,应与相应的径向测试点的间隙  $a$  基本相同,否则应作适当调整。

测试出各点间隙尺寸后,可用下式分别计算两轮上、下、左、右径向圆周间隙偏差  $a_{13}$  和  $a_{24}$ ,即

$$a_{ij} = \left[ \sum_{k=1}^4 (a_{ij} - a_{jk}) \right] / 4 \quad (5.2.4)$$

用下式分别计算两轮上、下、左、右轴向端面间隙偏差  $b_{13}$  和  $b_{24}$ ,即

$$b_{ij} = \left[ \sum_{k=1}^4 (b_{ij} - b_{jk}) \right] / 4 \quad (5.2.5)$$

以上两式中  $i$ ——为联轴器轮的上方“1”、左方“2”测试位置点;

$j$ ——为联轴器轮的下方“3”、右方“4”测试位置点;

$k$ ——某一测试位置点的间隙测量次数,  $k=1, 2, 3, 4$ , 表示对于某一测试位置点的轮面径向间隙或两轮端面间隙要分别测量 4 次,每次均转过  $90^\circ$ 。

所计算联轴器两轮径向圆周间隙偏差和轴向端面间隙偏差不应超过表 5-9 所规定的允许偏差值,如果超过应加以适当调整。例如左右偏差过大,可轻轻调整电动机座位置;上下偏差过大时,则可用垫铁片慢慢调整。当间隙偏差满足要求后,将联轴器上的全部联轴螺栓穿好并拧紧,把电动机及被驱动的生产机械的固定螺栓再紧固一遍。然后再重新用上述方法测试一次,经检查校验合格后即可交付使用。

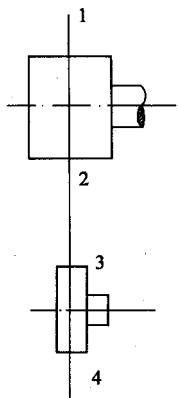


图 5-4 皮带轮轴平行的调整校验

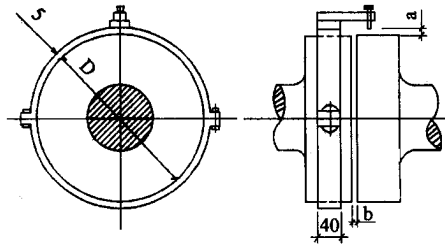


图 5-5 在联轴器主动轮上装设找中心线卡子示意图

表 5-9 联轴器两轮径向园周、轴向端面的间隙允许偏差值

轴的转速 (r/min)	固定式 (mm)	非固定式 (mm)
3000	≤0.04	≤0.06
< 1500	≤0.06	≤0.08
< 750	≤0.08	≤0.10
< 500	≤0.10	≤0.15

### 3. 齿轮传动装置的调整

当电动机通过齿轮与被驱动的生产机械联接时,对于渐开线直齿圆柱齿轮来说,与皮带传动装置的调整相似,也必须使主、从两齿轮轴相互平行,并按公差要求保证微小的齿侧间隙(即齿间距略大于齿厚)。两齿轮间的齿侧间隙的大小可通过塞尺进行检查,当各齿侧间隙适当、均匀时,则说明两齿轮轴已平行。通常还可用颜色印迹法来检查主、从齿轮是否啮合良好,其轮齿的接触部分一般应不小于齿厚的  $2/3$ 。

所谓齿轮的齿厚,见图 5-6,是指以直径为  $d_0$  的分度圆弧所截取的齿厚,齿厚与齿距二者相等,可用下式表示:

$$S_0 = W_0 = t/2 \quad (5.2.6)$$

$$t = \pi d_0 / z \quad (5.2.7)$$

上式中  $S_0$ ——齿轮的齿厚, mm;  
 $W_0$ ——齿轮的齿距, mm;  
 $t$ ——分度圆上的周节, mm;  
 $d_0$ ——分度圆直径, mm;  
 $z$ ——齿轮的齿数。

显然,周节  $t$  反应了齿轮的大小。由式 (5.2.7) 得

$$m = t/\pi = d_0/z \quad (5.2.8)$$

式中  $m$ ——齿轮模数,反应齿轮的大小。

则由式 (5.2.8) 可知,分度圆直径与模数的关系为  $d_0 = m z_0$ 。如果所安装的主、从两齿轮分度圆相切,即一齿轮的齿厚塞满另一齿轮的齿距,其两齿轮轴中心距为:

$$L = (d_{01} + d_{02})/2 = m(z_1 + z_2)/2 \quad (5.2.9)$$

式中  $L$ ——两齿轮轴中心距, mm;  
 $d_{01}$ 、 $d_{02}$ ——分别为主、从齿轮的分度圆直径, mm;  
 $z_1$ 、 $z_2$ ——分别为主、从齿轮的齿数。

显而易见,为了避免由于温度升高等原因而发生轮齿卡滞现象,如上所述,在安装调整齿轮传动装置时,应保证有合适的微小齿侧间隙。

对于模数  $m$  相等、压力角  $\alpha$  相同的渐开线齿轮的传动比为:

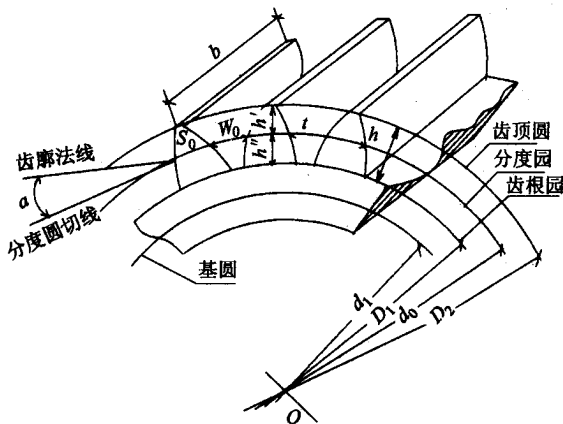


图 5-6 渐开线直齿圆柱齿轮各部分名称、符号

$$i_{12} = \frac{\omega_1}{\omega_2} = \frac{d_{02}}{d_{01}} = \frac{z_1}{z_2} \quad (5.2.10)$$

式中  $i_{12}$ ——齿轮传动比；

$\omega_1$ 、 $\omega_2$ ——分别为主、从齿轮的角速度  $\text{rad/s}$ 。

渐开线齿轮的正确啮合条件是齿轮分度圆上的模数及压力角都分别相等，这也是在安装调整齿轮传动装置时进行互换齿轮的必要条件。

### 三、电动机的电气安装及调试

电动机的电气部分安装主要是定子三相绕组与电源的连接和机壳的保护接地等。三相异步电动机定子绕组的接线有星形联接 (Y) 和三角形联接 (D) 两种接法。在电动机接入电源之前，应按照规范要求要求进行必要的交接试验，以保证电动机能安全投入运行。

#### (一) 绕组直流电阻的测量

打开电动机接线盒，先用万用表检查三相绕组是否短路，与盒内接线柱连接是否可靠。必要时可用直流电桥法或伏安法来测量绕组的直流电阻，其目的是检查三相绕组的直流电阻是否平衡，与原始测量数据或同类型电动机的数据是否相符，以判断电机是否存在匝间短路、接头接触不良等故障。

##### 1. 直流电桥法

与测量电力变压器绕组直流电阻的方法和要求相同，对于电机绕组电阻在  $10\Omega \sim 10^6\Omega$  中值电阻范围内，可选用单臂电桥；对于绕组电阻小于  $10\Omega$  的低值电阻，必须选用双臂电桥，因为双臂电桥能够较好排除连接导线电阻及其与接线柱接触电阻的影响，从而提高了测试精度。此外还可以使用 YY2512 直流低阻分选仪和 ZS-51 型数字毫欧表测量。如前所述，在使用直流电桥时必须注意以下事项：1) 在不测量时应通过锁扣旋钮将检流计 G 锁住，测量时再松开检流计。若检流计指针不在零位，应调节到零位；2) 估计被测绕组电阻的大小，选择适当的桥臂比率。在选择桥臂比率时，应使比较臂可调电阻的各档能被充分利用，以提高测试结果的准确度；3) 测量时应先按下电桥的电源按钮  $K_1$  (或转换开关 S)，待电桥中的电流稳定后，再按检流计按钮 G；4) 适当调节桥臂比率旋钮和比较臂的各档旋钮，直到使检流计指针指零后，再读取电阻值；5) 测量完毕先松开检流计 G 的按钮，再松开电桥电源按钮  $K_1$  (或转换开关 S)，然后拆线，以避免检流计受到电流冲击；6) 对于双臂电桥，连接导线应有 4 根，其中从电位接点 3、4 引出的连接线应比电流接点 3'、4' 所引出的连接线更靠近被测电阻，并且导线接头应接触良好，连接导引截面应适当选大一些。

##### 2. 伏安法

所谓伏安法就是用直流电流表测量每相绕组所通过的直流电流,用直流电压表测量被测绕组两端的直流电压,然后根据欧姆定律  $R = V/I$ ,计算绕组的直流电阻值。用伏安法测量电阻值时应注意以下问题:1)测量电源应采用蓄电池或其他电压较稳定的直流电源;2)为了保护电压表,应在接通电源之后再接入电压表,在断开电源之前先将电压表测量棒(笔)离开测量端,并应注意同时读取电压表和电流表的读数;3)为了减小电表的内阻对测量精确度的影响,在测量具有较低直流电阻的绕组时应按图 5-7(a)接线,其绕组直流电阻大小为:

$$r_{WL} = V \left( I - \frac{V}{r_v} \right) \quad (5.2.11)$$

式中  $r_{WL}$ ——绕组直流电阻  $\Omega$ ;  
 $r_v$ ——电压表内阻  $\Omega$ 。

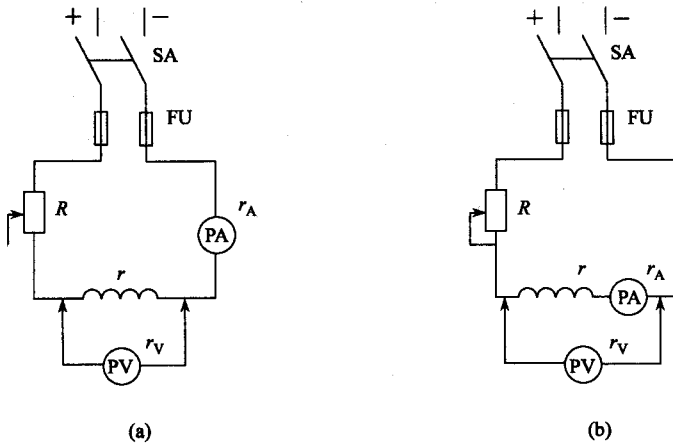


图 5-7 用伏安法测量绕组直流电阻接线图

(a) 低电阻绕组测量线路 (b) 高电阻绕组测量线路

在测量具有较高直流电阻的绕组时应按图 5-7(b)接线,其绕组直流电阻大小为:

$$r_{WH} = (V - I r_A) / I \quad (5.2.12)$$

式中  $r_{WH}$ ——绕组直流电阻  $\Omega$ ;  
 $r_A$ ——电流表内阻。

绕组直流电阻的高、低界限,应根据实际选用仪表的内阻大小和绕组直流电阻的大小来确定,并采用使测量误差最小的接线方式;4)测量时的电流不应超过绕组额定电流的 20%,并应尽可能地读取试验数据,以免因电机绕组发热而影响测量准确度;5)每一相绕组应在不同的电流数值下测量三次,取其算术平均值作为绕组直流电阻值,最后将所测得各相绕组的相间差值和线间差值,分别与原始出厂数据相比较。《电气装置安装工程施工及验收规范》(GB50150—91)中规定,1000kV 以上或者 100kW 以上的电动机各相间直流电阻差值不应超过其最小值的 2%,线间直流电阻差值不应超过其最小值的 1%。

值得注意的是,绕组直流电阻的大小是随温度变化的,在测量绕组直流电阻时,要同时测量绕组的温度,以便换算,其换算公式为:

$$\frac{R_2}{R_1} = \frac{k + t_2}{k + t_1} \quad (5.2.13)$$

式中  $R_1$ ——绕组在温度  $t_1^\circ\text{C}$  时的电阻  $\Omega$ ;  
 $R_2$ ——绕组在  $t_2^\circ\text{C}$  时的电阻  $\Omega$ ;  
 $k$ ——为常数,铜导体  $k = 235$ ,铝导体  $k = 228$ 。

在测量电机绕组温度时,应将温度计球部紧贴在电机机壳表面,最好插入吊攀的螺孔之内,使其有良好的热传导,并在测量点以及温度计球部还应采用棉花、石棉、油灰等绝缘材料覆盖,以免受到外界热气流或热

辐射的影响,减少温度测量的误差。另外,在有交变磁场存在的部位不能使用水银温度计,因为水银温度计在交变磁场中会产生涡流,使温度计本身发热而影响测量准确度,所以应采用酒精温度计。

## (二) 绕组绝缘电阻的测量

制造电机所用的绝缘材料很多,按其耐热能力共分为7个等级,但多采用B级和E级绝缘,在重要使用场所,则采用F级或H级绝缘。

电动机的绝缘电阻一般应满足:应与额定电压相同的同类型合格电动机相比较,或用下式计算电机应达到的最低绝缘电阻值:

$$R_T \geq V_N \sqrt{1000 + \frac{P_N}{100}} \quad (5.2.14)$$

式中  $R_T$ ——电动机运行温度时的最低绝缘电阻值,  $M\Omega$ ;

$V_N$ ——电动机额定电压,  $V$ ;

$P_N$ ——电动机额定功率,  $kW$ 。

但对于额定电压1000V以下低压中小型电动机,常温下绝缘电阻值应按 $0.5M\Omega$ 以上计取。另外温度变化对电机绝缘电阻的影响,应按下式将绕组温度 $t^\circ C$ 时测得的绝缘电阻 $R_t$ 换算到运行温度 $T^\circ C$ 时(或称热态时)的电阻值,即

$$R'T = e^{\left[ \ln R_t - \frac{T-t}{10} \ln 2 \right]} \quad (5.2.15)$$

对于热塑性绝缘的运行温度为 $75^\circ C$ ,B级热固性绝缘的运行温度为 $100^\circ C$ ,所以要求换算到 $75^\circ C$ 或 $100^\circ C$ 时的绝缘电阻 $R'T$ 应不低于 $R_T$ 。对于1000V及以上大中型电机,还可利用吸收比来判断电动机的受潮程度,要求吸收比 $\alpha = R_{60}/R_{15} \geq 1.2$ 。

因为任何绝缘材料在施加一定直流电压时,都有极微弱的电流流过,此电流由充电电流、吸收电流和泄漏电流等三部分组成。其中充电电流和吸收电流随时间而迅速衰减,尤其是充电电流衰减最快,在15s内可衰减为零,而泄露电流的大小和吸收电流的衰减速度则与绝缘材料的干燥、洁净程度和耐压性能等因素有关。当绝缘材料干燥、清洁干净和耐压性能良好时,泄露电流就很小,吸收电流衰减较慢,需几十秒到数分钟才达到稳定。由此可见,所测得的绝缘电阻值将随测量时间的增加而增大。当绝缘材料受潮或损坏时,泄露电流较大,吸收电流的影响作用减小。因此,对于某种绝缘材料来说,不论是否受潮,用兆欧表测量其15s时的绝缘电阻 $R_{15}$ 约为一常数,而60s时的绝缘电阻 $R_{60}$ 随绝缘材料受潮程度的增加而明显降低。如果吸收比 $\alpha \geq 1.2$ ,即可认为电动机内部没有受潮和损坏,如果 $\alpha < 1.2$ ,则应进行干燥绝缘处理。

为了简化计算,也可按表5-10给出的换算系数 $\zeta$ ,将所测得的电动机定子绕组绝缘电阻值换算到运行温度时的绝缘电阻。按上述所介绍的方法将绝缘电阻换算后,再与电动机绕组的绝缘电阻满足条件(或与电动机出厂原始数据或同类型电机)相比较,应无显著下降。

表5-10 电动机定子绕组换算到运行温度 $T^\circ C$ 时的绝缘电阻换算系数

定子绕组测试温度( $^\circ C$ )		5	10	20	30	40	50	60	70
换算系数 $\zeta$	热塑性绝缘	128	90.5	45.3	22.6	11.3	5.7	2.8	1.4
	B级热固性绝缘	87	68.7	43	26.8	16.8	10.5	6.6	4.1

例题 某台三相异步电动机,为热塑性绝缘材料。在定子绕组温度为 $10^\circ C$ 时,用兆欧表测得绝缘电阻为 $100M\Omega$ ,试计算运行温度时的绝缘电阻值。

解 对于热塑性绝缘材料,其运行温度取 $T = 75^\circ C$ ,则由式(5.2.15)得:

$$R'T = e^{\left[ \ln R_t - \frac{T-t}{10} \ln 2 \right]} = e^{\left[ \ln 100 - \frac{75-10}{10} \times \ln 2 \right]} = 1.1M\Omega$$

也可按表达式(5-10)给出的温度换算系数计算运行温度时的绝缘电阻值。对于热塑性绝缘材料,当 $t = 10^\circ C$ 时,温度换算系数 $\zeta = 90.5$ ,则换算到 $T = 75^\circ C$ 时的绝缘电阻为:

$$R'_1 = R_1/\zeta = 100/90.5 = 1.1\text{M}\Omega$$

### (三)三相绕组首末端的确定

如图 5-8 所示,电动机定子组出线端在接线盒内按规定要求布置后,当三角形接法时,只需用连接片将  $U_1$  与  $W_2$ 、 $V_1$  与  $U_2$ 、 $W_1$  与  $V_2$  分别上下连接起来,并作为电源接线端;而星形接法时,则只需用连接片将下面三个出线端  $W_2$ 、 $U_2$ 、 $V_2$  连接起来作为中性点,上面三个出线端  $U_1$ 、 $V_1$ 、 $W_1$  作为电源接线端(也可用连接片将上面三个出线端连接起来作为中性点,而下面三个出线端作为电源接线端)。但在接线之前,应注意严格校验绕组的极性,即检查校验三相绕组的首末端。否则,如果首末端接错,会使电动机的感应电动势和阻抗发生严重不平衡,而引起电动机三相电流不平衡,会出现噪声、振动和过热现象,甚至会引起电动机烧毁事故。

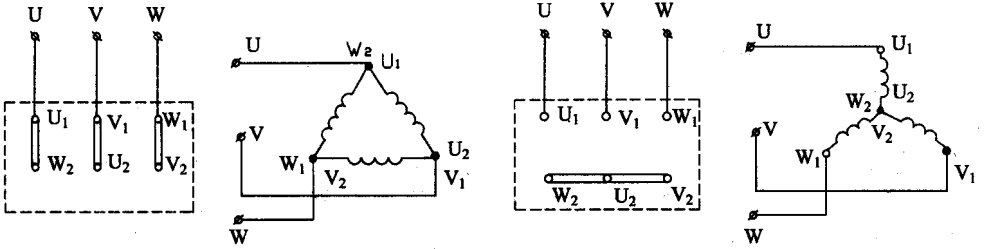


图 5-8 三相异步电动机定子绕组接线方法

(a)三角形接线 (b)星形接线

在测试时先用万用表确定出哪两个线端属于同一相绕组,然后将其中任意两相绕组串联,用蓄电池 E 通过开关 QA 与另两出线端连接,剩下的一相绕组出线端与毫伏表或毫安表连接,如图 5-9 所示。

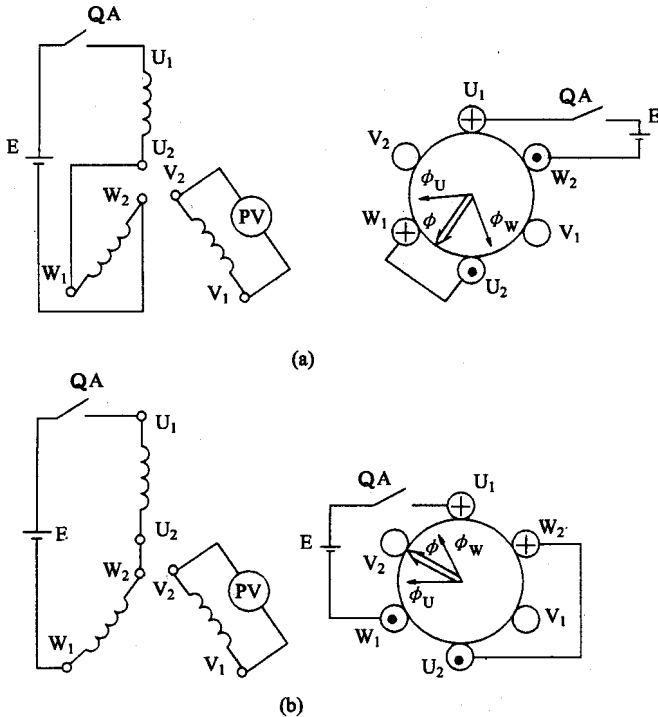


图 5-9 三相异步电动机绕组首末端判定试验线路图

(a)两相绕组的首末端连接

(b)两相绕组的首、首端(或未、末端)连接

由于三相定子绕组各相在空间位置上互差  $120^\circ$  电角度, 所以如果两相绕组为首末端连接时, 见图 5-9(a) 则与毫伏表相连接的绕组正好匝链其合成磁通, 在 QA 闭合或断开瞬时, 将出现毫伏表指针摆动幅度较大的现象, 如果两相绕组为首端与首端(或末端与末端)连接时, 见图 5-9(b), 则与毫伏表相连接的绕组基本上不匝链其合成磁通, 在 QA 闭合或断开瞬时, 将出现毫伏表指针不摆动或摆动幅度很小的现象。这样就可以确定出串联的两相绕组的首末对应端, 然后用同样的方法接线, 再确定出第三相绕组的首末对应端。

#### (四) 电机交流耐压试验

电动机交流耐压试验与电力变压器的交流耐压试验方法基本相同, 其目的是进一步检查电动机的绝缘性能, 其定子绕组的交流耐压标准见表 5-11。绕线式异步电动机转子绕组的交流耐压值, 对于转子工况为不可逆运行者, 其试验电压标准为  $1.5(2V_{2N} + 0.5) \text{ kV}$ , 但不应低于  $1 \text{ kV}$ ; 对于转子工况为可逆运行者, 其试验电压标准为  $1.5(2V_{2N} + 0.5) \text{ kV}$ , 但不应低于  $2 \text{ kV}$ 。  $V_{2N}$  为在定子绕组施加额定电压时, 转子绕组开路所测得的转子电压, 称为转子额定电压或转子开路电压。同步电动机转子绕组的交流耐压试验标准为其额定励磁电压的 7.5 倍, 且不低于  $1.2 \text{ kV}$ , 但不得高于出厂试验电压值的 75%。

表 5-11 电动机定子绕组交流耐压试验标准

额定电压 $V_N$ (kV)	0.45	0.5	2	3	6	10
试验电压 (kV)	1	1.5	4	5	10	16

试验时需将各相绕组分别对机壳及地进行耐压试验。对于大中型电动机, 还需采用球隙过电压保护装置, 并在被试验绕组端并接入电压互感器和电压表, 以监视试验电压的大小, 其试验方法及试验线路可参考三相电力变压器工频交流耐压线路。

#### (五) 电动机短路试验

电动机短路试验的目的是进一步检查电动机的绝缘是否存在缺陷, 其试验线路及其等效线路如图 5-10 所示。

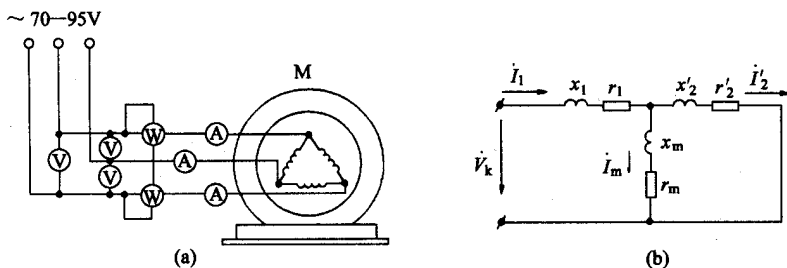


图 5-10 交流异步电动机短路试验线路

所谓异步电动机短路, 是指等值电路中串联的附加电阻(即模拟机械功率的等效电阻  $(1-s)'2/s$ ) 的状态, 其等值电路如图 5-10(b) 所示。在电动机堵转 ( $n=0, s=1$ ) 情况下进行试验, 故也称之为堵转试验。为了使堵转时的短路电流不致于过大, 应在降低电源电压的条件下进行。一般应从额定电压  $V_N$  的 0.4 倍开始(但短路电流不得超过其额定电流  $I_N$  的 1.2 倍), 从  $1.2I_N \sim 0.2I_N$  之间均匀测取 5~7 点, 每次记录端电压、短路电流和短路功率值, 并测量定子绕组的直流电阻, 试验线路见图 5-10(a)。

由图 5-10(b) 电动机短路试验等效线路可见, 由于  $Z' \ll Z_m$ , 故可认为励磁支路开路,  $I_m$  励磁电流, 铁耗  $P_{Fe}$ 、机械损耗  $P_\Omega$  和输出功率  $P_2$  均为零, 全部输入功率  $P_k$  均转变成定子、转子铜耗, 即

$$P_k = 3(I_1^2 r_1 + I_2^2 r_2) \approx 3I_k^2 (r_1 + 4r_2) = 3I_k^2 r_k \quad (5.2.16)$$

式中  $P_k$ ——电机短路损耗, 即定子、转子短路铜耗, W;

$I_k$ ——短路电流,  $I_1 \approx I_2 = I_k$  A;

$r_k$ ——短路电阻,  $r_k = r_1 + r_2$   $\Omega$ 。



电机短路阻抗为：

$$Z_k = V_k / \sqrt{3} I_k \quad (5.2.17)$$

则电机短路电抗为：

$$x_k = \sqrt{Z_k^2 - r_k^2} \quad (5.2.18)$$

式中  $x_k$ ——电机短路电抗  $x_k = x_1 + x'_2 \Omega$

对于大中型交流异步电动机,可以近似认为  $x_1 \approx x'_2$ ; 100kV 以下电动机,极对数为 1、2、3 者取  $x'_k = 0.97x_k$ ,极对数 4、5 者取  $x'_2 = 0.57x_k$ 。

## (六) 电源相序的测定

我们知道,旋转磁场的旋转方向由通入定子绕组电流的相序决定,是从电流相序在前的绕组转向电流相序在后的绕组。所以,一些要求单向运转的设备,电动机只能向要求的转向转动,必须先对接入电动机的电源相序进行严格测定,以保证设备的安全运行。

三相电源相序的测定可用图 5-11 所示的相序指示器进行测定,可由一个电容器  $C$  和两个白炽灯泡连接成星形电路。设白炽灯泡电阻为  $R$ ,且使  $R = 1/\omega C$  并接入三相交流电源,如图 5-12 所示。

按节点电压法,则有

$$\begin{aligned} \dot{V}_{NN'} &= \frac{\dot{E}_U j\omega C + \dot{E}_V \frac{1}{R} + \dot{E}_W \frac{1}{R}}{j\omega C + \frac{1}{R} + \frac{1}{R}} \\ &= \frac{j\dot{E} \angle 0^\circ + E \angle -120^\circ + E \angle -240^\circ}{j + 2} \\ &= (-0.2 + j0.6)E \end{aligned}$$

V 相白炽灯泡端电压为：

$$\begin{aligned} \dot{V}_{VN} &= \dot{V}_{VN} - \dot{V}_{NN'} = E \angle -120^\circ - (-0.2 + j0.6)E \\ &= (-0.3 - j1.466)E \end{aligned}$$

其有效值大小为： $V_{VN} = 1.496E$

W 相白炽灯泡端电压为：

$$\begin{aligned} \dot{V}_{WN} &= \dot{V}_{WN} - \dot{V}_{NN'} = E \angle -120^\circ - (-0.2 + j0.6)E \\ &= (-0.3 - j0.266)E \end{aligned}$$

其有效值大小为： $V_{WN} = 0.401E$

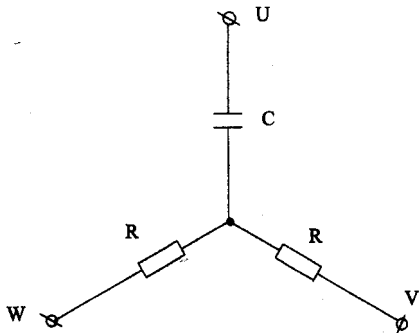


图 5-11 三相交流电源相序指示器

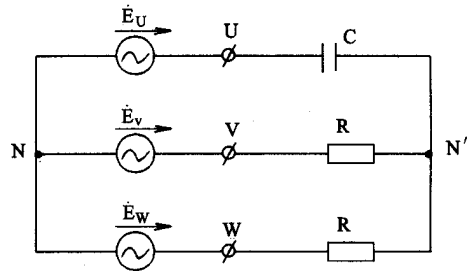


图 5-12 用相序指示器测试电源相序接线图

由此可见,接通电源后,如图 5-12 所示,若设电容器  $C$  所接的那一相为 U 相,则白炽灯泡较亮的那一相为 V 相,而较暗的那一相为 W 相。

此外,绕线式电动机转子还需要做转子开路耐压试验,对大中型电动机,还应进行电动机空载试验和轴

承绝缘检查等。

在完成上述电动机安装调试和接线的基础上,还应检查电机外壳接地或接零是否符合要求。一般电动机的电源线保护管采用水煤气管暗敷,且引出基础 200mm 以上,并将接地线与电动机的接地螺钉及焊接钢管连接起来。若有多台电动机外壳接地时,每台电机必须单独设接地线(支线),然后将这些接地支线分别与接地干线或等电位接地母线相连接,不能把几个接地支线相互串联后,再用一根接地线与接地干线或接地体相连接。接地线截面应按相线允许载流量确定,即接地干线的允许载流量应不小于供电网中最大的相线载流量的 1/2,接地支线的允许载流量应不小于该设备相线载流量的 1/3。但铜导线截面不大于 100mm<sup>2</sup>,铝导线截面不大于 35mm<sup>2</sup>,铜导线截面不大于 25mm<sup>2</sup>。

然后,经检查三相电源电压正常后,即可通电试验。电动机在空载情况下运行时间宜为 2h,并且要监视电动机有无磨擦声或其他不正常声音,有无局部过热或焦臭气味,记录电动机空载电流,检查线路电流是否超过规定值等等。经过 2h 空载运转和数次起动,如未发现异常现象,即可投入正常运行、交付使用,电动机控制本章从略,可参阅本书第 4 章电梯安装调试和《建筑电气控制技术》课程的有关内容。

## 第三节 同步电机运行与维修

### 一、同步发电机的原理与特性

#### (一)同步发电机的构造与等效电路

##### 1. 定子的构造

上一节已经描述和分析了同步电机的定子。三相定子电流产生以同步转速旋转的磁通。同步转速决定于电频率和磁极的个数。

##### 2. 转子的构造

同步电机的转子是一个直流电磁铁。可以通过电刷滑环为转子供给直流电流,也可以通过将转子中分离绕组感应的交流电压整流后供给直流电流。图 5-13 给出了一个柱形转子结构和一个凸极转子结构。柱形转子的磁结构是对称的,转子磁动势的衰减分布产生了正弦衰减的转子磁通。凸极转子的磁结构是不对称的,绕在磁极上的线圈将直流线圈磁动势集中于一点,正弦磁通分布通过衰减空气隙的宽度实现。为产生转矩,定子和转子中的极对数必须相等。从电路上来讲,转子传送励磁电流,也就是说它上面有很多匝细导线,导线中的电流相对较小。

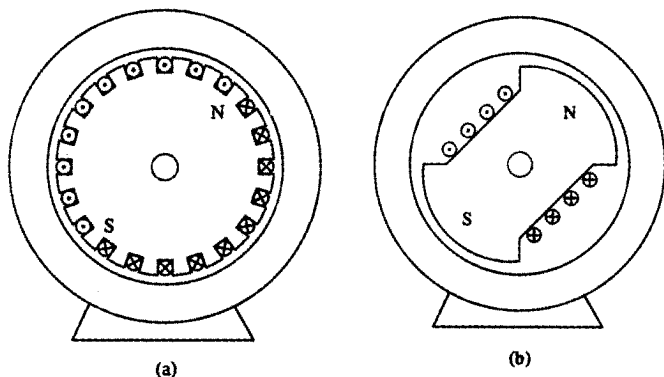


图 5-13 (a)柱形转子 (b)凸极转子

##### 3. 场生电动势

设转子以同步转速旋转,正方向为  $\theta_m$  的方向。因为空间中的转子磁通密度为正弦分布,所以  $\theta_m = 0^\circ$  的

磁通密度是一个可以用相量表示的正弦时间函数。从转子 N 磁轴通过  $\theta_m = 0^\circ$  的时刻开始计时,所以转子磁通密度相量  $\underline{B}_R$  为:

$$\overline{B}_R = B_R \angle 0^\circ \quad (5.3.1)$$

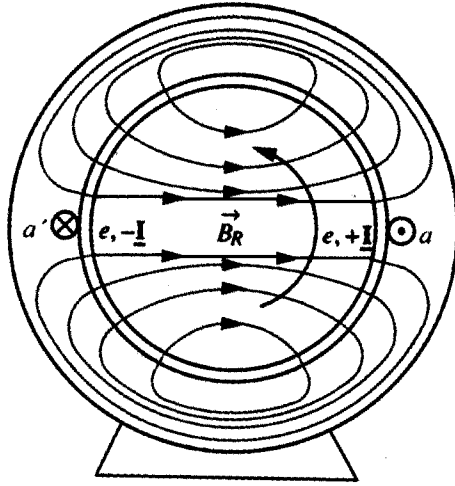
式中  $B_R$  是最大转子磁通密度,电频率为  $(VP/2)\omega_s$ 。磁通波在定子线圈上产生电压,此电压又在定子和负载中产生电流。这里主要研究图 5-14 中的  $a-a'$  导线环。可以确定这个环的电动势为:

$$e = 2\vec{l} \cdot \vec{u} \times \vec{B} = 2l\omega R B_R V \quad (5.3.2)$$

式中  $l$  是电机的轴长,  $R$  是空气隙的标称半径。 $e$  的极性是  $a$  端为正,  $a'$  端为负。整个线圈的相量磁动势  $\underline{E}_f$  近似值为:

$$\underline{E}_f = 2nl\omega R B_R / \angle 0^\circ \quad (5.3.3)$$

式中  $n$  是以  $a-a'$  为中心的线圈的匝数。如果没有定子电流,  $\underline{E}_f$  就是线圈中的电压,该电压是由转子磁场旋转产生的。



#### 4. 定子电流的作用

$a-a'$  中电流  $\underline{I}$  的相位决定于负载阻抗,但根据右手定则,定子电流产生的磁通  $B_s$  滞后  $90^\circ$  ( $= -j$ ), 给出磁通密度为:

$$\underline{B}_s = -j \frac{3}{2} \frac{\mu n \underline{I}}{2g} \quad (5.3.4)$$

式中  $g$  是空气隙的宽度,  $3/2$  是其两相使旋转磁通增大的倍数。因此,如果存在定子电流,空气隙中的磁通密度  $\underline{B}_{RS}$  等于转子磁通和定子磁通的和:

$$\underline{B}_{RS} = \underline{B}_R + \underline{B}_s \quad (5.3.5)$$

将式 5.3.5 两边乘以  $2l\omega R n$ , 可以变化为电压方程:

$$\underbrace{2l\omega R n \underline{B}_{RS}}_{\underline{V}} = \underbrace{2l\omega R n \underline{B}_R}_{\underline{E}_f} - j\omega \underbrace{2g/3\mu_0 l R}_{L_s} \underline{I} \quad (5.3.6)$$

#### 5. 式 5.2.24 电路解释

如果  $\underline{I}$  为零,转子磁通旋转产生的电压为  $\underline{E}_f$ , 可以将它看用发电机的戴维南电压。 $\underline{V}$  项是有定子电流时发电机的输出电压,因为  $\underline{B}_{RS}$  是空气电机的输出电压,因为  $\underline{B}_{RS}$  是空气隙中的磁通密度。式 5.2.24 的后一项表示一个感性电抗:

$$X_s = \omega \frac{n^2}{\mathcal{R}_g} = \omega L_s \quad \text{其中} \quad \mathcal{R}_g = \frac{2g}{3\mu_0 l R} \quad (5.3.7)$$

式中  $L_s$  是定子绕组的有效电感。 $X_s$  是交流频率时的有效电抗。

### 6. 单相等效电路

式(5.2.24)的部分推导是近似的,但其形式和解释是正确的,可以得到有效的单相等效电路,如图5-15(a)所示。转子磁通的作用由励磁电压  $\overline{E}_f$  表示,它由直流励磁电流  $I_f$  控制,如图5-15所示。但不应将励磁电压看作电机中实际存在的电压,因为转子磁通占据的空间与定子电流产生的磁通占据的空间相同,后者由单相同步感抗  $X_s$  表示。电机中实际存在的磁通是转子一定子磁通。根据法拉第定律,由于结构中总磁通运动而在定子线圈中感应的单相电压必然是单相终端电压  $\underline{V}$ 。

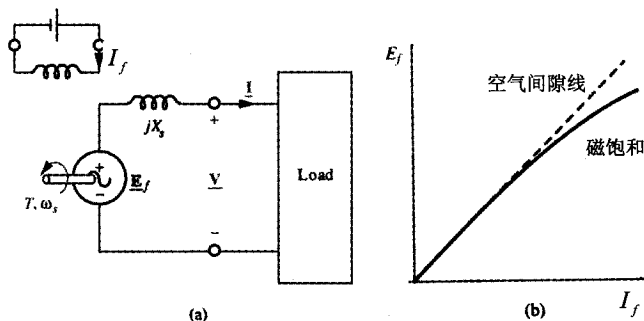


图5-15 (a)同步电动机的单相等效电路;

(b)励磁电流决定了励磁电压  $\underline{E}_f$  的大小

### 7. 小结

图5-16给出了同步发电机中的因果关系。电路用图5-15(a)中的单相等效电路表示,它用励磁电压表示旋转转子磁通,用同步电抗与定子电流的积表示旋转的定子磁通。定子磁通和转子磁通的和是电机中实际存在的磁通,它在等效电路中由励磁电压和同步电抗上电压降的和来表示。法拉第定律变为:

$$\underline{V} = \underline{E}_f - jX_s \underline{I} \quad (5.3.8)$$

定子电路中的损耗和泄磁通已被忽略。励磁电压的大小由直流励磁电流控制。图5-15(a)中的等效电路仅适用于柱形转子电机,因为它忽略了凸极转子磁结构的不对称性。

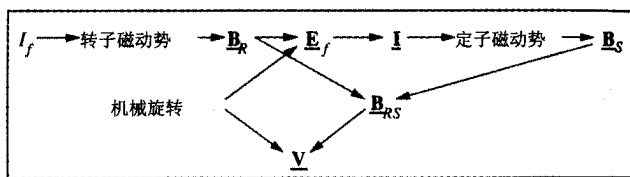


图5-16 同步发电机的因果关系。

发电机的有效电压  $\underline{V}$  由有效功率密度  $\underline{B}_{RS}$  产生

## (二)工作于独立电力系统中的发电机

### 1. 系统特性

多数同步发电机用于大型电力系统,并与其他许多发电机串联使用。但是同步发电机也可用作独立电力系统的唯一发电机。在本节,将研究同步发电机在这样一个独立系统中的应用。

图5-17表示一个独立系统。注意发电机的两个输入:机械驱动器上的调节杆和直流励磁电流。这个电力系统有如下特性:

(1)其频率由机械驱动器的速度决定。电频率为  $(P/2)\omega_m$ ,其中  $\omega_m$  是转子机械速度。因此,如果系统频率需要保持恒定,比如说为了计时,就要求对速度进行严密控制。在其他情况下,在不降低负载特性的前提下系统频率可以稍微有些变化。

(2)系统的电压部分由励磁电流控制。励磁电流增大可以使产生的电压增大。但是下例中系统的电压也受负载水平影响。

例 独立发电机

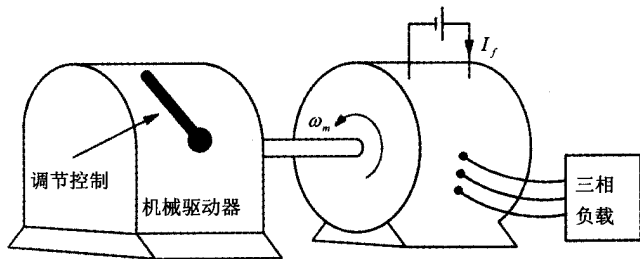


图 5-17 独立电力系统

一个 230V、四极、60Hz 三相发电机需要为一个负载提供 10kW 功率(功率因数为 0.9 滞后)。发电机的同步电抗为  $3.0\Omega$ ，忽略所有损耗和泄电抗。如果断开负载，发电机的输入电压为多少？

解：没有负载时，输出电压为  $\underline{E}_f$ ，它可以由图 5-15(a) 中的等效电流确定。单相电压和电流为：

$$\underline{V} = \frac{230}{\sqrt{3}} \angle 0^\circ$$

和

$$\underline{I} = \frac{10000}{\sqrt{3} \times 230 \times 0.9} \angle -\cos^{-1}(0.9) = 27.9 \angle -25.8^\circ \text{ A} \quad (5.3.9)$$

解方程式 (5.3.8) 可以确定励磁电压：

$$\underline{E}_f = \underline{V} + jX_s \underline{I} = \frac{230}{\sqrt{3}} + j3.0 \times 27.9 \angle 25.8^\circ = 185.3 \angle 24.0^\circ \quad (5.3.10)$$

这个单相电压与 321V 的三相电压等效。

思考题：电动机驱动发电机所需的转矩为多少？

## 2. 小结

独立同步发电机需要控制系统来调节发电机速度和输出电压。前者决定了电频率，后者决定于负载。

## (三) 功率角

### 1. 功率角的定义

研究了转子磁通和定子磁通结合起来得到转子—定子磁通。在推导过程中，介绍了  $\delta_R$  和  $\delta_s$ ，它们分别是转子磁通和定子磁通相对于总磁通的实际角度。这里对这些功率角进行更详细的研究。这些功率角对应于总磁通各分量之间的实际角度，也对应于可以看作相量的正弦量的相位角。

### 2. 功率角和相量图

图 5-18(a) 以实际角度给出了几个功率角，图 5-18(b) 给出了  $\theta_m = 0^\circ$  时的相量磁通。转子磁通密度相量与转子的 N 极对准，因为它使磁通沿正方向(向外)通过空气隙。而定子磁通密度相量与定子的 S 极对准，因为它使磁通沿正方向(向外)通过空气隙。转子磁通和定子磁通结合起来构成转子—定子磁通。当转子磁极超前于空气隙的最大磁通时，转子功率角  $\delta_R$  为正。

### 3. 转矩和功率角

重写式 (5-18)

$$T_{de}(\delta_{RS}) = -\frac{\pi R l g P}{2 \mu_0} B_R B_S \sin\left[\frac{P}{2} \delta_{RS}\right] = -\frac{\pi R l g P}{2 \mu_0} B_R B_{RS} \sin\left[\frac{P}{2} \delta_R\right] \quad (5.3.11)$$

它用转子功率角给出了电机的输出转矩。第二种形式非常有用，因为它的两个磁通量被限制为可控制量。转子磁通由直流励磁电流控制，转子—定子磁通与输出电压联系在一起。对于固定励磁通和输出电压，转矩决定于转子功率角  $\delta_R$ 。

现在说明磁通与上例中独立系统的相量图之间的一致性。电路与相量图如图 5-19 所示。定子绕组中产生的电压  $\underline{V}$  为相应参考。图中给出了电流和励磁电压。励磁电压与转子磁通密度同相，定子中产生的电压与转子—定子磁通密度同相，因此  $\underline{E}_f$  和  $\underline{V}$  之间的相位角为转子功率角  $\delta_R$ 。转子功率角对于理解同步发电机在大型电力系统中的工作状态尤其重要。 $jX_s \underline{I}$  的相反数表示定子磁通密度。

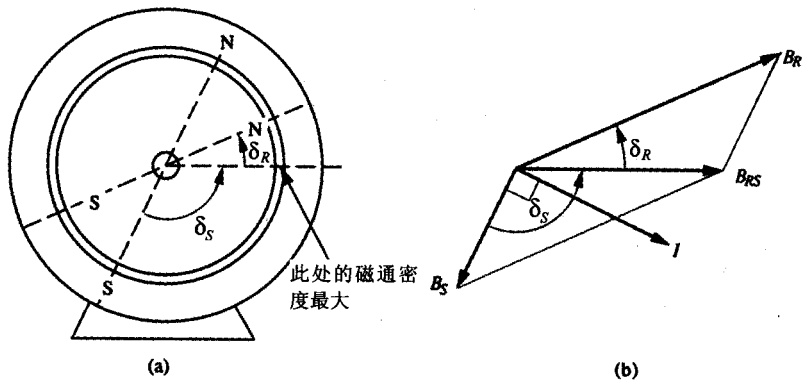


图 5-18 转子磁通和定子磁通结合起来得到总磁通。磁极设置同上例。

(a) 磁极设置 (b)  $\theta_m = 0^\circ$  时表示电流和磁通密度的相量

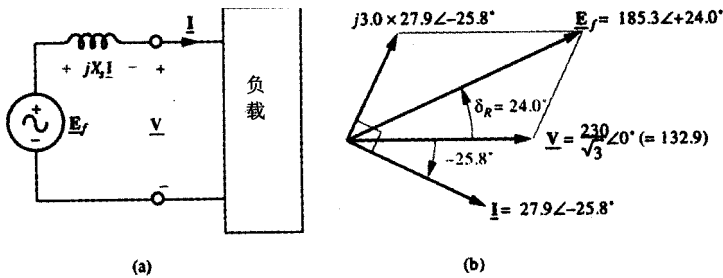


图 5-19 (a) 电路 (b) 独立发电机的相量关系。

磁极设置与磁通密度如图 5-18 所示

#### (四) 工作于大型电力系统中的同步发电机

在本节, 将研究同步发电机工作于大型电力系统时的特性。在大型电力系统中, 许多负载和许多发电机在一定地理区域内互相连接。这种内部连接可以提供可靠性、可以对各发电机进行保养、并允许特定电力公司之间进行电力交换。

##### 1. 电力网

在这种电力网中, 许多发电机串联在一起工作。所有的发电机都是同步的, 并通过远程传输线互相连接在一起。从某个发电机的角度来看, 电力系统是一个负载, 发电机向其中输送有效功率和无功功率。但是这种负载的特性与无源负载的特性有着显著不同。

##### 2. 无穷总线

电力系统可以用无穷总线模拟。在无穷总线中, 其频率恒定、电压恒定(包括幅度和相位), 与所研究发电机的工作状态无关。系统的频率可以看作一个常数, 它由许多发电机的可控制旋转决定。因此, 如果提高某个发电机的机械驱动器, 总线中的频率不会像独立工作那样使频率升高, 而是向电力网中输送更多的有效功率。同样, 如果增大某个发电机的直流励磁电流, 也不会像独立工作那样提高输出电压, 而是会改变向系统输送的无功功率。下面的分析将说明这种对有效输出功率和无功输出功率的独立控制。

##### 3. 在无穷总线中运转

图 5-20 给出了工作于无穷总线中的同步发电机的单相电路。发电机的有效输出功率为:

$$P_{out} = 3VI\cos\theta \tag{5.3.12}$$

式中  $\theta$  是单相输出电压和电流之间的角度,  $V$  和  $I$  是单相均方根值。这一系统的相量图如图 5-21 所示。

现在考虑当直流励磁电流变化时相量图的变化, 然后再考虑励磁电压的变化对相量图的影响。设机械驱动器的转矩和转速保持恒定, 那么, 发电机的输入和输出有效功率也保持恒定。无穷总线的线电压是固定

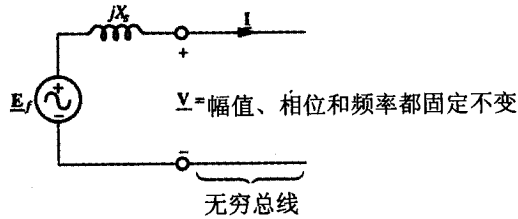


图 5-20 工作于无穷总线中  
同步发电机的单相模型

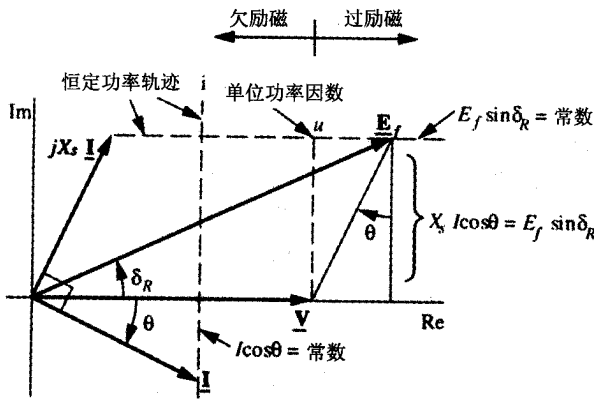


图 5-21 工作于无穷总线中的同步发电机的  
相量图。两条虚线表示当励磁电压的大小变化时，励  
磁电压和电流相量保持输出功率恒定的轨迹

的,因此,由式(5.3.12)可以看出,  $I \cos \theta$  也必然保持恒定。电流相量的顶端沿垂直虚线通过实轴达到传送有效功率所需的同相电流。当直流励磁电流变化时,输出电压的幅值和相位也变化,但电流中与总线电压同相的分量保持不变。

图 5-21 给出了转子功率角  $\delta_R$ , 它是励磁电压  $E_f$  超前于总线电压  $V$  的相位角。根据 KVL, 励磁电压是  $V$  和  $jX_s I$  的相量和。因此,根据图 5-21 中的几何关系,可以得到:

$$X_s I \cos \theta = E_f \sin \delta_R \quad (5.3.13)$$

式中  $E_f$  是单相励磁电压的大小。因此,可以将式(5.47)修改为以下形式:

$$P_{out} = \frac{3VE_f}{X_s} \sin \delta_R \quad (5.3.14)$$

因此,对于恒定功率(驱动器控制)和恒定线电压,  $E_f \sin \delta_R$  也保持恒定。励磁电压相量的顶端沿着图 5-21 中的垂直虚线移动。

#### 4. 直流励磁电流对功率因数的影响

利用这两个轨迹,就可以估算直流励磁电流的变化对无穷总线中同步发电机的影响。例如,考虑直流励磁电流降低对图 5-21 中相量图的影响。励磁电流降低会使  $E_f$  的大小减小,它使  $E_f$  的顶端沿垂直虚线向点  $u$  移动。同时,输出电压  $V$  固定。相量  $jX_s I$  与  $V$  和  $E_f$  的连线平行,它必然向一垂直位置移动。因此,电流  $I$  必然向一水平位置移动,而其顶端仍然留在垂直虚线上。所以,当直流励磁电流降低时,电流与输出电压的同相部分减小,功率因数趋向于单位 1,电流的大小降低。在点  $u$  处,  $E_f$  位于  $V$  的正上方,电流与单相输出电压同相。在这一点,得到一个直角,励磁电压为:

$$E_{fu}^2 = V^2 + (X_s I)^2 \quad (5.3.15)$$

式中  $E_{fu}$  是功率因数为单位 1 时所需励磁电压的大小。当  $E_f$  的大小下降很多时,电流将超前于输出电压。电流相对于输出电压的角度可以由励磁电压的大小控制,励磁电压的大小又由直流励磁电流控制。电

流的同相分量为定值,而异相分量的大小和符号都可以变化。因此,发电机与电力系统之间交换的无功功率由直流励磁电流控制。

图 5-22 给出了直流励磁电流对同步发电机电流的大小和功率因数的影响,输出功率保持恒定。励磁电流很小时称为欠励磁发电机,其输出电流超前于输出电压,当励磁电流增大时,输出电压降低。在功率因数为单位 1 的  $u$  点电压降至最低点,然后电流增大,并开始滞后于输出电压,这种情况称为过励磁发电机。

### 5. 小结

输出有效功率由发电机机械驱动器的调节杆控制。无功功率的符号和大小由直流励磁电流控制。对于过励磁发电机  $\underline{E}_f$  超过了图 5-21 中的  $u$  点,发电机输出正的无功功率。对于欠励磁发电机  $\underline{E}_f$  位于图 5-21 中  $u$  点的左侧,发电机输出负的无功功率。式(5.3.15)定义了过励磁特性和欠励磁特性的边界,并与单位功率因数对应。

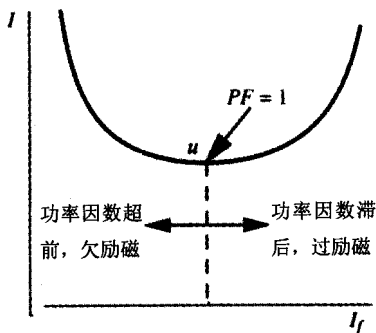


图 5-22 励磁电流对同步发电机输出的影响,输出功率保持恒定

### 例 提供无功功率

一个 600V(线电压)三相同步发电机的输出功率 25kW。同步电抗为  $10.0\Omega$ 。计算使功率因数为单位 1 的激励电压,并计算励磁电压为多少时,发电机可以在有效功率之外提供 +10kVAR 的无功功率。

解:要使功率因数为 1,所需线电流为:

$$I = \frac{P}{3V} = \frac{25 \times 10^3}{3 \times 600\sqrt{3}} = 24.1\text{A} \quad (5.3.16)$$

因此,根据式(5.3.15)得到所需励磁电压为:

$$E_{f0} = \sqrt{V^2 + (X_s I)^2} = \sqrt{(600\sqrt{3})^2 + (10.0 \times 24.1)^2} = 422\text{V} \quad (5.3.17)$$

注意,计算过程中采用单相电压。对于问题的第二部分,求视在功率:

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2} = \sqrt{(25)^2 + (10)^2} = 26.9\text{kVA} \quad (5.3.19)$$

功率因数为  $PF = 25/26.9 = 0.928$ , 电流的相位角为  $\theta = \tan^{-1}(10/25) = 21.8^\circ$  (滞后), 新电流  $I'$  的大小为:

$$I' = \frac{I}{PF} = \frac{24.1}{0.928} = 25.9\text{A} \quad (5.3.19)$$

根据式(5.3.8)新的励磁电压相量  $\underline{E}'_f$  为:

$$\underline{E}'_f = \underline{V} + jX_s I' = \frac{600}{\sqrt{3}} + j10.0 \times 25.9 \angle 21.8^\circ = 504 \angle 28.5^\circ\text{V}$$

因此,为使发电机多输出 +10kVAR 的无功功率,励磁电压应比单位功率因数所需励磁电压增大 19%。

### 6. 输出功率和功率角

图 5-23 给出了式(5.3.14)的图像以及转子功率角对发电机功率的影响,其中输出电压和励磁电压保持恒定。转子功率角  $\delta_R$  是一个空间角,其单位为电单位,它是转子的物理轴超前于空气隙中总磁通的角度。驱动转矩增大时,转子磁通的转速加快,更多的机械能转变为电能。输出功率会达到一个极限,如图 5-23 所示。输出功率大于此值后,电动机一发电机就不能同步,从而失去控制。实际中,发电机工作时的功率角在  $15^\circ$ — $25^\circ$  之间,这样可以远离失控的危险。



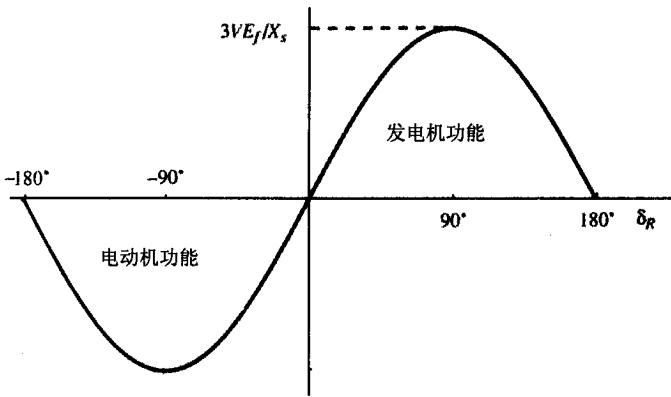


图 5-23 同步发电机输出功率与转子功率角之间的关系,励磁电压和输出电压保持恒定

从图 5-23 可以看出:电机用作电动机时,输出功率为负,对应于负功率角。在本例中,空气隙磁通超前于转子的轴,电力系统拉动机械系统,电能被转换为机械能。下一节将研究同步电动机的特性。

## 二、同步电动机运行与维修

### (一)同步电动机运行前的检查

1. 电动机主体零部件应齐全完整,内外表面清洁。
2. 经电气试验,各项电气指标均应符合要求。
3. 电刷与集电环工作面应接触良好。
4. 电动机控制系统必须完好,符合起动要求。
5. 油路系统应畅通。
6. 各部位振幅及轴向窜动量应符合技术要求。
7. 轴承不渗漏油。
8. 带有强制通风设备的电动机,通风系统必须一切正常。
9. 电动机在起动前,应先进行一次空操作,无问题后再投入空运行,经 1~2h 检查电动机各部件运动情况是否正常,电动机噪声和振动值应符合要求。
10. 轴瓦温度一般为 50~60℃,最高不能超过 80℃,滚动轴承允许工作温度为 100℃。
11. 停机后,全面检查电动机各部分情况,有无不正常现象。

### (二)同步电动机运行与维修

1. 电动机不能起动 同步电动机不能起动的原因及处理方法,有许多类似于三相异步电动机,除此之外,还有:

- (1) 转子上起动绕组断裂或开焊,应检查起动绕组并进行处理。
  - (2) 电动机起动转矩太小,应先空载或轻载起动后逐步加大负载。
  - (3) 没有起动绕组,对此类电动机可先用异步电动机将其拖至同步转速,然后给转子励磁电流,再加交流电压带上负载。
  - (4) 阻尼条开焊或断路,一般起动困难,严重时电动机不能起动,可用开口变压器检查处理。
2. 电动机起动后达不到同步转速
- (1) 转子中励磁绕组短路或接地,可检查励磁绕组的直流电阻和绝缘电阻,根据故障情况进行处理。
  - (2) 励磁系统断线或接触不良,使转子无法“牵入”同步,应检查励磁系统进行修理。

(3) 检修后励磁绕组匝数弄错或极性接反,应检查匝数与接线。

### 3. 电动机过热

(1) 电动机绕组短路,可用电桥测量各相绕组的直流电阻,找出短路绕组进行处理。

(2) 负载过大,应适当减轻负载。

(3) 通风冷却系统堵塞,应检查通风冷却系统。

(4) 转子励磁绕组的电流太大,绕组铜耗增加,使励磁绕组过热,可调整励磁电流。

### 4. 运行中产生振动

(1) 转子励磁绕组接地或匝间短路,造成磁场分布不均匀而产生怪声或振动,应检查励磁绕组是否接地或短路。

(2) 定、转子之间气隙不均匀,应按有关规定调整定、转子之间的气隙。

(3) 励磁线圈松动或已移位,应检查励磁线圈并以固定。

(4) 转子不平衡,应作动平衡试验予以纠正。

(5) 轴承间隙太大,应调整轴承间隙或更换轴承。

(6) 底脚螺钉松动,应予以紧固。

(7) 机座或轴承支座安装不良,应检查后予以纠正。

(8) 大修后转子极性接反,应改正接线。

(9) 电动机运行中铁心松动后,冲片便产生振动和噪声。

### 5. 运行中轴瓦漏油

(1) 润滑油填充过多,超过允许水平面。

(2) 润滑油牌号不符。

(3) 瓦座与瓦盖间接合面处旧密封涂料清理不干净。

(4) 新密封涂料填充不均匀,甚至忘填涂料。

(5) 密封垫安装不正确。

(6) 进油管和回油管接头、油杯、温度计等插口及阀门等处密封不良。

(7) 通风系统在轴承端形成真空,润滑油从轴承内部吸出。

### 6. 集电环异常磨损

(1) 在滑动接触过程中,集电环表面往往会有一层水膜,使集电环在与电刷接触传递电流过程中伴随发生电解现象,因而产生腐蚀,应清扫集电环。

(2) 滑动接触状况不良,如电刷压力太大,电刷在刷握内活动不自由,集电环表面脏,应分别进行处理。

(3) 集电环极性接错,应调换极性。

(4) 如采用金属石墨电刷或铜电刷,使集电环磨损较快时,应改用润滑性能较好磨损寿命较长的电刷。

## 第四节 直流电动机安装与维护

### 一、并励电动机的启动、制动和调速

#### (一) 启动

如把直流电动机直接接入电源进行启动,则启动电流很大。因为在启动瞬间,电枢还没有转动,电枢电路中的反电动势为零,而电枢电阻又很小,此时通过电枢的电流(即启动电流)很大,即:

$$I_{st} = \frac{U}{R_a}$$

例如,某台 10kW 电动机的额定电压为 220 V,额定电流  $I_N = 50$  A,电枢电阻  $R_a = 0.4\Omega$ ,则直接启动电流为:

$$I_{ST} = \frac{U}{R_a} = \frac{220}{0.4} = 550\text{A}$$

此电流为额定电流的 11 倍,这样大的电流将会烧毁换向器和电刷,同时使电动机的传动部件受到很大的冲击转矩,这是不允许的。因此,启动时,必须在电枢电路中串联启动变阻器来减小启动电流,同时为了获得较大的启动转矩而又不致使换向器受到损伤,通常把启动电流限制为电枢额定电流的 1.5~2.5 倍,即:

$$I_{\{ST\}} = \frac{U}{R_a + R_s} = (1.5 \sim 2.5) I_N$$

串联电阻  $R_s$  称为启动电阻,利用上式便可确定所需启动电阻  $R_s$  的数值。启动时接线如图 5-24 所示。

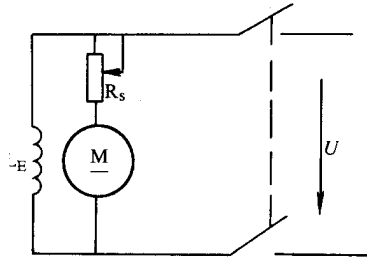


图 5-24 并励直流电动机启动电路图

当电动机电枢旋转起来后,在电枢中则产生反电动势  $E_a$ ,电枢电流逐渐减小,那么启动电阻就可以逐渐减小,最后启动电阻可以完全切除,电动机启动完毕,达到正常运转,此时电动机的电枢电流为:

$$I_a = \frac{U - E_a}{R_a}$$

电动机启动时要求其磁场有最大值,即要先接上励磁电压,以保证启动过程中产生足够大的反电动势,迅速减小启动电流和保证足够大的启动转矩,加速启动过程。

在直流电动机的启动方法中,目前应用广泛且启动稳定可靠的是按时间特性(原则)启动。

## (二)制动

直流电动机的电气制动同感应电动机一样,有能耗制动、反接制动和再生制动三种方法。

1. 能耗制动 把电枢从供电线路上切断,然后把它连接到电阻  $R$  上,励磁电路仍接于电源上保持不变,如图 5-25 所示。此时电动机由于惯性继续转动,电枢绕组中产生感应电动势和电流,使电动机运行在发电机状态。电枢导线中的电流在磁场中产生电磁力矩,按照左手定则,它与电枢旋转方向相反,因此起到制动作用,使电枢迅速停止运转。并励电动机大多采用能耗制动,并按感应电动势原则控制。这种方法可以保证停车准确,而且接线简单。

2. 反接制动 反接制动在直流电动机拖动中得到广泛应用,而通常也是用感应电动势原则来控制(如图 5-26 所示)。反接时只需将电枢两端的电源电压极性对换即可,此时电枢电流方向改变,由于磁场方向不变,所以电枢产生的电磁转矩与原转动方向相反,起到制动作用。在反接过程中,电枢中需要接入反接电阻限制电流,因为此时电源电压与电动机中反电动势的极性相同,电流过大会造成危险。

3. 再生制动 再生制动是当并励电动机运行时,由于某种外因使电动机转速超过正常转速(如电力机车下坡时),反电动势增大,超过外加电压,即  $E_{反} > U$ ,此时的电动机变成了发电机,向供电线路反馈供电,使电动机产生制动转矩(与旋转方向相反),而使电动机的转速减慢。

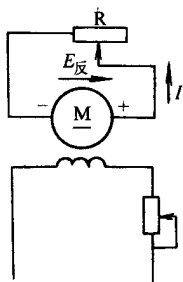
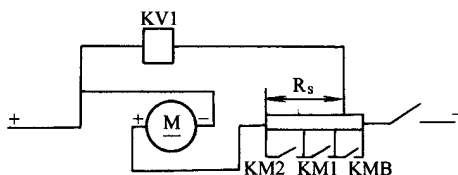


图 5-25 能耗制动的接线图

图 5-26 用电压继电器 KV1 控制反接制动的原理图( $R_s$  是启动电阻)

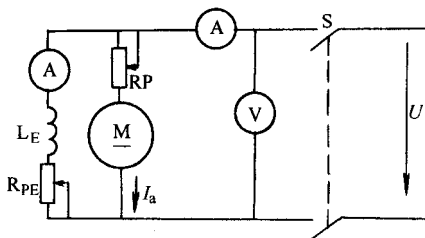
### (三) 调速

调速指的是在一定的机械负载下,通过对电动机施以附加的作用来改变转速。直流电动机的调速从式

$$n = \frac{U - I_a R_a}{C_e \Phi}$$

可以看出,有三个途径来调节电动机的转速。

1. 改变磁极磁通  $\Phi$  的调速方法 如图 5-27 所示,改变励磁电流,就可以使电动机的磁通改变,以调节转速。为此,在励磁电路中串联一个磁场变阻器  $R_{PE}$ ,改变磁场变阻器的阻值,即可调节电动机的转速。当励磁电流过小甚至励磁电路断开时,电动机的转速将急剧增加,会引起严重事故,这是在运用并励电动机时应注意防止的。电动机调速范围一般用最低转速和最高转速之比来表示,这种方法的调速范围可达 1:3,是比较经济的一种方法,应用较广。

图 5-27 调速的电路图( $L_E$  是并励绕组)

一般电动机只允许转速比额定转速增加 20%~50%,大范围调速的电动机是根据特殊用途设计制造的。

2. 在电枢电路中串联电阻的调速方法 如图 5-27 所示,在电枢电路内加入电阻(变阻器 RP)也可以调速,通常电源电压  $U$  是一定的,如果增加 RP 阻值,则电阻电压降  $I_a(R_a + R_p)$  增加,电动机的转速下降;反之,则转速升高。通常电枢电流较大,在调速过程中,调速变阻器要消耗大量的电能,故不经济,但这种调速方法较为简单。

3. 改变供电线路端电压  $U$  的调速方法 从他(并)励直流电动机机械特性可知,这种调速方法的特点是:调速平滑,转速稳定,一般只能从额定电压向下调节,因而转速只能调低不能调高,调速范围较大。但最低转速常受转差率的限制而不能太低。

采用这种方法调速,必须有专门的可以改变电压的直流电源。目前用得较多的独立可调的直流电源是

直流发电机—电动机系统 (即 G—M 机组)及晶闸管整流—电动机系统。

G—M 机组是用交流电动机带动直流发电机,然后再拖动直流电动机,因而可以通过调节直流发电机的励磁电流 (调  $R_G$ ) 来改变其磁场的强弱,得到不同的输出电压,达到调节直流电动机转速的目的,如图 5-28 所示。也可以通过调节直流电动机 M2 的励磁电流,改变其磁场强弱,从而得到 10 倍以上的大范围调速性能。通过改变直流发电机的励磁电流的方向和大小,又可以实现直流电动机启、制动和正反转控制。

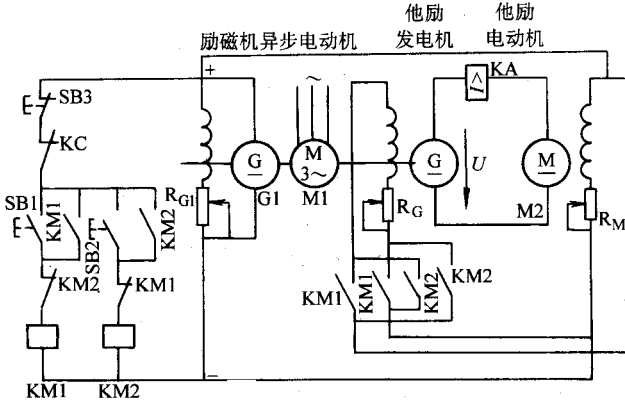


图 5-28 G—M 调速系统线路图

如欲使电动机的转速在额定值以下调节,则可保持  $R_M$  不变,把  $R_G$  增大,因而发电机的端电压降低,由于  $\Phi$  不变,电动机的转速便下降。

如欲使电动机的转速在额定值以上调节,则应保持其两端电压为额定值不变,而把  $R_M$  增大,由于电动机的励磁电流减小,所以转速升高。

G—M 机组的优点是能使生产机械的转速在较广的范围内均匀调节,调速范围可达到 1:30,其缺点是设备费用很大。近年来,由于晶闸管整流技术的发展,直流发电机有被晶闸管整流器代替的趋势,从而大大提高了效率,降低了设备费用。

在调节并励电动机的转速时,不论运行时串入电阻的数值如何,启动和制动总是在满磁通下进行的。在调速过程中,为了限制电枢电流的冲击,常在电枢电流中接入电流继电器 KA,它在电枢电流过大时动作,自动调节励磁,以限制过大的冲击电流,如图 5-28 所示。

## 二、串励电动机的启动和调速

串励电动机启动和反转与并励电动机相同,为了限制启动电流,仍需要在电枢电路接入启动电阻,但它的启动性能要比并励电动机好。串励电动机的调速原理和并励电动机基本相同,当串励电动机采用改变磁场  $\Phi$  的方法来调速时,磁场变阻器  $R_f$  必须与串励绕组并联,如图 5-29 所示。当磁场变阻器的阻值减小时,通过变阻器的电流增大,而通过串励绕组的电流减小,其所产生的磁通  $\Phi$  也随之减小,由转速公式  $n = \frac{U - K(R_a + R_f)}{C_e \Phi}$  可知,磁通减小,转速  $n$  便升高;反之,磁通增大,而转速下降。

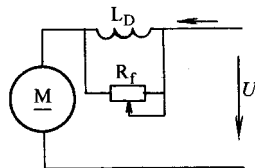


图 5-29 串励电动机的调速 ( $L_D$ —串励绕组)

调节串励电动机转速时,也可以在电枢中串入电阻,这种方法比较常用。启动电阻用于调速时,电阻发热量应按长期工作计算。

### 三、晶闸管一直流电动机的调速

直流电动机的调速,可以采用改变电枢电压和励磁绕组电压的方法来实现。晶闸管直流调速装置结构简单、效率高、工作可靠、控制精度高,因此获得了广泛的应用。

如图 5-30 所示,是一种直流电动机晶闸管整流无级调速系统,是通过改变电枢绕组电压来实现调速的。

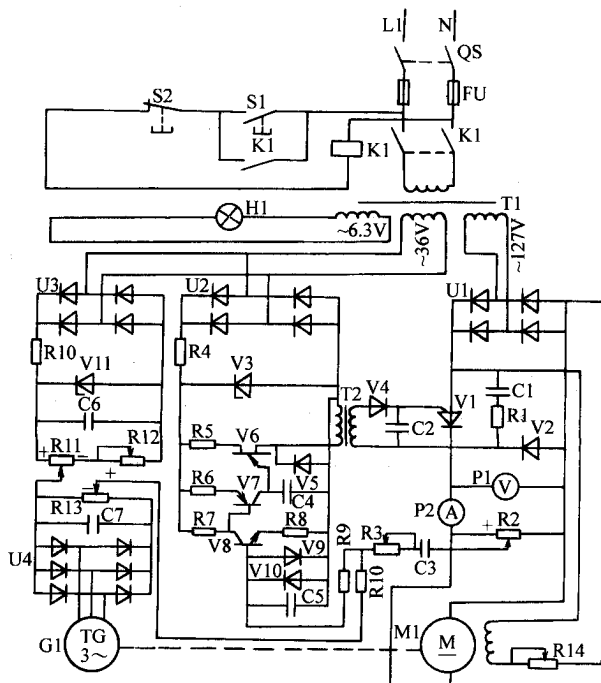


图 5-30 晶闸管直流调速系统

#### (一) 主电路

主电路中整流变压器 T1 的一次侧经接触器 K1 和控制按钮 S1、S2 进行控制,与 220V 交流电源连接。T1 的二次侧输出 127 V 交流电压,经全波桥式整流器 U1 整流后输出直流。再经晶闸管 V1 进行调压后供给直流电动机 M1。电容器 C1 与电阻 R1 组成 V1 的阻容保护环节,以防止晶闸管受过电压损坏。二极管 V2 的作用是阻隔 M1 的反电动势,使 M1 在低速运转时电流连续、运转平稳。直流电压表 P1 和直流电流表 P2,用来测量主电路中的电压和电流。M1 的励磁绕组也由 U1 直接供电,励磁电流通过调节电阻 R14 进行调节。M1 与测速发电机 G1 轴连接,进行测速反馈,稳定 M1 的转速。电位器 R2 和 R3 把 M1 的端电压经电容器 C3 进行微分反馈,当电压波动引起 M1 转速变化时,起稳定转速的作用。

#### (二) 触发电路

晶闸管的触发电路采用具有放大环节的单晶体管 V6 触发电路。由 T1 的二次绕组输出的 36V 交流电压,经整流桥 U2 整流、稳压管 V3 稳压后作为控制电路的工作电源。V3 使单晶体管 V6 得到过零的梯形波,以保证输出脉冲与主电路的电压同步,并使输出脉冲的幅值一定。

控制电路的输入信号经电容器 C5 滤波后加到晶体管 V8 基极与发射极之间。二极管 V9、V10 起正向限

幅作用,  $V_8$  作为前置放大, 再把输出信号加到  $V_7$  的基极上。

$V_6$ 、 $V_7$ 、 $C_4$  和脉冲变压器  $T_2$  等元件构成触发电路。工作时,  $C_4$  经  $V_7$  充电, 当达到  $V_6$  的峰点电压时,  $V_6$  导通,  $C_4$  经  $T_2$  放电, 于是  $T_2$  的二次绕组输出脉冲触发晶闸管  $V_1$ , 使其导通。当  $CA$  放电后电压逐步降低, 达到  $V_6$  的谷点电压时,  $V_6$  截止。这一过程不断重复, 连续对  $V_1$  进行触发。当改变  $V_7$  的基极电位时, 输出脉冲信号将产生相移。这样  $V_1$  输出的直流电压得到调节,  $M_1$  就实现了无级调速。 $V_7$  的基极电压是由给定信号决定的, 所以只要调节给定信号, 就可以改变输出脉冲信号的相位。电阻  $R_5$  是温度补偿电阻,  $V_4$  的作用是防止负脉冲送到  $V_1$  的控制极,  $C_2$  的作用是防止干扰信号。

给定信号电路的电源也是由  $T_1$  的二次绕组供电, 电压为 36V, 它是经整流桥  $U_3$  整流后, 由稳压管  $V_{11}$  稳压, 经电容器  $C_6$  滤波而得。给定信号电压的大小, 可用电位器  $R_{11}$  与  $R_{12}$  进行粗调和细调。

### (三) 反馈电路

测速反馈电压采用负反馈, 由测速发电机  $G_1$  输出并经整流桥  $U_4$  整流和  $C_7$  滤波后加到电位器  $R_{13}$  上, 反馈量大小由  $R_{13}$  调节。给定信号与测速反馈信号的差值(反馈信号的电压与给定信号的电压方向相反)再减去电压微分负反馈信号即为控制电路的输入信号。如果电动机的负载增大, 引起电动机转速下降( $n \downarrow$ ), 这时测速发电机的输出电压将减小, 即负反馈信号减小, 控制电路的输入信号增加, 晶体管  $V_7$  的基极电位下降, 发射极电流增大。使触发脉冲信号前移, 故晶闸管整流输出电压上升, 使电动机的转速上升, 即保证电动机的转速不因负载增大而下降过多。测速反馈的作用就是当电动机  $M_1$  的转速变化时(可能由负载变化或电压波动引起)起稳定转速的作用。

电源显示灯  $H_1$  由  $T_1$  的一个二次绕组供电, 电压为 6.3V。

## 四、直流电动机运行与维护

### (一) 温度的监视

温升是保证直流电动机安全运行重要条件之一, 温升过高, 就会引起绝缘加速老化, 电动机寿命降低。对 B 级绝缘绕组温升超过允许值  $10^\circ\text{C}$ , 寿命将会缩短一半。所以在电动机运行时应经常监视温升, 使温升不要超过绝缘等级的允许温升。

对绕组中埋有测温元件的电动机, 应定期检查和记录电动机内各部位温升。对没有埋设测温元件的电动机, 就要经常检查进、出口风温。通常直流电动机允许进、出口风温差为  $15 \sim 20^\circ\text{C}$ 。对较重要的电动机, 在温升较高的部位, 需埋设温度计加以经常监视。对于小型直流电动机, 一般用手摸来检查, 根据机座外表温度进行判断。

当电动机温度超过允许温升时, 应检查:

1. 电动机是否过载 当过载较严重时, 应适当减轻负载或使电动机空转冷却, 避免绕组温度过高而烧坏。
2. 冷却系统故障 若风机停转, 冷却水管堵塞、冷却水温度太高、冷却风温度过高, 过滤器积灰过多而风阻增大等, 都将引起电动机温度升高, 如发现这类故障, 应立即检查冷却系统, 排除故障。
3. 散热情况 电动机因过滤不好, 灰尘和油污粘结在绕组表面上, 造成电动机散热困难, 甚至堵塞了通风沟, 应及时清理。

### (二) 换向状况监视

良好的换向是保证直流电动机可靠运行的必要条件。直流电动机在正常运行时, 应是无火花或电刷边缘大部分有轻微无害火花, 氧化膜的颜色应均匀且有光泽。

如换向火花加大, 换向器表面状况发生变化, 出现电弧烧痕或沟道, 应分析原因, 是电动机负载过重, 还是换向故障, 要认真检查, 及时处理。

在电动机运行中, 应使换向器表面保持清洁, 经常吹风清扫, 并用干布擦换向器表面, 以免引起火花加大和环火事故。

### (三) 润滑系统监视

直流电动机润滑系统,特别是座式轴承的大型电动机,若润滑系统工作不正常,对电动机安全运行有直接影响。

在电动机运行时,应经常检查油路是否正常,油环转动是否良好,轴瓦温度、油标指示及油面位置是否正常,有无严重漏油或甩油现象。

### (四) 绝缘电阻监视

直流电动机绕组的绝缘电阻,是确保电动机安全运行的重要因素之一。对较重要的电动机,每班都应检查和记录绝缘电阻数值,一般允许为  $1M\Omega/kV$ ,但不低于  $0.5M\Omega/kV$ 。因受电动机运行温度和空气相对湿度的影响,如在停机时间较长时,由于绕组温度下降和绝缘结构中气孔和裂纹的吸潮,绝缘电阻往往大幅度下降,甚至低于允许值,但经过加热干燥后,绝缘电阻很快就可恢复。

当绝缘电阻值经常波动,其趋势是越来越低,即使加热干燥后,仍难于恢复时,应对绕组表面进行抹擦,并将碳粉、油雾等污染清扫干净。当清扫和加热干燥仍不起作用时,应用洗涤剂清洗。

为了使电动机保持较高的绝缘电阻,电动机内部应定期吹风清扫,过滤器的材料应及时更换。在电动机停机时间较长时,应使加热器通电加热,以避免绝缘电阻降低,一般只要使电动机温度高于室温  $5^{\circ}C$  时,就能防止绕组吸潮而绝缘电阻下降。

### (五) 异常现象监视

直流电动机在运行中,若发现有异常现象,应立即分析原因并作出处理。

1. 异常响声 一般在电动机运行中突然出现一种异常的响声,异声往往是电动机故障信号,可能是轴承损坏、固定螺钉脱落、电动机定心出现变化、电动机内部件脱落刮碰、定、转子相擦等故障引起,发现后应立即停机检查,排除故障。

2. 异常气味 异味中较多的是绝缘味,当电动机温度过高或绕组局部短路时,都会产生绝缘味,严重时因绝缘焦化还伴有烟雾,异味往往是事故征兆,应立即检查,排除故障。当发现电动机冒烟或起火时,必须立即停机,紧急处理。

3. 异常振动 电动机在运行中,振动突然加剧,因共鸣而引起噪声增加,可能是转动部分平衡破坏、轴承损坏和励磁绕组匝间短路所引起过大的振动,会使某些结构部件疲劳损坏,并影响换向性能,应及时处理。

### (六) 定期检修

直流电动机运行一定时间后,应进行定期检查。主要是测量一些技术状态的数据,排除在运行维护中已发现的小故障,检查和记录一些可以延期解决的故障,清理和擦净灰尘、油污,更换易损件等。

1. 对电动机外部和内部进行一次清扫,并对电动机外壳、端盖和其他结构部件等进行一次外观检查,有无损伤和锈蚀现象。

2. 检查绕组表面有无变色、损伤、裂纹和剥离现象,定子绕组固定是否可靠,补偿绕组连接线是否距离过近,焊接处有无脱焊现象。若发现问题,应及时处理。

3. 检查绕组绝缘电阻、记录数据,并与上次检修的数据进行比较,若绝缘电阻降低,应分析原因,对绕组表面和铁心上的积尘,应清除干净。

4. 检查换向器和电刷工作状态,换向器有无变形,表面有无沟道,换向器表面有无出现烧伤现象,应及时处理。

检查电刷是否已磨损到寿命限度,镜面是否良好,电刷压力是否合适,电刷在刷握内活动是否灵活等,如发现问题,应进行调整。对出现换向不良情况,还应检查片间电阻、刷距和气隙。

5. 检查转动部件和静止部件的紧固螺钉有无松动。

6. 检查轴承运行温度有无超过允许温度,对注入式换油滚动轴承,应注入适量润滑油,对轴承间隙较大或润滑油使用时间较长的轴承,应更换润滑油或轴承。



## 五、直流电动机常见故障与分析

### (一) 电动机不能起动

当电动机不能起动时,首先检查外部线路是否正常(如电源电压是否正常,熔断器是否完好),起动器是否正常,开关接触是否良好,将一切电动机以外的因素排除后,再分别检查电动机的主回路及励磁回路,逐项检查排除故障。

1. 电枢电路开路或接触不良,应测量换向器片间电阻,检查电枢电路有无开路或熔断器是否熔断,电刷与换向器是否接触不良。
2. 励磁回路开路,回路电阻过高或接触不良,应检查励磁线圈是否开路或起动器、励磁回路中各连接处是否接触不良。
3. 电枢绕组或励磁绕组匝间短路或接地,可测量电枢及励磁线圈的直流电阻。
4. 负载过重,应减轻负荷。
5. 电源电压过低,要检查电源,提高电源电压。
6. 电枢和换向器短路或接地,可将电枢线圈通以直流电,测量各相邻两换向片之间的直流电压降,检查是否短路。可用兆欧表或试灯法检查是否接地。
7. 复励电动机串励线圈接反,应更正串励线圈接线。
8. 励磁绕组中,个别励磁线圈极性接反或短接,应更正接线或测量励磁线圈的直流电阻。
9. 刷握接地,应检查接地点。
10. 控制器损坏,应检查修复。
11. 换向极线圈接反,应调整换向极线圈两端接头或用指南针检查主磁极和换向极磁性顺序,从换向器侧看,换向极与顺着电动机旋转方向相邻的主磁极极性应相反。

### (二) 电动机转速过高或过低

遇到直流电动机转速不正常时,首先检查电源电压及负载大小,然后再检查电动机的励磁回路及电刷位置是否正常。如果伴有异常响声,可能有励磁绕组或电枢绕组短路现象存在。

1. 电源电压(电枢电压)过高或过低,要检查电源,调整电源电压。
2. 电刷偏离正常位置,带换向极的直流电动机在正常运行时,电刷应在中心线上。如果电刷顺电枢转向偏移一个角度,使转速下降,当电刷逆电枢转向偏移一个角度,使电动机转速增高。可用感应法调整电刷位置。
3. 负载过大,应减轻负载。
4. 励磁绕组短路或接线错误,应找出短路处进行处理或改正接线。
5. 磁场过强或过弱,或励磁绕组断(串励电动机不允许空载起动或空载运行),应检查励磁电路有无断路处,并调节励磁电流。

### (三) 电刷下冒火花,换向器和电刷温度太高

1. 电刷不在中性线上,可用感应法调整电刷位置。
2. 主磁极和换向极的顺序不对,应调整换向极线圈两端接头或用指南针检查主磁极和换向极极性顺序。
3. 紫褐色火花出现在电刷后端(按旋转方向),说明换向极磁场太强;出现在电刷前端说明换向极磁场太弱。前者可减少换向极的匝数或增大换向极与电枢的气隙距离,后者可增加换向极的匝数或减小换向极与电枢的气隙距离。
4. 换向器表面不平、不圆、偏心、振动太大、个别换向片或云母突出、换向器表面失去光洁度、电刷与刷握配合不当、刷握及联接件刚度不足等都会引起电刷跳动,造成电刷下面有白色火花。换向片短路或接地会使电刷产生兰色火花,并使换向器温度升高,此时应修理换向器、下刻云母片,检查换向器短路或接地。
5. 电刷型号或尺寸不符,同一台电动机用不同型号的电刷,应更换合适的电刷,通常一台电动机只能采

用同一型号的电刷。

6. 电刷质量不好,也可产生紫褐色火花,应更换质量合格的电刷。

7. 电刷压力过大或过小,应调整各电刷压力,力求一致。当压力过小时,电刷与换向器接触不良;当压力过大时,摩擦加剧,有可能引起火花。当每组电刷压力不均匀时,压力大的电刷将分担较大的电流,电流密度过高就会引起火花。一般电动机可按 $0.015 \sim 0.025\text{MPa}$ 选择,牵引电动机和起重电动机可按 $0.025 \sim 0.04\text{MPa}$ 选择。

8. 电刷架上各电刷臂之间的距离不等,或同一电刷臂上的各刷握不在同一条线上,应调整各电刷臂或各电刷位置。

9. 电刷与换向器表面接触不良,换向器表面粗糙电蚀,磨损严重,电刷与换向器接触面不相吻合,刷握过紧,油污或电刷粉太多等,都可能产生红色火花。应清洗油污,用细砂纸打光电刷与换向器的接触面,使其光滑,吻合面积应达80%以上。

10. 电枢线圈断线,换向器与电枢接头焊接不良,或因脏物太多,造成相邻两换向片短接,都会产生绿色火花,并可能将换向片烧黑出现严重灼痕。应找出断线或焊接不良处,焊好后且用细砂纸将换向器表面磨光,消除换向片的短接。

11. 电枢线圈匝间短路或接地等故障均能使各支路的电流严重不平衡,使某些电流密度过大而产生换向火花。严重时能使与之相连的换向片产生灼痕。可将电枢线圈通以直流电,测量各相邻两换向片之间的直流电压降,检查是否短路,用兆欧表或试灯法检查是否接地,找出问题及时修理。

12. 励磁绕组短路或接地,应测量励磁线圈的直流电阻和绝缘电阻。

13. 复励电动机中某励磁绕组断路,应分别检查各并联回路的励磁线圈和连接线。

14. 电动机过载,应减轻负荷。

15. 均压线与换向片焊接不良或断线,应重新焊接或更换断线的均压线。

16. 换向极极性接错,即使轻载也会产生剧烈的火花,同时换向器灼黑、过热且伴有嘎嘎的强烈噪声,使电动机无法运行。此时可调换与刷杆相连的两线头即可。

17. 电枢大修后,电枢绕组与换向器铜片连接错误,应检查电枢接线。

#### (四)换向片间隔烧黑

在换向器圆周上,每隔一定片数有一换向片烧得发黑,片边有严重的灼痕(相隔片数往往是等于换向片数与槽数之比的倍数),其原因如下:

1. 电刷位置不在中性线上。

2. 换向极磁场强度不合适。

3. 电枢线圈断路或与换向片焊接不良。

#### (五)电动机沿某方向转动时,电刷下的火花比反方向旋转时大

1. 电刷不在中性线上,用感应法调整电刷位置。对于可逆旋转的电动机,电刷要严格位于中性线的位置上,对于单方向旋转的电动机为改善换向,允许电刷逆转向偏移 $1 \sim 2$ 片换向片距离。

2. 电刷架上各电刷臂之间距离不等,应调整各电刷臂或各刷握位置。

3. 电动机没有换向极或换向极匝数不够,应更换有换向极的电动机,或增加换向极的匝数,减少换向极与电枢的气隙长度。

#### (六)电动机振动声音不正常

1. 转速过高,应测量转速,调整到额定转速。

2. 定、转子间气隙不均匀,甚至扫膛。应测量并调整定、转子气隙。

3. 轴承间隙已超过规定,应更换新轴承。

4. 轴弯,应校正。

5. 安装螺钉松动,某些零件固定不牢,应紧固。

6. 传动机构发生故障或风扇和内部零件相撞,应及时修理。

7. 电枢大修后没找动平衡,应找动平衡。

## (七)电动机振荡

直流电动机振荡是指电流和转速发生剧烈的变化。其原因如下：

1. 电刷不在中性线上。
2. 串励绕组或换向极绕组接反。
3. 励磁电流太小或励磁电路断路。
4. 电源电压波动。

## (八)电动机内部冒烟或冒火

1. 电刷下火花过大。
2. 电枢线圈短路,这时除有强烈的火花外,还有焦味。
3. 换向器片间的绝缘片升高,或个别换向器片升高。在这些升高片之间及电枢线圈各元件之间充满了电刷粉末和油污引起燃烧。
4. 电动机内部各引线的连接不紧,甚至断路。
5. 电动机过载。

## (九)环火

1. 换向器片间电压太高。
2. 表面状态不好(云母沟中积有炭粉、云母片和换向片凸片、铜毛刺等),且维护不良。
3. 并头套开焊。
4. 金属异物落在换向器表面上。
5. 冲击负载过大。
6. 电控系统电压负反馈极性接错引起的自励是环火最危险的情况。

# 六、直流电动机故障检查

## (一)绕组故障检查

1. 电枢绕组匝间短路和层间击穿 绕组层间击穿将会产生很大的短路电流,使电动机保护跳闸停止运行。匝间短路会使换向火花加剧,连接的换向片被烧坏,短路电流使升高片接头焊点熔化,引起线圈发热。短路电流产生强烈电枢反应会使磁通减少,使电动机转速升高、电流增大。如短路匝数较多,而换向火花将使电动机无法运行,严重时造成线圈烧坏,甚至烧坏电枢磁铁。若是均压线绕组或波绕组、蛙绕组,常会引起换向片极距烧伤的现象。

(1)对比法 对匝间绝缘隐患及故障,可用冲击波匝间试验进行检查。将端子2放到某一个换向片上,而端子1和3则分开放在左右对称的两换向片上,片数可根据仪器所加电压大小而定,一般在10片以下,但两边片数一定相等,如图5-31所示。如示波器出现不同的不重合的波形,说明有匝间短路或有绝缘隐患现象,如示波器图形完全重合,说明绝缘正常。绕换向器测试一周后,即可发现有无故障,并确定故障的线圈槽数。

(2)电压降法 将在相距一个极距的两换向片上放两块电刷,或利用电动机相邻的一对电刷,并施加低压直流电,使其电流等于额定电流的15%左右,在保证电流不变的情况下,用精密电压表测量相邻两换向片之间的电压降,如图5-32所示,在测试一周中,如被测电压比正常电压小很多或接近于零时,说明连接该两换向片的线圈有短路故障。

(3)电阻法 可用电桥测量换向片间电阻来寻找故障点,但对于大型电动机因阻值太小,测量较困难。

(4)感应法 可用开口变压器和槽口加小铁片的感应法进行检查,当短路点接触不良时,因电流较小,则经常检查不出来。

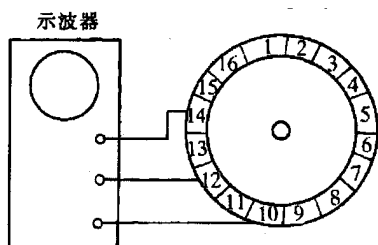


图 5-31 用对比法测试短路故障

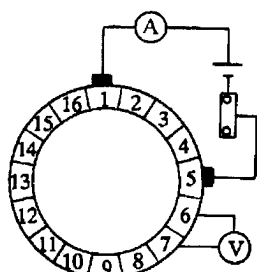


图 5-32 用电压降法寻找短路故障

(5)另一种感应法是将 100m 软胶线套在钳台上,钳口开到以被试电枢刚好放入且能转动为宜,并在钳口下部放一适合厚度的木块支撑住电枢,使电枢放入钳口恰好处于钳口中心。软线两端接到适当的低压交流电源上(约 20~30V),如图 5-33 所示,这时线圈的交变磁通穿过被测电枢,在电枢的各线圈上感应出交变电动势,如有短路线圈存在,必有短路电流出现,此时短路电流在短路线圈所处的槽上锯片振动,因而指示短路故障的存在和位置。这样逐渐转动电枢并将锯片移至全部槽上进行试验,即可找出短路故障。此法可用于较小的电动机或单相电钻。

电枢绕组短路故障通常要从槽中取出来重包绝缘,进行修理。

2. 电枢绕组接地 电枢绕组一点接地对电动机正常运行和换向影响很大,但可引起接地保护动作或报警。对于两点接地将会导致绕组短路而烧毁,严重时将会烧坏电枢铁心,造成危害性更大,应引起足够重视。

(1)兆欧表法 用兆欧表检查绕组的绝缘电阻,必要时可用万用表测量它与机壳或转轴的电阻值来进一步判定,并要区分是电枢绕组和换向器接地,还是换向极绕组、补偿绕组或串励绕组接地。

电枢绕组接地大多在槽口处,为具体判定接地部位,确定故障可疑点,用兆欧表(当绝缘电阻很低时可用万用表)测量对地电阻有无变化,如有变化,即为接地故障点。

(2)电压表法 如绕组是叠绕组时,在径向相对的两换向片上通电,用电压表的一端接到转轴上,另一端依次接触所有换向片进行测试,其电压值越接近故障点读数越小,当读数最小或者为零,即为故障点,如图 5-34 所示。用此法时电枢绕组是按两并联支路通电,当绕组某点接地时,不仅该换向片对地电压为零,与该点对称的等电位点的换向片虽未接地,但对地电压也为零,如图 5-35 所示。为避免将没有接地的线圈误认为接地,可改变一下通电点。如将 1、9 片通电改为 3、U 片通电,将  $V_6 = V_{12} = 0$  变为  $V_6 = V_{16} = 0, V_{12} \neq 0$ ,即真正的接地点为第 6 片。

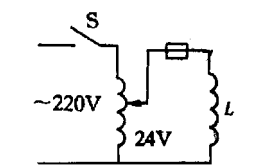


图 5-33 另一种感应法

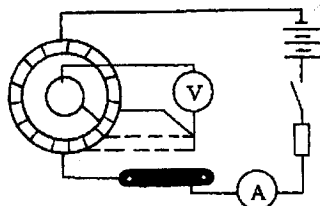


图 5-34 寻找电枢绕组接地故障

如为波绕组,则通电点应为相距半个换向片节距的两块换向片,用万用表的两端依次在一个换向片节距范围内移动,如电压值最小时为接地线圈处,只要试验一个换向片节距的片数即可。经找出接地的一周线圈后,再将对其中有怀疑的个别线圈进一步分别测试,从而找出真正的线圈接地点。

(3)冒烟法 将通电的调压器两端,一端可用裸铜线在换向器上绕几圈,另一端接到电枢轴上,如果电压逐渐上升,其电流通过接触不良的故障点时,形成弧光将故障点绝缘材料烧损冒烟,从而找出故障点。

(4)逐点逼近法 可先在绕组的中点处烫开一组并头套,测量任意一组中点两边的绝缘电阻,检查是哪一边接地,再在有接地点的那边的中点处,继续烫开一组并头套,检查是哪一边接地。按逐步淘汰的方法继续检查下去,很快即可找出故障点。

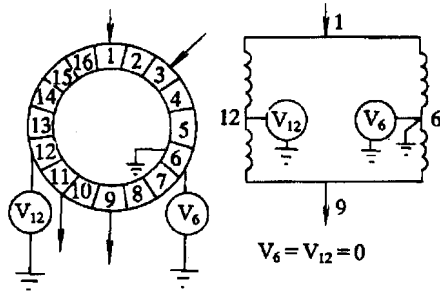


图 5-35 寻找电枢绕组接地故障点时发现虚接的原因

如果电枢绕组接地在槽口处,可在故障线圈下楔入玻璃丝布板、云母板、聚酰亚胺等薄膜绝缘材料。如在槽内接地,应按绕组短路办法一样拆出故障线圈,重包绝缘或更换新线圈。

3. 电枢绕组断线和并头套开焊 绕组断线或并头套开焊将会引起较大的换向火花,火花常呈绿色且带劈啪声,与故障线圈直接相连和通过均压线相连的换向片出现极距烧伤,甚至将会烧伤绝缘并使电枢绕组接地。

电阻法 判定断线或开焊的故障点,常用测量片间电阻的方法,详见换向片间短路故障的检查方法。当测量片间电阻时,可辅以用橡胶木槌轻敲被测的并头套,如发现测量值有变化即为故障点。

对端部断线的线圈,应在焊好后重包绝缘,对开焊的并头套应进行重焊,必要时应按短路故障进行修理。

4. 电枢绕组线圈与换向片接错 一般在电动机试运行时,将会出现较明显的不正常换向火花,此故障将比线圈短路还严重,甚至会在极短时间内引起接错线圈烧损。所以,在电动机试运行前应仔细检查,避免事故发生。

(1) 指南针法 在线圈左右两端交叉接反,如图 5-36 所示,将直流电引入到径向相对的两换向片上,把指南针依次放到每个电枢铁心的槽上,当指南针出现与正常情况下相差  $180^\circ$  时,即表示槽中线圈两端接反,将两端倒换,即可恢复正常。

(2) 感应法 将全部电刷提起,在主极线圈中通入直流电,在中性线位置附近的相邻两换向片上接一毫伏表,记录通电瞬间所感应产生的电动势方向,逐个检查转动到中性线位置附近的各相邻换向片。如果发现电动势方向相反时,即说明线圈两端接反,调换两端头即可排除故障。

(3) 直流压降法

1) 当相邻两线圈同性端颠倒时,如图 5-37 所示,这时 2' 线圈被短接,用直流压降法测量相邻两片间电阻时,在 2 和 3 及 3 和 4 之间没有电压,而 2 与 4 之间电压降与正常值一样,应把 1'、2' 两线圈的同性接头次序倒过来,电动机即可恢复正常运行。

2) 当相邻三个线圈端头接错,如图 5-38 所示,用直流压降法检查片间压降时,2、3 换向片间压降与正常情况相反,1 与 2 及 3 与 4 之间片间压降为正常时的两倍,可将三个线圈的接头按顺序调换过来电动机即可恢复正常运行。

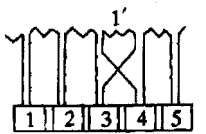


图 5-36 线圈两端

“交叉”接反

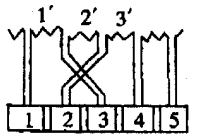


图 5-37 相邻两线圈同性端颠倒

圈同性端颠倒

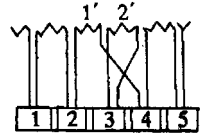


图 5-38 相邻三个线圈端头接错

圈端头接错

3) 三个相邻线圈接错的另一种情况,如图 5-39 所示,当用直流压降法检查时,出现 2 与 3 片间压降与正常时方向相反,1 与 2 及 3 与 4 的片间压降为正常值的两倍,按顺序调换三个线圈接头即可。

(4) 兆欧表或试灯法 相邻两线圈同性端头接倒,见图 5-39,也可用兆欧表或试灯来检查,则 2 与 3 及 3 与 4 片之间为断线情况,由于线圈 2 为换向片 3 所短接,使电动机运行时将很快被烧毁,应将两线圈的 1'、2'

同性接头次序倒换即可。

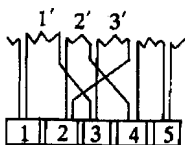


图 5-39 相邻三个线圈端头接错的另一种情况

5. 定子绕组匝间短路 当励磁绕组匝间短路时,使电动机空载转速上升,线圈局部发热,部分刷架下的换向火花加大。当电动机绕组为多极叠绕组又无均压线时,火花会非常严重。若换向极绕组与补偿绕组的连线相碰可能引起极间短路,将会出现强烈的火花,严重时造成环火,应引起足够重视。

交流降压法 一般用交流降压法来检查励磁绕组的匝间短路,将交流电通过调压器加到励磁绕组的两端,分别测量各极励磁绕组的压降,如图 5-40 所示。若出现在某极下的交流压降比其他磁极下的小很多时,说明该励磁绕组有短路故障。

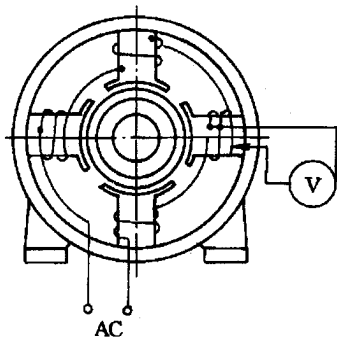


图 5-40 交流降压法测量匝间短路

对于框架式励磁绕组,如表面断线或短路,可去掉损坏的几匝,用同样规格导线对接上,补绕足够的匝数,焊好引线片,再用玻璃丝带扎紧,重新浸漆;如线圈内部短路,应拆掉全部线圈,用同样规格导线重新绕制,并进行浸漆处理。

6. 定子绕组接地 同电枢绕组接地故障一样,一点接地可引起接地保护动作或报警,两点接地就会烧坏绕组,应引起足够重视。

(1) 兆欧表法 将各线圈接头拆开,用兆欧表逐点测量定子绕组(包括主极绕组、换向绕组或补偿绕组)的绝缘电阻,寻找故障。

(2) 电压表法 在励磁绕组两端通入直流电(并励与串励绕组应与电枢回路断开),将毫伏表一端接地,一端依次与励磁绕组极间连线接触,如图 5-41 所示,当某线圈两端测得电压最低时,说明该线圈接地,其接地点在偏向电压最低点一端。

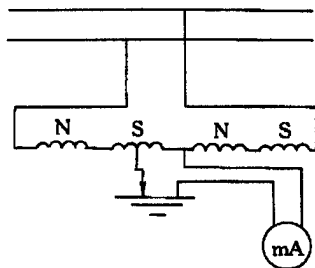


图 5-41 寻找某线圈接地方法

(3)冒烟法或试灯法 当找到故障线圈后,无法确定短路故障点时,又确证不是灰、油使绝缘电阻下降,可用冒烟法进行检查,或用交流 220V 试灯进行检查,通常短路点会发生放电声、电火花或烟雾,根据这些迹象确定出接地点。

当故障点在槽口或线圈端部时,可塞入高强度绝缘薄膜或薄绝缘纸来排除接地故障。如对地的极身绝缘内部损坏,应更换绝缘。

## (二)换向器故障检查

换向火花是衡量直流电动机换向优劣的主要标准,是电动机能否正常运行的重要标志,而直流电动机最常见的故障是换向故障,最明显的标志是换向火花过大。

1. 环火故障 直流电动机在某些恶劣的负载条件下运行或存在片间短路时,正负极性电刷之间可能形成一股强烈的环形电弧并伴有闪光或震耳欲聋的巨响,这种现象叫做环火。环火可在极短的时间内对电动机造成很大的损伤或严重破坏。如换向器成段烧毁、刷架和刷握成组烧化、刷辫烧断、电刷碎裂,使电动机根本无法继续运行。

首先检查电控系统的负反馈极性是否接反,再检查并头套是否开焊,片间及换向器的 $3^{\circ}$ 表面是否太脏。如果经常出现环火,应检查片间电压是否过高,不得已时可降低电压运行,但电动机出力也随之降低。

电动机出现环火后,换向器表面尤其是端头损坏最严重,重者应重车换向器表面,轻者可重新砂磨换向器,并清沟倒棱,被损坏的电刷必须更换,刷架和刷握必须进行修整,甚至更换,还要检查定子绕组,电枢绝缘电阻、片间电阻、轴瓦是否受损等。

2. 接地故障 换向器接地一般是V形云母环表面污染爬电、损坏和击穿引起的,或者由于换向器内部异物造成的。

首先用兆欧表检查,为快速准确检查出故障点,可先在绕组的中点处烫开一组并头套,测量任意一组中点两边的绝缘电阻,检查哪一边接地,再在有接地点的那边的中点处,继续烫开一组并头套,检查是哪一边接地。按逐步淘汰的方法继续检查,很快即可找到故障点。

如果是表面污染爬电接地,可用毛刷刷去云母环外露部分上的积灰和污垢,或用酒精和汽油进行清擦。如果接地故障排除后,还要在云母环外露部分上涂上灰磁漆。如果是换向器接地故障,应检修V形环或紧固圈下薄膜,再烫开全部并头套,拆下换向器。对V形环是局部击穿的,通常可用局部修补法进行修复。

3. 片间短路 换向片间短路将造成换向不良、火花过大,严重时将造成电枢线圈烧损,亦应引起足够的重视。

片间短路可通过片间电阻来确定,通常用直流电压、电流表法,即把直流电压(最好是电流)依次通入换向器相邻两换向片上,并用毫安表测量它们的电压降。正常时,测量值基本不变,如果片间短路,测量值小于正常值。

为了确定片间短路的故障点,可用图 5-42 来检查,从短路换向片的升高片旁,用电压表测量测磁线圈中是否有感应电动势,再把测磁线圈放在换向片上,并检查其中有无感应电动势。如果前者有感应电动势后者没有,说明短路故障在升高片端,否则在换向片的另一端。也可从换向片另一端通入上述电流,将测磁线圈放在升高片旁和换向器上来测量、检查。

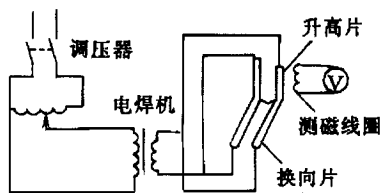


图 5-42 确定片间短路故障点线路

对于云母沟中导电物质造成的短路,可用锯片刀去掉导电物质并吹擦干净,而对 $3^{\circ}$ 表面内的金属异物或云母环碳化造成的短路,应拆下云母环来修理或更换云母环。

4. 突片和变形故障 运行多年的换向器,由于片间云母和V形云母环中含胶量挥发而干缩,拉紧螺杆冷

缩热胀后的伸长,致使片间压力降低,换向片在离心力作用下甩出,换向器出现突片和摆度增加,导致电刷跳动、火花加大。

用表头装有带螺纹的圆形胶木块的百分表来测量装胶木块是为避免云母沟对表针指示的影响。也可用专门测量换向器摆度和突片的袖珍式仪表,它被放在临时安装的电动机上半部某刷架上的专用刷盒内,其测量头垂直地放在换向器表面上,表中的记录纸带自动记录转子,旋转一周时的换向片径向高度的变化曲线,如图 5-43 示,从曲线上可以量出摆度和突片值。

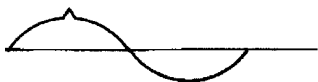


图 5-43 摆度、凸片实测曲线

5. 换向器表面烧伤、条痕、沟槽和挤铜故障 换向器表面在运行中建立起色调均匀且有光泽的氧化膜,是电刷与换向器滑动接触的重要因素,是保证电动机正常运行的重要条件。电动机换向不良时,首先是氧化膜遭到破坏,然后火花加大,换向器表面烧伤。

各种缺陷都可以从换向器表面状况看出来,这些都是换向不良的表现,也将导致换向器的进一步恶化,应尽快处理,以排除不必要的换向故障。

对于烧痕、节痕、挤铜及氧化膜不正常,首先对换向器进行清沟、倒棱角或片间电阻测定,也可经无火花区试验进行换向强度调整,或者更换电刷,再用砂磨方法清除不良现象,重建氧化膜后投入使用。对于条痕和沟槽在超过允许值后通常应进行车削加工,重建氧化膜后投入运行。如果氧化膜不能建立的换向器,应选择和更换电刷。

6. 换向器短路或接地 换向片短路或接地会使电刷产生蓝色火花,并使换向器温度升高。

用试灯法检查,用 220V 交流电源,每端接一试棒,其中试棒与电源间串联一只 25~40W、220V 灯泡,用试棒接触换向器两相邻换向片,逐渐转动换向器,改变试棒对换向片的位置,检查换向器片间绝缘,绝缘良好时电路不通,试灯不亮,如果试灯亮了,就表示试棒接触的两相邻换向片短路。同样,一个试棒接触换向片,另一个接触转轴即可检查换向器的对地绝缘及电枢绕组对地绝缘。

检查确定有换向片短路或有接地故障,应按上述 3 和 2 中的方法进行修理。

### (三) 电刷故障检查

电刷是直流电动机的重要部件,不仅要起电动机转动部分与固定部分之间传导电流的作用,还将完成换向的重任。从大量的直流电动机运行、维护经验中可知,电刷对电动机能否正常运行,换向是至关重要的,许多电动机因电刷选用不当而造成换向不良,甚至不能正常运行。改用了合适电刷,改善了换向,使电动机便能长期稳定正常运行。

1. 电刷破裂、刷辫折断、压板压簧折断、铆钉松动脱落 上述情况将会引起电动机环火,另外换向器表面状况不良、刷握与换向器表面距离太大、机械松动、电动机运行中振动或抖动、负载分配不均、电刷湿度过低、温升太高或电刷质量不好及型号不对等都会引起上述故障。

如果发现上述现象,先要更换电刷,改善电刷安装条件,调整刷握与换向器的距离,处理并清洗换向器表面不良状况,研磨电刷使负载分配均匀,增加周围空气湿度,排除电刷振动的机械原因。

2. 电刷磨损快 由于换向器表面状况不良、电刷与换向器接触不好、电动机火花太大、电刷压力太大、电刷型号选用不合适、温度太高、湿度太低、粉尘过多等引起电刷磨损快。

首先要调整电刷的压力,增加周围空气湿度,还要改善换向及换向器表面状况,使其与电刷接触良好,减少火花,必要时可更换耐磨性好的电刷。

3. 电刷热红 由于电刷压力太大,电刷卡在刷握上,电刷型号不对,接触电阻大,换向器表面有粗条痕,负载条件恶劣,火花过大等所造成的。

首先要调整电刷压力,必须使电刷在刷握内活动自如,改善换向及换向器表面不良状况,必要时更换新型号电刷。

4. 电刷不在中性线上 电刷不在中性线上将会引起换向超前或延迟,同时还会影响电动机特性,如电刷



偏离中性线位置较大时,电动机空载时会产生火花。

可用感应法调整电刷位置,将低压直流电源(小型电动机也可用干电池)经按钮接到并励绕组两端,把零位在表盘中间的毫伏表用试棒与电刷接触,在按下或松开按钮的瞬间,电枢产生感应电压,使表针左右偏摆,沿换向器周围方向变换电刷位置,直至表针不再偏摆为止,表示电刷即位于中性线位置。或将几组测量值绘图,连接各点的直线与横座标的交点即是电刷中性线的位置,如图 5-44 所示。可将全部电刷提起,用毫伏表依次测量相隔一个极距的两换向片,当毫伏表读数为最小时,即是电刷中性线位置。

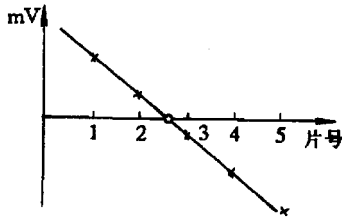


图 5-44 中性线确定法

## 七、直流电动机常见故障及处理

### (一) 直流电动机故障及处理(表 5-12)

表 5-12 直流电动机常见故障与处理

序号	故障现象	故障原因	处理方法
1	绝缘电阻低	1. 电动机绕组和导电部分有灰尘、金属屑、油污 2. 绝缘受潮 3. 绝缘老化	1. 用压缩空气吹净,或用弱碱性洗涤剂水溶液进行清洗,然后干燥处理 2. 烘干处理 3. 浸漆处理或更换绝缘
2	电枢接地	1. 金属异物使线圈与地接通 2. 绕组槽部或端部绝缘损坏	1. 用 220V 小试灯找出故障点,排除异物 2. 用低压直流电源测量片间压降或换向片和轴间压降找出接地点,更换故障线圈
3	电枢绕组短路	1. 换向片片间或升高片间有焊锡等金属物短接 2. 匝间绝缘损坏 3. 接线错误	1. 用测量片间压降的方法找出故障点,清除污物 2. 更换绝缘 3. 纠正电枢线圈与升高片的连线
4	电枢绕组断路	1. 线圈和升高片并头套焊接不良 2. 接线错误	1. 补焊连接部分 2. 纠正电枢线圈与升高片的连接
5	电枢绕组接触电阻大	1. 升高片和换向片焊接不良 2. 线圈和升高片并头套焊接不良	1. 补焊和加固升高片与换向片的连接 2. 补焊连接部分

序号	故障现象	故障原因	处理方法
6	电动机过热	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 负载过大</li> <li>2. 电枢绕组短路</li> <li>3. 电枢铁心绝缘损坏</li> <li>4. 主极线圈短路</li> <li>5. 环境温度高,通风散热情况不良,电动机内部不清</li> <li>6. 工作电压高于额定电压</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 减轻或限制负载</li> <li>2. 按上述电枢绕组短路故障处理</li> <li>3. 进行绝缘处理</li> <li>4. 找出故障点,排除短路故障</li> <li>5. 检查风扇是否脱落,风扇转动方向是否正确,通风道有无被堵塞,清理电动机内部,改善周围冷却条件</li> <li>6. 降低电压到额定值</li> </ol>
7	电动机不能起动或转速达不到额定值	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 负载过大</li> <li>2. 电刷不在中性线上</li> <li>3. 电枢的电源电压低于额定值</li> <li>4. 换向极线圈接反</li> <li>5. 励磁线圈断路、短路、接线错误</li> <li>6. 起动机接触不良,电阻不合适</li> <li>7. 电枢绕组或各连接线有短路或接地故障</li> <li>8. 复励电动机的串励绕组接反</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 减轻负载</li> <li>2. 用感应法调整电刷位置</li> <li>3. 提高电源电压到额定值</li> <li>4. 将换向极线圈的端钮相互更换位置</li> <li>5. 纠正接线错误、消除短路、断路故障</li> <li>6. 更换合适起动机</li> <li>7. 检查电枢绕组和各连接线,并进行处理</li> <li>8. 可将串励绕组的两端钮更换即可,或按电动机所附的接线图正确接线</li> </ol>
8	电动机转速过高	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 电枢电压超过额定值</li> <li>2. 电刷不在中性线上</li> <li>3. 励磁电流减少过多或励磁电路有断路故障</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 降低电枢电压到额定值</li> <li>2. 可用感应法调整电刷位置</li> <li>3. 增加励磁电流或检查励磁电路是否断路</li> </ol>
9	电动机振荡,即电流和转速发生剧烈变化	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 电动机电源电压波动</li> <li>2. 电刷不在中性线上</li> <li>3. 励磁电流太小或励磁电路有断路</li> <li>4. 串励绕组或换向极绕组接反</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 检查电源电压</li> <li>2. 用感应法重新调整电刷位置</li> <li>3. 增加励磁电流或查出断路处进行修理</li> <li>4. 纠正接线</li> </ol>

序号	故障现象	故障原因	处理方法
10	电刷下火花严重,换向器和电刷刷剧发热	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 电刷型号或尺寸不符</li> <li>2. 电刷不在中性线上</li> <li>3. 电刷的压力过大或过小</li> <li>4. 电刷质量不良</li> <li>5. 电刷与换向器的接触面未磨好或接触面上有油污</li> <li>6. 电刷架上各电刷臂之间距离不相等或同一电刷臂上的电刷握不在一直线上</li> <li>7. 换向器偏心,振摆、换向器表面不平 换向器片间云母突出</li> <li>8. 换向极绕组接反</li> <li>9. 电枢绕组有短路或接地故障</li> <li>10. 主磁极和换向极的顺序不对</li> <li>11. 电动机过载</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 应更换电刷</li> <li>2. 用感应法重新调整电刷位置</li> <li>3. 调整各电刷压力大小一致</li> <li>4. 更换质量合格的电刷</li> <li>5. 磨光电刷接触面或清洗油污</li> <li>6. 调整各电刷臂或各刷握的位置</li> <li>7. 修理换向器</li> <li>8. 改正接线</li> <li>9. 在电枢绕组中通入低压直流电,测量各相邻两换向片之间直流电压降,检查有无短路,用兆欧表或试灯检查有无接地,进行修理</li> <li>10. 用指南针检查各磁极的极性</li> <li>11. 应减轻负载或换一台容量较大的电动机</li> </ol>
11	电动机向某一方向旋转时,电刷下的火花较反方向旋转时大	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 电刷不在中性线上</li> <li>2. 电动机未有换向极或换向极的安匝数不够</li> <li>3. 电刷架上各电刷臂之间的距离不相等</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 用感应法调整电刷位置,对可逆电动机应将电刷严格固定于中性线上</li> <li>2. 应更换一台有换向极的电动机或增加换向极的安匝数</li> <li>3. 调整各电刷臂或各刷握的距离</li> </ol>
12	在换向器圆周上,每隔一定角度的换向片烧焦发黑,每次清理修整,仍是这几片发黑	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 这些发黑烧焦的换向片与电枢线圈之间焊接不良</li> <li>2. 连接这些换向片上的均压线焊接不良或有断路</li> <li>3. 连接这些换向片上的电枢线圈有断路</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 重新焊接</li> <li>2. 重新焊接或更换断路的均压线</li> <li>3. 更换或修复断路的电枢线圈</li> </ol>
13	电动机内部冒火或冒烟	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 电刷下火花太大</li> <li>2. 电枢绕组有短路</li> <li>3. 电动机过载</li> <li>4. 换向器的升高片之间及各电枢绕组之间充满了电刷粉末和油垢,引起燃烧</li> <li>5. 电动机内部各引线的连接点松动或有断路</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 检查电刷和换向器的工作状况</li> <li>2. 检查各电枢线圈发热是否均匀,或在电枢中通入低压直流电,测量各相邻换向片之间电压降</li> <li>3. 减轻负载或更换一台容量较大的电动机</li> <li>4. 清除油垢和粉末,必要时烘干处理</li> <li>5. 检查各连接线的连接点</li> </ol>

序号	故障现象	故障原因	处理方法
14	电动机振动	1. 电枢不平衡 2. 电动机的基础不坚固或固定不牢 3. 机组,电动机轴线定心不正常	1. 重新校正电枢平衡 2. 增强基础且坚固 3. 重新调整好机组轴线定心
15	滚动轴承发热,有噪声	1. 滚珠磨损 2. 轴承与轴配合太松 3. 轴承内润滑脂充得过满	1. 更换轴承 2. 使轴与轴承的配合精度符合要求 3. 减少润滑脂
16	滑动轴承发热、漏油	1. 油牌号不对,油内含有杂质和脏物 2. 油箱内油位过高 3. 油环停滞,压力润滑系统的油泵有故障,油路不畅通 4. 轴颈与轴瓦间隙太小,轴瓦研刮不好 5. 轴承挡油盖密封不好,轴承座上下接合面间隙大	1. 更换润滑油,清除杂质 2. 减少油量 3. 更换新油环,消除油路故障,保证有足够的油量 4. 研刮轴瓦,使轴颈和轴瓦间隙合适 5. 改进轴承挡油盖的密封结构,研刮轴承座接合面

## (二) 换向故障及处理(表 5-13)

表 5-13 换向故障与处理

序号	故障现象	故障原因	处理方法
1	换向不良	1. 换向器表面状态不良	1. 经常维护,并进行表面处理
		2. 换向器偏心 and 变形	2. 车圆换向器
		3. 电刷振动	3. 改善换向器表面,减小电刷与刷握间隙
		4. 电刷型号不符	4. 选用合适型号电刷
		5. 电刷弹簧压力过小	5. 调整电刷压力
		6. 电刷不在中性线上	6. 用感应法重新调整中性线
		7. 刷距不均匀	7. 调整刷距
		8. 电动机振动	8. 应校正平衡
		9. 电动机过载	9. 减轻负载
		10. 电枢绕组片间短路	10. 清理片间云母沟中金属物
		11. 补偿和换向极绕组短路	11. 消除短路故障
		12. 补偿和换向极绕组接线错误	12. 改正接线
		13. 并头套开焊	13. 补焊并头套

序号	故障现象	故障原因	处理方法
2	换向器呈现条纹	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 电刷型号不对</li> <li>2. 电刷电流密度过低</li> <li>3. 刷面镀铜</li> <li>4. 湿度过高</li> <li>5. 温度过高</li> <li>6. 油雾附着</li> <li>7. 有害气体</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 更换电刷</li> <li>2. 避免在 <math>2 \sim 5A/cm^2</math> 电流密度下长期运行</li> <li>3. 防止潮气和尘埃进入, 选用合适电刷</li> <li>4. 防止潮气进入电动机内部</li> <li>5. 加强通风冷却</li> <li>6. 防止油雾进入</li> <li>7. 防止有害气体进入</li> </ol>
3	换向器表面烧伤	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 电刷换向性能差</li> <li>2. 电枢不在中性线上</li> <li>3. 换向器变形</li> <li>4. 并头套开焊</li> <li>5. 刷距、极距不等</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 选用抑制火花能力强的电刷</li> <li>2. 调整电刷到中性线上</li> <li>3. 车圆换向器</li> <li>4. 补焊并头套</li> <li>5. 调整刷距、极距</li> </ol>
4	换向器磨损快呈铜本色	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 电刷磨损率太大</li> <li>2. 电刷与换向器接触不良</li> <li>3. 电刷电流密度太低</li> <li>4. 电刷中含有碳化硅和金刚砂</li> <li>5. 湿度过低</li> <li>6. 空气中有耐磨性尘埃</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 选用润滑性好电刷</li> <li>2. 改善接触面</li> <li>3. 去掉部分电刷</li> <li>4. 选用合适电刷</li> <li>5. 人工建立氧化膜</li> <li>6. 净化周围空气</li> </ol>
5	换向片边缘毛刺	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 电刷卡死在刷握内</li> <li>2. 刷握加垫太多</li> <li>3. 电刷振动</li> <li>4. 高摩擦</li> <li>5. 维护不当</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 保证电刷在刷握内自由活动</li> <li>2. 改用整垫</li> <li>3. 处理换向器表面, 减小电刷与刷握间隙</li> <li>4. 改善滑动接触或选用润滑性能好电刷</li> <li>5. 定期清扫换向器、改善滑动接触</li> </ol>
6	环火	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 换向不良</li> <li>2. 片间电压太高</li> <li>3. 短路或重负载冲击</li> <li>4. 电枢绕组开焊</li> <li>5. 维护不良</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 改善换向</li> <li>2. 防止过电压</li> <li>3. 减轻负载, 排除短路</li> <li>4. 补焊电枢绕组</li> <li>5. 加强换向器表面清理</li> </ol>
7	氧化膜颜色不正常	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 换向器温度太高</li> <li>2. 电刷型号不对</li> <li>3. 有害性气体</li> <li>4. 油附着</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 改善通风条件</li> <li>2. 更换电刷</li> <li>3. 防止有害性气体进入</li> <li>4. 防止油雾进入</li> </ol>

序号	故障现象	故障原因	处理方法
8	抖动和噪声	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 换向器变形、突片</li> <li>2. 电刷型号不对</li> <li>3. 电刷压力不合适</li> <li>4. 电刷与刷握间隙太大</li> <li>5. 电刷倾斜角不适当</li> <li>6. 电动机振动</li> <li>7. 湿度过低</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 车圆换向器</li> <li>2. 选用合适电刷</li> <li>3. 调整电刷压力</li> <li>4. 调整电刷与刷握间隙</li> <li>5. 调整倾斜角</li> <li>6. 校正平衡、消除振动</li> <li>7. 增加风道湿度</li> </ol>
9	电刷异常磨损和破损	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 换向不良</li> <li>2. 换向器表面粗糙</li> <li>3. 电刷压力太大</li> <li>4. 电刷、刷握振动大</li> <li>5. 电刷质量不好</li> <li>6. 接触面温度太高</li> <li>7. 湿度过低</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 改善换向</li> <li>2. 车光换向器</li> <li>3. 调整电刷压力</li> <li>4. 改善电刷润滑条件,减小电刷与刷握间隙</li> <li>5. 更换电刷</li> <li>6. 改善通风冷却条件</li> <li>7. 通风道喷雾增加湿度</li> </ol>
10	电刷电流分布不均	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 电刷压力不等</li> <li>2. 不同型号电刷混用</li> <li>3. 电刷与刷握间隙太小</li> <li>4. 电刷粘结在刷握内孔</li> <li>5. 刷瓣螺钉未拧紧</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 调整电刷压力,力求一致</li> <li>2. 改用同一型号电刷</li> <li>3. 调整间隙</li> <li>4. 清理刷握内孔</li> <li>5. 紧固刷瓣螺钉</li> </ol>
11	电刷表面镀铜	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 云母突出或有毛边</li> <li>2. 温度太高</li> <li>3. 湿度太低</li> <li>4. 氧化膜能力差、含研磨成分太多</li> <li>5. 油污</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 重下刻倒棱</li> <li>2. 改善通风冷却条件</li> <li>3. 增加风道湿度</li> <li>4. 选用合适型号电刷</li> <li>5. 防止油雾进入电动机内</li> </ol>
12	电刷与换向器温度高	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 电动机过载、堵转</li> <li>2. 电刷压力太大</li> <li>3. 电刷型号不对</li> <li>4. 通风不良</li> <li>5. 强烈火花</li> <li>6. 高摩擦</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 改善电动机运行状况、减轻负载</li> <li>2. 调整电刷压力</li> <li>3. 更换电刷</li> <li>4. 改善通风</li> <li>5. 改善换向不良</li> <li>6. 改善滑动接触条件</li> </ol>

### (三) 电刷故障及处理(表 5-14)

表 5-14 电刷的故障与处理

序号	故障现象	故障原因	处理方法
1	电刷磨损严重	1. 电刷型号不对 2. 换向器偏心,摆动或云母绝缘片凸起	1. 更换合适的电刷 2. 进行修理
2	电刷磨损不均匀	1. 刷握上弹簧压力不均匀 2. 电刷质量不一致	1. 调整各弹簧压力 2. 更换电刷
3	电刷或刷握过热	1. 电刷压力过大 2. 电刷型号或质量不一致 3. 电动机过载或通风不良	1. 调整电刷压力 2. 更换电刷 3. 减轻负载或改善通风
4	电刷在电动机运行中出现噪声	1. 电动机转速超过额定值 2. 电刷工作面未磨好 3. 电刷摩擦系数过大	1. 将电动机转速调整至额定值 2. 重新研磨 3. 更换摩擦系数较小的电刷
5	电刷在运行中破损、边缘碎裂	1. 电动机振动过大 2. 电刷质软或较脆	1. 减轻电动机振动 2. 更换质量合适电刷
6	电刷引线烧坏或变色,引起脱落	1. 各刷握弹簧压力不均匀 2. 电刷与引线之间铆压不好	1. 调整各弹簧压力 2. 更换电刷
7	电刷下火花较大	1. 电动机过载 2. 电刷不在中性线上 3. 换向极绕组接反 4. 换向器偏心、摆动或云母片凸起	1. 减轻负载 2. 调整中性线 3. 改正接线 4. 修理换向器

## 第五节 小功率电机运行与维护

### 一、小功率交流换向器电动机

#### (一) 小功率交流换向器电动机的类型与结构

小功率交流换向器电动机是指转子上带有换向器而且使用交流电源的小功率电动机,一般做成单相。常用的小功率交流换向器电动机,其功率不大于 1500W 的。根据用途和结构特点,主要分为单相串励电动机、交直流两用电动机和推斥式电动机等三种型式。其典型结构见图 5-45。用于电动工具、医疗器械、日

用电器、小型机床等。

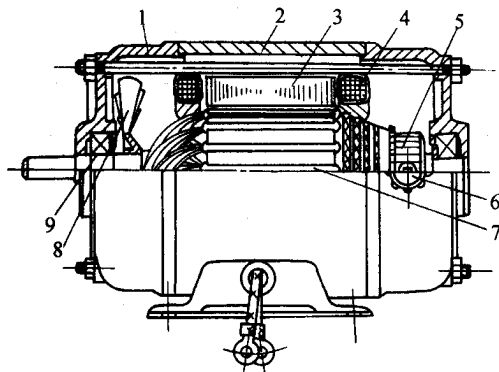


图 5-45 单相串励电动机结构图

- 1—端盖 2—机壳 3—定子铁心  
4—定子绕组 5—换向器 6—电刷装置 7—电枢  
8—风扇 9—轴承

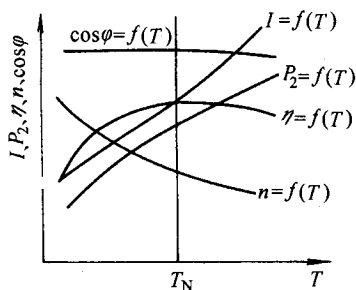


图 5-46 串励电动机工作特性

## (二)单相串励电动机原理

单相串励电动机其定子多为一对凸极,电枢绕组为双层绕组,与换向器相接,有一对并联支路,励磁绕组与电枢绕组串联。功率较大的电机设有换向极,小功率电动机,可将碳刷的位置逆转向移动一个角度,或者当碳刷仍维持在磁极几何中心线位置,但电枢绕组元件与换向片的焊头位置顺着转向偏移 $1 \sim 2$ 片,使电枢绕组轴线逆转向移位 $10^\circ \sim 30^\circ$ 。

单相串励电动机的定子绕组与电枢绕组是串联的。当电源交变时,定子磁场的极性和转子电流或由其产生的磁场同时变换方向,根据左手定则,电磁力的方向不会改变,转子始终维持一个恒定的转向。电动机的转速与极数和电源频率之间也没有严格的关系,即转速不受电源频率的限制,因此,单相串励电动机的转速可以在大范围内进行调节。

## (三)串励电动机的工作特性

在给定的外施电压条件下,单相串励电动机的转速、电流、输出功率、效率、功率因数和转矩的关系称为工作特性,见图 5-46。

## (四)串励电动机的调速

串励电动机转速主要与端电压及励磁磁通相关,调节励磁或端电压均可以实现调速。利用自耦变压器向电动机供电或在电动机供电回路中串联抽头分级的电抗器,可以方便地调节串励电动机的转速。在电动机供电回路中串接平滑可调的电阻器或分级的电阻器,也可以实现调速。串励电动机比较理想的调速方法是,通过在主回路中串接晶闸管或经全波整流后再串接晶闸管,用调节晶闸管的导通角,改变直流电压的平均值进行调速。

# 二、小功率电动机应用

## (一)电动机类型的选用

应根据电源、负载功率、转速、环境条件、对机械特性的要求及其他要求来选用适当类型的电动机。各种小功率电动机的特点及应用见表 5-15。





续 5-15

## (二)规定用途小功率电动机

品种规格很多,使用面宽广。其常见的类型及特点见表 5-16。

表 5-16 常见的规定用途小功率电动机

名称	电机类型	功率范围/W	转速 <sup>①</sup> /(r/min)	特点
洗衣机电动机	单相电容运转异步电动机	90~250	1500	开启式自冷,主副绕组相同,正反转运行
	单相串励电动机	60~370	500~15400	用于自动洗衣机,带电子调速器
(洗衣机用)脱水电动机	单相电容运转异步电动机	25	1500	开启式自冷,单向旋转,短时运行
	罩极异步电动机	40~60	1500	立式安装,单向旋转
离合器电动机	三相异步电动机单相异步电动机	120~550	3000,1500	带离合器及摇篮式防震底座,多用于驱动工业缝纫机电动机
家用缝纫机电动机	单相串励电动机	40~75	4000~8000	断续定额,带控制器执行起、停和调速
台扇电动机	单相电容运转异步电动机	35~70(输入)	1500	台扇的机头部分
	单相罩极异步电动机	40~50	3000	小型台扇机头部分
吊扇电动机	单相电容运转异步电动机	46~80(输入)	250~500	扇翼直径 900~1800mm
	单相罩极异步电动机	50~90	250~500	老式吊扇
机床冷却用电泵	三相或单相异步电动机	25~370	3000	立式结构,电机与单级离心泵组合为一体,泵送循环冷却液用
冰箱压缩机电动机	单相电容起动或电阻起动异步电动机	90~370	3000	电动机与压缩机组合,在氟里昂介质中工作
空调器风扇电动机	单相电容运转异步电动机	6~370	750,1000,1500	双轴伸,摇篮式减震底座,噪声低

名称	电机类型	功率范围/W	转速 <sup>①</sup> /(r/min)	特点
录音机电动机	稳速永磁直流电动机	0.11 ~ 0.27	2400 ,2200	电子稳速 ,高起动转矩 ,低噪声 ,电压 6 ~ 12V
转页式风扇用电动机	爪极式永磁同步电动机	输入功率小于 3	500 ,375	不对称爪极永磁同步电动机转速低 ,转矩大 ,带齿轮减速器
排气扇电动机	单相电容运转异步电动机或单相罩极异步电动机 三相异步电动机	输入功率 65 ~ 850	1500 ,1000	与轴流式风扇组合为一体
吸尘器用电动机	单相串励电动机	110 ~ 1080	15000 ~ 27000	电动机和风机组合一体

①对异步电动机指同步转速。

### 三、小功率单相异步电动机运行与维修

小功率单相异步电动机具有结构简单、噪声小、对无线电系统干扰小等特点，广泛应用在小型机床设备及家用电器上。

小功率单相异步电动机按起动情况可分为：罩极式、电阻起动、电容起动、电容运转和电容起动与运转等。

在定子绕组中通入单相交流电，气隙中产生脉振磁动势，且分成两个转向相反的旋转磁动势，同时都切割转子导体，产生转子感应电动势及电流，这两个磁场与相应转子感生的电流相互作用，又产生两个大小相等、方向相反的转矩，所以电动机不会自行起动。这时，电动机内部副绕组与主绕组在空间上有相位差，使副绕组内的电流与主绕组内的电流在时间上亦有相位差，同时在气隙空间产生一个椭圆形旋转磁场，可使电动机具有起动转矩，电动机就可自行起动。

电动机在起动后，副绕组可以与电源断开，也可以不断开，根据使用情况而定。

#### (一)电动机运行与维护

1. 电动机起动前，首先检查各部位螺钉有无松动及损坏，定、转子有无相擦现象。
2. 电动机接线是否正确，有无松动情况。
3. 检查定子绕组有无短路、断路和接地故障。
4. 检查起动离心开关，起动器动作是否灵活，有无损坏，电容器是否有开路、短路、击穿等现象。
5. 电动机运行时，检查电动机温升是否正常，不应超过允许温升。
6. 电动机运行时噪声是否正常
7. 定期维护和更换润滑油。

#### (二)单相罩极异步电动机故障与排除

单相罩极异步电动机具有结构简单、制造方便、运行可靠、维修方便、造价低，且噪声低等优点。虽然它的功率因数及效率较低，但起动转矩小，转差率大，故广泛地应用在对电动机性能要求不高，空载或轻载起动

时容量小的场所,如仪表风机、风扇等。

#### 1. 电动机起动困难

(1) 罩极线圈断裂或开焊、对虚、假焊应重新焊牢,若短路环已胀裂应更换。

(2) 负载过大,应更换合适容量的电动机。

(3) 主绕组短路或接错,当出现匝间短路后电动机的起动转矩下降,起动电流增大,导致熔体熔断,应采取绝缘处理或更换线圈。若是定子绕组极间连接接错,应找出错误改正接线。

(4) 主绕组断路,用万用表测量,找出断路的线圈及断点,应将断点重新焊好并绝缘处理。

(5) 转子笼条和端环裂开、断条或铜笼条和铜端环焊接处开焊,找出断裂或开焊处,重新焊牢。若铸铝转子断裂和开焊严重,应更换新转子。

(6) 轴承磨损严重,润滑油脂干枯或没有,转子不灵活或卡住,应更换新轴承或清洗干净,涂上新润滑油脂。

(7) 有时能起动,有时不能起动,或在某些部位不能起动,严格遵守操作规程,找出故障原因及时处理。

#### 2. 电动机振动和噪声大

(1) 主绕组短路或接地,找出短路和接地点且修复。

(2) 主绕组接线错误,找出错误改正接线。

(3) 罩极线圈焊接不良或开焊,找出故障点重新焊牢。

(4) 转子有断条或端环开路,应换条和补焊或更换新转子。

(5) 转子不平衡,重校静、动平衡。

(6) 轴承磨损严重或轴弯曲,更换轴承或校直转轴。

(7) 转子轴向窜动大,加垫片调整。

(8) 定、转子相擦,精车修复。

(9) 定、转子不同心度偏大,有严重哼哼声,检查椭圆度且进行修复。

(10) 定子铁心松动或有扇张现象,应紧固铁心,解决扇张情况。

(11) 极间漏磁片松动,重新紧固。

(12) 线圈短路,找出短路处且修复。

(13) 重绕时,主绕组匝数不对,找出匝数不对的线圈,纠正匝数错误或更换线圈。

#### 3. 电动机起动缓慢,转速降低

(1) 电源电压过低,应检查调节电压。

(2) 主、辅绕组接线错误,应仔细检查改正接线。

(3) 电动机的短路绕组脱焊,应重新焊牢。

(4) 电容运转电动机的电容量不足,应按规定配备足够的容量。

(5) 轴承润滑干枯,应定期清洗加入新的润滑脂。

(6) 电动机搁置日久受潮,运行前又未作绝缘性能检测,运行后电动机绕组匝间短路引起转速降低,应重新绕制线圈。

### (三) 分相异步电动机故障与排除

分相异步电动机是由主绕组和副绕组构成的电动机,按副绕组的作用不同可分为:电阻起动、电容起动、电容运转、电容起动和运转异步电动机。

#### 1. 电动机分类与应用

(1) 单相电阻起动异步电动机 当电动机通入单相交流电时,主、副绕组同时接通,产生起动转矩,电动机开始起动,在电动机转速升高到一定值时,离心开关或继电器将副绕组从电路中断开,电动机正常运行。

该种电动机具有造价低、起动转矩较小、起动电流较大、能可逆转等特点。广泛应用于低惯性负载、不经常起动、负载可变而速度基本不变,对起动转矩无特殊要求的各种机械,如小型机床、鼓风机、医疗器械等上。

(2) 单相电容起动异步电动机 运行原理同单相电阻起动异步电动机,但具有起动转矩较大,起动电流较小,可逆转,广泛应用于满载起动和要求起动转矩较大的各种机械,如空气压缩机、电冰箱、农业机械等。

(3) 单相电容运转异步电动机 电动机在运行时,副绕组与主绕组同时都接于电源上。

具有运行性能良好、效率及功率因数较高、工作可靠、振动噪声小、可逆转及调速但起动转矩较小、起动电流较大、轻负载时工作性能变坏、不能轻负载或空载运行。该种电动机适用于对起动转矩要求不高,工作时间较长,又不经常空载或轻载运行的各种机械,如记录仪表、通风机、水泵、电影放映机等。

(4)单相电容起动和运转异步电动机 为改善电容运转异步电动机的起动特性,在副绕组回路中并联两只电容器,一个是运转电容,固定接入副绕组回路,另一个是起动电容,只要在起动时接入副绕组回路,起动后当电动机速度达到一定值时,利用离心开关或起动继电器将起动电容断开,电动机仍正常运行。

该种电动机具有起动转矩高、功率因数和效率高、运行可靠等优点。它广泛用于带负载起动和噪声低的各种机械,如小型机床、空气压缩机、泵、建筑和医疗机械等。

## 2. 电动机故障与排除

### (1) 定子绕组断路

①嵌线后接头焊接不良,特别是在起动和运行时较大的电流冲击焊接处造成断裂,应重新补焊。

②电动机绕组接地,短路造成导线烧断,应找出故障处进行修复或更换线圈。

③由机械损伤导致导线折断,找出折断处进行修复。

### (2) 定子绕组短路

①电动机经常过载运行,绕组温升太高,使绝缘老化变脆,产生电磁线裂纹或漆皮脱落,引起匝间短路、烧坏电动机,找出短路处可做绝缘处理,如果在槽内发生多匝短路时,应更换线圈。

②因绕组线径较细,易在绕制时及运输中产生裂纹,局部漆皮脱落,而绕制后浸漆不透,经运行后,就可能造成短路,可用短路侦察器或匝间耐压试验仪检查短路故障,进行修复或更换线圈。

### (3) 绕组接地

①电动机引出线绝缘损伤与外壳相碰,应包好且进行绝缘处理。

②因断路、短路现象引起线圈与铁心接触或碰壳,找出故障处进行修复。

③绕组端部伸出较长与端盖相碰,应在绕组端部与端盖间加垫绝缘或缩短绕组长度。

④槽内导线和绝缘击穿,直接与铁心接触,一般接触不严重又在端部时,可进行修复,接地严重又在槽内时,应更换接地线圈。

### (4) 电动机不能起动或转速很慢、电流大出力小

①熔丝熔断或插头接触不良,电源断线,应首先检查熔丝是否熔断,插头接触是否良好,电源线有无断线,找出故障进行修复。

②电源电压太低,使电动机不能起动或转速太慢,应调整电源电压,必要时加稳压电源装置。

③电动机严重过载,如在运行中突然发现过载,可能是拖动机械造成,如机械运行正常则为电动机容量太小,应更换较大容量的电动机。

④主绕组或副绕组接线错误,应仔细检查改正接线。

⑤主绕组或副绕组有短路或开路现象,找出故障处进行修复或更换线圈。

⑥起动开关失灵,应修复开关。

⑦起动电容过小或损坏,应更换电容。

⑧轴承损坏或有其他卡住现象,应更换轴承或检查各部位并处理。

## 四、小功率同步电动机故障与维修

### (一) 简述

小功率同步电动机是转子转速与电源频率保持恒定比例关系的一种交流小功率电动机。广泛用于恒转速驱动,如记录仪表、电影机械、复印机、纺织机械、自动化系统的驱动元件和电钟等设备。

小功率同步电动机按工作原理分为:磁阻式、磁滞式和永磁式,按转子结构型式分为:内转子式和外转子式,按定子绕组相数分为:三相和单相,而单相又分为电容起动、电容运转、电容起动和运转、罩极式。

## (二)电动机故障与维修

小功率同步电动机的定子大多与小功率异步电动机相同,转子大都是笼型转子变形,其故障内容及处理方法见单相异步电动机。

### 1. 永久磁钢去磁过大

- (1) 永磁材质不好,在使用过程中造成去磁,应更换磁钢。
- (2) 笼型绕组断条或开焊,应检查故障处,进行修理或更换。
- (3) 永磁体两侧防漏磁的非磁性衬垫破碎或脱落,造成漏磁严重,按原非磁性垫块材质(一般为黄铜)及尺寸大小加工好衬垫换上,且固定好。
- (4) 操作不当,应严格按操作规程启动,减少启动时失步现象,如漏磁气隙宽度不合适时,应当调整。

### 2. 永磁体损坏

- (1) 永磁块与转子镶嵌或装配间隙过大,引起永磁块窜动,间隙过小,造成永磁块挤碎。如果是窜动可在缝隙里填灌适当的环氧树脂粘牢,如果已破碎,应重新加工永磁块换上,保持合适的配合间隙。
- (2) 检修时用力过猛,使永磁块破裂,要在维修过程中不要随意敲打。
- (3) 焊接方法不当,由于铁氧体之类材料较脆,在焊接时要将转子先预热,使永磁块受热均匀,就不易出现炸裂现象。

### 3. 启动过程中转矩变化大或失步转矩小

- (1) 永磁体材质不良或去磁较大,在条件许可时,可将定子绕组每槽匝数减少1~2匝,可明显提高失步转矩,或更换合适的永磁体。
- (2) 牵入同步时转速不稳,应检查电源电压是否稳定,可增加一套电源稳压器,使电源电压保持在电动机额定电压允许范围内。

## 五、小功率交流换向器电动机故障与维修

具有电枢绕组、换向器和电刷的小功率单相交流换向器电动机可分为:单相交流串励电动机、交直流两用串励电动机和推斥电动机三种。该种电动机具有较高的起动转矩、调速范围大等特点,广泛用于要求有单相交流电源、高转速、重量轻和串励特性的设备上,如医疗器械、小型机床、电子仪器、日用电器、电动工具等。

### (一)单相交直流两用串励电动机故障与维修

交直流两用电动机,既能用在单相交流电源上,又能用在直流电源上,主要用于真空洗衣机、电吹风机、电动缝纫机及各类手提式电动工具上。

#### 1. 磁极绕组匝间短路

短路点多发生在外表面或磁极线圈内表面转角处,如损伤面少,可采用分开垫绝缘的方法处理;若短路处在内部或无法修理时应更换新线圈。

#### 2. 绕组开路

主要是引线连接处脱焊,断裂引起开路,或在引出线根部折断,应找到断路处接好焊牢,包好绝缘即可。

#### 3. 绝缘击穿或接地

当电压过高或绕组过热以及振动引起绝缘受损,一般对地击穿损坏严重,修理较难,应更换新绕组。

#### 4. 电钻电动机起动困难或不能起动

- (1) 电源未接通,应检查电源线是否断线、熔断器是否熔断、开关是否接触不良。
- (2) 电源电压过低或将交流电源误接到直流引出端上,应调整电压到额定值附近,检查接线柱,如交直流接错应纠正过来。

(3) 定子绕组断路或短路,按以上方法处理。

(4) 转子绕组断路或短路,断路点多发生在线圈与换向片的焊接处,而短路或接地多发生在槽口处,可用万能表检查断路,用短路侦察器测量短路,也可用其他方法找出故障处,进行局部修复,严重时应更换绕组。

(5) 电刷与换向器接触不良或未接触,主要是电刷磨损、弹簧压力不足、刷辫松脱、换向器表面不平及不清洁而造成,应及时修复或更换。

(6) 电钻的减速齿轮损坏或卡住,应检查齿轮啮合的松紧情况,齿内有无异物卡住或断齿,应及时清除异物或更换新齿轮。

(7) 轴承磨损,使转子不能居中而偏心或下沉,与定子相擦,应更换轴承。

(8) 手按式开关经常接通和断开,使触头接触不良,应定期检修,必要时更换新开关。

#### 5. 电钻电动机转速慢

(1) 转子绕组短路或断路,查出故障处,如不严重可修复,严重时更换新线圈。

(2) 定子绕组短路或接地,可用兆欧表检查电动机绝缘电阻,找出故障点进行修复或更换线圈。

(3) 转轴磨损大或轴承损坏,造成定、转子相擦,应检查转轴和轴承,修复或更换。

(4) 钻孔时钻头迟钝或轴向推力过大,使电钻机械负荷过大,可将钻头磨锋利或减轻轴向推力。

(5) 过载运行会使转子绕组及换向器过热、短路,引起转子绕组与换向片间的连线松脱或电刷与换向片间产生过大火花,应适当减轻负载。

(6) 减速机构损坏或润滑脂太少,应更换磨损的齿轮,并经常维持有足够的润滑脂。

(7) 电刷弹簧压力过大,相当于增加了机械负荷,应适当调节电刷的弹簧压力。

#### 6. 换向器电动机发热

(1) 电刷型号规格不符或电刷压力过大,应对电刷型号、规格不符时应更换,调整电刷弹簧,使压力符合要求。

(2) 转子绕组短路,找出短路处进行修复或更换线圈。

(3) 轴承磨损大或定、转子相擦,应更换轴承。

(4) 减速齿轮损坏,应更换新齿轮。

(5) 负载过大,应减轻负载。

(6) 定、转子绕组受潮,绝缘电阻降低,应烘干处理。

(7) 电钻运转产生较大火花及环火,应改善电刷与换向器的接触情况。

#### 7. 电刷和换向器火花大

(1) 电刷与换向器接触不良,换向器偏摆、偏心、应调整弹簧压力或更换弹簧,研磨换向器表面或解决偏摆偏心。

(2) 过载运行,应减轻负载。

(3) 电刷型号不符,应予以更换。

(4) 转子断条或短路,找出故障并排除。

#### 8. 换向器片间短路或接地

(1) 片间短路,应清除片间进入的金属粉末、电刷碳粉、污物或焊接时焊锡未清理干净而引起。

(2) 接地,用万用表或兆欧表检查换向器对地绝缘电阻,找出接地处并排除。

#### 9. 电动机起动过程中时转时不转

(1) 换向器与转子绕组有多处断头、开焊,找出断头及开焊处,接好焊牢即可。

(2) 电钻转子在某一位置上能起动,而在另一位置上不能起动,在工作急需时可将电钻转轴旋转一定角度后再起动。

#### 10. 电钻运转时响声大

(1) 减速齿轮损坏或润滑油不足,应更换齿轮或添足新的润滑脂。

(2) 轴承损坏或润滑脂不干净,应更换轴承,并加入性能良好的润滑脂。

(3) 装配不良,应重新进行装配。

(4) 转子线圈重绕时,热风叶取下时方法不当或多次取下和安上,使风叶内径变大与转轴配合不够紧密,在离心力作用下风叶碰壳,安装时应在风叶部分的轴上,包一层厚薄合适的铜皮,将风叶装好,紧密地套在轴上即可。



## (二) 单相交流串励电动机故障与维修

小容量的单相交流串励电动机均用于电钻等电动机工具上。它的结构与交直流两用串励电动机基本相同,对容量较大的单相交流串励电动机,在定子铁心的大小槽中,嵌有励磁、补偿及换向三种绕组,还有的具有分路电阻及复励绕组。

电枢部分的故障及处理方法与交直流两用串励电动机相同,可参照有关部分。

定子部分:

1. 励磁、补偿、换向三种绕组嵌线接错,应重新绕制线圈并作好标记,仔细检查,改正接线。
2. 绕组开路、短路,开焊处要重新焊牢,短路严重时更换线圈。

# 六、小功率直流电动机故障与维修

## (一) 简介

小功率直流电动机是依靠直流电源运行的。该种电动机用于要求起动转矩高,转速变化范围较大的设备上。如日用电器、电动玩具、自动化仪器仪表、计算机外围设备、医疗器械、生产机械自动化装置、录音机等。

小功率直流电动机按励磁方式分为:电磁式和永磁式,按电枢形状分为:圆柱式和盘式,按电枢铁心分为:槽式和平滑式,按电刷分为:有刷式和无刷式等。

由于电磁式小功率直流电动机和普通直流电动机结构相同,其故障与处理方法相似,可参阅直流电动机有关部分。永磁式直流电动机是由永磁体建立磁场,其性能与恒定励磁的他励直流电动机相似,具有体积小、效率高、结构简单、可靠、用铜量少等特点,是小功率直流电动机的主要型式。

## (二) 永磁式直流电动机故障与维修

### 1. 电动机噪声大

- (1) 换向器和电刷、集电环和电刷接触时产生摩擦声,应调整使其接触良好。
- (2) 滚动轴承或含油轴承安装不当、缺油或磨损大,运转时产生杂音,应定期加添润滑油脂或更换轴承,安装时应采用压入法。
- (3) 电刷支架的振动声,检查电刷架有无松动或歪斜,将刷架调整固定好。
- (4) 稳速器触头开闭时产生较大声音,检查触头接触面是否光滑,有无氧化层或生成绝缘膜,并调整触头位置。
- (5) 高速时产生风声,应使电枢表面光滑,不要有无用的凸出部分。

### 2. 电动机振动大

- (1) 转子的磁铁偏心或机械偏心,电枢绕组开路、断路、接线错误,引线头和换向器开焊,轴是否弯曲,轴承磨损是否严重,应进行处理或更换。
- (2) 转子及稳速器不平衡,应进行静、动平衡试验,排除不平衡故障。
- (3) 稳速器触头的开闭引起电枢反作用,助长了振动加大,应正确操作、保持触头开闭灵活。

### 3. 电枢故障

电枢绕组及换向器的故障与处理方法和交流换向器电动机相似,可参阅有关部分。

## 第六章 变压器及其安装与维护技术

### 第一节 电力变压器原理与参数

#### 一、原理

##### (一) 电力变压器用途和分类

电力变压器按用途可分为升压、降压(配电)和联络变压器(见图6-1);还可以按相数分为单相和三相变压器,按绕组数分为双绕组、三绕组和自耦变压器,按绝缘介质可分为油浸式变压器、干式变压器、SF<sub>6</sub>气体绝缘变压器等。

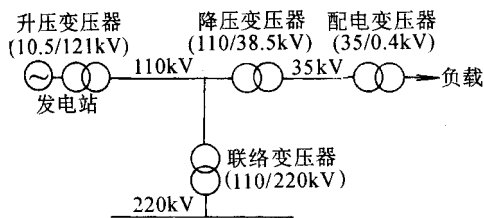


图 6-1 电力变压器用途举例

##### (二) 电力变压器工作原理

变压器是用来变换交流电压和电流而传输交流电能的一种静止电器。以单相变压器为例,其工作原理见图6-2。当匝数为 $N_1$ 的一次绕组AX接到频率为 $f$ 、电压为 $U_1$ 的交流电源上时,由励磁电流 $I_0$ 在铁心中产生磁通 $\Phi_z$ ,从而在一、二次绕组中感应出电动势 $E_1$ 和 $E_2$ ,匝数为 $N_2$ 的二次绕组ax端产生电压 $U_2$ 。当二次绕组接有负载 $Z$ 时,一、二次绕组中流通电流 $I_1$ 和 $I_2$ 。

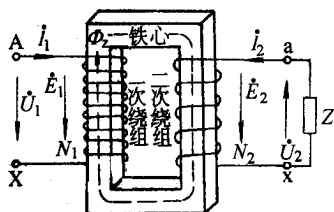


图 6-2 变压器工作原理图

为了分析它的基本原理,可首先按理想变压器来处理,即忽略励磁磁动势、绕组的电阻和电抗影响,由电压方程式 $U_1 = E_1 = 4.44fN_1\Phi_{zm}$ 和 $U_2 = E_2 = 4.44fN_2\Phi_{zm}$ ,得电压变换关系为

$$U_1/U_2 = E_1/E_2 = N_1/N_2 = K$$

$K$  称为电压比,由磁势平衡关系式  $I_1 N_1 = I_2 N_2$ ,故有  $I_1/I_2 = N_2/N_1 = 1/K$ ,从而得变压器传输电能的容量为

$$S_1 = U_1 I_1 = U_2 I_2 = S_2$$

可是,实际变压器需要励磁磁动势  $\dot{I}_0 N_1 = \dot{I}_1 N_1 - \dot{I}_2 N_2$ ,则电流变换关系为

$$\dot{I}_1 = \dot{I}_0 + \frac{1}{K} \dot{I}_2$$

如果考虑一、二次绕组的电阻  $r_1$ 、 $r_2$  和电抗  $x_1$ 、 $x_2$  产生的压降,根据基尔霍夫第二定律,其电压方程式为

$$\dot{U}_1 = -\dot{E}_1 + \dot{I}_1 r_1 + j \dot{I}_1 x_1$$

### (三) 变压器相量图

变压器的电压和电流的关系,用相量图来表示则比较直观。它是将二次电路参数用电压比  $K$  折合到一次后(或者反之)绘制的,其绘制顺序如下:选一水平正向相量为主磁通  $\Phi_2$ ,画出超前  $\Phi_2$  为  $\theta_0$  角的空载电流  $\dot{I}_0$ ,画出滞后  $\Phi_2$  为  $90^\circ$  的一、二次绕组的电动势  $\dot{E}_1$ 、 $\dot{E}_2$ ,根据负载性质即由  $\cos \varphi_2$  画出二次电流  $\dot{I}'_2$ ,再以  $\dot{I}'_2$  与  $\dot{I}_0$  合成为一次电流  $\dot{I}_1$ 。则  $-\dot{E}_1$  加  $(\dot{I}_1 r_1 + j \dot{I}_1 x_1)$  得  $\dot{U}_1$ ,  $\dot{E}_2$  减  $(\dot{I}'_2 r_2 + j \dot{I}'_2 x_2)$  得  $\dot{U}'_2$ ,见图 6-3。

### (四) 变压器等效电路

变压器的电压和电流的关系如通过等效交换,可将一、二次电路化为一个电路来描绘,以便于计算。图 6-4 所示的等效电路是由折合了参数的二次电路(包括负载阻抗)与励磁电路并联后再与一次电路串联的电路。

### (五) 三绕组变压器

每相有三个绕组,见图 6-5。三绕组变压器的一次绕组的容量必大于或等于二、三次绕组的容量。三个绕组的容量百分比按高压、中压和低压顺序有 100/100/100、100/100/50 和 100/50/100 三种,此时,二、三次侧不能均满载运行。一般三次绕组电压较低,多用于近区供电或接补偿设备。三绕组变压器有三个电压比和三个阻抗值。

### (六) 自耦变压器

至少有两个绕组并具有公共部分的变压器称为自耦变压器。降压自耦变压器的示意图和接线图见图 6-6。理想情况下电压比和电流比与双绕组变压器一样,传输容量(通过容量)也一样,即  $S_1 = U_1 I_1 = U_2 I_1 = S_2$ 。

但是由接线图可知,公共绕组中电流为

$$I = I_2 - I_1 = I_2 - I_2/K = I_2(1 - 1/K)$$

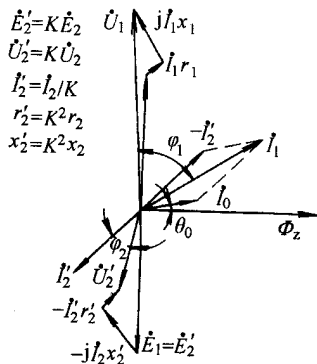


图 6-3 双绕组变压器相量图

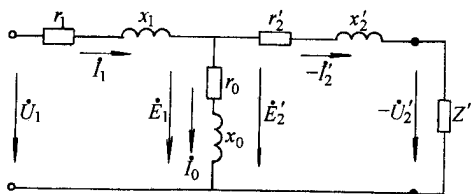


图 6-4 双绕组变压器的等效电路

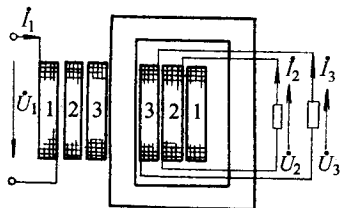


图 6-5 三绕组变压器示意图

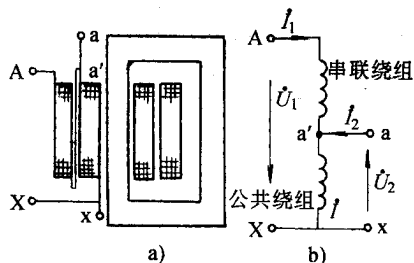


图 6-6 双绕组降压自耦变压器  
a) 示意图 b) 接线图

而串联绕组电压为

$$U = U_1 - U_2 = U_1 - U_1/K = U_1(1 - 1/K)$$

所以串联绕组的容量为

$$S_{a'x} = UI_1 = U_1 I_1 (1 - 1/K)$$

公共绕组的容量为

$$S_{a'a} = U_2 I_2 = U_2 I_2 (1 - 1/K) = S_{Aa'}$$

因此绕组容量,即变压器结构容量小于通过容量,它们的比值 $(1 - 1/K)$ 就是效益系数,即

$$\frac{S_{A'a}}{S_1} = \frac{S_{a'x}}{S_2} = (1 - \frac{1}{K}) < 1$$

电压比  $K$  越小  $(1 - 1/K)$  也越小,自耦变压器损耗越小,重量也就越轻,越经济。自耦变压器目前在超高压电网中应用很多。

## 二、特性与参数

### (一) 变压器空载电流和空载损耗

当变压器二次绕组开路,一次绕组施加额定频率的额定电压时,其中所流通的电流称为空载电流  $I_0$ ,  $I_0 = \sqrt{I_{0a}^2 + I_{0r}^2}$ 。通常  $I_0$  以额定电流的百分数表示,即  $I_0\% = (I_0/I_{1N}) \times 100\% = 0.3\% \sim 2\%$ ,变压器容量越大,其值越小。

空载电流的无功分量  $I_{0r}$  的波形是含有奇次谐波的非正弦波形,各次谐波的大小通常如表 6-1 所示。

表 6-1 励磁电流谐波分量(基波%)

谐波分量	冷轧电工钢片	谐波分量	冷轧电工钢片
基波	100	7 次谐波	5 ~ 10
3 次谐波	40 ~ 50	8 次谐波	3 ~ 6
5 次谐波	10 ~ 25	11 次谐波	1 ~ 3

空载电流的有功分量  $I_{0a}$  是相当于空载损耗  $P_0$  的分量。忽略一次绕组电阻损耗的空载损耗又称为铁耗。空载损耗  $P_0$  的计算式为

$$P_0 = K_0 p_t G_t$$

式中  $P_0$ ——空载损耗(W);

$K_0$ ——附加损耗,由于结构和工艺的原因所引起的损耗增大,取 1.15 ~ 1.3;

$p_t$ ——对应于铁心磁通密度的单位损耗(W/kg);

$G_t$ ——铁心重量(kg)。

## (二) 变压器励磁涌流

当变压器空载合闸到线路时,由于铁心饱和而产生很大的瞬间励磁电流,称为励磁涌流。励磁涌流大大地超过稳态的空载电流,甚至可达到额定电流的 5 倍及以上。

励磁涌流与合闸时铁心的剩磁  $\Phi_r$ 、电压相角  $\varphi$  有关。合闸时  $\varphi = 0$ ,  $\Phi_m$  在半波内能变化到  $2\Phi_m$ ; 有同向  $\Phi_r$  时,将增加到  $2\Phi_m + \Phi_r$ , 励磁涌流更为严重,见图 6-7。变压器容量越大,其持续时间越长,可达 5 ~ 10s。在三相变压器中总有一相要产生这种过渡现象。这样,差动继电器有可能误动作,有时需重合闸几次。在差动保护的整定中应避开励磁涌流的影响。

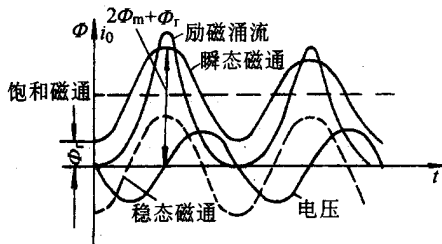


图 6-7 空载合闸时的励磁涌流

## (三) 变压器短路阻抗和负载损耗

当变压器二次绕组短接情况下,使一次绕组流通额定电流而施加的电压,称为阻抗电压  $U_z$ 。通常  $U_z$  以额定电压的百分数表示,即  $u_z(\%) = (U_z/U_{1N}) \times 100$ 。阻抗电压百分数由电抗、电阻电压百分数  $u_x$ 、 $u_r$  组成。中小容量变压器  $u_x/u_r$  为 1 ~ 5, 大容量的为 10 ~ 15。通常,阻抗电压的百分值  $u_z(\%)$  即为短路阻抗的百分值。短路阻抗大小与变压器成本和性能、系统稳定和供电质量有关。标准系列电力变压器的短路阻抗值见表 6-2。

表 6-2 双绕组变压器标准短路阻抗

电压等级/kV	6 ~ 10	35	60	110	220
短路阻抗(%)	4 ~ 4.5	6.5 ~ 8	8 ~ 9	10.5	12 ~ 24

变压器中,当一、二次绕组流过额定电流时所产生的损耗为负载损耗  $P_f$ ,  $P_f$  等于最大一对绕组的电阻损耗加入附加损耗(导线组涡流损耗、并绕导线的环流损耗、结构损耗和引线损耗)。电阻损耗  $P_r$ , 又称为铜耗

$$P_r = K_r j^2 G$$

式中  $P_r$ ——电阻损耗,又称为铜耗(W);

$K_r$ ——系数,铜线为 2.4,铝线为 13.22;

$j$ ——75℃时电流密度(A/mm<sup>2</sup>);

$G$ ——绕组总重量(kg)。

#### (四) 变压器短路电流

绕组内电流与漏磁通相作用,产生与电流平方成正比的电磁力。当与轴向漏磁通作用时,使内、外绕组产生压缩和拉伸的径向力;而与横向漏磁通作用时,产生轴向力。在正常运行时,这些电磁力均不大。

当变压器二次侧突然短路时,绕组内短路电流峰值为

$$I_{sm} = \sqrt{2} K_s I_s = \sqrt{2} K_s \frac{100}{u_z + u_s} I_{\phi N}$$

式中  $I_{sm}$ ——绕组内短路电流峰值(A);

$I_s$ ——稳态短路电流; $K_s$ ——系数,中小容量变压器为 1.2~1.4,大容量时为 1.7~1.8;

$I_{\phi N}$ ——额定相电流; $u_s$ ——系统短路阻抗百分数,  $u_s = S_N \times 100 / S_s$ ,  $S_s$  为系统短路表观容量,见表 6-3。

表 6-3 系统的短路表观容量

电压等级/kV	6、10	35	60	110
$S_s$ /MVA	500	1500	3000	8000
电压等级/kV	220	330	500	
$S_s$ /MVA	15000	30000	50000	

$I_{sm}$  为额定相电流  $I_{\phi N}$  的十几倍到几十倍,则短路电磁力为正常运行时和几百到上千倍。变压器绕组结构和压紧不合理时,可能使绕组变形、松散,使轴向紧固破坏,导致变压器损坏,这种事故在运行中并不少见。

#### (五) 变压器效率

变压器的效率为

$$\eta = \frac{\text{输出功率}}{\text{输出功率} + \text{空载损耗} + \text{负载损耗}} \times 100\%$$

在任意负载(以负载  $K_2 = I_2 / I_{2N}$  表示)时

$$\eta = \frac{K_2 S_{2N} \cos \varphi_2}{K_2 S_{2N} \cos \varphi_2 + P_0 + K_2^2 P_1} \times 100\%$$

当  $K_2 = \sqrt{P_0 / P_1}$  时,  $\eta$  最大。中小型变压器  $\eta$  在 95% 以上,大型变压器  $\eta$  在 99% 以上。

#### (六) 变压器电压调整率

变压器在负载运行时,由于阻抗降压,二次电压将随负载电流和负载功率因数的变化而变化。相应变压器的电压调整率为

$$\varepsilon \% = \frac{U_{2N} - U_2}{U_{2N}} \% \approx K_2 (u_r \cos \varphi_2 + u_x \sin \varphi_2)$$

$\cos \varphi_2 = 1$  时,  $\varepsilon = K_2 u_r$ , 因  $u_r < u_x$ , 故  $\varepsilon$  最小,当  $\cos \varphi_2 = 0$  时,  $\varepsilon = K_2 u_x$ , 故  $\varepsilon$  最大。

变压器的特性见表 6-4。

表 6-4 6、10kV30~1600kVA、Y<sub>yn0</sub> 联结组双绕组无励磁调压配电变压器特性

额定容量 /kVA	空载损耗 /kW	负载损耗 /kW	空载电流 (%)	阻抗电压 (%)
30	0.14	0.80	2.8	4
50	0.19	1.15	2.5	
63	0.22	1.4	2.4	
80	0.25	1.65	2.2	
100	0.29	2.00	2.1	
125	0.34	2.45	2.0	
160	0.39	2.85	1.9	
200	0.47	3.50	1.8	
250	0.57	4.00	1.7	
315	0.68	4.80	1.6	
400	0.81	5.80	1.5	
500	0.97	6.90	1.4	
630	1.15	8.10	1.3	4.5
800	1.40	9.90	1.2	
1000	1.65	11.60	1.1	
1500	1.95	13.80	1.0	
1600	2.35	16.50	0.9	

## 第二节 电力高压电器运行与维护

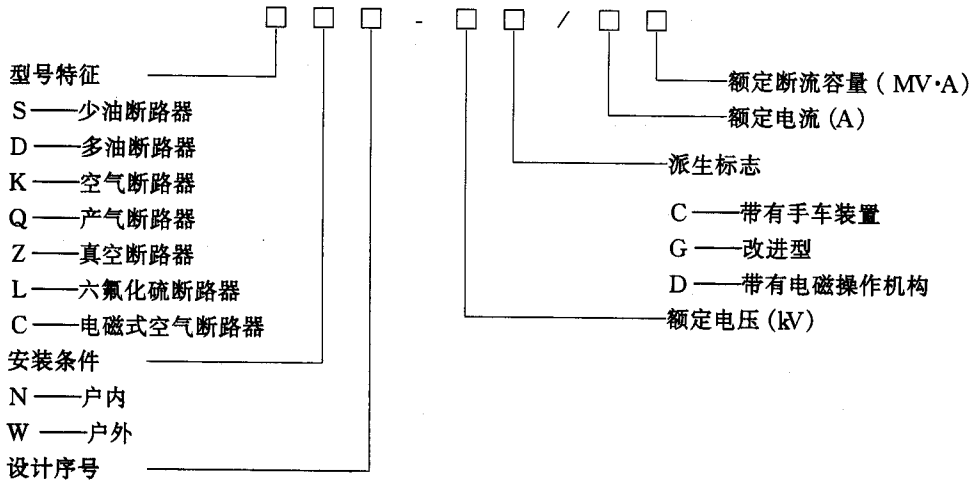
### 一、断路器运行与维修

断路器是高压开关设备中重要设备,它的作用是在高压回路带有负载的情况下接通或切断,并在发生过载或短路故障时,能通过继电保护自动切断电路,具有可靠的灭弧装置,能在极短的时间内熄灭电弧。

高压断路器的种类较多,按灭弧和绝缘介质情况可分为:充油、充气、磁吹、真空等;按油量可分为:少油和多油两类。多油断路器用油来消灭电弧,并使载流部分互相绝缘并与接地的油箱绝缘;少油断路器只能用来灭弧而不作绝缘用。

目前应用最广的高压油断路器有 DW8-35 型多油断路器和 SN10-10 型少油断路器。SN10-10 型断路器的操作,一般采用 CD<sub>2</sub> 型电磁式操作机构。

型号说明：



### (一) 高压油断路器的结构及作用

#### 1. DW8-35 系列户外高压多油断路器

断路器为三相分箱结构,各相分别装在单独的油箱盖上,三相油箱及操动机构装在一个公共支架上,三相的触头传动系统用拉杆连接在一起,并由一个操动机构来联动操作,其外形如图 6-8 所示,它主要结构包括:油箱盖、提升机构、导电结构、套管、灭弧室、电流互感器及操动机构等,而操动机构采用 CD11-X 型电磁操动机构。适用于 35kV 输配电系统。

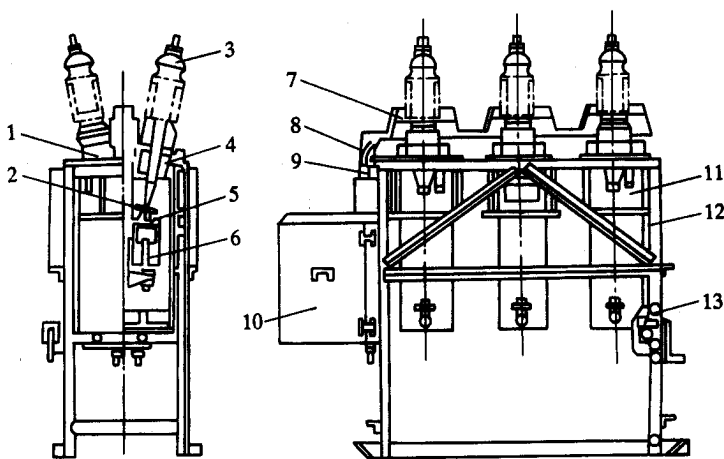


图 6-8 DW8-35 型多油断路器

- 1—油箱盖 2—提升机构(动触头) 3—套管 4—电流互感器
- 5—静触头 6—灭弧室 7—罩 8—水平拉杆 9—垂直拉杆
- 10—操动机构 11—油箱 12—铁架 13—升降机构

#### 2. SN10-10 型高压少油断路器

断路器是三相户内式高压少油断路器,适用于 10kV 输配电系统,作为电力设备及线路的控制与保护作用,也可用于操作较频繁的场合和开断电容器组,进行快速自动重合闸操作。主要结构包括:油箱、触头和导电系统、灭弧室、油缓冲器和油分离器及操动机构,而操动机构采用 CD2 电磁式操动机构或 CS2 型手动操动机构,其外形如图 6-9 所示。



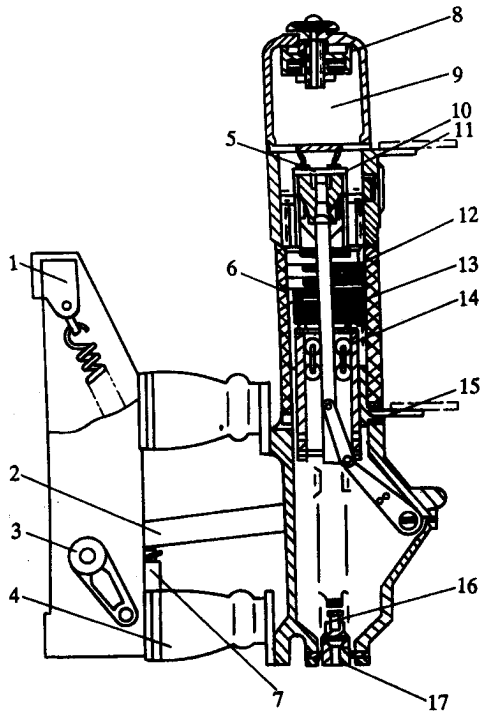


图 6-9 SN10-10 型少油断路器

1—框架 2—绝缘拉杆 3—主轴 4—支持瓷瓶 5—小钢球 6—绝缘筒 7—弹簧 8—油气分离器  
9—铝帽 10—瓣形静触点 11—上出线帽 12—灭弧室  
13—导电杆 14—滚动触头 15—下出线端 16—缓冲器 17—放油螺帽

## 2. CD2 型直流电磁操动机构

它供操动高压断路器用,所需的能量直接由辅助直流电源供给。主要由自由脱扣机构、电磁系统及缓冲法兰等组成,其结构如图 6-10 所示。

## (二) 断路器的选用及操作

### 1. 选用

- (1) 根据断路器的安装场所,确定是户内还是户外。
- (2) 按所控制的负荷性质,确定灭弧方式,通常对需要频繁操作的负荷,可采用多油式、真空式或磁吹式断路器;对非频繁操作的负荷可采用少油式断路器。
- (3) 断路器的额定电压与系统电压相符。
- (4) 断路器的额定电流略大于负荷的最大长期工作电流。
- (5) 断路器应有足够的断流容量,当线路发生故障时,断路器的额定断开电流必须大于工作地点的最大短路故障电流,如不能满足要求,应采用电抗器来限制短路电流或采用断流容量大一级的断路器。
- (6) 根据负荷特点、保护要求及遥控条件,合理选用手动、电动、液压、弹簧及机械重合等操作机构和不同的操作电源。

### 2. 操作

断路器是有很强的灭弧能力,能切断负载电流和短路电流,由于断路器本身的缺陷或对断路器的使用不当,都可能造成事故,而最严重的事故是断路器爆炸。

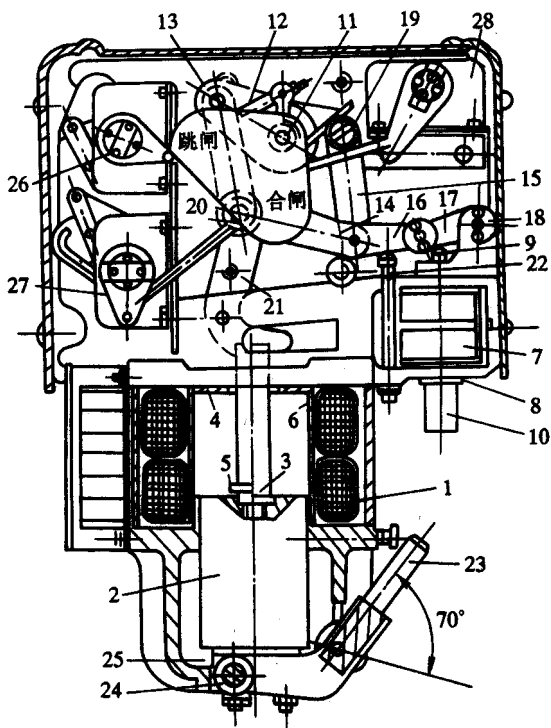


图 6-10 CD2 型电磁操动机构

1—合闸线圈 2—动铁心 3—顶杆 4—黄铜垫 5—弹簧 6—金属筒 7—分闸线圈 8—铁心 9—冲击杆 10—圆筒 11—操动机构的轴 12—杠杆 13—顶杆 14、15—杠杆 16、17—顶杆 18、19—固定轴 20—滚轴 21—销钉 22—支柱 23—杠杆 24—滚轴 25—缓冲橡皮垫 26、27—联锁触点 28—信号接点

### (1) 合闸送电前的检查

- ① 在合闸送电前要收回发出的所有工作票, 拆除临时接地线, 并全面检查断路器。
- ② 检查断路器两侧隔离开关, 都处于断开位置。
- ③ 使用 1000 ~ 2500V 兆欧表测量断路器的绝缘电阻应符合规定值。
- ④ 断路器的三相均处在断开位置, 油位、油色都正常, 并无渗漏油现象。
- ⑤ 分、合机械指示器均处于“分”的位置。
- ⑥ 操作机构要保持清洁、完整, 手动跳闸脱扣机构应动作灵活。
- ⑦ 断路器的继电保护及自动装置是否处于使用位置, 以便发生情况时能切除故障。
- ⑧ 经仔细检查, 确认无误后, 应对断路器进行一次拉、合闸试验, 使动作准确灵活, 方可投入运行。

### (2) 送电操作步骤

- ① 根据分、合闸机械指示器的指示, 确认断路器处于断开状态。
- ② 在未装操作熔断器的情况下, 先合上电源侧隔离开关, 再合上负荷侧隔离开关。
- ③ 装上合闸熔断器和操作熔断器。
- ④ 核对断路器名称和编号无误后, 将操作手柄顺时针方向旋转 90°至“预备合闸”位置。
- ⑤ 待绿色指示灯闪光, 将操作手柄顺时针方向旋转 45°至“合闸”位置, 在手脱离操作手柄后, 使手柄自动逆时针方向返回 45°, 这时绿灯熄灭, 红灯亮, 表明断路器已合闸送电。

### (3) 停电操作步骤

- ① 核对断路器的名称和编号无误后, 将操作手柄逆时针方向旋转 90°至“预备合闸”位置。
- ② 待红灯闪光, 将操作手柄逆时针方向旋转 45°至“分闸”位置, 在手脱离操作手柄后, 使手柄自动顺时针

方向返回 45° ,这时红灯熄灭 ,绿灯亮 ,表明断路器已断开。

- ③取下合闸熔断器和操作熔断器。
- ④根据分、合闸机械指示器的指示 ,确认断路器已处于断开位置。
- ⑤先拉开负荷侧隔离开关 ,后拉开电源侧隔离开关。

#### (4)操作时注意事项

①拉、合闸操作时 ,动作都要果断、迅速 ,把操作手柄扳至终点位置 ,使手柄从上到下要连续运动 ,确定断路器断开后 ,方可拉开相应的隔离开关。

②合闸时 ,要注意观察有关指示仪表 ,若故障还没有排除 ,应立即切断线路。

③分断容量能否满足系统的要求 ,在分断容量允许范围内应能正常工作。若系统的最大短路容量超过分断容量时 ,一旦发生短路 ,断路器可能爆炸 ,则在分、合闸操作前应考虑分断容量能否满足系统要求 ,如不能满足时应降低短路容量。

④操作隔离开关时 ,必须先确认断路器已经断开 ,并在断路器的操作手柄悬挂“不可合闸”的警告牌后 ,才能操作隔离开关。

⑤遇到下列情况 ,操作电源必须断开

A. 断路器停电检修或在有关二次线路及继电保护自动装置回路上工作时。

B. 当断路器的操作不在主控制室和配电室内 ,在断开操作电源的同时 ,必须在断路器操作手柄上悬挂“不可合闸”的警告牌。

C. 当系统接线从一组母线倒换到另一组母线时。

⑥电动操作时注意事项

A. 操作手柄必须拧到终点位置 ,同时监视合闸电流表的起动电流值是否在正常范围内。

B. 当合闸指示灯亮时 ,可使手柄返回中间位置不得过早返回 ,否则合不上闸。

C. 当已合闸 ,手柄返回后 ,而合闸电流表指示应返回零位 ,否则 ,可能因合闸接触器打不开而烧坏合闸线圈。

D. 合闸操作完毕 ,应认真检查机械分、合指示装置传动连杆和支持瓷瓶等是否完好 ,此时应无异常响声。

E. 要随时检查操作直流电压 ,当电源电压过低时 ,会因合闸功率不足 ,将使合闸速度降低 ,可能引起爆炸和不能同期并行的重大事故。

⑦空气断路器当气压降低时 ,而消弧能力将随之降低 ,在分闸时有可能造成爆炸。

#### (5)合闸送电前注意事项

①在合闸送电前 ,检查与控制有关的继电保护和自动装置是否处于使用位置 ,一旦发生事故 ,能正确动作切除故障。

②合闸时 ,要监视有关表计指示情况 ,特别是电压表和电流表 ,如有事故预兆 ,必须立即切除。

③合闸后 ,检查各相电流、电压是否平衡 ,若发现异常现象 ,应及时处理。

### (三)断路器的运行与维修

#### 1. 油断路器

##### (1)运行

①一要经常监视油面是否在上、下限之间 ,并定期检查油样的耐压、若低于允许值应及时更换 ,如有渗水、积水现象应及时处理。

②经常注意有无发烫、冒气、异常响声、放电现象 ,如发现异常现象 ,要及时处理 ,避免事故发生。

③对液压操作机构在运行中失压后 ,应采取防止缓慢分闸的措施后方可打压 ,并检查压力是否在允许范围之内。

④具有明显的拉、合闸标记。

⑤各相引线绝缘良好 ,并设有防水弯。

⑥瓷套管应保持清洁 ,无缝纹、破损、渗漏油的现象。

⑦安装断路器的电杆要稳固 ,支架可靠。

- ⑧拉、合断路器时,应使用绝缘杆或绝缘绳,操作者与断路器带电部分要保持足够的安全距离。
- ⑨外壳接地良好,对经常开路的断路器两侧应装有避雷器。

#### (2) 正常巡视

- ①油断路器的油色有无变化,油量是否适当,有无渗漏油现象。
- ②各部分瓷件有无裂纹、破损,表面有无脏污和放电现象。
- ③各连接处有无过热现象。
- ④操作机构的连杆有无裂纹,少油断路器的软连接钢片有无断裂。
- ⑤操作机构的分、合闸指示与操作手柄的位置、指示灯显示,是否与实际运行位置相符。
- ⑥有无异常气味、响声。
- ⑦金属外皮的接地线是否完好。
- ⑧室外断路器的操作箱有无进水,冬季保温设施是否正常。
- ⑨负荷电流是否在额定值范围之内。
- ⑩分、合闸电路是否完好,电源电压是否在允许范围之内。
- ⑪利用气动、液压机构合闸的断路器,压力指示是否在允许范围之内。
- ⑫直流系统有无接地现象。
- ⑬多油断路器的钢绳提升机构是否完好。

#### (3) 使用时注意事项

①多油断路器的油主要起灭弧和绝缘作用,而触头都浸没在绝缘油里,正常情况下,触头间的电弧熄灭很快。如选用或维修不及时,可能因油箱内着火或压力过度会引起爆炸,则必须使排气管的完好,以防爆炸作用。

②少油断路器的油只起灭弧作用,且外壳带电,安装时应保证足够的安全距离,外壳应涂成红色,引起人们注意安全。

③油断路器的液压操作机构的加热器要在 0℃ 时投入,10℃ 时停止运行。

④室外油断路器在环境温度 5℃ 时,要放水进行检查。

⑤绝缘油一般使用 45 号或 25 号变压器油。

⑥油面在环境温度为 20℃ 时,应保持的油位计 1/2 处,或在两条红线之间,套管油面约在 1/2 处。如果漏油,且油位计无油时,严禁带负荷并停止使用。

⑦若遇特殊情况,需要过负荷运行,应报主管领导批准,并监视油断路器和各接点的温度。

⑧油断路器开断故障次数超过允许值时(见表 6-5)应停止使用重合闸装置,并进行检修。

表 6-5 油断路器允许开断故障次数

母线短路容量为断路器遮断容量的百分数	110、220/kV	10、35/kV
80% 以上	3 次	3 ~ 4 次
50% ~ 80%	5 次	5 ~ 6 次
小于 50%	8 次	8 ~ 11 次

#### (4) 维护

①装配时必须注意各零部件的相互方向是否符合要求,各灭弧片的排列顺序及方向不能搞错。

②装配时必须按规定要求,调整各部分的尺寸,尤其是更换零件后,要检验是否需要减调整垫。

③严格检查零件的密封面精度及光洁度,拆卸时不得损伤。

④必须保持触头接触良好,且三相应同时接触。

⑤油断路器油位必须保持在适当高度,油位太低,将会造成灭弧困难,油位过高,将会使油箱上部缓冲空间减少,油箱内部的压力增大。

⑥检修后,应进行数次合闸试验,检查各部分动作是否灵活,有无卡涩现象。

## 2. 空气断路器

### (1) 运行中巡视检查

①分、合闸信号指示器,应三相一致,正确指示工作状态。

②分、合闸位置指示器,应三相一致,正确指示工作状态。

③气压表应指示在工作气压允许的变动范围之内。

④导电回路的刀闸与接线端子无异常状况,必要时用示温腊片或红外线测温仪检查温升。

⑤均压电容器应无漏油或其他异常现象。

⑥瓷件应无破损、裂纹和严重影响绝缘的沾污。

⑦各充气部件应无明显漏气。

⑧通风指示器的小球悬浮位置应在规定范围之内。

⑨加热器应在环境温度低于 $5^{\circ}\text{C}$ 时投入。

⑩气源装置应使高压气罐中的气压保持额定值,各级阀门位置要正确。

### (2) 使用注意事项

①巡视人员不得在排气口正面停留,防止突然跳闸时产生的高速气浪对人身体的突然冲击。

②除紧急事故外,一般不得使用汇控柜中的手动按钮操作。若必须使用时,应注意气压不得低于最低分闸气压。

③不允许在检修时调整各种气阀和控制元件。

④在空气断路器退出运行后,仍要保持充气,但气压可适当降低,或进行通风,以免绝缘件受潮。

### (3) 维护

①检修前必须先将均压电容器放电,再放掉压缩空气,才能开始检修。

②检修时,所有瓷件不准敲击猛撞,有机绝缘件不要雨淋受潮,均压电容器不能倒置,密封件不允许长期弯折。

③组装前,在操动系统的轴承和轴销上,在所有可动密封件和与之相摩擦的滑动面上以及在装配过程中必须与摩擦运动的所有零件上,都需涂敷润滑剂。

④在充气状态下检查时,应有专人监护,人体不得靠近排气口。

## 3. 异常运行

(1) 运行中发生崩烧短路 崩烧短路事故,一般与油断路器的灭弧系统的状况及运行维护不良有关,它不仅会造成供电中断,还有可能导致火灾,威胁人身安全,为防止发生崩烧短路事故,应做到以下几点:

①按线路负荷电流选用断路器,保证有足够的断流容量。

②安装时使各部位接触紧密,拧紧全部螺栓,防止导体松动。

③在导电杆的出、入口加装绝缘套管,防止小动物进入而引起短路。

④经常检查灭弧室的灭弧片排列是否整齐,不能颠倒或装错方向,否则灭弧能力降低,容易烧损静触头。灭弧片和绝缘零件有无烧损,绝缘零件是否受潮,都会影响灭弧性能。绝缘筒和灭弧片表面有无炭化或剥裂现象,也会不同程度地影响灭弧性能。

⑤雷雨天加强巡视,防止各绝缘部位受潮或进水,使绝缘性能变差。

⑥监视油箱内的油位,避免漏油日久,降低了油位而减弱灭弧室的油吹作用和熄弧能力。

⑦定期对绝缘油进行耐压试验,以便及时发现潜伏性故障,防止由于油质量差或进水而降低绝缘性能。

⑧检修后,应进行全面检查、测试并防止未拆接地线或短路线就合闸送电。

### (2) 运行中发生下列故障禁止分闸,以免发生爆炸事故

①油断路器无油或严重缺油。

②少油断路器两相绝缘拉杆断裂。

③灭弧室破裂或触头熔化。

④当采用液压操作机构时,液压降低到零时,未采取防止慢分闸措施。

### (3) 运行中油断路器自动跳闸应进行下列检查和处理

①检查保护装置的动作情况,并确认油断路器已断开。

②油色有无变化,若有喷油、冒烟现象,应停电进行检修。

③两侧母线连接处过热变色,绝缘子或瓷套断裂,应停电进行处理。

④对有重合闸装置的油断路器自动跳闸,重合又不良,应处理后再恢复送电,不准强行送电。

⑤对无重合闸装置的油断路器自动跳闸,若未出现异常现象,可强行送电一次,如强行送电不良,应进行处理后,方可恢复送电。对遮断容量不足时禁止强行送电。

(4)运行中油断路器严重缺油或油标内无油

①取下操作电源的断路器,防止缺油断路器自动跳闸。

②可通过母联断路器经旁路母线或使用备用断路器转移负荷。

③将缺油断路器退出运行,采取安全措施后进行检修和添油。

(5)运行中掉相由下列原因造成

①多油断路器的分、合闸缓冲器的压缩行程或拉杆绝缘子中心及导电杆的周期螺钉调整不当,使拉杆及多油断路器动触头的绝缘拉杆,在冲击力作用下断裂,引起掉相。

②少油断路器的分、合闸缓冲器的压缩行程调整不当或缓冲不良,引起振动太大,使某相绝缘子断裂而掉相。

③少油断路器某相导电杆上部的调整触点同期螺钉脱扣或衔接部分太短,使断路器掉相。

(6)运行中严重过热,由下列原因造成

①断流容量选得偏小,在过负荷的长期运行中发热。

②触点表面氧化,动、静触点接触不良,使接触电阻过大。

③动触点插入静触点的深度不够,静触点的触指歪斜或压紧弹簧松弛及支持环裂开变形,使动、静触点接触不紧密,造成接触电阻增大。

④少油断路器静触点引出导电杆误垫了铁垫圈引起涡流发热。

(7)运行中发现下列异常现象时应立即停止运行

①严重漏油,使油面低下而看不到油面时。

②支架绝缘子断裂或套管炸裂。

③内部发生放电响声。

④连接点处过热变色。

⑤瓷绝缘表面严重放电。

⑥故障掉闸后,严重喷油、冒烟。

(8)运行中指示灯不亮,运行中红灯或绿灯不亮,将影响值班人员对断路器的监视,当发生故障时也无法进行正确的判断,通常由下列原因引起:

①灯泡损坏。

②指示回路接触不良,附加电阻损坏。

③断路器辅助触点接触不良,跳、合闸线圈断线。

④控制母线的熔体烧断。

(9)油断路器合闸后,拉力绝缘子或弹簧断裂

①若一相拉力绝缘子断裂,应先将线路负荷转移到备用电源供电,如无备用电源,应通知用户停电,再断开事故断路器。

②若两相或三相拉力绝缘子断裂,可将线路负荷倒至备用电源或通知用户停电,再断开上级油断路器,最后断开事故油断路器进行处理。

③如跳闸弹簧断裂还能切断油断路器,应按上述(1)处理,如跳闸弹簧断裂不能断开油断路器,应按上述(2)处理。

4. 常见故障分析与处理

(1)油断路器的操作机构合不上闸

①操作机构的控制回路由于熔断器熔体熔断无直流电源,使操作机构合不上闸,应检查并排除故障后更

换相同规格的熔体。

②合闸线圈由于操作频繁,温度过高,甚至烧坏,应尽量减少操作次数,当合闸线圈温度超过 $65^{\circ}\text{C}$ 时,应停止操作,待线圈温度降低到 $65^{\circ}\text{C}$ 以下时再进行操作。

③直流电压低于合闸线圈的额定电压,导致合闸时虽然机构能动作,但不能合闸,应调高直流电源电压,满足合闸线圈的使用电压。

④合闸线圈内部铜套不圆、不光滑或铁心有毛刺而引起卡住,使操作机构合不上闸,可将铜套进行修整,去掉铁心毛刺,并进行调整以排除卡阻。

⑤合闸线圈内的套筒安装不当或变形,影响合闸线圈铁心的冲击行程,应重新安装,手动操作试验,并观察铁心的冲击行程且进行调整。

⑥合闸线圈铁心顶杆太短,定位螺钉松动,使铁心顶杆松动变位引起操作机构合不上闸,可调整滚轮与支持架间的间隙,并紧固螺钉。

⑦辅助开关触点接触不良,使操作机构合不上闸,应调整辅助开关拐臂与连杆的角度及拉杆与连杆的长度,或更换触点。

⑧操作机构安装不当,使机构卡住不能复位,应检查各轴及连板有无卡住,并进行相应处理。

### (2) 油断路器的操作机构不能分闸

①分闸线圈无直流电压或电压过低,应检查调整直流电源电压,达到合闸线圈的使用电压。

②辅助触点接触不良或触点未予切换,应调整辅助开关或更换触点。

③分闸铁心被剩磁吸住,可将铁顶杆换成黄铜杆,而黄铜杆必须与铁心用销子紧固。

④分闸铁心挂在其周围的凸缘,可将铁心周围凸缘的棱角进行修整,使铁心不致挂住。

⑤分闸线圈烧坏,应找出原因并更换线圈。

⑥分闸线圈内部铜套不圆、不光滑,铁心有毛刺而引起卡住,应对铜套进行修整,去除铁心毛刺,以消除卡住。

⑦连板轴孔磨损,销孔太大使转动机构变位,应检查连板轴孔的公差是否符合要求,超过时必须更换。

⑧轴销窜出,连杆断裂或开焊,可用手动打回冲击铁心使开关分开,再检查连杆、轴销的衔接部分,进行更换或焊接。

⑨定位螺钉松动变位,使传动机构卡住,应将受双连板击打的螺钉调换方向或加设锁紧螺母,以免螺钉松动变位。

### (3) 油断路器渗漏油

#### ① 基座转轴油封漏油

A. 基座中的油封配合太紧将油封挤破,应更换油封圈且配合不宜太紧。

B. 转轴上有毛刺将油封圈的内圆划破,应去掉转轴上的毛刺,并更换油封圈。

C. 基座孔端面加工粗糙,粗糙度差,可用砂布对转轴和孔进行磨光处理。

D. 油封垫未压紧,应在外面紧固压紧油封垫。

E. 油封变形、磨损或骨架橡胶油封有气孔、裂纹破损,可拆下检查并更换油封垫。

F. 断路器断开短路电流时,断路器本身内油压力增高,使油沿轴冲出,造成漏油,可选用双口油封增加油封的抗压力。

#### ② 放油阀漏油

A. 放油阀的螺钉孔平面有残漆及表面凹凸不平,可用锉刀将螺孔平面修整,并将红纤维板垫片换成橡胶圈,使螺钉旋紧时沟槽处保证可靠密封。

B. 放油阀失灵,应将放油阀的尼龙堵头换成金属堵头或更换新的放油阀。

③基座缓冲器油封漏油 橡皮圈与油封配合太紧,橡皮圈压缩后出现永久变形导致密封不严,或橡皮圈与油封配合太松,油封压缩量小使橡皮圈压不紧而造成漏油,可更换油封圈,使橡皮圈压缩到原来尺寸的 $1/2 \sim 2/5$ 为宜,并在油封圈表面涂以少量密封膏来防止加工表面有微小孔引起漏油。

#### ④ 大绝缘筒上下端油封漏油

A. 橡皮密封圈断裂或移位,应更换密封圈或移动位置。

B. 橡皮密封圈与油封槽尺寸配合太紧,被压缩后产生永久变形,甚至压碎,应尽量选用尺寸合适的密封圈或将油封槽重新按密封圈的大小进行加工。

#### ⑤油位计渗漏油

A. 油位计安装位置不当,使橡皮圈的切孔位置不合适或未压紧,可将油位计重新安装,适当压紧橡皮圈。

B. 油位计破碎及附件玻璃管端口不平或破裂,应更换油位计及附件。

⑥油箱焊缝渗漏油 对油箱焊缝渗漏油应采取补焊的方法,补焊时应将油箱内的油放干净,并做好防火措施,避免残油炭化燃烧引起事故。

(4)油断路器的动作不灵活,动静触点超程过大或三相合闸不一致

①动作不灵活 可拆下绝缘拉杆,用手转动底罩上的拐臂使其灵活。

②超行程过大 可调节拉杆的长度与油缓冲器塞杆的高度来达到要求。

③三相合闸不一致 可调节绝缘拉杆长度来满足同期性,合闸时三相动、静触点不一致程度不得超过3mm。

(5)油断路器的导电部分接地

①多油断路器引出、引入导电杆绝缘不良或少油断路器支持绝缘子污秽及拉式绝缘子绝缘不良,均能造成导电部分接地。应定期进行预防性试验,清扫或清洗瓷套或绝缘子,必要时涂上防污涂料或采用爬电距离大的绝缘子或瓷套,防止接地故障发生。

②多油断路器拉杆螺钉松脱,导电触点碰到油箱,或软铜片折断触及箱壁都会造成导电部分接地,应紧固拉杆螺钉或顶丝,开关在分、合闸时不要将软铜片受压打折或过于拉紧。

③检修后接地线忘记拆除,造成送电后接地。应严格按照规程操作,送电前必须有专人检查并拆除接地线,严禁事故发生。

(6)分、合闸速度不符合要求

①分、合闸速度同时减慢,应重新装配或注入润滑油脂。

②分、合闸速度减慢或加快,应调整分闸弹簧触头,压缩弹簧、合闸缓慢弹簧等。

(7)操作机构在电压偏低时不能分、合闸

①不能分闸

A. 定位止钉位置太低,应调整止钉位置。

B. 脱扣器松动,应紧固脱扣器。

C. 脱扣器铁心动作不灵活,应调整脱扣器的方向,使铁心无卡住现象。

D. 分闸电压偏低,操作时当分闸线圈的电压低于60%时,应调整到65%以上。

E. 各传动部分不灵活,应进行检查并加润滑剂。

②不能合闸

A. 辅助开关切换过早,应调整辅助开关的连杆长度,使主触点接触后再切换。

B. 合闸电压偏低,应加大电源容量或增大回路导线截面,以减少线路压降。

C. 各传动部分不灵活,应进行检查并加润滑脂。

(8)操作机构的分、合闸线圈烧坏

①电压过高,应降低电源电压。

②线圈绝缘老化或受潮,应更换线圈或将线圈进行干燥。

③辅助开关的触点未断开,线圈长时间通电,可调整辅助开关,能准确无误的进行切换。

④铁心卡住,应排除卡住现象,使铁心动作灵活。

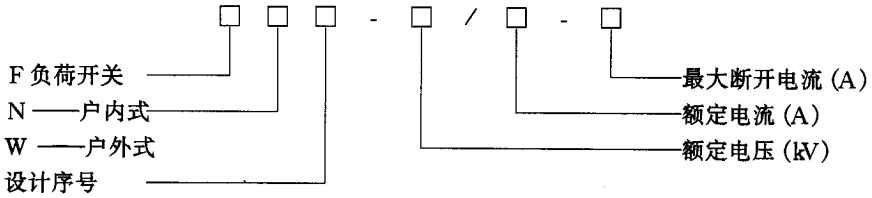
## 二、负荷开关使用与维修

高压负荷开关是用在额定电压和额定电流下接通和断开高压电路的专用开关电器。它是根据正常负荷



电流,而不是短路电流设计的,只能通断一定的负荷电流,而不能切断短路电流。因此,在大多数情况下,它和高压熔断器配合使用,可以代替油开关。线路的短路故障只能借助与它串联的高压熔断器来进行保护。

型号说明:



### (一) 负荷开关的种类及结构原理

负荷开关分为户外式和户内式两种。

#### 1. 户外式负荷开关

户外式负荷开关,实际上是户外柱上油开关,具有明显的断开点,三相触点装于同一个油桶内,借助于油介质灭弧,用于10kV架空配电线路中作分、合电路的控制电器。

FW5-10型户外式负荷开关,用于10kV配电线路上,断开与闭合额定电流、电容电流及环流。

FW5-10型负荷开关为三相联动,柱上单杆安装,用绝缘棒式绳索操作,也可配用杆下操动机构操作。采用固体产气材料产气灭弧,不用油灭弧。开关在分闸状态时有明显的断口,可起隔离开关的作用。

FW5-10型负荷开关由底座、支柱绝缘子和拉杆绝缘子、灭弧室、刀开关、机构等组成,外形如图6-11所示。

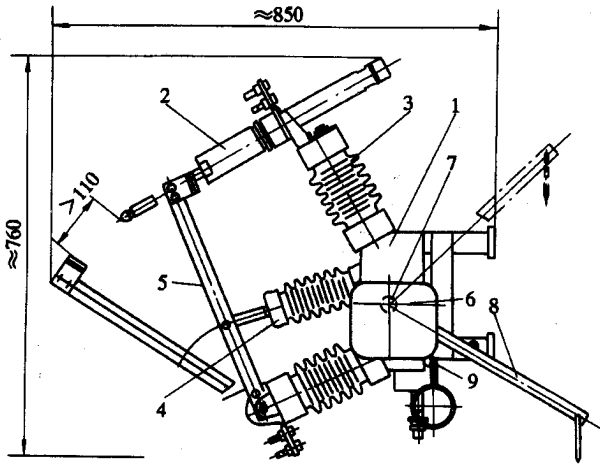


图 6-11 FW5-10 型外形图

- 1—底座 2—灭弧室 3—支持瓷瓶 4—拉杆瓷瓶
- 5—闸刀 6—机构 7—主轴 8—合闸手柄 9—分闸手柄

底座由角铁焊成,下部带安装架,直接装于电杆上,上部装有支柱绝缘子,上支柱绝缘子固定灭弧室,下支柱绝缘子固定刀开关。拉杆绝缘一端连刀开关,一端连主轴。机构附装于底座上,通过合闸手柄使开关合闸。操动分闸拉环使开关分闸。分闸状态下,导电杆与静触指形成内断口(起灭弧作用),导电杆与刀开关形成外断口(起隔离作用)。底座上有传动主轴、分闸弹簧和缓冲器。

动作过程:

#### (1) 合闸

1) 首先将合闸手柄轻轻拉下,使刀开关与导电杆初步轻微接触,这时操作线路不通(主要减少下拉行程,

便于用力快速合闸)。

2)再用力向下拉,一次合闸使导电杆快速插入静触指,这时线路接通。在分闸弹簧和推力弹簧被压缩的情况下,机构保持合闸状态。

(2)分闸 将分闸拉环下拉,机构脱扣,主轴在分闸弹簧作用下,带动拉杆绝缘子和刀开关。导电杆在刀开关带动和推力弹簧推动下,与静触指脱离形成内断口产生电弧,随着导电杆的快速运动,电弧被迅速拉长,并在消弧管和消弧头间的窄缝内燃烧。消弧材料由于电弧作用产生大量气体沿喷口高速喷出,形成强烈的纵吹作用,使电弧很快熄灭,电路切断。刀开关继续运动并与导电杆分离,形成外断口。

## 2. 户内式负荷开关

户内式负荷开关主要用于工厂的中小型变电所或大型设备的高压进户线处,是目前最常用电气设备,具有明显的断开点,在断开电路后,又具有隔离开关的作用,与高压熔断器配合使用,广泛用于小功率电路中作手动控制设备。

FN3-10型户内式负荷开关,适用于10kV以下的网络中,作断开和闭合负荷电流及过负荷电流用,也可用作断开和闭合长距离空载线路,变压器空载电流、电容器组的电容电流的开关。带RN3型熔断器的负荷开关,可切断短路电流,作保护开关用。

FN3-10型负荷开关,由开关本体和控制盒两部分组成。开关本体包括底架、支柱和拉杆绝缘子、导电刀板、动触点、静触点、传动机构等,控制盒包括信号监测器、缓冲器、闭锁器、延时器和电源等。而开关本体与控制器是通过电缆线连接,外形图如图6-12所示。

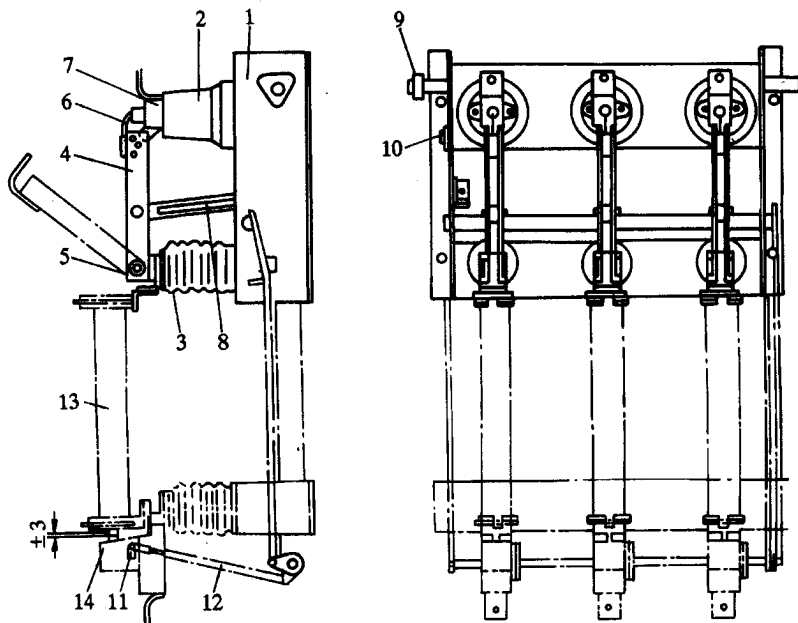


图 6-12 FN3-10 型负荷开关外形图

- 1—框架 2—连接绝缘子 3—支持绝缘子 4—刀开关 5—下触座  
6—动触点 7—主静触点 8、12—绝缘拉杆 9—拐臂  
10—接地螺钉 11—小拐臂 13—熔断器 14—热脱扣器

负荷开关闭合时,主回路与灭弧回路并联,电流大部分流经主回路,而在负荷开关分闸瞬间,主回路先断开,电流只通过灭弧回路,这时气缸中已产生足量的压缩空气,由于电弧与喷嘴接触,喷嘴也产生一定的气体,因此当灭弧触点刚一断开,这两种气流强烈吹弧,使电弧迅速熄灭。

负荷开关在框架上配有跳扣、凸轮与快速合闸弹簧组成快速合闸机构。一般可配用CS2、CS3、CS4及CS4-T型手动操动机构。

## (二) 负荷开关的使用与维修

### 1. 使用

- (1) 由于负荷开关出厂前都经过认真装配, 严格调整和试验, 使用时不必再拆开调整。
- (2) 使用时应进行几次空载分、合闸操作, 确认操作机构和触点系统无误后, 才能投入运行。
- (3) 使用中应检查负荷电流是否在额定值范围内, 各部分有无过热现象, 瓷绝缘有无放电痕迹。
- (4) 负荷开关只能断开和闭合规定的负荷电流, 一般不允许在短路情况下操作。
- (5) 当负荷开关的刀开关断开时, 具有明显可见的断开间隙, 因此它能起隔离电源的作用, 并能够带负荷操作。

(6) 断路时, 在动、静触点间产生的电弧, 因受到气缸内压缩空气和喷嘴由于电弧燃烧分解出来的气体强烈的气吹, 能使电弧迅速熄灭。

(7) 当负荷开关与高压熔断器配合使用时, 继电保护应进行下列整定:

- 1) 当故障电流大于负荷开关的分断能力时, 必须保证熔断器先熔断, 然后负荷开关才能分断。
- 2) 当故障电流小于负荷开关的分断能力时, 则负荷开关断开, 而熔断器不动作。

### 2. 维护

- (1) 投入运行前, 应将绝缘子擦拭干净, 并检查有无裂纹和损坏, 绝缘是否良好。
- (2) 负荷开关的操作一般比较频繁, 在运行中要保持各传动部分的润滑良好, 防止生锈, 并经常检查连接螺钉有无松动现象。
- (3) 检查操作机构有无卡住、呆滞现象。
- (4) 合闸时三相触点是否同期接触, 其中心有无偏移现象。
- (5) 分闸时, 刀开关张开角度应大于  $58^\circ$ , 断开时应有明显可见的断开点。
- (6) 各部分有无过热及放电痕迹。
- (7) 灭弧装置有无烧伤、漏气等异常现象。
- (8) 当操作次数达到规定的限度时, 应进行检修。

### 3. 常见故障分析与处理

负荷开关运行过程中, 一般不大容易出现故障, 当出现故障时相对断路器也显得简单和容易处理, 遇到问题时应及时检修。

(1) 熔断器熔断 熔断器熔断是负荷开关常见故障, 一般来说是由于系统短路或过负荷的所致或熔体选得过小。一般应查明原因, 排除故障后更换符合要求的熔体。

(2) 触点发热或烧坏 这种故障一般是由于三相触点合闸时不同步、压力调整不当、触点接触不良、过负荷运行及操作机构有问题造成的。

1) 当开关在断开、闭合位置时, 拐臂不能高支在缓冲器。旋转操作机构手柄的角度, 要与主轴的旋转角度互相配合( 主轴旋转角度约  $105^\circ$  ), 并使开关在断开、闭合位置时, 拐臂都能高支在缓冲器上。如果达不到要求, 应调整扇形板上的不同连接孔或改变拐臂长度来达到。

2) 负荷开关的刀开关与主轴触点之间要有合适的开断空间距离。若超出此范围, 可调节操作机构中拉杆长度或负荷开关的橡皮缓冲器上的垫片来达到。

3) 在合闸位置时, 调节刀开关的下边缘, 使与主静触点的红线标志上边缘相齐。如不能达到要求, 可将刀开关与绝缘拉杆间的轴销取出, 调节装在内部的六角偏心零件来达到。

4) 负荷开关在分闸过程中, 灭弧动触点与灭弧喷嘴不应有较大的摩擦, 否则应对灭弧动触点与刀开关间隙进行调节, 并检查灭弧静触点的装置是否符合要求。

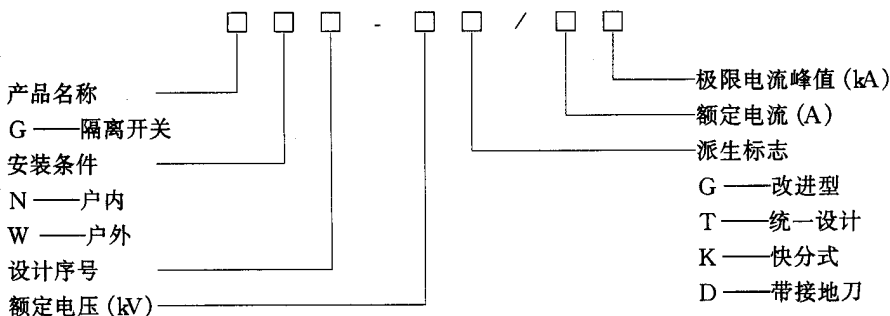
5) 在开关合闸时, 开关三相灭弧触点的不同时接触偏差, 不应大于  $2\text{mm}$ , 否则可调节刀开关与绝缘拉杆处的六角偏心接头来达到。

(3) 负荷开关的断开、闭合速度 负荷开关安装或修理完毕后, 应进行速度试验, 要求刚分闸速度达到  $(3.6 \pm 0.2)\text{m/s}$ , 最大分闸速度为  $(6.2 \pm 0.2)\text{m/s}$ , 刚合闸速度为  $(4 \pm 0.4)\text{m/s}$ 。如断开速度达不到要求, 可调节开断弹簧来达到, 合闸速度可调节管内的垫片来达到。

### 三、隔离开关运行与维护

隔离开关是一种没有专门灭弧装置的开关设备,主要用来断开无负荷电流的电路,隔离高压电流,在分闸状态时有明显的断开点,以保证其他电气设备的安全检修。在合闸状态时能可靠地通过正常负荷电流及短路故障电流。因它未有专门的灭弧装置,不能切断负荷电流及短路电流。因此,隔离开关只能在电路已被断路器断开的情况下才能进行操作,严禁带负荷操作,以免造成严重的设备和人身事故。只有电压互感器、避雷器、励磁电流不超过2A的空载变压器及电流不超过5A的空载线路,才能用隔离开关进行直接操作。

型号说明:



#### (一) 隔离开关的种类及结构原理

高压隔离开关一般可分为户内式和户外式两种。

##### 1. 户外式高压隔离开关

户外式隔离开关经常受到风、雨、冰雪、灰尘的影响,工作环境较差。因此,对户外式隔离开关的要求较高,一般应具有防冰能力和较高的机械强度。

GW5-35G系列户外式高压隔离开关是目前较为常用的设备,适用于35kV的电力系统,供高压线路在有电压无负荷情况下,进行分断与合电路。对被检修的高压母线、断路器等电气设备与带电高压线路进行电气隔离的单相或三相户外高压电器,在合闸位置,可以长期通过额定电流和短路电流;在分闸位置,提供符合要求的绝缘距离。也可用于接通或分断小的电容电流和电感电流。

GW5-35G型单极隔离开关由底座、支柱绝缘子、导电回路等部分组成,如图6-13所示。两绝缘子成“V”型交角 $50^\circ$ ,借助连杆组成三极联动的隔离开关。底座部分为两个轴承,用以旋转棒式支柱绝缘子,两轴承座间用伞齿轮啮合,即操作住一柱,另一柱可随之同步旋转,以达到分断、合合的目的。隔离开关导电回路的接线座采用盘式连接,导电杆在 $90^\circ$ 范围内能灵活转动。操动机构分为不接地、单接地和双接地三种。主刀开关与接地刀开关间的联锁是通过操动机构的连锁板来实现的。

GW4-35G型高压隔离开关也是目前应用较广泛的设备。它为双柱式结构,制成单极型式,借助于交叉连杆组成三极联动的隔离开关,也可作单极使用。

GW4-35G型隔离开关是由底架、绝缘支柱、导电部分等组成,如图6-14所示。绝缘支柱固定在轴承座上端的回转板上,导电部分固定于两支柱顶端,采用刀开关嵌人式结构,主刀开关分成两半,接触部分在中间。刀开关由紫铜排制成,刀开关的一边装有主触头,有两对触指,接触压力借助弹簧的压力产生,合闸时刀开关的另一边嵌入触指内,在弹簧的压力下可靠接触。在主刀开关分开后利用接地刀开关将出线侧接地,以保证检修工作的安全,交叉连杆的作用在于当一绝缘支柱转动时,带动另一支柱同时反方向旋转,使刀开关打开或闭合。操作时接地刀开关是在垂直面(主刀开关在水平面)上运动,它和主刀开关的联动是通过本体的机械联锁或操动机构的联锁来实现的。

##### 2. 户内式高压隔离开关

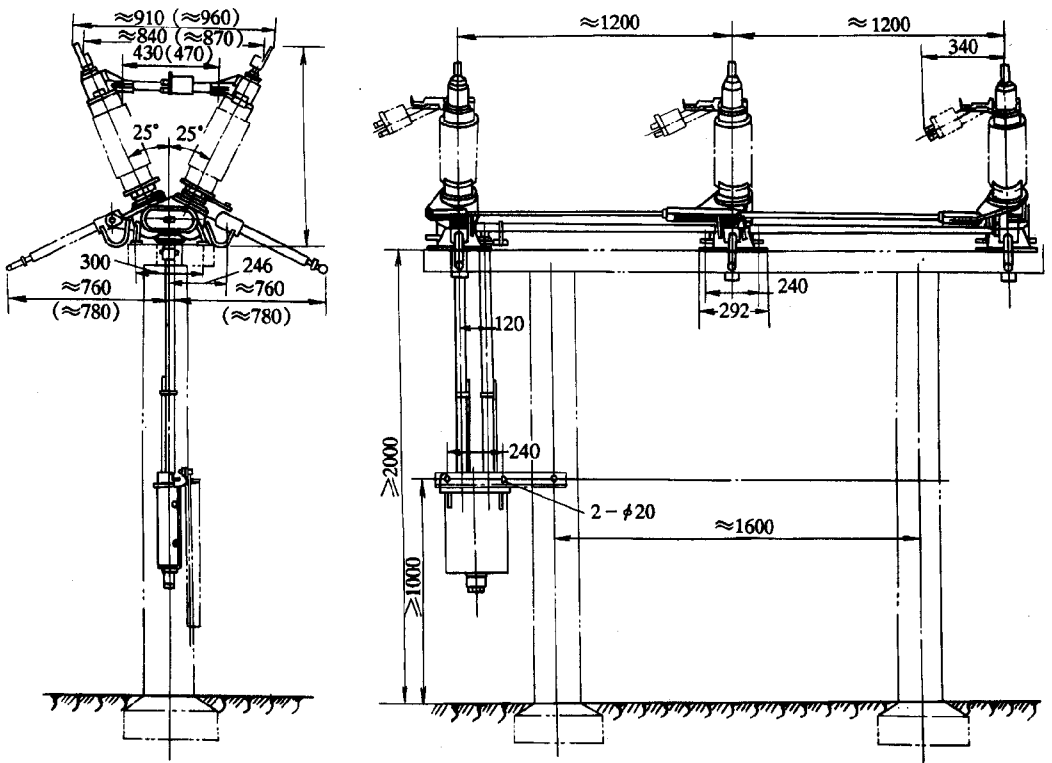


图 6-13 GW5-35G 型户外高压隔离开关外形及安装尺寸

户内式高压隔离开关有单极和三极,其型号较多,一般常用的都是三极,GN2-10型高压隔离开关是目前较为广泛采用的设备,可供户内高压电气设备和电力线路在有电压无负荷的情况下,分断与关闭电路之用。根据规格和型号不同,配用不同的手动操动机构,该开关外形尺寸如图 6-15 所示。

GN2-10型户内高压隔离开关的动触点靠拉杆绝缘子转动,拉杆绝缘子与动触点和转动轴的拉杆连接。隔离开关的合闸操作由移动机构与轴上的操作杆来完成。动触点由两片刀片做成,开关闭合时两片刀片夹紧静触点,使动静触点之间接触紧密,这样可承受较高的电动力,并具有较好的热稳定性。

为了使动静触点接触良好,避免短路时在电动力的作用下,刀开关自动断开或接触变坏而产生烧焊。在动静触点接触处装有弹簧,确保动静触点的接触压力。但在短路电流很大时,可采用电磁锁。即在静触点的外侧装有两块钢片,当电流通过开关时,使钢片磁化产生相互吸引的压力,将动、静触点夹紧,这样在线路发生短路时,隔离开关能保持良好的接触。

## (二) 隔离开关的使用和操作

### 1. 使用注意事项

(1) 当隔离开关与断路器、接地开关配用时,以及隔离开关本身具有接地开关,应有机械联锁或电气联锁来保证正确的操作程序。

(2) 底架上应有不小于 12mm 的接地螺栓,而接地软铜线的截面积应不小于 50mm<sup>2</sup>。

(3) 摩擦部位要经常涂以润滑脂。

(4) 指示分闸信号,应在主刀开关分开达到 80% 断开距离时才能发出,而指示合闸信号,应在主刀开关可靠接触后才能发出。

(5) 投入运行前,应认真检查隔离开关的接触情况和动作的一致性。

### 2. 正确操作注意事项

(1) 合闸时,在确认与隔离开关连接的断路器等开关设备处于分闸位置上,站好位置,果断迅速地合上隔

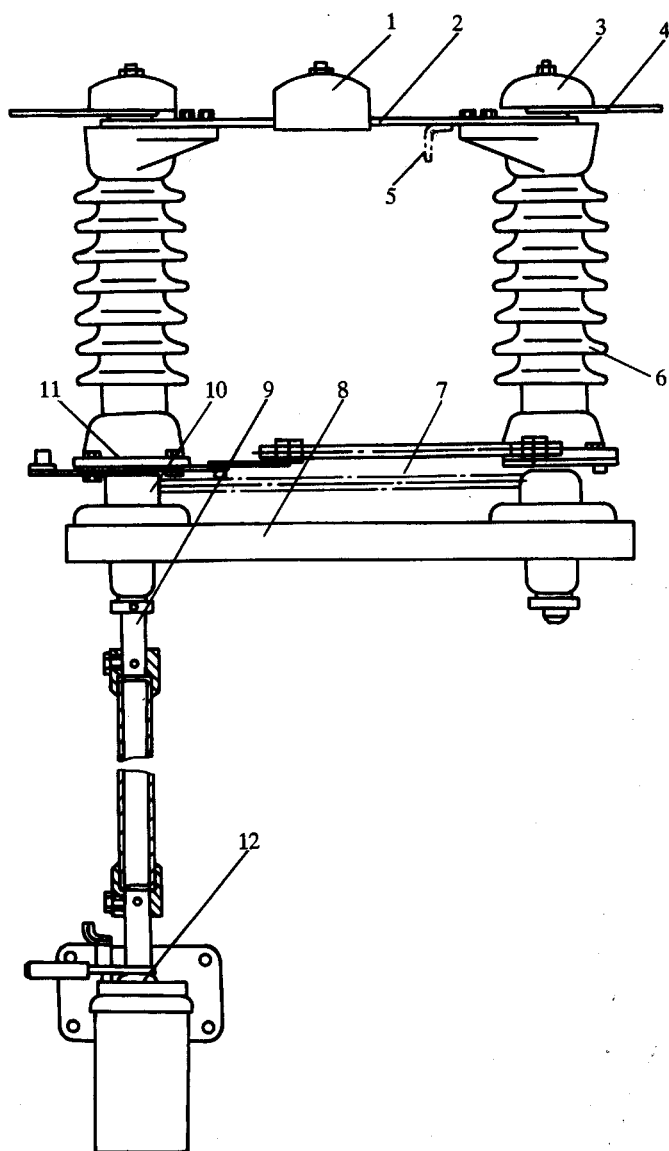


图 6-14 GW4-35G 型隔离开关

- 1—触点闭合处 2—闸刀 3—活动联接 4—接线端子  
 5—接地静触点 6—绝缘支柱 7—交叉连杆 8—底架  
 9—转轴 10—轴承座 11—回转板 12—手动操作机构

离开关,而合闸动作快结束时用力不宜过大,避免发生冲击。同时应保证主刀开关与静触点接触良好。

(2)若单极隔离开关,合闸时应先合两边相,后合中间相;拉闸时应先拉中间相,后拉两边相,还必须使用令克棒来操作。三极隔离开关是用手动操作机构来实现的。

(3)分闸时,在确认断路器等其他开关设备处于分闸位置,应缓慢操作,待主刀开关离开静触点时迅速拉开。操作完毕后,应保证隔离开关处于断开位置,并保持操作机构锁牢。

(4)用隔离开关来切断变压器空载电流、架空线路和电缆的充电电流、环路电流和小负荷电流时,应迅速进行分闸操作,以达到快速有效的灭弧。

(5)送电时,应先合电源侧的隔离开关,后合负荷侧的隔离开关;断电时,先拉负荷侧的隔离开关,后拉电

源侧的隔离开关。必须严格按照操作程序进行操作,以保证安全。

3. 允许进行下列直接操作

- (1) 开、合电压互感器和避雷器回路。
- (2) 电压为 35kV、长度为 10km 以内的无负荷运行的架空线路。
- (3) 电压为 10kV、长度为 5km 以内的无负荷运行的电缆线路。
- (4) 电压为 10kV 以下,无负荷运行的变压器,其容量不超过  $320\text{kV}\cdot\text{A}$ 。
- (5) 电压为 35kV 以下,无负荷运行的变压器,其容量不超过  $1000\text{kV}\cdot\text{A}$ 。
- (6) 开、合母线和直接接在母线上的设备的电容电流。

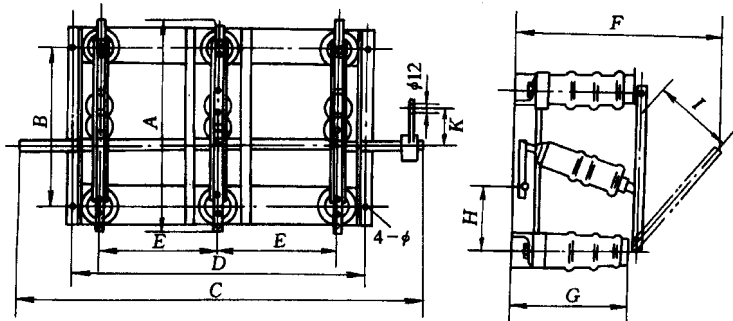


图 6-15 GN2 系列户外高压隔离开关外形尺寸

(7) 开、合变压器中性点的接地线,当中性线上接有消弧线圈时,只能在系统未发生短路故障时才允许操作。

(8) 与断路器并联的旁路隔离开关,若断路器处于合闸位置时,才开、合断路器的旁路电流。

(9) 开、合励磁电流不超过 2A 空载变压器和电容电流不超过 5A 的无负荷线路,对电压为 20kV 及以上时,必须使用三相联动隔离开关。

(10) 用室外三相联动隔离开关,开、合电压为 10kV 及以下,电流为 15A 以下的负荷电流。

(11) 拉、合 10kV 及以下,不超过 70A 的环路均衡电流,但严禁使用室内型三联刀闸拉、合系统环路电流。

4. 带负荷拉、合隔离开关,应按下列规定处理:

(1) 当错拉隔离开关,在切口发现电弧时应急速合上,若已拉开,不允许再合上,如果是单极隔离开关,操作一相后发现错拉,而其他两相不应继续操作,并将情况及时上报有关部门。

(2) 当错合隔离开关时,无论是否造成事故,都不允许再拉开,因带负荷拉开隔离开关,将会引起三相弧光短路,并迅速报告有关部门,以便采取必要措施。

### (三) 隔离开关的运行与维修

1. 发现下列异常运行时,应采取紧急措施

- (1) 接触部分过热,当温度超过  $75^{\circ}\text{C}$  时。
- (2) 绝缘子破裂,绝缘子在胶合处脱落。
- (3) 绝缘子表面严重放电。

若遇到上述情况,应迅速减轻负荷,利用适当的断路器或经旁备用母线上的开关设备转移负荷来减轻发热程度,并在停止运行后做好检修。

2. 检修与调整

隔离开关的检修,一般与断路器同时进行检修。检修时应采取可靠的安全措施,认真检查编号,特别是室外双母线的隔离开关,一般相距不远,容易走错位置,可按下列内容进行检修:

(1) 检修

1) 清扫瓷件表面的尘土,检查瓷件表面是否掉釉、破损,有无裂纹和闪络痕迹,绝缘子的铁、瓷结合部位是否牢固。若破损严重,应进行更换。

2) 用汽油擦净刀片、触点或触指上的油污,检查接触表面是否清洁,有无机械损伤、氧化膜和过热痕迹及

扭曲、变形等现象,必要时可用砂纸打磨触点表面,或拆下触点、刀片等,用细锉修整接触面,再涂上工业凡士林,表面镀银的接触面,不能用砂纸打磨或细锉修整,否则应重新镀银。

- 3) 检查触点或刀片上的附件是否齐全,有无损坏。
- 4) 检查连接隔离开关和母线、断路器的引线是否牢固,有无过热现象。
- 5) 检查软连接部件有无折损、断股等现象。
- 6) 检查并清扫操作机构和传动部分,并加入适量的润滑油脂。
- 7) 检查传动部分与带电部分的距离是否符合要求,定位器和制动装置是否牢固,动作是否正确。
- 8) 对带有均压装置的隔离开关,应检查均压环有无变形,连接件是否牢固。
- 9) 检查隔离开关的底座是否良好,接地是否可靠。

(2) 调整 经过检修的隔离开关,必须进行调整,使动作性能符合要求,调整项目有:

- 1) 合闸时,用 0.05mm 塞尺检查触点接触是否紧密,对线接触应塞不进去,对面接触,塞入深度应不大于 4~6mm,否则应对接触面进行锉修或整形,保证接触良好。
- 2) 触点弹簧各圈之间的间隙,在合闸位置时应不小于 0.5mm,并要求间隙均匀。
- 3) 组装后将其缓慢合闸,观察刀开关是否对准固定触点的中心落下或进入,有无偏卡现象。若有应调整绝缘子、拉杆或其他部件,以消除缺陷。
- 4) 刀开关张角或开距应符合要求,室内隔离开关在合闸后,刀开关应有 3~5mm 的备用行程,三相同期性应基本一致。
- 5) 辅助触头的切换是否正确,并确保接触良好。
- 6) 闭锁装置应正确、可靠。

### 3. 常见故障分析与处理

(1) 操作时动静触点相互撞击或三相触点合闸不一致

1) 由于调整不当所致,应拆开静触点固定座的螺栓,调节固定座的位置,使动触点刀片刚好插入刀口。动触点刀片插入静触点的深度不得小于刀片宽度的 90%,但不能太大,避免刀片冲击绝缘子。动刀片与静触点固定座的底部应有 4~6mm 的间隙。

2) 调整交叉连杆或拐臂的长度、操作绝缘子的调节螺钉长度,使动、静触点的间距符合要求,防止动、静触点的相互撞击和使开关合闸时的触点基本同期,10kV 及以下的隔离开关允许不同期误差为 5mm。

(2) 运行中接触部分过热

1) 隔离开关接触部分的发热程度,可根据开关触点部分的变色漆、示温片颜色变化及刀片本身的颜色来判断。一般温度超过 80℃ 时,应采取降温措施,如临时用风扇吹风冷却,并加强巡视或减小负荷运行,尽量及时停电进行检修。

2) 动、静触点接触面过小,电流集中通过后又分散,出现很大的斥力,减小了弹簧的压力,使压紧弹簧或螺钉松弛。应紧固松弛螺钉,调整交叉连杆长度,使动刀片插入静触点的深度不得小于刀片宽度的 90%。

3) 操作时刀口合得不严,表面氧化接触电阻增大,引起接触部分过热。可用 0 号砂纸打磨触头表面去掉氧化层。可在刀片、触点的接触面上涂敷导电膏,能有效地防止氧化降低接触电阻。

4) 开关在拉合过程中产生电弧,烧伤动静触点接触面,应整修动静触点的接触面或更换刀片。

5) 操作时用力不当,使接触位置不正,引起触点压力降低,使触点接触不良,导致接触部分过热,应检查各连动机构的配合和调整交叉连杆长度,并进行试合闸,直到动静触点接触压力和插入深度合适为止。

6) 长期过负荷使接触部分过热,应及时减轻负荷。

(3) 触点表面产生一层黑色附着物

1) 在长期运行中,受到外界空气的影响和电晕作用,在镀银触点上将会形成一层黑色的附着物(硫化银),降低了触点接触面的导电性能。检修时不能用细砂纸打磨,以免损坏银层,可用氨水洗掉触点表面的硫化银,其方法是:拆下触点用汽油洗去油污,用平锉刀修平触指上的伤痕,置于含量为 25%~28% 的氨水中浸泡约 15min 后取出,用尼龙刷子刷去硫化银层,再用清水冲后擦干,涂上一层中性凡士林即可。

2) 室内运行的隔离开关,可用防银变色剂处理镀银触点表面,这样既不影响接触电阻,又可防止银离子与大气中硫化物反应生成黑色附着物。



(4) 隔离开关误操作 由于不执行倒闸操作票及监护制度引起开关的误操作,一般有带负荷拉合闸和带地线合闸两种。

#### 1 预防隔离开关带负荷拉合闸的措施

①在隔离开关和断路器之间装设机械联锁,通常采用连杆机构来保证在断路器处于合闸位置时,使隔离开关无法分闸。

②利用油断路器操作机构上的辅助触点来控制电磁锁,使电磁锁能锁住隔离开关的操作把手,保证断路器未断开之前,隔离开关的操作把手不能操作。

③在隔离开关与断路器距离较远采用机械联锁有困难时,可将隔离开关的锁用钥匙,存放在断路器处或在该断路器的控制开关操作把手上,只能在断路器分闸后,才能将钥匙取出打开与之相应的隔离开关,避免带负荷拉闸。

#### 2 预防隔离开关带地线合闸措施

①在隔离开关操作机构处加装带接地线机械联锁装置,在接地线未拆除之前,隔离开关无法进行合闸操作。

②检修时应仔细检查带有接地刀的隔离开关,确保主刀片与接地刀的机械联锁装置良好,在主刀片闭合时接地刀应先打开。

#### (5) 隔离开关不能分、合闸

##### 1 不能分闸

①当隔离开关不能分闸时,若操作机构被冰冻结,应轻轻摇动几次,使冻结的冰松动后,才能进行拉闸操作。

②支持绝缘子及操作机构变形或移位,如果故障点发生在接触部位,不得强行拉闸,避免支持绝缘子损坏而引起严重事故。

##### 2 不能合闸

①轴锁脱落、楔栓退出、铸铁断裂,引起刀杆与操作机构脱节,应停电进行整修或更换损坏零件;如不允许停电,可临时用绝缘棒进行操作,但必须尽快安排检修。

②传动机械松动,使动、静触点接触面不在一条直线上,造成隔离开关不能合闸,应重新调整,使三相触点合闸时的同期性基本一致,避免动、静触点相互撞击。

## 第三节 小型变压器安装与维护

一般工厂里除了电力变压器外,还有数量较多的小型低压变压器,其结构原理与电力变压器相同。为了保证变压器的安全运行,应对运行前和运行中的变压器进行必要的检查,使供电和设备正常工作。

### 一、变压器的允许温度及温升

#### (一) 允许温度

允许温度是指变压器的绝缘材料允许的温度。当变压器的负荷电流增大时,二次绕组和一次绕组中的电流均要增大,而产生的铜耗也就增大,造成变压器的温度随之升高。若负荷电流超过额定电流,变压器的温度也将超过允许值。这样将使绝缘材料加速老化,甚至绝缘受到破坏,从而影响变压器的使用寿命,严重时造成烧毁。一般采用八度规则计算,即工作温度提高 $8^{\circ}\text{C}$ ,则绝缘的使用期限将缩短一半,如绝缘温度经常保持在 $95^{\circ}\text{C}$ 时,使用年限为20年,温度经常在 $103^{\circ}\text{C}$ 时,使用年限为10年。因此变压器正常运行时,不允许超过绝缘材料的允许温度。

## (二)允许温升

温升是指变压器各部温度超过冷却介质温度的数值,一般以环境温度 $40^{\circ}\text{C}$ 为准,通常变压器绕组最高温升为 $65^{\circ}\text{C}$ ,铁心表面最高温升为 $70^{\circ}\text{C}$ 。

# 二、变压器运行前和运行中的检查

## (一)变压器投入运行前的检查

1. 变压器的铭牌数据是否符合要求,其电压等级、联结组别、容量和运行方式是否与实际要求相符。

- ① 变压器各部位应完好无损。
- ② 变压器外壳接地应牢固可靠。
- ③ 变压器一次、二次侧及线路的连接是否完好,三相的颜色标志是否准确无误。
- ④ 采用熔断器和其他保护装置,要检查其规格是否符合要求,接触是否良好。
- ⑤ 检查夹件和垫块有无松动,各紧固螺栓应有防松措施。

## (二)变压器运行中的检查

- (1) 变压器声音是否正常。
- (2) 变压器温度是否正常。
- (3) 变压器一次、二次侧的熔体是否完好。
- (4) 接地装置是否完整无损。

如发现异常现象,应停电进行检查。

# 三、小型干式低压变压器的常见故障与处理

## (一)故障检查

变压器发生故障的原因有时比较复杂,为了正确检查和分析原因,应进行下列检查:

1. 外观检查 检查线圈引线有无断线、脱焊、绝缘材料有无烧焦、有无机械损伤,再通电检查有无焦臭味或冒烟,如有,排除故障后再进行其他检查。

2. 检查各线圈的通断和直流电阻 能够用万用表直接测出的可用万用表检查,对于直流电阻较小的,尤其是电磁线较粗的变压器线圈,最好用电桥测量直流电阻。若未有电桥,可用下列简易方法粗略判断。在变压器的一次线圈中串联一只白炽灯泡,其电压和瓦数可根据电源电压和变压器容量来确定,当变压器容量在 $100\text{V}\cdot\text{A}$ 以下时,可用 $25\sim 40\text{W}$ 灯泡,二次侧开路,接通电源,如灯泡微红或不亮,表示变压器未有短路;若灯泡很亮,说明一次侧线圈有短路故障,应拆开线圈,查找短路点。

3. 测量各线圈之间、各线圈与铁心之间的绝缘电阻 可用兆欧表进行测量,冷却电阻应在 $50\text{M}\Omega$ 以上。

4. 测量损耗功率 测量电路如图6-16所示,在被测变压器未接入电路之前,合上开关 $\text{SA}_1$ ,调节调压器 $\text{T}$ ,使输出电压为 $220\text{V}$ ,这时功率表上的读数电压表、电流表线圈所损耗的功率为 $P_1$ 。将被测变压器接在 $\text{a}$ 、 $\text{b}$ 两端,重新调节调压器 $\text{T}$ ,直到电压表 $\text{V}_1$ 读数为 $220\text{V}$ 额定输入电压,此时功率表上的读数 $P_2$ ,则为空载损耗功率。

5. 测量空载电流 将图6-16中的待测变压器接入电路,断开 $\text{SA}_2$ ,接通电源使其空载运行,当 $\text{V}_1$ 读数为 $220\text{V}$ 时,电流表 $\text{A}$ 的读数即为空载电流。通常变压器的额定电流为满载电流的 $10\%\sim 15\%$ ,如空载电流偏大,变压器损耗也增大,温升增高。

6. 测量额定输出电压 将待测变压器接入图6-16a、b两端,合上 $\text{SA}_2$ ,当 $\text{V}_1$ 读数为 $220\text{V}$ 时, $\text{V}_2$ 的读数即为该变压器的额定输出电压。通常误差要求在 $\pm 3\%\sim \pm 5\%$ ,有中间抽头的线圈,不对称度应小于 $2\%$ 。

7. 测量温升 当加上额定负载,通电 $1\text{h}$ 以上温升不得过 $40\sim 50^{\circ}\text{C}$ 。可先用万用表或电桥测量出一次线

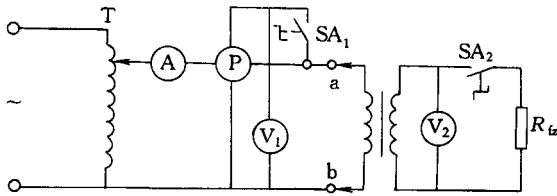


图 6-16 变压器测试电路

圈的冷态直流电阻  $R_1$  ,然后加上额定负载,接通电源,通电 1h 后,切断电源,再迅速测量初级热态直流电阻  $R_2$  ,这样连续测量几次热态直流电阻值近似相等时,可以认为所测量温度是终端温度,用下列公式求出温升  $\Delta T$  ,即

$$\Delta T = \frac{R_2 - R_1}{R_1} / 0.0039$$

## (二) 小型变压器常见故障与处理

### 1. 接通电源无电压输出

- (1) 一次绕组开路或引线脱焊,应更换或修理,并焊牢引出线接头。
- (2) 二次绕组开路或引线脱焊,应更换或修理,并焊牢引出线接头。
- (3) 电源插头或馈线开路,应检查并换修理插头或馈线。

### 2. 温升过高甚至冒烟

- (1) 匝间短路或一、二次侧绕组间短路,应更换绕组或检修短路部分。
- (2) 铁心片间绝缘太差,产生较大涡流,应重新对硅钢片进行绝缘处理。
- (3) 铁心叠厚不够或硅钢片型号不符,应加厚铁心或更换符合要求的硅钢片。
- (4) 负载过重或输出电路局部短路,应减轻负载或找出短路处并排除故障。
- (5) 层间或匝间绝缘老化,应进行浸漆处理,严重时重新更换绕组。

### 3. 空载电流偏大

- (1) 一次绕组匝数不足,应增加一次绕组匝数。
- (2) 铁心叠厚不够,应增加铁心厚度,若无法增加时可重作骨架,重新更换绕组。
- (3) 一次或二次绕组局部匝间短路,应查找短路处并排除故障。
- (4) 铁心质量太差,应更换符合要求的硅铁片。

### 4. 运行中有响声

- (1) 硅钢片没有插紧,应插紧或作夹紧处理。
- (2) 电源电压过高,应检查电源电压并进行降压处理。
- (3) 负载过重或短路引起振动,应减轻负载或找出短路处并排除故障。

### 5. 铁心或底板带电

- (1) 绕组对地短路或一、二次匝间短路,应加强对地绝缘或更换绕组。
- (2) 绕组对地绝缘老化,应重新浸漆或更换绕组。
- (3) 引出线头碰触铁心或底板,应处理引出线头与铁心或底板的短路故障。
- (4) 绕组受潮或环境湿度过高,底板感应带电,应对绕组进行烘烤处理或将变压器移到干燥环境中使用。

## 第四节 特种变压器安装与维护

### 一、分类

#### (一) 特种变压器分类

表 6-6 特种变压器分类

名称	用途	特点	标准代号
干式变压器	用于地下铁道、高层建筑等防火要求较高的场所	无绝缘油,不易着火,便于维护检修	GB6450—86
矿用变压器	矿用电力变压器和电钻及照明变压器分别用于煤矿中无和有爆炸危险场所,供电气传动及照明用电	外壳机械强度较高,进出线采用电缆,隔爆型要符合隔爆标准	JB3955—85
试验变压器	用于对各种电工产品、绝缘材料等进行绝缘性能试验	高压绕组电压高、电流小、尾端接地。为短时工作制	JB3570—84
电炉变压器	各种金属冶炼、热处理、石墨化、电渣重熔等	低压侧电压低、电流大,能大范围调切电压	JB3570—84
整流变压器	用于电化学、牵引、电气传动、直流输电、电镀、励磁、充电、调速、静电除尘等	低压侧电压低、电流大,能大范围调切电压	JB2530—79 JB3171—82 JB/DQ2113—84
T型结线变压器	用于金属冶炼、电气化铁道等	三相可变二相或两个单相	

### 二、干式变压器

#### (一) 干式变压器分类及特点

干式变压器有下列几种类型：

1. 开启式 以往传统的干式变压器多为开启式,其器身与大气相连通,适用于洁净而比较干燥的室内环境(环境温度+20℃时,相对湿度不超过85%)。国内产品的电压等级在15kV及以下,空气自冷式容量已达2400kVA。更大容量时采用吹风冷却为宜。

2. 封闭式 器身外有封闭的外壳,使之与外部大气不相连通,可使用于较为恶劣的环境。目前国内主要用于1000kVA以下的矿用隔爆型变压器中。

3. 浇注式 用环氧树脂或其他树脂浇注以形成产品的主、纵绝缘,又称为包封式干式变压器。它具有体

积小、结构简单、便于维护、可靠性高等特点。目前,无论在国内或国外,它已成为干式变压器的主流。国产的环氧浇注干式变压器最大容量已达 25000kVA,最高电压为 35kV,噪声低、耐受短路冲击能力等指标已接近国际先进水平。

干式变压器具有体积小、重量轻、安装容量、维修方便、没有火灾和爆炸危险等特点。

## (二)干式变压器技术参数

国产的环氧浇注干式变压器的技术参数见表 6-7。

表 6-7 国产环氧浇注干式变压器技术数据

型号	容量 /kVA	电压 /V	阻抗电压 (%)	
SC8—630/10	630	$10000_{-4}^{+6} \times 2.5\% / 400$	6	
SC8—800/10	800	$10000_{-4}^{+6} \times 2.5\% / 400$	6	
SC8—1000/10	1000	$10000_{-4}^{+6} \times 2.5\% / 400$	6	
SC8—1250/10	1250	$10000_{-4}^{+6} \times 2.5\% / 400$	6	
SC8—1600/10	1600	$10000_{-4}^{+6} \times 2.5\% / 400$	6	
SC8—2000/10	2000	$10000_{-4}^{+6} \times 2.5\% / 400$	6	

型号	外形尺寸( A/mm)× ( B/mm)×( C/mm)	总损耗 /W	总重 /kg
SC8—630/10	1630 × 1070 × 1595	8000	2440
SC8—800/10	1630 × 1070 × 1950	9290	2920
SC8—1000/10	1720 × 1070 × 1950	11150	3480
SC8—1250/10	1890 × 1070 × 1990	13340	4190
SC8—1600/10	1980 × 1070 × 2060	15900	4890
SC8—2000/10	2050 × 1070 × 2235	19350	5880

## 三、矿用变压器

### (一)矿用变压器特殊要求

矿用电力变压器可装置在矿井内虽有煤尘和沼气但无爆炸危险的场所。矿用隔爆型电钻变压器、照明变压器可装置在矿井内有煤尘和沼气且有爆炸危险的场所。

为防止在矿井内因碰撞而发生事故,矿用电力变压器规定不装储油柜,但在箱盖下部必须有防冷凝水措施。

矿用电钻、照明变压器内部裸露带电部分之间,以及裸露带电部分与金属外壳之间,其漏电距离与空气间隙的最小值应符合“GB1336—77 防爆电气设备制造检验规程”的规定。

矿用电钻、照明变压器高低压接线板与外面的联接应采用电缆,经由出线管引出。此出线管应能可靠地将电缆密封,并装有压紧装置,要分别加以标记。

矿用电钻、照明变压器的隔爆面,应作防锈处理。

矿用电力变压器箱盖上应装有能防滴防溅的塞子,当温度升降时可以保证自由呼吸,且应保证此塞子发生堵塞情况时,变压器油箱内部压力不超过 0.1MPa。

矿用电力变压器允许在与水平面成 35° 的倾斜巷道内运输。

## (二) 矿用变压器技术参数

见表 6-8。

表 6-8 矿用变压器技术参数

类别	型号	额定容量 /kVA	高压额定电压 /V	低压额定电压 /V	联结组标号
矿用照明变压器	KDG—0.5/0.38	0.5	380(660) (1140)	127	I, J0
	KDG—1.5/0.38	1.0			
	KDG—1.6/0.38	1.6			
矿用电钻变压器	KSG—1.6/0.66	1.6	660/380 (1140/660)	127 (133)	Y—Dd11—0
	KSG—2.5/0.66	2.5			
	KSG—4.0/0.66	4.0			
矿用电力变压器	KS—50/6	50	6000	690/400	Y <sub>y</sub> 0—d11
	KS—100/6	100			
	KS—200/6	200			
	KS—315/6	315			
	KS—400/6	400			
	KS—500/6	500			
KS—630/6	630	1200/690			

注 亦可选用括号内数字。

## (三) 矿用成套变电站

用于煤矿中爆炸危险场所,一般均为干式密封装置。箱壳的全部接合面均符合隔爆要求,并能承受 0.8MPa 的内部压力。

容量等级为 200、315、500、630、800、1000kVA 的隔爆型变压器常与高低压隔爆型开关箱组合成矿用成套变电站。隔爆型变压器的一次绕组具有 -4%、-8% 或 ±5% 的分接头,箱内有接线板以供变换分接用。二次电压可为 400、600 或 1200V。箱底设有带滚轮的拖撬,以供设备移动之用。

为适应坑道运输,要求矿用成套变电站的外形尺寸要小,特别是高度要低,故其铁心柱直径均比较大。隔爆型变压器的绝缘耐热等级均为 H 级。产品应按“GB1336—77 防爆电气设备制造检验规程”进行防潮和隔爆试验。

## (四) 矿用变压器使用与维修

变压器运行前应检查油箱中各种附件是否齐全完好,高低压出线套管有无破损,油箱有无渗漏油,并且至少要通过下列各项试验,确认产品无任何问题时方可投入运行。

1. 测量绕组电阻,且与出厂数值做比较,以确定是否有断头、接触不良情况;
2. 测量电压比,其误差应 $\leq 0.5\%$ ;
3. 试验绝缘性能,其绝缘电阻值应不低于出厂数值的70%,外施耐压和感应耐压试验值应在出厂数值的85%情况下进行。

当起吊变压器时应使全部吊攀同时着力。吊绳与垂直线之间夹角应小于 $30^\circ$ 。

当需要调整变压器输出电压时,对油浸式矿用变压器可通过分接开关进行,对矿用成套变电站则要在外壳的分接板上进行。欲提高二次电压时,应接负分接位置,反之则接正分接。

成套变电站外壳下部装有放水塞,遇有潮气冷凝成水流至外壳底部时,可以通过放水塞放出,以免壳内积水。

变压器应定期检查和修理。

变压器在运输、贮存和使用时必须防止雨淋和受潮。

## 四、试验变压器及其组合

### (一) 试验变压器特点

试验变压器有下列特点:

1. 二次电压较高而电流较小。单台试验变压器二次电压可达750kV以上,电流通常为 $0.1 \sim 1\text{A}$ ,但对于容量较大的电缆和大型电机等负载,电流最大可达4A;
2. 一般为单相,户内装置;
3. 二次绕组首末端绝缘水平不同。首端为高电位,而末端直接接地或通过电流表接地;
4. 产品多为短时工作制,允许使用时间为半小时。但对于某些试验,例如瓷套管的外绝缘污秽试验、线路的电晕试验以及电缆试验等,则要求试验变压器的使用时间为数小时乃至长期连续使用。

### (二) 试验变压器结构

试验变压器有下列几种结构型式:

1. 单套管式 其外形和接线原理图见图6-17。这种结构的二次绕组首端用高压套管引出,末端直接接地或用低压套管引出。高压绕组通常采用分段式或层式。低压绕组为层式。高压绕组在外,低压绕组在内靠近铁心柱。两个绕组之间设有专供测量输出电压的测量绕组。其匝数通常为高压输出绕组匝数的千分之一。测量绕组的外面设有接地电屏,以保证人身和仪表的安全。

2. 双套管式 图6-18中的每台试验变压器均为双套管式结构。这种结构的二次高压绕组两端都用高压套管引出,铁心是单相双柱式。绕组在左铁心柱上的位置,由内向外依次为:平衡绕组、高压绕组、低压绕组;在右铁心柱上则为:平衡绕组、高压绕组、串级励磁绕组。左右两柱的高压绕组互相串联,联结点(中点)接铁心。左右两柱的平衡绕组以同极性互相并联,其一个联结点也接铁心。铁心与油箱均取高压绕组一半(中点)的电位,因高压绕组末端接地,故油箱与地之间必须用支柱绝缘子支撑起来。

3. 绝缘筒式 这种结构是以绝缘筒代替油箱和两个高压套管,绝缘筒既作容器又作外绝缘。它实质上是双套管式的一种派生结构。铁心亦为双柱式带二分之一电压。但双柱不是左右排列而是上下排列。整个铁心对地须用绝缘件支撑起来。高压绕组首端A与金属上盖连在一起,末端X及低压绕组两端 $a_x$ 从底座引出。这种结构体积小、重量轻,常用于250kVA及以下产品。其结构见图6-19。

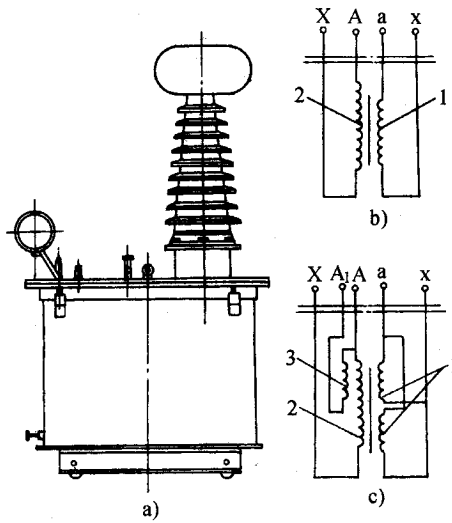


图 6-17 单套管式结构图

- a)外形图 b)无串级励磁绕组时的接线原理图  
 c)有串级励磁绕组时的接线原理图  
 1—低压绕组 2—高压绕组 3—串级励磁绕组

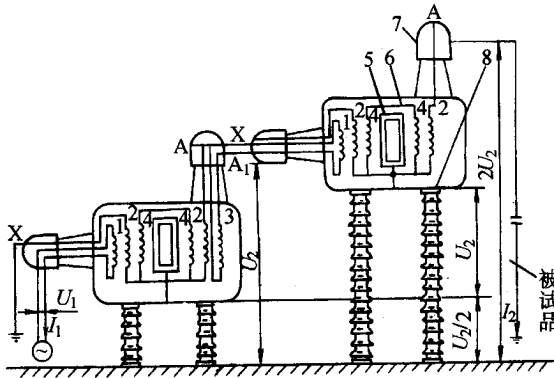


图 6-18 两台双套管式  
 变压器串级联结示意图

- 1—低压绕组 2—高压绕组 3—串级励磁绕组  
 4—平衡绕组 5—铁心 6—油箱 7—套管 8—支柱绝缘子

### (三) 试验变压器型谱

见表 6-9。

表 6-9 试验变压器系列型谱

额定容量/kVA	高压绕组的额定电压/kV		
	5	10	25
3	5	10	25
5	35	50	
10	50	100	
25	100	150	



额定容量/kVA	高压绕组的额定电压/kV		
50	50	100	150
100	50	100	150
150	150		
200	250		
250	250		
300	300	500	
500	500		
750	750		
1000	1000	1500	
1500	750	1500	2250
2000	2250		
2250	2250		
3000	750		
6000	1500		
9000	2250		

#### (四) 试验变压器使用方式

分单台式和串级式两种。串级式将两台或多台试验变压器的高压绕组的首末端子彼此串联, 串级后的总输出电压为各台试验变压器输出电压之和。后一台的低压绕组由前一台高压端的串级励磁绕组供电, 因此后一台的低压绕组、铁心和油箱对地电位均相应提高, 故油箱必须用绝缘套管支撑起来。两台试验变压器串级联结示意图见图 6-18。

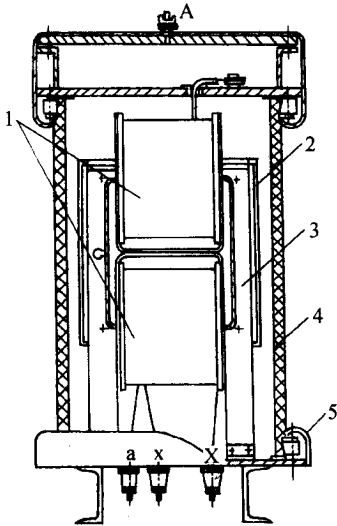


图 6-19 绝缘筒式试验变压器结构示意图

- 1—绕组 2—铁心 3—绝缘件
- 4—绝缘筒 5—屏蔽罩

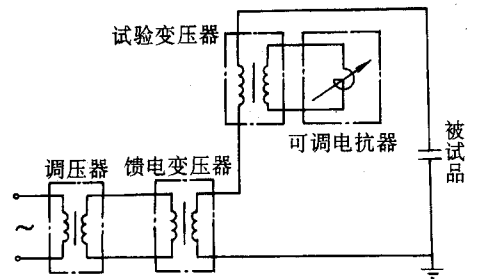


图 6-20 串联谐振装置接线图

## (五) 串联谐振装置

对于高压电缆的工频试验,要求设备容量大、时间长、波形好,通常采用电容、电感、电阻的串联谐振方式,其结线见图 6-20。

采用串联谐振回路的优点是:1)在谐振条件下,仅仅需要供给试验回路的有功损失,其电源容量可减少到十几分之一;2)当被试品击穿时,谐振条件受到破坏,回路阻抗增加,短路电流得以抑制,从而避免变压器过载和被试品的烧穿;3)试验回路不需另设保护电阻;4)能获得符合试验要求的正弦波电源。

# 五、电炉变压器

## (一) 电炉变压器用途和特点

见表 6-10。

## (二) 电炉变压器调压方式

有下列三种:

1. 分接头调压 通过改变高压绕组的分接头以期达到改变二次电压的目的,适用于调压范围较小的情况。
2. 自耦调压器调压 采用有一个单独的自耦调压器以满足大范围多级数的电压调节。
3. 第三绕组调压 见图 6-21。它由装于同一油箱中的两个器身组成。其一装有与电网相联的绕组 1、输出的低压绕组 2 以及带抽头的第三绕组 3。其二装有高低压绕组 4 和 5,分别与绕组 3 和 2 并联与串联。通过绕组 3 的分接头变换,使绕组 4 和 5 的端电压以及输出电压  $U_2$  得到改变。

这种调压方法的特点是:1)输出电压  $U_2$  成等差级数变化;2)第三绕组以及有载分接开关的电压电流值可以人为地选择;3)运行时第三绕组中的电流值与负载电流大小成正比,可以通过它来监视、控制负载电流;4)第三绕组端子可外接补偿电容器,以提高功率因数;5)变压器的技术经济指标较好。

表 6-10 电炉变压器的用途和特点

序号	用途	特点
1	三相炼钢电弧炉用	冶炼初期允许有 20% 的过载。因容易发生短路而必须使用大阻抗值变压器的情况下,其阻抗值的大小必须使短路电流值不超过额定电流的 3~4 倍。绕组排列方式:中小型为交叠式,大容量为同心式
2	三相矿热炉用(用于制取电石、铁合金、硅化合物、纯硅等)	矿热炉系一种电阻电弧炉,添料出料不停电,负载稳定,不会发生电极间短路;由于炉料电阻的变化,要求变压器能多级调压,小型炉 5 级,中型炉 8~15 级,大型炉 27 级。大型密闭式电石炉要能分相有载调压
3	单相电弧炉用(用于熔炼铜、铜合金、熔化生铁)	容量较小,不带电抗器,变压器短路阻抗为 20%~24%;不需要调压,绕组为交叠式排列
4	电阻炉用(用于机械零件加热、热处理、粉末冶金烧结、有色金属熔炼)	容量常为数百千伏安,大电炉由几台变压器分别供电,便于分段控制炉温;一次侧带分接头,有 5~7 级无励磁调压,绕组多为同心式排列;一次侧 380V 时多做成干式,6~10kV 时做成油浸式

序号	用途	特点
5	盐浴炉用(用于工具和机械零件热处理)	容量常在 100kVA 以下,二次电压 5.5~17.5V;有 5~7 级无励磁调压,绕组多为同心式排列,低压在外,用铜排卷制;也有用交叠式,低压绕组为铸铝的
6	单相石墨化炉用(用于电刷、电磁、金刚砂的加热,使之石墨化)	负载为间断性,一台变压器轮流为几台电炉供电;要求至少有 13 级有载调压,每级 2~3V;工作稳定,变压器短路阻抗为 10% 以下
7	工频感应炉用(用以熔化黑色和有色金属)	可采用 T 型结线变压器,亦可以选用三相变压器,而以电炉的感应圈、电感、电容构成三相对称负载;要求变压器有较多的调压级数,绕组多为同心式排列
8	电渣重熔用(用以将小钢锭精熔成大钢锭)	变压器多为单相;二次电压从数十伏至一百多伏,有 5~17 级调压,绕组多为交叠式排列

### (三) 电炉变压器绕组型式

绕组排列有交叠式、同心式两种。交叠式的特点是:高低压绕组出头均在外侧,便于引出。短路时轴向力较大,但可以采取措施压紧。

同心式中第三绕组调压方式的低压绕组常采用 8 字绕组的结构形式。图 6-22a 为多根导线并联的双饼式 8 字绕组,它适用于三匝及以上的情况;图 6-22b 为铜、铝板弯制的 8 字绕组,它适用于一至两匝的情况;另外还有介于这两种型式之间的用铜排卷的 8 字绕组。

### (四) 电炉变压器限流电抗

炼钢用电弧炉变压器,要求在炼钢初期具有较大的电抗,以限制频繁出现的短路电流,该限流电抗目前国内采用的型式有:1)一次侧单独加装铁心电抗器或者采用与铁心共轭的电抗器;2)采用改变交叠式绕组漏磁组数多少的办法以得到不同数值的电抗;3)采用改变漏磁空道大小的办法实现电抗值的改变。该办法的技术经济效果最好。

图 6-21 中与补偿电容器相串联的电抗器是为限制电容器两端短路而产生的极大短路电流而设置。

### (五) 电炉变压器电容补偿

有的电炉运行时功率因数很低,常需要在电炉变压器的第三绕组端子处接以补偿电容。补偿电容的容量亦即第三绕组所提供的容量。

图 6-23 给出了此种变压器各绕组电流流动示意图及其相量图。

### (六) 电炉变压器三次开断

为避免因电炉装料、卸料及故障下变压器与网路联结的超高压开关的频繁操作,特设计了图 6-21 所示的三次开断电路。

当电炉需停电时,先打开接在变压器三次绕组上的控制开关(此时电炉中尚有电流通过),然后合上变压

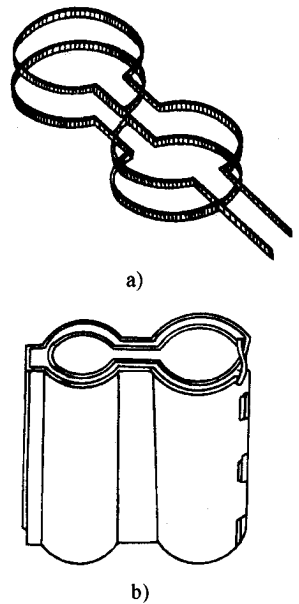


图 6-22 8 字绕组结构  
a) 双饼式 b) 板式

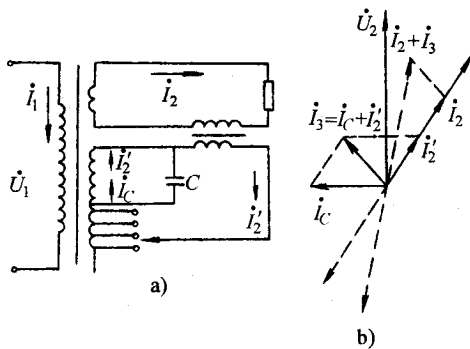


图 6-23 有补偿电容情况下电炉变压器工作原理图  
a) 电流流动示意图 b) 相量图

器与电炉间的短路开关(此时电炉中已无电流通过),便可进行炉子的装、卸料以及排除故障等工作。此时接于变压器一次侧的超高压开关仅仅起保护电炉变压器的作用。

在操作过程中,由于控制开关的断开和短路开关的闭合,导致绕组 2 的电压全部加在绕组 5 上,此时需注意防止变压器铁心的过饱和。所以,这种方式只有当  $U_{2N} \approx U_{5N}$  才适用。

## 六、整流变压器

### (一) 整流变压器同相逆并联

大型大电流整流装置多采用同相逆并联接线,这样做可以解决下述几个问题:1)各部分的局部过热;2)变压器二次侧的阻抗增大;3)整流元件间的电流不平衡。

整流变压器采用同相逆并联,即是将每相绕组分成两组并联,但是绕组端头外的引线并联联结的却是反方向的两组导电母线,目的是使其中流过大小相等方向相反的电流,以便互相补偿,使引线(包括短网、整流柜)周围的磁通得到最大限度的抵消。

两个三相桥式电路采用同相逆并联接线时,B 相绕组电流流动示意如图 6-24 所示。不难看出,从变压器引线到二次短网再到整流柜,电流流动都是两两成对出现的。

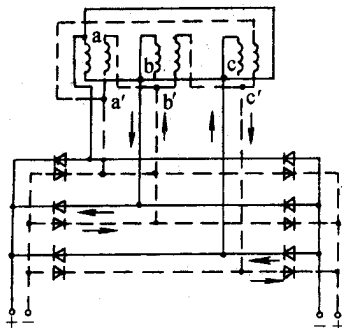


图 6-24 三相桥式电路同相逆并联联结图

### (二) 整流变压器移相

整流器组交流侧(网侧)谐波含量与等效相数的多少密切相关,故提高等效相数是抑制谐波的重要措施。

而提高等效相数主要是通过移相手段实现的。

在自耦调压变压器上或在整流变压器一次绕组上移相是最常用的办法。

由四台变压器组成的等效 24 相高、低压绕组相量图见图 6-25。

尽管移相绕组接于高压侧,但四台变压器的高压侧(一次侧)均同时连接于同一个电网上,因此在变压器的低压侧(二次侧)四台产品之间却存在着  $15^\circ$  的相角差。

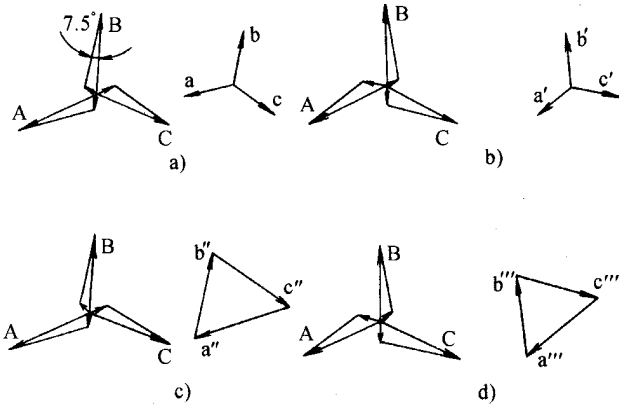


图 6-25 等效 24 相绕组相量图

- a) 第一台 :Y<sub>Y</sub> 联结左移  $7.5^\circ$  相
- b) 第二台 :Y<sub>Y</sub> 联结右移  $7.5^\circ$  相
- c) 第三台 :Y<sub>d</sub> 联结左移  $7.5^\circ$  相
- d) 第四台 :Y<sub>d</sub> 联结右移  $7.5^\circ$  相

### (三) 三次绕组的限流问题

大容量带有外接补偿电容的三次绕组的变压器,此三次绕组的容量常较高压绕组的容量为小,因此一旦在补偿电容处,亦即在三次绕组端子处发生短路,流经此三次绕组的短路电流倍数将比其它绕组的短路电流倍数大得多。为此,必须特殊考虑此三次绕组的机械强度,并且应该在三次回路中串以限流电抗器,以限制其短路电流(参见图 6-21)。

串联限流电抗器阻抗值的大小与三次绕组阻抗、三次绕组端电压有关。因为这三者电压的相量和是一常数,这一常数刚好等于补偿电容器的额定电压。由于电抗器中流过的是电容电流,负载情况下将导致三次绕组输出电压的升高,甚至超过补偿电容器的额定电压,这将是危险的。

### (四) 平衡电抗器

为使两组非同期换相的整流电路能同时并联工作,其间必须接平衡电抗器,以平衡非同期换向组之间的瞬变电压差。没有它,两组中只有瞬时电压高的一相导通,故两组只能交替工作而不是并联工作。

变压器和平衡电抗器的接线图见图 6-26,平衡电抗器本身的接线原理图见图 6-27。

不难看出,平衡电抗器的两个支路对于交流而言是串联的,对于直流而言则是并联的。

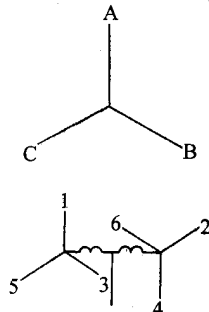


图 6-26 变压器和平衡电抗器的接线图

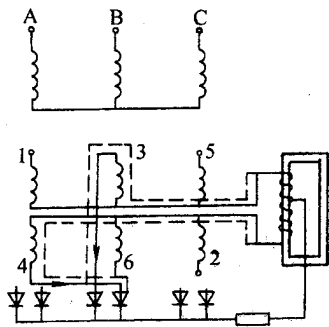


图 6-27 平衡电抗器接线原理图

## 七、T形联结变压器

### (一) T形联结变压器原理

T形联结又称为 Scott 联结,可以把三相电源变成两相电源,通常由称为 T 变和 M 变的两个单相变压器组成。其接线原理图见图 6-28。

T 变满载而 M 变空载以及 M 变满载而 T 变空载时的电流分布情况见图 6-29。图中系假定变压器电压比为 1,而负载电流为 100%。

T 变、M 变均满载时的电流分布及其相量图见图 6-30。

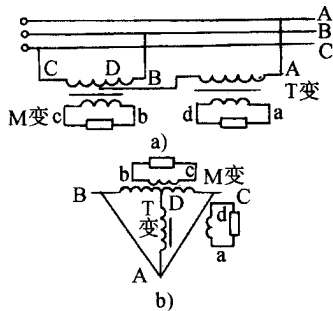


图 6-28 T形联结变压器原理图

a) 接线图 b) 原理示意图

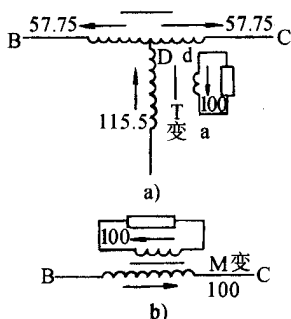


图 6-29 T 变 M 变分别满载时电流分布

a) T 变满载 M 变空载 b) M 变满载 T 变空载

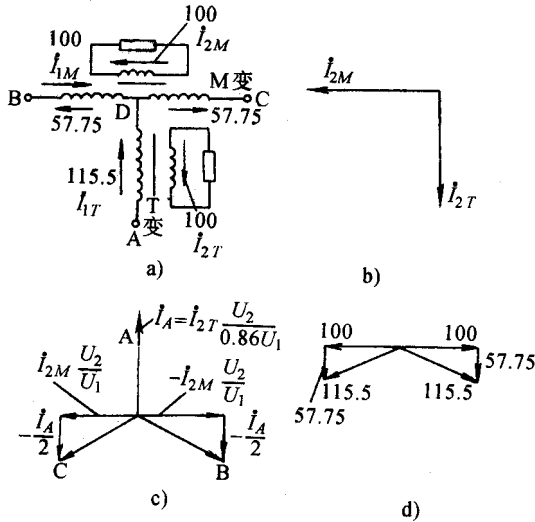


图 6-30 T 变、M 变均满载时电流分布及相量图

a) T 变、M 变均满载时电流分布 b) T 变、M 变  
二次电流相量图 c) 一次侧三相电流相量图  
d) 一次侧 B 相及 C 相电流合成相量图

不难看出，一次侧 B 相、C 相绕组中流过两种电流，取 M 变 100% 的电流以及 T 变 50% 的电流，而且这两种电流方向相互垂直，故合成后大小同 A 相电流一样，亦为 115.5%。此时一次侧各相电流为

$$I_A = -I_{2T} \frac{U_2}{0.866 U_1} = -1.55 \frac{U_2}{U_1} I_2$$

$$\begin{aligned} I_B &= -\frac{I_A}{2} - I_{2M} \frac{U_2}{U_1} \\ &= \frac{1}{2 \times 0.866} \frac{U_2}{U_1} I_2 + \frac{U_2}{U_1} j I_2 \\ &= 1.155 \frac{U_2}{U_1} (0.5 + j0.866) I_2 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} I_C &= -\frac{I_A}{2} - I_{2M} \frac{U_2}{U_1} \\ &= \frac{1}{2 \times 0.866} \frac{U_2}{U_1} I_2 + \frac{U_2}{U_1} j I_2 \\ &= 1.155 \frac{U_2}{U_1} (0.5 - j0.866) I_2 \end{aligned}$$

从上列各式中可知，在二次侧负载性质相同的以及负载电流大小相等情况下，一次侧三相电流的大小相等而相位差 120°。

## (二) T 形联结变压器阻抗

如果 M 变一次绕组结构布置不够理想，则会出现阻抗过大，导致二次侧三相电压严重不平衡。M 变一次绕组布置不合理情况见图 6-31。

从图 6-31 不难看出，从 T 变一次绕组中流进 M 变一次绕组两臂中的两个 57.75% 电流，在每个铁心柱中所产生的磁动势都没有得到平衡。结果对于从 T 变流进的电流而言，B、C 两相变成了一个电抗绕组，在负载下产生很大的压降，导致一次电压的严重不平衡。为此必须设法增加 B、C 相绕组各自的耦合程度，以减少其电压降落。

为解决此问题，常采用下列三种方法：1) M 变的两半个一次绕组常采用彼此交错排列方式；2) M 变的两半个一次绕组采用两柱并联联结方式；3) M 变中增设平衡绕组。这三种办法的接线示意图见图 6-32。

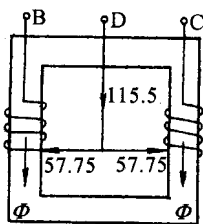


图 6-31 M 变一次绕组布置不合理情况

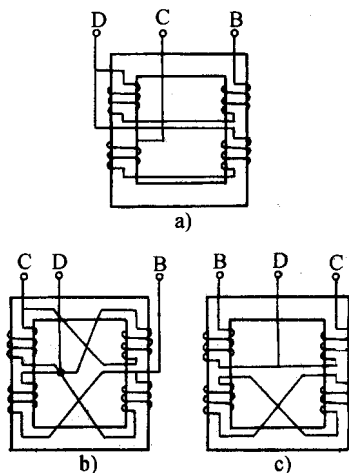


图 6-32 减少阻抗的三种接线图

a) 交叠排列 b) 并联联结 c) 增设平衡绕组

## 八、变压器的运行与维护

### (一) 变压器的特殊巡视检查

遇下列情况应对变压器进行特殊巡视检查,并应增加巡视检查次数。

1. 新设备或经过检修、改造的变压器在投运 72h 内。
2. 有严重缺陷时。
3. 气象有特殊变化(如大风、大雾、大雪、冰雹、寒潮等)时。
4. 雷雨季节特别是雷雨时。
5. 高温季节、高峰负荷期间。
6. 变压器在事故过负荷运行时。

### (二) 变压器日常巡视检查

1. 变压器的油温和温度计应指示正常,油枕的油位与温度相对应,各部位无渗油、漏油。
2. 套管油位应指示正常,套管外部无破损裂纹,无严重油污,无放电痕迹及其他异常现象。
3. 变压器音响正常。
4. 各冷却器手感温度应相近,风扇、油泵、水泵运转正常,无杂音、振动和摩擦声响,油流继电器工作正常。
5. 水冷却器的油压应大于水压(制造厂另有规定者除外)。



6. 吸湿器应完好,呼吸通畅无阻塞,吸附剂干燥。
7. 引线接头、电缆、母线应无发热迹象。
8. 压力释放器,安全气道及防爆膜应完好无损。
9. 有载分接开关的分接位置及电流指示应正常。
10. 气体继电器装满油,无气体,气体保护引出线端子盒罩盖完整且盖好。
11. 各控制箱和二次端子箱应关严,以免雨、雪、雾等浸入造成潮湿。
12. 强油风冷变压器的冷却装置电源工作方式正常,两组电源中一组在工作状态;另一组在备用电源状态。
13. 干式变压器的外部表面应无积污。
14. 变压器室的门、窗、门锁应完整,屋顶无漏水、渗水,照明应完好、充足、温度应正常。
15. 现场规程中规定的其他项目。

### (三) 变压器的特殊检查项目

1. 大风时,引线应无剧烈摆动、松动或断股,变压器的本体、瓷瓶套管及铝母线上无被大风刮上去的杂物。
2. 雷雨时,检查瓷瓶等各部有无放电闪络痕迹以及避雷器放电记录仪动作情况。
3. 大雪天,引线套管端子上落雪不应立即融化或出现蒸发冒气现象,应保持其上无冰溜子。
4. 大雾天,应加强设备巡视,套管应无放电现象。
5. 气温及负荷剧变时,应检查油枕油位及套管油位随温度的变化情况,注意伸缩节和接头有无变形或发热等现象。
6. 气体保护及差动保护动作后应立即检查。
7. 当系统发生短路故障时,应立即检查变压器系统有无开裂、断脱、移位、变形、焦味、烧损、闪络、烟火和喷油等现象。必要时取油样进行色谱分析。

### (四) 变压器的定期检查项目

1. 变压器的定期检查周期由现场规程决定。
2. 定期检查应增加以下检查内容
  - (1) 外壳及箱体应无异常发热。
  - (2) 各部位的接地应完好,必要时测量接地电阻。
  - (3) 必要时应测量铁心和夹件的接地电流。
  - (4) 定期对油样进行色谱分析。
  - (5) 强制油循环冷却的变压器应作冷却装置的自动切换试验。
  - (6) 有载调压装置的动作情况应正常。
  - (7) 各种标志应齐全明显。
  - (8) 各种气体、差动、过流、压力、温度等保护装置应齐全,良好。
  - (9) 各种温度计应在检定周期内,超温信号应正确可靠。
  - (10) 消防设备应齐全完好。
  - (11) 室(洞)内变压器通风设施应完好。
  - (12) 贮油池和排油设施应保持良好状态。

## 九、变压器分接开关的运行与维护

电力网的电压,是随运行方式和负载的大小变化而变化的。电压过高和过低,都会直接影响变压器的正常运行和用电设备的运行和使用寿命。为了使变压器能够有一个额定的输出电压,大多数是通过改变一次绕组分接开关的位置来实现调压的。

变压器分接开关的作用是改变变压器绕组的匝数比,以达到改变电压的目的。调整分接开关位置时,应注意以下几点:

### (一)无载分接开关位置的调整

1. 先将无载分接开关的止动销钉拧开或将螺栓旋出,再转动物柄,直到物柄上的指针与位置标志相重合,并以此位置为中心多次来回转动,以便消除触头上的氧化膜和油污。然后待定位销落于相应分接位置的孔中,分接开关的接触部分才能达到准确的位置。

2. 在确认分接开关位置正确并锁紧,并测量绕组的直流电阻合格后,才可将变压器投入运行。

3. 分接开关的位置应记入“变压器分接开关位置笔记本”。

### (二)有载调节变压器有载开关的调整

有载调节变压器有载开关的投运、验收、运行监视及其操作应遵守如下规定:

1. 投运前安装单位应按 GB148—90《电气装置安装工程电力变压器、油浸电抗器、互感器施工及验收规范》和 GB50150—91《电气装置安装工程电气设备交接试验标准》中有关部分及制造厂有关说明进行交接验收。同时将分接开关的新产品安装使用说明书、合格证、控制器说明书与整定值、过压力保护装置说明书与整定值、安装(检修)记录、调试记录、油的化验分析报告等技术资料移交运行单位。

2. 现场应备有分接开关运行维修细则、检修记录簿、缺陷记录簿、分接变换记录与分接变换运行次数记录表。

3. 当采用自动高压控制器时,投运前应按制造厂使用说明书和调度定值通知单位,对自动控制器进行必要的检查和调试,自动控制器的电压互感器断线闭锁应正确可靠。

4. 分接开关控制回路应设过电流闭锁装置,其整定值取与其配套的变压器额定电流的 1.2 倍,电流继电器返回系数应大于或等于 0.9,其过电流闭锁动作应正确可靠。

5. 分接开关油室内绝缘油应符合有关规定。

6. 有载调压变压器所有分接位置的变压比和直流电阻应符合有关规定。

7. 新装或大修后的有载调压变压器在投运前,由安装(检修)单位的施工人员与运行人员共同对分接开关进行以下项目的检查与验收。

(1) 对分接开关的安装(检修)资料及调试报告、记录等进行检查与验收,并应有合格可以投运的结论。

#### (2) 外观检查

1) 分接开关贮油柜的阀门应在开启位置。

2) 油位指示正常。

3) 吸湿器良好。

4) 外部密封无渗漏油。

5) 电动机构箱、机构均应清洁、防尘、防雨、防小动物、密封措施完好。

6) 进出油管标志明显。

7) 气体保护装置完好,保护方向正确。

8) 过压力的保护装置完好无损。

9) 电动机构箱与分接开关的分接位置指示正确一致。

#### (3) 电气控制回路检查

1) 控制回路绝缘应良好。

2) 回路接线正确,接触良好,接触器动作灵活,不应发生误动、拒动和连动。

3) 驱动电机的熔断器应与其容量相匹配。

(4) 检查分接开关的电动机构箱安装是否水平、垂直转轴是否垂直、动作是否灵活、加热器是否良好。

(5) 对分接开关的油流控制继电器、气体继电器进行整组动作试验。

(6) 分接开关的压力释放位置应符合产品技术要求,并应有合格证。

#### (7) 手动操作

1) 手摇操作一个循环,检查传动机构是否灵活,电动机构箱中的联锁开关、极限开关、顺序开关等动作是

否正确。

2) 水平轴与垂直轴安装是否正确。

3) 检查分接开关和电动机机构联结的正确性。

4) 正向和反向操作时,两者转动角度与手摇转动圈数是否符合产品说明书要求,电动机机构和分接开关每个分接变换位置及分接变换指示灯的显示是否一致,计数器动作是否正确。

(8) 电动操作检查

1) 先将分接开关手摇操作置于中间分接位置,接入操作电源,然后进行电动操作,识别电源相序。

2) 逐级分接一个循环,检查起动按钮、紧急停车按钮、电气极限闭锁动作、手摇操作电动闭锁、远方控制操作均应准确可靠。

3) 每个分接变换的运行位置指示,电机机构分接位置指示与分接开关分接位置指示均应一致,动作计数器动作正确。

4) 电动检查两个循环。

(9) 新装或大修后的有载调压变压器,投入电网进行五次冲击,合闸试验正常后,空载情况下,在控制室进行远方电气操作一个循环(如空载全程分接变换有困难,可在电压允许偏差范围内进行几个分接的变换操作),各项指示应正确,极限位置电气闭锁应可靠,其三相切换电压变化范围和规律与产品出厂数据相比较应无明显差别。然后调至所要求的分接位置带负荷运行,并加强监视。

### (三) 运行

1. 运行现场应具备的资料。

2. 有载调压装置及其自动控制装置,应经常保持在良好运行状态。故障停用,应立即汇报,同时通知检修单位检修。

3. 正常情况下,一般应使用远方电气控制。当检修调试、远方电气操作回路出现故障和必要时,可使用就地电气控制或手摇操作。当分接开关在极限位置又必须手摇操作时,必须确认操作方向无误后方可进行。就地操作按钮应有防误操作措施。

4. 每次分接变换操作都应将操作时间、分接位置、电压变化情况及累计动作次数记录在有载分接开关分接变换记录表内,每次投停、试验、维修、缺陷与故障处理,都应作好记录。

5. 分接开关每天分接变换次数可根据检修周期分接变换次数,检修周期与运行经验兼顾考虑。一般平均每天分接变换次数为 35kV 电压等级为 30 次,60~110kV 电压等级为 20 次,220kV 电压等级为 10 次,330kV 及以上不作规定。

6. 当变动分接开关操作电源后,在未确认电源相序是否正确前,禁止在极限位置进行电气操作。

7. 由单相变压器构成的三相有载调压变压器组,在进行分接变换操作时,应采用三相同步远方或就地电气控制操作,并必须具备同步保护。只有在空载状态下,远方控制回路出现故障而又急需操作时,方可在分相电动机箱内操作,同时应完成下列事项:

(1) 只有在三相分接开关完成 1 个分接变换后,方可进行第 2 次分接变换,不得在一相连续进行 2 次分接变换。

(2) 分接变换操作时,应与控制室保持联系,密切注意电压表与电流表的变化情况。

(3) 操作结束,应检查各相分接开关的分接位置指示是否一致。

(4) 两台有载调压变压器并联运行时,允许在 85% 变压器额定负荷电流及以下的情况下,进行分接变换操作。

不得在单台变压器上连续进行 2 个分接变换操作,必须一台变压器先进行一个分接变换后,再进行另一台的分接变换操作。每进行一个分接变换后,都要检查一次电压、电流的变化情况,防止误操作和过负荷。

(5) 进行升压操作时,应先操作负荷电流相对较小的一台,再操作负荷电流相对较大的一台,以防止过大的环流。降压操作与此相反。操作完毕,应再次检查并联的两台变压器电流大小与分配情况。

(6) 有载调压变压器与无载调压变压器并联运行时,应预先将有载调压变压器分接位置调整到与无载变压器相应的分接位置,然后切断操作电源,再并联运行。

(7) 对装有自动控制器分接开关的要求

1 装有自动控制器的分接开关必须装有计数器,当计数器失灵时,应暂使用自动控制器,查明原因,消除故障后,方可恢复自动控制。

2 两台及以上并联运行的有载调压变压器或有载调压单相变压器组,必须具有可靠的失步保护,此类变压器不能投入自动控制器。

3 当系统可能出现电压大幅波动时,应停用自动控制器。

#### (四)分接开关的事故处理

分接变换操作中发生下列异常情况时应作如下处理,并及时汇报,安排检修。

1. 操作中发生连动时,应在指示盘上出现第二个分接位置时,立即断开操作电源,用手动操作到适当分接位置。

2. 远方电气控制操作时,计数器及分接位置指示正常,而电压表和电流表又无相应变化,应立即切断操作电源,中止操作。

3. 如出现下列情况应中止或停止分接开关的操作。

(1)分接开关发生拒动、误动。

(2)电压表电流表变化异常。

(3)电动机构和传动机构出现故障。

(4)分接开关指示不一致。

(5)内部切换有异声。

(6)过压力保护动作。

(7)看不见油位或大量喷油危及分接开关和变压器运行出现其他异常情况时。

4. 若使用气体继电器代替油流控制器,运行中多次分接变换后动作发出信号,应及时放气。若分接变换不频繁而发出信号频繁,应作好记录,及时汇报并暂停分接变换,查明原因。消除故障前,不得将变压器及分接开关投入运行。

5. 分接开关巡视检查项目

(1)分接指示应在规定电压偏差范围内。

(2)控制器电源指示灯显示正常。

(3)分接位置指示器应指示正常。

(4)分接开关集油柜的油门、油色、吸湿器及其干燥剂均正常。

(5)分接开关及其附件各部位应无渗漏油。

(6)计数器动作正常,及时记录分接变换次数。

(7)电动机构内部应清洁,润滑油位正常,机构箱门关严密、防潮、防尘、防小动物,密封良好。

(8)分接开关加热器应完好,并按要求及时投入或退出。

6. 当出现下列异常时,应及时汇报,暂停分接变换操作

(1)变压器本体绝缘油的色谱分析出现异常。

(2)分接开关油位异常升高或降低,直至接近变压器油柜油面时。

7. 变压器有载分接开关的维护应按制造厂的规定进行,无制造厂规定者可参照以下规定:

(1)运行6~12个月或切换2000~4000次后,应取切换开关箱中的油样作实验。绝缘油的击穿电压不应低于30kV,当击穿电压低于30kV时,应停止使用自动电压控制器,当击穿电压低于25kV时,应停止分接变换操作,应更换切换开关箱的绝缘油。

(2)新投入的分接开关,在投入运行后1~2年或切换5000次后,应将切换开关吊出检查。此后可按实际情况确定检查周期。

(3)长期不调及长期不用的分接位置的有载分接开关,在停电时,应在最高和最低分接位置间操作几个循环,以保证操作机构经常保持良好状态。

8. 应逐级调压,即必须在一个分接变换完成后方可进行第二次分接变换,同时监视分接开关位置及电压、电流的变化。

## 十、变压器的不正常运行及其处理

变压器故障所表现的现象极其复杂,但大致可以分为四个方面:

- 磁路中发生的故障;
- 电路内发生的故障;
- 结构及装配上所发生的故障;
- 介质部分发生的故障。

因此,运行值班人员应根据变压器在运行中发现的不正常现象做出正确的判断,设法尽快采取措施加以消除,并报告主管部门和做好记录。

### (一) 变压器有下列情况应停运

变压器有下列情况之一者应立即停止运行,若有备用变压器应尽可能将其投入运行。

1. 变压器内部声响很大,很不正常,有开裂声。
2. 严重漏油或喷油,使油位无法从油位计、气体继电器上判断油位者。
3. 套管有严重破损和放电现象。
4. 变压器冒烟着火。
5. 在正常负载和冷却条件下,变压器温度不正常并不断上升,且经检查证明温度计指示正确,则变压器已发生内部故障,应立即将变压器停止运行。
6. 发生人身触电。
7. 当发生危及变压器安全的故障,而变压器的有关保护装置拒动时,值班人员应立即将变压器停止运行。

### (二) 变压器有下列情况应查明原因

遇到下列情况时,值班人员应查明原因,采取适当措施进行处理。

1. 变压器油温升高超过制造厂规定或规程规定的最高顶层油温时,值班人员应按以下步骤检查处理:
  - (1) 检查变压器的负载和冷却介质温度,并与在同一负载和冷却介质温度下正常的温度核对。
  - (2) 用酒精温度计所指示的上层油温核对温度测量装置。
  - (3) 检查变压器冷却装置,散热器冷却情况及变压器室的通风情况。若温度升高的原因是由于冷却系统的故障,应尽可能在运行中排除故障,若运行中无法排除故障且变压器又不能立即停止运行,则值班人员应按现场规程规定调整该变压器负载至允许温度下的相应容量。在正常负载和冷却条件下,变压器温度不正常并不断上升,但经检查证明温度指示正确,则认为变压器内部故障,应立即将变压器停止运行。
  - (4) 变压器在各种额定电流下运行,若顶层油温超过 $105^{\circ}\text{C}$ 时,应立即降低负载。
2. 变压器中的油因温度过低而凝结时,不应接冷却器空载运行,逐步增加负载,同时监视顶层油温。根据顶层油温投入相应数量的冷却器,直至转入正常运行。
3. 当发现变压器的油位较当时油温所应有的油位显著降低时,应查明原因。补油时应遵守规程有关规定,严禁从变压器下部补油。
  4. 变压器油位高出油位指示极限
    - (1) 首先应区分油位升高是否由于假油位所致。重点检查出气孔是否堵塞,影响了油枕的正常呼吸。
    - (2) 如确系油位过高,则应放油,使油位降至与当时油温相对应的高度,以免溢油。
  5. 当变压器因铁心多点接地且接地电流较大时,应检修处理。在缺陷未消除前,为防止电流过大烧损铁心,可采取措施将电流限制在 $100\text{mA}$ 以内,并加强监视。
6. 变压器的跳闸和灭火
  - (1) 变压器跳闸后应立即停止油泵。
  - (2) 变压器跳闸后应立即查明原因,如综合判断证明变压器跳闸不是由于内部故障所引起,可重新投入

运行。

(3)若变压器有内部故障的征兆时,应将变压器各侧断路器、隔离开关断开,进一步对变压器检查。如系变压器着火时,应立即采取以下措施:

- 1)立即断开电源,停止冷却器运行。
- 2)应立即断开变压器各侧断路器、隔离开关,退出所有保护。
- 3)如果油从上溢出,应打开下部油门,将油位降低。
- 4)如果油箱炸裂,应迅速将油箱中的油全部排出,使油流入贮油坑或贮油槽,并将残油燃烧的火焰扑灭。
- 5)若散热器漏油着火,应立即关闭散热器上、下油门,并将燃烧的火焰扑灭。
- 6)灭火时要使用不导电的二氧化碳、干粉、四氯化碳等灭火剂。不得已时,对于溢出地面或坑槽内的油火可用砂子、泥土扑灭,严禁使用水或普通灭火器灭火。

7.变压器的故障和原因,前已叙述,变压器是由磁路、电路、介质和箱体及散热装置构成的,因此,变压器的故障大致可以分为四个方面:

(1)磁路中发生的故障,是指在铁心、铁轭及其相互夹紧结构间发生的故障。

1)在变压器中,穿心螺杆穿过铁心及铁轭后套以螺帽,用以夹紧叠片,但在施工中,由于工作人员的疏忽,而使螺栓周围绝缘或绝缘垫片损坏,这种损坏形成的接地点与变压器本身的接地点,引起变压器片间局部短路,而形成涡流。如果螺栓上的绝缘有两个或两个以上损坏点时,则螺栓与螺栓间可能产生强烈的循环电流,当接地的两螺栓距离相当近时,两螺栓与两端所接触的夹件或叠片之间形成一个低阻抗回路,其电流所产生的热量足以使该部分的硅钢片温度到熔化的程度,同时可能危及线圈绝缘,进一步造成故障的发展。

2)当磁路叠片间的绝缘损坏时,或者铁轭与夹件间的绝缘损坏时,都会在局部铁心产生大量的涡流,其涡流产生的热量可能使铁心及线圈绝缘损坏。

3)由于工艺粗糙,要求不严,使不应有的铁削或碎钢片,将铁心及铁轭间绝缘短接或叠片短接,而使铁心叠片产生局部短路和涡流,造成铁心发热。

4)其他铁心缺陷,如油中金属碎渣造成铁心的片间短路。

(2)电路内发生的故障,是指在线圈、绕组绝缘及接线端所发生的故障。

变压器绕组的主绝缘和匝间绝缘是容易发生故障的部位。其主要类型有:

1)变压器的绕组处在交变磁场中,因此,变压器绕组、铁心长期受电磁力的作用,其每秒受到电磁力作用而产生振动频率约100Hz。如果在制造过程中检修工粗糙,铜导体锐利的边缘会在振动中割破绝缘,而使相邻匝间短路。

2)变压器长期过负荷运行使匝间绝缘老化。

3)变压器经过多次短路冲击,使绕组受力变形,使变压器匝间高低压层间或线圈对铁心(或外壳)绝缘击穿。

4)变压器油中进水,使变压器的匝间或主绝缘不能经受允许的电压而造成绝缘击穿。

5)由于防雷设施不完善,在大气过电压下,造成绝缘击穿。

(3)结构及散热装置或安装配合上不当发生的故障

1)在绕组结构上,由于绕组间沿线圈高度的分布不均,造成不平衡的机械应力。在变压器的次级回路上发生短路时,各级线圈中将有比额定电流大10~20倍的电流流过,由于线圈中大电流与线圈的磁场相互作用,便产生了很大的机械应力。该机械应力可以分解成两个不同方向的分力,一个是与线圈的轴垂直,该分力称辐向力;一个是沿线圈轴向的轴向力。若制造时未将线圈压紧,则在短路故障发生后,遇到线圈上下两端向上,下轭铁伸张或向线圈中部挤压造成其弯曲、变形而损坏。

短路时故障电流的大小取决于容量、变压器在系统的位置以及变压器本身阻抗值的大小。距离电压越远,故障电流越小,当发电厂并列的机组和容量越大时,则故障电流越大。

2)变压器线圈在装配时压环未压紧,或压环机械强度不够,在使用后绕组松动,当系统短路时或过大冲击电流时压环破裂,造成线圈变形或移动而损坏。

3)匝间绝缘未压紧或匝间绝缘的衬垫不在一条垂直线上(或线圈两绝缘垫块与匝间绝缘衬垫不在一条垂直线上)。

4)带电部分与外壳间电气距离不够,如某厂一台10kV/6kV的变压器,接线方式为 $Y_{y-12}$ 。当6kV系统发生一相接地时,变压器气体保护动作,吊心检查发生变压器内6kV侧铝母排裸露部分对外壳放电,将铝母线用绝缘带包缠处理后,恢复运行。

5)压环强度不够,当系统发生短路,过大的冲击电流使压环损坏,失去轴向紧力。如某厂一台110kV/6kV的备用变压器,其接线为 $Y_{y-12}$ 的带负荷调压变压器,在变压器自投于故障点后跳闸,气体信号出现,吊心检查为环氧板压环断裂,线圈严重变形,发生移动而损坏。

6)安装时套管各部位的密封情况不好,如接线端子帽、注油孔密封不良,导致水分进入变压器或套管内而发生故障。

7)检修或制造过程中,引出线与铜鼻子间焊接不良,引线过热开焊,引起套管烧炸。

8)套管的形式、尺寸选择不合理,套管装入变压器后尾部的绝缘距离不够及电场分布不合理,导致变压器故障。

9)制造或检修后装配时,由于清除残存的一切杂物不够彻底,导致焊渣、铜丝铁锈等杂物留入变压器内。

10)变压器潜油泵的轴承不是采用规定的E或C级或未按规定的周期更换轴承,运行中出现过热、振动、杂音、严重漏油、进入空气等异常现象。

## 十一、变压器介质

### (一)介质在变压器中的作用

变压器中的介质是指变压器油和绝缘材料。变压器油在变压器中起着绝缘、冷却和灭弧(在带负荷调压变压器的分接开关油箱中)作用。

1.绝缘作用,对变压器本体进行浸渍和保护,填充绝缘中的气体,防止空气和湿所侵入,保证其可靠绝缘。

2.冷却作用,变压器由于铁损和铜损产生的热量通过传导的方式传给油,通过变压器油的对流和传导将热量释放于周围环境中。因此,对变压器起着很好的冷却作用。为此要求变压器油具有较小的粘度、较高的闪光点 and 化学性质稳定,抗氧化性能、强度、热稳定性高。

但是,在实际运行中,由于绝缘油受到高温、强电场、温度、空气中氧气的氧化、阳光和杂质的作用,性能会逐渐变坏。反之,我们也可通过油质的变化反映变压器的故障,通过变压器油的介质损失、色谱分析、油耐压强度、微水分析、所含气量来监视变压器的运行工况,对变压器的状态进行分析。

### (二)油的电气击穿强度试验

目前,现场多采用专用的油击穿试验器进行油的电气击穿强度试验,其试验见图6-33。

1.试验前应检查试验设备是否良好。

2.试验前应在试验变压器与试油之间加入约5~10MΩ的限流电阻,将电流限制在10mA以下,试验应在温度为10~35℃和相对湿度不大于75%的室内进行。

3.试样应置于室内2~8h,夏天可短一些,使之接近室温。

4.在油倒出前将瓶颠倒几次使油均匀混合,但不应使其产生气泡。

5.用试油清洗电极油杯2~3次。

6.将试样沿杯壁徐徐注入油杯,将油杯接入试验回路,静置10~15min,使气泡逸出。

7.合上电源开关,均匀缓慢升压,升压速度为每秒3kV,升压至杯中发生明显火花放电,脱口开关跳闸。

8.记录击穿瞬间的电压数值。

9.静置5min后,重复上述升压试验,每杯油样共进行5次,取其平均值。

10.试验记录中应包括:油的颜色、有无机械杂质和游离碳、油温及击穿电压值、五次平均值和结论、试验日期和环境温度、油的牌号。

### (三)介质损失角的测定

测量绝缘油介质损失角正切,能灵敏地反映绝缘油在电场、高温、氧化、日照等因素作用下的老化程度,

也能灵敏地反映绝缘油中含有水分、杂质的程度。当介质损失角增大时,说明变压器绝缘受潮或者绝缘油劣化所致。

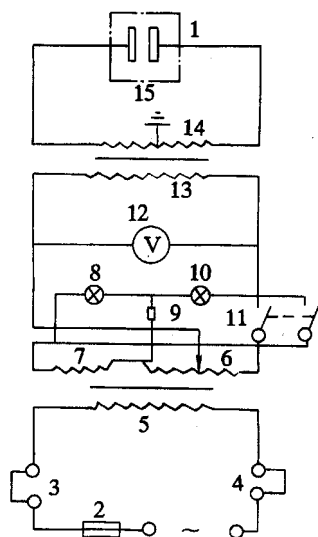


图 6-33 试验接线

1—油杯 2—熔断器 3、4—窗连锁 5—调压器一次线圈 6—调压器信号线圈 7、8—电源指示灯 9—电阻 10—合闸指示红灯 11—油击穿时自动跳闸开关 12—电压表 13—试验变压器的低压线圈 14—试验变压器高压线圈 15—线圈中点接地

#### (四) 变压器的微水分析

变压器的水分主要来自：

1. 变压器外部密封不严,造成水的浸入。
2. 空气浸入,油及绝缘材料氧化,热裂解而生成的水分。

变压器中的水分常常以溶解水、悬浮水、游离水、固体绝缘吸收水分等形态出现。溶解水、悬浮水、游离水、固体绝缘吸收水分在一定条件下可以互相转化。溶解水在温度降低达饱和时,可凝析成悬浮水;悬浮水在一定条件下可沉集成游离水;游离水在油的对流运动的裹挟下可成悬浮水;悬浮水、游离水在高温下又溶解于油成溶解水。固体绝缘材料中的水和油中水在一定条件下互相扩散。温度较低时,水分主要被固体绝缘材料吸收。

水分对变压器有极大的危害。悬浮水、游离水常常使金属材料锈蚀,生成的氧化物会恶化油的介质损耗,增加油的吸潮性,加速油和固体绝缘材料的老化。更为重要的是,使绝缘材料的抗电强度大大降低,常导致油击穿电压下降,威胁设备安全。因此,开展油的微水分析,确定油中水含量,对变压器的安全运行具有重大意义。

#### (五) 变压器油的色谱分析

变压器中使用的绝缘油、有机绝缘材料(塑料、橡皮、纸和纸板)、金属材料(紫铜、硅钢片、不锈钢),在高温和电场的作用下,会发生分解和老化,产生少量的各种气体,这些气体大部分溶解于油中,在正常情况,这个过程是缓慢的。

当变压器存在潜伏性过热或放电故障时,就会加快析出气体的速度,析出的气体形成的气泡在油里经对流、扩散,不断溶解在油中,油中的气体破坏电场分布,降低了绝缘油的抗电强度,可能导致故障的进一步发展。当产气速率大于溶解速率时,会有一部分气体聚集于变压器内,出现气体信号。

故障气体的成分和含量与故障的性质和严重程度有关。因此,分析气体的成分和含量,就能尽早发现变压器内部存在的潜伏性故障的性质,并可随时掌握故障的发展情况。



绝缘油和固体绝缘材料在电场或高温作用下,分解产生的各种气体中,对判断故障有价值的气体有:甲烷( $\text{CH}_4$ )、乙烷( $\text{C}_2\text{H}_6$ )、乙炔( $\text{C}_2\text{H}_2$ )、乙炔( $\text{C}_2\text{H}_4$ )、乙炔( $\text{C}_2\text{H}_2$ )、氢( $\text{H}_2$ )、一氧化碳( $\text{CO}$ )、二氧化碳( $\text{CO}_2$ )。总烃是指甲烷( $\text{CH}_4$ )、乙烷( $\text{C}_2\text{H}_6$ )、乙炔( $\text{C}_2\text{H}_4$ )、乙炔( $\text{C}_2\text{H}_2$ )四种气体的总和。氧( $\text{O}_2$ )、氮( $\text{N}_2$ )虽不作判断指标,但应尽可能分析。

正常运行的老化过程产生的气体主要是一氧化碳、二氧化碳,由于绝缘油与绝缘材料、不锈钢的相容性不良,可能产生异常氢含量。

在油纸绝缘中,存在局部放电油裂解产生的气体主要是氢和甲烷。在故障温度高于正常运行温度不多时,产生的气体主要是甲烷。随着温度的升高,乙烯和乙炔逐渐成为主要特征。在温度高于 $1000^\circ\text{C}$ 时,油裂解产生的气体中含有较多的乙炔。如果故障涉及到固定绝缘材料时,会产生较多的一氧化碳和二氧化碳。

当气体浓度达到注意值时,应进行追踪分析,查明原因,注意值不是划分设备有无故障的惟一标准。

出厂和新投入运行的设备,油中不应含乙炔,其他成分含量也应该很低。

## (六) 变压器局部放电的测量

在电场的作用下,绝缘介质的部分区域中发生放电现象称为局部放电。局部放电可以发生在绝缘结构的内部间隔、油膜中、导体(电极)的边缘上,这种放电一般只存在于绝缘的缺陷部分,并不会立即形成闪络或击穿,但伴随着局部放电产生的光、热和油中分解的甲烷、乙炔、乙烷、乙烯和氢、氧、一氧化碳和二氧化碳等气体,破坏了绝缘的分子结构,使绝缘性能下降,放电通道逐渐增长,发展到最后,有可能使整个绝缘击穿或闪络。所以检测局部放电是否存在以及测量其放电的强度是极为重要的。局部放电水平是评定变压器绝缘性能的一个重要参数。

### 1. 局部放电测量的内容

- (1) 检测绝缘介质是否存在局部放电。
- (2) 求出局部放电的起始电压和熄灭电压。
- (3) 求出某一电压下的局部放电强度。
- (4) 确定放电的部位,局部放电发出来的电、光、热、声和化学变化等,这些现象都可用来检测判断局部放电。局部放电检测方法的选择决定检测量内容及要求。总的来说可分为电气测量与非电气测量两大类。

### 2. 局部放电的测量方法

(1) 脉冲电流法,在电压的作用下,当介质内部发生局部放电时,由于放电流不断熄灭和重新点燃,因而形成脉冲式放电,试样二端产生一个几乎是瞬时的电压变化。这相当于发出一个高频的电磁波,再用一灵敏度较高的电子仪器接收此高频电磁波,测量此脉冲电流,就能测量局部放电的强度,这就是脉冲法的基本原理。

(2) 介质损耗法,局部放电消耗能量,使介质产生附加损耗。外施电压越高,放电次数越多,附加损耗越大。介质损耗法就是以测出这种附加损耗而监视示局部放电的。介质损耗法优点是检测方便,其缺点是灵敏度低。

### (3) 非电测量

- 1) 噪声检测法,用听觉或借助于传感器检测局部放电,这种方法灵敏度低且带有试验者的主观因素。
- 2) 气象色谱法,当油纸绝缘中存在局部放电时,由于放电时离子的撞击作用,使油分子分解,产生各种气体,局部放电时产生的主要是氢气、甲烷与乙炔,利用气相色谱仪测量溶解于油中的气体成分,以此来判断设备是否存在局部放电。

局部放电降低了油的绝缘性质,最后可能导致变压器内部严重故障,因此必须设法减少电力变压器的局部放电,其方法是要改善产品的设计,提高工艺以及更好地选择绝缘材料,如对金属电极的形状及绝缘结构进行改进,力求使电场分布均匀,对充油设备的绝缘油要求进行过滤、脱气,还需要有防尘、防潮的措施,对复合绝缘材料需合理地组合各种不同介电常数的电介质,力求使各部分合理承担电压,对固体绝缘需要进行干燥、抽真空、浸渍,以使固体绝缘的气隙填满,使电场在绝缘内部分布比较均匀,就可避免局部放电的发生。

## (七) 测量绝缘电阻和吸收比法

测量线圈连同套管一起的绝缘电阻和吸收比,对检查确定变压器绝缘状况具有较高的灵敏度。能有效

地检查出变压器绝缘整体受潮、部件表面受潮或脏污,以及贯穿性的集中缺陷。

变压器线圈电压等级在 6kV 及以上者,应用 2500V 兆欧表测量。电压等级在 500V 及以下者,应用 1000V 兆欧表测量。测量一侧线圈绝缘时,应将其他侧线圈短路并接地,这样既可以测出该侧线圈对地绝缘,也可测出该侧线圈与其他侧线圈的绝缘。测量绝缘阻值时,必须正确地使用兆欧表,以免影响使用结果。

变压器绝缘电阻若遇下列情况时,即认为不合格:

1. 在 10~30℃ 的温度下,一般  $R_{60}''/R_{15}'' < 1.3$ 。
2. 在 10~30℃ 的温度下,将测得的  $R_{60}''$  的绝缘电阻与前次测得的绝缘电阻值进行比较,阻值应接近,测试时的温度与前次测试时温度相差较大时,进行温度换算,其绝缘阻不得低于前次的 40%, $\Delta R_{60}''$  的增高不超过 30%。

## 十二、变压器的检修

### (一) 变压器检修前的准备

尽管有关规程规定了变压器大、小修的项目,但是检修工作应有所侧重点,消除变压器的缺陷,保证安全运行是大小修的重点,因此大、小修前必须了解变压器的状况及缺陷。

#### 1. 检查前的准备

(1) 检查运行日志,了解变压器的历史情况,根据日志所反映的异常情况 & 缺陷登记,以便分析故障或隐患可能发生的部位。

(2) 检修前对变压器进行外观检查,特别事故后的外观检查,通过看(观察)、闻、听、摸以判断变压器是否存在异常现象,以判断故障的性质和严重程度。

(3) 根据仪表检测变压器绝缘电阻和油温、预防性试验和色谱分析记录,通过对比分析,最后确定检修的内容、重点和项目。

#### 2. 备品备件的准备

检修前必须详细检查变压器所需的各种备品备件,如变压器各部所需的密封胶垫,除对这些密封垫的尺寸一一核对外,还要对它们的性能(例如耐油性)进行鉴定。检修变压器所更换的部件及对新部件的检查和鉴定等。

#### 3. 各种工具及试验设备的准备

现场消防设备、各种工具如真空滤油机、吊心用的专用吊桥、套管架、高压试验设备及现场消防设备。

4. 吊心前必须有严密的组织措施和技术措施,变压器铁心在空气中暴露的时间有限,因此事先应先做好充分的准备,设想可能出现的问题和解决办法,要做到忙而不乱,有条不紊。

5. 核实起吊设备、起吊重量,详细检查起吊所用的工具、绳索导链、拉钩等用具,必要时应进行承载试验。

### (二) 变压器吊心(或吊钟罩)

1. 吊心时间的确定,吊心前应与当地气象部门联系,吊心应选在晴天,相对湿度不应高于 75%,风力不要大于三级,以防灰尘、杂物等侵入变压器内。

2. 选择无烟灰、尘土和水汽的干净地点作为吊心场所。

3. 吊心时的铁心温度(即变压器上层油温)比空气温度高 10℃ 以上。

4. 起吊前应有严密的组织措施,起吊时应有专人指挥,油箱四角也要设专人监视。

5. 每根钢丝绳与铅垂线的夹角不得大于 30°,否则应采取辅助措施。

6. 起吊变压器钟罩时,为防止钟罩在空中摆动,碰伤绝缘、引线、支架等,可考虑在起吊钟罩装置时,使用不使其摆动的稳钉。

7. 起吊时应尽量缩短心子在空中停留的时间,并防止铁心、绕组和绝缘部件与油箱碰撞而受到损伤。

### (三) 拆卸变压器和吊出心子的步骤

1. 设备停电后,拆开变压器的高、低压套管引线、断开风扇、温度计、气体继电器等的电源,并把线头用胶

布包好,作好记号;对于充氮的变压器应拆开氮气管,拆除变压器接地线,必要时撤掉变压器轮下的垫铁,在变压器轨道上作好定位标记。

2. 将变压器运至检修场地,搬运工作应由专人统一指挥。
3. 放出变压器油,放油前应对油管进行检查,油管内应无水、无杂物,没有漏油。
4. 拆下套管、油垫、防爆管、风扇电机、散热器,分接开关的操作机构、漏油器、温度计和大盖的螺栓。
5. 拆卸变压器顶盖,吊出变压器铁心。对于采用钟罩式油箱的变压器,检修时吊起钟型外罩即可。

#### (四) 变压器铁心、线圈的检修

检修变压器铁心、线圈时应遵守下列规定:

1. 检修人员除携带必须的检修用具外,禁止携带其他与检修工作无关的物品(包括工作服口袋内的钥匙和其他物品),工作人员须穿不带铁钉的软底鞋,并准备好擦汗的毛巾。带入变压器内的工具,事前必须检查登记,并用白布带栓牢。

2. 使用的行灯必须是 36V 以下的电压。

(3) 检修人员上下铁心时,只能沿木支架或铁构架上下,禁止手抓脚踩线圈引线上下,以防止损坏线圈绝缘。

##### 1. 铁心检修

(1) 逐个检查各部螺栓、螺帽,所有螺栓均应紧固,并有防松垫圈、垫片,螺栓是否损伤,防松绑扎应牢固。

(2) 检查硅钢片的压紧程度,铁心有无松动,轭铁与铁心对缝处有无歪斜、变形等,漆膜是否完好,铁心硅钢片之间应有良好的绝缘,局部有无短路、变色、过热现象,接地应良好且保证无多点接地现象。

(3) 所有能触及的穿心螺栓均应连接紧固,用 1000~2500V 兆欧表测量穿心螺栓与铁心和与轭铁压梁间的绝缘电阻以及铁心与轭铁压梁之间的绝缘电阻(应卸开接地连片),其值均大于  $10M\Omega$ 。

(4) 注意检查铁心穿心螺栓绝缘外套两端的金属座套,防止因套过长与铁心触及造成接地。

(5) 铁心表面应清洁,油路能畅通,铁心及夹件之间无放电痕迹。

(6) 铁心通过套管引出的接地线应接地良好,套管应加护罩,护罩应牢固,以防打碎。

(7) 铁心可能发生的故障及处理方法

1) 夹件铁板因距铁心柱或铁轭的机械距离不够,变压器在运输或运行过程中受到冲击或振动,使铁心或夹件产生位移后,两者相碰触,造成两点或多点接地,见图 6-34。

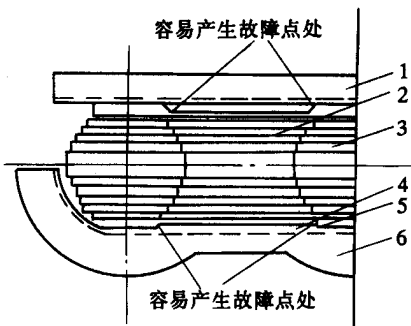


图 6-34 夹件与铁心碰触

- 1—上夹件 2—铁轭 3—铁心柱  
4—油道 5—下夹件支板 6—下夹件

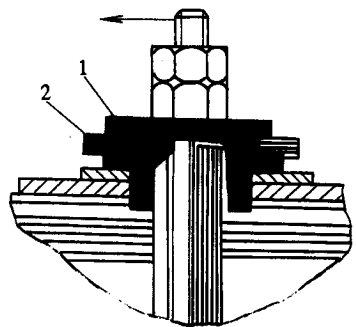


图 6-35 穿心螺杆与钢座套相碰

- 1—穿心螺杆绝缘管被挤坏后,穿心螺杆和钢座套相碰部位 2—钢座套

此时应查明两者相碰点,调整铁心柱与铁轭或夹件之间距离。

2) 铁心表面硅钢片因波浪突起与夹件相碰,或穿心螺栓的钢座套过长(或穿心螺杆绝缘管损坏,穿心螺杆与钢座套相碰)与夹件相碰,引起铁心多点接地,见图 6-35。

出现以上情况应采取的措施,予以消除。

3) 夹件与油箱壁相碰造成铁心多点接地,如图 6-36 所示,此时应调整夹件与油箱壁之间距离。

4) 电焊渣、杂物落在油箱及铁轭的绝缘中,或者落在铁心柱与夹件之间,造成铁心多点接地。应采取措施清理电焊渣、杂物等,恢复它们之间的绝缘。

5) 铁心上落有异物,使硅钢片之间短路(即硅钢片之间的绝缘脱落,局部出现癣一样的斑点,绝缘炭化或变色)则应拆开铁心进行检修。若硅钢片只有部分绝缘损坏,可将损坏的部分刮掉,清除干净后再用漆填补,若硅钢片上有数处损坏,应将其全部都用钢丝刷或用刮刀刮干净再涂漆。

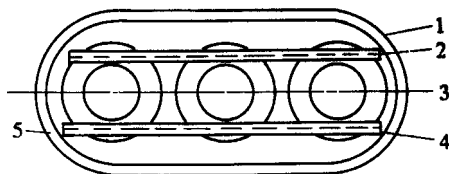


图 6-36 夹件与油箱相碰

1—油箱 2—相碰处 3—铁心

4—夹件 5—相碰处

若需要进行绝缘处理的硅钢片较少,可用毛刷涂漆,涂漆时漆膜应均匀,无漏处和空白点,不要在漆层上留下刷毛。

6) 穿心螺栓在铁轭中因绝缘破坏造成铁心硅钢片局部短路,则应更换穿心螺栓上的绝缘管和绝缘衬垫。

## 2. 线圈检修

(1) 线圈所有的绝缘垫片、衬垫、胶木螺栓无松动、损坏。线圈与铁轭及相间的绝缘纸板应完整、无破裂、无放电及过热痕迹,牢固无位移。

(2) 各组绕组排列整齐,间隙均匀,线圈无变形,线圈幅向应无弹出和凹陷,轴向无弯曲。

(3) 绕组的压紧顶丝、紧顶护环、止回螺帽应拧紧,防止螺帽和座套松动掉下,造成铁心短路。

(4) 线圈表面无油泥,油路应畅通。

(5) 线圈绝缘层应完整,高低压线圈 S 无移位,用眼观察线圈绝缘,基本可以分为四级:

一级(绝缘良好)绝缘层软韧而有弹性,颜色淡而鲜,用手按压无永久变形。

二级(合格)绝缘层干、硬而坚,颜色深而暗,用手按压后留有痕迹。

三级(不可靠)绝缘层硬而脆,颜色暗而发乌,用手按压后产生小裂纹。对这种绝缘应采取加强措施。

四级(绝缘老化)绝缘已老化,表面有裂纹及脱斑情形,用手按压后,绝缘层脆裂脱落。这种绝缘应重新更换包扎。

(6) 发现线圈有金属末子或粒子,应查明原因。

(7) 对于经受出口短路和异常运行的变压器,特别是铝线变压器,应根据具体情况进行必要的试验和检查,防止缺陷的扩大。

(8) 引出线绝缘良好,包扎紧固,无破裂现象;引出线固定牢靠、接触良好、排线正确,其电气距离符合要求。

强油循环的变压器线圈的低压裸露引线,应加包绝缘布带,以防止杂物引起短路。低压引线的固定应牢固,并有足够的机械强度。

为防止短路电流的机械力造成引线变形和移位,引线应具有足够的机械强度,并将其牢靠固定,对大容量大电流的引线尤其特别注意。

(9) 套管下面的绝缘围屏,应无放电痕迹,若有放电痕迹,说明引线与围壁距离不够,或电极形状、尺寸不合理,有局部放电现象。

## 3. 电压切换装置的检查

分接开关是变压器中惟一可转动的部件,为了满足系统电压质量,常需对其进行调整,特别是带负载调压变压器的调压开关,调整更是频繁,常因其接触不良引起发热而发生故障,检查、检修调压开关是变压器检修的重要内容之一。

### (1) 有载分接开关维修与检修

- ①有载调压变压器大、小修的同时 相应进行分接开关的大、小修。
- ②运行中分接开关室绝缘油 每六个月至一年或分接变换 2000 ~ 4000 次 至少采样一次进行分析。
- ③分接开关新投运 1 ~ 2 年或分接变换 5000 次 分接开关或选择开关应吊心检查一次。
- ④运行中的分接开关 每 1 ~ 2 年或分接变换 5000 ~ 10000 次或油击穿电压低 25kV 时 应开盖清洗换油或滤油 1 次。

⑤运行中分接开关累计分接变换次数 达到所规定的检修周期分接变换次数限额后 应进行大修 如无明显规定 一般每分接变换 1 ~ 2 万次 或 3 ~ 5 年也应吊心检查。

- ⑥运行中的分接开关 操作 3 个循环分接变换每年结合变压器小修。
- ⑦每当变压器通过穿越性故障电流时 应取样进行色谱分析 根据分析结果确定是否检修。

### (2) 分接开关大修项目

- ①分接开关心体吊心检查、维修、调试。
- ②分接开关油室的清洗、检漏与维修。
- ③驱动机构检查、清扫、加油与维修。
- ④储存油柜及其附件的检查与维修。
- ⑤油流继电器(或气体继电器) 过压力继电器、压力释放装置的检查、维修与校验。
- ⑥自动控制装置的检查。
- ⑦储油柜及油室中绝缘油的处理。
- ⑧电动机构及其他器件的检查、维修与调试。
- ⑨各部位密封检查、渗漏油处理。
- ⑩电气控制回路的检查、维修与调试。
- ⑪分接开关与电动机构的连接校验、调试及整组传动试验。

### (3) 分接开关小修项目

- ①机械传动部位与传动齿轮盒的检查与加油。
- ②电动机构的检查与清扫。
- ③各部位的密封检查。
- ④油流控制继电器(或气体继电器) 过压力继电器、压力释放装置的检查。
- ⑤电气控制回路的检查。

### (4) 临时性检修

①新投运 1 ~ 2 年或运行中分接变换 5000 ~ 10000 次或切换开关油室绝缘油击穿电压低于 25kV 或含水量大于  $40_{\mu\text{g}}/\text{L}$ (110kV 及以下分接开关油的含水量不作规定) 应更换或过滤油室绝缘油。

②新投运 1 ~ 2 年或运行中分接开关变换 2 万次 应进行切换开关吊心检查、绝缘油的更换或过滤、电动机构的检查、清扫与维修、缺陷处理及整组传动试验。

- ③根据缺陷性质和情况进行必要项目的检修与调试。

### (5) 分接开关的试验

分接开关的试验周期和标准 应执行规程在交接开关大修时的试验项目 主要有：

- ①绝缘电阻测量。
- ②测量过渡电阻值。
- ②测量每个触头接触力。
- ④检查切换程序与时间。
- ⑤动作顺序。
- ⑥操作试验。
- ⑦测量连同分接开关的变压器绕组回路的直流电阻。
- ⑧测量连同分接开关的变压器绕组变压比。
- ⑨辅助回路的绝缘试验。

必要时还须测量触头的接触电阻、测量每个触头的接触力。

#### (6) 分接开关的检查、检修内容

①分接开关的静触点与动触点应清洁无油污,触点表面镀层良好,无烧伤痕迹。若触点严重损坏,应拆下触点,换上新触点或按原样配制。触点表面粗糙程度以只 $R_{\text{a}}1.6$ 为宜,不需抛光和研磨。

②分接开关弹簧是否紧密,触点压力是否平衡,当发现弹簧压力不足或压力不平衡时,应调整触点弹簧,以保持触点接触压力适度和平衡。

③使用较久的分接开关,其触点表面常复有氧化膜和污垢,如果氧化膜很薄,污垢不多,将触点在各位置往返切换几次,即可清除,否则,需用汽油擦洗。有时绝缘油分解物沉积在触点上形成光泽薄膜,看起来很干净,其实为一层绝缘层,妨碍接触,可用丙酮擦洗,予以清除。

④传动机构应解体清洗,在拆卸分接开关传动机构时要对各相做好记号,在回装复位时不得倒置,正反操作要灵活,内部各档位置与箱外标志一致。开关的操作杆与箱盖的接缝处是否接合紧密,衬垫是否完整,对准操作杆的箱盖孔下面有无水渍。

⑤分接开关所有绝缘件、胶木筒、胶木管、胶木杆、胶木底座板等应无裂纹及变形,封闭用内胶木筒窗口与外胶木筒滑动应灵活。

⑥对可能产生悬浮电位的拨差,应采取等电位连接措施。

⑦如果采用接线板式的分接头,则应检查接线螺栓桩头的松紧情况,各接线桩头间是否因油泥堆积而发生短路或出现闪烙痕迹。

⑧各分接引线是否断裂及紧固件是否松动。

⑨传动装置各机械连接部是否牢靠,各部螺钉、弹簧、肖子应完整无缺。

⑩将分接开关切换至各档,测各相直流电阻,合格后方可带电运行。

⑪对分接开关电动机构再清洗一次,并检查其电气控制回路各接点接触是否良好,使用500~1000V兆欧表,测量电气回路绝缘阻值,机械传动部位联接应良好,且有适量的润滑油,手摇及远方电气控制正反两个方向,至少动作各1个行程分接变换。

#### (7) 分接开关维修注意事项

①分接开关每次检查、检修、调试或故障处理均应填写报告或记录。

②从分接开关室中取油样时,必须先放去排油管中的污油,然后再取油样。其击穿电压应不低于30kV,当低于30kV时,应及时安排处理。

③换油时先排尽油室及排油管中污油,然后再用合格绝缘油进行清洗。带电滤油时均应停止分接开关变换,其油流控制继电器或气体继电器应退出跳闸,投止信号,静置一段时间后待油中气体全部溢出后,再恢复跳闸。带电滤油时应遵守带电作业有关规定,采取措施确保油流闭路循环,控制适当的油流速度,防止空气进入或产生危及安全运行的静电。

④当怀疑分接开关的油室因密封缺陷而渗漏或变压器本体绝缘油色谱分析总烃、CO、CO<sub>2</sub>等异常超标时,可停止分接开关的分接变换,进行跟踪分析。

⑤用于绕组中性点调压的组合式分接开关,其切换开关中性线裸铜线应加包绝缘。

⑥切换开关心体吊出,一般应在整定工作位置进行。复装后加油前,应用手操作,观察其动作切换是否正确,并在所有分接位置测量变压器绕组直流电阻。但在转换选择器工作位置不变的情况下,至少测量3个连续分接位置。当发现相邻分接位置的直流电阻相同时,应及时查明原因,消除故障。

⑦分接开关操作机构垂直转轴转动时(或复装时),均要求预先设置在整定工作位置进行。凡是电动机机构和分接开关分离组装后,均应做连接校验。连接校验前必须先切断电动机操作电源,手摇操作做连接校验,正确后固定转轴,方可投入使用。同时应测量变压器各分接位置的变压比及连同绕组的直流电阻。

#### (8) 分接开关的吊心维修

①将分接开关油室及其储油柜内的绝缘油放尽,将分接开关头部所有油阀门关闭,将油室绝缘油抽尽,打开顶盖,按说明书的视图要求,拧出螺钉。

②在整定工作位置,小心吊出切换开关本体。

③排尽污油,用合格绝缘油冲洗油室及心体,清除内壁和心体上的游离炭,再次用合格油冲洗。

## ④分接开关的检查与维修

A. 检查各紧固件是否松动。

B. 检查快速机构的主弹簧、复位弹簧、爪长是否变形或断裂。

C. 检查各触点编织软连接线有无断脱。

D. 检查分接开关动、静触点的烧损程度。

E. 检查过渡电阻是否有断裂,同时测量直流电阻,其阻值与产品出厂铭牌数据相比,其偏差值不大于正负10%。

F. 测量每项单双数与中性引出点间的回路电阻,其阻值应符合要求。

G. 测量切换动、静触点的动作顺序,全部动作顺序应符合产品技术要求。

H. 必要时应将分接开关解体检查、清洗、维修与更换零部件,然后测试动作顺序与测量接触电阻,合格后置于起始工作位置。

I. 将切换开关吊回油室,复装注油。

⑤打开分接开关头部所有油阀门,从储油柜补充绝缘油至规定油位。

⑥选择开关的吊心检查,检查动、静触点间的磨损情况,各部位接头及其紧固件是否松动,拨盘、拨钉、定位钉、绝缘传动轴是否弯曲,测量各分接位置触头间的接触电阻。

⑦分接选择器、转换选择器的检查与维修仅在变压器大修时或必要时进行。

## 4. 油箱的检查及维修

(1) 油箱内部应清洁,无污垢。

(2) 焊缝应完好,无渗油现象。

(3) 各密封结合面应平整、清洁,密封垫良好。无渗油、漏油现象。

(4) 检查油箱内有无放电痕迹。

(5) 接地装置良好。

(6) 变压器顶盖坡度应符合要求。

(7) 外壳应喷漆。

## 5. 油枕的检修

(1) 将油枕内的油和沉淀物全部从下部排油孔排出,对油枕进行清洗(有盖的油枕应吊盖清洗),有锈者铲除后重新喷漆。

(2) 检查油枕是否完好,有无渗漏油部位,油枕与油箱的联通管是否通畅。

(3) 油位计应清洁、完整。玻动管无裂纹,油枕与油位计的连接管应通畅,不堵塞。

(4) 呼吸器的管子应高出油枕壁一定高度,以防雨水进入变压器。

6. 呼吸器的检修 由于变压器油温度的变化,变压器的油位也随温度而变化,呼吸器通过油囊隔膜与油面相接触(无油囊时直接与空气相接触),呼吸器的作用是滤除空气中杂物和潮气,以保持变压器油的绝缘强度。呼吸器应符合以下要求:

(1) 呼吸器内部应清洗干净。

(2) 过滤器与油枕联通管路应通畅,管路的各连接处应密封良好,以防潮气进入。

(3) 过滤器内的吸湿剂应清洁干燥,若已受潮,应更换或处理。

(4) 呼吸器应固定牢靠,固定高度以便于检修为原则。

(5) 呼吸器底部注入合格变压器油至规定高度。

(6) 变压器注油后,呼吸器各部位均应无渗漏油现象,呼吸器的功能应正常。

## 7. 防爆筒的检修

(1) 清除防爆管内的油垢和铁锈。

(2) 检查防爆管的放气螺钉是否完好,防爆筒与油枕的联通管或与呼吸器的联通管应畅通。

(3) 检查防爆管的薄膜垫是否良好,若有损坏有变质,应予以更换。

(4) 防爆筒应与油枕连通或呼吸器与大气连通。

(5) 防爆筒与油枕的连管应低于隔膜袋口,防止油枕出现假油位时油流入隔膜袋。

(6)安装时防爆管的喷口不得对准套管,以免出现故障时,喷出的油、火、气体造成套管间闪络。

8.冷却器的检修 变压器的冷却装置包括散热器、风扇、冷油器和潜油泵等,检修时认真做好以下检查测试工作:

(1)清除整个散热管子上的污垢,检查散热器内部是否清洁,有无锈蚀、积水,用变压器油将内部冲洗干净。

(2)检查散热器是否严密不漏,漏气或油压试验应合格(扁管散热器的试验气压为 $0.05 \sim 0.15\text{MPa}$ ,圆管散热器为 $0.2 \sim 0.3\text{MPa}$ )强油风冷循环散热器回路、油路之间密封应良好,互不串油。

(3)所有阀门、取样门应开、关正确、灵活、关闭严密、不漏油。

(4)检查强油水冷装置的冷却器,水管道和阀门等的内部是否清洁,有无堵塞现象,经充气试验应合格(不漏水、漏油)。

(5)强油循环的变压器,应注意检查本体及冷却系统各部位的连接密封是否良好。密封垫应安装正确,保持完好,制造上有缺陷的应处理好,如潜油泵的胶垫、进油阀门的密封盘根、压差继电器的连接管等。更换胶垫时,对性能不明的胶垫材料应做操作耐油试验。

(6)水冷却冷油器和潜油泵在安装前应按照制造厂的安装说明书,对每台做检漏试验。

(7)检查风扇电动机转动是否轻快,有无异常响声,轴承润滑是否良好,绝缘电阻是否合格,操作回路和联动启停装置动作是否正确。

(8)检查风扇固定是否牢靠,有无变形,运行中有无振动,旋转方向是否正确(垂直安装者风应向上吹,水平方向安装者风应向内吹),风扇与散热器风筒之间有无足够的间隙,以免风扇扫膛。

(9)检查潜油泵尾端的观察玻璃窗是否完整、透明,潜油泵叶轮转动是否灵活,有无扫膛现象,旋转方向与标记是否一致,油泵的冷却油路是否畅通无阻。

(10)潜油泵的轴承应采用E级或C级,上轴承应改用向心推力轴承,禁止使用无铭牌、无级别的轴承,运转中如出现过热、振动、杂音及严重漏油等异常现象时,应立即停运并检修。

(11)大修后的潜油泵,应用千分表检查叶轮上端密封环外圆的径向跳动公差,不得超过 $0.07\text{mm}$ 。

(12)检修时应注意检查油动继电器的薄膜及触点,如果薄膜失效或微动开关失灵,则应进行修理或更换。

(13)检修时,对强油循环的冷却系统的两个电源,应进行检修和自动装置的切换试验,自投应良好,信号装置应可靠。

9.气体继电器的检修 气体继电器的检修应遵照继电保护规程。

10.温度计的检查和校验

(1)温度计的校验及整定由仪表工人进行,电气人员拆装扇形温度计时必须谨慎,严防将毛细管打折。

(2)在变压器靠近弯部箱壁上应装有一个酒精温度计,以便在必要时校对扇形温度计的指示。

11.套管的检修

(1)清洗套管外部的油污,变压器套管上的油污是油和粉尘积聚而产生的。油污可用酒精冲洗,然后用白布擦掉。

(2)检查套管的法兰、铁件、瓷件应完好,无裂纹、破损或瓷釉损伤,瓷裙外面无闪络痕迹。

(3)要认真检查套管各部位的密封情况,当套管和铁件的胶合处发现裂纹、破损和漏油等情况时,必须重新胶合。充油套管各接合处不得有渗油和漏油现象。油位计完好,指示正确。

(4)接线端子帽及注油孔密封良好,严防水分自引线进入变压器内或进入套管内而发生故障。端部密封结构不合理的套管,要抓紧改造,要选用较好的结构,确保密封良好。

(5)对 $110\text{kV}$ 及以上的套管均应定期做介质损失角和电容量的测量和油色谱分析,如发现问题就在大修中处理,组装后应进行真空处理。

(6)对新投运的 $110\text{kV}$ 及以上套管均应有局部放电测试记录,并进行微水分析、油色谱、介质损失角、电容量等测定。如发现套管有渗漏时,应处理,并经试验合格后才能投入使用。

(7)检修人员应根据运行人员记录,在检修中注意检查套管引出线端子的发热情况,引出线与铜鼻子的连接,禁止用锡焊,防止因接触不良、引线过热开焊引起套管爆炸。



(8) 检修中更换不同型式、尺寸的套管时,应注意套管装入变压器尾部的绝缘距离及电场分布状况。

(9) 定期对套管进行清扫,保持套管清洁,在污秽严重地区的变压器,可考虑采用加强型套管,防污硅橡胶裙或防污闪材料。

(10) 充油套管竖立静置一定时间后,应无渗漏油现象。

## 12. 引线检修

(1) 在变压器大修施工过程中,应注意勿使引线扭转,不要过分用力吊拉引线,以免引线根部和线圈绝缘受伤。如果引线过长或过短,则应予以处理。

(2) 在吊心吊罩时,应注意检查引线间,引线对围屏及引线对地应保持足够的绝缘距离,必要时予以校正,并注意去掉裸露引线上的毛刺尖角,防止在运行中发生局部放电以致击穿。发现引线绝缘有损伤应于修复或更换。

(3) 检查时严禁踩在引线的根部,以免损伤引线与线圈的焊接接头,各引线接头应焊接良好。大修前应进行色谱分析和测量直流电阻,可以及时发现接头过热故障。对套管及分接开关的引线接头,如发现缺陷应在大修中及时处理。检修后应做检查试验,保证焊接质量。

## (五) 变压器检修后的组装

对变压器铁心、外壳及附件检修完经详细检查后,应用规定的液体(油、碱溶液、水)清洗干净后,即可进行组装。组装的步骤如下:

1. 将变压器小心装入油箱,并装上大盖。
2. 组装分接开关机构、热虹吸、散热器、油枕、气体继电器和防爆管等附件。
3. 往变压器油箱中注油,先将油注至淹没绕组,其余部分待装完套管后再补注。
4. 安装套管、连接套管下端引线和分接开关的接头。
5. 补注油至标准油位,注油时应先排除大盖下面套管座等突出部分积聚的气体。
6. 静置 8、24h 后,均应对套管根部进行排气。
7. 静置 24h 后,可做检修后的电气试验。
8. 将变压器运回原安装地点,对准检修前所做的定位标记,垫好变压器轮下垫铁。
9. 连接套管引线,接通风扇电动机电源,并校对电动机转向,接通气体继电器和温度计的电源,并连接好接地线。

## (六) 变压器的注油

1. 变压器注油前应对绝缘油进行含水量、含气量、油耐压强度和  $\lg\delta$  等进行分析,应严格控制这四大指标。油的采样应从注油设备的出口取得。

2. 注油应采用真空注油法。

3. 严禁自变压器下部注油,以防止将空气或箱底水分、杂物等带入线圈中。

4. 装有薄膜密封的大容量变压器,注油应严格按厂家说明书的要求进行,防止出现假油位和进入空气。

5. 注油时要特别注意,防止真空滤油机轴承磨损或滤网损坏造成的金属末或杂物进入变压器内部。

## (七) 热虹吸过滤器

为了延长变压器油的使用寿命,在变压器外部装有热虹吸过滤装置,在装置内装有吸附材料——硅胶。在变压器的运行过程中,由于上、下油温不同,所以油在变压器内对流运动,循环运动的油流过热虹吸装置。油中的有害成分如水分、游离炭、氧化物、纤维等被硅胶吸收,油经过滤过、净化,从而使保持了良好的绝缘性质和化学性质。检修后接用热虹吸过滤器时应注意以下几点:

1. 如果变压器内的油已相当老化和含有沉淀物,应仔细清洗变压器,除去外壳内的沉渣和机械混合物,换油后然后才可接用热虹吸过滤器。

2. 如果变压器油的绝缘强度已显著降低,应选用真空滤油机、离心式滤油机滤除油中水分。

3. 投入使用前,应往热虹吸过滤器内注满油,并排除其中积存的气体。

4. 如果热虹吸出口的油,其酸价比变压器外壳内的油的酸价低,而变压器的酸价达到  $0.1 \sim 0.15\text{mg}$ ,则应立即更换吸附剂。

5. 硅胶装入前必须进行干燥。

6. 新装或更换硅胶,应选择颗粒大的硅胶,新硅胶装入后,用变压器本体的变压器油对硅胶进行冲洗。其方法是先打开上部阀门,静置几小时后,然后从下部放油螺钉放出部分变压器油和碎渣,直到放出油干净无硅胶颗粒碎渣为止。

7. 装好硅胶后要排出热虹吸内的气体,以防气体继电器频繁动作。

8. 热虹吸过滤器应安装正确,防止活性氧化铝或硅胶冲入变压器内,对已发生冲入氧化铝或硅胶的变压器,应尽早安排检修。

9. 定期检修,根据化验结果及时更换硅胶。对质量有怀疑的热虹吸过滤器应在大修时解体检查。

## 十三、变压器的干燥

### (一) 变压器经过检修后

变压器经过检修后是否要经过干燥后才能投入运行,取决于下列试验情况:

1. 大修后的变压器,其心子在空气中连续暴露的时间,以其与外部空气接触的时间算起,不应超过下列规定:

当空气相对湿度 $\leq 75\%$  环境温度 $> 10^{\circ}\text{C}$ 时,110kV以上的变压16h,35kV以下的变压器24h。

2. 检修后测得的绝缘电阻值与在检修前在同一温度下测得的绝缘电阻值相比,或者与换算后同一温度下的相应值相比:

(1) 绝缘电阻值降低不超过40%。

(2)  $C_2/C_{50}$ 增大不超过10%。

(3)  $\lambda_{gt}$ 增高不超过30%。

(4)  $R_{60}''/R_{15}''$ 值在 $10\sim 30^{\circ}\text{C}$ 的温度下,不小于1.3。

满足上述条件时,即可不需干燥就可投入运行。当不满足上述条件时,应综合分析,决定是否需以干燥处理。

### (二) 现场使用的变压器干燥方法

1. 当符合下列条件者,变压器心子可在油箱中进行有控制的干燥

(1) 变压器心子在空气中停留的时间超过规定的时间但未超过48h。

(2) 变压器的绝缘性能鉴定不符合要求,但与要求接近时。

2. 热风干燥法 热风干燥的原理是利用空气的热量加热变压器的各部分,使吸附在绝缘中的水分蒸发,从而达到干燥的目的。这种干燥方法即可在变压器的油箱里或者在干燥罐中,还可在干燥室内进行。

进口热风温度应逐渐上升,最高温度不应超过 $95^{\circ}\text{C}$ 。为保证在烘干过程中变压器心子的安全,必须采取下述安全措施:

(1) 热风进口处应设过滤器或装金属栅网,以消除粉尘。

(2) 为使变压器纸质绝缘温度能均匀上升,在热风进口与变压器之间应装上挡板,使风扩散,然后缓慢地吹向变压器各处,不可直接吹到绕组上。

(3) 在变压器的顶盖上,可利用入孔或一只高压套管的法兰孔,装上一根管子将热风抽出。

3. 使用油箱铁损烘干法烘干变压器,这种方法是将变压器放在油箱内,外绕线圈通以电流,利用油箱隔壁中涡流损耗的发热来干燥变压器心子。

4. 干燥理论和现场实践证明,当变压器纸质绝缘的温度较高、较均匀,干燥容器内绝缘周围的水蒸气压力越低时,干燥后绝缘内的剩余含水量越低。因此,在干燥的同时,采用降低干燥容器内真空的方法。

(1) 热风真空干燥法 热风真空干燥法的载热体是热空气,一般是将变压器的心子放在一个容器(变压器油箱,真空罐内)用真空泵抽去容器内的空气,再用抽风机抽吸经过干燥的空气,并使其通过热交换器后,吹到被干燥的变压器身上。循环的热风在热交换器内吸收热量又释放给变压器器本身。如此循环,在变压

器器身被加热的过程中,绝缘也得到干燥。然后再通过真空泵使容器保持一定时间的真空,达到脱水、脱气的目的。这种方法的缺点是:

1) 需要较长的干燥时间,一般均需5~10天或更长。

2) 由于绝缘厚度的影响以及随着水分的大量脱出,吸附力越来越大,干燥效果不理想。

3) 如将变压器本身放在变压器外壳内进行干燥,首先应确定变压器外壳结构所允许的真空度,在干燥过程中不允许超过此真空度限度,否则应对变压器外壳进行加固。

所以这种方法仅适用于受潮不严重或电压等级在110kV以下的变压器干燥。

(2) 热油真空脱气干燥法,这种方法是以前述热油作为载体,加热变压器本身,当纸质纤维绝缘受热温度上升,表面水分开始蒸发,内部水分受热逐渐从内层向外层扩散。由于纸和油的含水量不同,在一定温度下,则纸中的水分不断向油中扩散,使油纸含水与油中含水量不断趋于平衡,由于热量的不断维持,平衡关系逐渐改变,以至再达到新的平衡,使变压器绝缘得到干燥,具体的干燥系统见图6-37。

首先,往装配好的变压器油箱底部注入少量绝缘油,油位高度以不淹没绕组处。然后通过滤油机(包括滤油网和油泵)泵将油吸出,泵至热交换器,将被滤过的油加热到100~110℃,热油经喷雾头喷成雾状,均匀喷洒在变压器本体上。雾状的热油呈薄膜状落于绕组表面,在绕组表面再次进行热交换,绝缘油的热向绕组内部传导。把部分热量传导给绕组绝缘,降低了温度的绝缘油落到油箱底部。再由滤油机从油箱底部将油抽出至热交换器,连续反复上述的循环加热,使绕组温度上升,引起水分迅速蒸发。

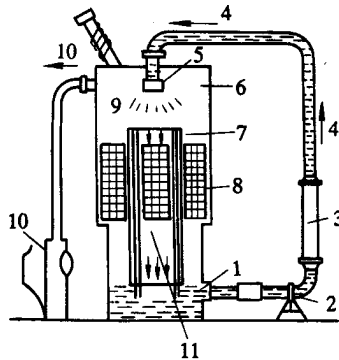


图6-37 热油真空脱气干燥法

- 1—滤油器 2—油循环泵 3—热交换器 4—热油  
5—喷雾油 6—变压器外壳 7—铁心 8—绕组  
9—喷雾油 10—排气装置 11—油

为了使干燥容器内绝缘绕组周围水蒸气的压力低于绝缘内部水蒸气的压力,借助于真空排气装置,一方面使干燥容器内经常保持在666Pa以下的真空度,以防止绝缘油因温升而变质;另一方面降低绝缘绕组周围的压力,使绕组内部的水分迅速扩散、蒸发,蒸发的水分通过真空排气向外抽出。真空热油喷雾法的优点是:

1) 因为绝缘油的热容量和热传导都比空气大,而且当热油浸入绝缘物中,使绝缘内外层之间有热传导桥,热传导和水分的扩散都较容易,干燥速度快,缩短干燥时间,干燥彻底。一般“热风真空干燥法”需要8~14天,而本法只需要3~5天。

2) 干燥准备工作简单,不需要大规模的干燥设备。

3) 变压器油不会变质,并可就地干燥。

4) 能充分清洗变压器内部。

此外,还有零序电流干燥法、铜损干燥法等都是常用的干燥法,这里不再赘述。

## 第七章 互感器安装与维修技术

### 第一节 互感器的类型与用途

#### 一、互感器分类

(见表 7-1、表 7-2)

表 7-1 常用互感器的分类

类别	型式	特点	标准
电磁式 电压互 感器	单相干式	采用环氧浇注绝缘,维护简单,误差稳定。不接地型供相间联结用,按 V 或三角形联结运行;接地型供相地间联结用,均接 YN <sub>yn</sub> ,开口三角形联结运行。由剩余电压绕组构成的剩余电压回路供输出零序电压用	GB1207—1997 IEC186
	单相油浸式	采用油纸绝缘,误差稳定。有不接地型与接地型两种	
	串级油浸式	采用油纸绝缘,绝缘分级数与额定电压有关,误差稳定,只能设计成接地型	
	SF <sub>6</sub> 气体 绝缘式	采用 SF <sub>6</sub> 气体,误差稳定,只生产接地型。单相式用于分相全封闭组合电器,三相式由三台单相互感器构成,用于三相共箱全封闭组合电器。另外,还有单个式单相 SF <sub>6</sub> 气体绝缘互感器,用于一般开敞式变电站	
电容式 电压互 感器	单相油浸式	是由电容分压器和电磁单元构成,高压电容器可兼作载波耦合电容器使用,只能设计成接地型。分离式的电容分压器和电磁单元分装成两个独立的整体,两部分仅有电气上的联系,检修方便,结构上比较松散;单柱式的电容分压器叠装在电磁单元之上,结构紧凑,检修困难	GB4703—84 GB4705—92 IEC186 IEC358

类别	型 式	特 点	标 准
电 流 互 感 器	干 式	采用浇注绝缘,维护简单;有贯穿式、母线式、支持式三种,用于开关柜,或安装在发电机回路中	GB1208—1997 IEC185
	油浸式	采用油纸绝缘,正立式重心低,适用于地震带;倒立式重心高,适用于非地震带	
	装入式	结构中无一次绕组及其主绝缘,装于变压器、断路器和全封闭组合电器套管上	
	SF <sub>6</sub> 气体 绝缘式	同 SF <sub>6</sub> 气体绝缘电压互感器	
零序 电 流 互 感 器	干 式	有电缆式和母线式之分,与电流继电器或与接地型电压互感器的剩余电压回路和功率方向继电器构成中性点绝缘系统的单相接地保护装置。这种保护装置有选择性,不需要进行选线操作,避免了非故障线路的停电和较长时间的寻找故障的操作过程	
组 合 互 感 器	油浸式	采用油纸绝缘,电流互感器与电压互感器同装于一个容器内,适用于线路变压器组和桥式主联线	GB17201—1997 IEC44—3
直 流 互 感 器	油浸式或 干 式	直流电流互感器实质上是利用安匝相等原理工作的饱和电抗器,直流电压互感器系将直流电流互感器与高压线性电阻串联至高压直流线路两端,使流经直流电流互感器的电流与电压成正比。高压直流互感器为油浸式,用于直流输电线路,低压直流互感器为干式,用于测量直流强电流	

表 7-2 新型互感器的分类

类 别	特 点
光耦合式 电 流 互 感 器	高低压回路用带信息的光束耦合,绝缘结构简单可靠,有光电式和磁光式两种,可输出模拟量或编码,输出容量小
带电子装置的 电容式电压互感器	由电容分压器和电子放大器构成,高压电容器的电容量很小,电容分压器只输出信号,用于全封闭组合电器

## 二、互感器用途

1. 与测量仪表配合,对线路的电压、电流、电能进行测量;与继电保护装置配合,对电力系统和设备进行保护。
2. 使测量仪表、继电保护装置与线路高电压隔离,以保证运行人员和二次装置的安全。

3. 将线路电压与电流变换成统一的标准值,以利仪表和继电保护装置的标准化。

## 第二节 电压互感器及其运行与维护

电压互感器是一种电压的变换装置,可将高电压变换为低电压,以使用低电压值反映高压量值的变化,可以直接用普通电气仪表进行测量。由于电压互感器二次侧均为 100V,使测量仪表和继电器电压线圈标准化,因此电压互感器在电力系统中得到了广泛应用。

### 一、结构原理

电压互感器实质上是一种专用变压器,其结构原理与普通变压器相同,如图 7-1 所示。它由铁心、一次线圈、二次线圈、接线端子、绝缘支持物等组成。电压互感器的一次线圈的匝数很多,而二次线圈的匝数很少。它的一次线圈并接在高压电路中,二次线圈与测量仪表或继电器的电压线圈并接在一起。由于这些电压线圈的阻抗相当大,所以电压互感器在工作时接近空载状态。电压互感器的一、二次侧的电压比约为一、二次侧线圈的匝数比,即  $U_1/U_2 \approx N_1/N_2$ 。

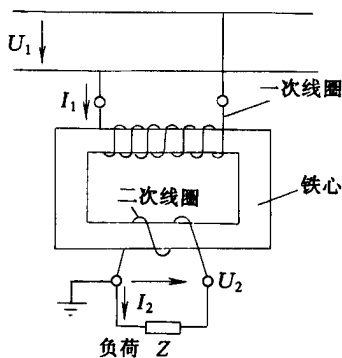


图 7-1 电压互感器的结构原理图

### 二、选择与使用

#### (一) 选择

1. 根据被测电压的高低选择电压互感器的额定变比,即应该使所用的电压互感器的一次线圈的额定电压大于被测电压。

2. 与电压互感器配套使用的测量仪表一般选 100V 的交流电压表。通常板式电压表是按所选用的电压互感器的一次线圈额定电压刻度的,而在该表上标明了所需配用的电压互感器规格,因此按此规格选用电压互感器即可。

3. 所选用的电压互感器应符合规定的准确度等级。

4. 测量仪表消耗的功率不得超过电压互感器的额定容量,否则会使误差增大。

#### (二) 正确使用

1. 电压互感器的一次线圈与被测电压的电路并联,而二次线圈则与测量仪表相连接,并使极性正确。

2.电压互感器的一、二次线圈都应接熔断器,以防止发生短路故障。电压互感器的二次线圈不准短路,否则电压互感器将因过热而烧毁。除了装设熔断器外,有时还安装保护电阻,用以减小短路电流。

3.电压互感器的二次线圈、铁心和外壳都必须可靠接地,这样即使在线圈绝缘损坏,二次线圈对地电压也不会升高,以保证人身和设备安全。

4.检修电压互感器的刀开关或在二次回路上进行工作时,除了按规程填写工作票外,还应考虑切断电压互感器的电源是否会影响继电保护装置;取下一、二次侧熔断器,防止反送电造成高压触电;拉开有关刀开关、验电器和挂接地线。

5.电压互感器二次线圈的电压降一般不得超过额定电压的0.5%,接用0.5级电度表时不得超过0.25%。

6.对有双母线,两组电压互感器的变配电站,电压互感器二次侧并列前,一次侧必须先经母联开关并列运行,否则,将会由于不平衡电压在二次侧产生大的环流使熔断器熔断,保护失压误动作,造成供电中断。

7.对于移相电容器放电用的电压互感器一次侧及110kV以上的电压互感器一次侧,不准装熔断器,主要是考虑到移相电容器的安全放电要求和110kV以上电压互感器一次侧的引线为硬连接,相间距离大,发生短路可能性小,即使发生短路,系统的保护装置将很快动作切除故障。

### (三) 极性测定

电压互感器的极性就是表明一次线圈和二次线圈在同一瞬间的感应电动势方向相同还是相反。相同为减极性,相反为加极性。极性测定方法有差接法和比较法两种:

1.差接法 如图7-2所示,将电压互感器的高压线圈接到交流220V电源,并将电压互感器高压正端与低压正端连接。当单极双投开关S投向“1”时,测得电源电压;投向“2”时测得两负端电压。这时,如果测得的电压小于电源电压,则为减极性;若大于电源电压,则为加极性。

2.比较法 如图7-3所示,TV<sub>1</sub>为已知减极性标准电压互感器,TV<sub>2</sub>为同一电压规格但未知极性的待测电压互感器。从高压侧引入同一电源,如果电压表指示为零或几乎为零,则为减极性;否则,为加极性。

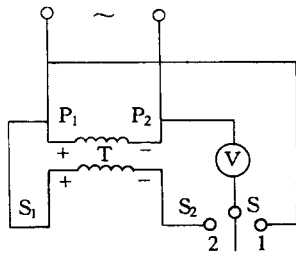


图7-2 测定电压互感器极性的差接法

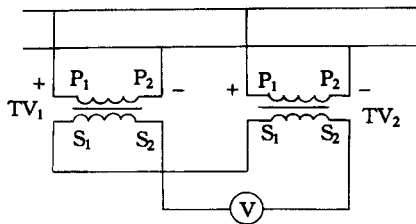


图7-3 测定电压互感器极性的比较法

## 三、运行与维修

### (一) 运行前及运行中巡视检查

1. 瓷套管是否清洁、完整,绝缘介质有无损坏、裂纹和放电痕迹。
2. 充油电压互感器的油位是否正常,油色是否透明(不发黑),有无严重的渗、漏油现象。
3. 一次侧引线和二次侧各连接部分螺钉若有松动,应予以紧固,保证接触良好。
4. 电压互感器内部是否有异常响声,有无放电声和剧烈振动声,当外部线路接地时,更要注意响声是否正常,有无焦臭味。
5. 6~35kV电压互感器的开口三角线圈上安装的灯泡(指示过电压用)有无损坏,若已损坏,应予以更换。
6. 电压互感器的保护接地是否良好,若有断开或锈蚀,应及时进行更换,防止二次侧绝缘击穿时,使一次侧高压窜入二次侧回路,造成人身和设备事故。
7. 高压侧导线接头有无过热,低压电路的电缆和导线有无损伤和锈蚀,低压侧熔断器及限流电阻是否完好。
8. 高压中性点上所串联的电阻是否良好,若已损坏,应立即更换,当无备品时应尽快恢复中性点接地。
9. 观察接至测量仪表、继电器和自动装置及回路的熔断器熔体有无熔断,电压互感器一、二次侧熔体有无熔断,表计指示是否正常。
10. 呼吸器内部的吸潮剂是否潮解,若硅胶油由原来的天蓝色变为粉红色,即表明硅胶已受潮,应及时更换。

### (二) 异常运行

运行中的电压互感器出现下列故障之一者,应立即退出运行:

1. 瓷套管破裂、严重放电。
2. 高压线圈的绝缘击穿、冒烟,发出焦臭味。
3. 电压互感器内部有放电声及其他噪声,线圈与外壳之间或引线与外壳之间有火花放电现象。
4. 漏油严重,油标中看不见油面。
5. 外壳温度超过允许温升,并继续上升。
6. 高压熔体连续两次熔断,当运行中的电压互感器发生接地、短路、冒烟着火故障时,对于6~35kV装有0.5A熔体及合格限流电阻者,可用刀开关将电压互感器切断,对于110kV以上电压互感器,不得带故障将刀开关拉开,否则,将导致母线发生故障。

熔断器是电压互感器的惟一保护装置,当发现高、低压熔体熔断时,应进行下列处理:

- (1) 高压熔体熔断时,应认真查明原因,确认无问题后,再进行更换。低压侧熔体熔断应立即更换,并保证熔体容量与原来相同,不得增大。
- (2) 发现熔体熔断,应先将有关保护解除(如低压闭锁、方向闭锁、距离保护、复合电压闭锁等),然后更换熔体,待处理完毕,恢复正常后,再将停用的保护装置投入运行。
- (3) 如更换熔体后,仍有断线信号,则应拉开刀开关,检查回路接头有无松动、断线现象,切换回路有无接触不良,有无短路故障等。

### (三) 电压互感器二次回路接地

电压互感器的一次线圈接于高压系统,如果在运行中,发生高压线圈对低压线圈绝缘击穿,高压电将窜入二次回路,这对二次设备(如仪表、保护、自动装置)是一个极大的损坏,更重要的是严重威胁到电气工作人员的安全。因此,为保证二次设备和人身安全,要求电压互感器的二次回路有一点接地,在电压互感器每组二次绕组均应有且只能有一个接地点,接地点必须设在电压互感器二次引出端子处。



## (四) 运行中更换电压互感器注意事项

对运行中的电压互感器及二次线圈需要更换时,除执行安全规程外,还应注意下列几点:

1. 个别电压互感器在运行中损坏需要更换时,应选用电压等级与电网电压相符、变比与原来相同、极性正确、励磁特性相近的电压互感器,并经试验合格。
2. 更换成组的电压互感器时,还应对二次侧与其他并列运行的电压互感器检查其接线组别,并核对相位。
3. 电压互感器二次线圈更换后,必须进行核对,以免造成错误接线,特别是防止二次回路短路。
4. 电压互感器及二次线圈更换后必须测定极性。

## (五) 停用电压互感器注意事项

1. 一般电压互感器的二次侧接有线路的距离保护、方向保护、低电压闭锁过流保护、低电压保护和自动装置。停用电压互感器时,应将有关保护和自动装置停用,以免造成装置失压误动作。

为防止停用的电压互感器从二次侧向一次侧反充电,造成运行电压互感器过流动作,停用时应将二次侧保护取下,再拉开一次侧刀开关。

2. 停用的电压互感器,若一年未带电运行,在带电前应进行试验和检查,必要时可先安装在母线上运行一段时间后,再投入和运行。

## (六) 维修

1. 油浸式电压互感器的油面距油箱盖一般应在 10~15mm,若距离过大,则电压互感器本身和引线将露出油面,这时要检查绝缘有无受潮现象。

2. 测量线圈的绝缘电阻,其值应不低于规定值 70%。

3. 电压互感器二次回路不得短路,若有短路,应立即退出运行,并进行检查和试验。

4. 三相三线圈电压互感器空载时,若一、二次侧相电压平衡,则零序回路的端电压应不大于 8V,要求试验中一次侧应接三相电缆,电缆对地电容应不小于 0.2 $\mu$ F。

5. 线路发生单相接地故障时,允许电压互感器连续运行 2h,防止线圈由于过热而损坏。

6. 电压互感器大多是因绝缘受潮、击穿、匝间短路、线圈烧坏、套管损坏而引起故障,一般可参照变压器的修理方法,按原样进行修复。

# 四、常见故障与处理

## (一) 电压互感器回路断线

1. 由于电压互感器的高、低侧熔断器熔体熔断,若高压侧熔体熔断,应拉开电压互感器入口隔离开关,更换熔体,并检查在高压侧熔断器前有无异常现象。测量电压互感器的绝缘电阻,确认良好后,方可送电。若低压侧熔体熔断,应立即更换,并保证熔体容量与原来相同,不得增大。如再次熔断,应查明原因,及时修复。若一时找不出故障原因,应调整有关设备的运行方式。在检查高、低压熔断器时,必须做好安全措施,以确保人身安全,并防止保护装置误动作。

2. 回路接线松动或断线,应紧固接线螺钉,并找出有无断线现象。

3. 电压切换回路辅助触点及电压切换开关接触不良,应仔细检查回路各辅助接头及开关本身的接触情况,保证接触良好。

## (二) 电压互感器高压或低压熔断器熔断

1. 电压互感器低压电路发生短路,使低压侧熔体熔断,应立即更换同样规格的熔体,如果再次熔断,应查明原因后再进行处理。

2. 高压电路相间、匝间或层间短路及一相接地等故障,使高压侧熔体熔断,应首先将电压互感器的隔离开关拉开,并取下低压侧熔体检查有无熔断。在排除电压互感器本身故障或二次回路故障后,重新更换与原

来相同规格的熔体,使电压互感器投入运行。

3. 熔断器日久磨损也会造成高压或低压侧熔体熔断,应定期进行检查。

4. 由于某种原因,电路中的电流和电压发生突变,此时引起的铁磁谐振,使电压互感器励磁电流增大几十倍,会使高压侧熔体迅速熔断。

5. 电压互感器低压侧发生短路,当低压侧熔体未熔断时,因励磁电流增大,使高压侧熔体熔断。

6. 当系统发生单相间歇性电弧接地故障时,将会产生高压电,使电压互感器的铁心很快饱和,励磁电流急剧增加,使熔体熔断。

## 第三节 电流互感器及其运行与维修

电流互感器是一种电流变换装置,可将高压电流和低压大电流变换成电压较低的小电流,供给仪表和继电器保护装置,并将仪表和保护装置与高压隔离电路隔开。电流互感器的二次电流均为 5A,使测量仪表和继电器保护装置使用安全、方便。因此,电流互感器在电力系统中得到了广泛应用。

### 一、结构原理

电流互感器的结构原理与变压器相似,如图 7-4 所示。由铁心、一次线圈、二次线圈、接线端子、绝缘支持物等组成。电流互感器的一次线圈与电力系统的线路串联,流过较大的被测电流,在铁心内产生交变磁通,使二次线圈感应出相应的二次电流。二次线圈与仪表、继电器保护装置的电流线圈串接成二次回路。电流互感器一、二次侧电流比约为一、二次线圈匝数的反比,即  $I_1/I_2 \approx N_2/N_1$ 。

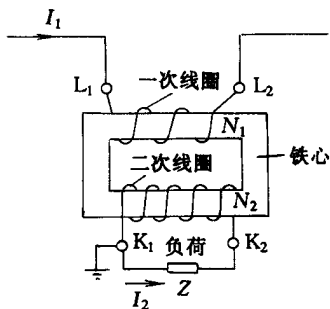


图 7-4 电流互感器结构原理图

### 二、选择与使用

#### (一) 选择

1. 电流互感器的额定电压与电网的额定电压应相符。

2. 电流互感器一次额定电流的选择,应使运行电流为其 20% ~ 100%; 10kV 继电器保护用的电流互感器一次侧电流一般应不大于设备额定电流的 1.5 倍。

3. 所选用电流互感器应符合规定的准确度等级。

4. 根据被测电流的大小选择电流互感器的变比,要使一次线圈额定电流大于被测电流。

5. 电流互感器二次负载所消耗的功率或阻抗应不超过所选用的准确度等级相应的额定容量, 以免影响准确度。

6. 根据系统运行方式和电流互感器的接线方式来选择电流互感器的台数。

7. 电流互感器选择之后, 应根据装设地点的系统短路电流校验其动稳定和热稳定。

## (二) 正确使用

1. 电流互感器的一次线圈串联接入被测电路, 二次线圈与测量仪表连接, 并使一、二次线圈极性正确。

2. 电流互感器一次线圈和铁心均要可靠接地。

3. 电流互感器二次线圈不允许开路, 由于二次阻抗很小, 因此接近于短路状态。拆装时先将二次侧两线端短接后, 才能进行拆装仪表, 并注意接线可靠, 不允许接熔断器, 以保证人身和设备安全。

4. 二次侧的负载阻抗不得大于电流互感器的额定负载阻抗, 以保证测量的准确性。

5. 电流互感器不得与电压互感器二次侧互相连接, 以免造成电流互感器近似开路, 出现高压的危险。

6. 电流互感器二次侧有一端必须接地, 以防止一、二次线圈绝缘击穿时, 一次侧的高压窜入二次侧, 危及人身和设备的安全。

## (三) 更换时注意事项

1. 个别电流互感器在运行中损坏需要更换时, 应使电压等级不低于电网额定电压, 变比与原来相同、极性正确、伏安特性相近的电流互感器, 并测试合格。

2. 由于容量变化而需要成组地更换电流互感器, 还应重新审核继电保护整定值及计量仪表的倍率。

3. 更换二次侧电缆时, 其截面和芯数必须满足最大负载电流及回路总负载阻抗不得超过电流互感器准确等级允许值的要求, 并对新电缆进行绝缘电阻的测定, 更换后要核对接线有无错误。

4. 更换后的电流互感器和二次回路在运行前必须测定极性。

## (四) 极性测定

电流互感器的极性是指一次线圈和二次线圈间电流方向的关系。在接线中  $L_1$ 、 $K_1$  为同性端,  $L_2$ 、 $K_2$  为同性端。如果电流互感器的极性错误, 在施工中未检查出来, 或在接线时将极性搞错, 在投入运行中将会引起继电保护装置的误动作, 或者导致功率表和电度表的错误计量, 因此必须正确测定电流互感器的极性, 常用的测定方法有以下几种:

1. 直流法 如图 7-5 所示, 在电流互感器一侧(一次或二次线圈)通过按钮 SB 接入 1.5~3V 干电池  $E$ ,  $L_1$  接电池正极,  $L_2$  接电池负极。  $K_1$  接电压表正极,  $K_2$  接电压表负极, 按下按钮 SB, 电路接通时, 若电压表正方向偏转, 则  $L_1$  与  $K_1$  为同极性(同名端), 若电压表负方向偏转, 则  $L_1$  与  $K_1$  为异极性(非同名端)。

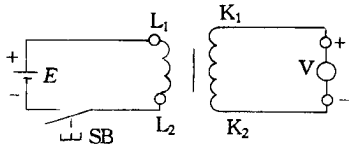


图 7-5 直流法测定电流互感器极性接线图

2. 交流法 如图 7-6 所示, 将电流互感器一、二次线圈的尾端  $L_2$ 、 $K_2$  接在一起, 在二次线圈上通过 1~5V 的交流电压, 再用 10V 以下小量程交流电压表分别测量  $U_2$ 、 $U_3$ 。若  $U_3 = U_1 - U_2$ , 则  $L_1$ 、 $K_1$  为同极性端子, 若  $U_3 = U_1 + U_2$ , 则  $L_1$ 、 $K_1$  为异极性端子。试验中应注意以下几点:

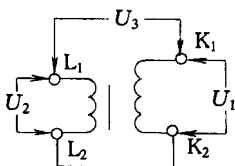


图 7-6 交流法测定电流互感器极性接线图

(1) 通入电压  $U_1$  应尽量低, 以在电流互感器两侧测得的电压数据清楚为原则。

(2) 当电流互感器的变比在 5 以下时, 用交流法测定极性即简单又准确; 当电流互感器变比大时,  $U_2$  的读数较小,  $U_1$  和  $U_3$  的数据接近, 电压表不易区分数值大小, 因此不易采用此法测定极性。

(3) 仪表法 用电流互感器校验仪测试电流互感器极性, 若校验仪的极性指示器没有指示, 则说明两侧极性正确。

## 三、运行与维修

### (一) 运行前的检查

1. 套管有无裂纹、破损现象。
2. 充油电流互感器外观应清洁, 油量充足、无渗漏油现象。
3. 引线和线卡子及二次回路各连接部分应接触良好, 不得松弛。
4. 外壳及二次回路一点接地良好, 接地线应坚固可靠。
5. 按电气试验规程, 进行全面试验合格。

### (二) 巡视检查

1. 各接头有无过热及打火现象, 螺栓有无松动, 有无异常气味。
2. 瓷套管是否清洁, 有无缺损、裂纹和放电现象, 声音是否正常。
3. 对于充油电流互感器应检查油位是否正常, 有无渗漏油现象。
4. 电流表的三相指示值是否在允许范围之内, 电流互感器有无过负荷运行。
5. 二次线圈有无开路, 接地线是否良好, 有无松动和断裂现象。
6. 定期校验电流互感器的绝缘情况, 如定期放油、化验油质是否符合要求。若绝缘油受潮, 其绝缘性能降低, 将会引起发热膨胀, 造成电流互感器爆炸起火。

### (三) 运行中监视

1. 当发现运行中的电流互感器冒烟、膨胀器急剧变形(如金属膨胀器明显鼓起)时, 应迅速(如通过运行电动操作等)切断有关电源。
2. 电流互感器一次端部引线的接头部位要保证接触良好, 并有足够的接触面积, 以防止接触不良, 产生过热现象。
3. 怀疑存在缺陷的电流互感器, 应适当缩短试验周期, 并进行跟踪和综合分析, 查明原因。
4. 要加强对电流互感器的密封检查(如装有呼吸器的, 呼吸系统是否正常, 密封胶垫与隔膜是否老化, 隔膜内有无积水), 对老化的胶垫与隔膜应及时更换。对隔膜内有积水的电流互感器, 应对电流互感器绝缘和绝缘油进行有关项目的试验, 当确认绝缘已受潮的电流互感器, 不得继续运行。

### (四) 异常运行

运行中的电流互感器可能出现开路、发热、冒烟、声响异常, 线圈螺钉松动、严重漏油、油面过低等异常现象。运行人员应根据出现的异常情况进行判断处理, 如用试温腊片检查电流互感器的发热程度, 从声音和表计指示情况辨别电流互感器二次回路是否开路。开路时电流表、电流表指示为零, 电度表不转, 有嗡嗡声, 电

流互感器本身有吱吱放电声或音,端子排可能烧焦,若发现上述现象,即认为电流互感器二次回路有开路故障。

### (五) 运行中二次回路工作及清扫注意事项

1. 工作中不允许将电流互感器二次回路开路。
2. 根据工作需要可在适当地点将电流互感器二次侧短路,但必须采用短路片或专用短路线,严禁用熔体或导线缠绕。
3. 严禁在电流互感器与短路端子之间的回路上进行任何工作。
4. 工作中必须有人监护,要使用绝缘工具,并站在绝缘垫上。
5. 工作中应谨慎小心,以免损坏元件或造成二次回路断线,不得将回路的永久接地点断开。
6. 清扫二次回路时,应穿长袖工作服,戴线手套,使用干燥的工具,并将手表等金属物品摘下。

### (六) 维修

1. 经常保持电流互感器的清洁。
2. 接地线应牢固可靠,接触良好。
3. 若是油浸电流互感器,应检查有无渗漏油现象。
4. 检查熔断器的熔体是否良好,各部分之间的距离是否符合要求,有无放电现象,有无异味异声。
5. 应定期进行预防性试验。
6. 测量线圈的绝缘电阻,线圈的绝缘电阻值与制造厂规定值或与上次测量值进行比较,应无明显降低,若绝缘受潮,应进行干燥处理。
7. 电流互感器的最高温度为 $35^{\circ}\text{C}$ 时,允许电流超过其额定电流 $10\%$ ,在线路中运行。当最高温度高于 $35^{\circ}\text{C}$ ,但不高于 $50^{\circ}\text{C}$ 时,长期允许的工作电流最大值,按下式计算,即

$$I_{1/2} = I_{35} \sqrt{\frac{80 - t_2}{45}}$$

式中  $I_{35}$ ——最高气温为 $35^{\circ}\text{C}$ 时,电流互感器允许的工作电流最大值(A);

$t_2$ ——环境的实际温度( $^{\circ}\text{C}$ )。

8. 电流互感器二次线圈不能开路,如果一旦开路必须立即退出运行,并检查二次线圈的绝缘情况,而铁心必须进行退磁处理。
9. 运行中,电流互感器的故障多因失慎,使电流互感器遭受开路而损坏绝缘,另外由于绝缘受潮或过电压而发生绝缘击穿,损坏后的电流互感器应按原样进行修复。
10. 对于户外多匝贯穿式瓷绝缘电流互感器,由于一次线圈是穿绕在两个平行的瓷件中,为了消除瓷件两侧与一次和二次线圈之间的空气隙的游离,在瓷件的内表面和被接地部件包围的外表面,均涂有半导体漆。内部漆膜与一次线圈作电气连接,外部漆膜接地,使空气层上不存在电位差。漆膜厚度约为 $0.1 \sim 0.14\text{mm}$ ,于空气中自然干燥 $3\text{h}$ 即可。

## 四、常见故障与处理

### (一) 电流互感器运行中声音不正常或铁心过热

1. 运行中的电流互感器在过负荷、二次回路开路、绝缘损坏而发生放电等情况下,都会产生异常声音。
  2. 对于半导体漆涂刷得不均匀而造成局部电晕,以及夹紧铁心的螺钉松动,也会产生较大的响声。
  3. 电流互感器的铁心过热,可能是由于长时间过负荷或二次回路开路引起铁心饱和而造成的。
- 在运行中,当发现声音不正常或铁心过热时,首先应观察并通过仪表等来判断引起故障原因。若是过负荷造成的,应将负荷降低至额定值以下,并继续进行监视和观察;若是二次回路开路引起的,应立即停止运行,或将负荷减少至最低限度;若是绝缘破坏而造成放电现象,应及时更换电流互感器。

## (二) 电流互感器二次回路开路

1. 由于铁心中磁通饱和,在二次侧可能产生高压电(数千伏甚至上万伏),在二次回路的开路点可能有放电现象,出现放电火花及放电声。

2. 铁心可能因磁饱和引起损耗增加而发热,使绝缘材料产生异味,并有异常响声。

3. 与电流互感器二次侧相连接的电流表指示可能摇摆不定或无指示,电度表转速可能出现异常。

在运行中,若发现电流互感器二次侧开路,应尽可能及时停电进行处理。如果不允许停电,应尽量减小一次侧负荷电流,然后在保证人体与带电体保持安全距离的情况下,用绝缘工具在开路点前用短路线将电流互感器二次回路短路,再将短路点排除,最后将短路线拆除,在操作过程中要有人监护,注意人身安全。

## 第八章 低压电器安装与维护

### 第一节 熔断器运行与维护

低压熔断器是低压配电系统中起安全保护作用的一种电器,主要作短路保护,有时也可起过载保护作用。广泛应用于电网保护和用电设备保护,当电网或用电设备出现短路或过载故障时,通过熔体的电流大于额定值,熔体因过热而被熔化,自动切断电路,避免电网或用电设备的损坏,并防止事故的蔓延。

在正常情况下,熔断器相当于一根导线,在发生短路时,电流过大,熔体因过热而熔化,自动断开电路。在切断电路过程中往往产生强烈的电弧并向四周飞溅,为了安全有效地熄灭电弧,一般把熔体安装在壳体内,并采取有效措施,快速熄灭电弧。

熔断器具有结构简单、使用方便、体积小、重量轻、价格低廉等特点。

熔断器按结构可分为:开启式、半封闭式和封闭式三种。封闭式熔断器又分为无填料管式、有填料管式和有填料螺旋式等。另外还有快速熔断器,主要用于半导体器件的短路或过载保护。

#### 一、熔断器的结构和特征

熔断器主要由熔体、绝缘底座、动触点和静触点等组成,而熔体是整个熔断器的核心部分,常做成丝状或片状。熔体材料必须具有熔点低、导电性能好、易于熔断、不易氧化等性质。制做熔体的材料一般有铅锡合金、锌、银、铜等。

##### (一) 插入式熔断器

用于 380V 低压电路作电气设备的短路保护或过载保护,熔断器装有熔丝或熔片,使用时熔丝的额定电流不能超过瓷座上标明的额定电流,否则熔丝烧断时产生的电弧极强,会烧坏熔断器。

型号说明:

##### (二) 螺旋式熔断器

在熔断管内装有熔丝和石英砂,熔断管一端有色点,当熔丝熔断时,色点就跳出,指示出熔丝已断,指示器的色别见表 8-1。

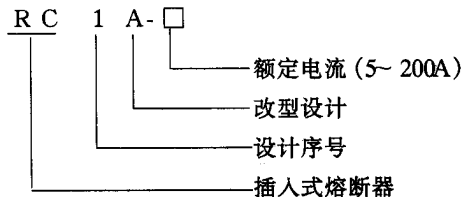
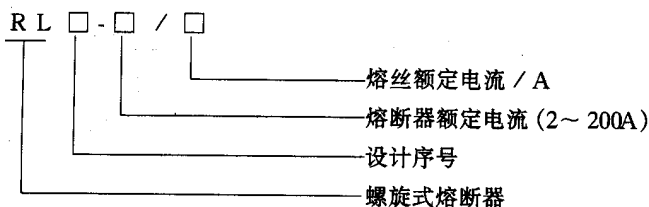


表 8-1 指示器色别

熔丝额定电流/A	2	4	6	10	16	20	25	35	50	80	100	125	200
熔断指示器色别	玫瑰	棕	绿	红	灰	蓝	黄	黑	白	银	红	黄	蓝

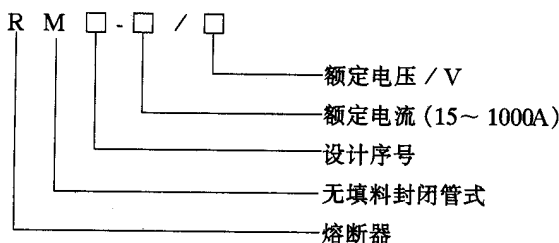
型号说明：



### (三) 有填料管式熔断器

有填料管式熔断器是一种具有限流作用的低压熔断器，广泛应用于要求断流能力较高的场合，它主要由瓷熔管、具有引燃栅的栅状铜熔体和触点底座等部分组成。当熔体熔断后，装设在上盖板的红色熔断指示器立即弹出，以便于运行维护人员进行监视。

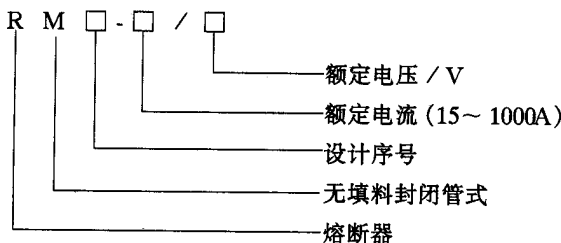
型号说明：



### (四) 无填料管式熔断器

熔断器的熔断管部分主要由纤维熔管、变截面的锌熔片和触点底座等部分组成。当熔片熔断时，纤维管的内管将有极少部分纤维物质因灼热而分解，产生高压气体，使电弧很快熄灭。具有结构简单、更换熔体方便及保护性能好等优点，广泛应用于低压配电装置中。

型号说明：

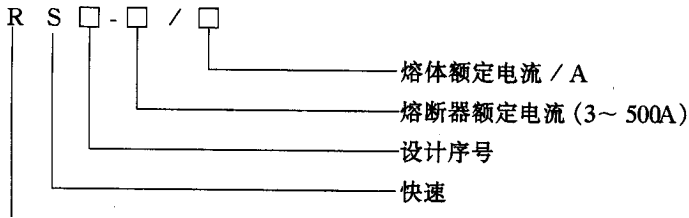


### (五) 有填料封闭管式快速熔断器

由熔断管、熔体、指示器、填料和触点底座等部分组成。熔体用银带制成“V”形的狭窄截面或网状形式，使熔断器具有快速性，可作为半导体整流元件的短路保护及过载保护。

型号说明：





## 二、熔断器的运用

### (一) 熔断器类型的选择

主要根据负载的情况和电路短路电流的大小来选择。对于容量较小的照明线路或电动机的保护,可选用 RC 系列半封闭式熔断器或 RM 系列无填料封闭式熔断器;对于短路电流相当大的电路或有易燃气体的地方,应选用 RL 或 RT 系列有填料封闭式熔断器;对于晶闸管及硅元件的保护,应选用 RS 型快速熔断器。

### (二) 熔体额定电流的确定

由于各种电气设备都具有一定的过载能力,当过载能力较轻时,可允许较长时间运行,而超过某一过载倍数时,就要求熔体在一定时间内熔断。还有一些设备起动电流很大,如三相异步电动机起动电流是额定电流的 4~7 倍,因此,选择熔体时必须考虑设备的特性。

熔断器熔体在短路电流作用下应可靠熔断,起到应有的保护作用,如果熔体选择偏大,负载长期过负荷,熔体不能及时熔断;如果熔体选择偏小,在正常负载电流作用下就会熔断。为保证设备的正常运行,必须根据设备的性质合理地选择熔体。

#### 1. 照明电路

(1) 电灯支路 熔体额定电流  $\geq$  支路上所有电灯的工作电流之和。

(2) 电灯总路 装于电度表出线处的熔体额定电流  $= (0.9 \sim 1.0) \times$  电度表额定电流  $>$  全部电灯的工作电流

#### 2. 电动机

(1) 单台直接起动电动机 熔体额定电流  $= (1.5 \sim 2.5) \times$  电动机额定电流

(2) 多台直接起动电动机 总熔体额定电流  $= (1.5 \sim 2.5) \times$  功率最大的电动机额定电流 + 其余电动机额定电流之和。

(3) 降压起动电动机 熔体额定电流  $= (1.5 \sim 2) \times$  电动机额定电流。

(4) 绕线式电动机和直流电动机 熔体额定电流  $= (1.2 \sim 1.5) \times$  电动机额定电流。

3. 配电变压器低压侧 熔体额定电流  $= (1 \sim 1.2) \times$  变压器低压侧额定电流

4. 电热设备 熔体额定电流  $\geq$  电热设备额定电流。

#### 5. 并联电容器

(1) 单台时 熔体额定电流  $= (1.5 \sim 2.5) \times$  电容器额定电流。

(2) 电容器组时 熔体额定电流  $= (1.3 \sim 1.8) \times$  电容器组额定电流。

6. 单台电焊机 熔体额定电流  $= (1.5 \sim 2.5) \times$  负荷电流。

7. 快速熔断器与整流元件串联 熔体额定电流  $\geq 1.57 \times$  整流元件额定电流

### (三) 选用熔断器注意事项

1. 熔断器的保护特性应与被保护对象的过载特性有良好的配合。

2. 按线路电压等级选用相应电压等级的熔断器,通常熔断器额定电压不应低于线路额定电压。

3. 根据配电系统中可能出现的最大短路电流,选择具有相应分断能力的熔断器。

4. 在电路中,各级熔断器应相应配合,通常要求前一级熔体比后一级熔体的额定电流大 2~3 倍,以免发生越级动作而扩大停电范围。

5. 熔体额定电流应小于或等于熔断器的额定电流。

## 三、熔断器的运行与维修

### (一) 熔断器的巡视检查

1. 检查熔体的额定电流与负荷情况是否相配合。
2. 检查熔体管外观有无损伤、变形、开裂现象,瓷绝缘部分有无破损或闪络放电痕迹。
3. 熔体有氧化、腐蚀或破损时,应及时更换。
4. 检查熔体管接触处有无过热现象。
5. 有熔断信号指示器的熔断器,其指示是否保持正常状态。
6. 熔断器环境温度必须与被保护对象的环境温度基本一致,如果相差太大可能会使保护动作出现误差,因此,尽量避免安装在高温场合,因熔体长期处于高温下可能老化。
7. 检查导电部分有无熔焊、烧损、影响接触的现象。
8. 熔断器上、下触点处的弹簧是否有足够的弹性,接触面是否紧密。
9. 应经常清除熔断器上及夹子上的灰尘和污垢,可用干净的布擦干净。

### (二) 熔体熔断的原因

1. 对于变截面熔体,通常在小截面处熔断是由于过负荷引起,因为小截面处温度上升较快,熔体由于过负荷熔断,使熔断部位长度较短。
2. 变截面熔体的大截面部位也熔化无遗,熔体爆熔或熔断部位很长,一般是由于短路而引起熔断。
3. 熔断器熔体误熔断,熔断器熔体在短路情况下熔断是正常的,但有时在额定电流运行状态下也会熔断称为误熔断。

(1) 熔断器的动、静触点(RC)、触片与插座(RM)、熔体与底座(RL、RT、RS)接触不良引起过热,使熔体温度过高造成误熔断。

(2) 熔体氧化腐蚀或安装时有机械损伤,使熔体的截面积变小,也会引起熔体误熔断。

(3) 因熔断器周围介质温度与被保护对象四周介质温度相差过大,将会引起熔体误熔断。

4. 对于玻璃管密封熔断器熔体的熔断,长时间通过近似额定电流时,熔体经常在中间部位熔断,但并不伸长,熔体气化后附在玻璃管壁上,如有1.6倍左右额定电流反复通过和断开时,熔体经常在某一端熔断且伸长,如有2~3倍额定电流反复通过和断开时,熔体在中间部位熔断并气化,无附着现象,通电时的冲击电流会使熔体在金属帽附近某一端熔断,若有大电流(短路电流)通过时,熔体几乎全部熔化。

5. 对于快速熔断器熔体的熔断,过负荷时与正常工作相比所增加的热量并不很大,而两端导线与熔体连接处的接触电阻对温升的影响较大,熔体上最高温度在两端,所以,经常在两端连接处熔断,短路时热量大、时间快、产生的最高温度点在熔体中段,来不及将热量传至两端,因此在中间熔断。

### (三) 拆换熔体

1. 安装熔体时应保证接触良好,如接触不好会使接触部分过热,热量传至熔体,使熔体温度过高引起误动作,有时因接触不好产生火花将会干扰弱电装置。

2. 更换熔体时,不要使熔体受到机械损伤和扭拉。由于熔体一般软而易断,容易发生裂痕或减小截面,降低电流值,影响设备正常运行。

3. 更换熔体时必须根据熔体熔断的情况,分清是由于短路电流,还是由于长期过负荷所引起,以便分析故障原因。过负荷电流比短路电流小得多,所以熔体发热时间较长,熔体的小截面处过热,导致多在小截面处熔断,并且熔断的部位较短,短路电流比过负荷电流大得多,熔体熔断较快,而且熔断的部位较长,甚至大截面部位也会全部烧光。

4. 检查熔断器与其他保护设备的配合关系是否正确无误。

5. 一般应在不带电的情况下,取下熔断管进行更换。有些熔断器是允许在带电的情况下取下的,但应将

负载切断,以免发生危险。

6. 更换熔体时,应注意熔体的电压值、电流值和熔体的片数,并使熔体与管子相配,不可把不相配的熔体硬拉硬弯装在不相配的管子中,更不能随便找一根铜线或熔体配上凑合使用。

7. 对于封闭管式熔断器,管子不能用其他绝缘管代替,否则易于炸裂管子,发生人身伤害事故。也不能在熔断器管子上钻孔,因为钻孔会造成灭弧困难,可能会喷出高温金属和气体,对人和周围设备是非常危险的。

8. 当熔体熔断后,特别是在分断极限分断电流后,经常有熔体的熔渣融化在上面,因此,在换装新熔体前,应仔细擦净整个管子内表面和接触装置上的熔渣、烟尘和尘埃等。当熔断器已经达到所规定的分断极限电流的次数,即使凭肉眼观察没有发现管子有损伤的现象,也不宜继续使用,应更换新的管子。

9. 更换熔断器时要区分是过载电流熔断,还是在分断极限电流时熔断。如果熔断时响声不大,熔体只在一两处熔断,而管子内壁没有烧焦的现象,也没有大量的熔体蒸气附着在管壁,一般认为是过载电流时熔断。如果熔断时响声特别大,有时看见两端有火花,管内熔体熔成许多小段(装有两片熔体的熔断器,两片熔体熔在一起),管子内壁有大量的熔体蒸气附着,有时管壁有烧焦现象,甚至在接触装置上也有熔渣,就可能是在分断极限电流时熔断。

#### (四) 熔断器的常见故障

##### 1. 熔断器熔体过早熔断

(1) 熔体容量选得太小,特别是在电动机起动过程中发生过早熔断,使电动机不能正常起动。

(2) 熔体变色或变形,说明该熔体曾已过热。熔体的形状直接影响熔体的熔断特性,人为改变熔体形状会使熔体过早熔断。

2. 熔断器熔体不能熔断。熔体容量选得过大,特别是在更换熔体时,增大了熔体的电流等级或用其他金属丝(如铜丝)代替,当线路发生短路时,熔体不能熔断,即不能对线路或电动机起保护作用,严重时甚至烧坏线路或电动机。

#### (五) 使用维修中应注意事项

1. 正确选择熔体(丝),应根据各种电器设备用电情况(电压等级、电流等级、负载变化情况等),在更换熔体时,应按规定换上相同型号、材料、尺寸、电流等级的熔体。

2. 安装和维修中,特别是更换熔体时,装在熔管内熔体的额定电流不准大于熔断管的额定电流。

3. 熔丝两端的固定螺钉应完好,无滑扣现象,以保证固定熔体时,接触良好、配合牢固,否则会造成接触处温度升高,烧坏熔体。安装熔丝时,应按顺时针方向弯曲熔丝,这样紧固螺钉时,熔丝不会被挤出来。安装熔丝时,不要划伤、碰伤熔丝,更不要随意改变熔丝的外形尺寸。

4. 更换熔体时,必须切断电源,不允许带电特别是带负荷拔出熔体,以防止发生人身事故。

5. 安装熔断器时,先放好弹簧垫或钢纸垫后再紧固螺钉,不要用力过猛,否则会损坏瓷底座。

6. 不能随便改变熔断器的工作方式,在熔体熔断后,应根据熔断管端头上所标明的规格,换上相应的新熔断管。不能用一根熔丝搭在熔管的两端,装入熔断器内继续使用。

7. 作为电动机保护的熔断器,应按要求选择熔丝,而熔断器只能作电动机主回路的短路保护,不能作过载保护。

8. 在安装 RL 型螺旋熔断器时,应将连接插座底座触点的接线端安装于上方(上线)并与电源线连接;将连接瓷帽、螺纹壳的接线端安装于下方(下线),并与用电设备导线连接。这样就能在更换熔丝旋出瓷帽后,螺纹壳上不会带电,确保人身安全。

9. 在维修短路保护线路时,应注意以下几点

(1) 对变压器中点接地的三相三线制或三相四线制供电线路,电动机主回路必须采用短路保护。

(2) 对不同性质的负载(如主回路、控制回路、照明回路、指示回路等)应分别保护,小容量电动机的控制回路可用主电路的熔断器作短路保护。

(3) 对容量较小且容量相差不大的两台或三台电动机,可采用一组共用的熔断器作短路保护,而对容量较大且容量相差较大的几台电动机的分支电路,应分别进行短路保护。

作为一个末端支路的短路保护共用一组熔断器时,应符合以下条件:

(1) 给末端支路馈电线路的最大额定电流应不大于 100A。

(2) 每台电动机要有单独的过载保护装置。

(3) 在有分支电路中,熔体的熔断动作应有选择性,前一级熔体的额定电流必须大于分支电路的熔体额定电流。

(4) 在下列线路中,不允许接入熔断器

1) 接地线路中。

2) 三相四线制的中性线路中。

3) 直流电动机的励磁回路。

## 第二节 刀开关及其安装维护

刀开关主要作电路隔离、转换以及接通和分断电路用。广泛应用于 380V 的交流电路或 440V 的直流电路,额定电流在 1500A 以下的配电设备。

刀开关按极数分为单极、双极和三极,按结构分为平板式和条架式,按操作方式分为直接手柄操作式、杠杆操作机构和电动操作机构式。主要类型有:负荷开关、隔离开关、熔断器式开关。

### 一、刀开关的选用

刀开关的额定电压应等于或大于电路额定电压,其额定电流应等于或大于电路工作电流。若用刀开关来控制小型电动机,则必须考虑电动机的起动电流比较大,应选用额定电流较大的开关,而刀开关的通断能力和其他性能均应符合电器的要求。

刀开关断开负载电流不应大于容许断开电流值,一般结构的刀开关通常不允许带负载操作,但装有灭弧室的刀开关,可作不频繁带负载操作。

刀开关所在线路的三相短路电流不应超过规定的动、热稳定值。

### 二、开启式负荷开关

开启式负荷开关(又称胶盖刀开关)主要用于额定电压在 380V 以下,电流在 60A 以下的交流电路中,作一般电灯、电阻和电热等回路的控制开关、不频繁地带负荷操作和作短路保护用。

它主要由瓷质底座、静触座、接装熔丝的接头、上胶盖、下胶盖、带瓷质手柄的闸刀等组成。

#### (一) 开关的安装及使用

1. 刀开关和熔丝联合使用时,刀开关应装在前面(电源侧),熔丝应装在后面(负载侧)。电源进线应接在静座上,而用电负载应接在下出线端上,这样在开关拉开后,闸刀和熔丝上均不带电,以保证更换熔丝时就不会触电。

2. 刀开关在安装时,底板应垂直地面,不可平装或侧装,刀开关在合闸位置时,手柄应向上,以防误操作合闸。

3. 操作时不可面对开关以防止电弧伤人,在拉开或推合时动作要迅速以减弱电弧对刀片和触座的灼伤。如胶盖或手柄损坏、刀触点接触松动、氧化严重时应及时修复或更换。

#### (二) 开关的运行与维护

1. 由于过负荷或短路故障,使熔丝熔断,待故障排除后,需要更换新熔丝时,必须观察绝缘瓷座及上、下

胶盖部分。因为熔丝熔化后,在电弧的作用下,使绝缘瓷底座和胶盖内壁表面附着一层金属粉粒,将会造成绝缘部分的绝缘性能下降,甚至不绝缘,导致在重新合闸送电的瞬间,引起开关本身相间短路。就要求先用干燥的棉布或棉纱将金属粉粒擦净,再更换熔丝。

2.当负荷较大时,为防止刀开关本身出现相间短路,可与熔断器配合使用,将熔断器装在刀开关负荷一侧,刀开关本身不再装熔丝,在应装熔丝的接点上,装与线路导线截面相同的铜线。这时,刀开关仅作开关使用,而短路保护及过载保护由熔断器实现。

3.刀开关的维护,主要是注意刀开关各部分的温升不超过允许值,其允许温升为 $55^{\circ}\text{C}$ ,如铜的表面变成一层暗红色,其温度已大大超过,应立即设法处理。或将蜡烛触及刀片上,若蜡烛熔化,说明温度已超过。

4.刀开关和进出线的连接螺钉,应经常紧固,保持接触良好,否则接触处温度很高,引起发热且有可能发生火灾。

5.使用时,刀片和夹座接触处,可能会出现歪扭等接触不良现象,也会引起刀开关过热,应及时修整,保证有足够的接触面积,以便减小接触电阻、降低温升。

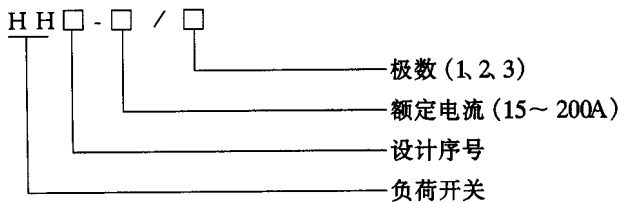
6.经常操作的开关,经电弧燃烧后,在接触面上往往会被烧毛,应及时磨光,否则会使接触电阻增大,引起刀开关过热。

7.检查底座有无裂损;可动触点片的绝缘操作手柄是否牢固;所控制负荷是否在额定容量以内;胶盖是否完整。

### 三、封闭式负荷开关

封闭式负荷开关(又称铁壳开关)适用于额定电压 $500\text{V}$ 以下、额定电流 $200\text{A}$ 以下的电气装置和配电设备中作不频繁地接通、分断负荷电路及短路保护,也可作异步电动机不频繁直接起动及分断用。该种开关带有灭弧装置,并具有防护外壳,能快速接通和分断,操作灵活方便,使用安全可靠。

型号说明:



#### (一) 结构

封闭式负荷开关主要由刀开关、瓷插式熔断器或封闭管式熔断器、灭弧装置、操作机构及外壳等组成。

对于容量较大的刀开关,在刀开关断开电路时,将会产生很强的电弧,如不将电弧迅速熄灭就会烧坏刀刃。为了保证用电安全,在铁壳开关内装有熔断器,并装有机电联锁装置,保证壳盖打开时不能合闸,而手柄处于中间闭合位置时,壳盖不能打开,以避免发生触电事故。在操作机构中装有速断弹簧,使刀开关能快速接通或切断电路,有利于电弧迅速熄灭,减少电弧对动触刀和静触座的烧蚀。

#### (二) 常开封闭式负荷开关

1. HH3、HH4 系列 这两类开关的规格按额定电流分为:15A、30A、60A、100A、200A 五种,其中 $15\sim 60\text{A}$ 三种开关内装有瓷插式熔断器,100A、200A 两种开关内装有封闭管式熔断器。

2. HH10、HH11 系列 操作手柄为抽拉式,HH10 额定电流为 30A、HH11 额定电流为 100A、200A、300A、400A 四种。

3. HH<sub>x</sub>-30 断相保护负荷开关 当三相熔断器中有任一相熔体熔断后,即可带动脱扣器动作,使开关跳闸。可以防止三相设备(如异步电动机)因缺相运行而烧坏。

### (三) 运行与维护

1. 开关的金属外壳应可靠接地或接零,防止漏电时发生触电事故。
2. 接线时,应将电源线接在静触座的接线端子上,负荷接在熔断器一端,如果接反了,在维修时将有可能会出现不安全。
3. 检查机械联锁是否正常,速断弹簧有无锈蚀变形现象。
4. 检查压线螺钉紧固后有无松扣现象。
5. 检查外壳是否完好无损,操作的绝缘杆应牢固无损,可动触片固定牢固,接触紧密。
6. 被控制设备应在开关容量之内,所配熔体应满足负荷要求。

## 四、隔离刀开关

### (一) 概述

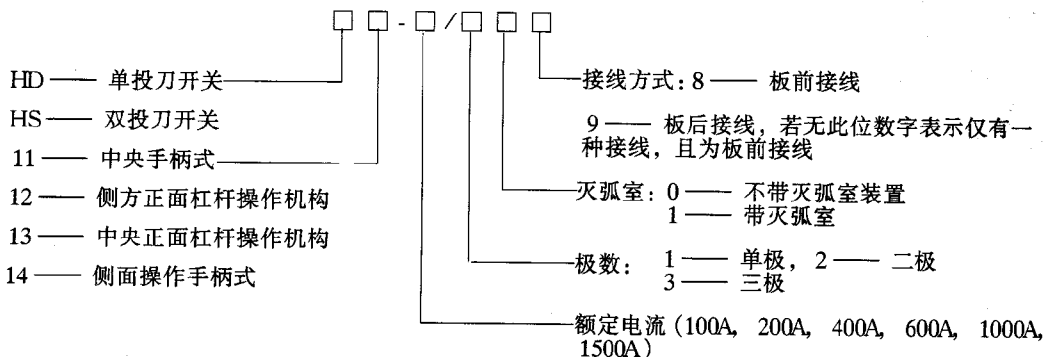
隔离刀开关广泛用于交流电压 380V、直流电压 440V、额定电流在 1500A 以下的低压配电装置中,作不频繁地接通和分断交直流电路或作隔离开关用。

普通的刀开关不能带负荷操作,它和断路器配合使用,在断路器切断电路后才能操作刀开关。刀开关起隔离电压的作用,有明显的绝缘断开点,以保证检修人员的安全。装有灭弧罩或在动触刀上装有辅助速断触刀(起灭弧作用)的开关,可切断不大于额定电流的负荷。

常用隔离开关:

1. HD11、HS11 系列 用于不切断带有负荷的电路,仅作隔离开关用。
2. HD12、HS12 系列 用于正面两侧操作,前面维修的开关柜中,其中带灭弧罩的刀开关可以切断不大于额定电流的负荷电路。
3. HD13、HS13 系列 用于正面操作,后面维修的开关柜中,其中带灭弧罩的刀开关可以切断不大于额定电流的负荷电路。
4. HD14 系列 用于动力配电箱中,其中带灭弧罩的刀开关可以带负荷操作。

型号说明:



### (二) 结构

隔离用的刀开关简称隔离开关,主要由操作手柄或操作机构、动触刀、静触座、灭弧罩和绝缘底板等组成。额定电流为 100~400A 采用单刀片,额定电流为 600~1500A 采用双刀片。触点压力是靠加装在刀片两侧的片状弹簧来实现。

带有杠杆操作机构的刀开关,用来切断额定电流以下的负荷电路,都装有灭弧罩,以保证分断电路时安全可靠。灭弧罩是由绝缘纸板和钢板栅片拼铆而成。规格不同的刀开关均采用同一形式的操作机构。操作

机构具有明显的分合指示和可靠的定位装置。

### (三) 操作注意事项

1. 操作隔离开关之前,应先检查断路器是否已经断开。
2. 操作时应站好位置,动作果断。
3. 对于单极隔离开关,闭合时先合两边相,后合中间相,断开时顺序相反。
4. 三极隔离开关在断开、闭合时,应动作迅速,断开、闭合必须检查是否在适当位置。
5. 闭合时,在闭合终了的一段行程中,不要用力过猛,以免发生冲击而损伤瓷件。
6. 严禁带负荷断开、闭合隔离开关。
7. 停电时先拉负荷侧隔离开关,后拉电源侧隔离开关,送电时先合电源侧隔离开关,后合负荷侧隔离开关。

8. 带负荷断开、闭合隔离开关时,应按以下规定处理:

- (1) 如错拉隔离开关时,在刀口发现电弧时应急速合上;如已拉开,则不许再合上,并及时报告有关部门。
- (2) 如错合隔离开关时,无论是否造成事故,均不许再拉开,并迅速报告有关部门,以采取必要措施。

### (四) 异常运行及处理

隔离开关发生以下异常现象时,应采取紧急措施:

1. 接触部分过热,当温度超过  $75^{\circ}\text{C}$  时。
2. 绝缘子破裂,接触子在胶合处脱落。
3. 绝缘子表面严重放电。

发生上述情况时,应及时采取措施,迅速减少负荷,可用经旁路备用母线上的开关设备转移负荷,以减轻发热,在停止运行后进行检修。

## 五、熔断器式刀开关

### (一) 概述

熔断器式刀开关(又称刀熔开关)具有一定的接通分断能力和短路分断能力,适用于交流  $380\text{V}$  或直流  $440\text{V}$ 、额定电流  $100\sim 600\text{A}$  的配电网中,作电气设备及线路的过负荷和短路保护用。在正常供电的情况下,不频繁地接通和切断电路。其短路分断能力由熔断器分断能力来决定。因为它由刀开关和熔断器组成,所以,具有刀开关和熔断器的基本性能。

型号说明:

### (二) 结构

熔断器式刀开关是由具有高分断能力的有填料熔断器和刀开关组成,并装有安全挡板和灭弧室,而灭弧室又由酚醛纸板和钢板冲制的栅片铆合而成。可以通过杠杆操作,也可在侧面直接操作。

熔断器式刀开关的熔断器固定在带有弹簧钩子锁板的绝缘梁上。在正常情况下,保证熔断器不脱口,当熔体熔断后,只需要按下弹簧钩子,就可以很方便地更换新的熔断器。

## 六、刀开关的运行与维修

1. 检查负荷电流是否超过刀开关的额定值。
2. 检查刀开关动、静触点连接是否不实,静触闭合力是否不够或开关合闸不到位的现象。
3. 检查刀开关电源侧和负荷侧,进出线端子与开关连接处压接是否牢固,有无接触不实、过热变色等现象。

4. 检查绝缘连杆、底座等绝缘部分有无损伤和放电现象。
5. 检查动、静触点有无烧伤及缺损,灭弧罩是否清洁完整。
6. 检查刀开关三相闸刀在合闸时,是否同时接触或分开,触点接触是否紧密。
7. 操作机构应完好,动作应灵活,断开、合闸位置应准确到位,顶丝、销钉、拉杆等均应完好无缺损、断裂。
8. 对 HR3 型刀熔开关必须调整其同相位内上、下触点同时闭合和上、下触点间的中心位置,保证接触紧密。
9. 开关触点过热,甚至熔焊的主要原因是开关的刀片与刀座接触不良。

(1) 开关刀片、刀座在运行中被电弧烧毛或铁壳开关速断弹簧的压力调整不当,引起触点接触不良而过热,甚至熔焊。应对动、静触点及时修磨,要求接触良好。对弹簧的弹性及时检查,将转动处的防松螺母或螺钉调整适当,使弹力维持刀片、刀座的动、静触点间的紧密接触与瞬间开合。

(2) 开关刀片与刀座表面产生氧化层,造成接触电阻增大或由于刀片动、静触点插入深度不够,使开关的载流量降低,也会引起触点过热甚至熔焊。对刀片、刀座的氧化层应及时清除,需在刀片与刀座间的接触部分涂上一层很薄的凡士林,调整杠杆操作机构,使刀片的插入深度达到规定要求。

(3) 由于带负荷操作起动大容量设备,使大电流冲击产生动、静触点瞬间弧光,或在短路时开关的热稳定不够而引起触点熔焊。应严格遵守操作规程,及时排除短路故障,并更换较大容量的开关。对轻微熔焊的触点应进行修整继续使用,对严重熔焊的触点必须更换。

#### 10. 开关与导线接触部位过热

大多数是因为导线连接螺钉松动、弹簧垫圈失效等,导致接触电阻增大或因螺栓选用偏小也会造成连接部位过热。应及时更换失效的弹簧垫圈并紧固好,选择合适的螺栓。

两种不同金属相互连接(如铜线与铝线)将会发生电路锈蚀,引起接触电阻增大而产生过热。应采用铜、铝过渡接线端子,在导线连接部位涂敷导电膏,也能防止接触处的电气锈蚀。

## 第三节 断路器及其安装维护

低压断路器旧称低压自动开关或空气开关。它既能带负荷通断电路,又能在短路、过负荷和低电压(或失压)时自动跳闸,其功能与高压断路器类似。其原理结构和接线如图 8-1 所示。

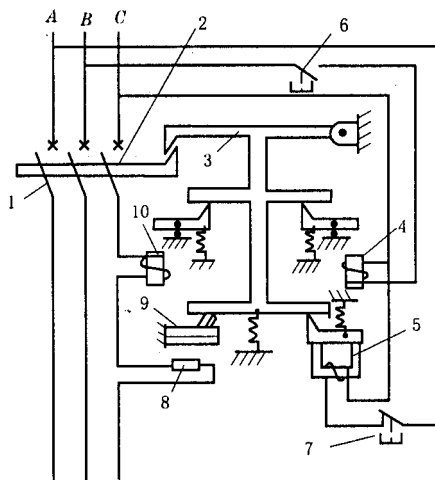


图 8-1 低压断路器的原理结构和接线

- 1—主触头 2—跳钩 3—锁扣 4—分励脱扣器 5—失压脱扣器,  
6、7—脱扣按钮 8—加热电阻丝 9—热脱扣器 10—过流脱扣器



当线路上出现短路故障时,其过流脱扣器动作,使开关跳闸;如出现过负荷,其串联在一次线路的加热电阻丝加热,使双金属片弯曲,也使开关跳闸;当线路电压严重下降或电压消失时,其失压脱扣器动作,同样使开关跳闸;如果按下按钮 6 或 7,使分励脱扣器通电或使失压脱扣器失压,则可使开关远距离跳闸。

低压断路器按灭弧介质分类,有空气断路器和真空断路器等;按用途分类,有配电用断路器、电动机保护用断路器、照明用断路器和漏电保护断路器等。

配电用低压断路器按保护性能分,有非选择型和选择型两类。非选择型断路器,一般为瞬时动作,只作短路保护用;也有的为长延时动作,只作过负荷保护用。选择型断路器,有两段保护、三段保护和智能化保护。两段保护为瞬时或短延时与长延时两段。三段保护为瞬时、短延时与长延时特性三段。其中瞬时和短延时特性适于短路保护,而长延时特性适于过负荷保护。图 8-2 表示低压断路器的三种保护特性曲线。而智能化保护,其脱扣器由微机控制,保护功能更多,选择性更好,这种断路器称为智能型断路器。

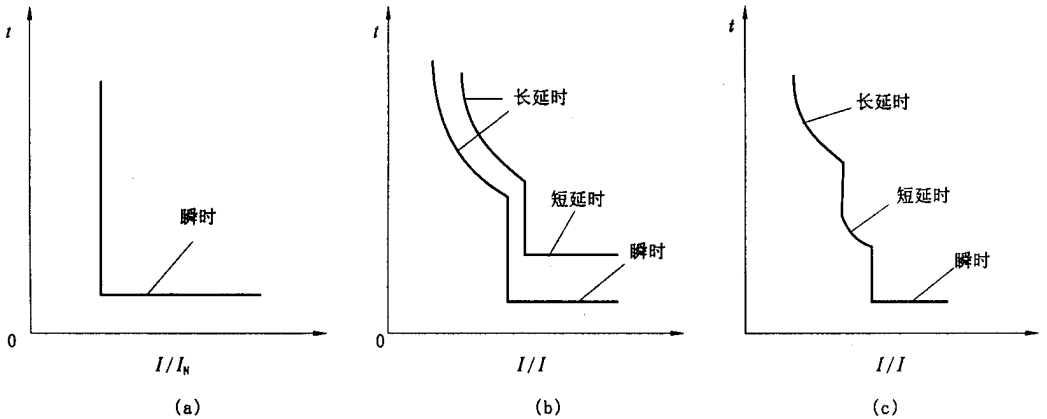


图 8-2 低压断路器的保护特性曲线

(a) 瞬时动作式 (b) 两段保护式 (c) 三段保护式

近几年来,各种新型号的断路器已大量生产,有的是国内有关单位新开发研制的,有的是引进国外先进技术生产的。新产品的各项性能指标优于老产品而将逐步替代老产品。

## 一、塑料外壳式低压断路器

塑料外壳式低压断路器,又称装置式自动开关,其全部机构和导电部分都装设在一个塑料外壳内,但在壳盖中央露出操作手柄,供手动操作之用,如图 8-3 所示。它通常装设在低压配电装置之中。



图 8-3 塑料外壳式低压断路器

DZ10 型塑料外壳式低压断路器是一种曾广泛采用的产品,现在生产现场使用较多。目前推广应用的品种有 DZX10、DZ15、DZ20 等型及引进技术生产的 H、DZ47(C45N、C45AD、NC-100H)、DZS3(3VE)等型,此外还生产有智能型塑料外壳式断路器如 DZ40 等型。以下对 DZ20 系列塑料外壳式断路器作一介绍。

DZ20 系列塑料外壳式断路器,其额定绝缘电压为 660V,额定工作电压 380(400)V 及以下,其额定电流从 16A 至 1250A。一般作为配用电,其 Y、J、G 型额定电流 225A 和 Y 型额定电流 400A 的断路器亦可作为保护电动机用,在正常情况下,断路器可分别作为线路不频繁转换及电动机的不频繁起动之用。

四极断路器主要用于额定电流 100A 至 630A 三相四线制的系统中。它能保护用户和电源完全断开,确保安全,从而解决其它断路器不可克服的中性极电流不为零的弊端。

配用电断路器,在配电网络中用来分配电能,且可作为电路及电源设备的过载、短路和欠电压保护。

保护电动机用断路器在配电网络中用作鼠笼型电动机的起动和运转中分断以及作为电动机的过载、短路和欠电压保护。

按额定极限短路分断能力高低分,DZ20 系列塑料外壳式断路器有以下类型:Y-一般型、S-四极型、C-经济型、G-最高型、J-较高型。

Y 型为基本产品,由绝缘外壳、操作机构、触头系统和脱扣器四个部分组成。断路器的操作机构具有使触头快速合闸和分断的功能,其“合”、“分”、“再扣”和“自由脱扣”位置以手柄位置来区分。

C 型、J 型和 G 型断路器是在 Y 型基础上派生设计而成(除 C 型 160A 外)。

J 型断路器是将 Y 型断路器的触头进行结构改进,使之在短路情况下,在机构动作之前,动触头能迅速断开,达到提高通断能力的目的。

G 型断路器是在 Y 型断路器的底板后串联的一个平行导体,组成了一个斥力限流触头系统。该系统比 J 型斥力触头长,断开距离也大,因此能更迅速地限流。在正常断开、闭合和在脱扣器短路整定保护动作值范围的情况下,均由 Y 型断路器来完成,一旦在网络中出现大电流或特大短路电流时,串联的斥力限流触头受电力而迅速斥开,引入电弧而限流。在触头斥开过程中,断路器的脱扣器动作,操作机构使 Y 型触头分断。斥力限流触头则由于电流的降低或消失而回到闭合状态。

S 型四极断路器的中性极(N)不装脱扣元件,位于最右侧位置,在分合过程中,中性极规定为闭合时较其它三极先接触,分闸时较其它三极后断开。

C 型断路器是为满足 630kVA 及以下变压器电网中的配电保护之需要,通过选用经济型材料和简化结构及改进工艺等办法能够达到较好的经济效果。

## 二、万能式低压断路器

万能式低压断路器,又称框架式自动开关。由于其保护方案和操作方式较多,装设地点也较灵活,故名为“万能式”或“框架式”。

DW10 型万能式低压断路器是一种曾广泛采用的产品,目前生产现场应用较多。现在推广应用的万能式断路器有 DW15、DW15X、DW16 等型及引进的 ME、AH 等型,此外还生产有智能型万能式断路器如 DW45、DW48 等型。其中 DW16 型保留了 DW10 型结构简单、使用维修方便和价廉的优点,但保护性能大有改善,是取代 DW10 的新产品。图 8-4 是目前正大量采用的 DW15 型万能式断路器外形。该系列断路器适用于额定电流至 4000A、额定工作电压至 1140V(壳架等级额定电流 630A 及以下)或 380V(壳架等级额定电流 1000A 及以下)的配电网络中,用来分配电能和作供电线路及电源设备的过载、欠电压、短路保护之用。壳架等级额定电流 630A 及以下的断路器也能在 380V 网络中作供电电动机的过载、欠电压和短路保护。

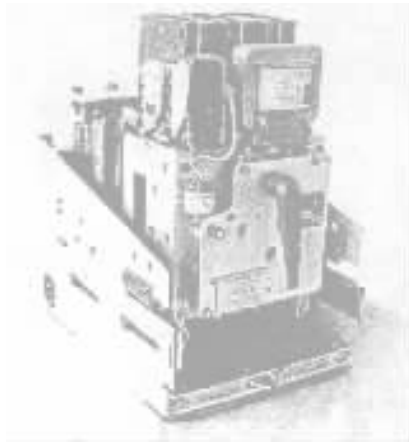


图 8-4 DW15-1600、2500 万能式断路器

断路器在正常条件下可作为线路的不频繁转换之用。壳架等级额定电流 630A 及以下的断路器在正常条件下也可作为电动机的不频繁起动之用。

DW15C 低压抽屉式断路器是由 DW15 改装而来,由断路器本体和抽屉室组成,可装在低压抽屉式配电屏中使用。

智能型万能式断路器,目前已初步得到应用,前景良好。其脱扣器采用数码显示和按钮整定方式,能适应要求较高的工业应用场合。智能脱扣功能如下:

#### 1. 整定功能

用户可在规定范围内整定所需要的电流整定值和延时时间。

#### 2. 显示功能

显示运行电流(即电流表功能),显示各运行线电压(即电压表功能)。整定时显示整定状态和电流、时间值;试验时显示试验状态及电流、时间值;故障发生时显示故障状态,并在分断电路后将锁存的故障信息(动作电流、时间、状态)加以显示。

#### 3. 自诊断功能

当计算机发生故障时,能立即显示出“E”符号或输出报警信号,也可依用户需要分断断路器。当局部环境温度超过 +85℃ 时,能立即发出报警信号或分断断路器。

#### 4. 试验功能

可以试验脱扣器的动作性能。分为脱扣试验、不脱扣试验两种。前者能使断路器分断,后者不分断断路器,可在断路器接于电网运行时进行。

#### 5. 负载监控功能

当电流接近于过载整定值时分断下级不重要负载。分断下级不重要负载后,电流下降,使主回路和重要负荷电路保持供电;当电流下降后,经一定延时发出指令再次接通下级已切除过的负载,恢复整个系统的供电。

#### 6. 模拟脱扣保护功能

该功能一般作后备保护。

#### 7. 热记忆功能

脱扣器过载或短路延时脱扣后,在脱扣器未断电之前,具有模拟双金属片特性的记忆功能。过载能量 30min 释放结束,短路延时能量 15min 释放结束。在此期间再发生过载、短路延时故障,脱扣时间将变短。脱扣器断电,能量自动清零。

另外,智能型万能式断路器一般都设有通讯接口,可以通过网卡等实现配电系统所要求的“四遥”通讯功能:遥测、遥调、遥控、遥信,适用于网络系统,具有过载长延时、短路短延时、瞬时、接地漏电阻段保护特性等功能。

## 第四节 配电屏

低压配电屏是按一定接线方案将有关电气设备组装在一起的一种金属框架,结构简单、价廉,并可双面维护,检修方便,在发电厂(或变电所)中,作为厂(所)用低压配电装置。它有固定式和抽屉式两种结构。

抽屉式低压屏为封闭式结构。它的特点是密封性能好,可靠性高。由于主要设备均装在抽屉内,当回路故障时,可拉出检修或换上备用抽屉,以便于迅速恢复供电。抽屉式低压屏还具有布置紧凑、占地面积少的优点,但其结构比较复杂,工艺要求较高,钢材消耗较多,价格也较高。因此在大机组的厂用电和粉尘较多的车间,抽屉式低压屏使用较多。

BSL、BDL、PGL1 和 PGL2 曾先后是我国广泛应用的低压配电屏,使用 DZ10、DZX10、DW10 等低压断路器。20 世纪 80 年代生产的固定式低压配电屏 GGL,采用封闭式结构,其低压断路器使用断流能力更大的 ME 型。

1992 年,由能源部组织设计生产的固定式低压配电屏 GGD 型在全国推广使用。该配电屏具有 GGD1(分断能力为 15kA)、GGD2(分断能力为 30kA)、GGD3(分断能力为 50kA)三种类型,采用了 DW15、DWX15、DW15C、ME 型低压断路器和 NT 系列高分断能力熔断器。

GCS 型高级抽屉式低压配电屏,是由电力工业部、机械工业部于 1995 年组织设计和研制的。该配电屏为封闭式结构,全面采用了较新的一、二次设备,具有分断与接通能力高、动热稳定性好、电气方案灵活、组合方便、系列性与实用性强、结构新颖、防护等级高等特点,能满足发电厂、变电所等电力市场对增容、计算机接口、动力集中控制、方便安装维修、缩短事故处理时间等方面的需要,是当前普遍采用的更新换代产品。其外形结构如图 8-5 所示。

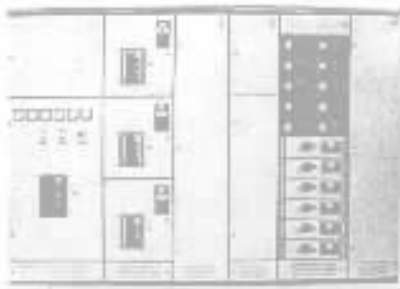


图 8-5 GCS 型低压抽出式配电屏

## 第五节 继电保护装置的安装与调试

变配电系统中的各种电气设备,由于其绝缘老化、机械损坏或由于误操作、雷电等原因,会发生各种故障和正常运行情况。常见故障有三相短路、两相短路、两相接地短路、中性点直接接地系统中的一相对地短路、电气设备的绕组匝间短路等。短路会产生大于额定电流几倍到几十倍的短路电流,电力系统的电压也会随之降低,如不采取有效措施,将会使线路设备损坏,甚至会引发火灾,给国民经济带来重大损失。

继电保护装置是由各种类型的继电器组成的,能自动、迅速和有选择地反应电气设备的故障或工作不正常的状态,并使断路器分闸或发出各种相应信号,以预防故障和缩小故障范围,最大限度保证系统安全可靠的供电。

## 一、对继电保护装置的基本要求

### (一) 选择性

当变电电力系统发生故障时,继电保护装置应能有选择地切除故障设备或线路,以保证不发生故障的设备或线路继续运行。

在单端供电系统中,可通过选取不同延时或不同动作电流的办法来实现继电保护装置的选择性。如图 8-6 所示,当  $d_1$  点短路时,短路电流将流经 QF-41、QF-31、QF-21、QP-11 等断路器,此时 QF-41 断路器应分闸,而不影响系统其余部分的正常运行。如果 QF-41 断路器由于某种原因拒动,则应由上一级保护装置使断路器 QF-31 分闸。这样,虽然也切除了部分非故障线路,但也限制了故障的更进一步扩大,缩小了停电范围。由此可见,继电保护装置应具有选择性要求。

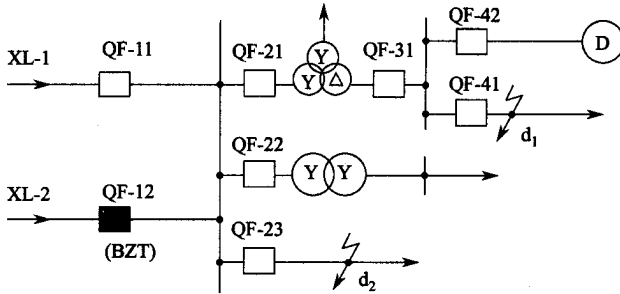


图 8-6 对故障切除具有选择性的配电系统图

另外当  $d_2$  点短路时,如果由于某种原因断路器 QF-23 拒动,继电器 QF-11 应及时分闸。这时工作电源被断开后,通过“备用电源自动投入装置(BZT)”可迅速动作接通备用电源。

继电保护装置的选择性是通过上下级断路器间的动作时限和灵敏性相互配合来实现的,即由故障点至电源方向逐渐降低继电保护装置的灵敏度和提高时限级差。一般要求时限级差  $\Delta t \geq 0.5s$ ,上一级继电保护装置整定值应比串联的下一级继电保护装置整定值大 1.1~1.15 倍以上。

### (二) 速动性

加了限制由于短路而产生的破坏作用,使供电系统尽快恢复正常供电,继电保护装置应具有速动性,以切除供电系统中的故障部分。一般少油高压断路器的分断时间为 0.15~0.1s,真空断路器和空气断路器的分断时间为 0.05~0.06s,继电保护装置的最小动作时间为 0.02~0.03s,所以,故障的最小切除时间为 0.07~0.09s。由此可见,要实现速动性要求,应选用分断时间短的断路器和动作时间最小的继电保护装置。但这应在保证选择性的前提下,尽可能提高保护装置的速动性。

### (三) 灵敏性

是指在保护范围内发生故障或工作状态不正常时,保护装置所能敏感反应和正确动作的能力,一般用灵敏系数来衡量。

如果保护装置用以反应故障时的参数量增加情况时,例如过电流保护装置,其灵敏系数为:

$$k_{Lmi} = I_{dmin}/I_{dz} \quad (8.5.1)$$

式中  $K_{Lmi}$ ——过电流保护装置灵敏系数;

$I_{dmin}$ ——保护区内末端发生金属性短路时的最小短路电流(电流互感器二次电流值),A;

$I_{dz}$ ——保护装置的二次动作电流, A。

当保护装置为两相以上短路保护时,取其两相短路电流最小值  $I_{dmin}^{(2)}$ ,  $\delta \sim 10kV$  中性点不接地系统的单相

短路保护,取其单相接地电容电流最小值  $I_{d\min}^{(1)}$ ; 380/220V 中性点接地系统的单相短路保护,则取其单相接地电流最小差值  $I_{d\min}^{(1)}$ 。

如果保护装置为反应故障时参数量的降低情况时,例如欠电压(或失压)保护装置,其灵敏系数为:

$$K_{Lmv} = V_{dz}/V_d \quad (8.5.2)$$

式中  $K_{Lmv}$ ——欠电压(或失压)保护装置灵敏系数;

$V_d$ ——保护区内末端发生金属性短路时,连接该保护装置母线上的最大残存电压(电压互感器二次电压值),V;

$V_{dz}$ ——保护装置的二次动作电压,V。

对于不同作用的保护装置和被保护设备所要求的灵敏系数,在表 8-2 中列出。

表 8-2 保护装置的最低灵敏系数  $k_{lm}$

类别	保护类型	元件名称	$k_{lm}$	备注
主保护	电流速断保护	电流元件	2.0	按保护安装处短路计算
	过电流保护	电流元件	1.5	个别情况可选 1.25
		零序元件	2.0	
	线路、电动机的纵联差动保护	电流差动元件	2.0	
	中性点不接地系统中的单相接地保护	电流元件	1.5	架空线路
1.25			电缆线路	
后备保护	远后备保护	电流元件	1.2	按相邻保护区末端短路计算

#### (四)可靠性

在正常运行中的继电保护装置应始终处于良好的警戒状态,当其保护范围内发生故障或工作状态不正常时,应能可靠动作,否则应能可靠拒动,即不产生误动作。

以上对继电保护装置的四条要求是十分重要的,在考虑保护方案时应根据实际情况,在统筹兼顾的原则下有所侧重,以使继电保护方案在技术上安全可靠。

## 二、一般常用继电器及其调试

在继电保护装置中,大量采用的是电磁型和感应型继电器。继电器种类繁多,例如有 DL-10 型、DL-20 型和 DL-30 型电流继电器;DJ-100 型、DY-20 型和 DY-30 型电压继电器;DS-110 型、DS-20 型和 DS-30 型时间继电器;DZ-10 型、DZ-30 型和 DZ-70 型中间继电器;DX-11 型、DX-30 型和 DX-41 型信号继电器等等。本节将重点介绍它们的基本结构、工作原理及其调试方法。

### (一)电磁式电流继电器

#### 1. 电磁型电流继电器的结构和工作原理

以 DL-10 型电流继电器为例,其结构如图 8-7 所示,主要由电磁铁 1、线圈 2、Z 型舌片 3、反作用弹簧 4 和动、静触点 5 和 6 等部件构成。

$$M_j \geq M_T + M_m$$

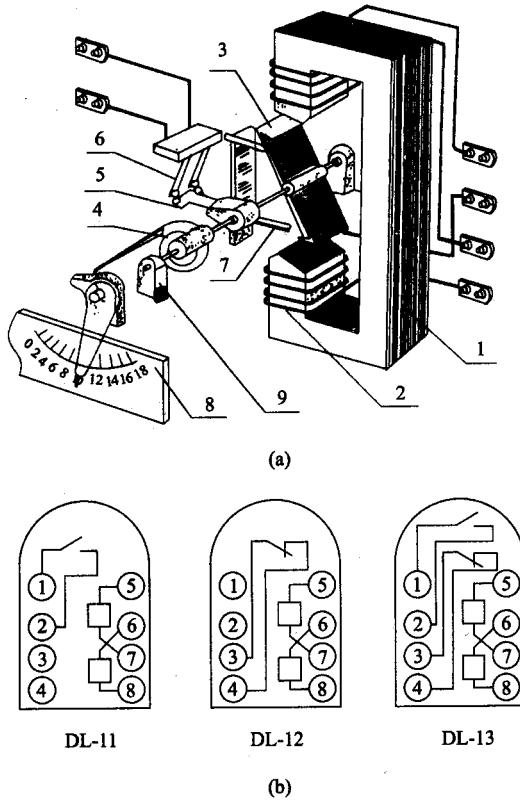


图 8-7 DL-10 系列电流继电器结构及接线图

(a) 结构图 (b) 内部接线图

1-电磁铁 2-线圈 3-Z型舌片 4-弹簧 5-动接点；

6-静接点 7-调整杠杆 8-标度盘 9-轴承座；

使继电器动作的最小电流称为动作电流  $I_{dz}$ ，因电磁力矩  $M_j$  与线圈中流过的电流平方成正比，故要继电器返回，必须降低线圈中的电流。使继电器返回到原始位置的最大电流值称为继电器的返回电流  $I_f$ ，继电器返回电流与动作电流之比，称为返回系数  $k_f$ ，即：

$$k_f = I_f / I_{dz}$$

(8.5.4)

对于反应电流增量的继电器来说， $I_{dz} > I_f$ ，所以  $k_f < 1$ ，一般取  $k_f = 0.85 \sim 0.9$ 。

以上所介绍的电磁型电流继电器，当其线圈电流达到一定数值时才动作，故称为过电流继电器，其动作时间为  $0.02 \sim 0.04s$ ，因此也称为瞬动过电流继电器。

图 8-7 所示继电器有两个电磁线圈，匝数均为  $W$ ，这样可以通过调整刻度盘的位置和利用电磁线圈的串、并联来整定电流。如果两个线圈串联，并通入电流  $I_j$ ，则继电器总磁势为  $I_j W \times 2 = 2WI_j$ ，如果两个线圈并联，通入电流仍为  $I_j$ ，则继电器总磁势为  $2 \times WI_j / 2 = WI_j$ 。可见，在继电器通入相同电流的情况下，线圈串联时的总磁势是线圈并联时的两倍。因为继电器动作所需磁势是一定的，故线圈并联时的动作电流是串联时动作电流的两倍。

随着电子技术的发展，生产出了体积小、重量轻、工作可靠和寿命长的电子式电流继电器，其特性与电磁式电流继电器相似，其线路原理如图 8-8 所示，主要由电压形成电路、整流滤波路、比较电路和单稳态触发电路等组成。

电压形成电路是将流入继电器的电流  $I_j$  经电流互感器 TA 和电阻  $R_1$  转换成电压  $V_{RI}$ ，再经整流滤波电

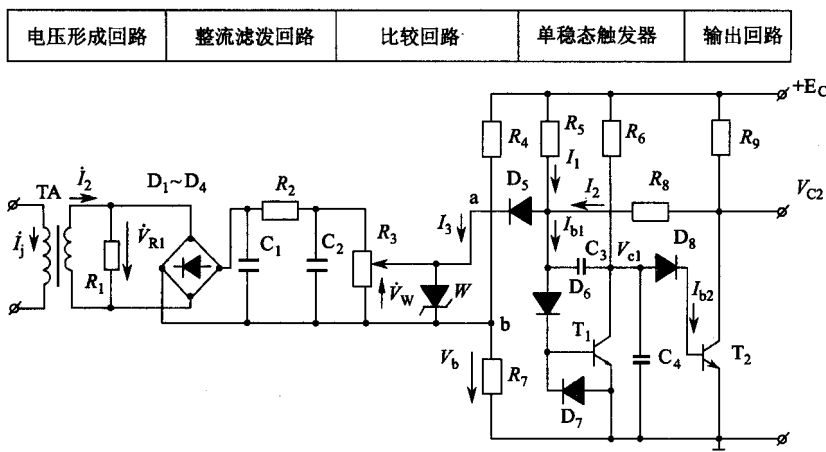


图 8-8 电子式电流继电器线路原理图

路将交流电压  $V_{R1}$  变成直流电压加于电位器  $R_3$  上,其输出电压  $V_w$  与输入电流  $I_j$  成正比,从而可通过电位器  $R_3$  来调节继电器的动作电流。比较电路由  $W$ 、 $R_3$ 、 $R_4$  和  $R_7$  等组成。经  $R_4$  和  $R_7$  分压得到  $V_b$ ,称为比较电压(一般为  $2 \sim 4V$ )。继电器是否动作,主要取决于  $V_w$  和  $V_b$  的比较结果。

在正常工作时,  $I_1 < I_{dz}$ ,  $V_w < V_b$ , 二极管  $D_5$  承受反向电压而截止,  $I_3 = 0$ 。输入信号回路对单稳态触发器的工作无影响。此时,  $T_1$  基极电流  $I_{b1} = I_1 + I_2$ , 并使  $T_1$  处于饱和导通状态,  $V_{C1} \approx 0.3V$ , 此电压不足以使  $T_2$  导通而处于截止状态,  $V_{C2} \approx E_c$ , 对应于继电器为不动作状态。

当  $I_j \geq I_{dz}$  时,  $V_w > V_b$ , 使 a 点电位变负,  $D_5$  承受正向电压而导通。由于输入回路的分流作用而使  $I_b$  减小, 单稳态触发电路将发生如下翻转过程:

$$V_a = V_w + V_b < 0 \rightarrow I_3 \uparrow \rightarrow I_{b1} \downarrow \rightarrow V_{C1} \uparrow \rightarrow I_{b2} \uparrow \rightarrow V_{C2} \downarrow \rightarrow I_2 \downarrow$$

即  $T_1$  由饱和导通转入截止,  $T_2$  则由截止转入饱和导通状态。对应于继电器为动作状态, 相应的电流值  $I_j$  为动作电流  $I_{dz}$ 。而当  $I_j$  减小到低于  $I_{dz}$  某一值时,  $T_2$  则由饱和导通状态转入截止状态, 显然返回系数  $k_f < 1$ 。

## 2. 电流继电器试调

### 1) 电流继电器动作电流和返回电流的试验

试验电路如图 8-9 所示, 由自耦变压器  $TM$ 、变流器  $TC$  和电流表等试验设备组成。合上开关  $SA$ , 均匀调节自耦变压器  $TM$ , 使其输出电压升高, 当继电器动作指示灯  $HL$  点亮时, 从电流表上读取电流值即为动作电流。然后再调节自耦变压器  $TM$ , 使其输出电压降低, 当继电器返回至初始位置, 即指示灯  $HL$  熄灭时, 从电流表上读取电流值为返回电流。如此反复试验三次, 分别计算动作电流及返回电流的平均值, 并以  $10I_{dz}$  冲击 5 次, 以检查继电器的触头是否有卡涩现象。一般校验  $DL$  系列电磁式电流继电器的返回系数应大于  $0.7$ , 如前所述, 通常取返回系数  $k_f = 0.85 \sim 0.9$  为宜。

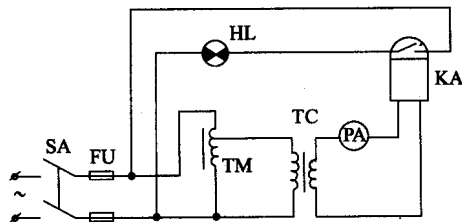


图 8-9 电流继电器动作电流和返回电流校验电路图

TM—自耦变压器; TC—变流器; KA—电流继电器; HL—指示灯; PA—电流表; SA—控制开关



## 2) 电流继电器动作时间校验

电流继电器动作时温校验试验线路如图 8-10 所示,主要由电流继电器 KA、自耦变压器 TM、电流表 PA,变流器 TC、电气秒表 Pt 和开关等组成。目前电气秒表种类繁多,以图 8-10 中所用电气秒表 QX-9709 为例,其外型如图 8-11 所示,是一种触点信号、脉冲信号、传感器信号测试的数码显示仪器,具有时基(小位数及时间测量范围)选择,自动清零,手动清零和触发计时等功能。可用于继电器,开关触点动作转换时间,脉冲宽度或两个脉冲之间的延迟时间以及物体运动速度等方面的测量。

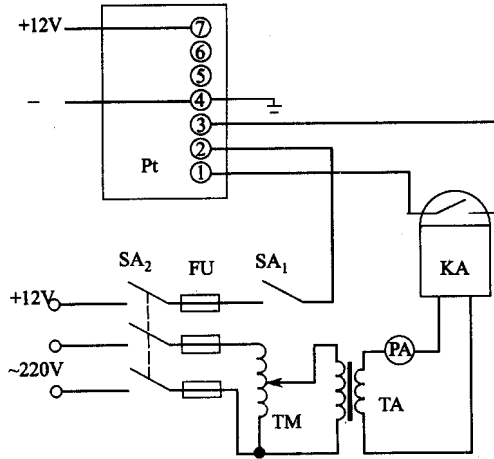


图 8-10 电流继电器动作时间校验线路图

SA1、SA2—控制开关;TM—自耦变压器;TC—变流器;Pt—电气秒表;KA—电流继电器;PA—电流表

按图 8-10 接线,其中接线柱①可输出 +6V 电压,为测量触点信号共用端或作为外接传感器工作电源;接线柱②为计时输入端,接线柱③为停止计时输入端,接线柱④为信号接地端(脉冲信号共用端);而接线柱⑥、⑦则为工作电源输入端。然后即可设置合适的时基,例如选择开关 I、II 均拨下时,时基为 0.1,最大计时 99999.9s,选择开关 I 拨下,II 拨上时,时基为 0.01,最大计时 9999.99s,选择开关 I 拨上,II 拨下时,时基为 0.001,最大计时 999.999s,选择开关 I、II 均拨上时,时基为 0.0001,最大计时

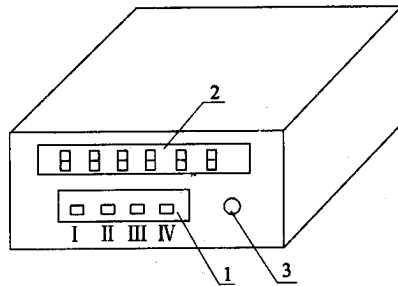


图 8-11 电气秒表 QX-9709 外型图

1—选择开关 I~IV 2—数码显示器 3—清零按钮

99.9999s。每次测量之前应注意清零,选择开关 III 拨下时为自动清零,而拨上时则需通过清零按钮 3 手动清零。另外通过选择开关 IV 可设置计时方式,例如选择开关 IV 拨下时为触发方式(即为上升沿触发控制);而 IV 拨上时,则为电平方式(即为交流电平控制方式)。

在校验时先将开关 SA1 打开,再合上开关 SA2,调节自耦变压器 TM,使通过继电器的电流上升至  $1.2I_{dk}$ 。然后打开 SA2,合上 SA1,之后再合上 SA2,这时电子秒表 Pt 开始计时。当继电器 KA 动作,即其常开触点闭合时,电气秒表 Pt 即刻停走,表上显示读数即为继电器 KA 的动作时间,如此反复试验三次,可得继电器动作时间分别为  $t_{d1}$ 、 $t_{d2}$ 、 $t_{d3}$ ,其平均值为电流继电器的动作时间,即

$$t_{dz} = (t_{dz1} + t_{dz2} + t_{dz3})/3 \quad (8.5.5)$$

其动作时间应不大于  $0.15s$  为合格。

### 3 电流继电器耐压试验

其目的是检查电流继电器的绝缘耐压能力,有无匝间短路等。即在线圈和金属壳体、铁芯之间施加交流电压  $2000V$ 、 $50Hz$  持续时间为  $1min$ 。

此外,为了减少电流互感器的二次负荷,在制造电流继电器时应尽可能减少它所消耗的功率,并满足正常运行时的热稳定要求。

## (二)电磁式电压继电器

电压继电器的结构和工作原理与电磁式电流继电器相同,有过电压继电器和欠电压继电器两种。

电压继电器的线圈可以直接或经过电压互感器接到电网上,作为过电压或欠电压保护。电压继电器流过的电流  $I_j$  为:

$$I_j = V_j/Z_j \quad (8.5.6)$$

式中  $V_j$ ——线圈的端电压,  $V$ ;

$Z_j$ ——线圈阻抗,  $\Omega$ 。

电磁型电压继电器在磁路未饱和时,  $Z$  型片受到的电磁力矩  $M$  与流过的电流  $I_j$  的平方成正比,电压继电器与电流继电器相似,电磁力矩  $M_j$  与其线圈的端电压  $V_j$  的平方成正比,即:

$$M_j = K'I_j^2 = K'(V_j/Z_j)^2 = KV_j^2 \quad (8.5.7)$$

使电压继电器动作的最小电压称作动作电压  $V_{dz}$ ,电压继电器动作后,使其返回到初始位置的最大电压称作返回电压  $V_f$ ,则返回系数定义为:

$$k_f = V_f/V_{dz} \quad (8.5.8)$$

一般过电压继电器的返回系数  $0.85 \leq k_f \leq 0.9$ ;欠电压继电器的返回系数  $1.15 \leq k_f \leq 1.25$ 。电压继电器的动作电压和返回电压校验方法与电流继电器的校验相似,其校验线路如图 8-12 所示。

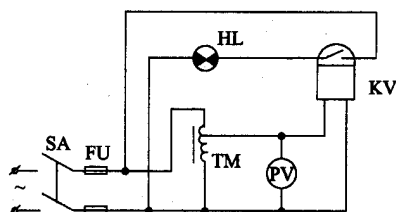


图 8-12 电压继电器的动作电压和返回电压校验线路

TM—自耦变压器;KV—电压继电器;PV—电压表;

HL—指示灯;FU—熔断器;SA—控制开关

## (三)电磁式中间继电器

中间继电器有交、直流两种类型,其线圈分为电压线圈和电流线圈。中间继电器是继电保护装置中不可缺少的辅助电器,其作用是提供数量足够的触点,以便同时控制多个线路;增加触点容量,可接通或断开较大电流的回路;也可使触点在闭合或断开时有一定的延时,以满足保护及自动控制装置的要求。

### 1. 电磁式中间继电器的结构及原理

其结构如图 8-13 所示,当在线圈 2 上施加工作电压后,电磁铁 1 产生电磁引力,将克服弹簧 6 的反作用力而使衔铁 3 吸合,并带动触头、5 使其常开触头闭合、常闭触头断开。当施加于线圈 2 上的电压消失后,在弹簧 6 的作用下,衔铁返回,带动触点 5 返回至初始位置。

瞬时动作的中间继电器,在额定电压下动作时间约为  $0.05 - 0.06s$ ,返回时间约为  $0.01 - 0.02s$ 。延时动作的中间继电器,其铁芯上套有若干片铜短路环,即相当于阻尼线圈。在接通或断开线圈的工作电压时,均

在铜短路环中产生感应涡流,由电磁感应定律知道,由涡流产生的磁通将阻碍主磁通的增加或减少,从而使继电器动作或返回都带有一定的延时特性。如 DZS-100 型延时动作的中间继电器,具有不小于 0.06s 的动作时限和返回时限, DZS-145 型延时中间继电器,其返回时间利、于 0.4s。

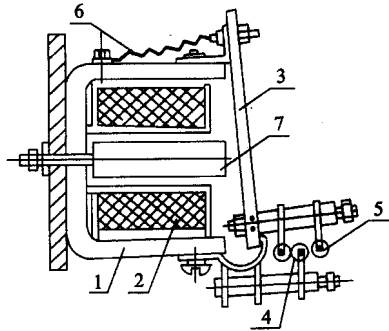


图 8-13 DZ-10 系列中间继电器结构图

1—电磁铁 2—线圈 3—衔铁 4—静触点 5—动触点 6—反作用弹簧 7—铁芯

为了使断路器能可靠跳闸,或防止发生断路器跳跃现象,可选用具有保持线圈的中间继电器。其结构与一般的 DZ 型中间继电器相似,只增加了保持线圈,如图片-14 所示。图中动作线圈为电压线圈,而保持线圈为电流线圈。当继电器动作后,其常开触头闭合而接通保持线圈回路,这时如果切断动作线圈的电压回路,继电器仍能继续保持动作状态。

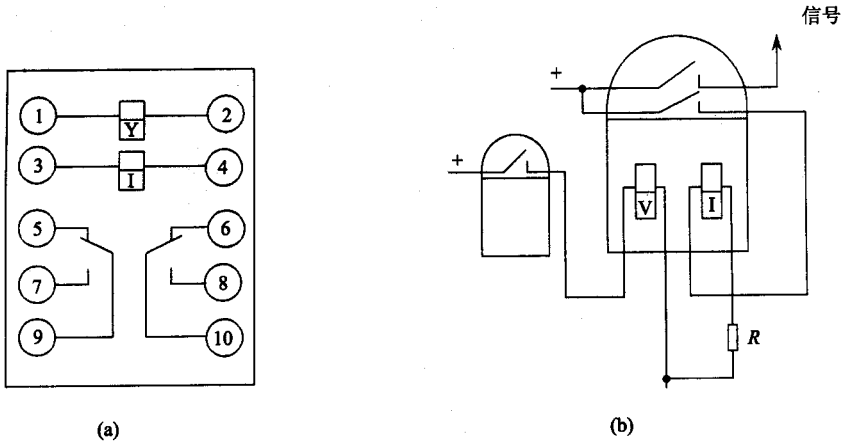


图 8-14 具有保持线圈的中间继电器

(a)继电器内部接线图 (b)继电器自保持接线方式

当然也可以由电流线圈作为动作线圈,而电压线圈作为保持线圈。用电流线圈作为保持线圈的继电器,一般规定保持电流应不大于额定电流的 80%;用电压线圈作为保持线圈的继电器,保持电压应不大于额定电压的 65%。

具有自保持线圈的中间继电器有多种,例如 DZB-100 系列的中间继电器主要包括 DZB115、DZB-127、DZB-138 型三种。这种继电器在接线之前应进行极性校验,找出动作线圈与保持线圈的同极性端,以确保中间继电器动作后能可靠地实现自保持。否则动作线圈与保持线圈的磁势将相互抵消,而不能自保持。

### 2. 电磁式中间继电器校验

电磁式中间继电器的动作电压和返回电压校验与电压继电器的校验方法相同,参见图 8-12,如果是直流中间继电器,应将自耦变压器改用电位器即可。为了保证在工作电源电压降低时中间继电器仍能可靠动

作,要求中间继电器的动作电压一般不应大于额定电压的 75% 即应满足;

$$V_{dz} \leq (60 \sim 75)\% V_N \quad (8.5.9)$$

由于中间继电器返回时,其线圈端电压一般已降至零,故这种继电器的返回系数约为 0.4 以下,但不会影响其工作的可靠性。返回系数  $K_f \geq 0.2$  为合格,可按下式对中间继电器校验,即:

$$k_f = V_f / V_{dz} \geq 0.2 \quad (8.5.10)$$

如果不能满足要求,可适当调整弹簧 6 的拉力。

直流中间继电器动作时间和返回时间校验线路如图 8-15 所示。在校验动作时间时,可按图 8-15(a) 接线,先将控制开关 SA2 分断,再闭合开关 SA1,调节电位器 RP(对于交流中间继电器则应调节自耦变压器),使其输出电压达到中间继电器的额定电压值。然后将开关 SA1 分断,使电气秒表 Pt 清零,先闭合开关 SA2,再闭合 SA1,此时电气秒表计时。当中间继电器动作时,电气秒表停走,数码显示器显示的时间即为中间继电器的动作时间。按同样方法,再分别取中间继电器额定电压的 70%、80%、90% 测量动作时间,各次测得的动作时间应接近相同。

返回时间校验线路如图 8-15(b) 所示,先将控制开关 SA2 分断,闭合 SA1,调节电位器 RP(对于交流中间继电器应调节自耦变压器),使其输出电压达到中间继电器的额定电压值,然后将 QX-9709 型电气秒表清零,并闭合开关 SA2,按下按钮 SB2,继电器 K2 动作,切断中间继电器 K1 电源,电气秒表开始计时。当中间继电器返回(即其常闭触点复位闭合)时,电气秒表停走,数码显示器显示时间即为中间继电器的返回时间。

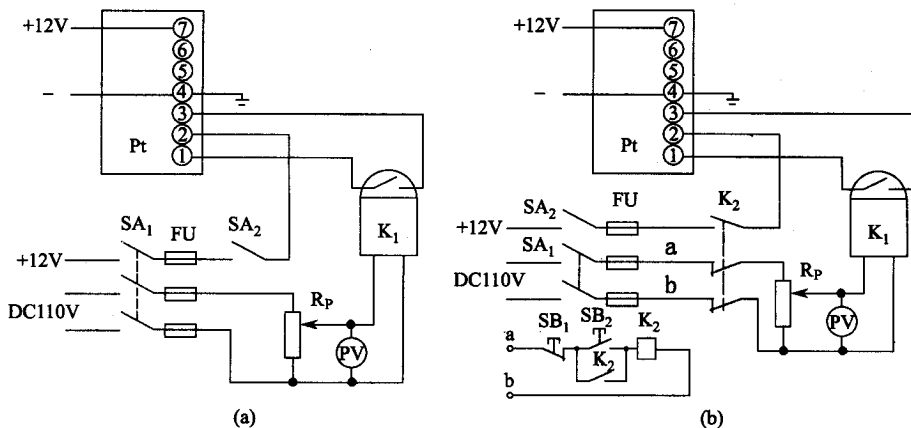


图 8-15 直流中间继电器动作时间和返回时间校验线路

(a) 动作时间校验 (b) 返回时间校验

如果所测试继电器的动作时间和返回时间不符合规定要求时,可适当调整弹簧 6 的松紧度和触头的间隙。

#### (四) 时间继电器

时间继电器是继电器保护及自动控制装置中常用的时限元件,使被控元件的动作得到可调的延时,因此对时间继电器的动作时限准确度要求较高,有电磁式时间继电器和电子式时间继电器等两种。

##### 1. 电磁式时间继电器。

电磁式时间继电器的结构如图 8-16 所示,在直流回路中一般采用 DS-110 系列,在交流回路中则多采用 DS-120 系列时间继电器,其结构基本相同。

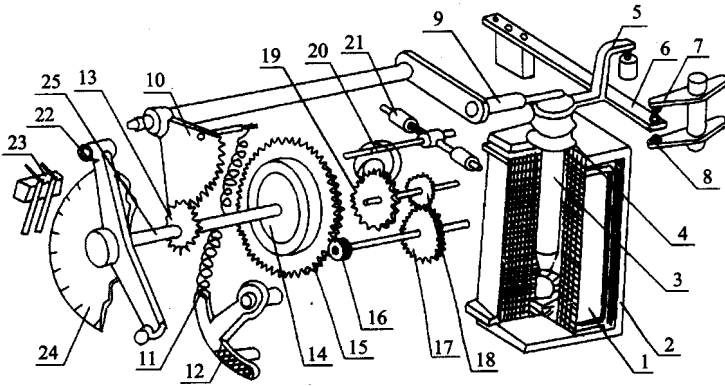


图 8-16 DS-110 系列时间继电器结构图

1—线圈 2—电磁铁 3—衔铁 4—返回弹簧 5—触点切换压头 6、7、8—瞬时动、静触点 9—曲柄 10—扇形齿轮；  
11、主弹簧 12、主弹簧拉力调节器 13、16、18—传动齿轮 14—滚珠式摩擦离合器 15、17—主传动齿轮、  
19—摆齿轮 20—摆卡 21—摆垂 22、23—延时动、静触点 24—延时标度盘 25—动触点轴；

当继电器的工作线圈 1 加上动作电压后，衔铁 3 被吸下，曲柄 9 失去支撑，在主弹簧 11 的作用下，扇形齿轮 10 转动，并带动齿轮 13 经滚珠式摩擦离合器 14 使同轴的主传动齿轮 15 转动；从而带动钟表机构传动齿轮 16，经中间主传动齿轮 17，传动齿轮 18 使摆卡 20 卡住摆齿轮 19 的一个齿，使之停转。但由于主弹簧 11 的作用，压迫摆卡偏转而离开摆齿轮，摆齿轮便转过一个齿。随后摆卡又重新卡住摆齿轮的另一相邻齿，使之再次停转，如此往复使摆齿轮断续转动，故延时动触点 22 经一定延时后才与静触点 23 接触，达到了延时的目的。

延时动、静触点闭合时间  $t_j$  由动触点轴所转动的行程角  $\alpha$  和转动角速度  $\omega$  决定。当  $\omega$  为常数时，则有引  $t_j = \alpha / \omega$ 。由此可见，在进行时间继电器的动作时限  $t_j$  整定时，可通过改变延时动、静触点闭合时间的行程角  $\alpha$  来实现。

在工作线圈 1 断电后，衔铁 3 靠返回弹簧 4 复位，并将主簧 11 位伸储存弹性势能，以备下次动作。在继电器复位过程中，由于离合器 14 的作用，钟表机构不工作，所以可瞬时完成复位。

## 2. 电子式时间继电器

电子式时间继电器制作工艺简单、成本低，而且工作可靠、寿命长、安装调试简便，因此在继电保护、自动控制装置中广泛采用，常用的放电式延时电路如图 8-17 所示。

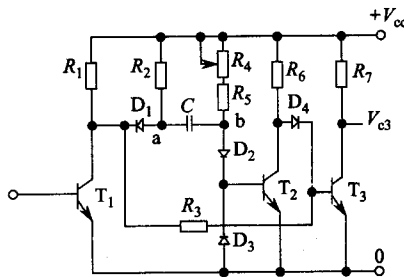


图 8-17 电子式时间继电器的延时电路图

在正常情况下，其前级触发器（图中未绘出）无动作信号输出，故  $T_1$  截止，同时放电式延时电路中的  $T_2$ 、 $T_3$  饱和导通，输出为低电平， $V_{cd} \approx 0.3V$ 。当保护动作时，前级触发器翻转，其输出信号使  $T_1$  饱和导通， $V_{cd} \approx 0.3V$ 。这时  $a$  点电位从  $+V_{cc}$  下降到约为  $1V$ ， $b$  点电位跃变约为  $-V_{cc}$ ，所以  $D_2$  和  $T_2$  均截止。由于  $R_6$ 、 $D_4$  支路可为  $T_3$  继续提供基极电流，故  $T_3$  仍处于饱和导通状态，使输出维持低电平。此时电容  $C$  和  $D_1$ 、 $T_1$ 、电源  $+V_{cc}$  和  $R_4$ 、 $R_5$  所组成的回路放电，并反向充电。根据克希荷夫回路电压定律得微分方程为：

$$(R_4 + R_5)C \frac{dv_c}{dt} + v_c = V_{cc} - (V_{D1} + V_{ces1})$$

式中  $V_{D1}$ 、 $V_{ces1}$ ——分别为二极管  $D_1$  的正向压降和三级管  $T_1$  的饱和管压降,即  $V_{D1} + V_{ces1} \approx 1V$ 。

在电容  $C$  放电瞬时,其端电压  $V_c(O+) = -V_{cc} + 1.4V$ ,则得微分方程通解为:

$$v_c = (V_{cc} - 1) - (2V_{cc} + 2.4)e^{-t/(R_4+R_5)C} \quad (8.5.11)$$

显然  $b$  点电位按指数规律升高,当升高到约  $1.4V$  时,即  $v_c = 0.4V$  时,  $D_2$  和  $T_2$  将恢复导通。当  $T_1$  与  $T_2$  均饱和导通时,  $T_3$  截止,输出高电平  $V_{e3} \approx V_{cc}$ ,送出动作信号。通过上述对电容充放电过渡过程的分析,为简化计算,可将式(2-110)近似写成:

$$v_c = V_{cc} - 2V_{cc}e^{-t/(R_4+R_5)C} = 0$$

则电子型时间继电器的动作时间  $t_{dz}$  为:

$$t_{dz} \approx 0.7(R_4 + R_5)C \quad (8.5.12)$$

由此可见,在调试中可通过调整电阻  $R_4$  整定动作时限。

### 3. 时间继电器的一般交接试验

应按要求将时间继电器安装在垂直的屏板上,并按二次接线原理图进行盘内配线,再与相应的外部接线端子相连接。在安装后,还应对继电器的内部线路(即工作线圈、触点等)与外壳及电气上无联系的电路之间进行绝缘电阻测量和耐压试验。工频交流试验电压为  $2kV$ ,持续时间  $1min$ ,应无击穿或闪络现象。在此基础上进行以下试验:

#### 1) 动作电压和返回电压校验

对于交流时间继电器动作电压和返回电压校验线路与电压继电器的校验方法相同,见图 8-12。先将开关  $SA$  闭合,均匀调节自耦变压器  $TM$ (对于直流时间继电器,应将自耦变压器改用电位器  $R_p$ ),使工作线圈 1 的端电压升高,当衔铁 3 被吸入,其瞬动常开触点闭合,指示灯  $HL$  点亮,此时电压表  $PV$  的数值称为动作电压。然后缓慢降低工作线圈 1 的端电压,当衔铁 3 和延时机构在返回弹簧 4 的作用下返回复位(即瞬动常开触点又断开),指示灯  $HL$  熄灭时,电压表  $PV$  上的数值称为返回电压。有关试验规程规定,时间继电器的动作电压应满足条件:

$$\left. \begin{array}{l} \text{直流时间继电器, } V_{dz} \leq 70\% V_N \\ \text{交流时间继电器, } V_{dz} \leq 85\% V_N \end{array} \right\} \quad (8.5.13)$$

返回电压应满足条件:

$$V_f \geq 5\% V_N \quad (8.5.14)$$

上式中  $V_{dz}$ ——时间继电器动作电压,  $V$ ;

$V_f$ ——时间继电器返回电压,  $V$ ;

$V_N$ ——时间继电器的额定工作电压,  $V$ 。

如果不符合规定要求,可适当调整返回弹簧 4 的松紧程度及衔铁在移动中是否有卡涩现象。校验调整符合规定要求后,再以动作电压值作两次冲击合闸试验,以进一步检查继电器是否动作可靠,触点有无抖动和接触不良等。

#### 2) 时间继电器的动作时限整定:

在按设计要求进行时间继电器的动作时限整定之前,应先对标度盘上的所有标度值(即动作时限)进行校验。所谓动作时限,就是从额定电压加到工作线圈 1 的瞬时起,到延时动合触点 22、23 闭合时止的这段时间,称为时间继电器的动作时限,并由指针在标度盘上指明。直流时间继电器的校验线路如图 8-18 所示,校验交流时间继电器时,只需将图中电位器  $R_v$  更换为自耦变压器  $TM$  即可。

在校验时间继电器的动作时限,应先将继续继电器的动作时限指针对准标度盘上的某一待测刻度值,然后将控制开关  $SA_2$  断开,  $SA_1$  闭合,调节滑线变阻器  $RP$ ,使施加于时间继电器线圈上的电压达到额定电压值。再将开关  $SA_1$  断开,并使电气秒表  $P_t$  清零后闭合开关  $SA_2$ ,再闭合  $SA_1$ ,这时电气秒表开始计时。经过一定的延时时间,其延时动合触点 22、23 闭合,并将电气秒表的①端输出的  $+6V$  电源接入至其停止计时端③,从而使电气秒表停走,则电气秒表记录的数值即为时间继电器的延时时间。按同样方法,分别取时间继电器额定电压的 90%、80%、70% 等各进行一次试验,取其四次试验数据的平均值,作为时间继电器的延时时间,并将

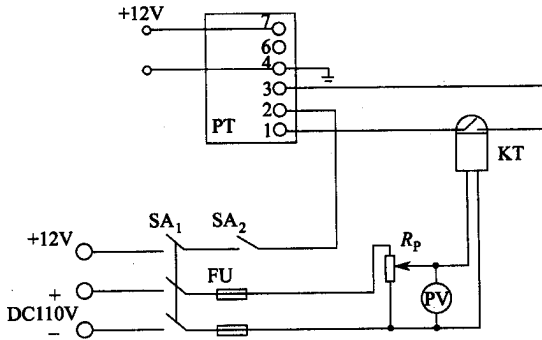


图 8-18 直流时间继电器动作时限校验线路

实际测量值与标度盘上的刻度值相比较。如果二者存在误差,应适当调整延时静触点 23 的位置,以改变延时动、静触点之间的行程角  $\alpha$ 。另外,也可以适当调整标度盘的位置,例如,当测量值比标度盘上的指示时限值大时,可将标度盘延顺时针方向转动适当角度,以使标度盘上的指示值与实测值相同。

经上述校验调整符合要求后,再将标度盘上的动作时限指针调整到设计整定的时限值,并按同样方法再校验三次,以使时间继电器的整定时限值与设计整定时限值相符,准确无误。

### (五) 信号继电器

在继电保护装置和自动控制系统中,信号继电器被用来作为整套继电保护装置或保护装置中的某一回路的信号指示。根据信号继电器所发出的信号,使值班人员能随时掌握整个系统的运行情况,分析继电保护装置的动属于什么性质,以便及时加以处理。常用的电磁式信号继电器有 DX-11、DX-3 型等,其结构如图 8-19 所示。

在正常情况下,信号继电器线圈 2 中无电流流过,衔铁 3 被弹簧 6 拉住,且信号牌 9 被衔铁边缘托持在较高位置。一旦线圈中流过电流而吸动衔铁时,信号牌将失去支撑而落下。这时在继电器外面观察孔 7 处可以看见信号牌。当信号牌落下时,使转轴转动  $90^\circ$ ,使固定在转轴上的动触点 4 与静触点 5 接触,将信号回路接通,发出声、光报警信号。继电器动作后,它的两对常开触点和信号牌均不能自动复位,从而实现对线路或用电设备故障的记忆功能,也便于值班人员及时了解故障的性质,判断出导致少油断路器跳闸的原因,对线路或用电设备故障及时进行处理。当事故处理完毕,需要解除信号时,则利用装在外壳上的手动复位旋钮 8 拨回信号牌,并断开信号电路。

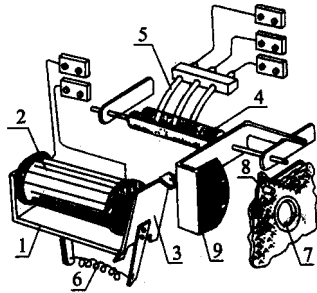


图 8-19 DX-11 型信号继电器结构图

- 1—电磁铁 2—线圈 3—衔铁 4—动触点;  
5—静触点 6—弹簧 7—信号牌观察孔;  
8—手动复位旋钮 9—信号牌

信号继电器通常可以分为电流型信号继电器和电压型信号继电器,其接线如图 8-20 所示。交流信号继电器的校验线路见图 8-21,试验时先将自耦变压器 TM 调至零位,合上刀开关 SA,均匀调节 TM,使输出电压(或电流)升高。当继电器的衔铁 3 刚好被吸动、信号牌 9 落下、触点闭合,指示灯 HL 亮时,电压表(或电流

表)的指示值即为信号继电器的动作电压(或电流)值。然后,再缓慢调节自耦变压器降低电压(或电流),在弹簧6的作用下衔铁开始返回原始位置时,电压表(或电流表)的指示值即为信号继电器的返回电压(或电流)值。

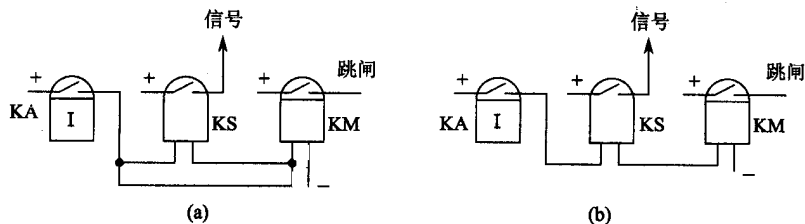


图 8-20 信号继电器的接线方式

(a)电压型信号继电器 (b)电流型信号继电器

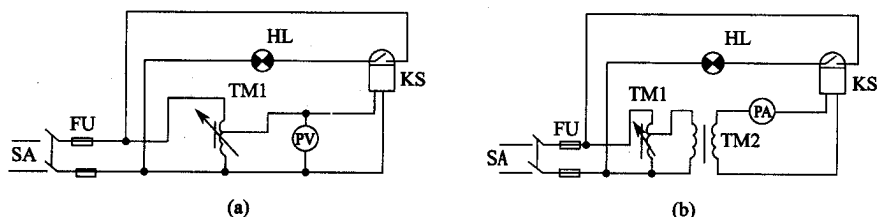


图 8-21 交流信号继电器校验线路

(a)电压型信号继电器 (b)电流型信号继电器

工程交接试验规定:电压型信号继电器的动作电压  $V_{dz}$  一般在其额定电压  $V_N$  的(50~65)%范围内为合格,而返回电压  $V_f$  不得小于其额定电压的5%;电流型信号继电器的动作电流  $I_{dz}$  一般在其额定电流  $I_N$  的(70~90)%范围内为合格,而返回电流  $I_f$  不小于其额定电流的5%。

如果动作电压或动作电流、返回电压或返回电流不符合上述要求时,经检查线圈如无短路或衔铁无卡阻现象时,可适当调节弹簧6的拉力,或调节衔铁与铁芯之间的间隙。调整后,还需要再重复校验一次。最后盖好胶木盖,并试验一次,以检查信号牌是否能按要求下落。

## (六)瓦斯继电器

当油浸式电力变压器内部发生故障时,由于短路电流及其产生的短路点电弧的作用,将使绝缘材料和变压器油分解产生大量的瓦斯气体。因气体比变压器油的比重小,因而会上升到变压器的最高部位油枕内。反应故障时的气体变化而组成的变压器保护称为瓦斯保护,而且是作为变压器本体的主保护。

瓦斯继电器就是用来检测变压器故障性质和严重程度的,当故障情况较轻时,轻瓦斯保护动作,发出轻瓦斯报警信号;当故障情况较严重时,则重瓦斯保护动作,发出重瓦斯报警信号,并使高压断路器跳闸。瓦斯继电器装在变压器油箱与油枕之间的连通管上,为了使油箱内的气体都能顺利进入瓦斯继电器,如前所述,在安装变压器时,变压器顶盖平面沿油枕方向应有(1~1.5)%的坡度,安装瓦斯继电器的连通管应有(2~4)%的升高坡度。

瓦斯继电器又称作气体式继电器,按结构分有浮筒式、挡板式和开口杯与挡板复合式等三种。浮筒式瓦斯继电器有GR-3型、FJ-22型等,由于浮筒式瓦斯继电器的浮筒渗油和水银接点防震性能差而导致误动作,所以这种继电器已较少采用。挡板式和开口杯与挡板复合式等瓦斯继电器工作可靠,具有良好的抗震性能,目前这两种瓦斯继电器得到广泛采用。

FJ<sub>3</sub>-80型挡板式瓦斯继电器的顶盖上设有4个接线端子,分别为轻瓦斯接线端子和重瓦斯接线端子。另外,顶盖上还设有排气阀和探针8,用以排除继电器内部的残留气体和复位之用。继电器内部的上、下开口杯1、2分别与平衡锤5、6固定在同一轴杆的两端。在变压器正常工作时,由于变压器油对开口杯的浮力作用,开口杯侧的力矩小于平衡锤侧力矩,所以开口杯均处于向上倾斜的位置。这时,固定在上、下开口杯上



的永久磁铁 12、13 分别位于干簧管(即磁力触点)3、4 的上方,其触点均不动作。

当变压器内部发生轻微故障(如局部少量匝间短路等)时,产生的瓦斯气体聚集到继电器顶部而迫使其油面下降,上开口杯 1 随之下降,固定在开口杯上的永久磁铁 12 将靠近干簧管磁力触点 3,在磁力作用下使其触点闭合,接通轻瓦斯信号回路,发出轻瓦斯声光报警信号。当变压器内部发生较严重故障(如相间短路,单相短路接地等)时,将产生较强烈的瓦斯气体而形成油流直接冲击挡板 11,使下开口杯 2 发生偏转下降,固定在开口杯上的永久磁铁 13 将靠近干簧管 4,使其触点闭合而接通重瓦斯信号回路,发出重瓦斯声光报警信号,同时使断路器跳闸,迅速切断电源。变压器瓦斯保护接线原理图如图 2-80 所示。

根据有关规程规定,室内 400kVA 及以上、室外 800kVA 及以上油浸式电力变压器均须装设瓦斯继电保护装置。以 FJ<sub>3</sub>-80 型瓦斯继电器为例,其安装调整方法如下:

在安装瓦斯继电器之前,应先选用 2kV 兆欧表测量瓦斯继电器及其所在二次回路的绝缘电阻,绝缘电阻应大于 1MΩ。然后再进行工频交流耐压试验,试验电压为 1kV,持续时间 1min 以上,如未发生异常现象为合格。并通过螺杆调节支架 9,以使永久磁铁 12、13 与磁力触点 3、4(即干簧管)之间的距离符合工程要求。支架 9 经过调节固定后就不得再随意改动。在安装瓦斯继电器时,应先关闭位于油枕和瓦斯继电器之间的截油阀,拆下临时短节管,再将瓦斯继电器的外标箭头指向油枕一侧,垫好耐油胶垫,按正确方位安装就位,将螺丝拧紧,以确保不漏油。安装完毕后再打开截油阀和排气阀 7,排除瓦斯继电器中的残留空气,以免残留气体使瓦斯继电器误动作,所以直到有油溢出时再将排气阀关闭,最后检查瓦斯继电器动作的可靠性。轻瓦斯保护接点动作时的气体容积可在 250~300cm<sup>3</sup> 范围内调节,可通过适当改变平衡锤 5 的位置来实现。轻瓦斯保护的检查可用打气筒从排气阀 7 处打进空气,如果轻瓦斯保护接点闭合,通过电源使信号灯点亮,重瓦斯保护的检查可拆下瓦斯继电器罩,按动探针 8 来做模拟试验。

瓦斯继电器的灵敏度较高,误动作机率较大,甚至变压器有轻微放电现象时,也会使瓦斯继电器动作。所以为了防止或减少误动作,应缓慢给变压器注油,以防止有空气气泡积存在变压器油内。即新装变压器投入运行时和变压器注油后,应将重瓦斯继电器保护暂时退出工作,如图 8-22 所示,即将切换片 6 切换到 5 位置,经 48~72h 后,直至无散发气体时为止。同时为了保证瓦斯继电器正确动作和灵敏度的要求,对于重瓦斯保护,一般要求变压器的瓦斯继电器油速整定为 0.6~1m/s;对于强迫油循环的变压器,瓦斯继电器的油速整定为 1.1~1.4m/s,可采用专用油速试验装置来整定瓦斯继电器的动作油速。此外,在切换片 6 切换到 5 位置时,还需运行 2~3 天,以使油中的空气受热上升逸出后,再通过切换片 6 使重瓦斯保护投入工作。

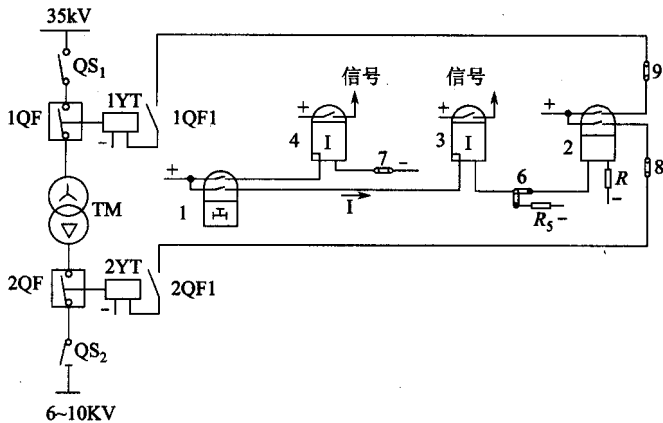


图 8-22 变压器瓦斯保护原理接线图

- 1—瓦斯继电器 2—出口中间继电器 DZB-130/110 型,串联电阻 20W、1kΩ 3—电流信号继电器 DX-11/0.05 型;  
4—电压信号继电器 DX-11/220 型 R<sub>5</sub> 电阻、2.5kΩ、20W 5—切换片 6、7、8、9—连接片

除此以外还应注意,在户外油浸式电力变压器上装设瓦斯继电器时,应在其端盖和电缆引线端子箱上采取防水防潮措施,以免雨水侵入瓦斯继电器而造成保护装置误动作。同时,在将切换片 6 切换到 5 点时,电阻 R<sub>5</sub> 的数值确定还应注意满足信号继电器 3 的灵敏度,使之在 1.4 以上。

例题 电力变压器瓦斯保护接线原理图如图 8-22 所示,如电流型信号继电器 3 选用 DX-11/0.05 型,试确定  $R_5$  的数值。

解 查电流信号继电器产品样本可知 DX-11/0.05 型的额定电流  $I_N = 0.05\text{A}$ ,长期允许通过电流  $0.15\text{A}$ ,动作电流  $I_{dz} \leq 95\% I_N$  线圈电阻  $70\Omega$ 。由信号继电器的灵敏度要求,其回路电流  $I$  应满足:

$$I \geq 1.4I_{dz} = 1.4 \times 95\% \times 0.05 = 0.067\text{A}$$

设直流电源电压为  $220\text{V}$ ,则电阻  $R_5$  为:

$$R_5 \geq \frac{220}{0.067} - 70 = 3213\Omega$$

如取电阻  $R_5 = 2500\Omega$ ,经校验  $I = \frac{220}{2500 + 70} = 0.086\text{A}$ ,即大于  $1.4I_{dz}$ ,且小于继电器长期允许通过电流  $0.15\text{A}$ ,故符合要求。

### 三、继电保护的動作电流(电压)计算

继电保护有变压器的继电保护、电动机的继电保护、同步发电机的继电保护、电网的接地继电保护、电网的相间短路继电保护、电网的距离继电保护和差动继电保护等多种,下面着重介绍电网相间短路时的继电保护动作电流的整定计算。

#### (一) 定时限过电流保护

如图 8-23 所示为电流互感器  $TA_U$ 、 $TA_W$  两相不完全星形接线的过电流保护原理图。当线路发生相间短路时,继电器 1KA 或 2KA 动作,其触点闭合,使时间继电器 KT 经整定动作时限后触点闭合,信号继电器 KS 动作,指示牌落下,并接通信号回路,同时出口中间继电器 KM 动作,其接点接通分闸脱扣线圈 YT 而使断路器跳闸。断路器分闸后,其辅助接点 Q1 随之断开跳闸的控制回路,从而实现了电网相间短路时的继电器定时限过电流保护。

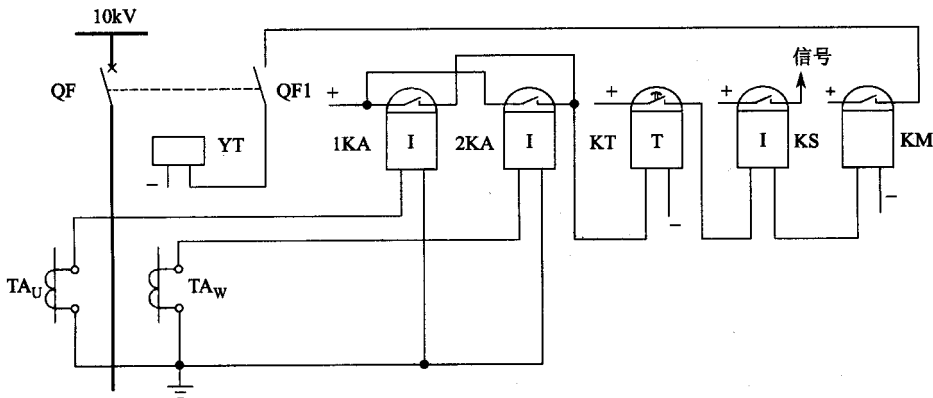


图 8-23 两相不完全星形接线的定时限过电流保护原理图

#### 1. 过电流保护的動作电流计算

过电流保护动作电流计算首先应具有可靠性,即只有电网发生故障时,才允许保护装置动作,其次是相邻两级线路保护的灵敏度应互相配合,以使上一级保护范围不致超过下一级的保护范围,即保证具有良好的选择性。

由于电流继电器的返回电流总是小于动作电流(即  $k_f < 1$ ),所以根据可靠性的要求,过电流保护的動作电流必须满足:在被保护线路正常运行时通过最大负荷电流  $I_{Hmax}$  的情况下,保护装置应不动作,即  $I_{dz} > I_{Hmax}$  ( $I_{dz}$  为保护装置动作时所对应的电流互感器一次电流值)。据此推得电流继电器的動作电流为:

$$I_{dz} = \frac{k_K k_{jx}}{k_f k_i} I_{Hmax} \quad (8.5.15)$$

式中  $k_K$ ——可靠系数 取  $k_K = 1.15 \sim 1.25$  ;

$k_{jx}$ ——接线系数 ( $k_{jx} = I_1/I_2$ ) ;

$k_f$ ——返回系数 , 一般取 0.85 左右 ;

$k_i$ ——电流互感器的变流比。

此外,在确定最大负荷电流时,还应考虑电网运行可能出现的各种严重情况。如装于双电源供电回路上的过电流保护装置,当其中一个回路发生故障时,全部负荷电流可能全部集中于另一个供电回路,此时负荷电流可达正常值的两倍,但是要求过电流保护不应动作。还有电动机自启动带来的影响等,如 8-24 所示。当  $d_1$  点短路使 3QF 跳闸后,在系统电压恢复的过程中,由于电动机自启动会造成线路 XL-1 的负荷电流大大增加,也要求过电流保护不应动作。为此引入自启动系数是  $k_{zg}$ ,则最大负荷电流  $I_{Hmax}'$ ,  $k_{zg}$  随负荷性质及电网情况而不同,一般取  $k_{zg} = 1.5 \sim 3$ 。从而电流继电器动作电流修正为:

$$I_{dz} = \frac{k_K k_{jx}}{k_f k_i} I'_{Hmax} \quad (8.5.16)$$

## 2. 过电流保护的灵敏度校验:

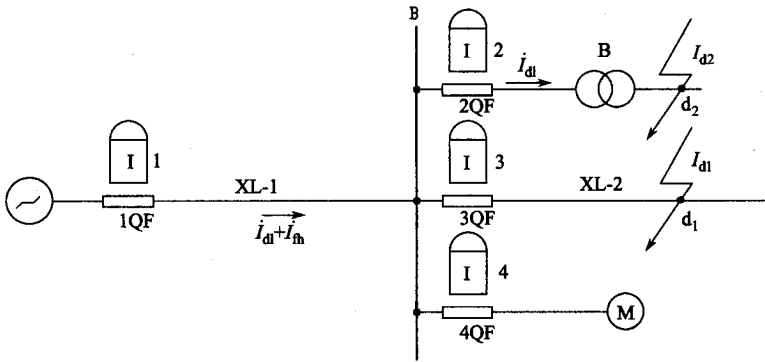


图 8-24 树干式供电系统的过电流保护

按上述方法确定了继电保护动作电流之后,还须进行灵敏度校验。即当被保护区域内发生短路时,校验保护的灵敏度是否符合要求。灵敏系数  $k_{lm}$  为被保护区末端短路时流入保护的最小短路电流(取最小运行方式下的两相短路电流)与保护的動作电流之比,即:

$$k_{lm} = I_{dmin} / (I_{dz} k_i) \quad (8.5.17)$$

式中  $I_{dmin}$ ——被保护区末端短路时,流过保护的最小短路电流(为电流互感器的一次值),A。

所谓最小运行方式,是指系统中投入运行的电源容量最小,而系统的等值阻抗最大(如变压器或发电机投入运行的台数最少,且投入运行的负荷线路最少),当发生故障时,短路电流最小的运行方式;最大运行方式,是指系统中投入运行的电源容量最大,而系统的等值阻抗最小,当发生故障时,短路电流最大的运行方式。

这样,在无限大容量的电力系统中发生三相短路时,其三相短路电流周期分量有效值  $I_{dl}^{(3)}$  可按下式计算:

$$I_{dl}^{(3)} = V_{pj} / \sqrt{3} Z_{\Sigma} \approx V_{pj} / \sqrt{3} X_{\Sigma} \quad (8.5.18)$$

式中  $V_{pj}$ ——短路计算点的平均额定电压,取同级额定电压  $V_N$  的 105% ;

$Z_{\Sigma}$ 、 $X_{\Sigma}$ ——分别为短路电路的每相总阻抗和总电抗,在高压电路, $Z_{\Sigma} \approx X_{\Sigma} \Omega$ 。

当无限大容量的电力系统发生两相短路时,其两相短路电流周期分量有效值可按下式计算:

$$I_{d1}^{(2)} = V_{pj} / 2Z_{\Sigma} \approx V_{pj} / 2X_{\Sigma} \quad (8.5.20)$$

由式(8.5.18)和式(8.5.19)可知:

$$I_{d1}^{(2)} = 0.866 I_{d1}^{(3)} \quad (8.5.20)$$

这就是说,在同一点发生相间短路时,两相短路电流是三相短路电流的 0.866 倍。

另外,按继电保护的作用分为主保护和后备保护。主保护是本段线路区域内电气设备的主要保护,其保护一般不得超出所保护的区域范围。后备保护是在主保护或断路器拒绝动作时,起后备的保护作用。后备保护又分为近后备保护和远后备保护。所谓近后备保护,是指在同一被保护线路中除了主保护之外,再装一套保护作为主保护的后备保护。如图 8-25 所示,当 d 点发生故障而主保护拒动时,其近后备保护动作而使断路器 2QF 跳闸。但是当 2QF 拒动时,这种近后备保护将失去作用,为此需要装设专用的断路器拒动的保护装置。例如远后备保护就是在主保护或断路器拒动时,由靠近电源侧的相邻线路保护来实现的保护。当线路 XL-2 中的 d 点发生短路时,其主保护 2 和断路器 2QF 均拒绝动作时,则由线路 XL-1 的主保护 1 动作并使断路器 1QF 跳闸,保护 1 就是线路 XL-2 的远后备保护。

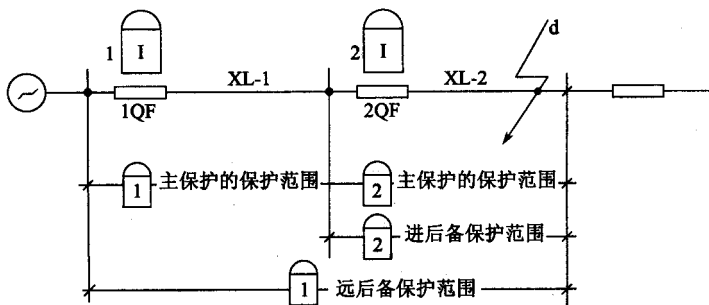


图 8-25 主保护和后备保护的保护区示意图

根据规程要求,将过电流保护装置作用主保护或近后备保护时,其灵敏系数  $k_{lm} > 1.5$ ;用作远后备保护时,则取下一级线路末端作为灵敏度校验点,灵敏系数  $k_{lm} > 1.2$ 。

### 3. 定时限过电流保护的时限

定时限过电流保护的时限,应根据选择性要求来确定,即各级定时限过电流保护装置的时限必须相互配合。如图 8-26 为单侧电源辐射式电网,设被保护线路 XL-1、XL-2、XL-3 的电源侧分别装设定时限过电流保护装置,其动作时限的整定应满足:  $t_2 = t_3 + \Delta t$ ,  $t_1 = t_2 + \Delta t$  即:

$$t_n = t_{n+1} + \Delta t \quad (8.5.21)$$

式中  $t_n$ ——距电源侧较近一级保护的时限;

$\Delta t$ ——时限级差,一般取 0.5s。

因此,辐射式电网定时限过电流保护的时限为阶梯型时限特性,即从负荷侧向电源侧逐级增加级差  $\Delta t$ 。这就是说,保护装设点离电源越近,动作时限越长。例如,当 XL-3 线路中 d 点短路时,虽然短路电流  $I_d$  也流经 XL-1、XL-2 线路,并且此短路电流大于保护 1、2、3 的动作电流,但由于保护 3 的动作时限  $t_3$  最小,所以保护 3 首先动作而将故障线路切除,使短路电流消失,故保护 1、2 将不动作,从而实现了选择性要求。

对于图 8-24 所示的树干式电网,其过电流保护时限的配合原则是:离电源侧较近的任一级保护的时限,应大于与其相邻的下一级保护动作时限为  $\Delta t$ 。如用  $t_1$ 、 $t_2$ 、 $t_3$ 、 $t_4$  分别表示保护 1、2、3、4 的动作时

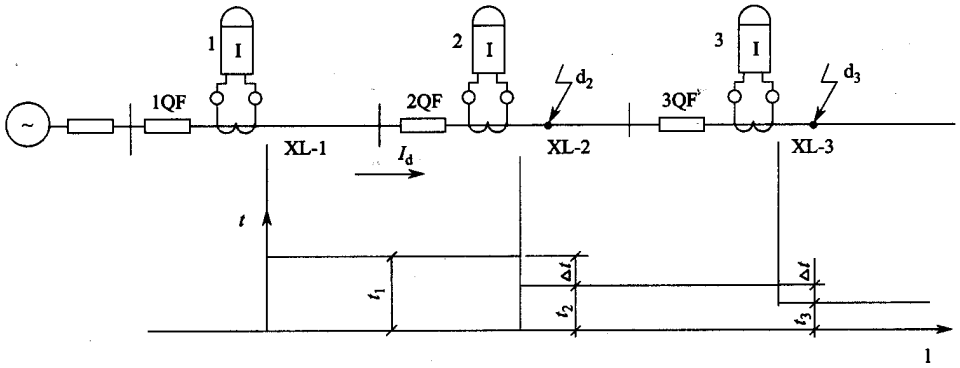


图 8-26 单侧电源辐射式电网限时过电流保护时限特性

限,则应满足:  $t_{12} = t_2 + \Delta t$ ,  $t_{13} = t_3 + \Delta t$ ,  $t_{14} = t_4 + \Delta t$ , 取其中最大值作为保护 1 的动作时限整定值。

由此可见,输配电线路过电流保护的動作时限不能脱离整个电网保护的实际情况和时限配合要求而个别独立整定。

## (二) 电流速断保护

定时限过电流保护简单、工作可靠,在辐射式电网中获得广泛应用。如上所述,由于定时限过电流保护的動作电流按最大负荷电流  $I_{Hmax}$  计算,为了保证具有选择性,保护的動作时限按阶梯原则整定,使保护装置的动作带有时限,即保护装设点离电源越近動作时限越长,这是过电流保护的一大缺点。为克服这一缺点,可采用电流速断保护。这种保护的选择性是靠增大動作电流的整定值来实现的,即本级保护的動作电流大于下一级线路首端短路时的最大短路电流。从而使电流保护的保護范围限制在被保护线路区域以内,对被保护线路区域以外发生故障不动作,故电流速断保护不用增加时限,各级也无须时限配合。其电流速断保护的動作电流为:

$$I_{sd} = \frac{k_K k_{js}}{k_1} I_{dmax} \quad (8.5.22)$$

式中  $k_K$ ——可靠系数,对电磁型电流继电器可取  $k_K = 1.2 \sim 1.3$ ;

$I_{dmax}$ ——本线路末端最大运行方式时的三相短路电流, A。

由式 8.5.22 可见,电流速断保护動作电流大于本线路末端的最大短路电流,所以这种保护不能对整个线路起保护作用,见图 8-27 图中  $I_{sd1}$ 、 $I_{sd2}$  分别为保护 1、2 的电速断保护動作电流。

## (三) 时限电流速断保护

要实现对线路全长进行保护的要求,就必须在满足选择性要求的前提下,并具有尽可能短的動作时限而增设时限电流速断保护环节。其保護范围不仅是本线路的全长,还可以延伸到下一级线路的一部分,通常要求保護范围延伸到下一级线路的部分不得超过该线路的电流速断保护范围。时限电流速断保护動作电流可按下式计算和整定:

$$I'_{sd1} = \frac{k_K k_{js}}{k_1} I_{sd2}^* \quad (8.5.23)$$

式中  $I'_{sd1}$ ——本级线路的时限电流速断保护動作电流, A;

$I_{sd2}^*$ ——相邻下一级线路电流速断保护動作电流的一次值, A;

$k_K$ ——可靠系数,取  $1.1 \sim 1.2$ 。

此外,本线路的时限电流速断保护動作时限  $t_1'$  与相邻的下一级线路的电流速断保护動作时限  $t_2$  的关系为:

$$t_1' = t_2 + \Delta t \quad (8.5.24)$$

相邻下一级线路的电流速断保护動作时限  $t_2 \approx 0$ , 故  $t_1' = \Delta t$ 。在调试整定動作时限  $t_1'$  时,一般取  $t_1' = 0.5s$ 。这样,当相邻的下一级线路始端发生故障且断路器拒动时,该线路的电流速断保护装置動作,从而使保护有

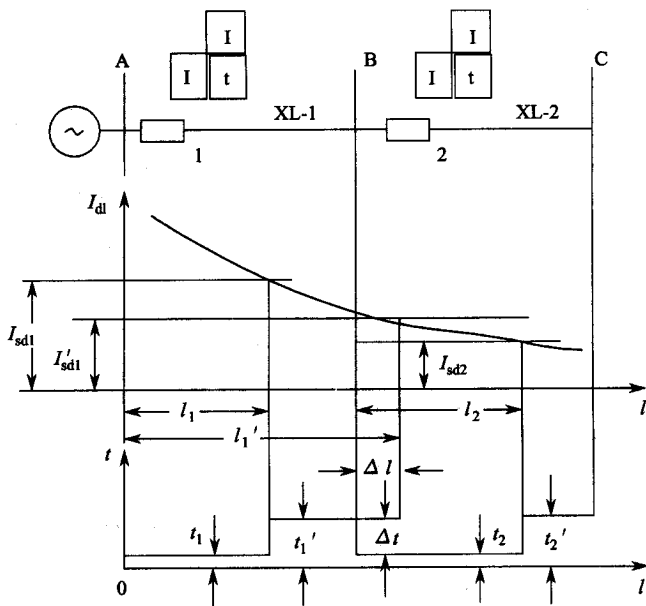


图 8-27 辐射式电网线路间时限电流速断保护与电流速断保护的配合

选择地将故障线路切除。

由图 8-27 线路短路的电流曲线  $i_{dl} = (I)$  及动作电流  $I'_{sd1}$ 、 $I_{sd2}$ 、 $I_{sd3}$  可分别求出线路 XL-1 的电流速断保护区  $l_1$ 、时限电流速断保护区  $l_1'$  和线路 XL-2 的电流速断保护区  $l_2$ ，以及相应的动作时限  $t_1$ 、 $t_1'$ 、 $t_2$ 。可见 XL-1 线路的时限电流速断保护区延伸到相邻下一级 XL-2 线路中，延伸长度为  $\Delta l$ ，这就是所谓的三段式电流保护。三段式电流保护由瞬时电流速断、时限电流速断和定时限过电流保护构成的保护装置，如图 8-28 所示。其中第 I 段和第 II 段分别为瞬时电流速断和定时限过电流保护，共同构成本级线路故障时的主保护，第 III 段为时限电流速断保护，可作为相邻下级线路断路器拒动时的远后备保护和本级线路主保护拒动时的近后备保护。所以，三段式电流保护装置具有作为主保护和远、近后备保护等全部功能，在实际中得到广泛应用。

为了使时限电流速断保护能够可靠地保护本级线路全长，应以本级线路末端作为灵敏度校验点，并以最小运行方式下的两相短路电流来校验保护的灵敏度。按规程规定，时限电流速断保护灵敏系数  $k_{lm}' \geq 1.25$  为合格，其灵敏系数  $k_{lm}'$  可按下式计算：

$$k_{lm}' = I_{dlmin} / (I_{sd}' k_i) \tag{8.5.25}$$

式中  $I_{dlmin}$ ——线路末端短路时的最小短路电流，A；

$I_{sd}'$ ——本级线路时限速断保护动作电流，A；

$k_i$ ——电流互感器变流比。

例题 10kV 单侧电源辐射式电网如图 8-29 所示，已知线路 XL-1 最大正常工作电流为 110A，电流互感器的变流比为 300/5。在最大、最小运行方式下， $d_1$  点三相短路电流分别为 1310A 和 1100A， $d_2$  点三相短路电流分别为 520A 和 490A。若线路 XL-2 定时限过电流保护的的动作时限整定为 2.5s，试确定在线路 XL-1 上装设三段式保护的的动作电流和动作时限，并校验其灵敏度，选择主要继电器的型号。

解：设本电网为小接地电流系统，且相邻元件均为一条线路，所以本电网三段式保护均采用两相不完全星形接线方式。

#### (四) 瞬时电流速断保护

如图 8-29 所示，当线路 XL-1 末端  $d_1$  点短路时，流过保护的最大短路电流为  $I_{dmax1} = 1310A$ ，采用两相

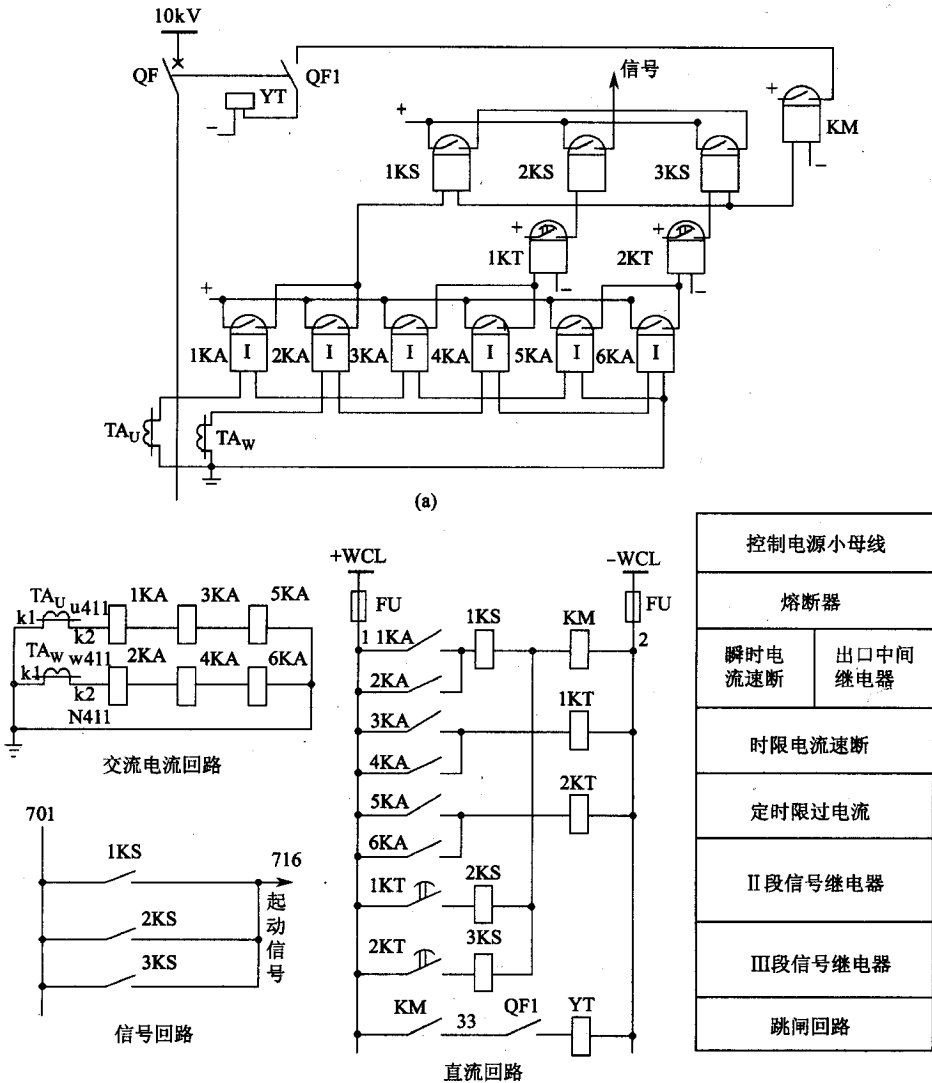


图 8-28 三段式电流保护原理图和展开图

(a)原理图 (b)展开图

不完全星形接线时, 接线系数  $k_{jx} = 1$  取可靠系数  $k_K = 1.3$ , 则由式(8.5.22)求得继电器的动作电流为:

$$I_{sd1} = \frac{k_K k_{jx}}{k_j} I_{dmax1} = \frac{1.3 \times 11 \times 1310}{300/5} = 28.4A$$

查继电器产品手册, 选用 DL-11/50 型电流继电器, 其动作电流整定范围为 12.5 ~ 50A, 可满足要求。

### (五) 时限电流速断保护

#### 1. 动作电流的整定计算

如前所述, 本级线路时限速断动作电流  $I'_{sd1}$  应与相邻下一级线路瞬时速断的动作电流相配合。而线路 XL-2 的瞬时速断动作电流应按式(8.5.22)及逐线路末端  $d_2$  点短路时的最大短路电流  $I_{dmax2} = 520A$  计算, 并折算到一次值  $I_{sd2}^*$ , 即可近似按下式整定:

$$I_{sd2}^* = k_K I_{dmax2} = 1.3 \times 520 = 676A$$

则由式 8.5.23 计算线路 XL-1 时限电流速断保护的动作为:

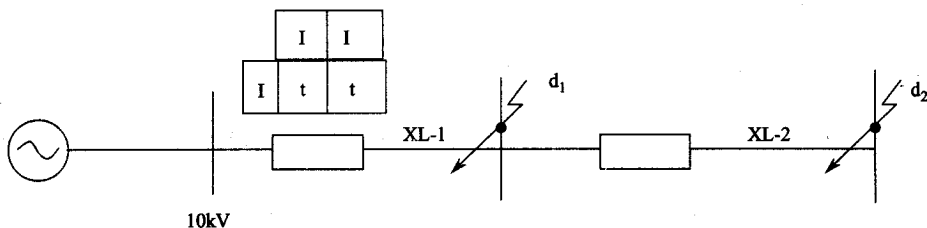


图 8-29 三段式电流保护线路

$$I'_{sd1} = \frac{k_{jx} k_k}{k_j} I_{sd2}^* = \frac{1 \times 1.1}{300/5} = 12.4 \text{ A}$$

查继电器有关手册,选用 DL-11/20 型电流继电器,其动作电流的整定范围为 5~20A,可满足要求。

### 2. 灵敏度校验

线路末端短路时的最小短路电流  $I_{d\text{min}}$  可取线路末端  $d_1$  点在最小运行方式下的两相短路电流,由式(8.5.20)和式(8.5.25)求得时限电流速断保护灵敏系数  $k_{lm}'$  为:

$$k_{lm}' = I_{d\text{min}} / (I_{sd}' k_i) = 0.866 \times 1100 / (12.4 \times 300/5) = 1.28 > 1.25$$

故满足规程规定的要求。

### 3. 动作时限的整定

线路 XL-1 的时限电流速断保护的動作时限应与线路 XL-2 的瞬时电流速断保护动作时限相配合,即按式(8.5.24)整定。所以取  $t_1' = 0.5\text{s}$ ,查继电器有关手册,选 DS-111 型时间继电器,其时限整定范围为 0.1~1.3s 可满足要求。

## (六) 定时限过电流保护

### 1. 动作电流的整定计算

定时限过电流保护的動作电流按式(8.5.16)整定。取可靠系数  $k_K = 1.2$ ,返回系数  $K_f = 0.85$ ,自起到系数  $k_{z1} = 2$ ,最大负荷电流  $I_{H\text{max}} = 110\text{A}$  则:

$$I_{dz} = \frac{k_K k_{jx} k_{z1}}{k_f I_i} I_{H\text{max}} = \frac{1.2 \times 1 \times 2}{0.85 \times 300/5} \times 110 = 5.2 \text{ A}$$

查继电器有关手册,选 DL-11/10 型电流继电器,其動作电流整定范围为 2.5~10A。

### 2. 灵敏度校验:

如前所述,定时限过电流保护在线路中作为近后备和远后备保护,故应分别在本级线路 XL-1 的末端  $d_1$  点和相邻下一级线路 XL-2 的末端  $d_2$  点短路时,在最小短路电流下校验其灵敏度。根据式(8.5.17), $d_1$  点短路时,定时限过电流保护(为近后备时)的灵敏度为:

$$k_{lm1} = I_{d\text{min}1} / (I_{dz} k_i) = \frac{0.866 \times 1100}{5.2 \times 300/5} = 3.1 > 1.5$$

$d_2$  点短路时,定时限过电流保护(为远后备时)的灵敏度为:

$$k_{lm2} = I_{d\text{min}2} / (I_{dz} k_i) = \frac{0.866 \times 490}{5.2 \times 300/5} = 1.4 > 1.2$$

所以,定时限过电流保护的灵敏度满足规程要求。

### 3. 动作时限的整定

定时限过电流保护的動作时限应按阶梯原则即按式(8.5.21)进行整定,使相邻上下级线路的定时限过电流保护时限相互配合。已知线路 XL-2 定时限过电流保护的时限  $t_2 = 2.5\text{s}$ ,则线路 XL-1 定时限过电流保护的動作时限为:

$$t_1 = t_2 + \Delta t = 2.5 + 0.5 = 3\text{s}$$

查继电器有关手册,可选择 DS-112 型时间继电器,其動作时限的整定范围为 0.25~3.5s。



## 四、继电保护的原理图、展开图和安装图

继电保护接线图是用来表示电器相互之间以及与其他二次回路元件之间电气连接的线路图,通常可分为电气原理图、展开图和安装图三种。

### (一)原理图

如图 8-28(a)所示的三段式电流保护装置原理图,其各继电器及元件均以整体的图形加以表示,互相连接的交流回路、直流回路都综合画在一起。为了便于阅读和表明动作原理,还画出了一次回路的有关部分(如断路器 QF、脱扣器线圈 YT 及其辅助触点  $QF_1$  以及被保护的线路或设备等)。其优点是能直观清晰地表示它们之间的电气连接及其动作原理,便于阅读,整体概念较强,但是在应用上具有一定局限性。例如在线路较复杂时,就难以绘制原理图了,另外线路彼此交叉也给识图带来较大困难,使安装调试和检修维护工作十分不便。另外,从原理图中还会发现只画出各继电器元件间的连接情况,至于元件的内部接线,引出端子及回路的标号,以及直流电源的情况等,均未能表示出来。这样也给安装调试检修维护和分折其工作原理带来不便,因此,除原理图外,又产生了与之相对应的展开图和安装图。

### (二)展开图

以电气原理图为基础,将继电器和元件用展开的形式来表示的接线图,称为展开图。如图 8-28(b)为三段式电流保护的展开图,其特点是分别绘制保护的交流电流回路(或交流电压回路)及直流回路,并且同一个继电器或元器件的不同部分(如线圈、触点等),可以分开画,即属于哪个回路就画到哪个回路之中。另外对于同一个继电器或元器件的线圈、触点等,都应标注相同的名称。在绘制或阅读展开图时,应遵守以下规则:

1. 回路的排列次序,一般是先绘制或阅读交流电流回路及交流电压回路,后绘制或阅读直流回路;
2. 每个回路内各行的排列顺序,对交流回路来说应按 U、V、W 相序排列,对直流回路则按其动作顺序由上而下依次排列;
3. 每一行中各元件(线圈、触点等)的连接顺序,应按实际情况和接线方便来绘制;
4. 控制回路应按要求标注数字标号,以方便查线、试调和维护。如表 8-3、表 8-4 分别列出发电、变电和输配电系统二次直流回路、交流回路的数字标号范围,以供绘制和调试二次回路时参考;

表 8-3 二次直流回路数字标号范围表

回路类别	保护回路	控制回路	励磁回路	信号及其它回路
标号范围	01 ~ 099	1 ~ 599	601 ~ 699	701 ~ 999

表 8-4 二次交流回路数字标号范围表

回路类别	控制、保护及信号回路	电流回路	电压回路
标号范围	1 ~ 399	400 ~ 599	600 ~ 799

5. 在阅读展开图时,一般应按先交流回路、后直流回路,由上而下、从左至右的顺序识图。

为了方便识图,常在展开图的右侧加上简要的文字说明表,以说明各行回路或元器件的性质或作用,如“瞬时电流速断”、“出口中间继电器”、“跳闸回路”、“定时限过电流”、“时限电流速断”等。由此可见,将展开图应用于复杂的保护线路绘制,极大地方便了设计制图、识图、试调和检修等工作,所以在工程设计和安装施工中广泛采用。

### (三)安装图

如图 8-30 所示为三段式电流保护安装图,可作为安装、接线,并配合展开图进行整定试验的依据。其

画法及编号原则如下：

### 1. 盘上器件的绘制

我们知道,在配电盘的盘面前布置继电器及其他元件,在盘面后进行配线,并使使之整齐美观。为了安装和接线方便,安装图是按盘后视图绘制的,即与盘面正视图相比,各器件间左右的相邻位置、同一器件的左右接线端子位置相反,并且器件外形及其相对位置应符合。

每一器件的内部接线,如电流表、电压表等可不画出,而继电器、电度表等,由于内部接线较复杂,线圈、触点等所在的回路也不同,故应画出。所有元器件的引出接线端及其编号,均根据实际情况按盘后视绘制。

### 2. 器件的标号

在图 8-30 中,各器件的上方的圆圈内均有标号,其内容主要包括：

1) 安装单位及器件排序编号 安装单位编号可用罗马数字 I、II、III 等表示。由于同一个继电保护盘上,可能装有不属于同一个一次设备的保护装置,例如 1# 主变压器保护、2# 主变压器保护等等。为了避免混乱,所以将每个一次设备所属的二次保护器件,均划作一个“安装单位”,并加以编号。同一安装单位的继电器和元器件,在盘上可自上而下排列在一个区域内。每个安装单位内的继电器、元器件等,可按从左到右、自上而下的顺序,用阿拉伯数字 1、2、3 等加以编号,称为器件(或设备)排序编号。这样可将器件排序与安装单位写在一起。如  $I_1$ 、 $I_2$ ……,并标注在圆圈内横线的上方。

2) 器件的文字符号 在圆圈内横线下方应标注器件的文字符号,以电流继电器的标注  $\frac{I_3}{1KA}$  为例,即表示展开图中的电流继电器 1KA 属于“安装单位 I”中的第 3 个器件。

### 3) 端子排及编号

盘上器件与盘外设备的连接,必须经过接线端子。可将多个接线端子组装成端子排,每个“安装单位”都有单独的端子排。在端子排上标有安装单位编号及名称,端子排内各端子则自上而下按顺序用阿拉伯数字加以编号。端子排一般布置在盘面后边的两侧。

在安装图中,端子排靠近盘内器件的一侧,要标明与各个端子相连接的盘内器件的标号及端子号。例如,图 8-30 中 1# 端子靠近盘内器件的一侧标有 1KA-2,即表示该端子应与盘内 1KA 继电器的 2# 端子相连接。而在安装图中的端子排另一侧,则需标明与端子相连的盘外设备的标号,以及连接导线的回路标号。例如,1# 端子的另一侧标有  $TA_{01}-k1$  及 U411,即表示该端子与盘外设备 U 相中的电流互感器二次侧的 k1 端子相连,连接导线的回路标号 U411。在标注时应注意与展开图相对应。

### 4) 盘内器件之间连接的表示法

对于盘内器件之间的电气连接线,在安装图中不需画出连接导线,只需采用在器件端子的一侧标注该端子的连接导线标号。端子标注采用“相对编号法”,即当甲、乙两端子用导线相连接时,在甲端子上标注乙端子的编号,而在乙端子上标注甲端子的编号,故称为“相对编号法”。例如在图 8-30 中,  $\frac{I_2}{3KA}$  的 8# 端子与  $\frac{I_1}{5KA}$  的 2# 端子相连接,则在 3KA 的 8# 端子旁标注  $I_1-2$ ,而在 5KA 的 2# 端子旁标注  $I_2-8$ ,从而为安装接线和检修调试工作提供了便利。

## 五、盘柜安装及试运行验收

盘柜是指高压开关柜和低压配电屏(盘),其安装主要包括开箱检查、盘柜安装、接线、母线连接,开关及结构调整等。如高压开关柜是由少油高压断路器(或高压真空断路器、六氟化硫断路器)、隔离开关、电流互感器、电压互感器、熔断器、母线以及各种检测仪表、保护装置和信号装置等组成的设备,主要用于高压电能分配、控制和保护电力变压器配电路等,有时也用作高压电动机的控制保护。高压开关柜分为固定式 GC-IA 型、XGN□-10 型、HXGN□-10 型和手车式 GFC-1C 型、KYN1-10 型等两大类,其中以 KYN1-10 型高压开关柜为例,其外型结构如图 8-31 所示,其型号含义如下：

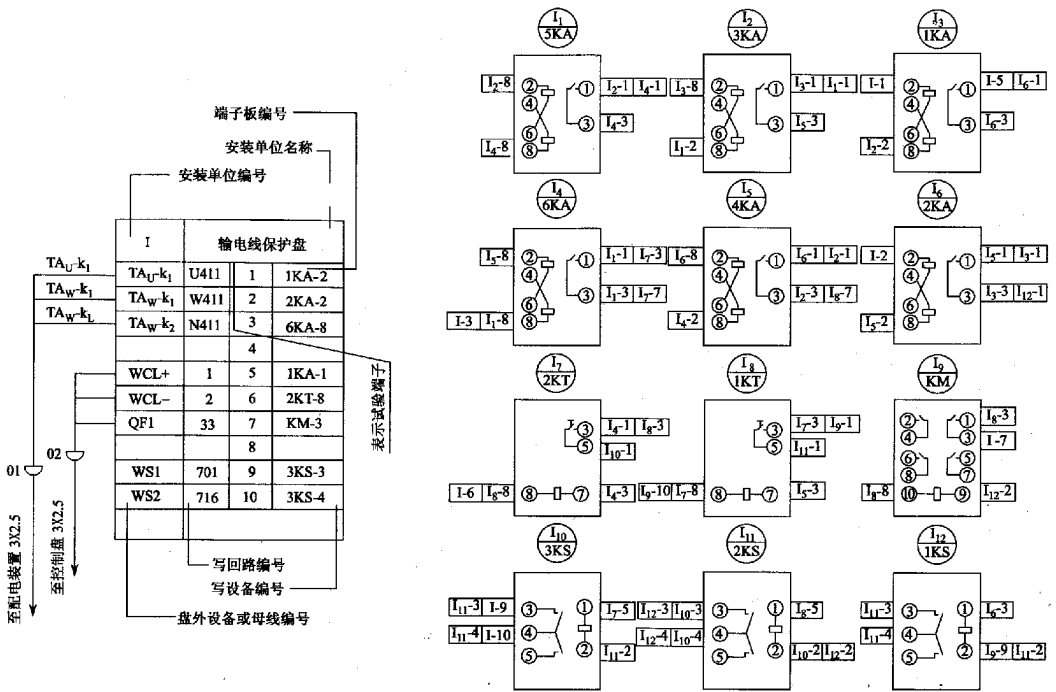
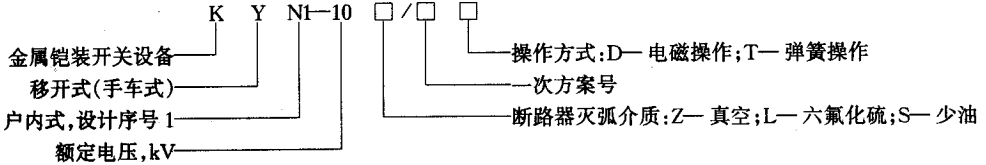


图 8-30 供配电系统三段式电流保护装置安装图



### (一) 基础型钢安装

高压开关柜或低压配屏的安装基础均须采用型钢并可可靠接地。基础型钢常采用[ 8~10 # 槽钢或 150 × 50 × 5 角钢。基础型钢的安装是高压开关柜或低压配电屏安装的基础工程,基础型钢可于浇注混凝土地坪时直接埋设,也可先在土建施工时埋设预埋件(如钢板、角钢或螺栓等),再将基础型钢按要求安装在预留位置上。目前,为了保证开关柜、配电屏(盘)的安装质量,多采用后一种安装方法,即在埋设预埋件时,预留出基础型钢的安装位置,待安装盘柜时再安装基础型钢。其安装方法步骤如下:

1. 先将基础型钢(槽钢或角钢)调直并除锈,按设计尺寸下料。
2. 将基础型钢安放在预留位置上,并用垫铁调整垫平。可采用水平尺或水平仪调整型钢的水平度,其水平误差每米不超过 1mm,全长不超过 5mm。并使盘柜前后、左右两条基础型钢相互平行,柜后的基础型钢应比柜前低 1~2mm,这样将对盘柜安装调整和达到整体美观的要求具有一定好处。基础型钢安装后,其顶部应高出抹平地面 5~10mm。
3. 将基础型钢调整完毕后,用电焊机将基础型钢与预埋件焊接牢固,以免在土建施工二次做面层时碰动型钢而使之移位。配合土建施工用细砂浆把型钢与基础地面之间的缝隙填充并捣实。
4. 基础型钢应与接地干线焊接,其焊点不得少于 2 处。基础型钢露出地面的部分应涂刷防腐漆。

### (二) 盘柜稳装

1. 盘柜安装位置应符合规定要求,如高压开关柜距墙一般为 1m 左右,但不小于 0.8m。单列布置时操作通道宽度为 2m,双列布置时操作通道宽度为 2.5m。低压配电屏距墙不小于 0.8m,为了便于检查巡视,一般要求低压配电屏距墙为 1m。单列布置时操作通道宽度为 1.8m,双列布置时操作通道宽度为 2.5m。高压开

关柜、低压配电屏如果靠墙安装,距墙也不得小于 25mm。对高压开关柜安装位置要求如图 8-32 所示。

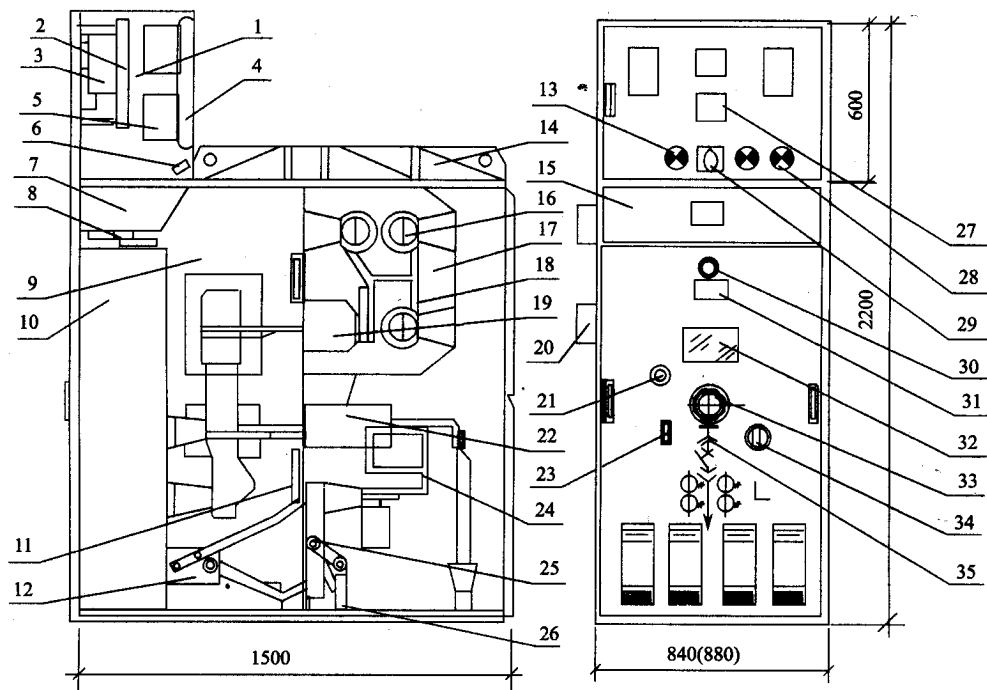


图 8-31 KYN1-10 型户内式高压开关柜结构图

- 1—仪表继电器室 2—内门 3—电度表 4—继电器安装板 5—继电器 6—端子排 7—二次端子室；  
8—二次触头及防护机构 9—手车室 10—断路器手车 11—金属活门 12—提门机构 13—仪表盘；  
14—泄压装置 15—端子室门 16—主母线 17—主母线室 18—支母线 19—触头盒 20—主母线套管；  
21—推进机构摇把孔 22—电流互感器 23—分合闸指示 24—互感器电缆室 25—接地开关；  
26—接地开关操作轴及联锁 27—带电显示装置 28—信号灯 29—SA 控制开关 30—手车照明灯开关；  
31—铭牌 32—观察窗 33—手车位置指示旋钮 34—紧急分闸手柄 35—主结线图；

2. 立柜时可在距柜顶、柜底各 200mm 处拉两根相互平行且在同一面上的尼龙线作为基准线。将盘柜按设计规定顺序参照基准线依次稳装就位,其四角可用钢垫片调平找正。一般以第一台盘柜为标准,将其它各台依次调整,使盘面一致,排列整齐,盘柜间缝隙 2~3mm。垂直误差不大于 1.5mm/m,成列盘顶部水平误差不大于 5mm。经全面检查符合要求后,用 M12 螺栓将开关柜固定在基础槽钢上,然后用 M10×30 螺栓进行柜间连接。应注意在安装盘柜时,不宜将主控制盘、继电器保护盘和自动控制盘等盘柜与基础型钢焊接固定。

3. 安装主母线。打开母线室、顶盖板和后封板后,即可进行安装主母线。连接母线时,接触面应平整无污物,有污物时应除净,涂中性凡士林,安装后再紧固顶板和后封板。

4. 安装一次电缆,电缆头固定在支架上,电缆与母线接触面应平整,接触面涂中性凡士林后即可连接,并紧固,电缆敷设施工完成后,应用隔板将电缆室与电缆沟分隔。

5. 连接柜间接地母线,使沿开关柜排列方向连成一体,检查工作接地和保护接地是否有遗漏,接地回路是否连接导通,接地回路导线电阻应不大于  $100\mu\Omega$ 。

6. 安装二次回路电缆,电缆由柜左侧穿入沿侧壁进入继电器室,分接到相应的端子排上,二次电缆施工后封盖电缆孔。

7. 先用布擦净开关柜及元器件上的灰尘及油污,然后检查调整柜门、网门及门锁,使其开闭灵活,门开关检查灯应能随门的开闭而亮暗。

手车式高压开关柜必须检查以下内容:①接地触头或接地簧片在手车推入时必须与车体接触良好;②安全挡板能随手车的进出而灵活升降,不得卡涩;③手车推入时,主回路动触头应能准确插入触头座;④电气或

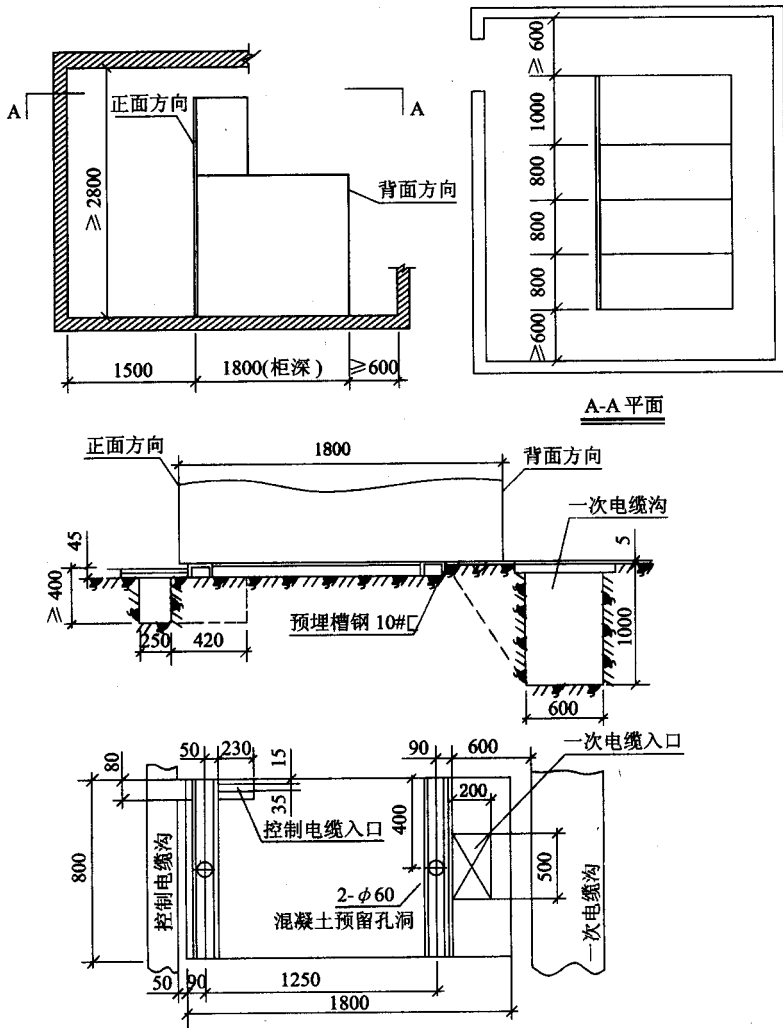


图 8-32 高压开关柜安装位置要求示意图

机械闭锁装置调整正确,在合闸位置时,手车不能拉出;⑤检查二次回路插头辅助触头等,应接点正确,接触可靠。

8. 应对二次回路进行严格检查,首先进行设备查线,对照安装图和展开图核对设备、仪表、开关、继电器、接触器、指示灯、熔断器等元件的型号规格是否与图纸相符,记录操作电源电压值;对照安装图和展开图,用试铃器或万用表根据线码管标号逐根检查二次回路接线是否与图纸相符。用 500V 兆欧表在端子板处测量二次回路绝缘电阻,不得小于  $1\text{M}\Omega$ ;小母线绝缘电阻不得小于  $10\text{M}\Omega$ 。二次回路如有晶体管集成电路,只能用万用表测试。另外,还需进行二次回路绝缘强度试验,在导体与箱壳之间施以 2000V 交流电压,持续时间 1min,应无击穿放电现象。经查线无误后就可在不连接主回路电源的情况下,接通控制操作电源,进行二次回路动作的模拟试验,均必须符合图纸设计要求。

### (三) 试运行验收

试运行是重要而又比较危险的工作,一定要按有关规定和程序进行。

1. 闭合室外跌落式熔断器时,必须穿绝缘靴,带绝缘手套,用一定长度的绝缘杆操作。先合边相、后合中相,然后用高压验电器检查进线开关上端是否有电。

2. 先将进线柜上、下隔离开关闭合(手车式开关柜则将手车推入柜内工作位置),再将进线高压断路器置

于合闸状态,这时高压电送至母线上。

3.将电压互感器相的隔离开关闭合(手车式开关柜则将手车推入柜内工作位置)检查三相电压表指示是否正常,电压互感器有无异常现象。将避雷器柜内隔离开关闭合(手车式开关柜则将手车推入内工作位置)检查避雷器有无异常现象。

4.将出线柜(如变压器馈电柜)的隔离开关闭合后,再合上高压断路器,将高压电送至电力变压器,检查变压器有无异常现象,其空载电流大小是否在规定范围之内。

5.按次序闭合低压进线柜隔离开关及空气开关,检查低压进线柜上的电压表,各线电压、相电压指示应正常。如系统中有两台以上变压器并联运行,必须在低压母联开关处检查各段母线的相序及电压是否符合变压器并联运行连接要求,测量各段同名相母线之间的电压应接近于零值,异名相的母线之间的电压应接近于额定线电压。确认无误后才可合上低压母线联络柜的开关,使变压器并联运行。

6.在向低压负载送电前,还须再检查一次负载设备线路的绝缘情况。然后依次闭合各动力配电屏和照明配电屏的隔离开关和自动空气开关,检查各用电回路电压和电流是否正常。

7.工程竣工交接应提交如下技术资料:①主要设备的产品说明书、生产许可证、产品合格证以及出厂试验数据;②安装检查记录;③隐蔽工程验收单和有关设计变更报告、记录等;④变压器吊芯检查和试验项目报告;⑤断路器、隔离开关、负荷开关检查调整记录和其它主要电气设备的试验报告;⑥试运行报告等等。

## 第六节 接触器的安装与维护

### 一、真空接触器运行与维修

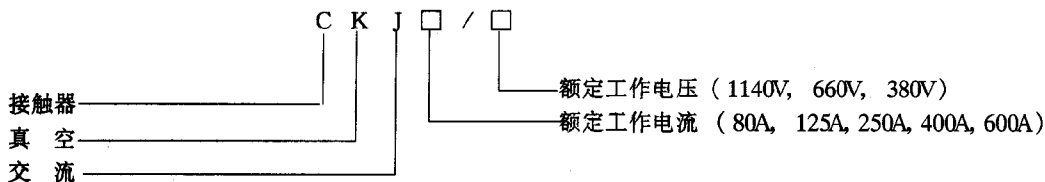
#### (一)特点及用途

在各种强电流电路中广泛使用的是断路器,与断路器相比,真空接触器具有一系列的特点:

- 1.分断能力强 分断电流达额定电流的10~20倍。
- 2.寿命长 电寿命达数十万次,机械寿命达数百万次。
- 3.安全可靠 开断电弧在真空管内,不和外界空气接触。
- 4.维修简便 触点不需维修,噪声小,耐恶劣环境,可频繁操作。

低压真空接触器用于交流50Hz,主回路额定工作电压为1140V、660V、380V的电力系统中,供远距离频繁地接通与分断电路,控制三相异步电动机或其他用电设备,特别适用于重负载,频繁操作的场合。广泛应用于石油化工、煤炭、供电、机械、交通、起重运输等行业。

型号说明:



#### (二)结构及原理

##### 1.结构

真空接触器主要由真空开关管、闭合线包、辅助开关、反力弹簧、拐臂、基座等组成。真空接触器的组成与一般空气式接触器相似,不同的是真空接触器的触点密封在真空灭弧室中。

真空开关管是真空接触器的关键部件,它基本上决定了真空接触器的主要性能。真空开关管是一个管状部件,在密封外壳内装有触点、屏蔽罩和动静触点的导电杆等,如图 8-33 所示。管内真空度为  $1.33 \times 10^{-4} \text{Pa}$  左右,真空的绝缘强度很高,触点在真空条件下开合时,产生的真空电弧具有电压低、能量小、熄弧时间短等特点,因此,触点在真空开关管内开合,熄弧能力强、触点行程小、安全可靠、触点磨损小、寿命长,从而造就了真空接触器的一系列优点。

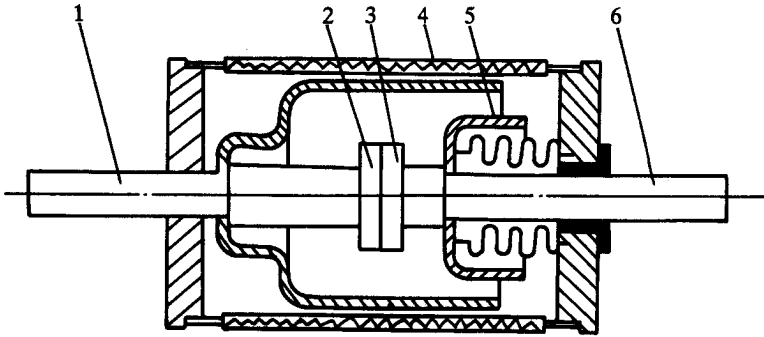


图 8-33 真空开关管结构原理图

1—静导电杆 2—静触点 3—动触点 4、5—屏蔽罩 6—动导电杆

## 2. 工作原理

由控制电路控制电磁铁(闭合线圈)与动衔铁板的吸合与释放,通过与动衔铁板连接的传动机构带动三相真空开关管的闭合或断开,从而实现对被控制电路的通断控制。

## (三) 运行与维修

### 1. 安装

- (1) 安装前先检查接触器,有无机械损坏处,有无油污处。
- (2) 根据安装尺寸进行安装,并注意安装面的平整与水平面的垂直度,螺栓联接处加防松垫圈。
- (3) 主回路线接入接触器主回路接线端,控制回路接入控制电源,如有接地时应使接地良好。
- (4) 装好后空载动作若干次,动作应轻便,各运动部件无阻滞和松动。

### 2. 更换与调整

#### (1) 更换开关管

- 1) 拆卸开关管,卸下管子端软导线,卸下动端调节螺钉触点弹簧,松下与卸下静端导电板,取出开关管。
- 2) 装上新开关管,顺序与上述相反。
- 3) 注意事项:开关管壳体和动导电杆间切不可相对转动,否则薄壁波纹管将受扭力而损坏,因此,在动导电杆上装卸软导线、导电板、调节螺钉时,应固定动导电杆使其不转动。

- 4) 检查:用 4200V 工频耐压试验,检查开关管有无因更换而损坏。

#### (2) 调整开关管

- 1) 接通控制电源,闭合开关管,用游标尺量出固定座与动导电块之间距离  $L$ 。
- 2) 断开控制电源,断开开关管,调节螺杆,使固定座与动导电板之间距离为  $L + \text{开距}$ 。
- 3) 固定调节螺杆的螺母。
- 4) 再接通控制电源,闭合开关管,用手拨动调节螺杆上部垫圈,看是否松动,用厚 1mm 试板试是否超程。
- 5) 三相同步调整,使三相开关管达到同步。
- 6) 断开接触器,若声音清脆,各运动部件无阻滞和松动,调整完毕。
- 7) 注意事项:调整时其他部件(如动衔铁、静衔铁、辅助开关)都不得松动调整,否则会影响整机性能。

### 3. 运行与维修

- (1) 真空接触器应储存在室内,其环境条件为干燥、无严重尘埃、无腐蚀性气体、环境温度不高于  $40^\circ\text{C}$ 。
- (2) 运输过程中应避免剧烈振动,不许倒置及受潮。

(3) 开箱时应检查外观是否有损坏,开关管有无破裂,绝缘体是否受潮,若绝缘体受潮,应擦干并置于40℃烘箱内烤48h后才能使用。

(4) 通电前首先检查电源电压是否符合铭牌电压,并检查各部件是否接触良好,接地螺钉有无松动。

(5) 安装后先进行空载试验,无误后再接通负载运行。

(6) 真空接触器很少需要维修,为了确保安全起见,可进行定期检查。

(7) 开关管的开距和超程每半年检查一次,若经调整开距后,如调节螺杆上部垫圈不能活动,触点已磨损,需更换开关管。

(8) 动作性能每年检查一次,用试验电源使接触器动作,观察合闸速度,再用75%额定电源电压试验,观察接触器动作和合闸速度,若接触器动作缓慢,合闸速度不快,可调节断开弹簧力。

(9) 辅助开关触点每季检查一次,观察触点是否清洁,触点开距是否可用,应清除脏物,调整开距。

(10) 紧固部分每年检查一次,用扳手拧紧所有螺钉紧固部分。

(11) 开关管真空度一年检查一次,开关管在接触器上用4200V工频电压试验,开关管单独用10kV工频电压试验,对不合格的应更换开关管。

#### 4. 常见故障与处理

真空接触器常见故障与处理方法见表8-5。

表8-5 真空接触器常见故障与处理方法

序号	故障现象	故障原因	处理方法
1	不动作	1. 电源电压过低 2. 电源电压不符  3. 线路接线不对 4. 线未接好,螺钉松动 5. 控制触点接触不良 6. 熔断器熔断 7. 线圈烧坏 8. 二极管击穿 9. 开关管损坏	1. 测量并提高电源电压 2. 测量工作电压,是否符合铭牌电压,可改正电源电压 3. 核对并改正接线 4. 检查接线,紧固螺钉 5. 检查接触电阻,清洁触点 6. 更换熔断器 7. 更换线圈 8. 检查并更换二极管 9. 检查开关管是否有负压,更换开关管
2	跳闸	1. 电源电压过低 2. 电源电压不符 3. 线路接法不对 4. 线圈损坏	1. 提高电源电压 2. 改正电源电压 3. 改正接线 4. 更换线圈
3	线圈过热	1. 电源电压不符 2. 线未接好,螺钉松动	1. 改正电源电压 2. 接好并紧固螺钉
4	线圈烧坏	1. 电源电压不符 2. 辅助开关触点损坏或不动作	1. 改正电源电压 2. 检查并更换辅助开关
5	开关管表面漏气	开关管表面附有杂物或水	测量开关管绝缘电阻,清洁开关管外壳
6	二极管击穿	电源电压不符	改正电源电压
7	动作速击	辅助开关触点损坏或不动作	检查并更换辅助开关
8	通电部分过热	线未接好,紧固螺钉松动	接好线并拧紧螺钉



## 二、直流接触器安装与维修

### (一) 概述

直流接触器主要用于远距离接通和分断直流电路和频繁地使直流电动机起动、停止、反转和反接制动。

直流接触器由操作电磁系统、触点灭弧系统、辅助触点及底板等部分组成。当接通操作线圈的操作电源时,其磁系统就产生电磁吸力,带动可动部分,使接触器触点闭合;当操作线圈断电时,电磁吸力消失,在触点压力和断开弹簧的带动下,使触点断开。

直流接触器分为:一般直流接触器、牵引直流接触器和高电感直流接触器。常用的直流接触器有CZ0、CZ10、CZ16、CZ18、CZ19、CZ22等系列。

选择直流接触器时,首先对其使用场合和控制对象的工作参数进行全面了解,包括控制功率、工作电压、电流、操作频率、工作制、控制电路参数及环境条件等。然后,再从各种系列中确定适合其用途的直流接触器型号及规格。

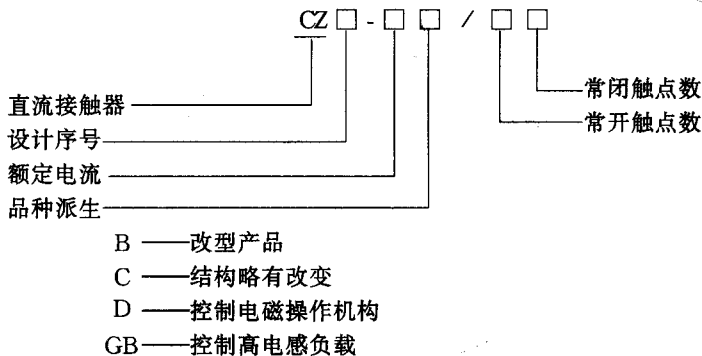
型号说明:

### (二) 安装和维修

直流接触器的正确安装和定期维修,可延长使用寿命和确保安全可靠的运行。

#### 1. 安装前

- (1) 检查所选用的接触器是否能满足电路实际使用的要求。
- (2) 检查外观是否完整无损,灭弧室和胶木件有无破裂。



- (3) 铁心极表面有无防锈油或出现锈渍。
- (4) 用手开闭接触器, 观察可动部分是否灵活, 有无卡碰现象。
- (5) 检查和调整触点工作参数(如开距、超程、初压力、终压力等), 触点动作的同步性和接触良好性。

#### 2. 安装时

(1) 根据使用说明书正确地安装和接线, 在规定的飞弧距离内严禁有任何物体。对有接线极性要求的直流接触器必须严格按照规定的极性连接。大额定电流接触器的直流操作线圈与电源的连接线如太长, 应选用加大截面积的导线, 以免连接导线压降太大而影响可靠的闭合。对于直流接触器磁系统是带电的, 应特别注意必须安装在绝缘底座上。

- (2) 安装要牢固, 防止有小零件掉进接触器内。
- (3) 对有灭弧室的接触器, 可先将灭弧室拆下, 待安装固定好后, 再将灭弧室装上。

#### 3. 安装后

- (1) 用手开闭接触器, 检查可动部分的灵活性。
- (2) 测量绝缘电阻应不小于  $15M\Omega$ 。

- (3) 检查接线正确无误后,应在主触点不带电的情况下试操作数次,其动作符合要求后,才能投入运行。
- (4) 对控制电动机正反转直流接触器,应检查电气联锁和机械联锁的可靠性。
- (5) 接触器初投入运行前,观察其分断电弧时的声光情况是否正常。

#### 4. 使用后

(1) 外观检查 清除灰尘,检查外观是否完整无损,拧紧紧固件。

(2) 灭弧室维修 检查灭弧室有无破裂或严重烧损,灭弧室内的栅片有无变形或脱落,若不能修复应予以更换,若不须更换,可用毛刷进行清理或铲除灭弧室内的金属溅物和颗粒。重新安装灭弧室时,应将它安装在原来一极上,不能随意改变更换到另一极上,以免影响灭弧能力。

(3) 触点维修 触点上烧毛现象是正常的,不会影响工作能力,通常不必清理。若触点接触处有金属颗粒或毛刺,可用细锉锉掉,银焊触点若有开焊、裂缝或磨损到原来厚度的1/3时,应予更换。

(4) 铁心维修 检查铁心极面有无变形、松开现象、擦拭极面上的污垢,交流操作铁心的短路环有无断裂,直流操作铁心非磁性垫片有无磨损或脱落,检查缓冲件是否完整、位置是否正确。

(5) 操作线圈维修 检查线圈外表层有无过热变色,接线有无松动,线圈骨架有无碎裂现象,检查线圈的固定是否牢固,缓冲性是否完整。

### (三) 常见故障与处理

直流接触器常见故障与处理方法见表8-6。

表8-6 直流接触器常见故障与处理方法

序号	故障现象	故障原因	处理方法
1	吸不上或吸不到底	1. 电源电压过低 2. 控制回路电源容量不足或发生断路或控制触点接触不良 3. 线圈参数与使用条件不符 4. 可动部分卡住,线圈断线或烧坏 5. 触点压力与超程过大 6. 直流操作双绕组线圈并联在保持绕组或经济电阻上的常闭辅助触点断开过早	1. 调高电源电压 2. 增加电源容量,修复线路或控制触点 3. 调换线圈 4. 排除卡住现象或更换线圈 5. 重新调整触点参数 6. 修复或更换常闭辅助触点
2	吸上立即又断开	直流操作双绕组线圈的保持绕组断线或接线头松动	更换线圈或紧固接线头
3	不释放或释放缓慢	1. 触点压力太小 2. 触点熔焊 3. 可动部分卡住 4. 反力弹簧力太小或损坏 5. 交流操作的铁心中肢气隙消失,使剩磁增大 6. 铁心极面有污垢粘着 7. 直流操作电磁铁非磁性垫片脱落或磨损	1. 调整触点压力 2. 修复或更换触点 3. 排除卡住现象 4. 调整或更换反力弹簧 5. 更换铁心 6. 清理铁心极面 7. 装好或更换非磁性垫片

序号	故障现象	故障原因	处理方法
4	线圈过热或烧坏	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 控制电源电压过高或过低</li> <li>2. 线圈技术参数与实际使用条件不符</li> <li>3. 线圈质量不好或绝缘损坏</li> <li>4. 使用环境中空气潮湿,含有腐蚀性气体或温度过高</li> <li>5. 交流操作或双绕组或带经济电阻的磁系统的可动部分卡住</li> <li>6. 交流操作电磁铁铁心极面不平或铁心气隙过大</li> <li>7. 直流操作电磁铁的双绕组线圈由于常闭辅助触点不释放</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 调整电源电压</li> <li>2. 更换线圈</li> <li>3. 更换线圈</li> <li>4. 采用特殊设计线圈</li> <li>5. 排除卡住故障</li> <li>6. 清理铁心极面或更换铁心</li> <li>7. 修复常闭辅助触点</li> </ol>
5	交流操作电磁铁的噪声大	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 铁心极面生锈或有污垢</li> <li>2. 短路环断裂</li> <li>3. 铁心极面磨损过度而不平</li> <li>4. 触点压力过大</li> <li>5. 铁心歪斜或被卡住</li> <li>6. 电源电压过低</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 清理铁心极面</li> <li>2. 更换短路环或铁心</li> <li>3. 更换铁心</li> <li>4. 调整触点压力</li> <li>5. 调整铁心</li> <li>6. 提高电源电压</li> </ol>
6	触点过度磨损或熔焊	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 操作频率过高或过载</li> <li>2. 负载侧短路</li> <li>3. 触点压力过小</li> <li>4. 触点表面有突起的金属颗粒或异物</li> <li>5. 控制电源电压过低</li> <li>6. 可动部分卡住,吸合过程有停滞或合不到位</li> <li>7. 两极触点动作不同步</li> <li>8. 永久磁铁退磁,磁吹力不足</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 调换合适的接触器</li> <li>2. 找出短路故障并排除</li> <li>3. 调整触点压力</li> <li>4. 清理触点表面</li> <li>5. 调高电源电压</li> <li>6. 排除卡住故障</li> <li>7. 调整触点使其同步</li> <li>8. 更换永久磁铁</li> </ol>
7	触点过热或灼伤	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 触点压力过小</li> <li>2. 触点上污垢,表面不平或有突起金属颗粒</li> <li>3. 环境温度过高或装在封闭或控制箱中使用</li> <li>4. 操作频率过高,工作电流过大,触点的通断能力不足</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 调整触点压力</li> <li>2. 清理或修整触点表面</li> <li>3. 更换容量大的接触器</li> <li>4. 更换容量大的接触器</li> </ol>

序号	故障现象	故障原因	处理方法
8	相间短路	1.可逆转换接触器的机械和电气联锁失灵,使两台正反转接触器同时闭合或由于接触器燃弧时间太长,转换时间短,发生电弧短路 2.尘埃堆积、潮湿、过热使绝缘损坏 3.绝缘件或灭弧室损坏 4.永久磁铁磁吹接触器的进出线极性接反,电弧反吹	1.检查联锁,在控制线路中增加中间环节或调换动作时间长的接触器 2.保持清洁 3.更换损坏部分 4.纠正进出线的极性

### 三、交流接触器运行与维修

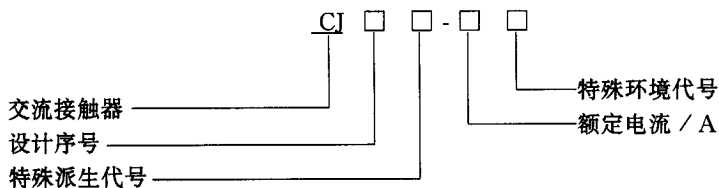
#### (一)概述

接触器主要用于频繁接通或分断交、直电路。具有控制容量大、可远距离操作、能实现联锁控制,并有失压及欠压保护,广泛应用于自动控制电路,其主要控对象是电动机,也可用于控制其他电力负载,如电热器、照明、电焊机、电容器组等。

接触器按控制电流的种类可分为交流接触器和直流接触器,这里主要介绍交流接触器。

常开的交流接触器有:CJ10、CJ20等。

型号说明:



#### (二)工作原理和结构

##### 1.工作原理

当电磁线圈不通电时,弹簧的反作用力或动铁心的自重使主触点保持断开位置。当电磁线圈接通额定电压时,电磁吸力克服弹簧的反作用力将动铁心吸向静铁心,带动主触点闭合,辅助触点也随之动作。

##### 2.结构

交流接触器主要由电磁系统、触点系统、灭弧装置和其他部分组成。

(1)电磁系统 电磁系统是接触器的重要组成部分,包括电磁线圈和铁心。接触器依靠它来带动触点的闭合与断开。

(2)触点系统 触点是接触器的执行部分,包括主触点和辅助触点。主触点的作用是接通和切断主回路,控制较大的电流,一般为数安到数百安,甚至高达数千安。而辅助触点是接在控制回路中,其额定电流一般为5~10A,以满足各种控制方式的要求。为了保证接触器可靠工作,触点必须满足以下要求:

- 1)连续工作时不应超过规定的允许温升。
- 2)闭合时接触良好,断开后触点间应有足够的绝缘间隙。
- 3)具有一定的接通和分断能力,在规定的条件下接通电流时不应发生熔焊。
- 4)有足够的机械强度及动、热稳定性。
- 5)耐弧耐磨,使用寿命长。

6)制造和维修方便。

(3)灭弧系统 在接触器中灭弧装置主要是用来保证触点断开电路时产生的电弧可靠的熄灭,减少电弧对触点的破坏作用,使电器能可靠工作。当接触器在接通或切断负荷电流时,主触点会产生较大的电弧容易损坏触点,为了迅速熄灭断开时的电弧,通常容量较大的接触器都装有灭弧装置。对10A以下,利用相间隔板隔弧,20A以上,采用半封闭式纵缝陶土灭弧罩,并配有强磁、吹弧回路。

(4)其他部分 有绝缘外壳、各种弹簧、短路环、传动机构等。

### (三)接触器的选用

选择接触器时应根据不同的使用条件,正确地选择产品类型和容量等级,才能保证接触器在控制系统中长期可靠运行。主触点的额定电流应大于或等于电动机的额定电流,在频繁操作时,或用于频繁正反转及反接制动时,决定接触器容量时必须考虑电动机的起动电流,通电持续率。为了防止主触点的烧蚀和过早损坏,应将触点的额定电流降低使用,通常可降低一个电流等级或选大一档的。

吸引线圈允许在额定电压的85%~105%范围内正常使用,其电压等级有36V、110V、127V、220V、380V等,可根据控制回路的电压等级来选择。

接触器用在不同的工作电压时,一般按控制功率相等的原则计算接触器的工作电流。在较低的工作电压下的工作电流不应超过同一接触器的额定发热电流,最高工作电压不能超过接触器的额定绝缘电压,在较高的工作电压下,接触器的控制功率可能有所增加或降低,主要取决于其触点系统性能的好坏。可根据不同工作电压的控制功率进行选择。

### (四)安装使用

#### 1. 安装前

(1)应检查名牌及线圈上的技术数据(如额定电压、电流、操作频率和通电持续率等)是否符合实际使用要求。

(2)用手分合接触器的活动部分,要求动作灵活无卡住现象。

(3)将铁心极面上的防锈油擦净,以免油垢粘滞而造成接触器在断电时不能释放。

(4)检查和调整触点的工作参数(如开距、超程、初压力和终压力等),并使各极触点的动作同步。

#### 2. 安装

(1)安装接线时不要使螺钉、垫圈、接线头等零件失落,以免掉进接触器内部而造成卡住或短路现象。安装时应将螺钉拧紧,以防振动松脱。

(2)检查接线正确无误后,应在主触点不带电的情况下,先使吸引线圈通电合分数次,检查动作是否可靠,然后才能进行使用。

(3)用于可逆转换的接触器,为了保证联锁可靠,除利用辅助触点进行电气联锁外,有时还加装联锁机构。

#### 3. 使用

(1)在使用中应定期检查各部件,要求紧固件无松脱,可动部分无卡住。零部件若有损坏,应及时修复或更换。

(2)触点表面应经常保持清洁,不允许涂油,若触点表面由于电弧作用而形成金属小珠时,应及时铲除。若触点严重磨损后,超程应及时调整,当厚度只剩下1/3时,应及时调换触点。当银及银合金触点表面在分断电弧中生成的黑色氧化膜接触电阻很低,不会造成接触不良现象,所以,不必锉修,否则会使触点寿命大大缩短。

(3)原来带有灭弧罩的接触器决不能不带灭弧罩使用,以防发生短路事故。对于陶土灭弧罩性脆易碎,应避免碰撞,若有裂碎,应及时更换。

### (五)运行与维修

#### 1. 运行中检查

(1)通过的负荷电流是否在接触器的额定值之内。

(2)接触器的分、合信号指示是否与电路状态相符。

- (3) 灭弧室内有无因接触不良而发出放电响声。
- (4) 电磁线圈有无过热现象,电磁铁上的短路环有无脱出和损伤现象。
- (5) 接触器与导线的连接处有无过热现象。
- (6) 辅助触点有无烧蚀现象。
- (7) 灭弧罩有无松动和损裂现象。
- (8) 绝缘杆有无损裂现象。
- (9) 铁心吸合是否良好,有无较大的噪声,断开后是否能返回到正常位置。
- (10) 周围的环境有无变化,有无不利于接触器正常运行的因素,如振动过大、通风不良、导电尘埃等。

## 2. 检查与维护

定期做好维护工作,是保证接触器可靠地运行,延长使用寿命的有效措施。

### (1) 定期检查外观

1) 消除灰尘,先用棉布沾有少量汽油擦洗油污,再用布擦干。

2) 定期检查接触器各紧固件是否松动,特别是紧固压接导线的螺钉,以防止松动脱落造成连接处发热。

如发现过热点后,可用整形锉轻轻锉去导电零件相互接触面的氧化膜,再重新固定好。

3) 检查接地螺钉是否紧固牢靠。

### (2) 灭弧触点系统检查

1) 检查动、静触点是否对准,三相是否同时闭合,应调节触点弹簧使三相一致。

2) 测量相间绝缘电阻,其阻值不低于  $10M\Omega$ 。

3) 触头磨损深度不得超过  $1mm$ ,严重烧损、开焊脱落时必须更换触点,对银或银基合金触点有轻微烧损或接触面发黑或烧毛,一般不影响正常使用,可不进行清理,否则会促使接触器损坏,如影响接触时,可用整形锉磨平打光,除去触点表面的氧化膜,不能使用砂纸。

4) 更换新触点后应调整分开距离、超额行程和触点压力,使其保持在规定范围之内。

5) 辅助触点动作是否灵活,触点有无松动或脱落,触点开距及行程应符合规定值,当发现接触不良又不易修复时,应更换触点。

### (3) 铁心检查

1) 定期用干燥的压缩空气吹净接触器堆积的灰尘,灰尘过多会使运动系统卡住,机械磨损加大。当带电部件间堆聚过多的导电尘埃时,还会造成相间击穿短路。

2) 应清除灰尘及油污,定期用棉纱蘸有少量汽油或用刷子将铁心极面间油污擦干净,以免引起铁心发响及线圈断电时接触器不释放。

3) 检查各缓冲件位置是否正确齐全。

4) 铁心端面有无松散现象,可检查铆钉有无断裂。

5) 短路环有无脱落或断裂,若有断裂会引起很大噪声,应更换短路环或铁心。

6) 电磁铁吸力是否正常,有无错位现象。

### (4) 电磁线圈检查

1) 定期检查接触器控制回路电源电压,并调整到一定范围之内,当电压过高线圈会发热,关合时冲击大。当电压过低关合速度慢,容易使运动部件卡住,触头焊接一起。

2) 电磁线圈在电源电压为线圈电压的  $85\% \sim 105\%$  时应可靠动作,如电源电压低于线圈额定电压的  $40\%$  时应可靠释放。

3) 线圈有无过热或表面老化、变色现象,如表面温度高于  $65^{\circ}\text{C}$ ,即表明线圈过热,可引起匝间短路。如不易修复时,应更换线圈。

4) 引线有无断开或开焊现象。

5) 线圈骨架有无磨损、裂纹,是否牢固地装在铁心上,若发现必须及时处理或更换。

6) 运行前应用兆欧表测量绝缘电阻,是否在允许范围之内。

### (5) 灭弧罩检查

1) 灭弧罩有无裂损,当严重时应更换。

2 对栅片灭弧罩 检查是否完整或烧损变形 严重松脱位置变化 如不易修复应及时更换。

3 清除罩内脱落杂物及金属颗粒。

#### (6) 维护使用中注意事项

1 在更换接触器时 应保证主触头的额定电流大于或等于负载电流 使用中不要用并联触头的方式来增加电流容量。

2 对于操作频繁 启动次数多(如点动控制) 经常反接制动或经常可逆运转的电动机 应更换重任务型接触器 如 CJ10Z 系列交流接触器 或更换比通用接触器大一档至二档的接触器。

3 当接触器安装在容积一定的封闭外壳中 更换后的接触器在其控制回路额定电压下磁系统的损耗及主回路工作电流下导电部分的损耗 不能比原来接触器大很多 以免温升超过规定。

4 更换后的接触器与周围金属体间沿喷弧方向的距离 不得小于规定的喷弧距离。

5 更换后的接触器在用于可逆转换电路时动作时间应大于接触器断开时的电弧燃烧时间 以免可逆转换电路时发生短路。

6 更换后的接触器 其额定电流及关合与分断能力均不能低于原来接触器 而线圈电压应与原控制电路电压相符。

7 电气设备大修后 在重新安装电气系统时 应采用线圈电压符合标准电压 如机床电气标准电压为 110V。

8 接触器的实际操作频率不应超过规定的数值 以免引起触头严重发热 甚至熔焊。

9 更换元件时应考虑安装尺寸的大小 以便留出维修空间 有利于日常维护时的安全。

#### 3. 故障分析与处理

(1) 通电后接触器不能吸合或吸合后断不开 当接触器不能吸合时 首先检查电磁线圈两端有无电压。如无电压 说明故障发生在控制回路 可根据具体电路检查处理 如有电压但低于线圈额定电压 使电磁线圈通电后产生的电磁力不足以克服弹簧的反作用力 这时应更换线圈或改接电路 如有额定电压 多数情况是线圈本身可能开路 应用万用表测量线圈电阻 如接线螺丝松脱应紧固 线圈断线应更换线圈。

接触器运动部分的机械机构及动触头卡住使接触器不能吸合 可对机械机构进行修整 调整灭弧罩与触头的位置 消除摩擦 当转轴生锈、歪斜也会造成接触器通电后不吸合 应拆开检查 清洗转轴及支撑杆 组装时要保证转轴转动灵活或更换配件。

接触器吸合一下又断开 一般是因自锁回路中的辅助触头接触不良 使电路自锁环节失去作用 检修动合辅助触头 保证接触良好。

(2) 接触器吸合不正常 接触器吸合不正常是接触器吸合过于缓慢 触点不能完全闭合 铁心吸合不紧而产生异常噪声等不正常现象。

控制电路的电源电压低于 85% 额定值 电磁线圈通电后所产生的电磁吸力不足 难以使动铁心迅速吸向静铁心 引起接触器吸合缓慢或吸合不紧 应检查控制电路电源电压 设法调整至额定工作电压。

弹簧压力不适当 引起接触器吸合不正常 当弹簧的反作用力太大造成吸合缓慢 触点弹簧压力超程过大 会使铁心不能完全闭合 而触头的弹簧压力与释放压力太大会使触点不能完全闭合 应对于弹簧的压力进行相应的调整或更换弹簧。

动、静铁心间的间隙太大 可动部分卡住、转轴生锈、歪斜都会引起接触器吸合不正常 应拆开检查 重新装配 调整间隙或清洗转轴及支撑杆 组装后保证转轴转动灵活 必要时更换配件。

铁心板面因长期频繁碰撞 沿叠片厚度方向向外扩张又不平整而产生异常响声 应用锉刀修整 必要时更换铁心 如果短路环断裂 应更换尺寸一样的短路环。

(3) 接触器主触点过热或熔焊 接触器主触点过热或熔焊一般是因触点接触不良 通过电流过大造成的。

接触器吸合过于缓慢或有停滞现象 触点停顿在似接触非接触的位置上 或者触点表面严重氧化及灼伤 使接触电阻增大都会使主触点过热 应清除主触点表面氧化层 可用细锉刀轻轻锉平 保证接触良好。

接触器用于频繁起动设备中 主触点频繁地受到起动电流冲击 会造成过热或熔焊 应合理操作避免频繁起动 或选用适合于操作频繁及通电持续率长的接触器。主触点长时间通过过负荷电流也会造成过热或

熔焊,应减轻负荷,使设备在额定状态下运行,或根据设备的工作电流,重新选择合适的接触器。

负荷侧有短路点,吸合时短路电流通过主触点,会造成主触点熔焊,应检查短路点并排除故障。接触器三相主触点闭合时不同步,某两相主触点受特大起动电流冲击,也会造成主触点熔焊。应检查主触点闭合状态,调整动静触点间隙达到同步接触。

(4)接触器线圈断电后铁心不能释放 接触器经长期运行,较多的撞击使铁心板面变形;“U”字型铁心中间磁极面上的间隙逐渐消失,使线圈断电后铁心产生较大的剩磁,将使动铁心粘附在静铁心上,造成接触器断电后不能释放,应用锉刀锉平或在平面磨床上磨光铁心接触面,保证其间隙不大于 $0.15 \sim 0.2\text{mm}$ 。

铁心极面上油污和尘屑太多,会造成接触器线圈断电后铁心不能释放,应清除油污。或动触点弹簧压力太小,可调整弹簧压力,必要时更换弹簧。

接触器触点熔焊也将会造成断电后铁心不能释放。

安装不符合要求或更换新接触器时铁心表面防锈油没有清除,安装时应使倾斜度不超过 $5^\circ$ ,如铁心表面有防锈油,应擦净油即可。

#### 4. 常见故障与处理

接触器常见故障与处理方法见表8-7。

表8-7 接触器常见故障与处理

序号	故障现象	故障原因	处理方法
1	不吸合	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 线圈供电线路断路</li> <li>2. 线圈导线断路或烧坏</li> <li>3. 控制按钮的触点失效,控制回路触点接触不良,不能接通电路</li> <li>4. 机械可动部分卡住,转轴生锈或歪斜</li> <li>5. 控制回路接线错误</li> <li>6. 电源电压过低</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 更换导线</li> <li>2. 更换线圈</li> <li>3. 检查控制回路,消除故障</li> <li>4. 排除卡住故障,修理受损零件</li> <li>5. 检查、改正线路</li> <li>6. 调整电源电压</li> </ol>
2	吸力不足(即不能完全闭合)	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 电源电压过低或波动较大</li> <li>2. 控制回路电源容量不足,电压低于线圈额定电压</li> <li>3. 触点弹簧压力过大或触点超额行程太大</li> <li>4. 控制回路触点不清洁或严重氧化使触点接触不良</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 调整电源电压</li> <li>2. 增加电源容量,提高电压</li> <li>3. 调整弹簧压力及行程</li> <li>4. 定期清扫,修理控制触点</li> </ol>
3	吸合太猛	控制电路电源电压大于线圈电压	调整控制电路电源电压
4	不释放或释放缓慢	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 可动部分被卡住,转轴生锈或歪斜</li> <li>2. 触点弹簧压力太小</li> <li>3. 触点熔焊</li> <li>4. 反力弹簧损坏</li> <li>5. 铁心极面有油污或尘埃粘着</li> <li>6. 自锁触点与按钮间的接线不正确使线圈不断电</li> <li>7. 铁心使用已久,去磁气隙消失,剩磁增大,使铁心不释放</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 排除卡住故障,检修受损零件</li> <li>2. 调整触点弹簧</li> <li>3. 排除熔焊现象,修理或更换触点</li> <li>4. 更换弹簧</li> <li>5. 清理铁心极面</li> <li>6. 检查改正接线</li> <li>7. 更换铁心</li> </ol>



序号	故障现象	故障原因	处理方法
5	电磁铁噪声大或振动	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 线圈电压过低</li> <li>2. 动、静铁心的接触面相互接触不良</li> <li>3. 短路环断裂或脱落</li> <li>4. 触点弹簧压力过大</li> <li>5. 极面生锈或异物(油污、尘埃)侵入铁心极面</li> <li>6. 铁心极面磨损严重且不平</li> <li>7. 铁心卡住或歪斜,使铁心不能吸平</li> <li>8. 铁心安装不好,造成铁心松动</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 提高控制回路电压</li> <li>2. 修理接触面,保证接触良好</li> <li>3. 处理或更换短路环</li> <li>4. 调整弹簧压力</li> <li>5. 清理铁心极面</li> <li>6. 更换铁心</li> <li>7. 解决铁心卡住故障</li> <li>8. 紧固铁心</li> </ol>
6	无压释放失灵	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 反力弹簧的反力过小</li> <li>2. 主触点磨损严重使反力太小</li> <li>3. 非磁性垫片装错或未装</li> <li>4. 铁心极面油污或因剩磁作用,使铁心粘附在静铁心上</li> <li>5. 铁心磨损严重,使中间极面防止剩磁的气隙太小</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 更换弹簧</li> <li>2. 更换主触点</li> <li>3. 更换或加装</li> <li>4. 清除油污或更换铁心</li> <li>5. 可将中间极面锉平,锉去 0.05 ~ 0.2mm</li> </ol>
7	线圈过热或烧损	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 电源电压过高或过低</li> <li>2. 操作次数过于频繁</li> <li>3. 铁心极面不平或气隙太大</li> <li>4. 运动部分卡住</li> <li>5. 线圈绝缘损伤或制造质量不好</li> <li>6. 使用环境条件特殊(空气潮湿,含有腐蚀性气体或环境温度太高)</li> <li>7. 线圈匝间短路,使线圈工作电流增大,造成局部发热</li> <li>8. 线圈技术参数与实际、使用条件不符(电压、频率、通电持续率、适用工作制等)</li> <li>9. 交流接触器派生直流操作的双线圈,其常闭联锁触点熔焊不释放</li> <li>10. 铁心端面不清洁有杂物或铁心表面变形,使衔铁运动时受阻,造成动、静触点不能紧密闭合,线圈电流增大</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 调整电源电压</li> <li>2. 选择合适的接触器</li> <li>3. 处理极面或更换铁心</li> <li>4. 解决卡住问题</li> <li>5. 排除损伤现象或更换线圈</li> <li>6. 采用特殊设计的线圈</li> <li>7. 排除短路故障或更换线圈</li> <li>8. 调换线圈或接触器</li> <li>9. 调整联锁触点参数或更换线圈</li> <li>10. 清除铁心表面或修复</li> </ol>

序号	故障现象	故障原因	处理方法
8	触点熔焊	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 控制回路电压过低,使吸力不足,形成触点的停滞不前或反复振动</li> <li>2. 触点闭合过程中,可动部分被卡住</li> <li>3. 闭合时触点及动铁心都发生跳动</li> <li>4. 操作频繁或过负荷使用</li> <li>5. 触点弹簧压力过小</li> <li>6. 触点表面有金属颗粒突起或异物</li> <li>7. 负载侧短路</li> <li>8. 起动过程中有很大的尖峰电流,使触点闭合时吸力不足</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 提高线圈两端电压,其值不低于85%的额定值</li> <li>2. 消除卡住故障</li> <li>3. 调整触点初压力及超额行程,用锉刀修理熔化痕迹,严重时更换触点或更换大一级的接触器</li> <li>4. 调换合适的接触器</li> <li>5. 调整弹簧压力</li> <li>6. 清理触点表面</li> <li>7. 排除短路故障或更换触点</li> <li>8. 当接触器吸力有较大裕度时,可增大初压力,当吸力显然不足时,更换大一级的接触器</li> </ol>
9	触点过热或灼伤	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 操作频率过高,或工作电流过大,触点容量太小,使触点超载运行,触点的断开容量不足</li> <li>2. 触点的超额行程太小</li> <li>3. 触点弹簧压力太小</li> <li>4. 触点上油污,表面氧化或表面高低不平,有金属颗粒突起</li> <li>5. 铜触点用于长期工作制</li> <li>6. 环境温度过高或用在密闭的控制箱中</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 更换大一级的接触器</li> <li>2. 调整触点超程或更换触点</li> <li>3. 调节触点弹簧压力或更换弹簧</li> <li>4. 清理触点表面</li> <li>5. 选择合适的触点</li> <li>6. 选大一级接触器</li> </ol>
10	触点磨损严重	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 三相触点动作不同步</li> <li>2. 负载侧短路</li> <li>3. 接触器选用不合适,在以下场合时,容量不足(反接制动、有较多密接操作、操作过于频繁)</li> <li>4. 灭弧装置损坏,使触点分断时产生电弧不能被分割成小段迅速熄灭</li> <li>5. 触点的初压力太小</li> <li>6. 触点分断时电弧温度太高使触点金属氧化</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 调整到同步</li> <li>2. 消除短路故障,更换触点</li> <li>3. 重选合适的接触器</li> <li>4. 更换灭弧装置</li> <li>5. 调整初压力</li> <li>6. 检查灭弧装置或更换</li> </ol>

序号	故障现象	故障原因	处理方法
11	相间短路	1. 可逆转换的接触器互锁触点不可靠, 出现误动作, 使两只接触器同时投入运行, 造成相间短路 2. 接触器的动作太快, 转换时间短, 在转换过程中产生电弧短路 3. 尘埃堆积, 粘有水气、油垢等使线圈绝缘降低 4. 灭弧室碎裂, 零部件损坏 5. 装于金属外壳内的接触器, 外壳处于分断时的喷弧距离内, 可引起相间短路	1. 检查电气联锁和机械联锁在控制线路中的中间环节 2. 调换动作时间长的接触器, 延长可转换时间 3. 定期清理, 保持清洁卫生 4. 更换零部件 5. 选用合适的接触器或在外壳内进行绝缘处理
12	灭弧装置	1. 受潮 2. 破碎 3. 灭弧栅片脱落 4. 灭弧线圈匝间短路	1. 及时烘干 2. 更换灭弧装置 3. 重新装好 4. 及时修复或更换

## 第九章 高压电器安装与维修技术

### 第一节 高压断路器安装与维护

室内高压断路器是开关电器中结构最为复杂的一类。在正常运行时,可用它来将用电负荷或某线路接入或退出电网,起倒换运行方式的作用;当设备或线路上发生故障时,可通过继电保护装置联动断路器迅速切除故障用电设备或线路,保证无故障部分仍正常运行。由此可见,高压断路器在电力系统中担负着控制和保护电气设备或线路的双重作用。

高压断路器具有分断能力强、性能稳定、工作可靠和运行维护方便的特点,其核心部件是灭弧装置和触头。按使用不同的灭弧介质而生产了各类高压断路器,目前我国电力系统中应用的断路器有如下几种:(1)高压空气断路器是以压缩空气为灭弧介质和弧隙绝缘介质,并兼作操作机构的动力,操作机构与断路器合为一体。目前我国生产的 KW4、KW5 系列高压空气断路器的空气压力在  $2 \times 10^6 \text{ MP}_a$  以上,多用于 10kV 及以上的电力系统中。(2)六氟化硫(SF<sub>6</sub>)高压断路器则采用 SF<sub>6</sub> 气体作为灭弧介质,与其它高压元件组成全封闭式高压断路器,因此不受环境条件影响,运行安全可靠,在电力系统中,尤其是在 110kV 及以上电力系统中得到越来越广泛的采用。(3)真空高压断路器是利用真空作为绝缘介质,其绝缘强度最高,而且绝缘强度恢复快。其真空灭弧室是高强度的真空玻璃泡构成,真空度可达到  $10^{-7} \sim 10^{-9} \text{ mm}$  汞柱,多用于 10kV 及以上的电力系统中。(4)油高压断路器是利用变压器油作为灭弧和弧隙绝缘介质。按其绝缘结构及变压器油所起的作用不同,分为多油式和少油式两种高压断路器。多油高压断路器的变压器油除了作为灭弧介质外,还作为弧隙绝缘及带电部分与接地外壳(油箱)之间的绝缘。少油高压断路器的变压器油只作为灭弧介质和弧隙绝缘介质,其油箱带电,油箱对地绝缘则通过瓷介质(支持瓷套)来实现。少油高压断路器的灭弧能力较强,工作安全可靠,维护方便,而且体积小,用油量少、重量轻,价格便宜,所以在电力系统中获得最为广泛的采用。在 20kV 及以下电压等级的供配电系统中广泛采用 SN10 系列(户内式)断路器,在 20kV 以上则大量使用 SW4、SW6(户外式)断路器。本节将主要介绍 SN10 系列少油高压断路器及其一般安装调试方法。

#### 一、SN10 系列少油高压断路器的结构

SN10-10 型少油高压断路器外型如图 9-1 所示,其三相彼此独立,每相断路器都有一个油箱 1,并由支持瓷套 3 固定在框架 2 上,油箱的上、下出线座与外线路连接。在框架 2 上设有主轴 4、拐臂 5、分闸弹簧 6,操作机构可通过拐臂 5、绝缘拉杆 9 和拐臂 5 的驱动主轴 4 转动,从而实现分合闸动作。弹簧缓冲器 8 和限位缓冲器 7 分别为合闸、分闸时缓冲,以免由于受强烈冲击震动而损坏零件。

少油高压断路器的其中一相内部结构见图 9-2,油箱通过支持瓷套固定在支座上,支座上装有主轴  $A_1$  和拐臂 16,通过绝缘拉杆 17 使油箱内主轴  $A_2$  和主拐臂 13 作顺时针或逆时针转动。当主轴  $A_2$  和主拐臂 13 顺时针转动时,将通过连臂 14 使动触杆 9 向上移动实现合闸,同时分闸弹簧 18 被拉伸而存储弹性势能,为断路器分闸做准备。当主轴  $A_2$  和主拐臂 13 在分闸弹簧 18 作用下逆时针转动时,将使动触杆向下移动实现分闸。为了防止在分闸时动触杆 9 冲击油箱底部,故装有油缓冲器 15。为了防止主拐臂 13 在分合闸过程中撞

击油箱壁,在主拐臂 13 上也装有缓冲橡皮垫 12。

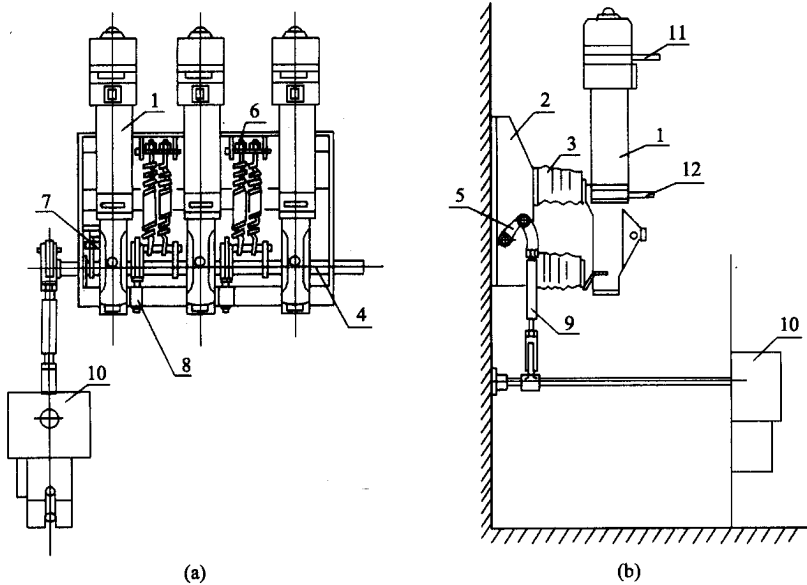


图 9-1 SN10-10 型少油高压断路器

(a) 正视图 (b) 侧视图 1—油箱 2—框架 3—支持绝缘子(瓷套) 4—主轴 5—拐臂;  
6—分闸弹簧 7—限位缓冲器 8—弹簧缓冲器;  
9—绝缘拉杆 10—操作机构 11—上接线座 12—下接线座

动触杆 9 与导向筒 8 之间装有两个滚动触头 11, 由滚动触头 11 与下出线座 10 电气连接。静触头则由静触头座 3、单向止回阀 20、静触片 5 等组成, 安装于灭弧室 6 上部, 并与上出线座 2 电气连接。灭弧室 6 位于上、下出线座之间, 其外部为绝缘筒 7。当断路器的动触杆 9 向下移动且分断较大电流时, 动、静触头之间产生电弧的高温将使变压器油迅速气化, 产生较大压力, 使单向止回阀 20 向上升起而关闭通向顶罩的小圆孔。这样电弧只能在密闭的电弧室内燃烧, 而形成更大的气体压力。当动触杆继续向下移动时, 将分别打开灭弧室内的各个横向、纵向吹弧道, 高压油气混合物冲出, 可在 0.018s 内吹熄电弧。当灭弧室内气体压力下降到一定程度时, 单向止回阀 20 落下而打开通向顶罩的小圆孔, 使剩余气体排入油气分离器, 并将废气从排气孔排出。当断路器分断较小电流时, 由于电弧较小, 灭弧室内气体压力较小, 所以动触杆向下移动时, 气体的纵吹、横吹效果较差, 主要由纵向弧道内形成的附加油流灭弧, 熄弧时间较长, 约为 0.02s 以上。由此可见, 这种自能式灭弧方式的少油高压断路器, 分断电流越大, 熄弧能力越强, 灭弧时间越短; 分断电流电弧越小, 熄弧能力越弱, 灭弧时间也越长。

## 二、少油高压断路器的安装调试

### (一) 少油高压断路器安装及要求

高压断路器通常是通过支持瓷套固定在框架上。在安装之前应对断路器进行外观检查, 重点检查其密封情况, 有无机械损伤和漏油等现象。安装时应注意以下几点:

1. 断路器应垂直安装, 以减少动触杆在分、合闸过程中的摩擦力。并应固定牢靠, 底座或支架与基础的垫片不超过 3 片, 总厚度 10mm 以内, 且各垫片间焊接牢固。
2. 三相联动的断路器相间支持瓷套法兰面宜在同一水平面上, 各相油箱间中心距应符合产品规定要求, 一般为  $250 \pm 1\text{mm}$ , 其误差不应大于 5mm。

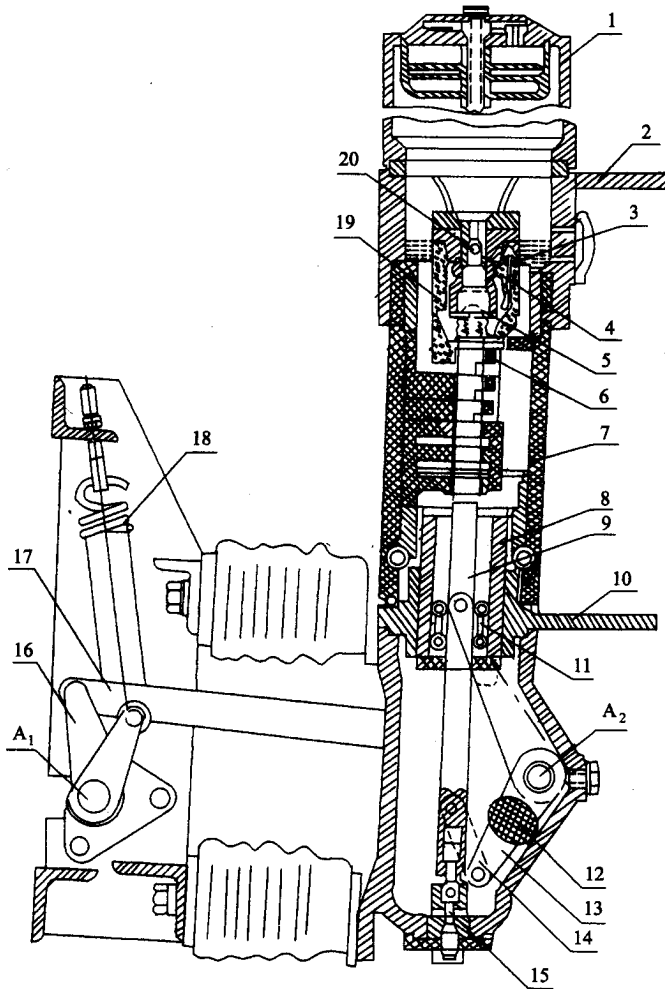


图 9-2 SN10 型少油高压断路器结构

- 1—帽及油气分离器 2—上出线座 3—静触头座 4—压紧弹簧；  
 5—静触片 6—灭弧室 7—绝缘筒 8—导向筒；  
 9—动触杆 10—下出线座 11—滚动触头 12—缓冲橡皮垫；  
 13—主拐臂 14—连臂 15—油缓冲器 16—拐臂；  
 17—绝缘拉杆 18—分闸弹簧 19—绝缘罩筒；  
 20—单向回止阀；A<sub>1</sub>、A<sub>2</sub>—主轴

3. 联动三相各断路器之间的连杆 拐臂应在同一水平面上 拐臂角度应一致。

4. 支持瓷套内部应清洁 卡固弹簧、法兰密封垫应完好 安放位置正确且紧固符合要求。

5. 油断路器一般应进行解体检查清理 并按产品说明书所要求的拆卸顺序进行 尤其要注意隔弧片的安放顺序和方向 以便在回装时正确无误 使横向吹弧道畅通。如制造厂规定不作解体检查清理并且有质检合格证保证的 10kV 以下的油断路器不可进行解体检查清理 只进行抽查即可。

6. 手车式少油高压断路器的安装 除了满足上述规定要求外 还应满足以下要求 (1)手车轨道应安装在同一水平面上 且相互平行 轨距应与手车轮距相配合 手车推入或拉出应轻便灵活 (2)手车的隔离静触头位置应安装准确 安装接触良好 其接触行程和超行程应符合产品技术规定 (3)手车接地应可靠 电气和机械联锁装置动作准确 操作灵活轻巧、制动装置应可靠和便于拆装等。

## (二)少油高压断路器的调试

### 1. 断路器安装垂直度检查

卸开绝缘拉杆 17,用手转动主拐臂 13 应无阻滞现象,否则应进一步检查调整断路器的器身中心垂直度,以消除动触杆运行中的摩擦力过大问题。

### 2. 动触杆总行程和接触行程检查调整

动触杆总行程是指动触杆从分闸状态初始位置运行到合闸后位置的距离,而动触杆接触行程是指动触杆接触到静触头后运行的距离。总行程和接触行程均可从有关产品手册中查得,如 SN10-10/600~350 型,总行程  $B = 147 \pm \frac{1}{3} \text{mm}$  接触行程  $\triangle B = 41 \pm \frac{1}{3} \text{mm}$ 。在检测时可先将断路器的帽和油气分离器 1 卸掉,并旋下中间的六方螺母,使动触杆 9 在合闸位置。用不锈钢探针从六方螺母处插入至动触杆顶端,测量六方螺母上口至动触杆顶端的长度  $A$ 。动触杆 9 在分闸位置时,再用不锈钢探针从六方螺母处插入至动触杆顶端,测量六方螺母上口至动触杆顶端的长度  $L$ ,从而可求得动触杆总行程  $B = L - A$ 。一般  $B$  值合格了,接触行程也就合格了。如果不符合要求,可以适当调节绝缘拉杆 17 的长度和油缓冲器 15 的活塞杆高度,一般主拐臂 13 的分、合闸夹角约为  $110^\circ$  为宜。

### 3. 三相触头同期性的调整

三相联动断路器在分、合闸时,各相动触杆与静触头接触或分离应一致,即同期性要好,一般要求三相的不同期性应不超过  $3\text{mm}$ 。可采用灯泡目测法来校验三相联动断路器分、合闸的同期性,测试线路如图 9-3 所示。如不符合要求,可适当调节绝缘拉杆 17 的长度。调节分闸弹簧 18 的长度还可实现调整分、合闸的速度。调整完毕后,将所有连接部位连接牢固,锁片锁牢,防松螺母拧紧,闭口销张开。

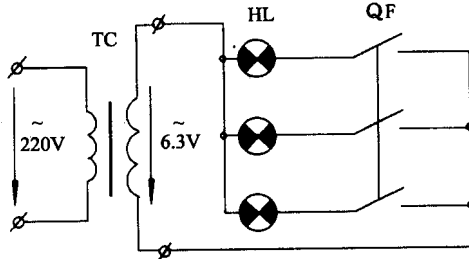


图 9-3 三相联动断路器三相触头同期性测试

QF—断路器;HL—指示灯;TC—变压器

### 4. 少油高压断路器的交接试验

1 绝缘电阻的测量 选用  $2500\text{V}$  兆欧表,分别测试断路器各相动、静触头之间及各相对外壳及地的绝缘电阻,即先分闸测量各相动、静触头之间的绝缘电阻,再合闸测量各相对外壳及地的绝缘电阻,其值应不小于表 9-1 的规定值。

表 9-1 断路器的绝缘电阻最小允许值 ( $\text{M}\Omega$ )

额定电压 ( $\text{kV}$ )	3 ~ 15	20 ~ 220
绝缘电阻 ( $\text{M}\Omega$ )	1000	2500

2 动、静触头接触电阻的测试 对高压断路器的触点接触要求很高,这是由于通断电压高、电流大,所以要求其动、静触头的接触电阻不得超过允许值。因为动、静触头的接触电阻非常小,为微欧数量级,所以应选用直流双臂电桥或选用 ZS-51 型数字毫欧表、YY2512 型直流低阻分选仪等测量仪器测量。如果所测得的动、静触头接触电阻超过规定值,应首先检查测量线路接线是否正确,各连接点是否接触良好,有无油渍和氧化膜存在。对于带有消弧副触头的断路器,应分别测量其主触头与消弧副触头的接触电阻。经过上述检查无问题后应再重复测试,如接触电阻仍然过大,则应拆开静触头座检查其触头压力和紧密度,并参照产品说

说明书加以调整和修理。触头表面应清洁,触头上的铜钨合金不得有裂纹、脱焊或松动。导电部分的铜编织带或可挠软铜片不应断裂,铜片间无锈蚀,固定螺栓应齐全紧固。同相的各触头片的弹簧压力应均匀一致,合闸时触头接触紧密,且分、合闸过程中均无卡涩现象。

3 交流耐压试验:少油高压断路器的交流耐压试验标准试验线路如图 9-4 所示。该试验可与其高压隔离开关、负荷开关等一起进行分相及三相对地试验。在对断路器的某一相施加试验电压时,另外两相应与油箱一起接地,并且在分、合闸情况下各进行一次。

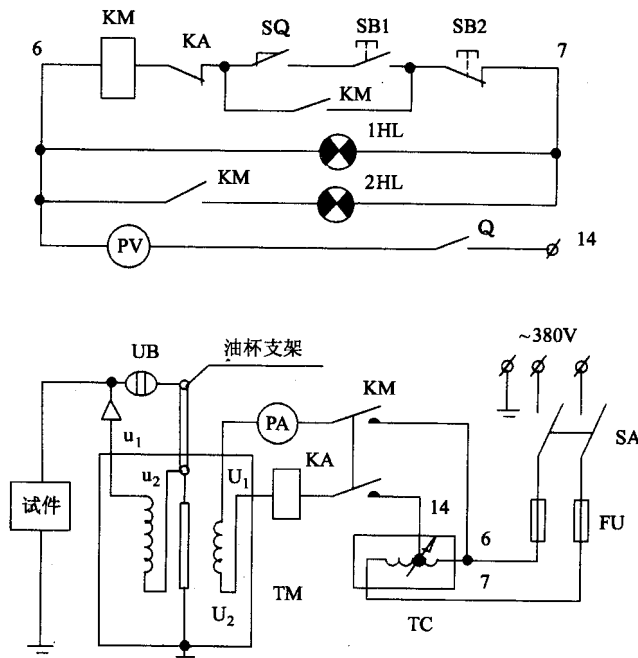


图 9-4 少油高压断路器及其变压器油试验线路

TC—高压交流试验变压器;KA—过流继电器;TS—自耦变压器;

UB—油杯;SQ—零压启动限位开关;KM—交流接触器;

SB1~SB2—分别为启动、停止按钮

4 变压器油耐压强度试验:15kV 及以下高压断路器的变压器油耐压强度标准为 25kV,试验线路如图 9-4 所示。试验时取少量断路器的变压器油样倒入干净的油杯内,同时调节油杯中的电极间隙(一般为 1.5~2.5mm)后,将油杯固定在专用油杯架上,静置 5~10min,以充分消除油内残存的气泡。然后按试验线路要求接线,将自耦变压器 TC 调整到零位,使零压启动限位开关 SQ 触点闭合。合上开关 SA,电源指示灯 1HL 亮,表明试验电源已接通。再按下启动按钮 SB<sub>1</sub>,接触器 KM 吸合,指示灯 2HL 亮,均匀调节自耦变压器 TC 升压,直至电极间隙被击穿时为止,此时过流继电器 KA 动作而使试验电路失压。电极间隙被击穿时的电压值即为变压器油的耐压(击穿)强度。再按同样方法进行 5 次变压器油耐压强度试验,每次间隔 5min,以观察变压器油的耐压强度是否符合试验标准。经试验合格后方可将油注入断路器油箱,变压器油注至油位指示器的规定油标位置,注油量一般为 49~8.4N,油位指示器的油位指示应正确、清晰。

### 三、高压断路器操作机构

高压断路器操作机构的作用是使断路器实现接通并维持通路状态或分断状态。用电磁装置将电能转换成磁力(机械能)来实现断路器分、合闸的动力机构,称为电磁操作机构。在变配电系统中,与 SN10-10 型断路器相配套的电磁作机构一般为 CD10 型。



## (一) CD10 型操作机构的结构

其内部结构如图 9-5 所示,主要由三部分组成:

1. 自由脱扣机构:自由脱扣机构位于操作机构的上部,其中分闸电磁铁位于操作机构的右侧,由分闸铁芯 3 和分闸线圈 2 组成。当分闸操作时,分闸线圈 2 中通入直流电流产生磁场,分闸铁芯 3 被吸入而实现分闸。分闸后经联动触点切断分闸线圈电源,分闸铁芯 3 复位落下。在操作机构上部的左、右侧均装有辅助触点 4,下方则装设合闸线圈 10 和合闸铁芯 15。自由脱扣器上的主转轴 5 经连杆、支架等传动机构操作断路器。在主转轴 5 上还装有分、合闸指示牌 13,以指示断路器的合闸或分闸状态。

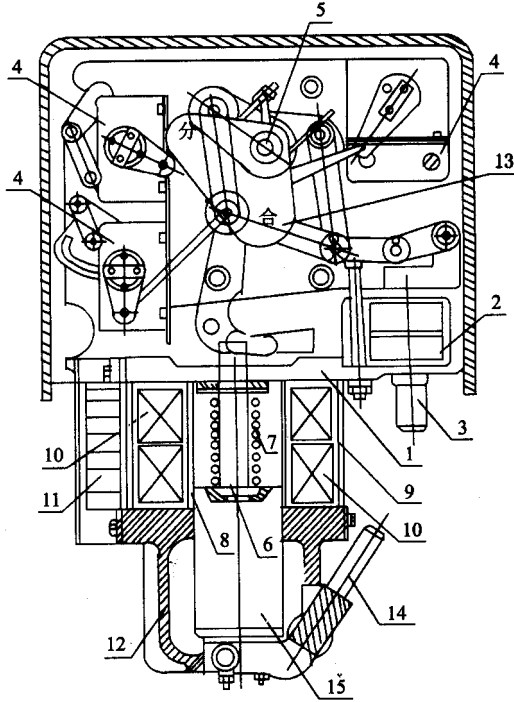


图 9-5 CD10 型电磁操作机构结构图

- 1—铁支架 2—分闸线圈 3—分闸铁芯 4—辅助触点;  
5—主转轴 6—顶杆 7—复位弹簧 8—内套筒 9—外套筒 10—合闸线圈 11—接线端子板;  
12—缓冲法兰 13—分、合闸指示牌 14—手动操作手柄 15—合闸铁芯。

2. 合闸电磁系统:在操作机构的合闸电磁系统中,铸铁支架 1 与缓冲法兰 12 构成合闸电磁系统的上下导磁体,其中间的外套筒 9 为磁轭,兼作合闸线圈的外护圈,而内套筒 8 为合闸线圈的内护圈,以免合闸线圈受到机械损伤。在内套筒中设有合闸铁芯 15,其上方装有顶杆 6,并由铁支架 1 的园孔中穿出。

当合闸线圈 10 通入电流时,合闸铁芯 15 被吸入,推动顶杆 6 并驱动传动机构使断路器实现合闸。合闸后其辅助触点 4 动作而切断合闸线圈的电源,故合闸铁芯靠其自重和复位弹簧 7 共同作用而迅速落下,断路器则由自由脱扣机构的自锁环节来维持合闸状态。

3. 缓冲法兰:位于操作机构的下部,既能对外套筒 9、内套筒 8、合闸铁芯 15 和合闸线圈 10 起到定位作用,又是磁路的组成部分。在缓冲法兰 12 内部装有橡皮垫,以对合闸铁芯在迅速下落时起到缓冲作用。缓冲法兰 12 的下部还装设有手动操作手柄 14,套入丁字套筒即可手动操作合闸。

## (二) CD10 型操作机构的电动控制

我们知道,电磁操作机构具有操作灵活安全,便于远距离集中控制的优点,在操作人员远离被控对象现场情况下,也同样可以实现对断路器的分、合闸操作。电磁操作系统应具有如下功能(1)能监视电源及下次

操作时分、合闸回路的完整性 (2)能指示断路器的分、合闸位置状态,如出现自动重复分、合闸事故时应有明显的信号 (3)应具有断路器“防跳”的闭锁装置 (4)断路器分、合闸结束后,应使分合闸命令脉冲自动解除; (5)线路应简单可靠,使用的小母线应最少。电磁操作系统按控制方式可分为分别操作、选线逻辑操作和程序自动操作等三种,下面以手动操作为例介绍对 CID10 型操作机构的控制,如图 9-6 所示。

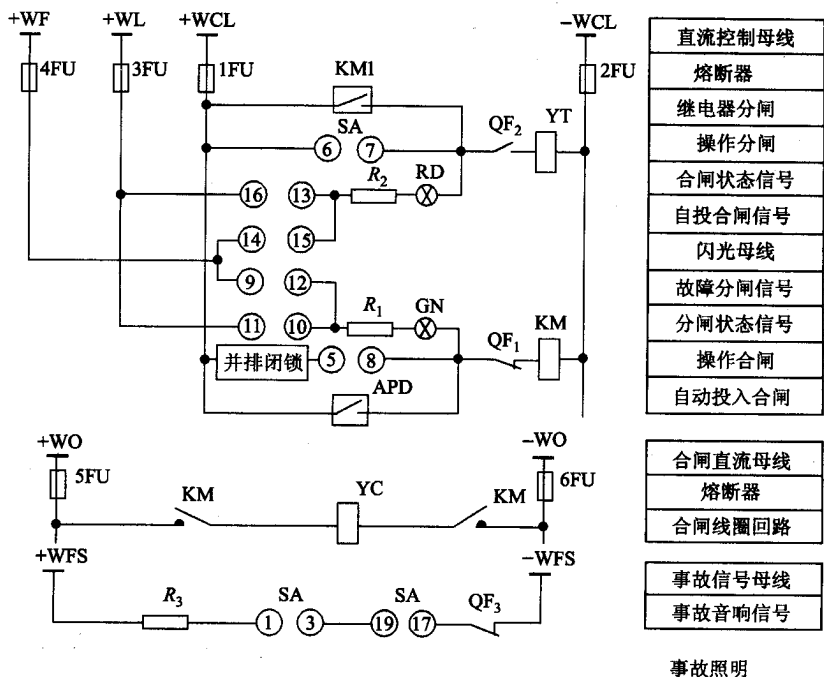


图 9-6 CID10 型电磁操作机构控制线路

QF1 ~ QF3—断路器辅助触点;YT—分闸线圈;YC—合闸线圈;KM—合闸接触器;  
 SA—万能转换开关;RD、GN—分别为合闸信号灯  
 (红色)合闸信号灯(绿色);KMI—出口中间断路器的分闸触点;  
 APD—备电自动投入装置合闸触点;WCL—控制母线;  
 WL—灯母线;WF—闪光母线;WO—合闸电源母线;  
 WFS—事故音响母线;1FU~6FU—熔断器

图中 SA 为万能转换开关 LW2-Z-1a、4、6a、40、20/F8 型,有“跳闸后”“预备合闸”“合闸”“合闸后”“预备跳闸”“跳闸”等 6 个档位,其内部接点分、合情况见表 9-2。

### 1. 合闸操作过程

合闸操作过程由“预备合闸”“合闸”“合闸后”等三档完成。设万能转换开关 SA 初始位置为“跳闸后”,则断路器处于分闸状态,此时辅助触点 QF<sub>1</sub> 闭合, QF<sub>2</sub> 断开。故 SA 在“跳闸后”档位时, SA<sub>10-11</sub> 闭合而接通灯母线 +WL, 绿色分闸信号灯 GN 点亮, 表示断路器分断。由于电阻 R<sub>1</sub> 与 GN 及合闸接触器线圈 KM 串联, 故 KM 并不能吸合。同时 SA<sub>14-15</sub> 也闭合而接通闪光母线 +WF, 但由于 QF<sub>2</sub> 断开, 所以红色合闸信号灯 RD 不亮。此外 GN 和 RD 还起着监视控制电源和下次操作时回路完整性的作用, 例如熔断器 2FU 熔断时, 红、绿信号灯不亮, 而达到监视电源的作用, 而红、绿信号灯分别串联在分、合闸回路中, 又可监视下一次操作时回路的完整性。

将万能转换开关 SA 拨向“预备合闸”位置时, 由表 9-2 可知 SA<sub>9-10</sub> 闭合, 此时, QF<sub>1</sub> 仍闭合, 故使绿色信号灯 GN 与闪光母线 +WF 接通, 发出绿色闪光信号, 表示合闸回路是完整的, 可以进行合闸操作, 同时也核对了所操作的档位是否有误。而 SA<sub>13-14</sub> 闭合, 使 RD 仍与闪光母线 +WF 接通, 但由于辅助触点 QF<sub>2</sub> 断开, 故 RD 仍不亮。



再将万能转换开关 SA 拨向“合闸”位置,由表 9-2 可知, SA<sub>5-8</sub> 闭合,合闸接触器 KM 吸合,合闸线圈 YC 得电而实现断路器合闸。此时又由于辅助触点 QF<sub>1</sub> 断开而使 KM 失电,切断合闸线圈 YC 回路,同时分闸信号灯 GN 熄灭,而 SA<sub>13-16</sub> 闭合,辅助触点 QF<sub>2</sub> 闭合使合闸信号灯 RD 点亮,发出红色合闸信号。同时,由于分闸线圈 YT 与合闸信号灯 RD、电阻 R<sub>2</sub> (2.5kΩ) 串联,故不会发生误分闸动作。另外 SA<sub>9-12</sub> 闭合,如果断路器自动分闸时,分闸信号灯 GN 将发出绿色闪光信号,表示断路器已经“自动分闸”。

最后将 SA 拨向“合闸后”位置, SA<sub>5-8</sub> 断开, SA<sub>9-10</sub>、SA<sub>13-16</sub> 闭合,从而确保切断合闸接触器 KM 线圈的控制电源 +WCL,使 RD 继续发出红色合闸信号。当发生断路器自动分闸时,GN 可发出“自动分闸”的绿色闪光信号。

值得注意的是,由于合闸线圈 YC 工作电流很大(约 120~200A),所以应由大容量直流电源单独供电,并由合闸接触器 KM 控制。由上述分析可知,SA 在“合闸后”位置时可使 YC 断电,从而可节省电能。合闸线圈 YC 断电后,合闸铁芯 15 及顶杆 6 下降,则由自由脱扣机构中的搭钩顶住滚轮,使整合系统维持合闸状态。

图 9-6 中的“并联闭锁”环节,可使两路电源进线变电所的两路电源不会并列运行。如图 9-7 所示,两路电源不并列运行的条件是电源进线断路器和母线分段断路器等三台不能同时合闸运行,只能同时有一台或两台断路器合闸运行。

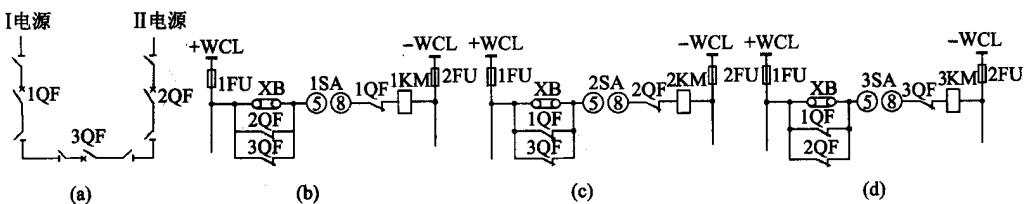


图 9-7 单母线分段式断路器并联闭锁环节  
(a)一次系统 (b)~(d)分别为 1QF~3QF 合闸操作回路

## 2. 分闸操作过程

将 SA 拨向“预备跳闸”位置时, SA<sub>13-16</sub> 闭合,由于此时辅助触点 QF<sub>2</sub> 已闭合,所以 RD 发出红色闪光信号。同样由于分闸线圈 YT 与电阻 R<sub>2</sub>、合闸信号灯 RD 相串联,故不能实现分闸动作。另外 SA<sub>10-11</sub> 闭合,辅助触点 QF<sub>1</sub> 已断开,分闸信号灯 GN 还不能点亮。

再将 SA 拨向“跳闸”位置, SA<sub>6-7</sub> 闭合,分闸线圈 YT 与控制母线 +WCL 接通而实现断路器分闸。由于分闸线圈 YT 的工作电流只有几安培,所以分闸回路直接由控制母线电源供电。断路器分闸后,辅助触点 QF<sub>2</sub> 断开而切断分闸回路。同时由于分闸辅助触点 QF<sub>1</sub>、SA<sub>10-11</sub> 也闭合,故此时分闸信号灯 GN 点亮而发出绿色分闸信号。最后将 SA 拨向“跳闸后”位置,即完成了分闸操作过程。

图中 KMI 为继电保护装置的出口中间继电器触点,当线路发生故障时,继电保护装置动作而使分闸线圈 YT 得电,实现断路器分闸而切断故障线路。

从上述对 CD10 型操作机构的控制线路分析可知,既实现了对操作机构及断路器的远距离操作控制,又可对操作机构控制的全过程和运行情况进行监视。当断路器的分、合闸状态与 SA 的分、合状态不对应时,均可发生闪光信号。例如,当 GN 发出绿色闪光信号时,表示继电保护装置使断路器实现分闸或误脱扣分闸状态;当 RD 发出红色闪光信号时,则表示备用电源自动投入合闸触点 APD 动作实现合闸或断路器误合闸状态。但是,当 SA 在“预备合闸”或“预备分闸”档位时,信号指示灯分别发出红色及绿色闪光信号,则表示合闸或分闸回路具有完整性,表明可以继续合闸或分闸操作。

## (三) CD10 型操作机构的调试

### 1. 支持杆的调整

图 9-8(a)为 CD10 型电磁操作机构的脱扣器合闸后位置图,要使该操作机构的传动系统工作协调,对支持杆 7 的调整是十分关键的。只有将支持杆 7 调整到合适的高度,才能确保操作机构对断路器进行可靠的分、合闸操作。一般应使销轴 A<sub>5</sub> 高于 A<sub>6</sub> 约 1~2mm 为宜,即使连杆 10、11 的同一轴线与水平线之间形成很小的仰角。

## 2. 分、合闸铁芯的调整

如图 9-8(a) 所示, 用手动操作检查合闸铁芯及顶杆 5 的行程。当顶杆 5 将滚轮顶到最高位置时, 搭钩 3 在其弹簧作用下返回到滚轮的下方 (即在通过轮心的垂线上), 此时测量滚轮与搭钩之间的间隙应为  $1 \sim 1.5 \text{mm}$ , 可通过调节顶杆 5 的长度来实现, 一般合闸铁芯的行程为  $75 \text{mm}$  左右。

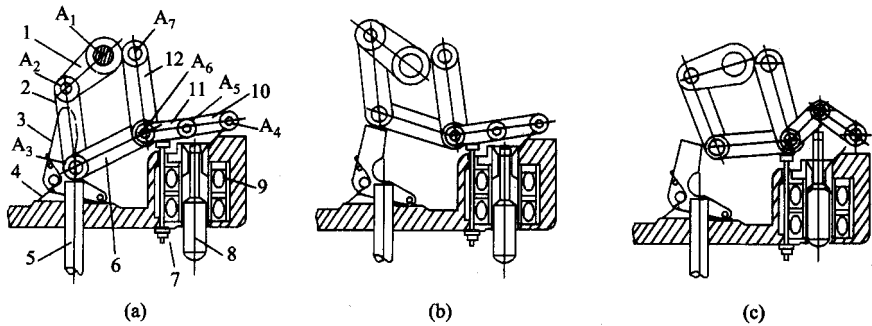


图 9-8 CD10 型电磁操作机构工作原理示意图

(a) 分闸位置 (b) 合闸位置 (c) 分闸过程中

在合闸状态下, 用手向上推动脱扣铁芯 8, 顶起连杆 10 而实现分闸。在调整时应使脱扣铁芯 8 上的顶杆接触到连杆 10 后再升高  $8 \sim 10 \text{mm}$  即可。在进行分、合闸铁芯调整过程中, 可同时对其辅助触头  $QF_1$ 、 $QF_2$  进行调整, 以保证其在分、合闸状态下动、静触头在中心位置上接触, 且触点闭合时接触紧密, 分断时也有足够的间隙。如果是延时辅助触头, 在分断位置时其动、静触头间隙一般为  $4 \sim 5 \text{mm}$ 。

## 3. 断路器及其操作机构的电气检查试验

在断路器及其操作机构调整符合要求后, 还须进行总体电气检查试验, 以检查操作机构是否协调可靠。

检查试验内容主要包括 (1) 绝缘电阻测试, 即用兆欧表分别检测分、合闸线圈对铁芯、外壳的绝缘电阻, 应不小于  $1 \text{M}\Omega$  (2) 直流电阻测试, 即用直流单、双臂两用電桥 (QJ65 型) 或直流低阻分选仪 (YY2512 型) 等测量分、合闸线圈的直流电阻, 以检查线圈是否存在匝间短路故障, 其数值大小可与同类型操作机构的线圈阻值相比较 (3) 分、合闸试验, 将操作电压 (或电流) 调节到额定值的  $80\%$ 、 $90\%$ 、 $100\%$ 、 $110\%$ , 分别进行  $3 \sim 5$  次分、合闸试验, 以进一步检查操作机构的灵敏性、可靠性等电气性能。

# 四、高压断路器的选择

以上介绍了高压断路器及其操作机构的主要结构、工作原理和安装调试方法, 对断路器的一般选择要求也应有一定的了解。

## (一) 按工作电压和工作电流选择

为了保证高压断路器 (或高压隔离开关、负荷开关) 能安全可靠地运行, 应满足以下条件:

$$\left. \begin{aligned} V_{\text{kN}} &\geq V_{\text{N}} & I_{\text{kN}} &\geq I_{\text{jzm}} \end{aligned} \right\}$$

(9.1.1)

式中  $V_{\text{kN}}$ ——断路器额定电压,  $\text{kV}$ ;

$I_{\text{kN}}$ ——断路器额定电流,  $\text{A}$ ;

$V_{\text{N}}$ ——线路额定电压,  $\text{kV}$ ;

$I_{\text{jzm}}$ ——线路正常工作时的最大负荷电流,  $\text{A}$ 。

由于高压断路器一般为普通型和湿热带型, 其额定电流是按环境温度  $+40^\circ\text{C}$  确定的, 所以当实际环境温度高于或低于  $+40^\circ\text{C}$  时, 应对额定电流加以修正, 即

$$I_{\text{kN}}' = kI_{\text{kN}}$$

式中  $k$ ——额定电流修正系数,可按下式确定:

$$k = \sqrt{\frac{T_m - T}{T_m - 40}} \quad (9.1.2)$$

式中  $T_m$ ——高压断路器最高允许工作温度,℃;

$T$ ——年最热月平均环境温度,℃。

也可按经验近似计算断路器额定电流。如  $T < 40^\circ\text{C}$  时,每降低  $1^\circ\text{C}$  可增加  $0.5\% I_{\text{kN}}$ ,但最大不得超过  $20\% I_{\text{kN}}$ ;如  $40^\circ\text{C} < T \leq 60^\circ\text{C}$  时,每增加  $1^\circ\text{C}$  可减少  $1.8\% I_{\text{kN}}$ 。据此初选断路器,再按断路器的动稳定、热稳定条件进行校验。

动稳定条件:

$$\left. \begin{aligned} i_{\max} &\geq i_{\text{cj}}^{(3)} \\ I_{\max} &\geq I_{\text{cj}}^{(3)} \end{aligned} \right\} \quad (9.1.4)$$

式中  $i_{\max}$ 、 $I_{\max}$ ——分别为断路器(或电气设备)允许通过最大电流的峰值、有效值, kA;

$i_{\text{cj}}^{(3)}$ 、 $I_{\text{cj}}^{(3)}$ ——分别为三相短路冲击电流的峰值、有效值, kA。

热稳定条件:

$$I_{\text{tt}} \geq I_{\infty}^{(3)} t_{\text{jx}} \quad (9.1.5)$$

$I_{\text{tt}}$ ——在规定热稳定试验时间  $t$  秒内,断路器的热稳定电流, kA;

$I_{\infty}^{(3)}$ ——三相短路稳态电流, kA;

$t_{\text{jx}}$ ——假想时间(或称为热效时间), s。

在无限大电源系统中,如果实际短路时间  $t_{\text{d}}$  为继电保护装置整定的动作时间与断路器的分断时间之和)小于  $1\text{s}$  时,可按实际短路时间加  $0.05\text{s}$  计算假想时间  $t_{\text{jx}}$ (即  $t_{\text{jx}} = t_{\text{d}} + 0.05$ )。如果实际短路时间大于  $1\text{s}$  时,则按实际短路时间计算假想时间  $t_{\text{jx}}$ (即  $t_{\text{jx}} = t_{\text{d}}$ )。其中  $I_{\text{tt}}$  参数可由断路器产品样本中查得。

## (二)按安装地点的三相短路容量选择

所谓安装地点的三相短路容量,是指在无限大电源系统中,电力系统出口断路器后面发生三相短路时的短路容量。断路器的额定断流容量  $S_{\text{kd}}$ (或额定开断电流  $I_{\text{kd}}$ )应不小于安装地点的三相短路容量  $S_{\text{d}}$ (或三相短路电流  $I_{\text{d}}$ ),即

$$\left. \begin{aligned} S_{\text{kd}} &\geq S_{\text{d}} \\ I_{\text{kd}} &\geq I_{\text{d}} \end{aligned} \right\} \quad (9.1.6)$$

如果断路器安装在低于其额定电压的电路中时,其断流容量可按下式换算:

$$s'_{\text{kd}} = \frac{V_{\text{N}}}{V_{\text{KN}}} \cdot S_{\text{kd}} \quad (9.1.7)$$

式中  $S'_{\text{kd}}$ ——断路器换算后的断流容量, MVA;

$S_{\text{kd}}$ ——断路器额定断流容量, MVA;

$V_{\text{N}}$ ——安装地点线路的额定电压, kV;

$V_{\text{KN}}$ ——断路器的额定电压, kV。

## (三)按工作环境、运行要求和经济等因素选择

应根据安装使用环境(温度、海拔高度、空间介质等)确定选用户内式或户外式高压断路器;再按照操作的频繁程度确定高压断路器的类型,如操作频繁的场合应选用高压真空断路器,否则可选用高压少油断路

器。高压少油断路器的型号含义为：

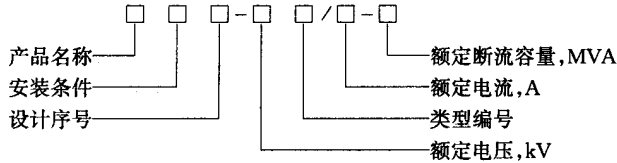


表 9-3 中列出常用高压少油断路器的技术数据,以供选择参考。

表 9-3 常用高压少油断路器技术数据

型 号	额定电压	额定电流	额定断流容量	额定分断电流	动稳定电流	4s 热稳定电流	操作机构	固有分断时间	合闸时间
	kV	A	MVA	kA				类型	s
SN10-101/600-300	10	600	300	17.3	44.1	17.3	CS2, CD10CT7	0.06	0.25
SN10-101/1000-500		1000	500	29	74	29	CD10, CT7		

例题 某 10kV 高压配电系统如图 9-9 所示,已知系统出口断路器的断流容量为 200MVA,线路计算电流 350A,继电保护装置整定时间 1.1s,断路器分断时间 0.2s。如变电所的进线选择 SN10-10L/600-500 型户内高压少油断路器,是否符合要求?

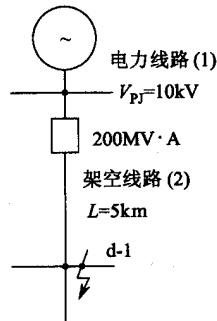


图 9-9 某 10kV 高压配电系统图

解 短路计算点  $d-1$  的平均额定电压取  $V_{pj} = 10.5\text{kV}$ ,又知系统出口断路器的断流容量  $S_{dl} = 200\text{MVA}$ ,则电力系统的电抗为：

$$X_{\Sigma T} = V_{pj}^2 / S_{dl} = (10.5 \times 10^3)^2 / 200 \times 10^6 = 0.551\Omega$$

架空线路距离  $L = 5\text{km}$ ,由《工厂配电设计手册》查得  $x_0 = 0.38\Omega/\text{Km}$ ,故线路电抗为：

$$X_{L-1} = x_0 L = 0.38 \times 5 = 1.9\Omega$$

则短路线路的总电抗为：

$$X_{\Sigma} = X_{\Sigma T} + X_{L-1} = 0.551 + 1.9 = 2.451\Omega$$

这样,略去线路直流电阻,三相短路电流周期分量有效值为：

$$I_{d-1}^{(3)} = V_{pj} / \sqrt{3} X_{\Sigma} = 10.5 / \sqrt{3} \times 2.451 = 2.473\text{kA}$$

由《建筑供配电》知道,在无限大电源系统中,短路电流周期分量有效值在短路过程中是恒定的,故三相继暂态短路电流和三相短路稳态电流为:

$$I(3) = I_{\infty} = I_{d-1}^{(3)} = 2.473\text{KA}$$

所以三相短路冲击电流峰值为:

$$i_{cj}^{(3)} = 2.55I(3) = 2.55 \times 2.473 = 6.306\text{kA}$$

三相短路容量为:

$$S_{d-1}^{(3)} = \sqrt{3} V_{pj} I_{d-1}^{(3)} = \sqrt{3} \times 10.5 \times 2.473 = 44.975\text{MVA}$$

由式(9.1.1)~(9.1.7),查表9-3进行校验,校验结果见表9-4。由此可见,该线路中选用SN10-101/600-300型高压少油断路器可满足要求。

表9-4 10kV高压少油断路器校验表

SN10-101/600-300		安装处线路电气参数	
项 目	数 据	项 目	数 据
额定电压( $V_{KN}$ )	10kV	额定电压( $V_N$ )	10kV
额定电流( $I_{KN}$ )	600A	最大负荷电流( $I_{JXM}$ )	350A
额定断流容量( $S_{KN}$ )	300MVA	短路计算点三相短路容量 $S_{d-1}^{(3)}$	44.975MVA
允许通过最大电流峰值( $i_{max}$ )	44.1kA	三相短路冲击电流峰值( $i_{cj}^{(3)}$ )	6.306kA
热稳定参数( $I_1^2 t$ )	$17.32 \times 4 = 1197.16$	三相短路热稳定数据( $I_{\infty}^2 t_{jx}$ )	$2.4732 \times 1.3 = 7.95$

## 第二节 高压隔离开关安装与维修

高压隔离开关常与断路器配合使用。由于隔离开关无灭弧装置,断流能力差,所以不能带负荷操作。为防止误操作,电力系统中的隔离开关和断路器之间通常都装有连锁机构。隔离开关的主要用途有以下几点:

### 一、隔离电压

在检修电气设备时,用隔离开关将被检修的设备与电源电压隔离,并形成明显可见的断开间隙,以确保检修的安全。

### 二、倒闸操作

投入备用母线或旁路母线以及改变运行方式时,常用隔离开关配合断路器,协同操作来完成。



### 三、分、合小电流

因隔离开关具有一定的分、合小电感电流和电容电流的能力,故一般可用来进行以下操作:①分、合避雷器、电压互感器和空载母线;②分、合励磁电流不超过 2A 的空载变压器;③关合电容电流不超过 5A 的空载线路。

按安装地点,高压隔离开关分户内式(GN)和户外式(GW)两大类。每台都配有相应的手动(CS)操作机构。

GN19-10C 和 GN30-10 是目前广泛使用的两种 10kV 高压隔离开关,外形如图 9-10、图 9-11 所示。

GN30-10 为旋转式隔离开关,分为 GN30-10 型和 GN30-10D 型两大类。GN30-10D 型是在 GN30-10 型基础上增加接地开关以满足开关柜的不同要求。本产品适用于一般污秽地区、潮湿地区及具有凝露的地方使用。触头采用线接触方式,接触性能可靠,特别是对大电流产品,采用了独特的设计原理,能正常通过 3150A 的额定电流。

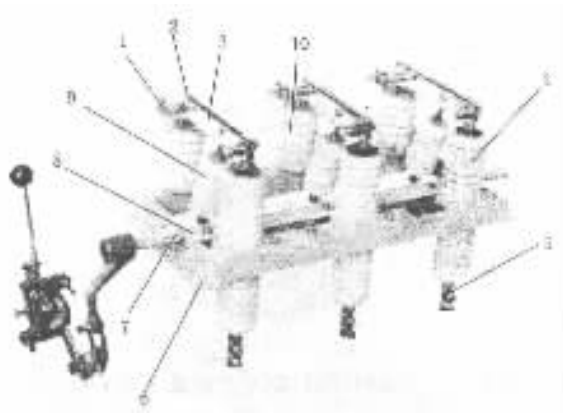


图 9-10 GN19-10C 型高压隔离开关

- 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

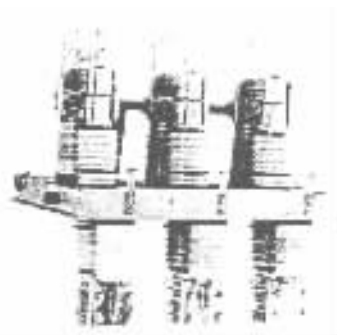


图 9-11 GN30-10(D)型旋转式隔离开关

### 第三节 负荷开关安装与维护

高压负荷开关是专门用于接通和断开负荷电流的电器设备,装有热脱扣器时,在过负荷的情况下也能自动跳闸。负荷开关仅有简单的灭弧装置,不能切断短路电流,因此,它必须与高压熔断器结合使用,短路电流由熔断器切断。负荷开关断开后,与隔离开关一样,具有明显可见的断开间隙,所以它也具有隔离电流、保证安全检修的功能。

高压负荷开关分户外(FW)和户内(FN)两大类。每台都配有相应的手动(CS)操作机构。高压负荷开关的类型较多,这里着重介绍几种新一代高压真空负荷开关。

FN21-12D.R型户内高压真空负荷开关及熔断器组合电器是我国研制的新一代12kV真空负荷开关,产品在国家高压电器质量检验测试中心通过了型式试验。本开关额定开断转移电流可达3150A,额定工频耐受电压42kV,具有优良的开断性能和绝缘水平,特别适合在配电网中作控制和保护的开关设备。其外形如图9-12所示。

ZFN□-1X(R)型12kV负荷开关组合电器用于开断负荷电流、过载电流和短路电流,特别适用于对无油化、不检修及频繁操作有要求的场所。真空灭弧室的操作方式既可采用弹簧机构,也可采用电动机构。真空灭弧室、隔离刀和接地刀之间具有可靠的连锁。处于合闸位置的组合电器,当短路电流或过载电流流过主回路时,熔断器中至少有一相熔体熔断,撞击器动作,撞击组合电器的机构锁扣装置,使真空灭弧室在分闸弹簧的作用下实现快速可靠分闸。

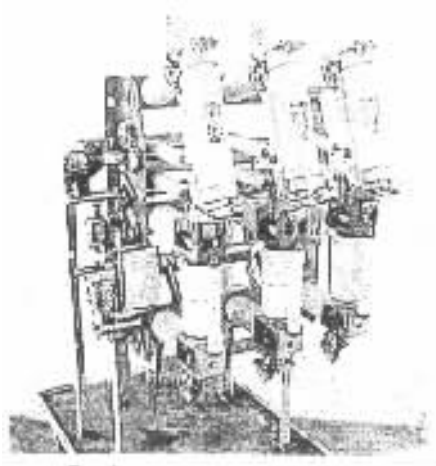


图9-12 FN21-12D.R  
型高压真空负荷开关

FZW28-12户外交流12kV高压真空负荷开关因其卓越的性能及免维护特性,目前广泛地应用于架空线路配电系统。该设备与故障搜查控制器(FDR)或遥控终端单元(RTU)、电源变压器(SPS)组合使用,构成配电自动化设备,可以实现电网线路操作全部自动化。

FZW28-12负荷开关的突出特点是具有15年以上免维护特性和预留有配电自动化扩展接口。

## 第四节 熔断器安装与维护

高压熔断器是一种保护电器,当其所在电路的电流超过规定值并经一定时间后,它的熔体熔化而分断电流、断开电路。熔断器主要用来进行短路保护,但有的也具有过负荷保护功能。

按安装环境,高压熔断器也有户内式和户外式两大类。我国生产的户内式熔断器有 RN1、RN2、RN3、RN5、RN6 等;户外式有 RW3-10(G)、RW4-10(G)、RW5-35、RW7-10、RW10-35、RW11-10 等。

### 一、RN 型户内管式熔断器

RN1、RN2 两者结构基本相同,都是充有石英砂填料的密闭管式熔断器。RN2 的尺寸较小。RN1 主要用作 3~35kV 电力线路和电气设备的短路保护;RN2 用作 3~35kV 电压互感器的短路保护。图 9-13 是 RN1、RN2 的外形图,图 9-14 是 RN1、RN2 内部结构示意图。

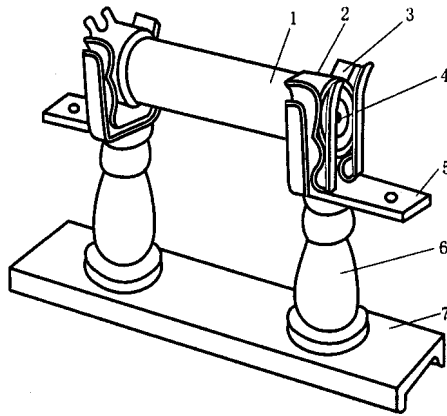


图 9-13 RN1、RN2 型高压熔断器

1—瓷熔管 2—金属管帽 3—弹性触座  
4—熔断指示器 5—接线端子 6—瓷绝缘子 7—底座

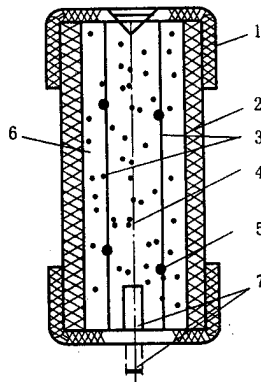


图 9-14 RN1、RN2 型高压熔断器的熔管剖面示意图

1—管帽 2—瓷熔管 3—工作熔体 4—指示熔体:  
5—锡球 6—石英砂填料 7—熔断指示器

由图 9-14 可知,工作熔丝(由铜丝制成)上焊有小锡球。锡是低熔点金属,过负荷电流或短路电流通过熔丝,其温度迅速上升,锡球先于铜丝被熔化,锡球熔化后包围铜丝,温度继续上升,锡与铜相互渗透形成熔点较低的铜锡合金,使熔体能在较低的温度下熔断,这就是所谓的“冶金效应”。它使得熔断器能在较小的故障电流或过负荷电流时动作。熔断器是采用几根熔丝并联的,熔断时能产生几根并行的电弧,即把粗弧变成细弧,加快电弧的熄灭。管内填以石英砂,其作用是加快灭弧。这种熔断器能在短路电流未达到冲击值之时就可完全熄灭电弧,是快速熔断器,即具有限流作用。

RN3 也是户内高压熔断器,通常装在负荷开关内,与 RN1 一样,熔管一端装有指示器,当熔断器动作后指示器即向外弹出。

RN5、RN6 是改进型,特性与 RN1 相同,只是外形加以改进,体积小,重量轻,泄漏距离大,防污性能好,维护简单,更换方便。

可配熔体的额定电流, RN1-6、10 为 2~300A, RN1-35 为 2~40A, 断流容量为 200MVA; RN2-6~35 熔体额定电流均为 0.5A。

## 二、RW 型户外跌落式熔断器

RW11-10 型如图 9-15 所示,其基本结构及动作情况如下:

熔断管上部动触头借熔丝张力(向下)拉紧后,推到上静触头上面锁紧,同时下动触头与下静触头也相互压紧,从而使电路接通。当被保护对象发生故障,故障电流通过熔丝使其熔断后,熔管上动触头因失去张力拉紧而上翻,使锁紧机构释放熔管,在动触头上翻的弹力和熔管自身重力的作用下,回转跌落,造成明显可见的断开间隙。熔管一般用钢纸管制成,当熔体熔断形成电弧时,在电弧灼热作用下,熔管分解出大量气体使管内产生很大压力,形成强烈的纵向吹弧作用,使电弧迅速拉长而熄灭。在熔断小电流时,因管内压力不大,上端封闭着,只形成向下单端排气,使管内保持足够压力,有利于熄灭小故障电流产生的电弧。而在分断大故障电流时,由于电弧大,产生气体多,管内压力大,使上端铁帽冲开而形成两端排气。这样有助于防止分断大故障电流造成熔管破坏,有效地解决了自产气电器分断大小电流的矛盾。

由于 RW 型熔断器熔断后,熔管会自动跌落,故又叫跌落保险。

RW3-10(G)型额定电压为 10kV,额定电流 50~200A,断流容量 50~200MVA; RW4-10(G)型,除外形尺寸稍小于 RW3-10(G)外,其它性能与 RW3-10(G)相同。它们灭弧速度不高,因而没有限流作用; RW5-35 型,额定电压为 35kV,额定电流为 50~200A,断流容量为 200~800MVA,熔管采用钢管-环氧玻璃布复合管制成,有较高机械强度并能保证连续三次顺利开断额定断流容量; RW7-10 型是有统一支架的跌落式熔断器,在条件变更时,只需用钩棒更换不同的熔管即可。熔管有较高机械强度,具有多次开断能力,可免除熔断一次即更换熔管的麻烦; RW10-35 型,额定电压 35kV,额定电流为 0.5A 者是专用于保护电压互感器的,额定电流为 2~10A 者用于保护线路或设备过载与短路,它具有限流作用,可代替 RW2-35 及其附加电阻,但安装时要注意熔体电流与被保护对象的电流一致方可投入运行; RW11-10 型是 10kV 防污型跌落式熔断器,适用于工业污秽和沿海地区的输电线路及变压器的保护,结构如图 9-15。除 RW1-10 型外其它型式只适用于周围空气没有导电尘埃和腐蚀性气体、没有易燃易爆及剧烈震动的户外场所。

RW 型熔断器除作过载和短路保护外,在一定条件下,可用高压绝缘钩棒(俗称令克棒)去操作熔管分、合小容量的空载变压器、小电流的线路及设备。

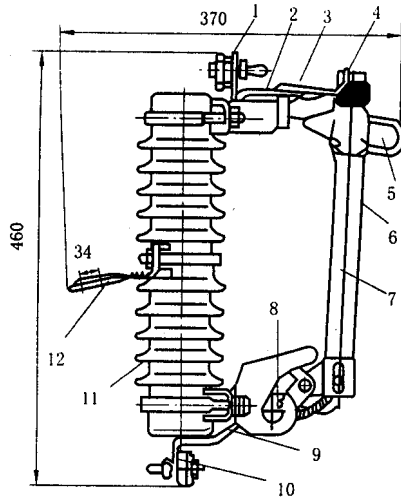


图 9-15 RW11-10 型高压跌落式熔断器

- 1—上接线端 2—上静触头 3—上动触头，  
4—管帽 5—操作环 6—熔管 7—熔丝，  
8—下动触头 9—下静触头 10—下接线端，  
11—绝缘瓷瓶 12—固定安装板

## 第五节 高压开关柜安装与维护

成套配电装置是制造厂成套供应的设备。同一回路的开关电器、测量仪表、保护电器和辅助设备都组装在全封闭或半封闭的金属柜内。

高压开关柜是按一定的线路方案将有关一、二次设备组装而成的一种高压成套配电装置，在发电厂和变电所中作为控制和保护发电机、变压器和高压线路之用，也可作为大型高压交流电动机的起动和保护之用。

高压开关柜有固定式和手车式（移开式）两大类型。GG-1A(F)型是我国以前大量生产和广泛应用的较为经济的固定式高压开关柜，现在多采用新型的 GGX2-12 等开关柜。GGX2-12 为全国统一设计，1998 年推广使用，外形如图 9-16。

DKG-10 型金属铠装固定式 10kV 高压开关柜，由电力部组织设计，1997 年 4 月通过部级鉴定。该柜采用金属铠装全密封结构，柜体骨架由新型型材拼装而成，柜内分为断路器室、母线室、继电器室，室与室之间用钢板隔开。断路器室在柜体中部，其下接线端子与电流互感器连接。断路器本体与操作机构为一体化，主开关部装有轮子，检修时可将开关推到专用小车上，便于检修。断路器室还设有压力释放通道，若内部发生电弧时，气体可通过排气通道将压力释放。

电缆室在柜体下部的后方，GN30-10 隔离开关的支持绝缘子可设有监视装置，电缆固定在支架上。对于主接线为联络方案时，本室则为联络电缆室。

手车式（又称移开式）高压开关柜的特点是，高压断路器等主要电气设备是装在可以拉出和推入开关柜的手车上的，如图 9-17 所示。断路器等设备需要检修时，可随时将其手车拉出，然后推入同类备用手车，即可恢复供电。因此采用手车式开关柜，较之采用固定式开关柜具有检修安全、供电可靠性高等优点，但价格较贵。

KYN800(18A)-10 是目前较为流行的 10kV 手车式高压开关柜。

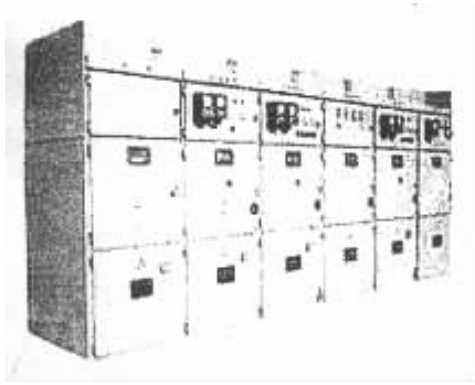


图 9-16 GGX2-16 型固定式高压开关柜



图 9-17 KYN1-12 型手车式高压开关柜

KYNB-40.5 为小型化全绝缘组装式开关柜，铠装型、移开式，配用新型真空断路器。开关柜由固定的柜体和可抽出部件(手车)两大部分组成，外形尺寸及结构示意图见图 9-18。

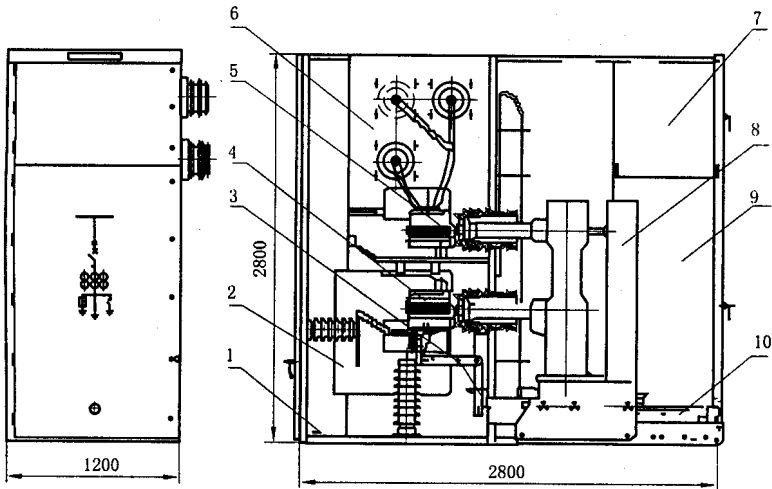


图 9-18 KYNB-40.5 型组装式开关柜

- 1—接地母线 2—电缆室 3—接地开关 4—电流互感器 5—触头盒；  
6—母线室 7—总电器室 8—38DW-VAC32 手车 9—手车室 10—进车联管机构

## 第六节 避雷器使用与维修

电气设备在运行中除承受工作电压外,还将遭到过电压的影响。由雷电引起的雷电过电压或由开关操作引起的过电压,其数值远远超过工作电压,会使设备绝缘损伤,寿命缩短,甚至造成停电事故。因此,必须采取各种有效措施来限制过电压。避雷器就是用来限制过电压的一种主要保护电器,它一般接于导线和地之间,并连在被保护设备或设施上,在正常时处于不通状态,出现雷击过电压时,击穿放电,当过电压值达到规定值的动作电压,避雷器立即动作,切断过电压负荷,将过电压限制在一定水平,保护设备绝缘,使电网能够正常供电。当过电压终止后,迅速恢复不通状态,恢复正常工作,主要用来保护电力设备,也可作防止高压电侵入室内的安全措施。

### 一、阀型避雷器

阀型避雷器最基本的元件是火花间隙和非线性工作电阻片,它们串叠装在密封的瓷套内,如图9-19所示,该种避雷器具有较好的保护性能,广泛用于交、直流系统,保护发、配电设备。

#### (一) 结构及原理

阀型避雷器主要由瓷裙、火花间隙、阀片电阻等元件组成。各主要元件的作用是:

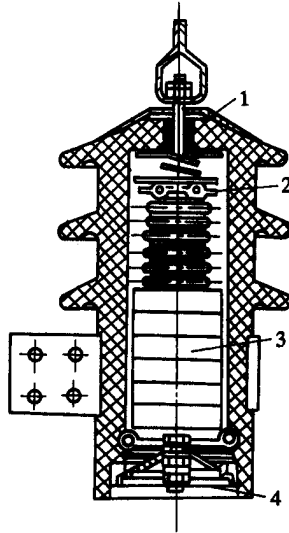


图9-19 阀型避雷器结构

1—瓷裙 2—火花间隙 3—阀片电阻 4—接地螺钉

1. 火花间隙 由多个单元间隙串联而成,每个火花间隙均由两个黄铜片电极和一个云母垫圈隔开组成。在正常情况下,火花间隙使阀片电阻及黄铜片电极与电力系统隔开,而在受到过电压击穿后0.01s内,能将工频续流电弧熄灭。

2. 阀片电阻 是由特殊碳化硅制成,其阻值随电压的不同而在很大范围内变化。火花间隙在正常工作时,有足够的绝缘强度,不会被正常的工作电压所击穿。当雷电侵入时,高电压加在电阻阀片上,其阻值变小,立即将雷电流泄入大地。此后阀片电阻阻值增加,限制正常工频电流通过,以保证火花间隙可靠熄灭,使

电路恢复正常工作。

当线路正常运行时,避雷器的火花间隙将线路与地隔开,当线路遭雷击时,在强电场的作用下,火花间隙被击穿,将雷电流通过阀片电阻泄入大地,释放过电压电荷,从而起到保护电气设备的目的。

## (二) 安装

### 1. 安装前的检查和试验

#### (1) 安装前的检查

- 1) 避雷器额定电压与线路电压是否相同。
- 2) 底盘瓷盘有无裂纹,瓷件表面是否有裂纹、破损和闪络痕迹及掉釉现象。如有破损,其破损面应在  $0.5\text{m}^2$  以下,在不超过三处时可继续使用。
- 3) 将避雷器向不同方向轻轻摇动,内部应无松动的响声。
- 4) 检查瓷套与法兰连接处的胶合和密封情况是否良好。

#### (2) 电气试验

- 1) 绝缘电阻 用 2500V 兆欧表测量绝缘电阻,与同类避雷器试验值进行比较,绝缘电阻值应未有明显变化。
- 2) 工频击穿电压试验 FS 型避雷器工频放电电压标准:额定电压为 3kV、6kV、10kV,新装和大修后的避雷器为 9~11kV,16~19kV,26~31kV,运行中的避雷器为 8~12kV,15~21kV,23~33kV。
- 3) FZ 型避雷器一般可不做工频放电试验,但要做避雷器泄漏电流测量。

### 2. 安装要求

(1) 避雷器应垂直安装,倾斜不得大于  $15^\circ$ 。安装位置应尽可能接近被保护设备,避雷器与 3~10kV 设备的电气距离,一般不大于 15m,易于检查巡视的带电部分距地面若低于 3m,应设遮栏。

(2) 避雷器的引线与母线、导线的接头长度不应小于 100mm,截面积不得小于规定值(3~10kV 铜引线截面积不小于  $16\text{mm}^2$ ,铝引线截面不小于  $25\text{mm}^2$ )。要求上下引线连接牢固,不得过紧或松动,各金属接触表面应清除氧化膜及油漆。

(3) 避雷器周围应有足够的空间,带电部分与邻相导线或金属构架的距离不得小于 0.35m,底板对地不得小于 2.5m,以免周围物体干扰避雷器的电位分布而降低间隙放电电压。

(4) 避雷器的拉线绝缘子串必须牢固,其弹簧应适当调整,确保伸缩自由,弹簧盒内的螺帽不得松动,要有防护装置,同相各拉紧绝缘子串的拉力应均匀。

(5) 均压环应水平安装,不得歪斜,三相中心孔应保持一致,全部回路(从母线、线路到接地引线)不能迂回,应尽量短而直。

(6) 对 35kV 及以上的避雷器,接地回路应装设放电记录器,而放电记录器应密封良好,安装位置应与避雷器一致,以便于观察。

(7) 对不可互换的多节基本元件组成的避雷器,应严格按出厂编号、顺序进行叠装,避免不同避雷器的各节元件相互混淆和同一避雷器的各节元件的位置颠倒、错乱。

(8) 避雷器底座对地绝缘良好,接地引下线与被保护设备的金属外壳应可靠连接,并与总接地装置相连。

## (三) 运行

### 1. 巡视检查

- (1) 瓷套是否完整。
- (2) 导线与接地引线有无烧伤痕迹和断股现象。
- (3) 水泥接合缝及涂刷的油漆是否完好。
- (4) 10kV 避雷器上帽引线处密封是否严密,有无进水现象。
- (5) 瓷套表面有无严重污秽。
- (6) 动作记录器指示数有无变化,判断避雷器是否动作。

2. 运行 避雷器在运行中应经常进行监视和定期的预防试验,才能使避雷器正常运行。



(1) 动作次数记录器 动作次数记录器是监视避雷器动作次数的主要仪器,一般利用电磁式计数器为计数元件,由避雷器放电电流的能量来推动计数器工作,也可利用放电电流作为触发信号,用其他能源推动计数器工作。

(2) 预防性试验 阀型避雷器的预防性试验的项目及有关规定,见表 9-5。

表 9-5 阀型避雷器预防性试验

试验项目	周 期	规 定 与 要 求
绝缘电阻测量	1. 设备交接时 2. 变电所内避雷器一年 1 次在雷雨季节前 3. 线路上的避雷器 1~2 年 1 次	1. FS 系列的绝缘电阻交接时应大于 5000M $\Omega$ , 运行中应大于 2000M $\Omega$ 。有非线性并联电阻的避雷器的绝缘电阻:与前一次或同一型式的测量数据进行对比,主要检查非线性电阻的通断和接触情况 3. 用 2500V 兆欧表测量
电导电流及非线性差值的测量	1. 设备交接时 2. 每年雷雨季节前	电导电流范围和非线性系数差值,按预防性试验规程或规定,进行测试
无非线性并联电阻的避雷器工频放电电压试验	1. 设备交接时 2. 运行中每 3 年至少 1 次	按预防性试验规程或产品技术条件进行测试

避雷器的电导电流,一般用直流法测量。对运行中的避雷器也可用交流法进行带电测量,但应预先对避雷器在试验室用同一方法进行测量,以获得试验电压与电导电流的关系曲线,供带电测量时对比判断测量结果,常用方法见图 9-20。

(3) 阀型避雷器投入运行时间,应根据当地雷电活动情况来确定,一般在每年三月初到十月投入运行。

(4) 运行前应做的试验项目

1) 用 1000~2500V 兆欧表测量绝缘电阻,测量结果与前一次或同型号避雷器的试验值相比较,绝缘电阻值不应有显著变化。

2) 测量工频放电电压,对于 FS 型避雷器,额定电压为 3kV、6kV、10kV 时,其工频放电电压分别为 8~12kV、15~21kV、23~33kV。

3) FZ 型避雷器一般不做工频放电试验,但应做避雷器的泄漏电流测量。

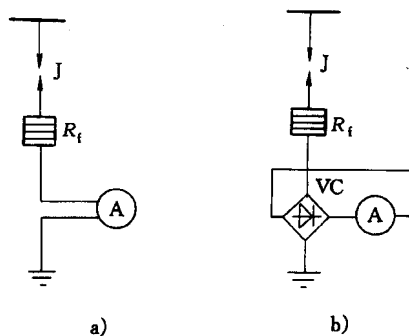


图 9-20 交流法测电导电流原理接线图

a) 峰值电流表法 b) 平均值整流电流表法

## (四) 维修

1. 瓷套及水泥接合缝是否完好。

2. 与避雷器连接的导线、接地引下线有无烧伤痕迹或烧断现象。

3. 瓷套表面有无严重污秽。

4. 属于以下情况的元件不应使用

(1) 严重烧伤的电极；

(2) 严重受潮、膨胀分层的云母垫片；

(3) 贯穿、局部击穿或闪络的阀片；

(4) 严重受潮的低温阀片；

(5) 非线性并联电阻严重老化，电导电流超过运行规程所规定的范围；

(6) 严重老化龟裂或严重变形失去弹性的橡皮密封件；

(7) 开裂的瓷套；

(8) 其他严重损伤的零件。

5. 装配前全部新旧零部件都必须进行烘干处理，并保存在干燥室内备用。

6. 阀片冲击电流残压应进行测量，然后配组，使全部阀片冲击电流残压不大于技术条件规定的残压值；设计续流残压不小于产品的灭弧电阻幅值。若无条件测量残压时，应将每只避雷器内的阀片分别存放，并保持放置方向一致，不能将不同避雷器内的阀片随便混装在一起。

7. 非线性并联电阻配组时，电导电流及非线性系数差值必须符合运行规程的要求。

8. 不能用普通橡胶代替能抗臭氧的氯丁橡胶，由于普通橡胶在臭氧作用下易老化龟裂。

9. 解体检修后的避雷器，应进行下列试验：电导电流试验、工频放电电压试验和密封试验，必要时进行冲击放电电压试验。

## (五) 常见故障分析与处理

1. 阀型避雷器内部受潮

(1) FS 型避雷器 内部受潮的象征是绝缘电阻低于  $2500\text{M}\Omega$ ，工频放电电压下降。

1) 顶部的紧固螺母松动，引起漏水或瓷套顶部密封用螺栓的垫圈未焊死，在密封垫圈老化开裂后，潮气和水分沿螺钉缝渗入内腔。可将螺栓与垫圈焊牢或更换已老化的橡皮垫圈，必要时在瓷套的顶部增加金属帽和橡皮垫圈重新密封，但涂以红色标记的螺母严禁旋动。

2) 底部密封试验的小孔未焊牢堵死，应在密封试验后，将密封小孔及时焊牢或用橡胶堵死。

3) 瓷套破裂，有砂眼，裙边胶合处有裂缝等易于进入潮气及水，应更换瓷套，堵塞胶合处的裂缝。

4) 橡胶垫圈由于使用日久老化变脆而开裂，失去密封作用，应将顶部和底部的垫圈更换为有防臭氧性能的氯丁橡胶垫圈。

5) 底部压紧用的扇形铁片未塞紧，使底板松动，底部密封橡胶垫圈位置不正，造成空隙而渗入潮气及水，应在检修安装时塞紧扇形铁片和放正橡胶垫圈位置。

(2) FZ 型避雷器 内部受潮的特征是绝缘电阻与前次测量结果明显减小，电导电流大于  $0.6\text{mA}$  或与前次测量结果比较明显增加。

1) 密封的小孔未焊好，可在密封试验后及时焊好小孔。

2) 密封垫圈老化开裂失去作用，应更换为氯丁橡胶垫圈。

3) 上下密封底板位置不正，四周密封螺栓受力不均或松动或密封垫圈位置不正，应重新装配，放正密封橡胶垫圈底板位置，在紧固底板时要防止垫圈位移，四周密封螺栓应均匀旋紧，对歪斜过大的底板应进行处理或更换。

4) 瓷套与法兰胶合处不平整或瓷套有裂纹，可加厚密封橡胶垫圈或用一倾斜式密封垫圈加强密封，或重新将瓷套与法兰胶合，更换有裂纹的瓷套。

2. 工频放电电压超过允许范围

(1) FS 型避雷器工频放电电压偏高

1) 云母垫圈受潮膨胀分层，增大了间隙，可更换适当厚度的云母片或将偏高的云母垫圈削薄（厚度不应小于  $0.5\text{mm}$ ）或调整火花间隙。

2) 火花间隙小瓷套破碎，使电极位移，应更换小瓷套，调整间隙的工频放电电压值。

3)内部弹簧压力不足,应更换较大压力的弹簧或用短的干燥阀片,将内部元件垫高,以增加内部压力。

4)搬运时(特别是水平搬运),使间隙发生位移,应注意搬运时必须垂直放置。

(2)FS型避雷器工频放电电压偏低

1)由于间隙多次放电,使电极灼伤产生毛刺,应卸下电极,对轻度灼伤的可用细砂纸砂平毛刺,然后用布轮抛光机抛光,严重灼伤的应更换,装配时必须注意调整间隙的工频放电电压。

2)由于部分间隙短接,应重新组装,排除间隙短接并调整工频放电电压。

3)电极受潮腐蚀生成残留物,绝缘垫圈及火花间隙、小瓷套绝缘下降,使电压分布不均匀,应清洗电极,烘干绝缘垫圈及小瓷套等部件,并调整间隙的工频放电电压。

4)由于弹簧压力过大,使用于固定间隙的小瓷套破裂,间隙变小而使放电距离缩短,可更换弹簧和小瓷套,并重新调整间隙。

3.运行中爆炸

(1)由于中性点不接地系统中发生单相接地,使非故障相对地电压升高到线电压,即使避雷器所承受的电压小于其工频放电电压,而在持续时间较长的过电压作用下,可能会引起爆炸,应排除单相接地点后更换新避雷器。

(2)由于电力系统发生铁磁谐振过电压,使避雷器放电,从而烧坏其内部元件而引起爆炸,应采取相应的预防措施后,更换新避雷器,其预防措施为:

1)在电压互感器一次中性点上接一个电阻(9kΩ、150W)。

2)在母线上接一个电容,使 $X_C/X_L \leq 0.01$ ,其中 $X_C$ 为电容器容抗, $X_L$ 为线路感抗。

3)采用质量较好,铁心不易饱和的电压互感器。

4)提高开关检修质量,使三相同期动作。

(3)线路受雷击时,避雷器正常动作。由于本身火花间隙灭弧性能差,当间隙承受不住恢复电压而击穿时,使电弧重燃,工频续流将再度出现,重燃阀片烧坏电阻,引起避雷器爆炸,或由于避雷器阀片电阻不合格,残压虽然降低但续流却增大,间隙不能灭弧而引起爆炸。应更换新避雷器,并按时对避雷器进行预防性试验,在雷雨季节前投入运行。

(4)由于避雷器密封垫圈与水泥结合处松动或有裂纹,密封不良而引起爆炸。可参阅例1中所述方法进行处理。但对于避雷器内部充有惰性气体(如氮),不易自行修理,应委托供电部门修复,对于充填干燥空气的可拆开修理。

4.避雷器瓷套裂纹 当发现避雷器瓷套有裂纹,应根据现场实际情况进行处理:

(1)向有关部门报告并申请停电,在做好安全措施后,更换故障避雷器。若暂无备品更换,在不威胁供电系统安全运行的前提下,可先采取防止受潮的临时措施(如在裂纹处涂漆或环氧树脂),并尽快在短期内更换新避雷器。

(2)若发现在雷雨天气,应尽量不使避雷器退出运行,待雷雨过后再进行处理。

(3)由于瓷套裂纹而引起放电,但尚未导致发生接地现象时,应设法将故障相的避雷器停用,以免扩大事故范围。

## 二、管型避雷器

管型避雷器是一种利用产气材料产气灭弧的,是电力线路和变电所进线段的保护元件,用于交流系统的过电压保护。

### (一) 结构及原理

管型避雷器由产气管、内部间隙和外部间隙三部分组成,如图9-21所示。内部放电间隙是由棒形电极和环形电极组成。外部放电间隙是起将管型避雷器与线路电压隔离的作用。产气管是用纤维、有机玻璃和可塑物做成,在电弧的作用下能产生大量的气体。

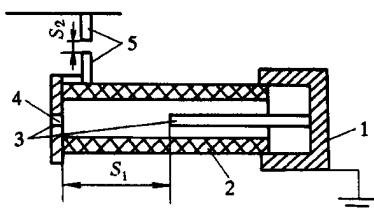


图 9-21 管式避雷器结构原理图

1—端盖 2—灭弧管 3—内电极 4—喷气口 5—外电极  $S_1$ —内(灭弧)间隙  $S_2$ —外(隔离)间隙

当线路遭到雷击时,在强电场的作用下,而大气过电压使内部间隙和外部间隙被击穿,将雷电流通过接地装置引入大地,但随之而来的是供电系统的大量工频续流在管内通过,使管内壁的材料燃烧,产生大量的灭弧气体,形成强烈的弧光。由于管内温度极高,气体压力很大,迅速向管口喷出,形成强烈的吹弧作用,在交流电流过零时电弧熄灭。这时外部间隙的空气恢复了绝缘,使管型避雷器与系统隔离,恢复系统的正常运行。

为了保证管型避雷器的可靠工作,在选择时,开断续流上限,应不小于安装处短路电流最大有效值,开断续流的下限,应不大于安装处短路电流的可能最小值。

管型避雷器外部间隙的最小值为 3kV,8mm;6kV,10mm;10kV,15mm;35kV,100mm。

## (二) 安装

- 管型避雷器的电压等级与安装地点电力系统的电压等级相同。
- 接地引线截面不得小于:铜线  $16\text{mm}^2$ ,铝线  $25\text{mm}^2$ 。
- 为了使外部火花间隙放电时不烧伤导线,应在对准外间隙导线处用铝包带缠绕 150~200mm,而外部间隙不宜垂直安装。
- 管型避雷器应倾斜安装,闭口端固定,开口端对水平线有小于  $15^\circ$  向下的倾斜角。在开口端的喷气范围内(长 1.5m,宽 1m 的喇叭型锥体),不得有其他物体或异相导线而引起相间或对地闪络。
- 各相管型避雷器的喷气范围不得相交,或与接地体碰触。
- 在特殊污秽的安装场所,避雷器应与水平线成  $45^\circ \sim 60^\circ$  的向下倾斜角,以便能在下雨时冲洗掉避雷器表面的积垢。
- 安装前,不得任意拆开、调整灭弧间隙;灭弧间隙喷口处的灭弧管内径应符合使用说明规定。
- 安装前,通过检查确认绝缘管壁无损伤裂痕,漆膜无脱落,管口无堵塞现象,配件齐全,绝缘良好,试验合格。
- 动作指示盖应向下打开。
- 避雷器及支架必须安装牢固,防止由于受反冲力而变形后位移。
- 便于观察和检修。
- 安装点的最大工频电压升高不能超过灭弧电压。
- 无续流避雷器的高压引线与被保护设备的连接线长度应符合使用说明的规定。
- 安装管型避雷器时,必须使排出的游离气体不致造成相间或对地闪络。
- 安装地点电力系统的最大短路电流值,应不大于避雷器的开断电流上限,电力系统的最小短路电流值应不小于避雷器开断电流下限。

## (三) 运行中巡视检查

- 外壳有无裂纹、机械损伤、绝缘漆剥落等现象。
- 安装位置是否正确,开口端是否向下。
- 外部间隙的电极距离有无变动,是否符合要求。
- 排气孔有无被杂物堵塞现象。
- 动作指示器是否动作。

6. 消弧管是否完好。
7. 接地线有无烧伤和熔断现象。

#### (四) 常见故障分析与处理

1. 管型避雷器误动作 管型避雷器一般在室外安装, 由于受风吹雨淋, 管子容易受潮, 受潮后将有可能在工作电压下, 发生电压沿管子表面闪络, 而导致避雷器误动作。因此在使用管型避雷器时, 必须串联一个适当的空气间隙, 即外火花间隙。

2. 管型避雷器动作不准 管型避雷器多次动作后, 由于灭弧管多次在高温下分解大量气体, 管内径扩大, 管壁变薄, 使避雷器不能准确动作。一般规定: 当管型避雷器的管子内径增加到原内径的 1.2~1.5 倍时, 避雷器就不能继续使用, 应予以更换。

### 三、保护间隙

保护间隙是最简单的防雷保护装置, 但自行灭弧能力较差, 用来保护发电厂、变电所的进线段、线路的绝缘弱点、交叉档或大跨越档杆塔。它分为棒形、角形、环形、球形和装在线路绝缘子串上的保护金具等。

#### (一) 结构及原理

放电间隙是由两个金属极组成, 一个电极固定在绝缘子上与导线相接, 另一个电极通过辅助间隙与接地装置连接, 两电极之间应保持规定的间隙距离, 如图 9-22 所示。

在正常情况下, 间隙对地绝缘。当雷击时, 间隙被击穿, 雷电流便被泄入大地, 使线路和电气设备的绝缘不致发生闪络击穿, 起到保护作用。

保护间隙的结构应满足以下条件:

1. 间隙距离稳定不变。
2. 间隙放电动作时, 防止电弧跳到其他设备上去。
3. 防止与间隙并联的绝缘子受热损坏。
4. 间隙正常动作时, 防止电极被烧损而改变原来的间隙距离。

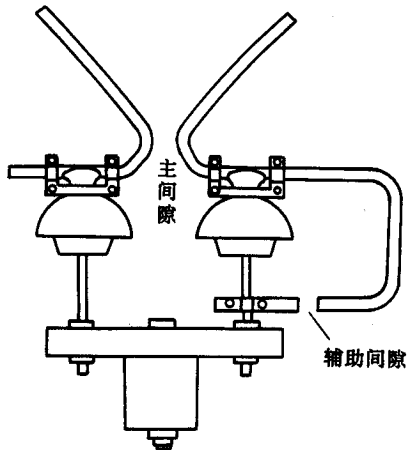


图 9-22 保护间隙的原理结构

5. 间隙电极必须镀锌。

#### (二) 安装

1. 保护间隙应镀锌, 以防止氧化。
2. 安装前应对间隙进行测量, 调整并固定牢固, 其距离见表 9-6。

表 9-6 保护间隙主间隙和辅助间隙的距离

额定电压/kV	3	6	10	35
主间隙距离/mm	8	15	25	210
辅助间隙距离/mm	5	10	10	20

3. 在主间隙上方 1m 以内, 辅助间隙上方 0.3m 以内的空间不应有导线或其他异物, 辅助间隙与周围物体应保持距离为 0.1m。

4. 保护间隙与保护设备之间的距离不得大于 5m。

5. 保护间隙要可靠接地, 接地电阻不得大于  $10\Omega$ ; 接地引下线应与所保护设备的外壳相连接, 接地引下线截面积不得小于: 铜线  $16\text{mm}^2$ , 铝线  $25\text{mm}^2$ 。

6. 由于保护性能差, 灭弧能力小, 容易造成接地或短路故障, 引起线路开关跳闸或熔断器熔断造成停电, 因此对于装有保护间隙的线路, 一般要求装设自动重合闸装置或自重合熔断器与它配合, 以提高供电的可靠性。

7. 对角间隙安装形式的要求。

(1) 主间隙必须垂直向上安装, 两角应张开  $80^\circ \sim 100^\circ$ 。

(2) 辅助间隙采用角间隙时, 两角必须向上垂直安装, 球形电极应对准安装。

(3) 两角必须保持在同一垂直平面内, 不得错开。

(4) 主、辅间隙应尽可能接近, 不得超过 2m。

(5) 角间隙与被保护设备间的距离不应大于 5m。

(6) 保护间隙应有良好的接地装置, 其接地引下线与被保护设备的金属外壳应可靠接地。

(7) 一般都应装在高压熔断器的内侧, 即接变压器的一边。这样在间隙放电后, 熔断器能迅速熔断, 以减少线路断路器的跳闸次数, 并缩小停电范围。

### (三) 运行维护

1. 检查间隙是否被导线短接。

2. 检查间隙有无烧坏及其固定的绝缘子。

3. 动作时是否由于电动力作用改变了主辅间隙距离, 若有变动应及时调整。

4. 接地是否良好。

## 四、避雷器的选择及装设范围

### (一) 选择原则

1. 避雷器灭弧电压不得低于安装地点可能出现的最大对地工频电压。

2. 仅用于保护大气过电压的普通阀型避雷器的工频放电电压下限, 应高于安装地点预期操作过电压, 既保护大气过电压, 又保护操作过电压的磁吹避雷器的工频放电电压上限, 在适当增加裕度后, 不得大于电网内过电压水平。

3. 避雷器冲击过电压和残压在增加适当裕度后, 应低于电网冲击电压水平。

4. 保护操作过电压的避雷器的额定通断容量, 不得小于系统操作时通过的冲击电流。

5. 中性点直接接地系统中, 保护变压器中性点绝缘的阀型避雷器, 可按表 9-7 选择。

表 9-7 直接接地系统中保护变压器中性点绝缘的避雷器

变压器额定电压/kV	110		220	330
中性点绝缘	110kV 级	35kV 级	110kV 级	154kV 级
避雷器型式	FZ-110J FZ-60	暂用 FZ-40 或特殊要求的避雷器	FCZ-110 FZ-110J	FCZ-154J FZ-154J

6. 选择氧化锌避雷器的原则与阀型避雷器基本相同,还应注意下列事项:

- (1) 没有间隙,额定电压不得低于工频过电压。
- (2) 保护水平不考虑间隙的放电电压,仅以各种波形的残压与电网绝缘水平相配合。
- (3) 必须校验通断能力。

## (二) 装设范围

按照过电压保护规程的规定,下列各处应装设避雷器:

1. 变电所每组母线上。
2. 未沿全线装设避雷线的 35~110kV 线路,应装设在木杆或木横担钢筋混凝土杆的首端。
3. 35~110kV 进线的隔离开关或断路器,若在雷雨季节可能经常断路运行,即隔离开关或断路器的电源侧带电,负荷侧不带电,应在靠近隔离开关或断路器处装设避雷器。
4. 变电所的 35kV 及以上电缆进线段,应在电缆与架空线路的连接处装设避雷器,若电缆长度超过 50m,且断路器在雷雨季节可能经常断路运行,应在电缆末端装设避雷器。
5. 要装在自耦变压器两个自耦绕组出线上,对 35kV 及以下自耦变压器,还应在串联绕组的两端跨接阀型避雷器。
6. 变电所的 3~10kV 配电装置的每相母线和每路架空线上。
7. 3~10kV 架空配电网的配电变压器附近。
8. 经常开路运行的 3~10kV 柱上断路器和负荷开关的电源侧,经常闭路运行的 3~10kV 柱上断路器和负荷开关,应在两侧都要装避雷器。
9. 多雷区架空配电网 3~10kV  $Y_{yn}$  和  $Y_y$  接线配电变压器的低压侧。
10. 架空配电网 35/0.4kV 配电变压器高压侧和低压侧均应装设阀型避雷器。
11. 3kV 及以上架空线路的木杆、木横担、线路的个别铁横担、钢筋混凝土杆和铁塔。
12. 与架空电力线路相连接的长度超过 50m 的电缆两端。
13. 单机容量为 300kW 及以上直配电机车间线路的入户处。
14. 每台大容量高压旋转电机的出线处。

# 第十章 机床电气设备安装与维护技术

## 第一节 机床电气设备检查与安全措施

### 一、机床电气设备的检查

#### (一)外观检查

1. 设备应可靠接地,地线应采用多股铜线,其截面积不得小于 $4\text{mm}^2$ 。
2. 设备外表整洁,安装稳固可靠,并能方便拆卸、维修和调整。
3. 所有电气设备、元器件应按图纸要求完整无缺,若要代用,需查阅有关产品目录,应保证主要参数一致或接近。

#### (二)外部配线

1. 配线必须整洁,绝缘无破损现象,可用 $500\text{V}$ 兆欧表测量绝缘电阻值应不低于 $0.5\text{M}\Omega$ 。
2. 电线管应整齐,固定可靠,管子的连接采用管接头,管子终端应安装管扣保护圈。
3. 为避免将电线管与油管或冷却液管混淆,不应把电线管与它们装得很近。
4. 电线可敷设在机床底座内的导线通道内,但必须防止液体、铁屑和灰尘侵入。
5. 导线端头上应有线号,线头弯曲方向要与螺帽拧紧方向一致,多股线端头应压接或烫焊锡。
6. 压接导线的螺钉应有平垫圈和弹簧垫圈。
7. 主电路、控制电路,特别是接地线颜色应有区别。
8. 敷设在易受机械损伤部位的导线,应采用铁管或金属软管保护,而在不可能遭受机械损伤部位的导线,可采用塑料管保护;在发热体上方或旁边的导线,必须加耐热瓷管进行保护。
9. 连接活动部分的导线(如箱门、刀架、溜板箱等)应采用多股软线。对多根导线可用线绳、螺旋管捆扎或用塑料管、金属软管保护,以免损伤。对活动束线应留有一定的弯曲活动长度,保证线束在活动中不受拉力。

#### (三)电气元件的检查

1. 继电器和接触器应外观清洁,电木无烧伤痕迹,触点平整,接触可靠,衔铁动作灵活无粘卡现象,保证三相触点同步通断,在 $85\%$ 的额定电压下能可靠动作,灭弧装置无缺损,可逆接触器应有可靠的机械联锁。
2. 电磁铁的行程不超过规定距离,工作衔铁动作灵活可靠,并无异常响声,在 $85\%$ 额定电压下应能可靠动作。
3. 各种行程开关、按钮等动作灵活,准确可靠。
4. 电气仪表的表盘玻璃完好,表针动作灵活,计量准确。
5. 导线颜色应符合规定。
6. 各导电部分对地绝缘电阻应不小于 $1\text{M}\Omega$ 。



## 二、机床电气安全措施

### (一) 保护接地

保护接地是将电气设备的金属外壳与大地直接连接,使设备漏电时,在外壳上的对地电压限制在安全电压范围以内,避免人身电击的危险。

为了预防机床电气设备在漏电情况下,免遭电击的危险,保护接地电路的连续性必须得到保证,应确保机床接地端子和电气设备任何外露的金属导体之间的电阻值不得大于 $0.1\Omega$ 。接地装置的连接点要采取必要措施(如进行加工,使其金属面平整和采用梅花式弹性垫圈),确保有良好的导电性,同时必须满足以下要求:

1. 所有可拆卸的电器和箱体,必须具备接地螺钉(端子)。
2. 金属软管不准当作地线使用,且必须用管接头和金属管垫使其与机床有良好的导电接触。
3. 在拆掉机床上某一电器时,不得将其他电器的保护接地线拆断。可采用保护地线的树叉式接法。
4. 机床电气设备紧固螺钉,不得用作接地螺钉,反之亦然。而电器的金属底座不得用作接地母线。
5. 一个接地端子只允许接一根保护地线。

### (二) 紧急停车

机床出现不正常的危急情况时,必须采取措施立即停车,以免事态扩大。紧急停车可以用电源开关来实现,也可用急停按钮来实现,对急停器件有以下要求:

1. 手柄或蘑菇头按头必须是红色。
2. 底盘或底面必须是黄色的,其形状不作规定,可以是圆形、正方形或其他形状。
3. 急停器件近旁不需要设任何形象化符号。
4. 急停按钮的按头必须是圆形或蘑菇头形,不许用其他形状,如矩形、方形等。
5. 急停按钮的按头必须突出来。
6. 急停按钮不得用带灯的按头。
7. 急停按钮最好是自锁式的。

### (三) 安全电压

当交流电压低于 $50V$ 和直流电压低于 $120V$ 时,人们接触漏电设备时,不会发生致命危险。

表 10-1 允许的最长的触电持续时间

最长的切断时间/s	接触电压/V		最长的切断时间/s	接触电压/V	
	交流电压	直流电压		交流电压	直流电压
$\infty$	< 50	< 120	0.2	110	175
5	50	120	0.1	150	200
1	75	140	0.05	220	250
0.5	90	160	0.03	280	310

电气设备绝缘失效或损伤而漏电时,保护装置(如漏电保护断路器)应在规定的时间内切断电气设备的电源,以免事态扩大,发生设备和人身事故,而最长的触电持续时间见表 10-1。

### (四) 电源开关

当清扫机床、维修机床或电气设备,以及设备较长时间不使用时,应使机床电气设备与电网隔离,以免发

生人身和设备事故,对电源开关要求如下:

1. 带电端子应加盖,电源开关断电后,仍然带电的部分,必须加绝缘盖防护,以避免偶然触电。盖上还必须贴上三角黑色闪电标志,提醒人们注意。电源开关进线端子必须加盖,如果进线不经电源进线板,而是直接接在电源开关端子上,其电源侧端子必须加绝缘盖板。

2. 必须带锁住机构,以便不用机床时在断开位置上锁住主开关,有些大型机床还应用几把锁,每把锁都有自己的钥匙,分别由使用者掌握。若钳工和电工同时进行同一台机床的维修,他们就得各自有一把锁将电源开关锁住。当两人各自分别完成任务后才把锁打开,这样有利于人身安全。

3. 必须有手动手柄,机床电源开关必须有手动的操作件。

4. 只允许有一个接通位置和一个断开位置,不允许有几个接通和断开位置,也不允许有其他功能的位置。如倒顺开关就不准用作电源开关。

5. 对手动器件,如按钮、选择开关等,在其附近或在元件上,都必须具有清楚、耐久的功能标志。

### (五) 插销用作电源开关

只有满足以下条件,才能用插销作为机床电气设备的电源开关:

1. 电动机总功率不超过 2kW,交流电流不超过 16A(不得用于直流电流)。

2. 插锁必须具备接地极,接地极应长于载流极。

3. 机床电气设备必须具有切断负载的开关,即插销只能作为隔离开关,绝对不允许作为负荷开关用。

4. 必须安装在操作者看得见和摸得着的位置。

5. 电路的电源侧必须连接在插销的插孔上。

### (六) 一台机床可有几个电源开关

按规定以下电路不需经过电源开关:

1. 检修机床时的照明电路。

2. 维修用具的插销电路。

3. 欠压脱扣电路。

4. 与外边控制电路联锁的电路。

这些电路可以有自己主开关,以便不用时切断自己的电源,但这些开关必须连接在电源开关之前,当电源开关切断后,这些分电源开关的端子上还有电压,要求必须遮盖。并在电源开关的旁边加一个说明牌,说明哪些电路在主电源开关切断后仍有电压。

### (七) 电柜

1. 电柜或壁龛上的所有通孔均应密封,应达到防护等级的要求,决不允许与冷却、润滑或油槽(箱)之间有通孔,以防止有害于元器件的工作性能。

2. 电柜或壁龛门的开度应不小于  $95^\circ$ ,从安全考虑,应有门的固定机构,门的宽度不得大于 0.9m,当门用螺钉紧闭时,螺栓头不得装有手柄,以防随便打开电柜的门。

3. 门内和电柜内壁的颜色应为桔黄色。

4. 门上仅能安装人工控制开关、信号和测量器件,人工开关是指按钮开关、电键开关、选择开关不应为手动的电源开关。

5. 对于右开门和双开门的电柜,电源开关最好安装在电柜内右上方,而开关上方最好不要安装其他电器,如果安装有其他电器,电源开关上方必须用绝缘盖板遮挡住,以免发生意外电击危险。

6. 装有电气元件的电柜、壁龛和任何地方,当从电柜、壁龛等外部不能辨别其中是否装有电气元件,必须在门或盖上装有黑边、黄底、黑色闪电符号的三角形标记。

7. 打开电柜必须用钥匙或工具,打开门之前必须先断电源,打开门后,门内所有高于 50V 的带电部分必须加以保护,防止意外触电。

8. 电气设备断电后,若有充了电的元件存在时,应给它并联上放电电阻,使其在 5s 内将电压降到 120V 以下,否则要在门上装警告牌,如果危险电压延伸到电柜外面,必须强制将电压在 5s 内降到 120V 以下。

## (八) 布线色标

保护导线 :黄绿双色线

动力电路的中线、中间线 :浅蓝色

交流或直流动力线 :黑色

交流控制电路 :红色

直流控制电路 :蓝色

与保护导线连接的控制电路 :白色

与电网直接相连的联锁电路 :桔黄色或黄色

## (九) 按钮的颜色

停止或急停按钮 :红色

起动按钮 :绿色

起动与停止交替动作按钮 :黑色、白色或灰色。

点动按钮 :黑色

复位按钮 :蓝色

按钮标记 :起动按钮 I ,停止按钮 O ,起动与停止交替使用按钮 I ,点动按钮 T。

## (十) 光标按钮颜色的含义

红色 :危险或报警

黄色 :警告

绿色 :安全

蓝色 :按照情况需要赋予的特定含义

白色 :未赋予特定含义

# 第二节 机床电气设备故障检修

由于机床电气设备的电气元件种类和规格繁多,不同的机床有不同的电气结构,而引起机床电气线路发生故障的因素也很多,因此机床电气线路往往发生多种难以预料的故障,处理这些故障也存在着很大难度。

电气设备在运行中经常会发生各种各样的故障,当遇到故障时不要盲目的乱找,这样不仅不能迅速排除故障,反而会使故障范围扩大而引起严重事故。因此,要首先了解设备的主要结构和运动形式、电力拖动和控制要求、电气控制线路的分析、基本的单元控制原理以及工艺生产过程或操作方法,掌握基本的检修方法,熟练、准确、迅速、安全地查出故障,并予以排除。

## 一、电气故障的调查

机床出现了故障,首先应向机床操作者详细了解发生故障前的情况,使维修人员能更准确地判断故障可能发生的部位,迅速排除故障。

1. 故障发生在开动前、开动后,还是运行中,是运行中自动停止,还是在异常情况后由操作者停下来的。
2. 发生故障时,机床处于什么工作状态,按了哪个按钮,扳动了哪个开关。
3. 故障发生前后有何异常现象(如声音、臭气、弧光等)。
4. 以前有无发生过类似故障,是如何处理的。
5. 在听取故障介绍时,要正确地分析判断是机械故障还是液压故障,是电气故障,还是综合故障。

## 二、电路分析

根据调查情况,参照电气原理图及有关技术说明书,结合故障现象进行电路分析,判断,初步估计有可能产生故障的部位,是主电路还是控制电路,是交流电路还是直流电路,确定故障性质,逐步缩小故障范围,以便迅速查出故障点并加以排除。

对于复杂的机床电气线路,可将复杂线路分成若干单元,以便分析,并正确判断出故障点。

## 三、断电检查

检查前首先将机床电源断开,必要时取下动力配电箱内的熔断器,在确保安全的情况下,根据不同性质的故障及可能产生故障的部位,有所侧重地进行检查。

1. 检查电线进口处有无损伤,而引起电源接地、短路等现象。
2. 熔断器有无烧损痕迹。
3. 检查配线、电气元件有无明显变形损坏或过热、烧焦和变色而出现臭味。
4. 限位开关、继电保护、热继电器是否动作。
5. 断路器、接触器、继电器等的可动部分,动作是否灵活。
6. 可调电阻的滑动触点,电刷支架是否有窜动而离开原位。
7. 导线连接是否良好,接头有无松动或脱落。
8. 对故障部分导线、元件、电机等可用万用表进行通断检查。
9. 用兆欧表检查电机、控制线路的绝缘电阻,通常不小于  $0.5\text{M}\Omega$ 。

## 四、通电检查

如果断电检查,仍不能找到故障原因,可对电气设备进行通电检查。

1. 切断电动机电源,向控制电路通电,操作按钮或开关,检查控制电路上的接触器、继电器等动作是否正常。如果动作正常,说明故障在主电路,如果不动作或动作不正常,说明故障在控制电路。应进一步找出原因,确定故障点,予以排除。

2. 使用万用表、钳形电流表等测量电压、电流等工作参数,将测量结果与正常值进行比较,从中分析故障原因,并进行排除。

3. 对复杂的电气设备,可将电路划分为若干单元,要真正地检查每个单元,以防止故障点被漏掉。

4. 断开全部开关,取下各熔断器,再按顺序,逐一插入需要检查部位的熔断器,合上开关,观察有无冒烟、冒火、熔体熔断等现象,然后再观察各电气元件是否能按要求顺序动作。并需认真地逐项检查,以免故障范围扩大。

5. 机床的正常运行,是由电气线路和机械系统互相协调配合实现的,机床出现停止运行,不一定是电气原因,也有可能是机械问题所造成的。因此,必要时应与机修人员共同检修。

## 五、故障检修方法

### (一) 试电笔法

试电笔检修断路故障的方法如图 10-1 所示。

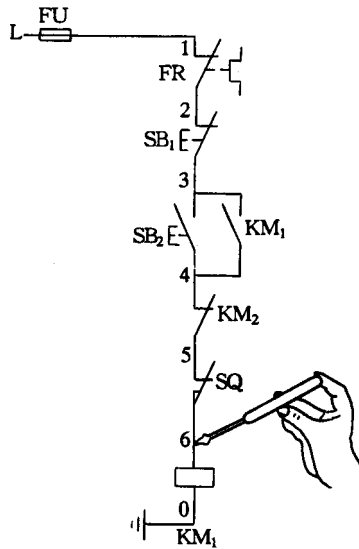


图 10-1 试电笔检修断路故障

用试电笔依次测试 1、2、3、4、5、6 各点，并按下按钮 SB<sub>2</sub>，测量到哪一点试电笔不亮即为断路处。

测试注意事项：

1. 当对一端接地的 220V 电路进行测量时，要从电源侧开始，依次测量，且注意观察试电笔的亮度，防止因外部电场、泄漏电流引起氖管发亮，而误认为电路没有断路。
2. 当检查 380V 并有变压器的控制电路中的熔断器是否熔断时，要防止由于电源电压通过另一相熔断器和变压器的一次线圈回到已熔断的熔断器的出线端，造成熔断器未熔断的假象。

### (二) 校灯法

校灯检查断路故障的方法如图 10-2 所示。

检修时将校灯一端接在 0 上，另一端依次按 1、2、3、4、5、6 次序逐点测试，并按下按钮 SB<sub>2</sub>，若接到 2 号线上校灯亮，而接到 3 号线上校灯不亮，说明按钮 SB<sub>1</sub>(2~3) 断路。

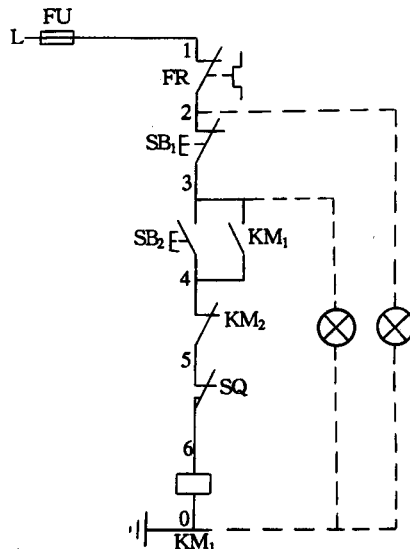


图 10-2 校灯检修断路故障

## 检修注意事项：

1. 用校灯检修断路故障时，应注意灯泡的额定电压与被测电压相配合。如被测电压过高，灯泡易烧坏；如电压过低，灯泡不亮。一般检查 220V 电路时，用一只 220V 灯泡，若检查 380V 电路时，可用二只 220V 灯泡串联。

2. 用校灯检查故障时，要注意灯泡功率，一般查找断路故障时使用小容量（10~60W）灯泡为宜；查找接触不良而引起的故障时，要用较大功率（150~200W）灯泡，这样就能根据灯的亮、暗程度来分析故障。

### （三）万用表法

1. 电压测量法 检修时将万用表的选择开关旋到交流电压 500V 档位。

（1）分阶测量法 电压的分阶测量法如图 10-3 所示。

检查时，首先可测量 1、7 两点间的电压，若为 380V 说明电路正常，然后按住起动按钮  $SB_2$  不放，同时将一表棒接到 7 号线上，另一表棒按 2、3、4、5、6 线号依次测量，分别测量 7、2、7、3、7、4、7、5、7、6 各阶之间的电压，各阶的电压都为 380V，说明电路工作正常，若测到 7、5 电压为 380V，而测到 7、6 无电压，说明行程开关  $SQ$  的常闭触头（5、6）断路。

根据各阶电压值来判断故障的方法见表 10-2。

（2）分段测量法 电压的分段测量法如图 10-4 所示。

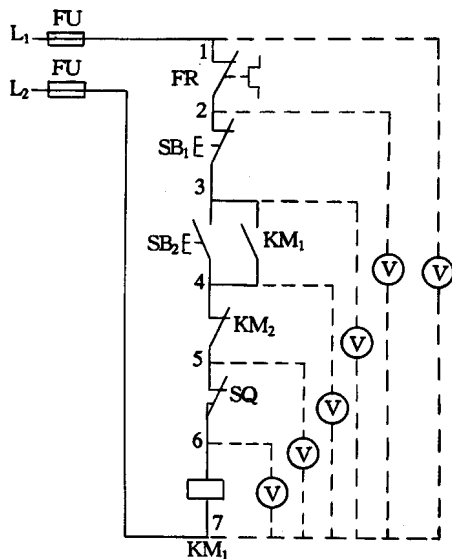


图 10-3 电压的分阶测量法

表 10-2 分阶测量法判断故障原因/V

故障现象	测试状态	7.1	7.2	7.3	7.4	7.5	7.6	故障原因
按下 $SB_2$ 、 $KM_1$ 不吸合	按下 $SB_2$ 不放	380	380	380	380	380	0	$SQ$ 常闭触点接触不良
		380	380	380	380	0	0	$KM_2$ 常闭触点接触不良
		380	380	380	0	0	0	$SB_2$ 常开触点接触不良
		380	380	0	0	0	0	$SB_1$ 常闭触点接触不良
		380	0	0	0	0	0	$FR$ 常闭触点接触不良

检查时，可先测试 1、7 两点间电压，若为 380V，说明电源电压正常。然后逐段测量相邻两线号 1、2、2、3、3、4、4、5、5、6、6、7 间的电压。

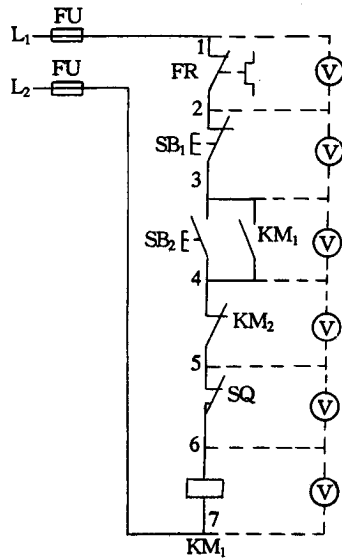


图 10-4 电压的分段测量法

若电路正常,按  $SB_2$  后,除 6、7 两点间的电压为 380V 外,其余任何相邻两点间的电压值都为零。

若按下  $SB_2$ ,  $KM_1$  不吸合,说明有断路故障,这时可用万用表电压档逐段测试各相邻两点间的电压。当测量到某相邻两点间的电压为 380V 时,说明这两点间有断路现象,根据各段电压值来判断故障的方法见表 10-3。

表 10-3 分段测量法判断故障原因/V

故障现象	测试状态	1.2	2.3	3.4	4.5	5.6	6.7	故障原因
按下 $SB_2$ , $KM_1$ 不吸合	按下 $SB_2$ 不放	380	0	0	0	0	0	FR 常闭触点接触不良
		0	380	0	0	0	0	$SB_1$ 常闭触点接触不良
		0	0	380	0	0	0	$SB_2$ 常开触点接触不良
		0	0	0	380	0	0	$KM_2$ 常闭触点接触不良
		0	0	0	0	380	0	SQ 常闭触点接触不良
		0	0	0	0	0	380	$KM_1$ 线圈断路

## 2. 电阻测量法

(1) 分阶测量法 电阻的分阶测量法如图 10-5 所示。

按下  $SB_2$ ,  $KM_1$  不吸合,说明电路有断路故障。

首先断开电源,然后按下  $SB_2$  不放,可用万用表的电阻档测量 1、7 两点的电阻,若电阻为无穷大,说明 1、7 之间电路断路。然后分阶测量 1、2、3、4、5、6 各点间的电阻值。若某两点间的电阻值为 0,说明电路正常,如测量到某线号间的电阻值为无穷大,说明该触点或连接导线有断路故障。

(2) 分段测量法 电阻的分段测量法如图 10-6 所示。

检查时,先切断电源,按下  $SB_2$ ,然后依次逐段测量相邻两线号 1、2、3、4、5、6 间的电阻。若测量某两线号的电阻为无穷大,说明该触点或连接导线有断路故障。如测量 2、3 两线号间的电阻为无穷大,说明停止按钮  $SB_1$  或连接  $SB_1$  的导线有断路故障。

电阻测量法虽然安全,但测得的电阻值不准确时,容易造成错误判断,应注意以下事项:

- 1) 用电阻测量法检查故障时,必须要断开电源。
- 2) 若被测电路与其他电路并联时,必须将该电路与其他电路断开,否则所测得的电阻值误差较大。

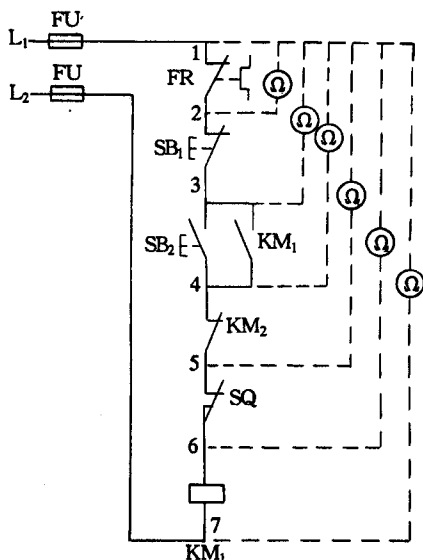


图 10-5 电阻的分阶测量法

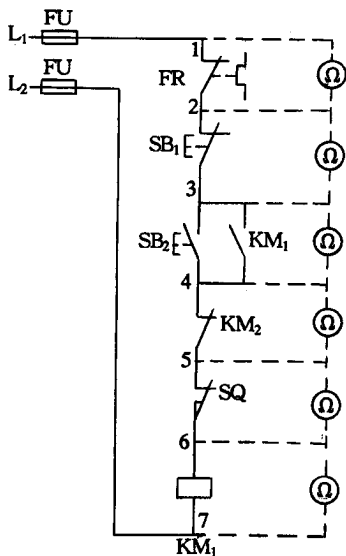


图 10-6 电阻的分段测量法

#### (四) 短接法

短接法是利用一根绝缘导线,将所怀疑断路的部位短接,若短接过程中,电路被接通,则说明该处断路。

1. 局部短接法 局部短接法如图 10-7 所示。按下  $SB_2$  时,  $KM_1$  不吸合,说明该电路有断路故障。

检查时,可先用万用表电压档测量 1、7 两点间的电压值,如电压正常,可按下  $SB_2$  不放,然后用一根绝缘导线,分别短接 1、2 2、3 3、4 4、5 5、6,当短接到某两点时,接触器  $KM_1$  吸合,说明断路故障就在这两点之间。

2. 长短接法 长短接法如图 10-8 所示,长短接法是指一次短接两个或多个触点来检查断路故障的一种方法。

当热继电器  $FR$  的常闭触点和按钮  $SB_1$  的常闭触点同时接触不良,若用上述局部短接法短接 1、2 两点,按下  $SB_2$ ,  $KM_1$  仍然不会吸合,就可能会造成错误判断。而采用长短接法将 1、6 短接,若  $KM_1$  吸合,说明 1、6



两点之间有断路故障,然后再短接 1、3 和 3、6,当短接 1、3 时,按下 SB<sub>2</sub> 后 KM<sub>1</sub> 吸合,说明故障在 1、3 两点之间,再用局部短接法短接 1、2 和 2、3,很快就能将断路故障排除。

短接法注意事项:

- (1) 由于短接法是用手拿着绝缘导线带电操作,因此一定要注意安全,以免触电事故发生。
- (2) 短接法只适用于检查压降极小的导线和触头之间的断路故障。对于压降较大的电器,如电阻、接触器和继电器的线圈、绕组等断路故障,不能采用短接法,否则就会出现短路故障。
- (3) 对于机床的某些要害部位,必须确保电气设备或机械部位不会出现事故的情况下,才能采用短接法。

(六) 检查电路注意事项

- 1. 用兆欧表测量绝缘电阻时,低压系统用 500V 兆欧表,而在测量前应将弱电系统的元件(如晶体管、晶闸管、电容器等)断开,以免造成过电压击穿,损坏元器件。
- 2. 检查时需拆开电机或电气元件接线端子,应在拆开处两端标上标号,不要凭记忆标号,以免出现差错。断开线头要作通电试验时,应检查有无接地、短路或人体接触的可能,尽量用绝缘胶布临时包上,以防止发生意外事故。
- 3. 更换熔体时,要按规定容量更换,不准用铜线或铁丝代替,在未处理故障前,尽可能临时换上规格较小的熔体,以防止故障范围扩大。
- 4. 当电机、电机扩大机、磁放大器、继电器及继电保护装置等需要重新调整时,一定要熟悉调整方法、步骤,应达到规定的技术参数,并作好记录,供下次调整时参考。
- 5. 检查完毕后,应先清理现场,恢复所有拆开的端子线头、熔断器、开关手把、行程开关的正常工作位置,再按规定的方法、步骤进行试车。

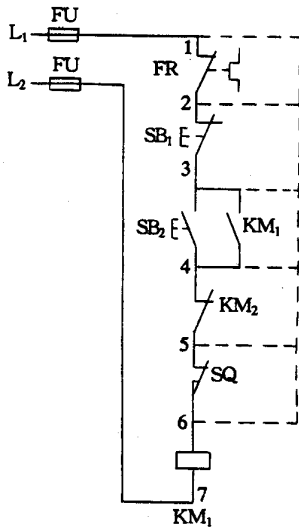


图 10-7 局部短路法

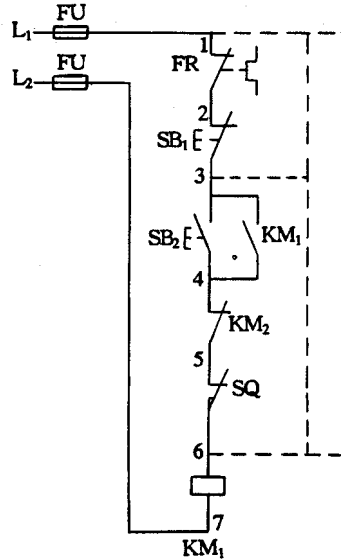


图 10-8 长短接法

## 第二节 常见机床电气设备安装与维护

### 一、铣床的常见故障与处理

#### (一) X8126 型万能工具铣床

X8126 铣床常见故障与处理方法,见表 10-4。

表 10-4 X8126 型铣床常见故障与处理方法

序号	故障现象	故障原因	处理方法
1	主电动机不转	1. 总电源没有接通 2. 熔断器熔体熔断 3. 起动或停止按钮接触不良 4. 起动接触器触点接触不良或线圈烧坏 5. 电动机内部断线或定子绕组烧坏	1. 接通电源总开关,检查三相电源电压 2. 更换熔体 3. 修复或更换按钮 4. 修复触点调整吸合卡住的磁铁或更换线圈 5. 检修电动机定子绕组或内部接线
2	电动机通电后发出“嗡嗡”响声	1. 三相电源缺相 2. 熔断器三相中一相烧断 3. 接触器的主触点有一个烧坏或接触不良	1. 检查三相电源电压 2. 更换熔体 3. 修复烧坏的触点,使其接触良好
3	主电动机起动后,按停止按钮不能停车	1. 停止按钮常闭触点卡住打不开或进水受潮 2. 起动按钮常开触点短路闭合 3. 交流接触器主触点粘连	1. 修复常闭触点或烘干受潮开关 2. 修复或更换常开触点 3. 用组锉修平各触点的接触面,使触点接触良好或更换触点
4	冷却泵电动机不转	1. 转换开关未接通 2. 冷却泵的水轮被杂物卡住 3. 电动机出口线断路或线圈烧坏	1. 接通转换开关 2. 清理卡住水轮的杂物 3. 修复电动机引出线或重绕线圈
5	照明灯不亮	1. 照明回路熔断器熔体熔断 2. 照明变压器线圈烧坏 3. 开关未接通电源 4. 灯泡损坏或线路折断	1. 更换熔体 2. 重新绕制变压器线圈 3. 合上开关 4. 检查线路或更换灯泡

#### (二) X5030 型立式升降台铣床

X5030 立式升降台铣床常见故障与处理见表 10-5 所述内容也适用于 X 130、X 6030 型升降台铣床

表 10-5 X5030 型立式升降台铣床常见故障与处理

序号	故障现象	故障原因	处理方法
1	主电动机不转	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 总电源没有接通</li> <li>2. 熔断器熔断</li> <li>3. 起动按钮接触不良</li> <li>4. 起动接触器不动作或触点接触不良</li> <li>5. 热继电器跳扣或损坏</li> <li>6. 电动机内部断线或烧坏</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 合上总电源开关,将转换开关扳到接通位置</li> <li>2. 更换熔体</li> <li>3. 修复触点</li> <li>4. 检查线圈有无断线或烧坏,磁铁是否卡住,修复或更换触点</li> <li>5. 将热继电器复位或修复更换热继电器</li> <li>6. 接好内部断线或重绕线圈</li> </ol>
2	主电动机起动时发出“嗡嗡”声	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 熔断器断一相</li> <li>2. 接触器主触点一相烧坏或接触不良</li> <li>3. 电动机内部断线</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 更换熔体</li> <li>2. 修复或更换触点</li> <li>3. 接好内部断线</li> </ol>
3	主轴停车或急刹车制动失灵	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 硅二极管烧坏</li> <li>2. 制动接触器不吸合或触点接触不良</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 更换相同规格的二极管</li> <li>2. 检查线圈有无断线或烧坏,修复或更换触点</li> </ol>
4	进给电动机不转	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 主轴电动机没有起动</li> <li>2. 主令开关损坏</li> <li>3. 限位开关损坏或压住,使限位没有复位</li> <li>4. 接触器不动作或触点接触不良</li> <li>5. 热继电器跳扣</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 接通主电动机(只有主电动机启动后才能启动进给电动机)</li> <li>2. 修复或更换开关</li> <li>3. 修复或更换限位开关</li> <li>4. 检查控制线路及线圈是否断线,修复或更换触点</li> <li>5. 将热继电器复位</li> </ol>
5	进给电动机只有一个转向	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 主令开关有部分损坏</li> <li>2. 限位开关中有个别的损坏或压住没有复位</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 修复或更换主令开关</li> <li>2. 检查并使限位开关复位或更换已损坏的限位开关</li> </ol>
6	冷却泵电动机不转	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 冷却泵电动机开关没有接通</li> <li>2. 接触器不吸合或触点接触不良</li> <li>3. 热继电器跳扣</li> <li>4. 电动机内部断线或烧坏</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 将开关扳到接通位置</li> <li>2. 检查线圈有无烧坏,修复或更换触点</li> <li>3. 使跳扣复位</li> <li>4. 接好内部断线或重绕线圈</li> </ol>
7	主回路“放炮”断线	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 主回路接触器相间短路</li> <li>2. 两个接触器粘死</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 修复相间绝缘</li> <li>2. 将粘死的触点拨开,并进行修复或更换触点</li> </ol>
8	控制回路“放炮”断线	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 控制进给的接触器相间短路</li> <li>2. 正反转两个接触器一个粘死,另一个通电,使接触器同时通电造成短路</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 修复相间绝缘</li> <li>2. 修复粘死的触点,并清理污物</li> </ol>

## (三) X52K 立式升降台铣床

X52K 立式升降台铣床常见故障与处理见表 10-6。

表 10-6 X52K 型立式升降台铣床常见故障与处理

序号	故障现象	故障原因	处理方法
1	主电动机不转	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 电源没有接通</li> <li>2. 熔断器熔断</li> <li>3. 主电动机接触器没有吸合或主触点接触不良</li> <li>4. 热继电器跳扣</li> <li>5. 正反转开关没有放到起动作位置</li> <li>6. 电动机故障</li> <li>7. 按钮或冲动开关接触不良</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 检查电源电压,合上电源开关</li> <li>2. 更换熔体</li> <li>3. 检查接触器线圈及触点使其接触良好</li> <li>4. 将热继电器复位</li> <li>5. 将转换开关扳到起动作位置</li> <li>6. 检修电动机</li> <li>7. 检查按钮及冲动开关触点使其接触良好</li> </ol>
2	主电动机不能冲动	由于冲动开关经常受到频繁冲击,使开关位置改变,压不上开关或接触不良	修复或更换开关,并调整好开关动作距离
3	工作台各方向均不进给	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 主电动机没有转动,只有主电动机起动后进给才能工作</li> <li>2. 行程开关位置发生变化或开关被撞坏</li> <li>3. 变速冲动开关在复位时不能闭合或接触不良</li> <li>4. 热继电器跳扣</li> <li>5. 电动机接线脱落或绕组断路</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 按序号 1 进行检查</li> <li>2. 调整行程开关位置或检修开关</li> <li>3. 修整触点使其接触良好</li> <li>4. 将热继电器复位</li> <li>5. 接好引出线或检修电动机</li> </ol>
4	工作台能向左、右进给,不能向前、后、上、下进给	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 限位开关 <math>SQ_{1-2}</math> 或 <math>SQ_{2-2}</math> 触点接触不良或断线</li> <li>2. 操作工作台向前、后或向上、下时,限位开关 <math>SQ_{3-2}</math> 或 <math>SQ_{4-2}</math> 被压开,使两个进给接触器通电回路均被断开</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 检查限位开关触点或接线是否良好</li> <li>2. 调整限位开关位置,使触点接触良好</li> </ol>
5	工作台能向前、后、上、下进给,不能左、右进给	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 限位开关 <math>SQ_{3-2}</math> 或 <math>SQ_{4-2}</math> 触点没有接触或断线</li> </ol>	检查限位开关触点接触情况或将断线接好

序号	故障现象	故障原因	处理方法
6	进给电动机不能冲动	冲动开关位置改变,压不上开关或接触不良	修理或更换开关。并调整好开关动作距离
7	工作台没有快速移动	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 电磁铁线圈损坏</li> <li>2. 由于冲击力大,线圈受到到振动,接线松动,使线路断开</li> <li>3. 快速接触器不吸合或触点接触不良</li> <li>4. 快速按钮接触不良</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 修复或更换线圈</li> <li>2. 使线头接牢</li> <li>3. 检查线圈是否烧坏或修复触点</li> <li>4. 修复或更换触点</li> </ol>

## 二、车床的常见故障与处理

### (一) C3361-1型回轮式六角车床

C336-1 车床常见故障与处理见表 10-7。

表 10-7 C336-1 型车床常见故障与处理

序号	故障现象	故障原因	处理方法
1	接触器不动作或跳动	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 控制按钮失灵</li> <li>2. 控制线路有断路</li> <li>3. 接触器线圈断线</li> <li>4. 接触器的互锁常闭触点接触不良</li> <li>5. 电源缺相</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 检修或更换按钮</li> <li>2. 检查线路</li> <li>3. 检修或更换</li> <li>4. 检修或更换触点</li> <li>5. 检查电源</li> </ol>
2	接触器动作,电动机不能起动,或转速低于额定转速	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 熔断器熔断,或开关、接触器有一相处于开路</li> <li>2. 连接电动机导线断路或接线端子螺钉松动</li> <li>3. 电动机绕组一相断线</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 检查熔断器及各连接点是否接触良好</li> <li>2. 检查各连接点的接触是否良好</li> <li>3. 检修电动机</li> </ol>

序号	故障现象	故障原因	处理方法
3	电动机过热或响声异常	1. 负载过重 2. 电动机轴承损坏 3. 电源缺相 4. 电动机定子绕组短路	1. 减轻切削负荷 2. 更换轴承 3. 检查电源电压 4. 检修电动机
4	没有反接制动或变速手柄回到原位时又能自动启动	1. 行程开关失控 2. 控制线路断线或接触不良	1. 检查行程开关是否完好位置是否正确 2. 检查控制线路有无断线,接触是否良好

## (二) C512 型立式车床

C512 车床常见故障与处理见表 10-8。

表 10-8 C512 型立式车床常见故障与处理

序号	故障现象	故障原因	处理方法
1	电动机不能起动	1. 电压继电器不能吸合 2. 接触器不能吸合或触点接触不良	1. 调整电源电压 2. 检修接触器
2	缺相	1. 三相熔断器脱开或某相熔体熔断 2. 开关或接触器触点接触不良	1. 检查熔断器或更换熔体 2. 检修开关或更换接触器触点
3	接触器或继电器卡住	1. 掉进杂物 2. 衔铁销子断掉 3. 装配不当	1. 清除杂物 2. 更换衔铁销子 3. 重新装配
4	接触器或继电器接触不良	1. 触点上脏物 2. 触点表面有氧化皮	1. 清除脏物 2. 用刷子或砂布清理氧化皮

序号	故障现象	故障原因	处理方法
5	熔断器熔体熔断或过热,热继电器跳开	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 线路中有局部短路</li> <li>2. 电动机过载</li> <li>3. 电源电压过低或过高</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 用兆欧表测量对机壳的绝缘电阻,排除短路故障</li> <li>2. 检查电动机额定电流,减轻负载</li> <li>3. 调整电源电压,不要超过允许波动范围</li> </ol>
6	电动机振动、噪声大	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 电动机转子或转子轴的轴承、风扇、联轴器动平衡精度差</li> <li>2. 电动机支承座安装不平</li> <li>3. 转子与定子之间的电磁扭力往往由于电磁力和机械传动力不一致而引起振动</li> <li>4. 风扇与端盖间隙小</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 重新进行动平衡试验,提高动平衡精度</li> <li>2. 重新安装并在支承座上垫一层10mm厚的减振橡皮</li> <li>3. 提高电动机转子及转子上机件的动平衡精度</li> <li>4. 增大风扇与端盖间隙</li> </ol>
7	电动机发热	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 电动机过载</li> <li>2. 电源电压过高或过低</li> <li>3. 定子铁心的硅钢片间绝缘不良或有毛刺</li> <li>4. 定子和转子相摩擦</li> <li>5. 电动机通风不良</li> <li>6. 定子绕组短路或接地</li> <li>7. 运行中电动机一相断路</li> <li>8. 绕线转子的绕组的焊接点脱落,使转子过热,且转速显著降低</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 减轻负荷或更换容量较大的电动机</li> <li>2. 调整电源电压</li> <li>3. 检修定子铁心</li> <li>4. 检查铁心是否变形,轴是否弯曲、轴承是否磨损,端盖止口有无松动</li> <li>5. 检查风扇是否装好,风扇有无脱落,通风口有无堵塞</li> <li>6. 用电桥测量各相线圈直流电阻,或用兆欧表测量对机壳的绝缘电阻</li> <li>7. 检查三相电源电压和电动机绕组</li> <li>8. 检查各焊接点,将脱焊点重新焊牢</li> </ol>
8	电动机空载或加负载时三相电流不平衡	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 三相电源电压不平衡</li> <li>2. 定子绕组局部短路</li> <li>3. 绕组重绕后,匝数不对</li> <li>4. 绕组重绕后,接线错误</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 检查电源电压</li> <li>2. 测量三相电流,检修短路线圈</li> <li>3. 用电桥测量各相绕组直流电阻</li> <li>4. 改正接线</li> </ol>

### (三) C5263 型立式车床

C5263 立式车床的工作台直流控制系统常见故障与处理方法,见表 10-9。

表 10-9 C5263 立式车床 KT 系列晶闸管直流调速系统常见故障与处理

序号	故障现象	故障原因	处理方法
1	电动机不能起动	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 熔断器熔体熔断, 磁场未产生电流</li> <li>2. 速度给定电压未加至速度调节器</li> <li>3. 触发脉冲回路故障</li> <li>4. 控制用稳压电源故障</li> <li>5. 电流调节器输出始终为负向限幅值</li> <li>6. 切换逻辑故障 <math>U_A</math> 不能撤消</li> <li>7. 运转指令逻辑故障 <math>V_4</math> 始终导通</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 检查熔断器及磁场电路</li> <li>2. 按下起动按钮后, 检查速度调节器的输出孔有无电压, 若无电压应检查: 给定电源电压是否正常; 继电器 <math>KA_1</math>、<math>KA_2</math> 是否动作; 调速电位器进线有无掉线</li> <li>3. 检查触发电压, 正常值为 16V; 电源线有无断线</li> <li>4. 检查稳压电源电压, 正常值为 <math>\pm 12V</math>; 电源线有无断线</li> <li>5. 按起动按钮后, 如速度调节器输出为正值, 检查电流调节器输出为负值, 说明电流调节器有故障</li> <li>6. 对照切换逻辑动作图表, 检查逻辑单元 LKI、LK II</li> <li>7. 检查逻辑单元 LK III</li> </ol>
2	电动机一起动熔断器熔体熔断	电流反馈回路断线	检查电流反馈
3	电动机降速或停车过程中熔断器熔体熔断	逆变失败	检查脉冲有无丢失, 检查 $\beta_{\min}$ 是否变小, 若小于 $20^\circ$ , 在高速下有可能引起逆变失败
4	晶闸管整流桥波形缺相	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 桥臂熔断器熔断</li> <li>2. 移相触发器故障</li> <li>3. 脉冲分配器故障</li> <li>4. 晶闸管整流器损坏</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 检查更换熔断器</li> <li>2. 检查移相触发器输出波形</li> <li>3. 检修脉冲分配器</li> <li>4. 检修晶闸管整流器</li> </ol>
5	晶闸管整流桥输出电压波形不对称	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 电流互感器故障</li> <li>2. 电流反馈回路故障</li> <li>3. 给定电源故障, 脉冲太大</li> <li>4. 测速发电机励磁电路滤波电容失效</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 检查电流互感器二次绕组电阻值, 正常时为 <math>37\Omega</math> 左右。</li> <li>2. 检查互感器出线有无断线; 电流反馈整流桥元件有无损坏</li> <li>3. 检查给定电源电压是否脉动, 正常脉动在 <math>20mV</math> 以下</li> <li>4. 检查更换滤波电容</li> </ol>



序号	故障现象	故障原因	处理方法
6	电动机不能制动	1. 切换逻辑故障 在需要制动时 $U_A$ 不能撤消 2. 若在一个方向不能制动 ;另一方向不能起动 ,可能是切换逻辑中的电子开关故障	1. 检查切换逻辑电路 2. 检查 LK II 中的 $V_{17}$ 、 $V_{19}$ ,拔出移相触发器 ,按正向起动按钮 ,此时 $V_{19}$ 输出端 3、13 和控制电源零线间电压约为 12V ,若小于 10V 即不正常 ,按反转按钮 , $V_{17}$ 的情况也与此相同
7	速度不稳定	1. 如在空载时速度不稳 ,加负载后又变正常了 ,可能是电流自适应故障 2. 测速发电机和拖动电机的机械连接不良 3. 速度反馈电路接触不良	1. 观察电流调节器面板上自适应测试孔的波形呈开关波形为正常若呈一条直线即有故障 ,并检查三极管 $V_4$ 是否损坏 2. 检查机械连接是否打滑 ,不同心连接间隙太大 3. 检查线路连接处有无松动 ;测速发电机电刷与换向器接触是否良好 ;测速发电机电枢回路中正反向接触器触点接触是否良好

### 三、磨床的常见故障与处理

#### (一) M1432A 型外圆磨床

M1432A 外圆磨床常见故障与处理见表 10-10。

表 10-10 M1432A 型外圆磨床常见故障与处理

序号	故障现象	故障原因	处理方法
1	机床不起动	1. 油泵没有开启或油泵接触器联锁触点接触不良 2. 短路、过载保护装置容量配备不当 3. 控制电压与接触器线圈电压不一致	1. 先检查油泵接触器通电动作情况 ,再检查油泵电动机三相电压是否正常或检修更换触点 2. 检查熔断器是否熔断 ,热继电器有无跳扣或容量配备是否恰当 ,如有不符应进行调换 3. 检查控制电压与接触器线圈电压是否相符 ,应匹配一致

序号	故障现象	故障原因	处理方法
2	机床带电	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 没有使用网络中性线</li> <li>2. 接地线线径太小或接触不牢</li> <li>3. 使用场地过分潮湿,有腐蚀性气体影响</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 要装接接地线</li> <li>2. 按规定线径进行接地并接线要牢固</li> <li>3. 机床周围要保持清洁、干燥、尘污少</li> </ol>
3	内圆磨头电动机不起动	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 内外圆电动机联锁装置不好</li> <li>2. 内圆电动机本身质量问题</li> <li>3. 内圆电动机保护装置有问题</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 检查行程开关和电磁铁的联锁动作是否正常</li> <li>2. 检测电动机三相绕组绝缘电阻是否正常,并校验动平衡</li> <li>3. 检查热继电器容量是否正确若有跳扣应复位</li> </ol>
4	砂轮架进时,头架与水泵电动机不转	砂轮与头架联锁装置不好	检查联锁装置行程开关的安装部位是否正确,接触是否良好,检查头架与冷却泵的主令开关是否处于接通位置
5	油泵电动机声音异常或有间断撞击声	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 使用场地潮湿、腐蚀,致使铁屑、污物,进入内部,引起阻塞</li> <li>2. 三相电压不均匀</li> <li>3. 轴承内润滑油硬化或渗入金属屑等污物</li> <li>4. 定子与转子发生摩擦</li> <li>5. 风扇碰罩壳</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 清除铁屑污物,潮湿应烘干</li> <li>2. 三相绕组电阻应均匀,三相电压均匀并正常,三相空载电流应小于额定电流的50%</li> <li>3. 清洗或更换轴承</li> <li>4. 检查转子是否同心,保证定子与转子间隙为0.3mm左右</li> <li>5. 调整风扇与罩壳的间隙</li> </ol>

## (二) M7130 型卧轴矩台平面磨床

M7130 型卧轴矩台平面磨床常见故障与处理见表 10-11。

表 10-11 M7130 型卧轴矩台平面磨床常见故障与处理

序号	故障现象	故障原因	处理方法
1	各电动机均不能起动的	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 电磁吸盘参加工作时,欠电流继电器没有动作或触点接触不良</li> <li>2. 电磁吸盘不参加工作时,转换开关未拨到退磁位置,或接触不良</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 调整欠电流继电器动作值,检修或更换触点</li> <li>2. 将开关扳到退磁位置或检修开关</li> </ol>

序号	故障现象	故障原因	处理方法
2	砂轮电动机过载保护热继电器经常脱扣	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 砂轮进刀量太大,使电动机超负荷运行,电流急剧上升</li> <li>2. 热继电器选择规格太小或调节不当</li> <li>3. 由于装入式电动机前轴承是铜瓦,易磨损发生堵转,电流增大</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 减小进刀量,防止电动机过载</li> <li>2. 按电动机额定电流进行选择和调整</li> <li>3. 及时检修或更换被磨损的轴瓦</li> </ol>
3	冷却泵电动机容易烧坏	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 冷却液浸入电动机内部,造成匝间或绕组间短路</li> <li>2. 反复修理后,使端盖止口间隙增大,转子在定子内不同心</li> <li>3. 冷却泵被脏物堵塞,电动机产生堵转</li> <li>4. 由于砂轮电动机与冷却泵电动机共用一个热继电器,电动机容量相差太大,电流增大不能使热继电器脱扣</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 防止冷却液浸入电动机内部</li> <li>2. 更换端盖止口,并进行动平衡试验</li> <li>3. 清除脏物</li> <li>4. 应装设单独的热继电器进行过载保护</li> </ol>
4	电磁吸盘无吸力	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 整流变压器没有输出电压</li> <li>2. 整流桥元件损坏无直流输出</li> <li>3. 欠电流继电器线圈断开</li> <li>4. 插销接触不良</li> <li>5. 整流桥熔断器熔断</li> <li>6. 电磁吸盘本身故障</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 检修变压器</li> <li>2. 检查或更换整流元件</li> <li>3. 接好线圈线</li> <li>4. 修复或更换插销</li> <li>5. 检查并更换熔体</li> <li>6. 检修电磁吸盘</li> </ol>
5	电磁吸盘吸力不足	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 整流器空载输出电压太低</li> <li>2. 接负载后电压太低</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 用万用表直流档测量空载输出电压应为 130 ~ 140V,若太低可检查或更换二极管</li> <li>2. 接负载时直流电压不低于 110V,若太低是吸盘线圈短路,应修复或更换电磁吸盘线圈</li> </ol>
6	电磁吸盘退磁不好,工件取不下来	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 退磁电压过高</li> <li>2. 退磁电阻损坏或线路断开,无法进行去磁</li> <li>3. 没有掌握好退磁时间</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 检查或更换退磁电阻,把退磁电压调至 5 ~ 10V</li> <li>2. 更换电阻或接通线路</li> <li>3. 对于不同材质工件,应掌握退磁时间长短</li> </ol>

### (三) Y7520W 型螺纹磨床

Y7520W 型螺纹磨床常见故障与处理见表(10-12)。

表 10-12 Y7520W 型螺纹磨床常见故障与处理

序号	故障现象	故障原因	处理方法
1	合上电源开关,指示灯 HL <sub>1</sub> 不亮	1.熔断器 FU <sub>4</sub> 熔断 2.指示灯接触不良或灯泡烧坏	1.更换熔体 2.检修或更换灯泡
2	部分或全部电动机不能起动	1.熔断器熔断 2.某一电动机过载热继电器脱扣 3.直流电源故障	1.更换熔体 2.找出过载原因,调节负荷并将热继电器复位 3.检修整流设备,使输出电压为 115V
3	主轴润滑泵运转已久,而指示灯 HL <sub>2</sub> 不亮	1.水银开关 SL 位置未调整好 2.指示灯接触不良或灯泡损坏	1.调整好水银开关位置 2.检修或更换灯泡
4	磨削内螺纹时,砂轮不能起动	砂轮上微动开关 SQ <sub>4</sub> 位置未调整好或接触不良	调整其位置并检查接触情况,而超行程量不宜大于 2mm
5	继电器 KA <sub>8</sub> 、KA <sub>9</sub> 不动作,工作台(头架)不能起动	1.换向开关 SQ 撞块未调整好或接触不良 2.微动开关 SQ <sub>1</sub> 、SQ <sub>2</sub> 、SQ <sub>5</sub> 或 SQ <sub>6</sub> 失灵	1.调整好撞块或检修换向开关的触点 2.检修、调整各微动开关
6	自动润滑失灵	时间继电器 KT 故障	调节检修时间继电器的线圈、泄气室、微动开关或更换
7	工作台速度很快,而无法用电位器调节	1.测速发电机电刷接触不良 2.测速发电机励磁回路故障	1.检查电刷接触情况,并修磨、调整好压力 2.检查励磁绕组及 R <sub>6</sub>
8	电机扩大机有输入信号,但无法建立电枢端电压	1.交轴或顺轴电刷接触不良或损坏 2.补偿状态没有调整好 3.补偿绕组分流硒堆老化或击穿	1.检查电刷,调整压力或修磨换向器,保证接触良好 2.用改变补偿绕组分流电阻的大小所达到的调节补偿一般为欠补偿 3.调整串联片数或更换,使电枢回路的截止电流小于 12A
9	最高转速、最低转速或转速级数与规定不符	粗调节电阻组未调整好	粗调节速度是按几何级数分级的,调整时应从小到大逐点用电桥校正

序号	故障现象	故障原因	处理方法
10	最高工作转速的调整不良	测速反馈信号大小与电机励磁电压调节不当	当两调节电位器都移向最高转速位置后,改变 $R_7$ 大小,使最大主控制信号为 110V,再调 $R_6$ 使测速发电机励磁电压达到 50V 左右,此时可调节 $R_2$ 使电动机励磁绕组电压为 110V 左右
11	最低转速达不到要求	调节电位器部分损坏或阻值调节不当	最低转速由 $R_{10}$ 决定,一般整定为 600 $\Omega$ ,最低转速达不到要求,可调节 $R_{10}$ ,但其值应在 550 ~ 650 $\Omega$ 之间,若还达不到,应适当改变粗调电位器的第一级电阻来获得
12	工作台速度时快时慢	整流电路电压稳定器失效	检修或更换电压稳定器 TS
13	工作台快速运动失灵或速度不正常	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 微动开关 <math>SQ_3</math> 失灵</li> <li>2. 电阻 <math>R_1</math> 或 <math>R_5</math> 未调整好</li> <li>3. 继电器 <math>KA_2</math> 或 <math>KA_7</math> 触点工作不正常</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 检修调整工作状态</li> <li>2. 先调整 <math>R_5</math> 削弱测速反馈信号,使电机扩大机输出为 160V 再调整 <math>R_1</math> 削弱电动机磁场,使电动机的转速升高到规定值</li> <li>3. 检修或更换元件</li> </ol>
14	铲磨时,快速运动不正常	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 铲磨开关 <math>SQ_7</math> 或铲磨继电器 <math>KA_7</math> 工作不正常</li> <li>2. 电阻 <math>R_8</math> 没有调整好</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 检修调整工作状态或更换元件</li> <li>2. 调整时先将电位器扳到最快位置,改变 <math>R_8</math> 大小,使工件达到允许最高转速</li> </ol>
15	工作台电动机软弱无力,较微弱的负载力矩即将电动机制动	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 电机扩大机交轴回路故障</li> <li>2. 直流电机主回路接线接触不良</li> <li>3. 电子管放大器电压或功率放大倍数显著减小</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 检查交轴电刷,导线有无松动或断路</li> <li>2. 紧固导电螺钉</li> <li>3. 检查电子管是否老化或更换管子,检查绝缘、发热是否正常</li> </ol>
16	直传动电机周期性振荡	电容器 $C_{18}$ 断路	更换电容器

序号	故障现象	故障原因	处理方法
17	测速表无读数	1. 换向触点接触不良 2. 电位器或电阻损坏 3. 转换开关 SA <sub>12</sub> 接触不良 4. 电表损坏	1. 检查调整触点工作状态 2. 检查后更换 3. 检修或更换触点 4. 检修或更换
18	低速蠕动	电机扩大机剩磁激励电枢电压引起电机低速蠕动	通过 RP <sub>3</sub> 、R <sub>38</sub> 所组成的电压负反馈回路加以抑制
19	电子管放大器失灵	部分元件或线路损坏	检查更换元件,调整时应特别注意对称和平衡问题

## 四、钻床电气设备安装与维护

钻床的结构型式很多,有立式钻床、卧式钻床、深孔钻床和多轴钻床等。摇臂钻床是一种立式钻床,由于它的运动部件较多,常采用多电动机拖动。现以 Z35 型摇臂钻床为例,说明钻床电气系统的一些特点。

### (一) Z35 型摇臂钻床

#### 1. 电力拖动和控制要求

(1) 电力拖动 由于摇臂钻床运动部件较多,如主轴的旋转、摇臂沿外立柱垂直移动、摇臂与外立柱一起相对于内立柱的回转移动、主轴的垂直移动(进给运动)等,因此采用多电动机拖动。

为了满足攻丝,要求主轴能够实现正反转和调速,主轴由立式电动机 M<sub>2</sub> 拖动,通过改变摩擦离合器的手柄位置来实现正反转,因此对主电动机只要求单方向运转,为满足不同钻削速度和进给速度的要求,通过改变主轴箱中的齿轮传动比来实现。

摇臂升降由摇臂升降电动机 M<sub>3</sub> 拖动,依靠电动机的正反转来实现摇臂升降。当升降完毕时,要求摇臂自动夹紧在立柱上。

摇臂绕立柱的回转,在外立柱松开后由人力作用进行,而立柱的夹紧、放松由电动机 M<sub>4</sub> 的正反转经液压装置来实现。

M<sub>1</sub> 是冷却泵电动机,为加工工件时输送冷却液。

#### (2) 控制要求

1) 零压保护 由十字开关与零压继电器 KA 完成的。

2) 必要的限位保护 用限位开关 SQ<sub>1</sub> 作为摇臂上下移动的极限位置保护。

3) 具有短路保护、过载保护和联锁。

#### 2. 电气控制线路分析

Z35 型摇臂钻床电气控制原理如图 10-9 所示,为了操作方便,采用十字开关 SA,十字开关是由四个微动开关和操作手柄组成。操作手柄有五个位置,即左是控制零压保护,右是控制主轴旋转,上是控制摇臂上升,下是控制摇臂下降。当操作手柄在某一位置时,四个微动开关只有一个接通,其余都处于断开状态。当操作手柄在中间位置时,四个微动开关都不通。

(1) 冷却泵电动机 M<sub>1</sub> 的控制 利用转换开关 SQ<sub>2</sub> 直接控制。当电源总开关 SQ<sub>1</sub> 合上后,再将 SQ<sub>2</sub> 合上,

电动机  $M_1$  运转, 断开  $SQ_2$ ,  $M_1$  停转。

(2) 零压继电器  $KA$  的作用 将十字开关扳向左面  $\rightarrow SA$  接通  $\rightarrow KA$  线圈得电  $\rightarrow KA$  触点闭合自锁 (为控制电路接通电源作好准备)。

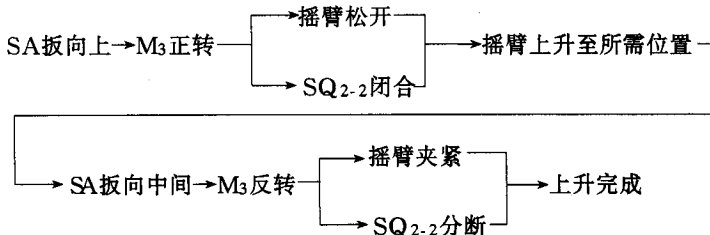
机床在工作中, 由于某种原因, 线路突然断电时, 继电器  $KA$  线圈失电, 自锁触点分断。当电压恢复时  $KA$  不能自行获电, 若要通电, 必须将十字开关重新扳到左边位置, 起到了零压保护作用。

(3) 主轴电动机  $M_2$  的控制 将十字开关扳向右面  $\rightarrow SA$  接通  $\rightarrow KM_1$  线圈得电  $\rightarrow KMI$  主触闭合  $\rightarrow M_2$  运转。

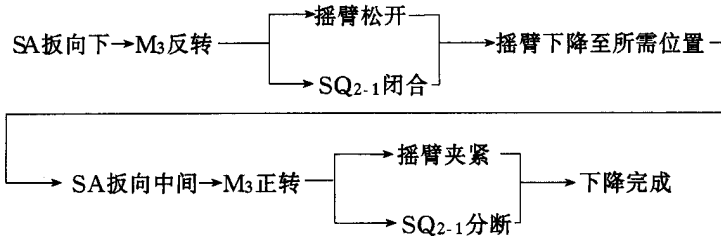
主轴的旋转方向由主轴箱上的摩擦离合器手柄来操作。

(4) 摇臂升降的控制 摇臂的升降是由电气和机械联合控制的, 其工作过程如下:

摇臂上升:



摇臂下降:



当十字开关在上升位置时, 升降电动机  $M_3$  转动, 带动升降丝杆旋转。升降丝杆在开始转动时, 升降螺母随着丝杆一起转动, 此时升降螺母空转, 摇臂不上升, 而辅助螺母沿着丝杆向上移动, 通过拨叉向逆时针方向旋转, 带动扇形压紧扳轴, 使夹紧装置把摇臂松开。在辅助螺母向上移动的同时, 将传动条向上移动到与升降螺母相接触, 卡住升降螺母, 这时升降螺母不再空转, 摇臂便在升降螺母带动下开始上升。在辅助螺母向上移动时, 还通过拨叉转动  $SQ_2$  的轴, 使  $SQ_{2-2}$  闭合, 作好夹紧准备。

当摇臂上升到预定位置时, 将十字开关手柄扳到中间位置, 由于  $SQ_{2-2}$  已闭合, 这时升降电动机停止后再反转, 拖动升降丝杆反向旋转, 将摇臂夹紧, 同时带动  $SQ_2$  的轴, 使  $SQ_{2-2}$  断开, 升降电动机停转。

(5) 摇臂回转夹紧的控制 摇臂的回转是在外立柱松开的前提下用人力推动摇臂转动。而立柱的夹紧与松开是由电动机  $M_4$  经液压机构来完成的。

当需要摇臂绕立柱转动时, 应先按下按钮  $SB_1$ , 使电动机  $M_4$  转动, 并通过齿轮式离合器拖动齿轮式油泵, 送出高压油, 经油路系统和传动机构将外立柱松开。这时可松开  $SB_1$ ,  $KM_4$  断电, 电动机  $M_4$  停转。从而可在人力推动下使摇臂和外立柱绕内立柱转动, 当转到所需的位置时, 再按  $SB_2$ ,  $KM_5$  线圈通电, 电动机  $M_4$  反转, 在液压机构作用下使立柱夹紧。松开  $SB_2$ ,  $KM_5$  断电, 电动机  $M_4$  停转。

(6) 照明电路 由变压器  $TC$  将 380V 电压降为 36V, 供给照明电路, 用开关  $QS_3$  控制照明。

### 3. 常见故障分析与处理

#### (1) 主轴电动机不起动

1) 总熔断器熔断, 应更换熔体。

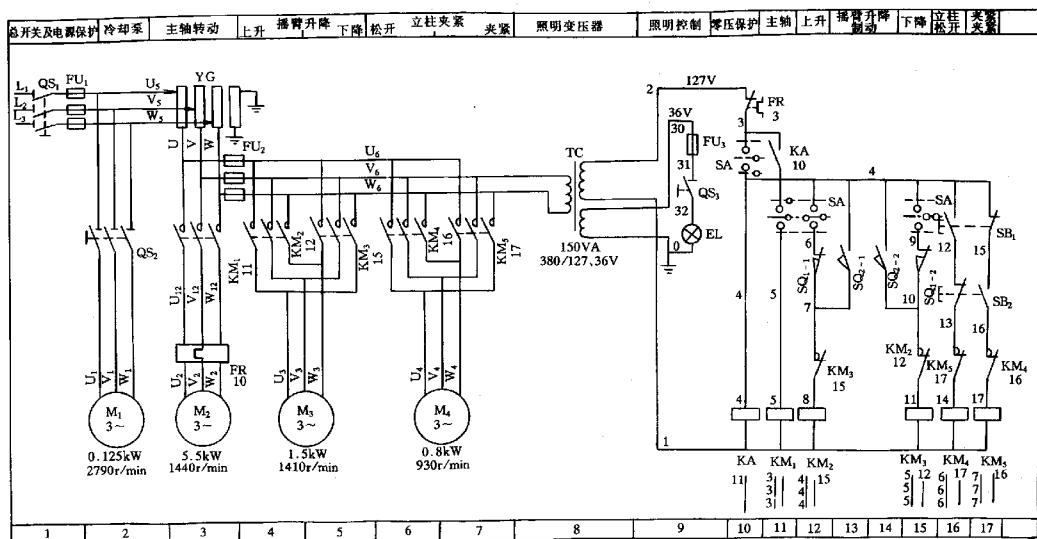


图 10-9 Z35 型摇臂钻床电气原理图

- 2) 摇臂升降电动机电路中熔断器熔断,应更换熔体。
- 3) 操作不当,十字开关未经过零位就扳向主轴旋转位置,应正确操作。
- 4) 十字开关接触不良,应检修开关触点,严重损坏的要更换。
- 5) 接触器没有动作或主触点接触不良,应检查线圈回路或修复更换触点。
- 6) 热继电器脱扣,可手动复位,并按规定整定动作值。
- 7) 电动机本身损坏,应检修或更换电动机。

(2) 摇臂放松夹紧过程与机械夹紧动作不协调

- 1) 自动夹紧微动开关位置调整不当,当摇臂升降到位,十字开关扳回中间位置时,升降电动机不能反向运转,使机械夹紧无法动作,应调整微动开关到合适位置。摇臂夹紧时使微动开关两个常开触点断开;在摇臂放松上升时,下降线圈电路中微动开关常开触点处于闭合;在摇臂放松下降时,上升线圈电路中微动开关常开触点处于闭合。
- 2) 夹紧过程中,电动机反转时间长短不当,使机械夹紧机构未处于最佳夹紧位置,应微调微动开关,使电动机反转停止时机械夹紧机构中的扇形凸轮最高点刚好顶在夹紧拉杆上,达到最大夹紧力。

(二) Z3040 型摇臂钻床

Z3040 型摇臂钻床常见故障与处理见表 10-13。

表 10-13 Z3040 型摇臂钻床常见故障与处理

序号	故障现象	故障原因	处理方法
1	摇臂不能升降	1. 行程开关 SQ <sub>2</sub> 未动作或接触不良 2. 新安装时或大修后,电源相序接反,使液压泵电动机反转,摇臂夹紧,压不上 SQ <sub>2</sub> 3. 液压系统故障,如液压泵不转,油路堵塞或气温太低时油的粘度增大	1. 应调整好 SQ <sub>2</sub> 的位置并紧固 2. 调换电源相序 3. 认真检查液压系统或改善环境温度减小油的粘度



序号	故障现象	故障原因	处理方法
2	摇臂升降到预定位置后,摇臂夹不紧	<ol style="list-style-type: none"> <li>1.行程开关 <math>SQ_3</math> 过早动作,使液压泵电动机在未完成夹紧之前提前断电</li> <li>2.夹紧力量不够</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1.调整 <math>SQ_3</math> 的固定位置,保持合适的动作距离</li> <li>2.检查液压系统,如活塞杆阀心卡住或油路堵塞</li> </ol>
3	立柱、主轴箱不能夹紧或松开	<ol style="list-style-type: none"> <li>1.夹紧或松开接触器不能吸合或触点接触不良</li> <li>2.油路堵塞</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1.检查按钮接线,接触情况是否良好</li> <li>2.请液压、机械修理人员进行检修</li> </ol>
4	摇臂上升或下降限位开关失灵	<ol style="list-style-type: none"> <li>1.限位开关损坏,触点不能因开关动作而闭合,接触不良,使线路断开</li> <li>2.限位开关不能动作,触点熔焊,使线路始终呈接通状态</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1.检修或更换限位开关</li> <li>2.检修或更换触点</li> </ol>
5	主轴电动机刚旋转,熔断器就立即熔断	<ol style="list-style-type: none"> <li>1.机械机构正反向时,发生卡住现象</li> <li>2.钻头被铁屑卡住,进给量太大</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1.排除机械卡住故障</li> <li>2.减小进给量,随时清理铁屑</li> </ol>
6	按起动按钮,立柱、主轴箱能夹紧,但松开按钮后,主轴、立柱就松开	<ol style="list-style-type: none"> <li>1.机械菱形块和轴承块的角度方向装错</li> <li>2.菱形块的距离不当,使其不能立起来</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1.改变菱形块的安装方向</li> <li>2.调整其距离,使夹紧力不宜太大</li> </ol>

# 第十一章 架空线路的安装 运行与维护技术

城市中架空线路的安装日益困难,但架空线具有建设费用省、建设周期短、负荷支接方便、易于故障修理等优点,因此还是最实用的供电方法。过去我国城市中大多以架空电网为主。近年来才由于负荷的急剧增长和城市规划、改革开放的需要,逐步增长了电缆的比重。但在负荷增长迅速、电网建设工程量大、供电进度上出现矛盾时,首先考虑架空线或绝缘架空线路供电还是有实际意义的。

## 第一节 低压架空线路设计

### 一、低压架空线路的设计内容

#### (一) 架空线路路径的选择

架空线路在地面上所经过的地带称路径。选择路径时,必须对现场进行全面勘测,同时要符合下列要求:

1. 路径短,转角少,便于运输、施工和维护。
2. 与城镇及农田基本建设规划相协调,尽量少占农田和不应引起机耕、交通和人行困难。
3. 尽量避开河洼、冲刷地带和容易被车辆碰撞处,以及有易燃易爆物或可燃液(气)体的生产厂房、仓库、堆场、储藏器等。

#### (二) 架空线路的安全距离

见表 11-1。

表 11-1 低压架空线对地和跨越物的最小距离

线路经过地区或跨越项目		最小距离 (m)	
地面	市区、厂区、城镇	6.0	
	社、队集镇	5.0	
	自然村、田野、交通困难地区	4.0	
道路	公路、小铁路、拖拉机跑道	6.0	
	至铁路轨顶	公用	7.5
		非公用	6.0
	电车道	至路面	9.0
至承力索或接触线		3.0	

线路经过地区或跨越项目		最小距离 (m)	
通航河流	常年洪水位	6.0	
	航船桅杆	1.0	
不能通航及不能 浮运的河及湖	冬季至冰面	5.0	
	至最高水位	3.0	
管索道	在管道上面通过	1.5	
	在管道下面通过	1.5	
	在索道上、下面通过	1.5	
房屋建筑 <sup>①</sup>	垂直	2.5	
	水平、最凸出部分	1.0	
树木 <sup>②</sup>	垂直	1.0	
	水平	1.0	
通信 广播线	交叉跨越(电力线必须在上方)	1.0	
	水平接近通信线 <sup>③</sup>	倒杆距离	
电力线	垂直交叉	0.5kV 以下	1.0
		6 ~ 10kV	2.0
	水平接近	0.5kV 以下	2.5
		6 ~ 10kV	2.5

注：①架空线严禁跨越易燃建筑的屋顶。

②导线对树木的距离，应考虑修剪周期内树木的生长高度。

③在路径受限制地区，1kV 以下最小 1m。

### (三) 架空导线的档距

两根电杆之间的距离称为档距。在整个线路中，除特殊跨越、分支及转角等情况外，直线部分的档距应基本上保持一致。

档距应根据所用导线规格和具体环境条件等因素来选定。常用档距适用范围见表 11-2。

表 11-2 低压架空线路常用档距和适用范围

导线水平间距 (mm)	300			400	
	25	30	40	50	60
适用范围	1. 城镇闹区街道 配电线路 2. 城镇、农村居民 点配电线路		1. 城镇非闹区配 电线路 2. 城镇工厂区 配电线路	1. 城镇工厂区配电线路 2. 城镇、农村居民 点外围配电线路	

导线水平间距 (mm)	300		400
	3. 乡镇企业内部 配电线路 4. 田间配电线路	3. 农村、城镇居民 点外围配电线路	

## 二、低压架空线路的施工内容

### (一) 竖立电杆

竖立电杆的普通方法有扳立法和吊立法两种。其示意如图 11-1、图 11-2 所示。

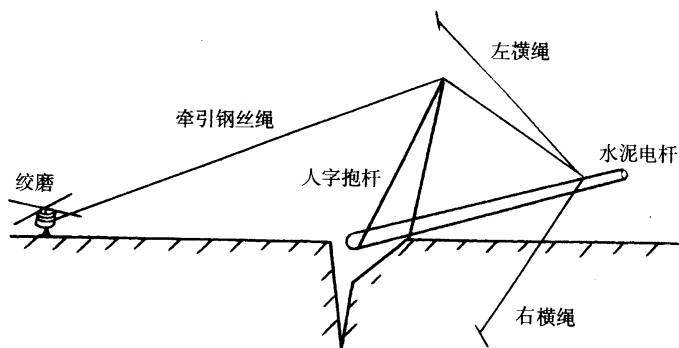


图 11-1 扳立法示意图

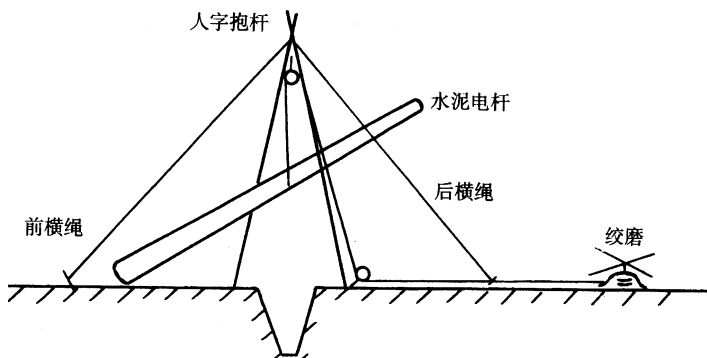


图 11-2 吊立法示意图

### (二) 架设导线

1. 放线 放线一般总是一个个耐张段先后进行的。放线前应选择合适的地点,放置线盘和放线架。放线段内每根电杆上应挂有开口的放线滑轮,滑轮一般是用铝的,但放钢线时应用钢的滑轮。拉线速度应尽量保持恒速进行,不要突然加快速度,以防止放线架倒塌。看守放线架的人员应监视导线的质量,如发现损伤及时做好记号。

放线的另一种方法是展放法。这是先将导线沿线路展放在地面上,然后工作人员登上电杆,将导线用绳提到横担上并分别摆好。

放线时如果需要跨过带电导线,应在带电导线停电后再施工,如果停电有困难,可在跨越处搭跨越架子。在需要通过公路、铁路时,应有专人看守。

## 2. 导线的连接

3. 紧线和弧垂的调整 紧线时,可根据导线截面积的大小和耐张段的长短选用人力紧线、紧线器紧线或绞磨紧线。为了防止横担扫转,可同时紧两根线或三根线。

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

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

(3)紧线过程中,应有人监视弧垂,不要将导线收得过紧或过松。几根导线的弧垂应保持相等,弧垂标准见表 11-3。

表 11-3 架空线路的弧垂

导线截面积 (mm <sup>2</sup> )	当温度为 10℃ 时							下列温度时 增减的弧垂 (cm)		
	10	16	25	35	50	70	95	+25℃	-10℃	
档距 (m)	铜线的弧垂									
	30	30	30	40	50	60	70	6	12	
	40	40	40	50	60	70	80	8	16	
	50	60	60	60	70	80	90	10	20	
	铝线的弧垂									
	30	36	36	36	50	62	78	90	8	16
	40	48	48	48	62	72	80	104	10	20
	50	72	72	72	75	87	104	117	13	25

(4)一般施工中常用平行四边形法观测导线值,在相邻的电杆上挂上板(水准尺),由观测人员在杆上,从一侧板瞄准对侧板,调整导线,使导线正好与瞄准直线相切即调整完成,如图 11-3 所示。

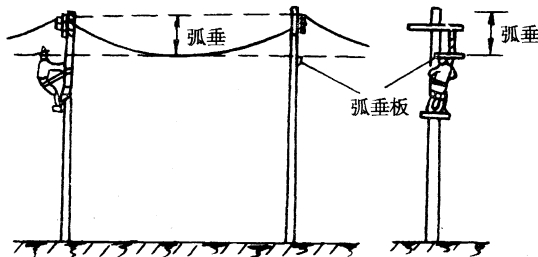


图 11-3 平行四边形法观测导线弧垂

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

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

4. 导线固定 直线段导线在蝶形绝缘子上的绑扎如图 11-4 所示：

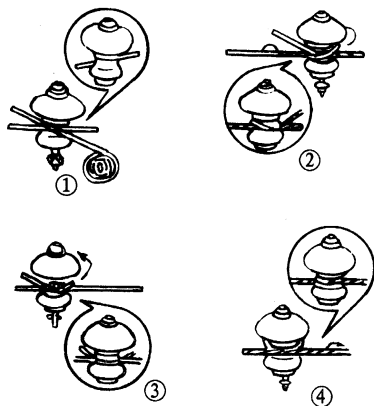


图 11-4 直线段导线在蝶形绝缘子上的绑扎

(1) 把导线紧贴在瓷瓶颈部嵌线槽内,把扎线一端留出足够在嵌线槽子绕一圈和导线上绕 10 圈的长度,并使扎线与导线成 X 状相交。

(2) 把扎线从导线右下侧绕嵌线槽背后至导线左边下侧,按逆时针方向围绕正面嵌线槽,从导线右边上侧绕出。

(3) 接着将扎线贴紧并围绕瓷瓶嵌线槽背后至导线左边下侧,在贴近瓷瓶处开始,将扎线在导线上紧缠 10 圈后剪除余端。

(4) 把扎线的另一端围绕嵌线槽背后至导线右边下侧,也在贴近瓷瓶处开始,将扎线在导线上紧缠 10 圈后剪除余端。

始终端支持点在蝶形绝缘子上的绑扎如图 11-5 所示：

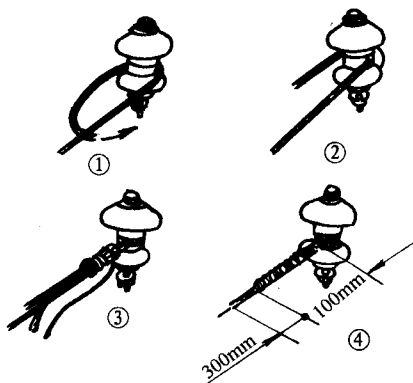


图 11-5 始终端支持点在蝶形绝缘子上的绑扎

① 把导线末端先在瓷瓶嵌线槽内围绕一圈。

② 接着把导线末端压着第一圈后再围绕第二圈。

③ 把扎线短的一端嵌入两导线末端并合处的凹缝中,扎线长的一端在贴近瓷瓶处,按顺时针方向把两导线紧紧地缠扎在一起。

④ 把扎线在两始、终端导线上紧缠到 100mm 长后,与扎线短的一端用克丝钳紧绞 6 圈后剪去余端,并紧贴在两导线的夹缝中。

针式绝缘子的颈部绑扎如图 11-6 所示：

① 绑扎前先在导线绑扎处包缠 150mm 长的铝箔带。

② 把扎线短的一端在贴近瓷瓶处的导线右边缠绕 3 圈,然后与另一端扎线互绞 6 圈,并把导线嵌入瓷瓶

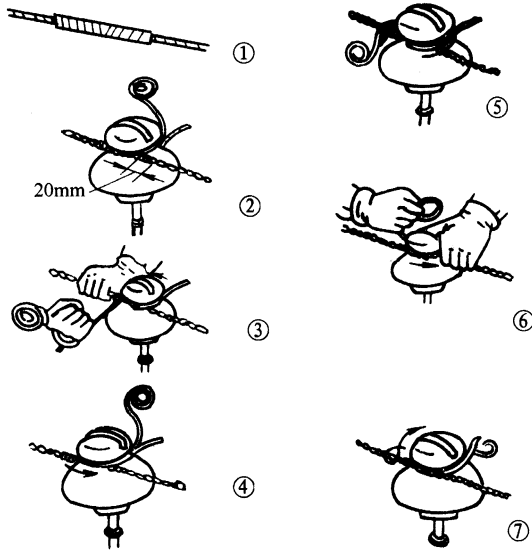


图 11-6 针式绝缘子的颈部绑扎

颈部嵌线槽内。

③接着把扎线从瓷瓶背后紧紧地绕到导线的左下方。

④接着把扎线从导线的左下方围绕到导线右上方,并如同上法再把扎线绕瓷瓶 1 圈。

⑤然后把扎线再围绕到导线左上方。

⑥继续将扎线绕到导线右下方,使扎线在导线上形成 X 形的交绑状。

⑦最后把扎线围绕到导线左上方,并贴近瓷瓶处紧缠导线 3 圈后,向瓷瓶背部绕去,与另一端扎线紧绞 6 圈后,剪去余端。

针式绝缘子的顶部绑扎如图 11-7 所示:

①把导线嵌入瓷瓶顶嵌线槽内,并在导线右端加上扎线。

②扎线在导线右边贴近瓷瓶处紧绕 3 圈。

③接着把扎线长的一端按顺时针方向从瓷瓶颈槽中围绕到导线左边下侧,并贴近瓷瓶在导线上缠绕 3 圈。

④然后再按顺时针方向围绕瓷瓶颈槽到导线右边下侧,并在右边导线上缠绕 3 圈(在原 3 圈扎线右侧)。

⑤然后再围绕瓷瓶颈槽到导线左边下侧,继续缠绕导线 3 圈(也排列在原 3 圈左侧)。

⑥把扎线围绕瓷瓶颈槽从右边导线下侧斜压住顶槽中的导线,并将扎线放到导线左边内侧。

⑦接着从导线左边下侧按逆时针方向围绕瓷瓶颈槽到右边导线下侧。

⑧然后把扎线从导线右边下侧斜压住顶槽中导线,并绕到导线左边下侧,使顶槽中导线被扎线压成 X 状。

⑨最后将扎线从导线左边下侧按顺时针方向围绕瓷瓶颈槽到扎线的另一端,相交于瓷瓶中间,并互绞 6 圈后剪去余端。

### 三、架空线路的施工要求

#### (一)放线

##### 1. 放线前的准备工作:

(1)根据线轴上的导线长度及架设方向布置放线轴的安放位置。

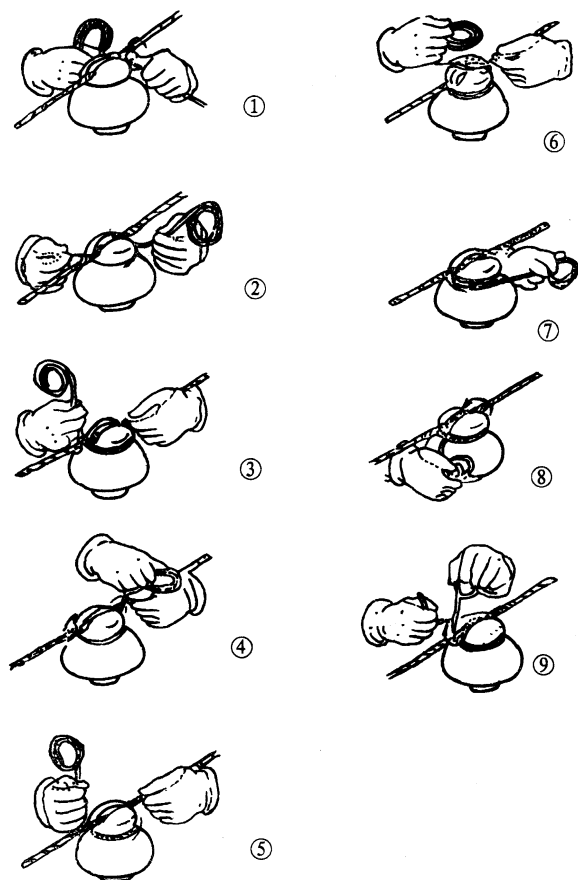


图 11-7 针式绝缘子的顶部绑扎

(2) 将放线支架装设牢固。

(3) 清除放线通道上能使导线受损的障碍物,或者采取可靠的防护措施。

(4) 跨越电力线、通讯线、铁路及公路时,应搭设牢固的越线架。否则,应有可靠的跨越方案。

(5) 通讯联系要及时准确,沿途应设有护线员。

2. 放线时应注意保护导线不受损伤。当发现有磨损、断股、金钩等现象时,应及时采取措施。

3. 当经过有腐蚀导线成份的地区时,应采取防护措施。

4. 放线时,导线与牵引绳之间应装设防捻器,用以防止导线松散破股。

5. 放线滑车的选用应符合下列规定:

(1) 滑车轨槽的直径应与导线的直径相匹配。滑车轮径应大于导线直径的 10 倍。

(2) 滑车的制造材料应与导线相匹配。

(3) 根据线路的具体情况选用与之相适应的滑车。

(4) 滑车转动要灵活。

6. 导线在同一截面处损伤符合下列情况时,可不进行处理:

(1) 单股损伤深度小于直径的  $1/2$ 。

(2) 受伤面积小于导线截面的 5%。

7. 受损导线截面符合下列之一者,必须锯断重接:

(1) 钢芯铝绞线在同一处受损或断股超过铝股线总面积的 25%;单股金属线在同一处受损或断股的面积超过总面积的 17%。



(2) 钢芯铝绞线断一股。

(3) 金钩、破股形成的永久变形。

8. 钢绞线用作避雷线时, 7 股外层断一股, 必须割断重接, 19 股允许外层断一股, 但应将断头用绑线扎牢。

## (二) 连接

1. 不同金属、不同规格、不同捻回方向的导线与避雷线不允许在一个耐张段内连接, 只允许使用专用的连接器在杆塔跳线内连接。

2. 连接部分的导线及避雷线不允许有断股、缺股及股线缠绕不良等现象存在。

3. 用钳压连接管进行直线连接时, 应遵守下列规定:

(1)  $35 \sim 240\text{mm}^2$  的各种钢芯铝绞线允许用钳压管钳接, 钳接时导线中间应加垫片。

(2) 钳接后导线端头露出管外长度应不小于 20mm, 并且导线端头的绑线不得拆除。

4. 压接后的连接管应符合如下要求:

(1) 连接管因压接而发生弯曲时, 其弯曲度应不大于 1%, 若大于 1% 允许校直。

(2) 压接后或压弯校直后的连接管不允许有裂纹, 发现有裂纹时必须割去重接。

(3) 压接后的尺寸须经卡尺测量, 尺寸误差必须符合拉力要求。

(4) 压接呈六角形的连接管, 不得有扭曲现象。

(5) 压接后的导线连接管与等长导线的电阻比值不应大于 1。

5. 压接后的连接管口及外露已压钢管表面要涂防潮油漆。

6. 每一档距内每根导线或避雷器只允许有一个直线连接管及三个补修管, 且补修管与补修管之间, 或连接管之间的距离, 不应小于 15m。

7. 直线连接管或补修管与悬垂线夹的距离, 至少位于护线条或防震锤安装范围之外, 且愈远愈好; 与释放线夹的距离应满足设计要求; 与耐张线夹的距离应不小于 15m。

## (三) 紧线

1. 紧线工程应在基础的混凝土强度完全符合设计要求, 并且耐张段内的杆塔全部验收合格后方可进行。

2. 紧线前, 应在耐张杆塔上打好拉线。

3. 紧线应在白天进行, 如遇恶劣天气, 如风、雨、雪、雾等应停止进行。

4. 紧线时, 导线与避雷线应通过滑车, 划印应采用垂球法画在本线上。

5. 观测弛度时, 应实测温度, 并能代表导线与避雷线的真实情况。

6. 观测弛度时, 耐张段在 6 档及其以下时, 靠近中间一档作为观测档, 耐张段在 7~15 档时, 应在两侧各选一档作为观测档, 耐张段在 15 档以上时, 在两侧及中间各选择一档作为观测档。弛度的观测应符合档距较大, 悬挂点高差较小的要求。

7. 弛度的误差应符合设计要求, 并在观测过程中注意弛度的准确性。

8. 紧线后应及时进行附件安装, 以避免导线受损伤。

9. 挂好后的导线及避雷线上, 不应有杂物。

## (四) 附件安装

1. 在安装绝缘子及金具之前, 要仔细检查其质量是否合乎要求。否则不允许使用。

2. 在安装绝缘子前, 要先清除其上污垢杂物, 并逐个用 2500V 兆欧表摇测其绝缘, 绝缘电阻小于  $5\text{M}\Omega$  者不得使用。

3. 金具上的镀锌若脱落, 须用红丹及油漆补刷。

4. 悬式绝缘子串除设计有特殊要求外, 应垂直地面。在个别情况下, 顺线路方向与垂直位置的倾角一般不超过  $5^\circ$ 。

5. 悬式绝缘子串上的穿钉及销子, 两边线者一律向外穿, 中线者从脚钉侧穿入。

6. 耐张绝缘子串上的穿钉及销子一律向下穿。

7. 固定穿钉的开口销子,每个须开口  $60^{\circ} \sim 90^{\circ}$ 。开口后不允许有折断、裂纹等现象。严禁用线材取代开口销子。穿钉呈水平方向时,开口销子的开口侧应向下。
8. 金具上的各种连接螺栓应加弹簧垫,用双螺母或在露出螺紋部分涂以铅油,以防止螺栓因震动而脱落。
9. 钢芯铝绞线除使用护线条外,不允许与螺栓线夹直接接触,安装时应有铝包带衬垫。铝包带缠绕的方向与外层铝股一致,每端露出线夹口  $10 \sim 30\text{mm}$ ,且断头应在线夹内。
10. 护线条安装时,每条的中心均应与线夹中心重合。捻回应紧密均匀,方向与外层导线一致。端头应装端夹,并将护线条折回  $180^{\circ}$ 。
11. 防震锤安装时,与导线及避雷线接触的夹口内应加衬垫,并垂直地面。其夹板缺口朝向为:边线者向里,中线者向右。安装位置误差应不大于  $30\text{mm}$ 。
12. 在安装跳线连板前,应清除污垢及氧化膜,以确保其平滑。在螺栓夹紧后,应在缝口处涂一层红铅油,以防潮气侵入。
13. 跳线安装后不得弯曲,应呈悬链状下垂,与杆塔、拉线及金属的间隙应符合要求。
14. 架线完工后,要检查导线与跨越物的距离是否符合规定。
15. 当采用针式绝缘子时,导线与绝缘子的固定应满足如下规定:
  - (1) 直线杆上导线应安装在绝缘子顶槽中。转角杆上安装在转角外侧边槽中。
  - (2) 绑扎导线,应在导线上包扎两层铝包带,包扎长度应使两端露出绑扎处不小于  $20\text{mm}$ 。
  - (3) 扎线的安装应符合设计规定。扎紧不得损伤导线。

## 第二节 架空线路施工准备工作

### 一、架空线路测量

线路测量通常根据设计部门提供的线路平、断面图和杆塔明细表,从始端桩位开始安置经纬仪,向前方逐基定位。对于  $10\text{kV}$  及以下的配电线路,因耐张段及档距均较短,杆型结构也比较简单,可不使用经纬仪,仅用数支标杆即可进行定位。通常是直接量出每基杆塔档距位置,立一标杆,将数支标杆连续立在中心线上,以目测指挥各杆成一直线即可钉桩。向前延长时,即用第一支标杆移到最前面,与原来数支成一直线,中间依次插入标杆,轮流移杆逐步向前延伸。

杆坑中心位置确定后,即可根据中心桩位,依据图纸规定的尺寸,量出挖坑范围,用白灰在地面上画出白粉线,坑口尺寸应根据基础埋深及土质情况来决定。可参考下式计算,杆坑剖面如图 11-8 所示。

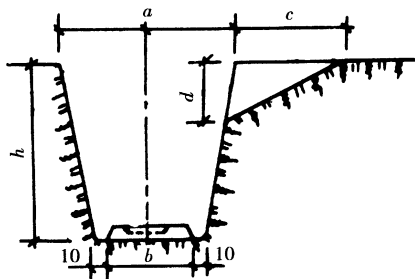


图 11-8 杆坑剖面示意图

$$a = b + 0.2 + \eta h \text{ (m)}$$

式中  $a$ ——坑口边长(m);

$b$ ——底盘边长(m);

$h$ ——坑深(m);

$\eta$ ——坡度系数 根据土质决定:一般粘土可取 0.4 坚硬土壤可取 0.3。

杆坑定位应准确。对于 10kV 及以下架空配电线路直线杆,杆坑中心顺线路方向的位移不应超过设计档距的 3%,横线路方向上位移不应超过 50mm。转角杆、分支杆杆坑中心横线路、顺线路位移均不应超过 50mm。

## 二、电杆的定位

首先根据供电点(原有输电线的分支杆)与用电负载的位置,进行实地勘测,确定线路的走向。当供电点和用电点两根电杆位置确定之后,最好使线路成直线走向,但由于地形或其他因素的限制,线路需拐弯,这就可确定转角杆的位置。这样,供电点、转角杆、用电点就把整条线路分成几个直线段,如把分支杆位置确定后,就可决定分支线路的方向。如图 11-9 所示。

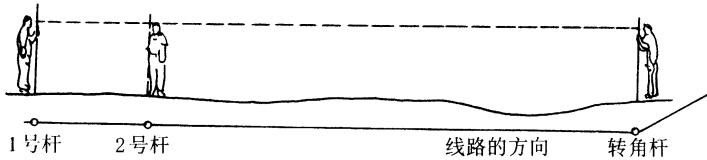


图 11-9 杆塔的定位

测量每段直线间水平距离,如平地可用皮尺测量,当地形复杂时就不能用皮尺测量,就要用仪器来测量。以上这些工作完成后,电杆的定线工作即告完成。

定线工作完成后,就要确定每段直线电杆的具体位置,叫“电杆的定位”。根据所选的电导线型号,按照前述的方法,初步确定电杆的高度和档距。根据档距的大小,每段直线段内就可确定电杆的根数和位置。确定电杆的具体位置时,要从一端向另一端逐杆定位。先在直线段末端的转角杆处立一标杆(又叫花杆),在首端(1号杆处)也立一标杆,然后按照选定的档距,从1号杆开始量出第一档距离,由一位测工拿着标杆站在那里,这时,看线路的电工站在1号杆处,用眼睛去看测工拿的标杆和1号杆的标杆,转角标的标杆成一直线,就可定下2号杆的标位了(即测立标杆处)。再由2号杆和转角杆确定3号杆的杆位。依此类推,直到各杆的杆位全部确定为止,如图11-9所示。

在各杆的杆位中心处打下木桩。施工时就以此桩为中心打洞。各杆的杆位确定后,杆型可根据它们的用途来确定,就可绘出电杆明细表如表11-4,作为施工的依据,最后还要作出导线与电杆材料的预算,以准备各种线路器材和加工零件。

表 11-4 电杆明细表

杆号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	9	15	16	17
直线段距离(米)	331				665									205				
档距(米)	73	81	102	75	70	70	71	70	75	80	75	81	73	68	69	68		
杆型	终	直	跨	跨	转	直	直	直	分	直	补	补	直	终		直	直	终
杆高(米)	8	8	12	12	8	8	8	8	8	8	10	10	8	8		8	8	8
导线型号	LJ-25													LJ-16				

### 三、电杆基础打洞

电杆基础打洞(挖坑)之前,先要检查标桩设立地点是否正确,然后打几个辅助标桩,用来检查电杆是否立在中心位置。

#### (一)直线杆

在打洞的电杆桩处,如图 11-10 中的 2 号杆以及前后电杆的标桩处,各立标杆一支,若从 1 号标杆处看过去,三根标杆处于一直线上,表示被检查的 2 号标杆桩位置正确。这时,可在直线方向主标桩的一侧或两侧,打下辅助标桩两根,以便打洞时检查洞的中心位置。若有侧面人字拉线时,可用绳先在沿线路方向拉紧,再用另外绳在主标桩处与线路方向的绳拉成一个“+”字(即成  $90^\circ$  角),即为人字拉线的方向,打下标桩,以备打拉线洞之用。图 11-11。

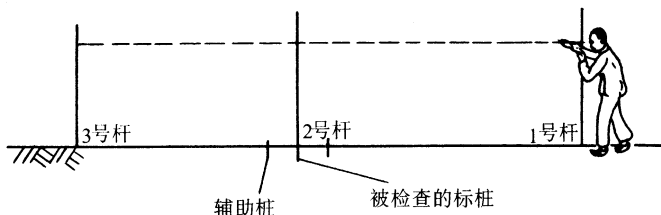


图 11-10 检查 2 号杆标桩位置

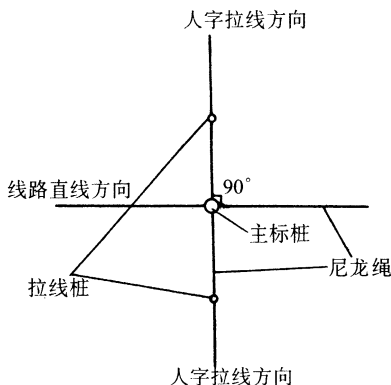


图 11-11 人字拉线的方向

#### (二)转角杆

转角杆(图 11-12 中 3 号杆)的位置可沿 1、2 号杆及 4、5 号杆的标桩处直立标杆,对准两侧的直线方向,各在 3 号杆前后打辅助标桩一根(共四根)。3 号杆的中心标桩位置应正好处于辅助标桩直线的相交点,见图 11-12。

转角杆的拉线洞的方向,可在 3 号杆桩处沿两侧线路的直线方向各量相等距离  $a$ ,打下辅助标桩 A、B 两点,取其等分点 C,则 C 点与 3 号主标桩的延长线即为转角拉线的方向,如图 11-13。

#### (三)拉线洞的位置

沿需要安装拉线的方向,量取长为  $AB$  图 11-14(a),在 B 点打下标桩,即为拉线洞的位置。当拉线角度为  $45^\circ$  时,  $AB$  的距离为拉线顶端距地面高度与拉线洞深度之和。

#### (四)打洞

打洞最好用专用工具,挖成圆洞,以减少开挖工作量。如立杆方法不是用固定式抱杆立电杆,在电杆根

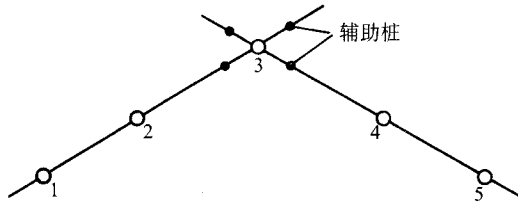


图 11-12 转角杆的标桩位置

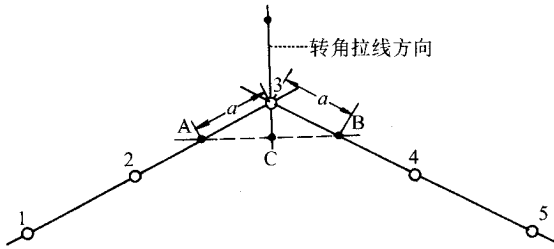


图 11-13 转角杆拉线的方向

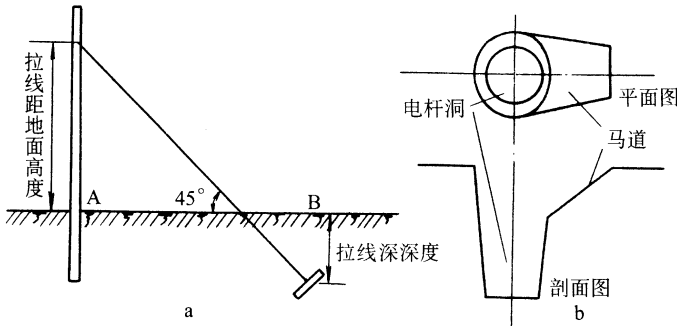


图 11-14

a. 拉线洞的位置 b. 杆坑的形状

部的洞旁还要挖一道斜坑(又称“马道”),以利立杆图 11-14b。拉线洞或需要安装底盘或卡盘的电杆,应根据具体尺寸挖成长方形洞。

打洞工作是劳动强度较大的体力劳动。使用的工具一般是锹、镐、长勺等,用人力打洞取土。多年来,各地在打洞方面曾作过一些改革,有在工具上进行改革的,如夹铲、螺旋钻;也有在打洞方式上进行改革的,如爆破等。但它们都有一定的适用范围,目前人力打洞仍是比较普遍采用的施工方式。

杆坑形式分为圆形坑和长方形坑,当采用抱杆立杆时还要留有滑坡(马道)。

不论圆形坑、方形坑或拉线坑,坑底均应基本保持平整,便于进行检查测量坑深。坑深检查一般以坑边四周平均高度为基准,可用直尺直接量得坑深数字。当然用水准仪测量更为准确。坑深允许偏差为  $\pm 100$  mm。

电杆的埋设深度在设计未作规定时,可按表 11-5 所列数值选择,或按电杆长度的十分之一再加 0.7m 计算。当遇有土质松软、流砂、地下水位较高等情况时,应作特殊处理。

表 11-5 电杆埋深表

杆长/m	8.0	9.0	10.0	11.0	12.0	13.0	15.0
埋深/m	1.5	1.6	1.7	1.8	1.9	2.0	2.3

打洞工作劳动强度较大,应特别注意安全,一般应注意:

1. 所用工具必须坚实牢固,并应经常注意检查,以免发生事故。
2. 当坑深超过 1.5m 时,坑内工作人员必须戴安全帽;当坑底面积超过  $1.5\text{m}^2$  时,允许两人同时工作,但不得对面操作或挨得太近。
3. 严禁在坑内休息。
4. 打洞时,坑边不应堆放重物,以防坑壁垮塌。禁止将工器具放在坑壁边缘,避免掉落伤人。
5. 在行人通过地区,当坑挖完不能很快立杆时,应设围栏,夜间并应装设红色信号灯,以防行人跌入坑内。

## 第三节 放线施工技术

### 一、施线施工方法分类

#### (一) 拖放法

是将线盘架设在放线架上拖放导线,拖放前,先清除线路上的障碍物,以免损伤导线,它以每个耐张段为一个单元,把线路所需导线全部放出,置于电杆根部地面,然后按挡把全耐张段导线同时吊上电杆,如图 11-15 所示。

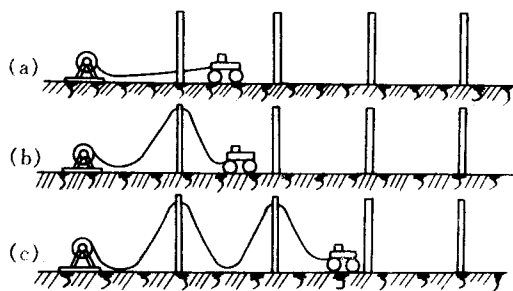


图 11-15 拖放法放线

#### (二) 展放法

放线的线路如果不长,导线重量又不太重,可把导线背在肩上,边走边放,如线路较长,线捆较大,可把线捆装在汽车上,在汽车行进中展放导线。

## 二、导线的连接要求与方法

导线放完之后,导线的断头都要连接起来,导线损伤有下列情况之一者,应锯断重接:

1. 已磨损或断股的导线,在同一断面内,损坏面积超过导线导电部分截面积的 15%。
2. 导线出灯笼,其直径超过导线直径的 1.5 倍而无法修复,或有无法修复的永久变形。
3. 作为地线的钢绞线,7 股者外层断一股应剪断重接。

### (一) 导线连接时的一般要求

1. 在每档距内每条导线只允许有一个连头。
2. 导线接头位于针式绝缘子固定处的净距离不应小于 500 毫米。
3. 导线接头距耐张线夹之间的距离不宜小于 15 米。
4. 架空线路跨越铁路、公路、电力线、电车道、通信线路及主要河流时,导线不许有接头。
5. 接头处的机械强度,不应低于原导线强度的 80%。接头处的电阻,不应超过同长度导线电阻值。

### (二) 导线的连接方法

#### 1. 钳压接法

钳压法适用于较大负荷的多根铝芯铜芯导线的直接连接。

(1) 根据导线规格选择合适的压模和压接管(钢质线用铜质压接管,铝质线用铝质压接管)。

(2) 用钢丝刷清除线表面和连接管内壁的氧化膜和油污。导线清洗长度等于可连接部分的 1.25 倍。清洗后涂上一层中性凡士林。

(3) 用压线钳进行压接,压坑顺序应按图 11-16 所示进行,压坑位置要正确,不要偏斜,不可使压接管变形,压接导线采用搭接法,由管两端分别插入管内,使导线的两端出管外 25~30 毫米。

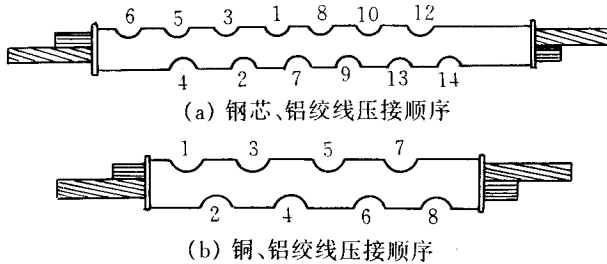


图 11-16 导线压接顺序

(4) 压接深度要适度,压缩处椭圆槽,距管边的高度为  $h$  值,每个压坑间距尺寸、压坑数,使用压膜型号及规格如图 11-17 和表 11-6 所示。

表 11-6 导线钳压压口及压后尺寸

导线截面 (mm <sup>2</sup> )		35	50	70	95	120	150	185	240
压口数	铝、铜线	6	8	8	10	10	10	10	12
	钢芯铝线	14	16	16	20	24	24	26	2×24
压后尺寸 (mm)	铝线	14	16.5	19.5	23	26	30	33.5	-
	钢芯铝线	17.5	20.5	25	29	33	36	39	43
	铜线	14.5	17.5	20.5	24	27.5	31.5	-	-

#### 2. 缠绕法

多股线交叉缠绕法适用于多股截面 35mm<sup>2</sup> 以下的裸铝或铜导线,缠绕前先按表 11-7 的规定量好接头长度。

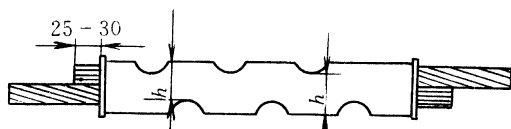


图 44-17 压接部位尺寸

表 11-7 多股线交叉缠绕的接头长度和绑线直径

导线直径或截面积	接头长度 (mm)	绑线直径 (mm)	中间绑线长度 (mm)
$\phi 2.6 \sim 3.2$	80	1.6	-
$\phi 4.0 \sim 5.0$	120	2.0	-
$16\text{mm}^2$	200	2.0	50
$25\text{mm}^2$	200	2.0	50
$35\text{mm}^2$	300	2.3	50
$50\text{mm}^2$	500	2.3	50

铜芯导线直接连接的步骤：

- (1) 把两个线头分别调直,并标出连接需要的线头长度。
- (2) 把两线头散开,并把线头根部(约连接部分全长的  $1/3$ )重新绞紧,把其余部分扳成伞形状。
- (3) 把两伞形线头隔股对叉到底,并把对叉后的伞形钳平。
- (4) 把一端七股芯线按 2、2、3 根分成三组,前二组线折起,缠绕二圈后,余线扳回为线芯,最后一组(3 根线)缠绕 3 圈后,余线切去剪平。

### 3. 线夹连接法

分支线连接也叫 T 形连接,低压配电线路的分支连接经常采用 U 形线夹连接和并沟线夹连接。

- (1) U 型线夹多用于铜质多股导线的分支连接,连接方法如图 11-18(1)所示。U 型线夹的规格应配合导线规格,如表 11-8 所示,每一连接处用 2~4 只 U 型线夹,两相邻线夹中心距离应为 150~200 毫米。

表 11-8 U 形线夹规格选用表

规格	适用电线规格范围
GQ-1	$25\text{mm}^2$
GQ-2	$35\text{mm}^2$
GQ-3	$50\text{mm}^2$
GQ-4	$70\text{mm}^2$

- (2) 并沟线夹适用于多股铝绞线的分支连接,连接方法如图 11-18(2)所示。并沟线夹上的两条嵌线槽应严格配合导线规格。对铝质导线也应清洗触面,涂中性凡士林油。电流容量大的分支线应用两副并沟线夹。二者相距 300~400 毫米。夹入并沟线夹内的铝线应包缠二层铅包带或铝箔带,以防损伤导线。在拧线夹时几个螺栓应均匀拧紧,当两根导线截面不同时,可按大截面导线选择线夹。

## (三) 架线

导线上杆,一般采用绳吊,具体操作方法如下:



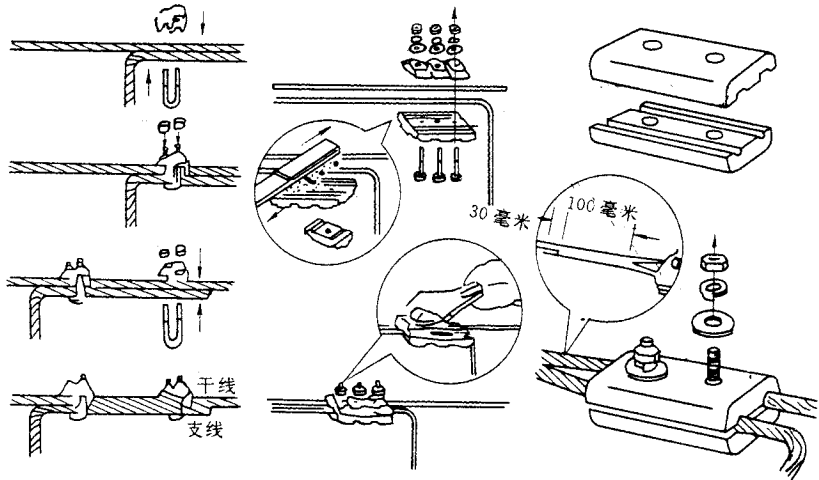


图 11-18 导线的 U 形线夹连接和并沟线夹连接图

1. 吊线时,一般每挡电杆上都需有人操作,地面上一个人作指挥,3~5人配合。
2. 截面较小的导线,可将一个耐张杆全长的四根导线一次吊上,导线截面较大的可分成每两根导线吊一次。
3. 导线吊上电杆后,一端线头绑扎在瓷瓶上,另一端线头夹在紧线器上,中间每挡把导线布在横担上的瓷瓶附近,嵌入临时安装的滑轮内,不能搁在横担上,中性线应安放在电杆内挡,三相四线制在电杆上的排列相序一般为 UNVW 或 UVNW 等。

### 三、放线的施工方法

拖放导线前应沿线路清除障碍物,石砾地区应垫以隔离物(草垫),以免磨损导线。放线通常按每个耐张段进行。放线前,应选择合适位置放置放线架和线盘,线盘在放线架上要使导线从上方引出。

放线时,要一条条地放,不要使导线磨损和断股,不要有死弯(背花)。如出现磨伤、断股等时,应及时作出标志,以便处理。

放线时,最好在电杆上或横担上挂一个开口放线滑轮(滑轮直径应不小于导线直径的 10 倍)。铝导线必须选用铝滑轮或木滑轮,这样既省力,又不会磨损导线。

拖放法和展放法如图 11-19、图 11-20 所示。

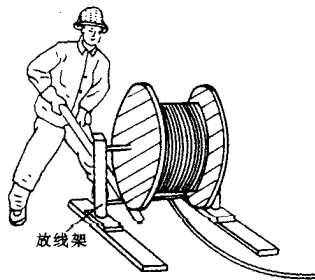


图 11-19 拖放法放线

在放线过程中,线盘处应有专人看守,负责检查导线的质量和防止放线架的倾倒。放线速度应尽量均匀,不宜突然加快。放线若需跨过带电导线时,应将带电导线停电后再施工,如停电困难时,可在跨越处搭跨越架子。放线若通过公路、铁路时,要有专人观看车辆,及时通知,防止发生事故。

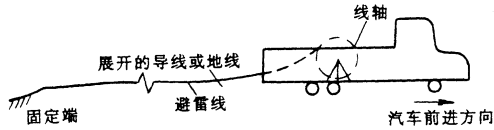


图 11-20 展放法放线

## 四、施线施工要点

一般用线轴架放线。将线盘放在耐张杆附近,用两只板凳或四根木头组成线轴架,如图 11-21 所示。放线时,由几名工人互相隔一定距离,背着导线(导线从线轴架上方抽出),沿电杆一侧前进,尽量避免导线抱在地上,放完一条再放一条。如导线不能避免拖地时,应加垫稻草与地隔离,以免与地面摩擦而损坏。

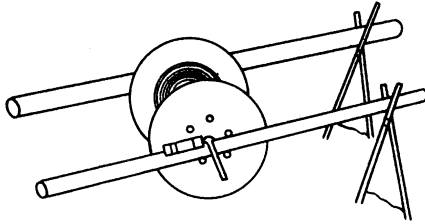


图 11-21 线轴架

当导线跨过通讯线路时,应预先搭好临时跨越架。导线施放到每根电杆时,即将导线放进电杆上预先挂好的开口滑车里去,扣上封片,再继续施拉导线前进,切勿把导线直接放在铁横担上拖拉,以免损坏导线,如图 11-22。在放线时,还应注意导线是否有断股情况,如有损伤的导线,应立即停止放线,做好补强处理工作,放线过程中,沿线要有护线人员,监护导线不受损伤,不发生小圈,遇到这种情况要剪断重新接好,在同一截面处损伤面积小于 17% 时,可采取补强措施,如图 11-23。

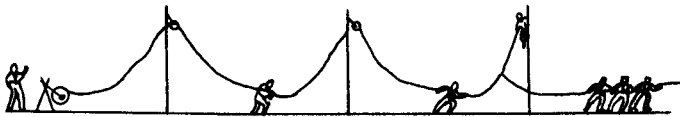


图 11-22 施线图

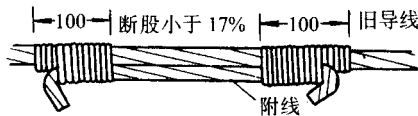
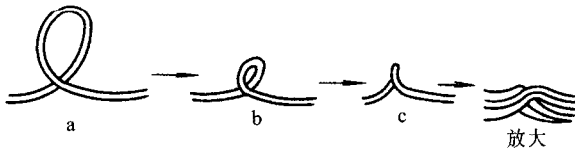


图 11-23 小圈的形成及导线的补强  
(单位:毫米)

### 第四节 拉线施工技术

拉线在架空线路中,是用来平衡电杆各方向的拉力,防止电杆弯曲或倾倒的,因此,在承力杆(终端杆、转角杆等)上,均需装设拉线。另外,为了防止电杆被强大的风力刮倒或冰凌荷载的破坏影响,或在土质松软地区,为增强线路电杆的稳定性,有时也在直线杆上,每隔一定距离(一般为5~10根电杆档距)装设抗风拉线(两侧拉线)或四方拉线。当由于地形限制无法装设拉线时,也可利用撑杆代替。

普通拉线是用在线路的终端杆、转角杆、分支杆及耐张杆等处,主要起平衡拉力的作用。两侧拉线(或叫人字拉线)是安横线路方向装设在直线杆的两侧,由两组普通拉线组成,用以增强电杆的抗风能力。也称为抗风拉线。四方拉线(或叫十字拉线)通常装设在耐张杆或处于土质松软地点的电杆上,用以增强电杆的稳定性,由4组普通拉线组成。因此4组拉线分别装设于电杆前后左右4方,所以称为四方拉线。

当电杆距离道路太近,不能就地安装拉线或需跨越其它障碍时,采用水平拉线。即在道路的另一侧立一根拉线杆,在此杆上做一条过道拉线和一条普通拉线。过道拉线应保持一定高度,以免妨碍行人和车辆的通行,如图11-24所示。当在直线路的电杆上产生不平衡拉力(如在同一电杆上,两侧导线规格不同,造成两侧荷载不等,产生不平衡张力),又因地形限制没有地方装设拉线时,可采用共同拉线。即把拉线固定在相邻的一根电杆上,用以平衡拉力。见图11-24。该种形式的拉线分垂直V形和水平V形两种。主要用在电杆较高,横担层数较多,架设导线根数较多的电杆上,在拉力的合力点上下两处各安装一条拉线,其下部则合为一条。此种称垂直V形。在H型杆上则应安装成水平V形。见图11-24。为防止电杆弯曲,但又因地形限制不能安装普通拉线时,则可采用弓形拉线,如图11-24所示。

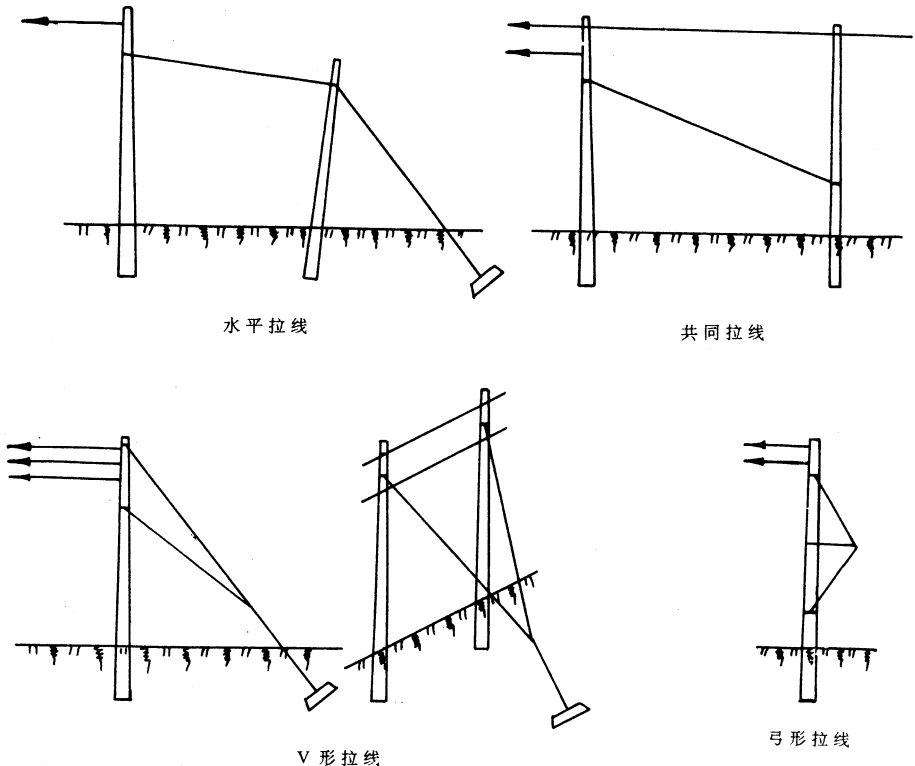


图 11-24 几种拉线示意图

安装拉线包括埋设拉线盘,做拉线上把和收紧拉线做中把。单钢绞线普通拉线的组装见图 11-25。

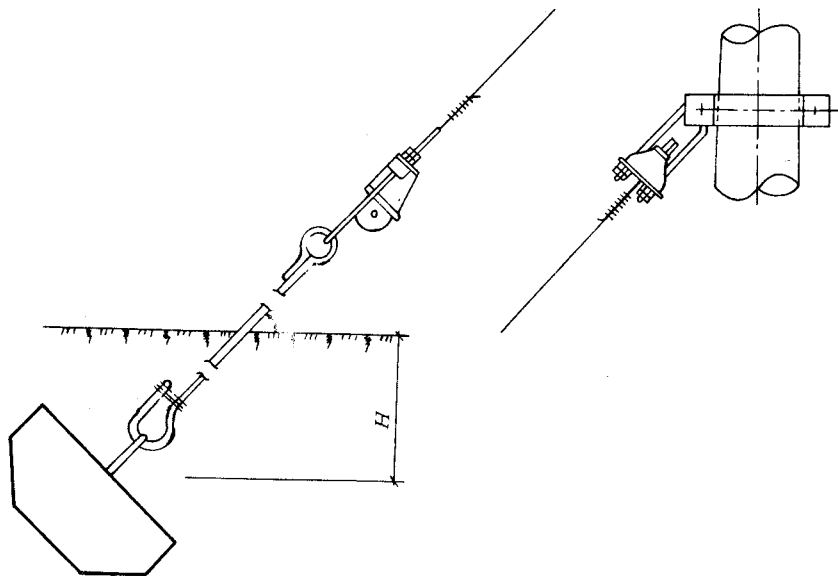


图 11-25 单钢绞线普通拉线组装

拉线盘埋设好后,应使拉线棒的拉环露出地面 500~700mm,拉线棒与拉线盘应垂直,连接处应采用双螺母。拉线上把装在电杆上,需用拉线抱箍及螺栓固定(也可在横担上焊接拉线环)。组装时,先用一只螺栓将拉线抱箍抱在电杆上,然后把预制好的上把拉线环放在两块抱箍的螺孔间,穿入螺栓拧上螺母固定之。上把拉线环的内径,以能穿入 M16 螺栓为宜,但不得大于 25mm。当拉线上需要安装拉紧绝缘子时,可先在地面上做好。其方法是,将拉线中部之间的两端,分别由拉紧绝缘子的两孔中穿过,折回缠绕所需长度,采用直径不大于 3.2mm 镀锌铁线绑扎。在下部拉线盘埋设好,拉线上把也做好后,便可收紧拉线做中把,使上部拉线和下部拉线棒连接起来,成为一个整体,以发挥拉线的作用。

安装好了的拉线应符合下列规定:

1. 拉线与地面的夹角应符合设计要求,一般宜为  $45^\circ$ 。其偏差不应大于  $3^\circ$ (10kV 线路)。
2. 终端杆的拉线及耐张杆承力拉线应与线路方向的中心线对正,分角拉线应与线路分角线方向对正,防风拉线应与线路方向垂直。
3. 跨越道路的拉线,应满足设计要求,且对通车路面边缘的垂直距离不应小于 5mm。
4. 采用 UT 型线夹及楔型线夹固定拉线时,应在丝扣上涂润滑剂,线夹舌极与拉线接触应紧密,受力后无滑动现象,线夹的凸肚应在屋线侧,安装时不得损伤导线,拉线弯曲部分不应有明显松股,拉线断头处与拉线主线应有可靠固定,线夹处露出的尾线长度为 300~500mm,尾线回头后与本线应扎牢。UT 型线夹的螺杆应露扣,并应有不小于  $1/2$  螺杆丝扣长度可供调整,调紧后,其双螺母应并紧。若用花篮螺栓,则应封固。
5. 过道拉线的拉桩杆应向张力反方向倾斜  $10^\circ \sim 20^\circ$ ,其埋设深度一般不应小于拉线桩长的  $1/6$ ,拉桩坠线与拉桩杆夹角不应小于  $30^\circ$ ,拉桩坠线上端固定点的位置距拉桩杆顶端应为 0.25m,当拉桩坠线采用镀锌铁线绑扎固定时,缠绕长度应符合规范规定。
6. 当一根电杆上装设多条拉线时,各条拉线的受力应一致。
7. 拉线底把应采用拉线棒,其直径不应小于 16mm,拉线棒与拉线盘的连接应保证可靠。

当线路建在高低相差悬殊的地方时,一般导线成仰角时用拉线,成俯角时用撑杆,当地形条件受到限制,无法安装拉线时,也可用撑杆代替拉线,作为平衡张力稳定电杆之用。组装如图 11-26 所示。

钢筋混凝土电杆的撑杆安装时,撑杆的规格和高度,应根据电杆的高度、规格和受力情况来确定。撑杆与电杆间的夹角,应满足设计要求,允许偏差为  $\pm 5^\circ$ 。撑杆底部埋深不宜小于 0.5m,且底部应垫以底盘或块石,并应和撑杆垂直。撑杆与电杆的结合,采用  $\angle 63 \times 63 \times 6$  的角钢制成的联板支架(两块)和 M16 $\times$ (210~

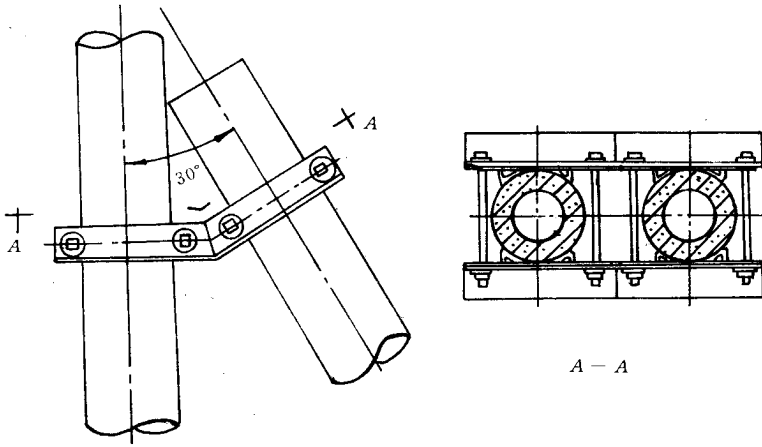


图 11-26 俯角撑杆组装图

270)的方头螺栓(4根)固定。在角钢联板支架上要放上4块特制的M型抱铁,使撑杆与电杆连接紧密、牢固。每根螺栓的两端都应垫上垫圈。如图11-26所示。

## 一、拉线的方式

### (一)普通拉线

用于终端杆、转角杆和分支杆。装设在电杆受力的反面,以平衡电杆所受的单向拉力,如图11-27a所示。对于耐张杆,应在电杆顺线路方向前后加拉线,以承受导线的拉力。

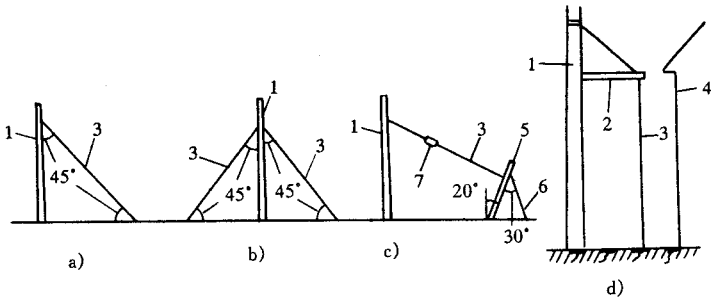


图 11-27 拉线

- a)普通拉线 b)侧面拉线 c)水平拉线 d)自身拉线
- 1—电杆 2—横木 3—拉线 4—房屋 5—拉桩
- 6—坠线 7—拉紧绝缘子

### (二)侧面拉线

又称人字拉线或防风拉线。用于交叉跨越和耐张段较长的线路上,以便使线路能抵御垂直线路方向的风力,如图11-27b所示。

### (三)水平拉线

用于拉线需要跨过道路的电杆上,如图11-27c所示。

### (四)自身拉线

也称弓形拉线。用于地面狭窄、受力不大的电杆上,如图11-27d所示。

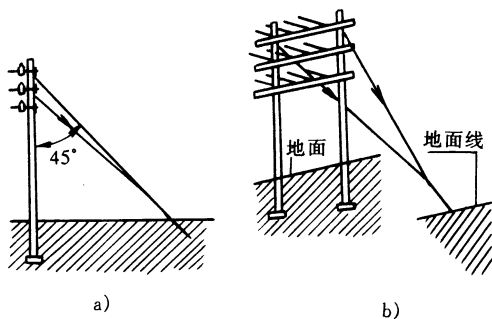


图 11-28 Y形拉线做法图

a) Y形上下拉线 b) Y形水平拉线

(五) Y形上下拉线及 Y形水平拉线见图(11-28)。

## 二、拉线的安装准备

电杆拉线所用的材料有镀锌铁线和镀锌钢绞线两种。镀锌铁线一般用  $\phi 4\text{mm}$  一种规格。施工时要绞合制作比较麻烦。镀锌钢绞线施工方便,强度稳定,有条件应尽量采用。

### (一) 拉线长度的计算

电杆拉线长度计算公式为(图 11-29)

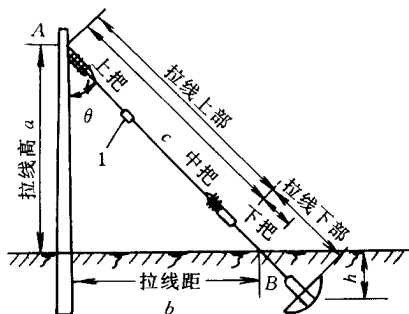


图 11-29 拉线示意图

1—拉紧绝缘子 c—地上部分拉线长度(m)

b—拉线距(m) a—拉线高(m)

$$c = \sqrt{a^2 + b^2}$$

通常采用的近似经验公式为

$$c = 0.72 \times (a + b)$$

一般拉线与地面夹角在  $30^\circ$  到  $60^\circ$  之间,其误差在 1.7% 以内。

在实际应用中用系数进行修正。当  $a$  与  $b$  值相近时,系数取 0.71; 当  $a$  是  $b$  或  $b$  是  $a$  的 1.5 倍左右时,用 0.72; 当  $a$  是  $b$  或  $b$  是  $a$  的 1.7 倍时,用 0.73。

计算出来的拉线长度应减去花篮螺栓长度和地锚拉棒露出地面的长度,再加上两头扎线长度,才是所需钢绞线的下料长度。

### (二) 拉线的制作

做拉线的基本操作分以下三个步骤进行:

### 1. 埋设拉线盘

埋设拉线盘前,应把下把拉线组装好,然后再进行整体埋设。目前大多采用镀锌圆钢做拉线棒。安装时拉线棒穿过水泥拉线盘,用垫圈、螺母固定,如图 11-30 所示。

下把拉线装好后,将拉线盘放正,使底把拉环露出地面 500~700mm,随后就可分层填土夯实。拉线棒在地面上 200~300mm 处,都要涂敷沥青,泥土中含有盐碱成分较多的地方,还要从拉线棒出土 15mm 处缠卷 80mm 宽的麻带,缠到地面以下 350mm 处,并浸透沥青,以防腐蚀。

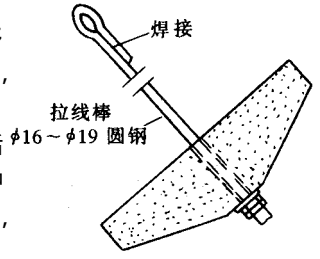


图 11-30 拉线盘

### 2. 做拉线上把

拉线上把可用楔形线夹或套环将钢绞线一头固定好,然后用合抱箍固定在合力的作用点上。或用缠绕法把镀锌铁线上把固定在电杆的合力作用点上。在行人较多的地方,拉线上应装设绝缘子,如图 11-30 所示。距地面不得小于 2.5m。

### 3. 做拉线中把

做好上把和下把后,便可以做中把,使上部拉线和下部拉线盘连接起来,成为一个整体,以发挥拉线作用。

收紧拉线可用紧线钳。紧到一定程度时,检查一下杆身和拉线的各部位,再继续收紧,把电杆校正。对于终端杆和转角杆,拉线收紧好,杆顶可向拉线侧倾斜电杆梢径的 1/2,最后用自缠法或另缠法绑扎,并用  $\phi 4\text{mm}$  镀锌铁线固紧花篮螺栓。

拉线的自缠法和另缠法绑扎见图 11-31。

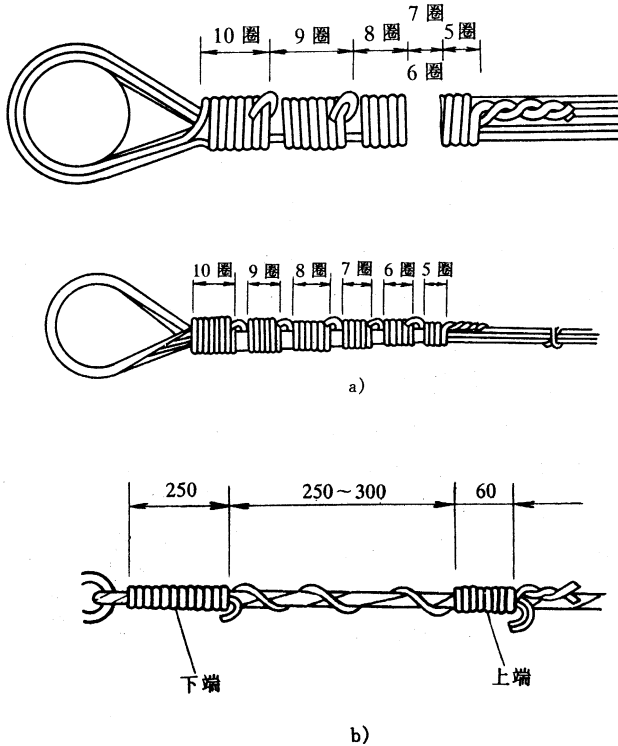


图 11-31 拉线的捆扎

a) 自缠法 b) 另缠法

### (三) 拉线安装的技术要求

1. 拉线与电杆的夹角不宜小于  $45^\circ$  ,当受地形限制时 ,不应小于  $30^\circ$ 。
2. 终端杆的拉线及耐张杆承力拉线应与线路方向对正 ,分角拉线应与线路分角线方向对正 ,防风拉线应与线路方向垂直。
3. 拉线穿公路时 ,对路面中心的垂直距离不应小于 6m。
4. 采用绑扎固定的拉线安装时
  - (1) 拉线两端应设置心形环。
  - (2) 钢绞线拉线可采用直径不小于 3.2mm 的镀锌铁线绑扎固定。绑扎应整齐、紧密 ,缠绕长度不能小于表 11-9 所列数值。
  - (3) 合股组成的镀锌铁线拉线可采用直径不小于 3.2mm 镀锌铁线绑扎固定 ,绑扎应整齐紧密 ,缠绕长度为五股以下者 ,下端 150mm ,花缠 250mm ,上端 100mm。
  - (4) 合股组成的镀锌铁线拉线采用自身缠绕固定时 ,缠绕应紧密 ,缠绕长度 :三股线不应小于 80mm ,五股线不应小于 150mm。
5. 采用 UT 型线夹及楔形线夹固定的拉线安装时 :
  - (1) 安装前丝扣上应涂润滑脂。
  - (2) 线夹舌板与拉线接触应紧密、受力后无滑动现象 ,线夹的凸度应在尾线侧 ,安装时不得损伤导线。
  - (3) 拉线弯曲部分不应有明显松股 ,拉线断头处与拉线主线应可靠固定。线夹处露出的尾线长度不直超过 400mm。
  - (4) 同一组拉线使用双线夹时 ,其尾线端的方向应作统一规定。

表 11-9 缠绕长度最小值

钢绞线截面积 /mm <sup>2</sup>	缠绕长度/mm				
	上端	中端有绝缘 子的两端	与拉棒连接处		
			下端	花缠	上端
25	200	200	150	250	80
35	250	250	200	300	80
50	300	300	250	250	80

- (5) UT 型线夹或花篮螺栓的螺杆应露扣 ,并应有不小于  $1/2$  螺杆丝扣长度可供调紧。调整后 ,UT 型线夹的双螺母应并紧 ,花篮螺栓应封固。
6. 采用拉桩杆拉线的安装应符合下列规定 :
  - (1) 拉桩杆埋设深度不应小于杆长的  $1/6$  ;
  - (2) 拉桩杆应向张力反方向倾斜  $15^\circ \sim 20^\circ$  ;
  - (3) 拉杆坠线与拉桩杆夹角不应小于  $30^\circ$  ;
  - (4) 拉拉坠线上端固定点的位置距拉桩杆顶应为 0.25m ,距地面不应小于 4.5m ;
  - (5) 拉桩坠线采用镀锌铁丝绑扎固定时 ,缠绕长度可参照表 11-9 所列数值。
7. 合股组成的镀锌铁线用作拉线时 ,股数不应少于三股 ,其单股直径不应小于 4.0mm ,绞合均匀 ,受力相等 ,不应出现抽筋现象。
8. 当一基电杆上装设多股拉线时 ,拉线不应有过松、过紧、受力不均匀等现象。
9. 埋设拉线盘的拉线坑应有滑坡 (马道) 回填土应有防沉土台 ,拉线棒与拉线盘的连接应使用双螺母。
10. 居民区、厂矿内、混凝土电杆的拉线从导线之间穿过时 ,应装设拉线绝缘子。在断线情况下 ,拉线绝缘子距地面不应小于 2.5m。



### 三、拉线结构

拉线的结构如图 11-32 所示。其整体由拉线抱箍、楔形线夹、钢绞线、UT 型线夹、拉线棒和拉线盘组成，其组装图见图 11-33。当在居民区和厂矿区，拉线从导线之间穿过时，则应装设拉线绝缘子，并使在拉线断线时，拉线绝缘子距地面不应小于 2.5m。其目的是避免拉线上部碰触带电导线时，人员在地面上误触拉线而触电。

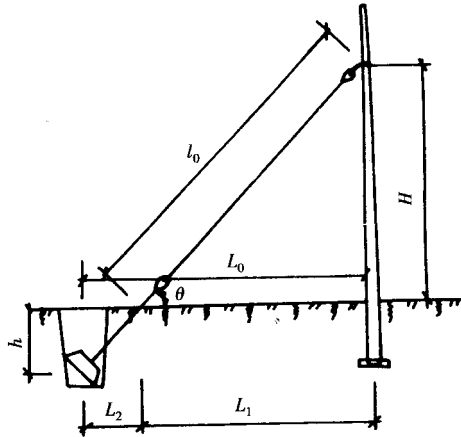


图 11-32 一般地形拉线示意

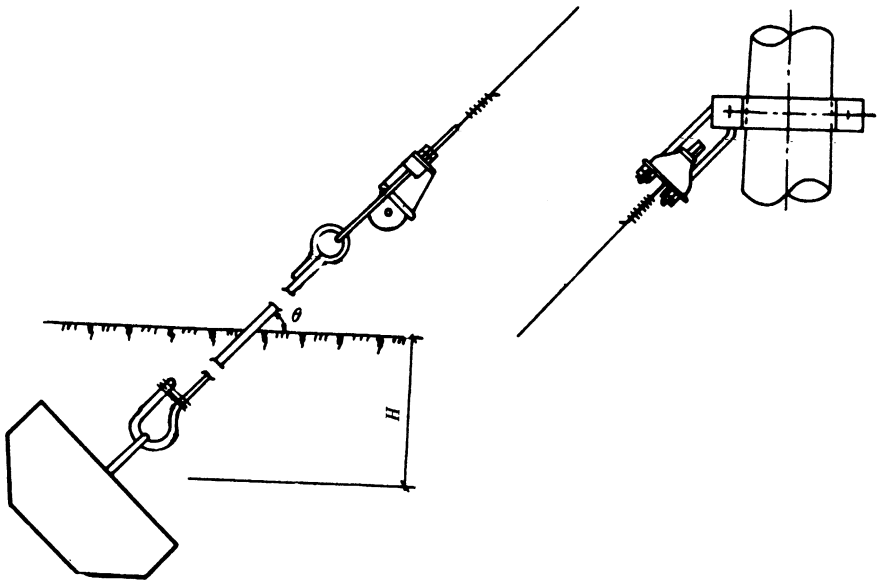


图 11-33 单钢绞线普通拉线组装

拉线长度的计算，一般是先计算装成拉线的计算长度，然后再计算拉线的预割长度，即钢绞线的下料长度。所谓拉线的计算长度，即是从电杆上拉线固定点至拉线捧出土处的直线长度，见图 11-32 上的  $l_0$ 。其值为：

$$l_0 = H/\sin\theta$$

算出拉线计算长度的目的是计算拉线组装所需钢绞线的长度,即拉线的预割长度。一般采用下式计算,即:

钢绞线长度 = 拉线计算长度 - 拉线棒出土部分长度 - 两端连接金具的长度 + 两端金具出口尾部钢绞线折回长度

## 四、拉线组装

### (一) 埋设拉线盘

将拉线棒与拉线盘组装好,放入拉线坑内。将拉线棒方向对准已立好的电杆。此时拉线棒应与拉线盘成垂直,若不垂直,须向左或向右移正拉线盘,直至符合要求为止,再进行回填土夯实。埋设好后,应使拉线棒的拉环露出地面 500~700mm。

### (二) 做拉线上把

拉线上把装在电杆上,需用拉线抱箍及螺栓固定(也可在横担上焊接拉线环)。组装时,先用一只螺栓将拉线抱箍抱在电杆上,然后把预制好的上把拉线环放在两块抱箍的螺孔间,穿入螺栓拧上螺母固定之。或使用 UT 线夹代替拉线环,先将拉线穿入 UT 线夹固定,再用螺栓将 UT 线夹与拉线抱箍联结,如图 11-33 所示。

### (三) 收紧拉线做中把

在下部拉线盘埋设好,拉线上把也做好后,便可收紧拉线做中把,使上部拉线和下部拉线棒连接起来,成为一个整体,以发挥拉线的作用。

收紧拉线时,一般使用紧线钳。将紧线钳下部钢丝绳系在拉线棒上,紧线钳的钳头夹住拉线高处,收紧钢丝绳将拉线收紧。将拉线的下端穿过 UT 线夹的楔形线夹内,将楔形线夹与已穿入拉线棒拉环的 U 形环联结,套上螺母,此时即可卸下紧线钳,利用可调 UT 型线夹调节拉线的松紧。拉线穿过楔形线夹折回尾线长度为 300~500mm,尾线回头与本线应扎牢。

安装好了的拉线应符合下列规定:

1. 拉线与地面的夹角应符合设计要求,一般宜为  $45^\circ$ ,其偏差不应大于  $3^\circ$ 。
2. 承力拉线应与线路方向的中心线对正,分角拉线应与线路分角线方向对正,防风拉线应与线路方向垂直。
3. 跨越道路的拉线,应满足设计要求,且对通车路面边缘的垂直距离不应小于 5m。
4. 采用 UT 型线夹及楔型线夹固定拉线时,应在丝扣上涂润滑剂,线夹舌板与拉线接触应紧密,受力后无滑动现象,线夹的凸肚应在尾线侧,安装时不得损伤导线,拉线弯曲部分不应有明显松股,拉线断头处与拉线主线应固定可靠,线夹处露出的尾线长度为 300~500mm,尾线回头后与本线应扎牢。UT 型线夹的螺杆应露扣,并应有不小于  $1/2$  螺杆丝扣长度可供调紧,调整后,其双螺母应并紧。
5. 过道拉线的拉桩杆应向张力反方向倾斜  $10^\circ \sim 20^\circ$ ,其埋设深度不应小于拉桩杆长的  $1/6$ ;拉桩坠线与拉桩杆夹角不应小于  $30^\circ$ ,拉桩坠线上端固定点的位置距拉桩杆顶端应为 0.25m。
6. 当一根电杆上装设多条拉线时,各条拉线的受力应一致。

当线路建在高低相差悬殊的地方,一般导线成仰角时用拉线,成俯角时用撑杆;当地形条件受到限制,无法安装拉线时,也可用撑杆代替拉线,作为平衡张力稳定电杆之用,组装如图 11-34 所示。撑杆的规格和高度,应根据电杆的高度、规格和受力情况来确定。撑杆与电杆间的夹角,应满足设计要求,允许偏差为  $\pm 5^\circ$ 。撑杆底部埋深不宜小于 0.5m,且底部应垫以底盘或块石,并应与撑杆垂直。撑杆与电杆的结合,采用  $\angle 63 \times 63 \times 6$  的角钢制成的联板支架(两块)和 M16  $\times$  210~270 的方头螺栓(4根)固定。在角钢联板支架上要放上 4 块特制的 M 型抱铁,使撑杆与电杆连接紧密、牢固。

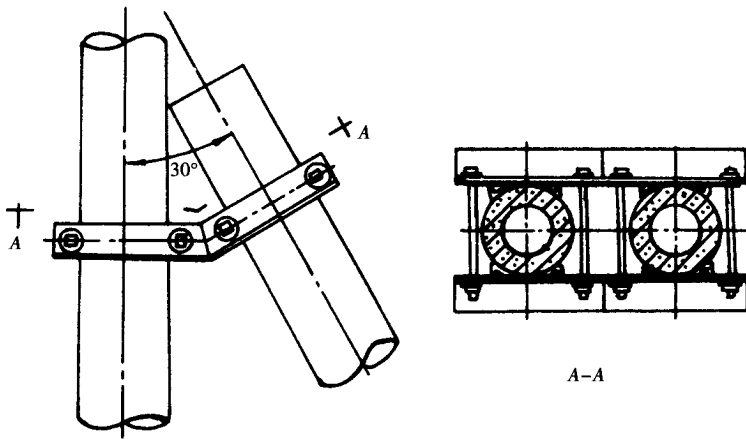


图 11-34 俯角撑杆组装图

## 五、拉线的装设方法

拉线应按电杆受力情况装设。当线路转角在  $45^\circ$  及其以下时,可只设置分角拉线;超过  $45^\circ$  时,则在线路中心线的延长线上设置拉线。拉线与电杆的夹角一般为  $45^\circ$ ,但受地形限制时,也允许不大于  $30^\circ$  角装设。拉线坑的深度可按受力大小决定,一般为  $1.2 \sim 1.5\text{m}$  深,以地横木或拉线盘承受最大拉力情况下不被拉动为原则,根据受力大小经过计算选择。

### (一) 拉线伸直及绞合

拉线制作之前,首先伸直拉线,根据需要的长度将铁线放开,将两端临时固定在树上或其他地方,由 5 至 6 人集中在中间把铁线拉直。按需要长度剪裁,按规定的股数绞合在一起,在绞合过程中,不可太松但也不要过紧,以防绞合不均产生抽筋,使拉线各股受力不平衡,而造成运行中拉线断股。

### (二) 拉线把的制作

拉线把的制作方法,一般分为自缠法和另缠法两种。自缠法是将拉线的折回部分作为缠绕绑线。在运行中不必要拆开和调正的拉线采用自缠法,对于需要拆开调正的端头则应用另缠法。通常在拉线地横木、拉线环、拉线瓷瓶等处都采用自缠法固定。拉线环的上部和水平拉线靠拉线桩一端都采用另缠法。

用自缠法缠绕时,一般只缠 5 段,后一段圈数比前一段圈数少一圈。如果股数较多(一般超过 9 股时),可采取双线缠绕,缠绕 5 段后多余的剪去。自缠法和另缠法的圈数和长度可参考表 11-10 及图 11-35。

表 11-10 拉线自缠回数及另缠长度

拉线股数	自缠最多回数	另缠长度 A	另缠长度 B
7 股以下	10	200mm	100mm
9 ~ 11 股	15	250mm	130mm
13 股以上	20	300mm	160mm

底把一般采用自缠法,首先制作底把拉线环,可直接用手弯成,具体操作方法如图 11-36 所示。

为了防止抽筋,在折弯之前先在折弯处用小铜线或黑胶布捆绑三道,拉线环制成之后,即可进行捆绑。

底把拉线环做好之后,将另一端用自缠法缠绕在地横木上并用卡钉固定。底把完全制成后,即可埋入拉

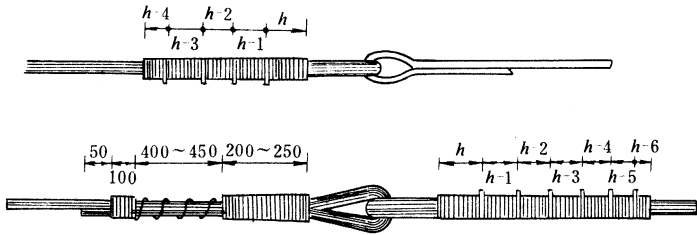


图 11-35 拉线自缠回数及另缠长度

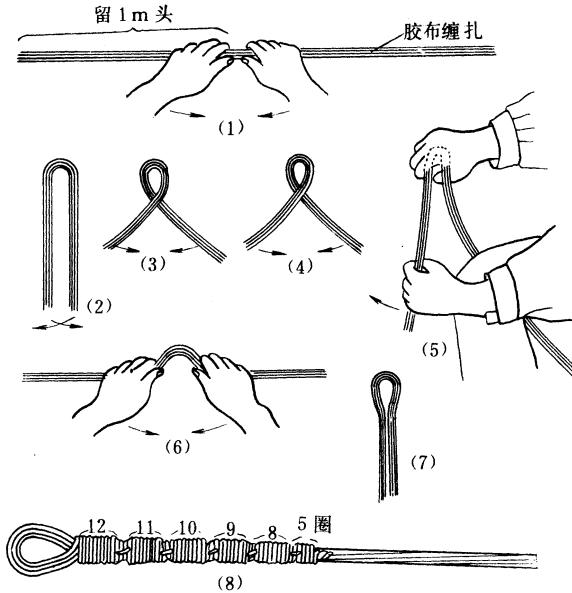


图 11-36 底把拉线环作法

线坑内,拉线环露出地面长度为 600 mm。如图 11-37 所示。

底把的埋设方向应与拉线方向相同,拉线坑须挖一马道以便敷设拉线,以免拉线变形影响受力。

拉线上把对于采用自缠法木杆的绑扎,将编好的拉线贴紧,用卡钉(扒锯子)固定,然后将拉线围绕过来以自缠法进行缠绕。

当拉线受力后,为不使电杆受到拉线作用而损坏,常在拉线与电杆接触处用铁板敷垫,并将垫板用卡钉固定。如图 11-38 所示。

对于水泥杆,可先制作拉线环,在制作拉线环时,在拉线环里边套入心形环,以免拉线环受力变形影响拉线的强度。拉线环制作方法与底把相同,然后套入拉线抱箍螺栓上。

拉紧绝缘子的装设位置,应使拉线断线而沿电杆下垂时,绝缘子离地面的高度应在 2.5m 以上,不致触及行人。同时应使绝缘子距电杆最近应在 2.5m 以上,以便在杆上作业时不致触及接地部分。

拉紧绝缘子两侧的拉线一般采用自缠法,如图 11-39 所示。

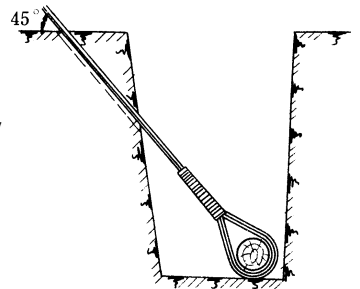


图 11-37 拉线底把

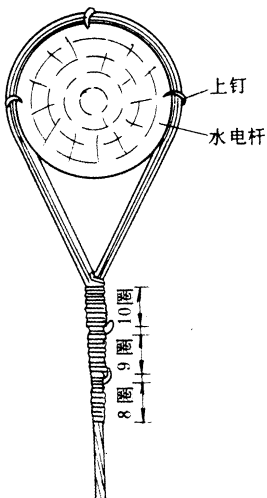


图 11-38 拉线把制作

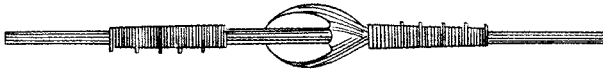


图 11-39 拉紧绝缘子

## 第五节 紧线施工技术

在紧线时,一般需要与垂弧测量、固定导线一起施工。紧线前,在一端耐张杆上,先把线头在瓷瓶上作终端固定,然后在另一端用紧线钳紧线如图 11-40 所示。紧线者在操作时,应听从垂弧测量者的指挥。紧线时应掌握以下几项操作方法。

1. 紧线器定位钩要固定牢靠,以防紧线时打滑,紧线器的夹线钳口夹位置应尽可能拉长一些,以增加导线收放幅度,便于调整导线的垂弧,紧线钳口应包括上铝色带,以免夹伤导线。
2. 一个耐张段内的电杆挡距基本相等,而每挡距内的导线自重也基本相等,故在一个耐张段内,不需对每一个挡距进行垂弧测量,只要在中间 1~2 挡距内进行测量即可,测量应从横担中间(即近电杆)的一根开始,接着测电杆另一边对应的一根,然后再交叉测量第三根和第四根,这样能使横担受力均匀,不致因紧线而出现扭斜。
3. 导线与地面的距离,在最大垂弧情况下,不应小于表 11-11 所示数值。

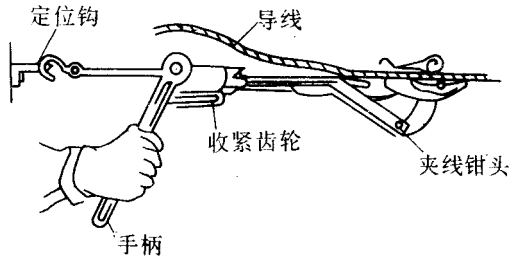


图 11-40 紧线钳紧线方法

表 11-11 导线与地面的最小距离

单位:米

线路电压(KV)	1次以下	6~10	35~110	220
线路经过地区				
居民区	6	6.5	7	7.5
非居民区	5	6.5	6	6.5
交通困难地区	4	4.5	5	5.5

拉线上把与下把完成之后,即可用紧线器将拉线收紧,如图 11-41 所示。收紧方法是将上部拉线穿到底把拉线环,用力将端头折回,将折回靠近拉线环的一股抽出绞入紧线器,作为紧线器的尾巴,紧线器叨住上把开始收紧拉线。紧好后将另几股合拢,用另缠法进行缠绕。

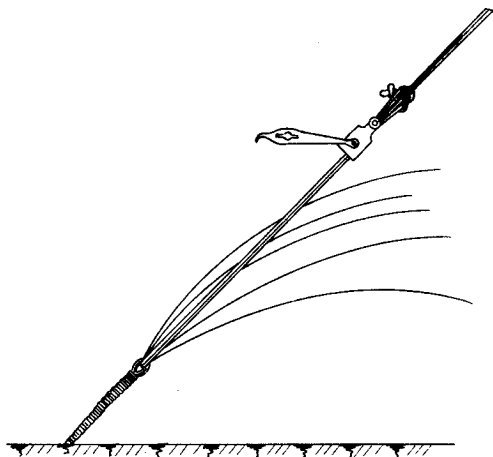


图 11-41 收紧拉线

## 一、准备工作

1. 在紧线区间两端杆塔上的临时拉线,必须重新检查,调整一次,以防止杆塔受力后发生倒杆塔事故;
2. 全面检查导线、避雷线的连接情况,确认符合规定时,方可进行紧线;
3. 在紧线区间内未清除的障碍物(如房屋、树木等),应全部清除;
4. 通信联系应保持良好状态,全部通信人员和护线人员均应到位,以便随时观查导线、避雷线的情况,防止导线卡在滑车中被拉断,或拉倒杆塔;
5. 观测弧垂人员均应到位并做好准备;
6. 在拖地放线时超过路口处,有时将导线临时埋入地中或支架悬空,在紧线前应将导线、避雷线挖出或脱离支架;
7. 冬季施工时,应检查导线、避雷线通过水面是否被冻结;
8. 逐基检查导线、避雷线是否悬挂在轮槽内;
9. 牵引设备和所用的紧线工具是否已准备就绪;
10. 所有交叉跨越线路的措施是否都稳妥可靠,主要交叉处有无专人照管。

## 二、紧线方法分类

紧线方法有单线法、双线法、三线法,施工时可根据具体情况采用之。

### (一)单线法

所谓单线法即是一线一紧的方法。这种方法的优点是所需的设备少,所需的牵引力小,要求紧线人数不多,施工时不致发生混乱,比较容易施工;其缺点是施工的进度较慢,紧线时间长。

### (二)双线法

双线法是同时紧两根架空导、地线,如图 11-42 所示。



图 11-42 二线法

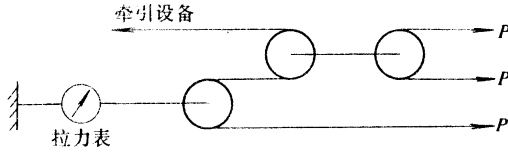


图 11-43 三线法

### (三) 三线法

三线法是一次同时紧三根导线,利用三线法紧线的示意图表示在图 11-43 中。不管是二线法还是三线法,尽管其紧线的速度快,但其准备工作繁多,效果并不十分理想,所以使用并不十分广泛。

## 三、紧线操作步骤

### (一) 紧线操作程序和工具

1. 紧线时通常使用与导、地线规格的三角紧线器,对 GJ-35 以下的钢绞线,也可使用比较轻便的蛙式紧线器。
2. 紧线的顺序是从上到下,先紧架空地线、后紧导线,先紧中间导线、后紧两边导线。
3. 当使用机动绞磨和人力绞磨紧线时,负责指挥的紧线人应注意拉力表和导线离地情况,如发现异常情况,应立即停止牵引,待查明原因后,再继续紧线。特别当导线收紧至接近要求的弧垂值时,应放慢牵引速度,当达到要求的弧垂值时,立即停止牵引,待半分钟至一分钟,被紧导线无变化时,方可在操作杆塔上划印。
4. 划印,对导线而言,是从紧线钢绳量至挂耐张绝缘子串的球头挂环的球头中心;对架空地线而言,则量至耐张楔形线夹用的金具穿螺栓处。划印使用绑线绑扎或专用红铅笔,并在划印两端做出明显标记。划印后,应复查弧垂无误后,并自划印点量出应切割的线长,即可切断导线。

### (二) 一次紧线法

所谓一次紧线法,是在划印后,由施工人员在杆塔上将导、地线卡入耐张线夹,将其挂上杆塔,松去紧线器。这种操作方法是因架空线不需再行松下落地而得名。其优点是不用松线,减少对交叉跨越处的阻碍时间,但其高空作业量大,不利于保证卡线质量。

### (三) 二次紧线法

二次紧线法是当高空划印后,将导、地线放松落地,由地面人员根据印记操作卡线,同时组装绝缘子串,再次紧线。高空作业人员只需待绝缘串接近杆塔上的球头挂环时,立即将球头套入绝缘子碗头,插入弹簧销完成挂线操作。

二次紧线法的优点是:

1. 高空作业量小;
2. 有利于保证卡线质量。

其缺点是:

1. 多一次松、紧线操作;
2. 增加对交叉跨越处的阻碍时间。

通常对小截面导线皆使用一次紧线法。

## 四、紧线的安全要求

1. 紧线时应在基础混凝土强度达到设计要求而且对各杆塔均已检验合格后方可进行。
2. 紧线用的牵引地锚距紧线杆塔的距离不得小于杆塔高度的 2.0 倍。牵引绳对地夹角不宜大于  $30^\circ$  ,以减少对紧线杆塔横担的下压力。
3. 紧线段内的越线架、交通要道以及导线接头通过放线滑车时均应设专人护线 ,发现异常现象立即停止紧线。
4. 紧线时工作人员不得在导线下面停留。当导线、避雷线拉紧即将离地时 ,任何人不得横跨导线、避雷线。非工作人员应离开导线、避雷线 20m 以远。
5. 耐张杆塔的绝缘子串的挂线金具靠近横担挂线点时 ,应停止紧线 ,然后挂线人员方可到挂线点操作挂线。挂线完毕后应缓慢放松牵引绳 ,边松牵引绳边调整耐张杆的永久拉线和临时拉线 ,并观察电杆有无变形。
6. 为保证导线和杆塔的安全 ,挂线时 ,孤立档或较短的耐张段的导线过牵引长度应符合下列要求 :①档距大于 300m 时允许过牵引长度为 200mm。②紧线档距离 200 ~ 300m 时 ,过牵引长度不宜大于档距的 0.5%。③紧线档距在 200m 以下时 ,按导线的安全系数不小于 2.0 进行控制。

## 五、紧线施工要求

紧线时 ,每一耐张杆受张力的反方向除了有正式拉线外 ,还应装设临时拉线 ,以防紧线时横担产生偏扭 ,临时拉线在杆上固定点应尽量靠近导线的固定点。

加施工条件许可 ,还可采用对两根边线同时收紧的方法 ,如图 11-44 所示。紧线用的绞磨与耐张杆的水平距离应不小于地面到导线悬挂点这段距离的两倍。如导线截面较小 ,可用人力拉紧导线进行收线。如在紧线时导线张力太大 ,牵引钢丝绳与导线的连接须用特制的紧线钳。常用的紧线钳有三角式、蛙式等几种 ,见图 11-45。如缺少紧线钳时 ,亦可自制木质螺栓线夹 ,如图 11-46 所示。木质螺栓线夹是用两块带相槽硬木和紧固螺栓 ,硬木槽的大小应与导线的直线相配合。

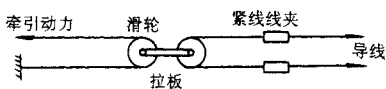


图 11-44 两线同时紧线的方法

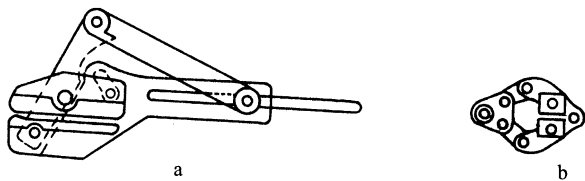


图 11-45 紧线钳

a. 三角紧线钳 b. 蛙式紧线钳

用线夹或紧线钳夹握导线时 ,应在导线上包以麻布或铝带 ,以免导线夹伤。

紧线时 ,将导线钳或线夹在固定电杆上 ,并收紧导线。这时应选一挡用来观察导线的弛度。观测弛度这一挡距大小要适中 ,高差不要相差太大 ,一般选在耐张段中间附近几挡。

担负弛度观察的电工登杆后 ,把弛度板固定在两端电杆上 ,其位置是从固定导线点 ,沿杆向下量取当时气温下的弛度值 ,然后由观察弛度的电工 ,以目力由本杆的弛度板瞄准对面杆上的弛度板 ,命令紧线 ,当导线的线条正好与对面杆的弛度板成一直线相切时即可停止紧线图 11-47。最后绑扎固定各杆上导线 ,紧线工



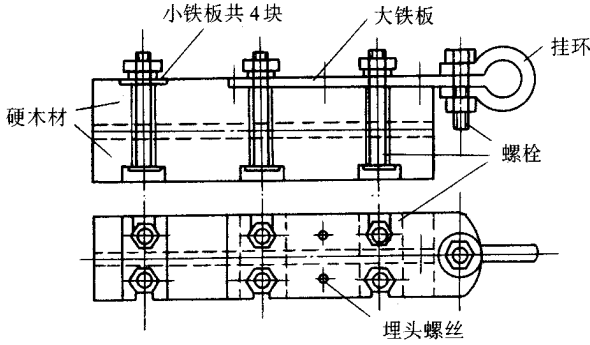


图 11-46 木质螺栓线夹

作即告完成。

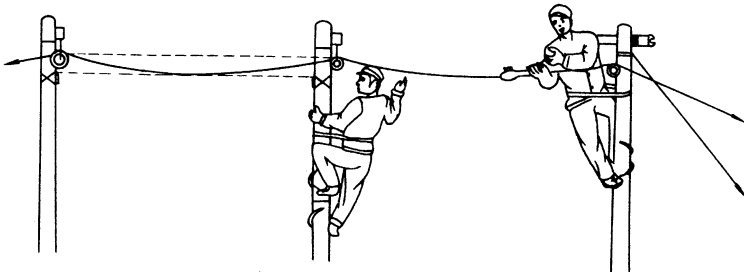


图 11-47 观测导线的弛度

## 六、紧线的施工方法

紧线前,应检查导线是否都放在滑车中。小段紧线亦可将导线放在针式绝缘子的顶部沟槽内。不允许将导线放在铁横担上,以免磨伤。

紧线时要有统一的指挥,明确的松紧信号。指挥人员要根据观测档对弧垂观测的结果,指挥松紧导线。各种导线在不同温度下的弧垂值,因地区气象特点而不同。不同气象地区,应根据本地区电力部门规定的弧垂进行紧线。

紧线时,一般应做到每基电杆有人,以便及时松动导线,使导线接头能顺利越过滑车或绝缘子。

一般中小型铝绞线和钢芯铝绞线可用紧线钳紧线,紧线方法见图 11-48。

先将导线通过滑轮组,用人力初步拉紧。然后,将紧线钳上钢丝绳松开,固定在横担上。紧线钳的错口夹住导线(导线上应包缠麻布)。紧线时,横担两侧的导线应同时收紧,以免横担受力不均而歪斜。

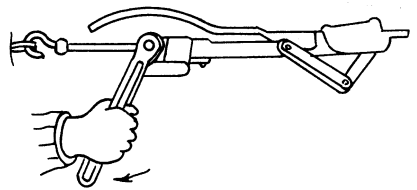


图 11-48 紧线图

紧线时,要根据当时的气温,确定导线的弧垂值。观测弧垂的方法是:在耐张段内选择一个标准档距,在该档距的两端电杆上,根据要求的弧垂值,各绑一横板(弛度尺),见图 11-49。当导线紧到观察档导线弛度最低点和两块横板,三点成一条直线时就可以了。注意使用新铝导线紧线时要比弧垂表规定值平均多紧 15%~20%,以便在导线受拉力发生初伸长时,仍保证弧垂合适。

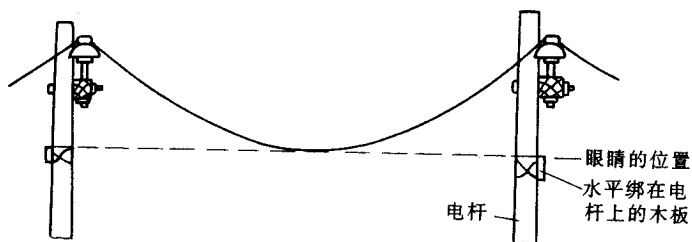


图 11-49 弧垂观测方法

## 七、常见的导线固定方法

导线在绝缘子上通常用绑扎方法来固定。绑扎方法因绝缘子形式和安装地点的不同而异,常用的有以下几种。

### (一) 顶绑法

顶绑法用于直线杆针式绝缘子的固定绑扎。铝导线绑扎时应先在导线绑扎处先绑好 150mm 长的铝包带。所用铝包带宽为 10mm,厚为 1mm。绑扎材料应与导线材料相同,其直径在 2.6~3mm 范围内。绑扎步骤如图 11-50 所示。

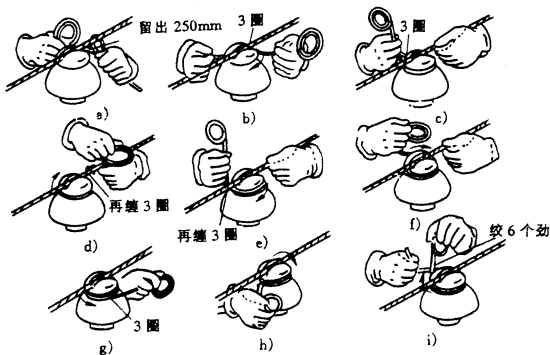


图 11-50 针式绝缘子顶绑法

这种方法一般适用 1~10kV 直线杆针式绝缘。

### (二) 侧绑法

侧绑法用于转角杆和 1kV 以下的直线杆的针式绝缘子的固定绑扎。铝导线绑扎时应先在导线绑扎处绑好 150mm 长铝带。导线应放在绝缘子颈部外侧。若由于绝缘子顶槽太浅,直线杆也可以用这种方法绑扎。侧绑法如图 11-51 所示。

### (三) 终端绑扎法

终端绑扎法适用于终端杆蝶式绝缘子上导线绑扎。首先在与绝缘子接触部位的铝导线外绑上铝包带,然后把预缠成圈的绑线一端留出长 200~250mm,夹在导线之间,再用绑线在导线上绑扎,第一圈应离蝶式绝缘子裙边 80mm,绑扎到规定长度后与短头扭绞 2~3 圈,余线剪断压平。最后把折回导线向反方向弯曲,如图 11-52 所示。

### (四) 用耐张线夹固定导线

在导线需要安装线夹部分,用同规格的线股缠绕。其方向与导线外层线股缠绕方向一致。两端各留长 10mm。安装线夹时,先将全部 U 形螺栓及压板稍稍拧紧。然后按图 11-53 中所所示的 1、2、3、4 顺序最后拧紧

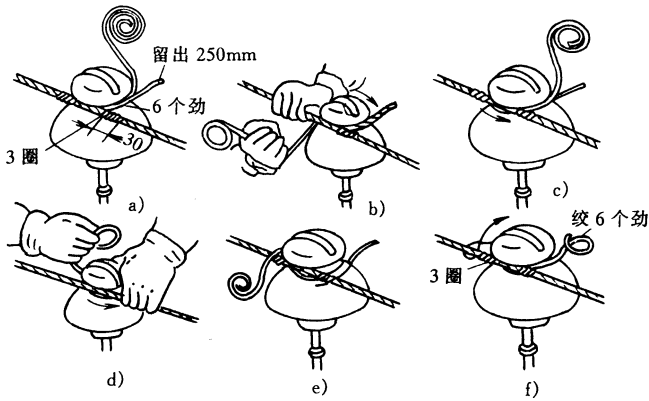


图 11-51 针式绝缘子侧绑法

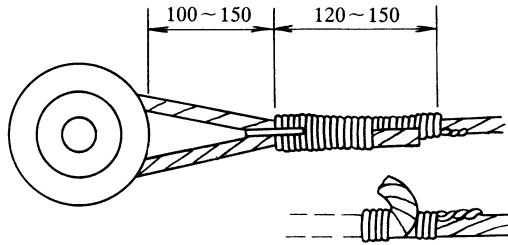


图 11-52 终端绑扎法

复查。

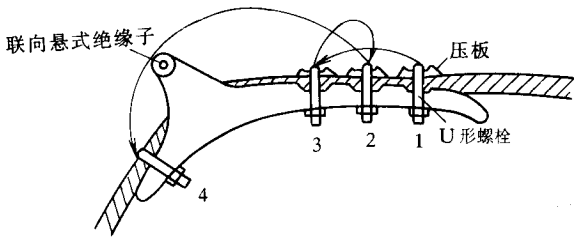


图 11-53 耐张线夹固定法

(五)导线的固定应牢固、可靠,且应符合下列规定:

1. 直线角度杆

导线应固定在针式绝缘子转角外侧的凹槽内。

2. 直线跨越杆

导线应固定在外侧瓷瓶上,中相导线应固定在右侧瓷瓶上(面向电源侧),导线本体不应在固定处出现角度。

3. 裸铝导线在绝缘子或线夹上固定时,应缠铝包带,缠绕长度应超出接触部分 30mm。

4. 裸铝导线在蝶式绝缘子上作耐张且采用绑扎方式固定时,其接触部分应缠铝包带。绑扎长度不应小于表 11-12 所列数值。

表 11-12 绑扎长度值

导线截面/mm <sup>2</sup>	绑扎长度/mm
LJ-50、LGJ-50 及以下	150
LJ-70	200

## 八、导线固定工艺

在低压和 10 千伏高压的架空线上,一般都用瓷瓶作为导线的支持物。直线杆上的导线与瓷瓶的贴靠方向应为同一方向,转角杆上的导线,必须贴靠在瓷瓶外侧,导线在瓷瓶上的固定,均采用绑扎方法,裸铝绞线因质地过软,而绑扎线较硬,且绑扎时用力过大,故在绑扎前需在铝绞线上包缠一层保护层,包缠长度以两端各伸出绑扎处 20 毫米为准。

### (一) 顶绑法

一般用于固定直线杆针式绝缘子的导线,其操作方法如图 11-54 所示。绑扎时首先在导线绑扎处绑扎 150 毫米长的铝带。所用铝带的宽为 10 毫米,厚为 1 毫米,绑线的材料应与导线材料相同,直径应为 2.6~3 毫米范围内,绑扎步骤如下:

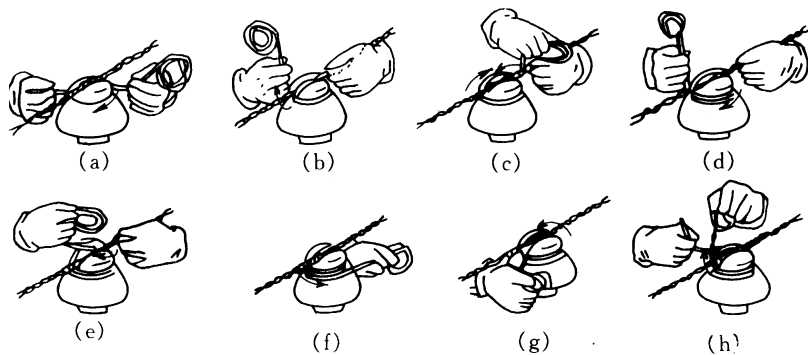


图 11-54 针式瓷瓶的顶绑法

1. 把绑扎线绕成卷,在绑线的一端留出一个长约为 250 毫米的短头,用短头在绝缘子左侧的导线上绑绕 3 圈,方向是从导线外侧经导线上方,绕向导线内侧[图 11-54(a)]所示。
2. 用绑线在绝缘子颈部内侧,绕到绝缘子右侧的导线上绑绕 3 圈,其方向是从导线下方,经外侧绕向上方[图 11-54(b)]所示。
3. 用绑线在绝缘子颈部外侧,绕到绝缘子左侧导线上再绑绕 3 圈,其方向是由导线下方经内侧绕到导线上方[图 11-54(c)]所示。
4. 用绑线从绝缘子颈部内侧,绕到绝缘子右侧导线上,并再绑绕 3 圈,其方向是由导线下方经外侧绕到导线上方[图 11-54(d)]所示。
5. 以后重复图 11-54(c)所示作法,把绑线绕瓷瓶颈槽到导线右边下侧,并斜压住顶槽中导线,继续绑扎到绝缘子左边下侧[图 11-54(e)]所示。
6. 以导线左边下侧按逆时针方向围绕瓷瓶颈槽到右边导线下侧[图 11-54(f)]所示。
7. 把绑线从导线右边下侧斜压住顶槽中导线,并绕导线左边下侧,使顶槽中导线被绑线压成 X 形[图 11-54(g)]所示。
8. 最后将绑线从导线左边下侧按顺时针方向围绕瓷瓶颈槽到绑线的另一端,相交于瓷瓶中间,并互绞 6

圈后剪去余端 图 11-54(h) 所示。

## (二) 颈绑法

颈绑法是转角杆针式绝缘子上的绑扎方法。把导线放在绝缘子颈部外侧(若直线杆的绝缘子顶槽太浅,无法采用顶绑时,直线杆也可采用这种绑扎方法)。导线在进行额绑时,首先在导线绑扎处同样要绑扎一定长度的铝带,步骤如图 11-55 所示。

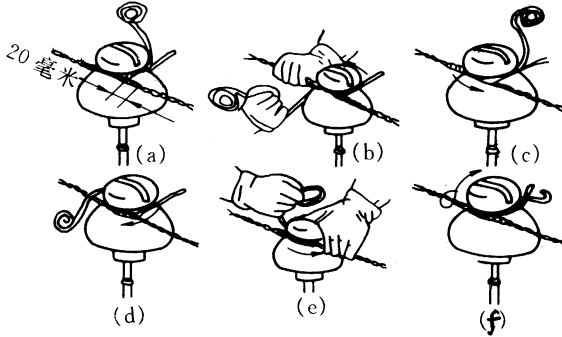


图 11-55 针式瓷瓶的颈绑法

1. 把绑线短的一端在贴近瓷瓶处的导线右边缠绕 3 圈,然后与另一端绑线互绕 6 圈[如图 11-55(a)所示],并把导线嵌入瓷瓶颈部的嵌线槽内。
2. 接着把绑线从瓷瓶背后紧紧地绕到导线的左下方[如图 11-55(b)所示]。
3. 随着把绑线从导线的左下方围绕到导线右上方,并如同上法再把绑线绕瓷瓶一圈[如图(c)所示]。
4. 然后把绑线再绕到导线左上方,并继续绕到右下方,使绑线在导线上形成 X 形的交绑状[如图 11-55(d)(e)所示]。
5. 最后把绑线绕到导线左上方,并贴近瓷瓶处紧缠导线 3 圈后,向瓷瓶背部绕去,与另一端绑线紧绞 6 圈后,剪去余端[如图 11-55(f)所示]。

## (三) 终端绑扎法

终端绑扎法是终端杆蝶式绝缘子的绑扎方法,如图 11-56 所示。

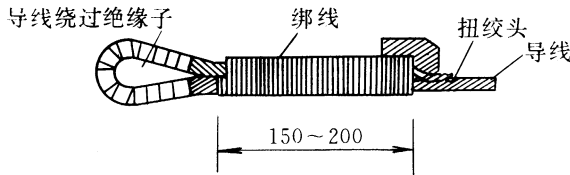


图 11-56 终端绑扎法

其操作步骤如下:

1. 首先在与绝缘子接触部分的铝导线上绑以铝带,然后把绑线绕成卷,在绑线一端留出一个短头,长度为 200~250 毫米(绑扎长度为 150 毫米时,短头长度为 200 毫米,绑扎长度为 200 毫米时,短头长度为 250 毫米)。
2. 把绑线短头夹在导线与折回导线之间,再用绑线在导线上绑扎,第一圈应距蝶式绝缘子表面 80 毫米,绑扎到规定长度后与短头扭绞 2~3 圈,余线剪去压平,最后把折回导线反方向弯曲。
3. 绑扎长度不小于下表 11-13。

## (四) 用耐张线夹固定导线法

1. 用紧线钳先将导线收紧,使导线弧垂比所要求的数值稍小一些,然后在导线需要安装线夹的部分用同规格的线股缠绕,缠绕时,应从一端开始绕向另一端,其方向应与导线外层线股缠绕方向一致。缠绕长度

应露出线夹两端 10 毫米。

表 11-13 绑扎长度

导线截面(平方毫米)	绑扎长度(毫米)
LJ-50 及以下	150
LJ-50	200
LJ-70	250
TJ-16 及以下	100
T1-25~30	150
TJ-50~95	200

2. 卸下线夹的全部 U 形螺栓,使耐张线夹的线槽紧贴导线缠绕部分,然后装上全部 U 形螺栓及压板,并稍拧紧。最后按图 11-57 所示的 1、2、3、4 顺序拧紧。在拧紧过程中,要使线夹受力均匀,不要使线夹的压板偏斜和卡碰。所有螺丝全部拧紧后,再逐个检查并反复紧一次。

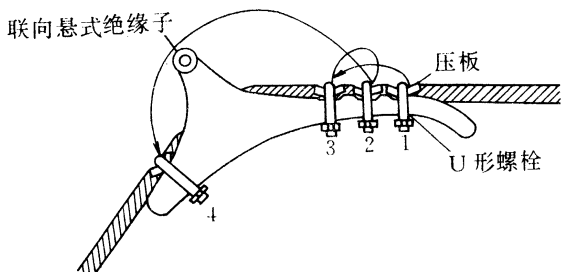


图 11-57 耐张线夹固定法

### (五) 10 千伏及以下线路的导线排列规定

1. 10 千伏直线杆应采用三角形排列,耐张杆、终端杆可采用水平排列。导线间的最小距离不应小于 0.8 米。如图 11-58 所示。

2. 1 千伏以下,应采用水平排列。导线间的水平距离不应小于 0.4 米。靠近电杆的两导线间水平距离不应小于 0.5 米。

## 九、导线在瓷瓶上固定方法

导线在瓷瓶上用绑扎方法加以固定。绑扎用的扎线应与导线使用相同材料,铝线外部尚需加绑一层铝包带。绑扎导线与软铝包带的长度见表 11-14。

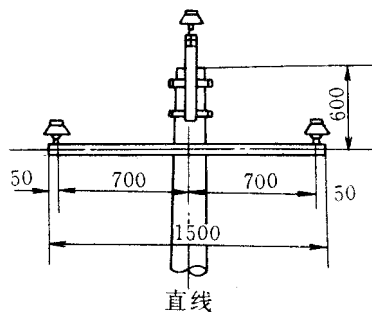


图 11-58 相间距离

表 11-14 绑扎导线与软铝包带长度表

导线截面 (毫米 <sup>2</sup> )	顶扎法和颈扎法		终端扎法	
	铝带长度(米)	绑线长度(米)	铝带长度(米)	绑带长度(米)
50 以下	0.5	2.8	1.5	3~4
70~120	0.7	2.8	2.0	3.5~4.5

导线在瓷瓶上绑扎方法见图 11-59, 11-60 和 11-61。

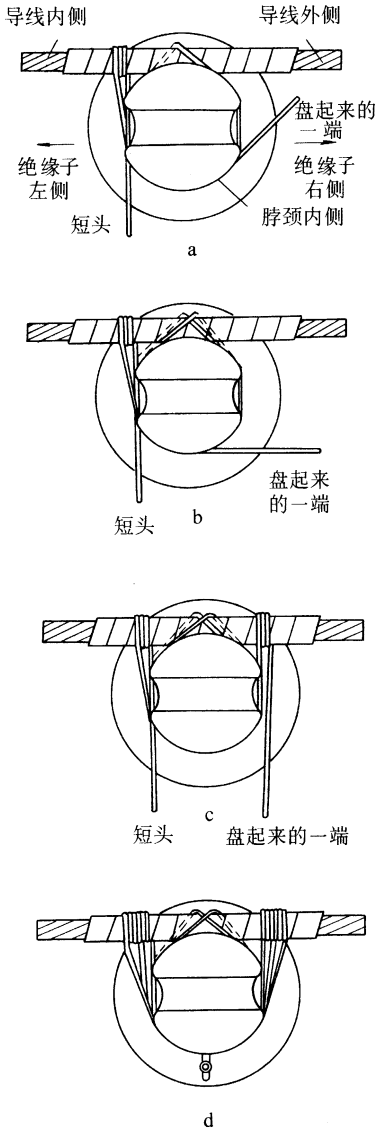


图 11-59 颈扎法

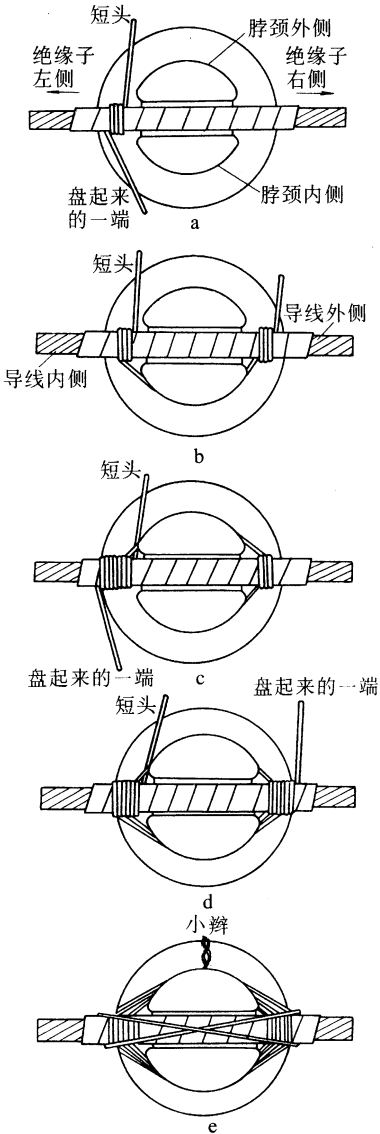


图 11-60 顶扎法

1. 颈扎法。方法见图 11-59 所示。
2. 顶扎法。方法见图 11-60 所示。

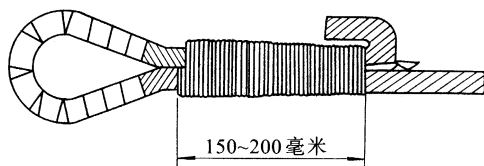


图 11-61 终端扎法

3. 终端扎法。方法见图 11-61 所示。如截面较大,导线的弯头较难做,可用耐张线夹固定,在导线与瓷瓶相接触的部分,也要用铝包带把导线包起来加以保护导线。

## 第六节 电杆组装施工技术

架空线路的杆塔具有高、大、重的特点,起立杆塔基本上有整体起立和分解起立两种方式,整体起立杆塔的优点是,绝大部分组装工作可在地面上进行,高空作业量少,施工比较安全方便。架空配电线路均应尽可能采用整体起立的方法。这就必须在起立之前对杆塔进行组装。所谓组装,就是根据图纸及杆型装置杆塔本体、横担、金具、绝缘子等。

### 一、电杆及各部件的质量要求

在电杆组装之前,应依据图纸对电杆及各部件的规格和质量做一次检查,避免把不符合要求的部件用到工程上去,影响整个线路系统的质量。

#### (一) 钢筋混凝土电杆

首先要求电杆高度须符合设计要求,因为电杆的高度是由导线弛度、导线与地面间的允许距离、线路电压等条件所决定的。导线最低点与地面之间,必须保证有足够的距离,因为在导线下面不仅要通过行人,而且要通过各种车辆。其次是电杆梢径应符合设计要求,因为电杆梢径不同,其承力情况也不同,它是影响线路质量的一个重要方面。另外还要求电杆表面光洁平整,壁厚均匀,没有露筋、跑浆等现象,不应有纵向裂纹,横向裂纹的宽度不应超过 0.1mm,预应力混凝土电杆应无横向裂纹。电杆本身不应有超过杆长 1/1000 的弯曲,且顶端应封堵良好。

#### (二) 横担及金具

配电线路普遍使用的角钢横担及其它采用黑色金属制造的金具零件均应热镀锌,且表面应光洁无裂纹、毛刺、飞边、砂眼、气泡等缺陷。耐张线夹的船体压板与导线接触面应光滑。遇有局部锌皮剥落者,除锈后应涂刷红樟丹及油漆。

金具上的各种联结螺栓表面不应有裂纹、破眼、锌皮剥落及锈蚀等现象,螺杆与螺母的配合应良好,且应有防松装置。所用防松装置亦应镀锌良好,弹力合适,厚度符合规定。

#### (三) 绝缘子

绝缘子(包括瓷横担绝缘子)瓷釉表面应干净光滑、无裂纹、缺釉、斑点、烧痕、气泡或瓷釉烧坏等缺陷,瓷件与铁件组合无歪斜现象,且结合紧密,铁件镀锌良好。型号、规格符合设计要求,且有出厂合格证。无出厂合格证时应进行交流耐压试验或用 2500V 摇表测量其绝缘电阻值。



## 二、电杆组装施工项目

### (一) 横担安装位置

高压架空配电线路导线成三角形排列,最上层横担(单回路)距杆顶距离宜为 800mm,耐张杆及终端杆宜为 1000mm。低压架空线路导线采用水平排列,最上层横担距杆顶的距离不宜小平 200mm;当高低压共杆或多回路多层横担时,各层横担间的垂直距离可参照表 11-15。

表 11-15 多回路各层横担间最小垂直距离/mm

类别	直线杆	分支或转角杆
高压与高压	800	450/600
高压与低压	1200	1000
低压与低压	600	300

各横担须平行架设在一个垂直面上,和配电线路垂直。高低压合杆架设时,高压横担应在低压横担的上方。直线杆单横担一般装在受电侧,90°转角杆及终端杆一般应采用双横担,当采用单横担时,应装于拉线侧。遇有弯曲的电杆,单横担应装在弯曲的凸面,且应使电杆的弯曲与线路的方向一致。

### (二) 横担安装

将电杆顺线路方向放在杆坑旁准备起立的位置处,杆身下两端各垫道木一块,从杆顶向下量取最上层横担至杆顶的距离,划出最上层横担安装位置。先把 U 型抱箍套在电杆上,放在横担固定位置,在横担上合好 M 型抱铁,使 U 型抱箍穿入横担和抱铁的螺栓孔,用螺母固定。先不要拧紧,只要立杆时不往下滑动即可。待电杆立起后,再将横担调整至符合规定,将螺帽逐个拧紧。调整好了的横担应平正,端部上下歪斜及左右扭斜均不得超过 20mm。

瓷横担安装应符合下列规定:垂直安装时,顶端顺线路歪斜不应大于 10mm;水平安装时,顶端宜向上翘起 5°~15°,顶端顺线路歪斜不应大于 20mm。

### (三) 杆顶支座安装

将杆顶支座的上、下抱箍抱住电杆,分别将螺栓穿入螺栓孔,用螺母拧紧固定。如果电杆上留有装杆顶支座的孔眼,则不用抱箍,可将螺栓直接穿入支座和电杆上的孔眼,用螺母拧紧固定即可。

### (四) 绝缘子安装

杆顶支座及横担调整紧固好后,即可安装绝缘子。安装前应把绝缘子表面的灰垢、附着物及不应有的涂料擦拭干净,经过检查试验合格后,再进行安装。要求安装牢固、连接可靠、防止积水。悬式绝缘子的安装,尚应符合下列规定:①与电杆、导线金具连接处,无卡压现象;②耐张串上的弹簧销子、螺栓及穿钉应由上向下穿。当有特殊困难时,可由内向外或由左向右穿入。③绝缘子裙边与带电部位的间隙不应小于 50mm。

## 三、钢筋混凝土电杆的连接要求

等径分段钢筋混凝土电杆和分段的环形截面锥形电杆,均必须在施工现场进行连接。钢圈连接的钢筋混凝土电杆宜采用电弧焊接,其焊接示意如图 11-62 所示。当采用气焊时,则应满足下列规定:①钢圈的宽度不应小于 140mm。②加热时间宜短,并采取必要的降温措施。焊接后,当钢圈与水泥粘接处附近水泥产生宽度大于 0.05mm 纵向裂缝时,应予补修。③电石产生的乙炔气体,应经过滤。

采用电弧焊接时应由经过焊接专业培训并经考试合格的焊工操作。

## 四、卡盘安装要求

卡盘是用 U 型抱箍固定在电杆上埋于地下,其上口距地面不应小于 500mm,允许偏差为  $\pm 50\text{mm}$ ,如图 11-63 所示。一般是在电杆立起之后,四周分层回填土夯实至卡盘安装位置时,将卡盘固定在电杆上,然后再继续填土夯实。

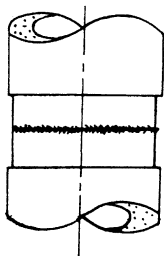


图 11-62 钢圈  
焊接示意图

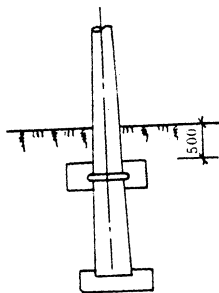


图 11-63 卡盘安装

卡盘安装在直线路路上时,应与线路平行,并应在线路电杆两侧交替埋设。承力杆上的卡盘应埋设在承力侧。

## 五、电杆组装方法

架空线路的杆塔具有高、大、重的特点,起立杆塔基本上有整体起立和分解起立两种方式,整体起立杆塔的优点是,绝大部分组装工作可在地面上进行,高空作业量少,施工比较安全方便。架空配电线路均应尽可能采用整体起立的方法。这就必须在起立之前对杆塔进行组装。所谓组装,就是根据图纸及杆型装置杆塔本体、横担、金具、绝缘子等。


### (一) 钢筋混凝土电杆的连接方法

等径分段钢筋混凝土电杆和分段的环形截面锥形电杆,均必须在施工现场进行连接。钢圈连接的钢筋混凝土电杆宜采用电弧焊接,当采用气焊时,则应满足下列规定:①钢圈的宽度不应小于 140mm。②加热时间宜短,并采取必要的降温措施。焊接后,当钢圈与水泥粘接处附近水泥产生宽度大于 0.05 mm 纵向裂缝时,应予补修。③电石产生的乙炔气体,应经过滤。

采用电弧焊接时应由经过焊接专业培训并经考试合格的焊工操作,焊接时应符合下列规定:

1. 焊接前,钢圈焊口上的油脂、铁锈、泥垢等物应清除干净。
2. 钢圈应对齐找正,中间留 2~5mm 的焊口缝隙。当钢圈有偏心时,其错口不应大于 2mm。
3. 焊口调整符合要求后,宜先点焊 3~4 处,然后对称交叉施焊。点焊所用焊条牌号应与正式焊接用的焊条牌号相同。
4. 当钢圈厚度大于 6mm 时,应采用 V 形坡口多层焊接,焊接中应特别注意焊缝接头和收回的质量。多层焊缝的接头应错开,收口时应将熔地填满。焊缝中严禁堵塞焊条或其他金属。焊缝应有一定的加强面,其高度和遮盖宽度应符合表 11-16 的规定。

表 11-16 钢圈焊缝加强面要求

焊缝加强面尺寸 /mm	钢圈厚度 $s$ /mm	
	< 10	10 ~ 20
高度 $c$	1.5 ~ 2.5	2 ~ 3
宽度 $e$	1 ~ 2	2 ~ 3
示意图		

5. 焊缝表面应呈平滑的细鳞形与基本金属平缓连接,无折皱、间断、漏焊及未焊满的陷槽,并不应有裂纹。基本金属咬边深度不应大于 0.5mm,且不应超过圆周长的 10%。

6. 在雨、雪、大风天气时,应采取妥善措施后,才可施焊。施焊中电杆内不应有穿堂风。当气温低于  $-20^{\circ}\text{C}$  时,应采取预热措施,预热温度为  $100 \sim 120^{\circ}\text{C}$ ,焊后应使温度缓慢下降。严禁用水降温。

7. 焊完后的整杆弯曲度不得超过电杆全长的  $2/1000$ ,超过时应割断重新焊接。

8. 接头应按设计要求进行防腐处理。可将钢圈表面铁锈和焊缝的焊渣与氧化层除净,先涂刷一层红樟丹,干燥后再涂刷一层防锈漆。

## (二) 横担安装方法

高压架空配电线路导线成三角形排列,最上层横担(单回路)距杆顶距离直为 800mm,耐张杆及终端杆宜为 1000mm。低压架空线路导线采用水平排列,最上层横担距杆顶的距离不宜小于 200mm;当高低压共杆或多回路多层横担时,各层横担间的垂直距离可参照表 11-17 选取。

表 11-17 多回路各层横担间最小垂直距离/mm

类别	直线杆	分支或转角杆
高压与高压	800	450/600
高压与低压	1200	1000
低压与低压	600	300

各横担须平行架设在一个垂直面上,和配电线路垂直。高低压合杆架设时,高压横担应在低压横担的上方。直线杆单横担一般装在受电侧,分支杆、 $90^{\circ}$ 转角杆及终端杆一般应采用双横担,但当采用单横担时,应装手拉线侧。遇有弯曲的电杆,单横担应装在弯曲的凸面,且应使电杆的弯曲与线路的方向一致。

将电杆顺线路方向放在杆坑旁准备起立的位置处,杆身下端各垫道水一块,从杆顶向下量取最上层横担至杆顶的距离,画出最上层横担安装位置。先把 U 形抱箍套在电杆上,放在横担固定位置;在横担上合好 M 形抱铁,使 U 形抱箍穿入横担和抱铁的螺栓孔,用螺母固定。先不要拧紧,只要立杆时不往下滑动即可。待电杆立起后,再将横担调整至符合规定,将螺帽逐个拧紧。调整好了的横担应平正,端部上下歪斜及左右扭斜均不得超过 20mm。

瓷横担安装应符合下列规定:垂直安装时,顶端顺线路歪斜不应大于 10mm;水平安装时,顶端宜向上翘起  $5^{\circ} \sim 15^{\circ}$ ,顶端顺线路歪斜不应大于 20mm。

## (三) 杆顶支座安装

将杆顶支座的上、下抱箍抱住电杆,分别将螺栓穿入螺栓孔,用螺母拧紧固定。如果电杆上留有装杆顶

支座的孔眼,则不用抱箍,可将螺栓直接穿入支座和电杆上的孔内,用螺母拧紧固定即可。

#### (四) 绝缘子安装

杆顶支座及横担调整紧固好后,即可安装绝缘子。安装前应把绝缘子表面的灰垢、附着物及不应有的涂料擦拭干净,经过检查试验合格后,再进行安装。要求安装牢固、连接可靠、防止积水。悬式绝缘子的安装,应符合下列规定:①与电杆、导线金具连接处,无卡压现象;②耐张串上的弹簧销子、螺栓及穿钉应由上向下穿。当有特殊困难时可由内向外或由左向右穿入。③绝缘子裙边与带电部位的间隙不应小于50mm。

## 六、立杆施工

架空配电线路施工常用立杆方法有:

1. 撑杆(架杆)立杆。对10m以下的钢筋混凝土电杆可用3副架杆,轮换着将电杆顶起,使杆根滑入坑内。此立杆方法劳动强度较大。
2. 用汽车吊立杆。此种方法可减轻劳动强度、加快施工进度,但在使用上有一定的局限性,只能在有条件停放吊车的地方使用。
3. 用抱杆立杆。分固定式抱杆(独立抱杆或人字抱杆)和倒落式抱杆(人字抱杆)。这是立杆最常用的方法。

倒落式抱杆立杆采用人字抱杆,可以起吊各种高度的单杆或双杆,是立杆最常用的方法,其现场布置见图11-64。

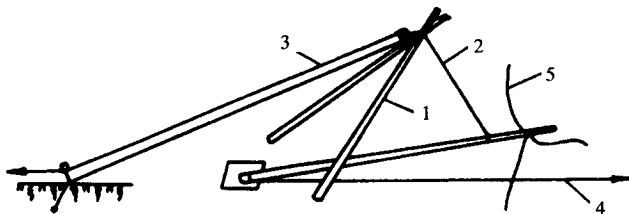


图 11-64 倒落式抱杆立杆示意图

1—抱杆 2—起吊钢绳 3—总牵引绳 4—制动钢绳 5—拉绳

倒落式抱杆长度一般取杆长的1/2。电杆放置时,应将杆根放在离杆坑中心约0.5m处;一般直线杆杆身沿线路中心放置,转角杆的杆身应与内侧角的二等分线垂直放置。吊点的分布,15m及以下的电杆可以参照表11-18。

电杆立起后,要进行杆身调整,符合要求后再填土夯实。

调整杆位,一般可用杠子拨动,使电杆移至规定位置。调整杆面,可用转杆器或用绳子绑在电杆上,穿入一根木杠,以推磨的方式转动电杆,使横担达到正确方向。调直杆身可借助拉绳进行。调整好的电杆应满足如下要求:直线杆的横向位移不应大于50mm,电杆的倾斜不应使杆梢的位移大于半个梢径。转角杆的横向位移不应大于50mm,转角杆应向外角预偏,紧线后不应向内角倾斜,向外角的倾斜也不应使杆梢位移大于一个梢径。终端杆应向拉线侧预偏,其预偏值不应大于杆梢直径,紧线后不应向受力侧倾斜。调整符合要求之后,即可进行填土夯实工作。

回填土时应将土块打碎,每回填50mm夯实一次。对松软土质的基坑,应增加夯实次数或采取加固措施。夯实时应在电杆的两对侧同时进行或交替进行,以防电杆移位或倾斜。当回填土至卡盘安装位置时,即安装卡盘,然后再继续回填土并夯实,夯实后的基坑设置防沉土层。土层上部面积不宜小于坑口面积,培土高度宜高出地面300mm,在电杆周围形成一个圆形土台。

表 11-18 锥形电杆吊点参考位置

电杆规格	杆重 /kg	一点起吊 位置距杆 顶尺寸/m	二点起吊位置距杆顶尺寸/m	
			上吊点	下吊点
φ190 × 9m	734	3.8	2.3	6.8
φ190 × 10m	843	3.8	2.6	7.6
φ190 × 12m	1077	3.8	3.2	9.2
φ190 × 15m	1470	4.0	3.8	10.0
φ150 × 8m	422	3.4	2.0	6.0
φ150 × 9m	495	3.4	2.3	6.8
φ150 × 10m	573	3.4	2.6	7.6

由于配电线路所使用的电杆,没有送电线路的杆塔笨重,杆型结构也比较简单,这就给立杆带来了一些便利条件,可以使用一些轻便工具,实现机械化,简化施工过程。但立杆仍然是施工中极为关键的一环,必须引起思想上的充分重视,做好一切准备工作,否则,简单也会变成复杂,甚至会发生某些事故或施工质量不合要求。

### (一)立杆的准备工作

立杆前,首先应对参加立杆的人员进行合理分工,详细交待工作任务、操作方法及安全注意事项。每个参加施工人员必须听从施工负责人的统一指挥。通常在立杆工作量特别大时,为加快施工进度,可以使用流水作业的方法,将施工人员分成三个小组,即准备小组,负责立杆前的现场布置;立杆小组,按要求将电杆立至规定位置后,将三面(或四面)临时拉绳结扎固定;整杆小组,调整电杆垂直至符合要求,然后安装卡盘、填土夯实。

施工人员应按分工认真做好所需工具和材料的准备。所用设备和工具,如抱杆、撑杆、绞磨、钢丝绳、麻绳、铁锹、木杠等,必须有足够的强度,且应操作灵活、使用方便。为确保安全,有些工具在使用前应做强度试验。

严密进行立杆现场布置。起吊设备安放位置要恰当、符合要求。例如抱杆的位置、绞磨的位置、地锚的位置及打入地下的深度等。

经过全面检查,确认完全符合要求后,方能进行起吊工作。

### (二)常用立杆方法分类

架空配电线路施工常用立杆方法有:

1. 撑杆(架杆)立杆 对 10m 以下的钢筋混凝土电杆可用 3 副架杆,轮换着将电杆顶起,使杆滑入坑内,此立杆方法劳动强度较大。
2. 用汽车吊立杆 此种方法可减轻劳动强度、加快施工进度,但在使用上有一定的局限性,只能在有条件停放吊车的地方使用。
3. 用抱杆立杆 分固定式抱杆(独立抱杆或人字抱杆)和倒落式抱杆(人字抱杆)。这是立杆最常用的方法。

### (三)立杆注意事项

1. 参加立杆的每个工作人员必须严格按照操作规程办事,并能熟练操作;在整个施工过程中应由一人专门负责全面指挥,参加施工的每个人应绝对服从,而且要彼此配合密切、协调。

2. 起吊前应对起吊机具做严密的检查和必要的性能试验。抱杆放置位置应正确,并根据不同地形做好防滑、防沉措施。

3. 起吊速度要均匀,不能太快或时快时慢,工作人员应分开站在电杆两侧;严禁立杆时在坑内工作,以

防倒杆伤人。

- 立杆工作不宜中途间断。
- 杆身调整完毕 要待杆坑完全填平夯实之后 才可撤去架杆或拉绳等起吊机具 严禁过早上杆。
- 上杆工作的人员必须精神正常、身体健康、无妨碍高空作业的疾病。

#### (四) 立杆施工操作

立杆一般有板立法和吊立法两种 如图 11-65 及图 11-66。

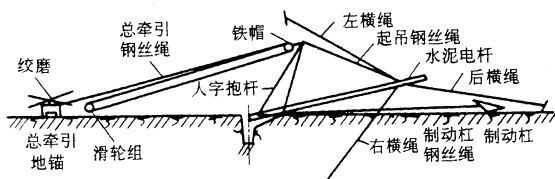


图 11-65 板立法(一点起吊)现场布置示意图

立杆用的工具主要有抱杆、滑轮、绞磨、钢丝绳、白棕绳、木桩和铁架等。立杆前必须按事先定好的杆位桩挖好坑,由于低压架空线路用的电杆较小,一般不用底盘和夹盘,故只需挖成比杆根的直径略大的圆坑,如图 11-67a 所示,如采用板立法,则尚需挖一下槽如图 11-67b 所示。

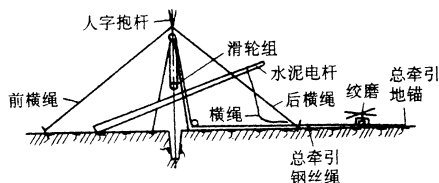


图 11-66 水泥杆吊立法现场布置示意图

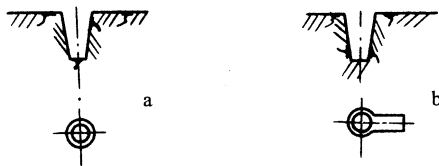


图 11-67 杆坑剖视图

a. 圆杆坑 b. 带下槽的圆杆坑

##### 1. 板立法

操作方法如下:

- 将制动杆的钢丝绳一端结在水泥杆根部,另一端在制动杆上缠绕 4~5 匝。
- 将起吊钢丝绳一端固定在抱杆铁帽上,一端结在水泥杆上约 2/3 的长度处。
- 将临时横绳结在钢丝绳下面,分左右、后 3 根。结横绳时,应预先考虑好立杆后不用登相拆卸的措施。
- 总牵引地锚与制动杆、杆坑中心,抱杆铁帽四点应在同一直线上,左右横绳应与杆坑中心为垂直方向的同一直线。
- 将总牵引钢丝绳的一端与抱杆铁帽联结,另一端通过滑轮组引到绞磨处,并在绞磨绕 4~5 匝,对于 7~8 米轻型杆,若不用滑轮、绞磨,亦可直接用人工牵引竖立。
- 在抱杆顶部结上两根白棕绳或麻绳,作为抱杆脱离铁帽时的控制绳。
- 抱杆杆根撑开约 3~4 米,放置在靠近水泥杆根 3~4 米处。
- 用人工揸并一面用绞磨配合或用人拉,将抱杆起立到 60°~70°,调整抱杆位置和抱杆与水泥联结的起吊钢丝绳,并做好防止抱杆脚滑动、下陷措施。
- 完成以上准备工作后,即可开始立杆,工作人员应各就各位,由一人指挥,用绞磨或人工牵引起动至杆顶离地 0.5 米时,应暂停起立,全面进行检查一次,如各部件确无问题,才可继续起立。
- 制动杆在水泥杆起吊前应先拉紧,力量相当于水泥杆的重量,制动杆调整应听从指挥人员统一指挥。
- 当水泥杆起立到抱杆将脱离铁帽时,应有人掌握抱杆的制动绳,使抱杆慢慢降落,以免抱杆落地时损坏。

(12) 水泥杆起立过程中,各横绳应听从统一指挥,配合调整,尤其起立至  $70^{\circ} \sim 80^{\circ}$  时,绞磨要降低速度,操作人员应特别注意指挥人员的指挥,防止水泥杆发生向牵引方向倒杆事故,指挥人员应考虑牵引方向的钢丝绳、滑车等比后横绳重的特点。

(13) 水泥杆立好后,须检查调整水泥杆方向,做好临时拉线或基础填妥后,方可拆卸立杆工具。

## 2. 吊立法

吊立法与板立法不同之点:吊立法先将抱杆起立,并将其固定后,利用抱杆起吊水泥杆,如图 11-66 所示。操作方法如下:

(1) 在杆坑两侧打好抱杆横绳木桩,两侧木桩与杆坑中心三点必须成一直线。

(2) 将水泥杆中心移到杆坑处,在抱杆顶部结好前后横绳,装好滑轮组后,用人工揸和利用绞磨或用人拉将抱杆起立,起立时应先将一侧横绳缠绕在木桩上,随起立而徐徐松开,抱杆立好后,应做好防止杆脚滑动和下陷的措施,并收紧固定前后横绳。

(3) 将总牵引钢丝绳一端固定在滑轮上,用一根短钢丝绳结在水泥杆重量中心,再与滑轮组联结,另一端在抱杆根部通过一只单滑轮在绞磨上缠绕 4~5 匝,对于 2~9 米等重量较轻的水泥杆亦可不用绞磨而用人工牵引。

(4) 将绞磨后端钢丝绳固定在总牵引地锚上。

(5) 以上工作全部完成后,即可起立,水泥杆离地后,亦应全面检查一次,确无问题后方可继续立杆,前后横绳应有人看管,防止抱杆侧斜,当水泥杆根进入杆坑时,绞磨牵引钢丝绳即可徐徐松出。

(6) 水泥杆立好后,须检查调整水泥杆方向,基础填妥后,方可拆卸立杆工具。

施工人员均应在距离杆高 1.2 倍范围以外,非施工人员均不得进入施工范围内。

## 第七节 工程验收

架空线路工程的验收工作一般分为:隐蔽工程验收检查、中间验收检查及竣工验收检查三个阶段。

### 一、隐蔽工程验收

隐蔽工程是指在竣工后无法检查的工程部分。其内容大致有以下几项:

1. 基础坑深。包括电杆坑、拉线坑。
2. 预制基础埋设。如底盘、卡盘、拉线盘的规格与安装位置。
3. 各种连接管的规格、压接前的内外径、长度及压接质量。
4. 接地装置的安装。

### 二、中间验收

中间验收检查是指施工班组完成一个或数个分项(基础、杆塔、接地等)成品后进行的验收检查。对架空线路施工来讲,大致有以下几项。

#### (一) 电杆及拉线

检查的内容包括:电杆焊口弯曲度及焊接质量,杆身高度及扭偏情况,横担及金具安装情况(应平整、紧密、牢固、方向正确),拉线的连接方法及受力情况,回填土情况。

#### (二) 接地

检查内容是实测接地电阻值,看其是否符合设计的规定值。

### (三) 架线

检查内容包括:导线及绝缘子的型号及规格是否符合设计要求,金具的规格及连接情况,压接管的位置及数量;导线的弛度;导线对各部分的电气距离;电杆在架设导线后的挠度;线位;导线连接的质量;线路与地面、建筑物之间的距离等。

## 第八节 架空线路的运行与维修

架空线路的电压在 1kV 以下称为低压架空线路,超过 1kV 称为高压架空线路。架空线路的施工,主要包括测位、挖坑、立杆、横担组装、拉线制作及架设导线等工序。架设线路由电杆、导线、金具、绝缘子和拉线等组成,其结构如图 11-68 所示。

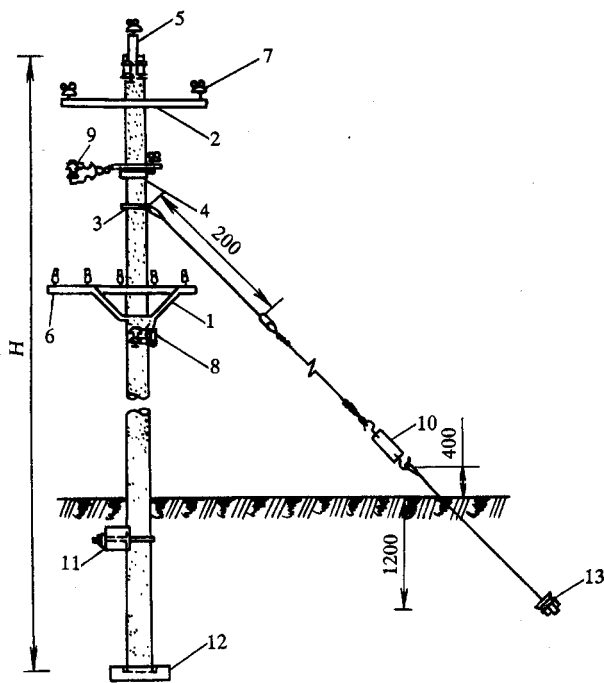


图 11-68 钢筋混凝土电杆装置示意图

- 1- 低压五线横担 2- 高压二线横担 3- 拉线抱箍 4- 双横担  
5- 高压杆顶 6- 低压针式绝缘子 7- 高压针式绝缘子 8- 蝶式绝缘子 9- 悬式绝缘子及高压蝶绝缘子 10- 花蓝螺丝 11- 卡盘  
12- 底盘 13- 拉线盘

### 一、架空线路及部件作用

#### (一) 电杆

电杆是用来架设导线,按其作用可分为直线杆、耐张杆、转角杆、终端杆、分支杆、跨越杆、换位杆等。

1. 直线杆(又称中间杆) 用于线路的直线段的中间部分,用来支持导线、绝缘子和金具。正常情况下能承受导线的重量及线路侧面的风力,但不能承受线路方向的拉力,这种电杆占全部电杆数的 80% 左右。

2. 耐张杆(又称承力杆) 用于线路直线段的中间部分的几个直线杆之间,或有特殊要求的地方,如与铁



路、公路、河流、管道等交叉处。在断线事故和架线时紧线情况下,能承受一侧导线的拉力。

3. 转角杆 用于线路的转弯处,有直线型和耐张型两种,可根据转角的大小及导线截面的大小而定,能承受转角导线不平衡的拉力。

4. 终端杆 用于线路的首端和终端,在正常情况下,能承受线路方向全部导线的拉力。

5. 分支杆 用于线路的分路处,是在一根电杆上分出两方向不同的线路电杆。

6. 跨越杆 用于线路与铁路、河流、湖泊、山谷及其他交叉跨越处的两侧。

7. 换位杆 用于线路中导线需要换位处。

## (二) 导线

导线是用来输送电能的,导线架设在电杆顶部,绑扎固定在绝缘子上。架空线路的导线,一般采用 LJ 型硬铝绞线和 LGJ 型钢芯铝绞线。用于架空线路的铝绞线、钢芯铝绞线截面积应不小于  $16\text{mm}^2$ , 高压架空线路  $6 \sim 10\text{kV}$  线路的铝绞线截面积应不小于  $35\text{mm}^2$ , 钢芯铝绞线截面积应不小于  $25\text{mm}^2$ ,  $35\text{kV}$  的线路不应小于  $36\text{mm}^2$ , 以免被风刮断。

## (三) 横担

横担装在电杆的上端,用来固定架设导线用的绝缘子。按材质分为:木横担、铁横担、陶瓷横担等。木横担因易腐烂,使用寿命短,在工业中很少使用,铁横担是用角铁制成的,因坚固耐用,已被广泛使用,但安装前应该镀锌,以免生锈,陶瓷横担是近些年出现的一种新型比较理想的产品,安装时不用任何绝缘子,可将导线直接固定在陶瓷横担上,但存在着冲击碰撞易于破碎的缺点,在施工中应尽量注意,以免损坏。

横担的安装形式有复合横担、正横担、交叉横担、侧横担等。复合横担用于线路起点、端点、耐张力杆上,能承受线路方向导线的拉力,正横担用于线路的中间杆或转角角度不大的杆上,在正常情况下,不承受导线的拉力,交叉横担用于线路分支杆上,承受线路一定方向导线的拉力,侧横担用于电杆与建筑物的距离小于规定距离时。

## (四) 金具

金具包括架空线路中所用的抱箍、线夹、钳接管、垫铁、穿心螺栓、花篮螺钉、球头挂环、直角挂板和碗头挂板等。

## (五) 绝缘子

绝缘子用于紧固导线,保持导线对地的绝缘,按外形分为:针式绝缘子、蝴蝶绝缘子、盘形悬式绝缘子、作拉线用的棱形或蛋形绝缘子。安装前应进行交流耐压试验,并将表面的污垢用干布擦拭干净,以防止送电后发生闪络和击穿。

## (六) 拉线

电杆架线后,发生了受力不平衡现象,应采用拉线来稳固电杆,有时由于电杆的埋设基础不牢固,不能维持电杆的稳固,可使用拉线进行补强。还有当负荷超过电杆的极限强度时,可利用拉线来减小弯曲力矩。

# 二、架空线路的基本要求

## (一) 线路的基本要求

1. 线路路径的基本要求

(1) 架设线路的路径尽量选择捷径,地形不复杂,投资较少。

(2) 应尽量少占农田,避开洼地,冲刷地带及易被车辆碰撞的地方。

(3) 应尽量避开爆炸物、易燃物和可燃液(气)体的生产厂房、仓库、贮罐等。

(4) 应尽量把线路架设在公路、道路的两侧,便于运输、施工和今后的运行维护。

(5) 线路路径的选择既要照顾到当前的需要,又要考虑到今后的发展,并要满足城市规划和电网规划,要留有一定的裕度。

## 2. 架空线路应避免在下列处所架设

- (1) 国家的纪念塔、碑及其类似处所或规划之内。
- (2) 屋顶、庭园、林木丛生之地。
- (3) 山洪、水灾较多之处。
- (4) 生产、贮存易燃、易爆物的厂房、库房等处所。
- (5) 生产腐蚀性气体、液体及污染严重之地。
- (6) 不易通过的山河、湖泊及基础不易稳固的地方。

## 3. 架空线路的电杆应避免在下列处所埋设

- (1) 妨碍交通的场所或妨碍交通信号视线的场所。
- (2) 铁路路基取土处及路基斜坡面。
- (3) 地下管道、暗渠、电力电缆、通信电缆及其他地下设施埋设之处。
- (4) 建筑物及地道出入口。
- (5) 车马通行频繁易受碰撞之处。
- (6) 临河岸及接近水渠之处。
- (7) 沙地、沼泽地及泉水池。

## 4. 对线路的基本要求

(1) 供电安全 要保证对用户可靠地、不间断地供电,就要保证线路架设的质量并加强运行维修工作,防止发生事故。

(2) 电压质量 电压质量的好坏,直接影响着用电设备的安全和经济运行,供电电压 10kV 及以下高压供电和低压电力用户的电压变动范围为  $\pm 7\%$ , 低压照明用户为  $-10\% \sim +5\%$ 。

(3) 经济供电 送电过程中要尽量降低线路损耗。

## (二) 架空线路的档距要求

线路的档距要根据导线对地距离、杆塔的高度和地形的特点来确定,配电线路的耐张段长度不宜大于 2km。

1. 高压线路 城市 40~50m, 郊区 60~100m。
2. 低压线距 城市 40~50m, 农村 40~60m。
3. 高低压同杆架设线路 档距选择应满足低压线路的技术要求。
4. 在野外及居民区的配电线路 在条件许可的范围内,应尽量放大档距。

## (三) 电杆高度和埋深

1. 电杆高度应根据横担安装位置、电杆埋深、导线弧垂和导线对地面的垂直距离来确定,可用下列公式近似计算:

电杆总长(高度) = 横担至杆顶距离 + 导线弧垂 + 导线对地面垂直距离 + 电杆埋入深度

2. 电杆的埋深应根据电杆的材料、高度、承力和当地的土质情况来确定。一般 15m 以下电杆,埋深可按杆长的  $1/6$  计算,但最少不得小于 1.5m,一般电杆埋深见表 11-19。

表 11-19 电杆埋设深度

杆 高/m	8	9	10	11	12	13	15
埋 深/m	1.5	1.6	1.7	1.8	1.9	2.1	2.3

## (四) 高压架空线路电杆的要求

### 1. 木杆

- (1) 杆身不应有腐朽,有腐朽的电杆在设计范围内应去掉腐朽部分,涂刷防腐油。
- (2) 不能使用通身木纹呈螺旋状扭曲的木杆。

- (3) 杆身弯曲,凡两端中心连接已超出杆外者不得使用,在受力大的地方,弯曲严重的木杆也不得使用。
- (4) 未裂穿的干缩缝允许深度,不得超过梢径 1/3,长度不得超过杆长的 1/2。
- (5) 木杆的外皮应全部剥干净。
- (6) 主杆梢径不得小于:10kV 及以下的线路为 160mm;农村架空线路为 140mm。
- (7) 木杆接腿梢径不应小于主杆根径的 85%,其最大弯曲不应超出接腿长度的 1%。

## 2. 混凝土杆

- (1) 杆身的弯曲不得超过杆长的 2/1000。
- (2) 电杆横向裂纹宽度应不超过 0.2mm。
- (3) 电杆表面应平整光滑,内外壁均不得有流浆露筋等缺陷,杆顶必须有堵块。
- (4) 混凝土杆用的底盘、卡盘表面应无裂缝、剥落等缺陷,如因运输碰撞,其碰损面积不得超过总面积的 2%(深度不大于 20mm)。

## (五) 装设拉线的要求

1. 拉线在木杆上固定时,应在木杆上加护杆铁板,以防止木杆受到损伤。但拉线为 25mm<sup>2</sup> 钢绞线或 5 股以下镀锌铁线时,可不加护杆铁板。
2. 用钢绞线作拉线应在电杆上先绕一圈,用卡钉钉牢。拉线截面为 50mm<sup>2</sup> 以下,可用镀锌铁线缠绕;50mm<sup>2</sup> 以上应用钢线卡子固定。若用 8 号铁线制作拉线,应把各股平铺在电杆上用卡钉钉牢,再用 10 号铁线或自身缠绕固定。
3. 拉线在混凝土杆上固定时,应使用拉线抱箍,抱箍的机械强度要满足拉线的拉力要求,而螺栓直径应不小于 16mm。
4. 拉线在电杆上的固定位置应尽量靠近横担,但木质直线杆的两侧人字拉线(防风拉线)应固定在横担以下的 1m 处,以防雷击闪络。
5. 拉线底把应做在不易被车辆碰撞的地方,若受地形限制,应埋设护桩。拉线在易受洪水冲刷的地区,应增设必要的防护设施。
6. 配电线路木杆上的拉线应装拉紧绝缘子,要求绝缘子距地面不小于 2.5m,混凝土电杆的拉线一般不装拉紧绝缘子,但拉线从导线之间穿过时应装设拉紧绝缘子。
7. 拉线与带电体的最小净空距离 3~10kV 为 0.2m,低压线路为 0.05m。
8. 线路沿道路架设分支或转角杆,在线路转向的反方向,因受道路或其他障碍物的限制不能做一般拉线时,可架设水平拉线。拉线对地面的垂直距离应不小于 6m,在人行道及不通汽车的小巷应保持 4m 以上。水平拉线的埋深不应小于 1m,并向外倾斜 10°~20°,拉线截面积为 11 股或用 GJ-50 及以上的钢绞线时,拉线应装设底盘。
9. 拉线长度计算

$$L = KB$$

式中  $L$ ——拉线装设长度(m);

$B$ ——拉距(m);

$K$ ——系数,见表 11-20

表 11-20 对不同距高比的系数

距高比	2	1.5	1.25	1	0.72	0.66	0.5	0.33	0.25
系数 K	1	1.2	1.3	1.4	1.7	1.8	2.2	3.2	4.1

## (六) 接腿电杆安装时规定

1. 主杆与腿杆的接合长度一般为 1.5m,使用两条直径为 16mm 穿钉螺钉紧固,其方向由主杆穿入腿杆,用 8 号镀锌铁线再上下绑扎两处,每处不少于 5 圈,铁线要用卡钉钉在主杆和腿杆上。
2. 接腿前应考虑以下几点

(1) 直线杆接腿横线路放置, 终端杆接腿顺线路放置在接线侧。

(2) 电杆若有弯曲, 直线杆的弯曲凸面应面向受电侧, 转角、终端杆的弯曲凸面应面向导线的拉力侧。

(3) 横担装设方向, 直线杆和中间承力杆, 横担装在受电侧, 转角杆、终端杆横担装在导线张力外侧, 跨越杆横担装在被跨越物的外侧。

### (七) 架空线与铁路交叉时的要求

1. 杆塔外缘至铁路轨道中心的水平距离不应小于 5m。

2. 交叉点应选在站界以外, 若必须在站内交叉时, 应取得铁路主管部门同意。

3. 两侧使用耐张杆, 但跨越非公用窄轨铁路可用加强直线杆。

4. 导线截面: 铝芯及钢芯铝线不小于  $35\text{mm}^2$ , 铜线、钢铁绞线不小于  $16\text{mm}^2$ 。

5. 导线不允许有接头(跨越非公用窄轨铁路时不限)。

6. 尽量增大交叉角(一般不小于  $30^\circ$ ), 以  $90^\circ$  为最宜。

### (八) 架空线与城市道路及公路交叉时的要求

1. 10kV 及以上线路导线最小截面: 铜线、钢铁绞线不小于  $16\text{mm}^2$ , 铝线不小于  $35\text{mm}^2$ , 钢芯铝线不小于  $25\text{mm}^2$ (不允许使用单股导线)。

2. 两侧用耐张杆或加强直线杆。

3. 杆塔与公路边缘的距离不小于 0.5m。

4. 交叉档内不允许有接头。

### (九) 架空线路通过森林地带和绿化区时应采取的措施

1. 通过森林地带时, 需砍伐树木而留出通道, 通道宽度为线路本身所占宽度(两边线间距离)加 10m, 通道附近超过主要树种高度的个别树木应进行砍伐, 但树木自然生长高度和线路的垂直距离能保持 3m 以上时可不砍伐通道。

2. 架空线路通过公园绿化区和防护林带时, 通道宽度应和有关单位协商解决, 但树木和边线在最大风偏时的距离不应小于 3m。

3. 架空线路通过果林、经济作物及城市绿化灌木时, 不必留出通道, 但线路至树梢的垂直距离不小于 1.5m, 最大风偏时的水平距离均不应小于 2m。

### (十) 架空线路对建筑物垂直和水平距离(见表 11-21)

表 11-21 架空线路对建筑物垂直和水平距离

最小间隔距离/m	线路额定电压/kV		
	0.22 ~ 0.38	1 ~ 15	20 ~ 35
在最大弧垂时垂直距离	2.5	3	4
在最大风偏时对接近部分的水平距离	1	1.5	3

### (十一) 同杆架设配电线路横担间的最小垂直距离(见表 11-22)

表 11-22 同杆架设配电线路横担间的最小垂直距离/m

导线排列方式	直线杆	分支或转角杆
高压与高压	0.8	0.45/0.6 <sup>①</sup>
高压与低压	1.2	1
低压与低压	0.6	0.3

① 转角或分支线路横担距上面的横担用 0.45m, 距下面的横担用 0.6m。

## (十二) 导线在档距内的连接要求

1. 在一个档距内每根导线允许有一个接头或三个补修管,其间距离不应小于 15m,导线接头或补修管距导线固定点,直线杆应不小于 0.5m,输电线耐张杆应不小于 15m,配电线不小于 1m。

2. 在下列交叉跨越档内不能有接头

- (1) 跨越铁路。
- (2) 跨越公路和城市主要道路。
- (3) 跨越通信线路。
- (4) 特殊大档距和跨越主要通航河流。

3. 不同金属、不同规格、不同绞向的导线,不得在一个耐张段内连接,只允许用专用连接器在杆塔跳线上连接。

## (十三) 导线在绝缘子上固定的要求

1. 导线在针式绝缘子上固定

(1) 直线杆上的导线应固定在针式绝缘子顶部的槽内,1kV 及以下线路可固定在绝缘子侧面绑线的槽内。

(2) 30°以下转角杆上的导线,应固定在绝缘子转角外侧绑线的槽内。

(3) 轻型承力杆上,导线在绝缘子上固定处不应出角度,两侧导线应按绝缘子外侧取直,中间导线应按面向电源侧时右侧绝缘子取直。

(4) 1kV 及以下线路的导线,在绝缘子固定应绑扎成单十字,1kV 以上的绑成双十字。

2. 导线在蝶式绝缘子上固定

(1) 铜线在绝缘子上固定时,其绑扎长度:导线截面为 35mm<sup>2</sup> 及以下的绑扎 150mm,截面为 50 ~ 95mm<sup>2</sup> 的绑扎 200mm。

(2) 固定铝线的绑扎长度:导线截面为 50mm<sup>2</sup> 及以下的绑扎 150mm,截面为 70mm<sup>2</sup> 的绑扎 200mm。

3. 导线在悬式绝缘子上的固定

(1) 直线杆上用悬式线夹固定。

(2) 耐张、转角、终端、换位等杆上,使用耐张线夹固定。

(3) 交叉跨越的两端直线杆上,不应采用释放线夹固定。

(4) 导线在绝缘子上(耐张杆)的固定:铜线截面为 50mm<sup>2</sup>、铝线截面为 35mm<sup>2</sup> 以上,使用螺栓型耐张线夹,铜线截面为 50mm<sup>2</sup> 以下允许绑扎在心形环上。绑线截面为 16 ~ 25mm<sup>2</sup> 的铜线长为 120mm,铝线为 180mm,截面为 35 ~ 50mm<sup>2</sup> 的铜线长为 150mm,铝线长为 250mm。

4. 铝线在绝缘子上的固定 除满足以上要求外,还应符合下列要求:

(1) 铝导线与绝缘子和金具接触处容易磨损,应在接触部位缠绕铝带。

(2) 铝带缠绕方向应与外股导线方向一致。

(3) 铝带缠绕长度,在针式绝缘子上固定时,应超出绑扎部分 30mm,在蝶式绝缘子上固定时,应超出接触部分,在悬式绝缘子上固定时,两端露出线夹 20 ~ 30mm,当采用护线条时可不缠绕铝带。

(4) 截面为 95mm<sup>2</sup> 及以上的铝线,应采用悬式绝缘子固定。

## (十四) 配电线路线间距离(见表 11-23)

表 11-23 配电线路线导线最小线间距离

档距 / m	40 以下	50	60	70	80	90	100	110	120
线路电压									
高压/kV	0.6	0.65	0.7	0.75	0.85	0.9	1	1.05	1.15
低压/kV	0.3	0.4	0.45	0.5	—	—	—	—	—

### (十五) 架空线路弓子线的连接要求

1. 铜、钢(铁)线可互相绞接或绕接,而绑线应和导线是同质材料。
2. 铝线应使用并沟线夹(连接板)连接,对 10kV 以下配电线路也可用绑线绕接。
3. 铜、铝导线的互相连接,应使用铜铝接头(线夹),不可直接连接。
4. 每相弓子线与邻相弓子线或引下线间的距离:10kV 不小于 0.3m,低压不小于 0.15m。

### (十六) 接户线

1. 选择进户点时,建筑物应牢固,便于维修和保证施工安全,并尽量靠近供电线路和负荷中心。
2. 接户线应使用耐压 500V 以上的绝缘导线,一般不应有接头,其导线的最小截面为:  
10m 以内:铜线为  $2.5\text{mm}^2$ ,铝线  $4\text{mm}^2$ 。  
10~25m:铜线为  $4\text{mm}^2$ ,铝线为  $6\text{mm}^2$ 。
3. 接户线各部位的距离。
4. 长度不超过 25m。
5. 线间距离不应小于 250mm。
6. 入户处距地面不应小于 2.5m。
7. 跨越胡同距地面应不小于 3.5m。
8. 院内架设距地面应不小于 3m。
9. 导线距墙水平距离应不小于 150mm。

### (十七) 架空线路导线最小截面的规定(见表 11-24)

表 11-24 配电线路导线最小截面/ $\text{mm}^2$ 

导线种类	3~10kV		1kV 以下
	居民区	非居民区	
铝绞线	35	25	16
钢芯铝绞线	25	16	16
铜线	16	16	直径 3.2mm

### (十八) 导线间距

1. 线路电压为 10kV 时,导线间距应不小于 0.6m。
2. 线路电压为 400V 时,导线间距应不小于 0.3m,但临近电杆两侧的导线间距应不小于 0.5m。

## 三、架空线路的选用、安装及使用

### (一) 导线选用

#### 1. 对导线的要求

(1) 导电性能好,就是相应的电阻小,从而减少线路的电压和电能损耗。

(2) 机械强度大,导线悬挂在高空,除它本身重量外,还要受到风压、冰雪等机械力的作用,应具有足够的机械强度,以防断线事故。

(3) 抗化学腐蚀性强,架空在沿海或化工厂附近等污秽比较严重地区的线路,由于空气中有盐碱等腐蚀性物质存在,对导线有强烈地腐蚀作用,要求导线应具有很强的抗化学腐蚀能力,才能保证线路长期安全运行。

## 2. 导线的选择原则

(1) 应符合基本建设投资、运行经济和技术合理的原则。导线截面选择过大,会增加有色金属的消耗量,使建设费用增加;而导线截面选择过小,在线路上造成过大的电压降电能损耗较大,使负荷侧电压过低,会影响线路的经济运行。

(2) 送电线路主要是由经济电流密度和允许线路电压损耗来确定,同时还满足发热条件和机械强度的要求,还应满足避免产生电晕现象的最小导线直径的要求。

(3) 配电线路导线截面的选择,一般是按允许电压损耗来确定,但应按发热条件进行校验,并满足有关规定的最小导线截面的要求。

## 3. 选择的基本方法

(1) 按导线的发热条件选择导线截面,在任何环境温度下当导线连续通过最大负荷时,其导线温度不大于 $70^{\circ}\text{C}$ 。此时的负荷电流称为安全电流。而按长期允许通过的安全电流来选择导线。

(2) 按机械强度选择导线截面,导线应具有足够的机械强度,不要由于各种不利条件而造成断线事故。10kV 架空线路铝绞线应不小于 $35\text{mm}^2$ ,钢芯铝绞线应不小于 $25\text{mm}^2$ 。

(3) 按经济电流密度来选择导线截面,经济电流密度是经过各种经济技术比较得出的最合理的单位导线截面的电流值。当电力线路单位导线截面上通过这一电流时,使电力线路的建设投资、电能损耗和运行维护费用等综合起来将会最小、最经济,其导线截面可按下式进行计算,即

$$S = \frac{P}{\sqrt{3}JU_e \cos\varphi}$$

式中  $S$ ——导线截面( $\text{mm}^2$ );

$P$ ——线路上通过的有功负荷(kW);

$J$ ——经济电流密度( $\text{A}/\text{mm}^2$ );

$U_e$ ——额定电压(V);

$\cos\varphi$ ——线路功率因数。

由此式求得导线截面后,还必须对载流量进行校核,是否超过导线最高允许工作温度。

(4) 按允许电压损失来选择导线截面,在10kV线路中,一般都按允许电压损失值来计算导线截面。由于输送功率都不大,导线截面较小,电压损失成为突出矛盾,因此,如果电压损失能满足要求,而其他技术条件大都能符合规定,可按下式进行计算,即

$$S = \frac{\sum PL}{\gamma \Delta UR U_e}$$

式中  $S$ ——导线截面( $\text{mm}^2$ );

$P$ ——线路上通过的有功负荷(kW);

$L$ ——导线长度(m);

$\gamma$ ——导线材料的电导率( $\text{S}/\text{m}$ );

$\Delta U_R$ ——线路电阻上的电压损失(V);

$U_e$ ——额定电压(V)。

将选用的导线截面再按实际线路电阻、感抗值验算电压损失,若与允许电压损失相差很少,可以使用。但必须按发热条件进行校验,使导线长期允许安全电流应大于线路的最大计算电流,否则应按发热条件重新选择导线截面。

## 4. 导线品种的选用

(1) 农村电力网,选用小截面的铝绞线和钢芯铝绞线,也可选用高强度及耐热的铝合金绞线、镀锌钢绞线或单根铝包钢线。

(2) 高压输电线路,一般大截面的导线用轻型钢芯铝绞线,小截面的导线用普通型。

(3) 大跨越用导线,选用钢芯铝包钢绞线或钢芯铝合金绞线,跨越距离较小时,可用铝包钢绞线或加强型钢芯铝绞线。

(4) 配电线路,配电线路档距较小时,可用铝或铝合金绞线,档距较大时,可用钢芯铝绞线。

- (5) 防腐导线,可用防腐型钢芯铝绞线。  
 (6) 重冰区用导线,可选用强度较大的钢芯铝绞线,铝包钢绞线或特种的防冰雪导线。

## (二) 横担的安装

1. 横担的安装位置 为了施工方便,一般都在地面上将电杆顶部横担、金具等全部组装完毕,然后整体立杆。如果电杆竖起后组装,应从电杆的最上端开始。杆上横担安装的位置应符合以下要求:

- (1) 直线杆的单横担应安装在负荷侧,90°转角杆和终端杆若采用单横担,应装于拉线侧。
- (2) 转角杆、分支杆、终端杆以及受导线张力不平衡的地方,横担应安装在张力的反方向侧。
- (3) 多层横担均应装在同一侧。
- (4) 有弯曲的电杆,横担均应装在弯曲侧,并使电杆的弯曲部分与线路的方向一致。
- (5) 直线杆、终端杆、耐张杆的横担与线路方向垂直。
- (6) 30°以下转角杆应与角平分线方向一致。
- (7) 横担安装应平直,上下歪斜或左右(前后)扭斜的最大偏差不应大于横担长度的1%。垂直安装横担,顶端顺线路方向歪斜应不大于10mm,水平安装的瓷横担,顶端应上翘起5°~10°,顶端顺线路方向歪斜应不大于20mm。
- (8) 同杆架设的双回路,横担间的垂直距离应符合规定的要求。
- (9) 边相的瓷横担不宜作中相垂直安装的瓷横担,中相应垂直地面,穿钉应与线路垂直。

2. 横担的长度(见表11-25)

表 11-25 横担的长度

横担材料	低压线路			高压线路		
	二 线	四 线	六 线	二 线	水平排列四线	陶瓷横担头部铁
铁横担	700	1500	2300	1500	2240	800

### 3. 低压横担的制作

(1) 常用 $L5 \times 50$ 的角钢制作,直线横担可用U型螺栓固定到电杆上,耐张和转角横担,可用两条直线横担组成,用四根穿心螺栓固定到电杆上。

(2) 根据架空导线相数不同,可做成二、三、四、五、六线横担等,当制作四线以上的横担时,应使用相应大型号的角钢。

(3) 横担应进行镀锌处理,在急用情况下,也可在横担表面涂刷防锈漆。

(4) 用木制横担时,截面应不小于 $80 \times 80\text{mm}$ ,并作防腐处理。

### 4. 横担的组装

(1) 安装时,先装顶杆支柱,将上、下抱箍分别穿入螺栓并用螺母紧固,若电杆上留有装顶杆支柱的孔眼,可不用抱箍,直接把螺栓穿过孔眼用螺母紧固。再安装横担,在横担上合好M型抱铁,用U型抱箍从电杆背部抱过杆身,穿过抱铁及横担螺栓孔,用螺母紧固。当用螺栓固定陶瓷横担时,要垫油毡垫两层。

(2) 安装绝缘子,绝缘子的电压等级,不得低于线路额定电压,安装前应进行外观检查和测量绝缘电阻,如表面有裂纹、釉面脱落等缺陷不能使用,并要求绝缘电阻不低于 $300\text{M}\Omega$ 。

1) 高压线路上所用悬式绝缘子要与耐张线夹组成,导线截面在 $70\text{mm}^2$ 以下时,也可采用悬式绝缘子与蝶式绝缘子通过曲型拉板组合;低压线路采用低压蝶式绝缘子。

2) 紧固横担和绝缘子等各部位所用的螺栓,要求直径应不小于16mm,其外露长度应不小于5个螺距,但不应大于30mm。螺栓装在垂直方向时,应从下往上穿。

3) 全瓷瓷横担的固定处应加软垫,组合式瓷横担中心轴弯曲度应不超过长度的1%。

4) 悬垂绝缘子串应于地面垂直,个别情况下不能垂直安装时,顺线路方向的倾斜角度不应大于5°,最大偏移量应不超过200mm。



5 绝缘子串上的穿钉和弹簧销子的穿入方向为 悬垂串两边线向下穿 , 中线从脚钉侧穿入 , 耐张串一律向下穿。

6 穿钉开口销子的开口度应为  $60^{\circ} \sim 90^{\circ}$  , 销子开口后不得有折断、裂纹等现象 ; 禁止用线材代替开口销子 ; 穿钉呈水平方向时 , 开口销子的开口侧应向下。

### (三) 拉线的安装

1. 常用直径为 4mm 的镀锌铁丝绞合而成的绞线作拉线 , 当铁丝超过 7 股时 , 应用镀锌钢绞线 , 而拉线下把应改用圆钢拉线棒。

2. 拉线与电杆夹角应为  $30^{\circ} \sim 45^{\circ}$  , 大于  $30^{\circ}$  的转角杆应分别在导线的反方向侧安装拉线 ; 对耐张杆 , 应顺着导线方向两侧安装拉线 , 以便发生事故时能平衡导线的水平拉力 ; 对终端杆一般在导线反方向安装拉线。

3. 拉线的各股受力应一致 , 不应有松动、过紧或全部松弛等现象。

4. 为便于调整拉线的松紧程度 , 可加装花蓝螺栓。

5. 拉线绝缘子离地面高度应不小于 2.5m , 以免触及上把。

6. 钢筋混凝土电杆可采用拉线抱箍固定拉线 , 将拉线的上部折回约 1.5m , 弯成环形、嵌入拉线环内。

7. 拉线的方向一定要在架设导线方向的反面 , 切勿装偏或装错。拉盘可用混凝土或石块制成 , 埋深应不小于 1.2m , 拉线所受张力越大 , 拉盘埋深也应越大。

### (四) 线夹的安装

1. 线夹型号应与导线、避雷线的型号配套 , 否则 , 导线、避雷线在线夹中固定不牢 , 可能发生事故。

2. 铝绞线、钢芯铝绞线和铝包钢绞线不应与线夹直接接触 , 应在绞线的表面紧密缠包 1 ~ 2 层铝包带 , 以防止运行中被线夹磨损。铝包带的缠绕方向应与导线外层线股绞制方向相同 , 两端露出线夹口 10 ~ 30mm , 铝包带的端头应压入线夹内 , 以防止端头散开。

3. 线路经过的居民区 , 线路与铁路、公路、通信线路和其他电力线路交叉跨越的地点及线路检修困难的地段 , 都不得采用释放型线夹 , 以免误动作造成事故。

4. 倒装式螺栓型耐张线夹的无螺栓侧应指向导线端 ; 有螺栓侧应指向跳线端 ; 若安装方向相反 , 将造成线夹受力状态不良而发生事故。线夹与绝缘子的连接应选用长的连接金具 , 使线夹附件的跳线与绝缘子瓷裙保持一定距离。

5. 线夹上的螺栓应有弹簧垫圈 , 螺栓应紧固 , 受力应均匀。

### (五) 拉桩杆的安装

1. 拉桩杆埋设深度应不小于杆长的  $1/6$ 。

2. 拉桩杆应向张力反方向倾斜  $15^{\circ} \sim 20^{\circ}$ 。

3. 拉桩坠线与拉桩杆夹角应小于  $30^{\circ}$ 。

4. 拉桩坠线上端固定点的位置距拉桩杆顶应为 0.25m , 距地面应不小于 4.5m。

5. 拉桩坠线可采用直径不小于 3.2mm 的镀锌铁线绑扎固定 , 缠绕长度应符合安装规程的规定。

### (六) 架空导线的安装及使用注意事项

1. 架空导线和避雷器的设计安全系数应不小于 2.5 , 避雷器的设计安全系数宜大于架空导线。

2. 在大跨越的稀薄气候条件下和重冰区较少出现覆冰的情况下 , 导线的弧垂最低点的最大应力都不应超过破坏应力的 60% , 并进行验算。

3. 应根据导线和避雷线的平均运行应力上限 , 考虑防振措施。若钢芯铝绞线在平均运行应力上限达到瞬时破坏应力的 22% 时 , 不论档距大小 , 应加护条线。在钢芯铝绞线或钢绞线的平均运行应力上限达到瞬时破坏应力的 25% , 应加防振锤(线)或另加护条线。

4. 放线时应清除放线通道上易以损伤导线的杂物 , 或采取防护措施 ; 对线路上的地面或江河中含有腐蚀导线成分的地区 , 应采取特别防护措施。

5. 防止导线被磨损、断股、钩住等现象 ; 若发现导线破损 , 应做出明显标志或及时处理。

6. 放线滑车的槽底直径应大于导线外径的 10 倍 , 滑轮的材料应与导线材料相适应 , 以免磨损导线。

7. 导线接头不良会引起导线发热 , 甚至脱开 ; 在导线连接时 , 连接管附近的股线不应鼓包 , 防止运行时导线的

股线受力不均匀。接头压好后,连接管口应涂防潮油漆,防止腐蚀。

8. 不要将弧垂作过分收紧,以免超过导线的使用应力,同一档距内的导线的弧垂,应力求一致。
9. 用紧线器紧线时,应用麻布等物保护导线不被夹伤。紧线后应立即进行附件安装,防止导线损伤。
10. 导线与瓷横担或线夹的接触部分,应用铝带缠包衬垫,绕包的方向与外层铝线相同,每端应露出线夹口 10~20mm,绕包的铝带要紧密而不重叠。
11. 安装护线条时,每条的中心均应与线夹中心重合,扭紧应紧密均匀,方向与外层铝线相同。
12. 线夹的 U 型螺栓应拧紧螺母,而不要用力过大,防止导线承受压力过大,引起断股。
13. 导线发生严重覆冰或雷击跳闸后,应对导线巡视检查,若发生事故应立即处理。
14. 若导线在同一截面处受到损伤,当单股损伤深度大于直径的 1/2 或损伤面积大于导线总面积的 50% 时,应采取补强措施。
15. 不同金属不同规格不同纹向的导线,严禁连接使用。

## (七)导线的连接方法

### 1. 钳压法连接导线

- (1) 钳压连接前,要选择合适的连接管,其型号应与导线相符。
- (2) 清除导线表面污垢,将连接部位的线股用绑线缠紧,并把连接管内壁清洁干净,涂上中性凡士林。
- (3) 导线压口数(见表 11-26)

表 11-26 导线压口数

导线截面/mm <sup>2</sup>		35	50	70	95	120	150	185	240
压口数	铜、铝线	6	8	8	10	10	10	10	12
	钢芯铝线	14	16	16	20	24	24	26	2×24
压后尺寸/mm	铜线	14.5	17.5	20.5	24	27.5	31.5		
	铝线	14	16.5	19.5	23	26	30	33.5	
	钢芯铝线	17.5	20.5	25	29	33	36	39	43

(4) 钳压后,导线端头露出长度不应小于 20mm,导线端头的绑线不得拆除。压接后的连接管不应有裂纹,弯曲度不应超过管长的 2%,连接管的电阻不应大于等长导线的电阻。连接管两端附近的导线不应有“灯笼”、“抽筋”等现象,两端出口处、合缝处和外露部分要涂刷油漆。

(5) 钳压管允许用于连接钢线、铝线和截面为 35~240mm<sup>2</sup> 的各种钢芯铝线,钳接钢芯铝线时,中间应加装垫片,除 AC-240 导线用两个连接管外,其余导线都用一个连接管。

### 2. 弓子线(又称跨接线或过引线)连接

- (1) 不同金属导线(如铜线和铝线)的互相连接,要用可靠的过渡接头(线夹),不应直接连接。
- (2) 同金属导线采用绑扎连接时,绑扎长度不得小于表 11-27 数值。

表 11-27 弓子线绑扎长度

导线截面/mm <sup>2</sup>	绑扎长度/mm	导线截面/mm <sup>2</sup>	绑扎长度/mm	导线截面/mm <sup>2</sup>	绑扎长度/mm
LJ-35 以下	150	LJ-50	200	LJ-75	250

- (3) 绑扎连接时应接触紧密、均匀、无硬弯,要求为均匀弧度。
- (4) 不同截面导线连接时,绑线长度应以小截面导线为准。
- (5) 绑线要选用与导线同金属的单股线,直径不得小于 2mm。
- (6) 用并钩线夹连接时,线夹数量一般不得少于 2 个。

(7) 每相弓子线与邻相弓子线或引下线间的距离 :10kV 线路不应小于 0.3m ,低压线路不应小于 0.15m。

### 3. 铜铝导线的连接

(1) 铜铝导线连接时 ,为避免电化学腐蚀 ,不得直接连接 ,应采用铜铝过渡线夹和连接管把两者连接。

(2) 在负荷较小的线路上 ,把铜线或铝线搪锡后再连接 ,以减少电化学腐蚀。

### 4. 爆炸压接法压接导线

(1) 爆炸压接是借助于炸药在爆炸时产生的压力 ,形成一个高压气团 ,使钳压管被压缩 ,将导线紧密地压在管内 ,形成牢固接头。

(2) 爆炸压接用的主要材料是钳压管、炸药(硝铵或太乳炸药)、雷管、导火线、6~8号硬壳纸等。

(3) 制作药包时将硬壳纸裱糊的两个纸筒套在一起 ,外面纸筒壁为两层 ,里面纸筒壁为一层 ,在两个纸筒中间充填炸药 ,里面纸筒内穿导线 ,铝线的药包为一头粗 ,一头细 ,如图 11-69 所示。药包的尺寸随导线截面不同而变 ,见表 11-28。

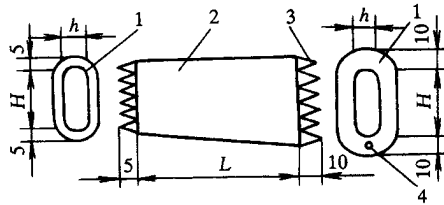


图 11-69 铝导线爆压药包的制作

1-端盖 2-硬纸筒 3-软纸花边 4-雷管孔

表 11-28 导线钳接管药包制作尺寸

项 目	药 包 尺 寸 /mm				
	LJ-50	LJ-70	LJ-95	LJ-120	LJ-150
钳接管长度	140	160	220	300	310
药包长度 $L$	110	130	180	250	260
端盖孔长度 $H$	26	31	36	40	45
端盖孔宽度 $h$	15	17	20	23	25
药包外露管长度	15	15	20	25	25
装药重量/g	80	110	170	260	290

## 四、架空线路的运行与维修

### (一) 巡视检查

#### 1. 运行前的检查

(1) 线路有无杆号、相位等标志 ,影响安全运行的问题是否全部解决。

(2) 线路上的临时接地线和障碍物是否全部拆除。

(3) 线路上是否有人进行登杆作业 ,在安全距离内的一切作业是否全部停止。

(4) 线路继电保护和自动装置是否调试完好 ,是否具备投入运行条件。

(5) 对线路进行一次仔细的全部巡视检查 ,确认具备试运行条件后 ,才能闭合送电。

2. 巡视检查周期 根据线路的电压等级、季节特点及周围环境来确定巡视检查的周期, 10kV 线路市区线路每月一次, 郊区线路每季不少于一次, 若遇自然灾害或发生故障等特殊情况, 应临时增加巡视检查次数。

### 3. 巡视检查的种类

(1) 定期性巡视 定期性巡视是线路运行人员主要日常工作之一, 通过定期性巡视能及时了解和掌握线路各部分的运行情况和沿线周围的状况。

(2) 特殊性巡视 在导线结冰、大雪、大雾、冰雹、河水泛滥和解冻、沿线起火、地震、狂风暴雨之后, 对线路全线或某几段, 某些部件进行详细查看, 以发现线路设备发生的变形或遭受的损坏。

(3) 故障性巡视 为查明线路的接地、跳闸等原因, 找出故障地点及情况, 无论是否重合良好, 都要在事故跳闸或发现有接地故障后, 立即进行巡视检查, 并注意下列事项:

1 巡视时要详细进行检查, 不应中断或遗漏杆塔。

2 夜间巡视时应特别注意导线落地, 对线路交叉跨越处应用手电筒看清楚后再通过。

3 巡视时若发现断线, 不论停电与否, 都应视为有电。在未取得联系与采取安全措施之前, 不得接触导线或登上杆塔。

4 巡视检查后, 无论是否发现故障, 都要及时上报。

5 在故障巡视检查中, 对一切可能造成故障的物件或可疑物品都应收集带回, 作为事故分析的依据。

(4) 夜间巡视 检查线路导线连接处、绝缘子、柱上开关套管和跌落熔丝等的异常情况。

(5) 监察性巡视 由主管领导或技术负责人进行。目的是在于了解线路及设备状况, 并检查、指导运行人员的工作。

(6) 预防性检查 用专用工具或仪器对绝缘子、导线连接器、导线接头、线夹连接部分进行专门的检查和试验。

(7) 登杆检查 为了检查杆塔上部各部件连接、腐朽、断裂及瓷瓶裂纹、闪络等情况, 带电检查时应注意与带电设备的安全距离。

### 4. 巡视检查

#### (1) 沿线巡视

1 沿线有无易燃、易爆物品和强腐蚀性物体, 若有应及时搬移。

2 在线路附近新建的化工厂、水泥厂、道路、管道工程、林带和倒下足以损伤导线的天线、树木、烟筒和建筑手架等。

3 检查在线路下或防护区内的违章跨越、违章建筑、柴草堆或可能被风刮起的草席、塑料布、锡箔纸等。

4 有无威胁线路安全的施工工程(如爆破、开挖取土等)。

5 检查线路防护区树木, 树木对导线的安全距离是否符合规定。

6 线路附近有无射击、放风筝、抛扔杂物、飘洒金属和在杆塔、拉线上拴牲畜等。

7 查明沿线污秽情况。

8 其他异常现象, 如洪水期巡视检修用的道路及桥梁情况、线路设备情况及威胁线路安全运行等的情况。

#### (2) 杆塔巡视

1 杆塔有无倾斜、弯曲, 各部位有无变形、外力损坏, 钢筋混凝土杆有无裂纹、酥松、混凝土脱落、钢筋外露, 焊接处有无开裂、锈蚀, 木杆有无劈裂、腐朽、烧焦, 绑桩有无松动。

2 杆塔基础有无下沉, 周围土壤有无挖掘、被冲刷、沉陷等现象, 基础有无严重的裂缝, 寒冷地区电杆有无冻鼓现象。

3 杆塔各部位的螺栓有无松动或脱落, 金具及钢部件有无严重的锈蚀和磨损等现象。

4 杆塔位置是否合适, 有无被撞的可能, 保护设施是否完好, 路名及杆号相位标志是否清晰齐全。

5 杆塔有无被水冲、水淹的可能, 防洪设施有无损坏。

6 杆塔周围有无杂草和蔓藤类植物附生, 杆塔上有无鸟巢、鸟洞及杂物。

7 接地引下线是否完好, 接地线的并沟连接线夹是否紧固。

#### (3) 导线巡视

1) 导线上有无铁丝等悬挂物、导线有无断股、损伤、腐蚀、闪络烧伤等现象。

2) 导线接头连接是否完好,有无过热而变色现象,不同规格型号的导线连接应在弓子线处连接,跨越档内不准有接头。

3) 线路交叉时,导线间跨越距离及导线对地距离是否符合规定,在交叉跨越处,电压高的电力线应位于电压低的电力线上方,电力线位于弱电流线路上方,其距离和交叉角应符合规定。

4) 气温变化时弧垂的变化是否正常,三相弧垂是否一致,有无过紧、过松现象。

5) 弓子线有无损伤、断股、歪扭,与杆塔、横担及其他引线间的距离是否符合规定。

6) 线夹、护线条、铝带、防振锤、隔离棒等有无异常现象。

#### (4) 绝缘子巡视

1) 绝缘子有无裂纹、破损、闪络放电痕迹、烧伤等现象,表面脏污是否严重。

2) 针式绝缘子有否歪斜,铁脚、铁帽有无锈蚀、松动、弯曲现象。

3) 悬式绝缘子的开口销子,弹簧销子是否锈蚀、缺少、脱出或变形。

4) 固定导线用绝缘子上的绑线有无松弛或开断现象。

5) 吊瓷是否缺弹簧销子,开口销子未分开或小于 $60^\circ$ 。

#### (5) 横担和金具巡视

1) 铁横担有无锈蚀、歪斜、变形。

2) 木横担有无腐朽、烧损、开裂、变形。

3) 瓷横担有无裂纹、损坏、绑线有无开脱,与金具固定处的橡胶或油毡垫是否缺少。

4) 金具有无锈蚀、变形,螺栓是否紧固,有无缺帽,开口销子,弹簧销子有无锈蚀、断裂、脱落、变形。

#### (6) 拉线、地锚、保护桩巡视

1) 拉线有无腐蚀、松弛、断脱和张力分配不均等现象。

2) 水平拉线对地距离是否符合规定,有无下垂现象。

3) 拉线有无影响交通或被车碰撞。

4) 拉线固定是否牢固,地锚有无缺土、下沉等现象。

5) 拉线杆、顶(撑)杆、保护桩等有无损坏、开裂、腐朽或位置角度不符合要求等现象。

6) 拉线棍有无异常现象和开焊变形。

7) 上、下把连接是否可靠,附件是否齐全,拉线底把铁线绑扎有无松脱及外力损坏痕迹。

#### (7) 风雨天的特殊巡视

1) 电杆有无倾斜,基础有无下沉及被雨水严重冲刷。

2) 导线弧垂有无异常变化,与绝缘子绑扎有无松脱,有无打连、断股、烧伤、放电现象。

3) 横担有无偏斜、移位现象。

4) 上、下弓子线对地部分的距离有无变化。

5) 绝缘子有无受雷击损坏及被冰雹砸破的外力损坏现象。

6) 接户线或引下线有无被风刮断或接地现象。

#### (8) 发生故障后巡视

1) 导线有无打连、烧伤或断线现象。

2) 绝缘子有无破碎及放电烧伤等现象。

3) 电杆、拉线、拉桩、钱杆等有无被车辆撞坏现象。

4) 导线上有无金属导体残留物。

5) 有无其他外力破坏痕迹。

#### (9) 架空线路巡视工作中应注意事项

1) 不论线路是否停电,都应视为带电,并应沿线路上风侧行走,以免断线落到人身上。

2) 单人巡视时,不得做任何登杆工作。

3) 发现导线断落地面或悬挂在空中,应设法防止他人靠近,保证断线周围8m以内不得进入,并派人看守,迅速处理。

4) 应注意沿线地理情况,如河流水位变化,不明深浅的不应涉渡,并注意其他沟坎变化情况。

5) 应将巡视中发现的问题,记入巡视线路的记录本内,较重要的异常现象应及时报告上级主管领导,以便采取措施迅速处理。

## (二) 测量试验

测试是巡视的必须补充,使用仪器可测得正常巡视无法发现的缺陷。

1. 绝缘子测试 为了查明不良绝缘子,一般每年应进行一次测试。其方法是利用特制的绝缘子测试杆,在带电线路 directly 进行测量。

(1) 可变火花间隙型测试杆 根据绝缘子串中每片绝缘子上的电压分布是不均匀的,改变测试杆上电极间的距离,直至放电,即可测得每片绝缘子上的电压,当测出的电压小于完好绝缘子所应分布的电压时,就可判定为不良绝缘子。

(2) 固定火花间隙型测试杆 电极间的距离,已预先按绝缘子串绝缘子的最小电压来整定(一般间隙为0.8mm)。由于间隙已固定,而绝缘子串的电压分布不能测出,只能发现零值或低值绝缘子。

测试时注意:不能在潮湿、有雾或下雨的天气中测试,测试的次序应从靠近横担的绝缘子试起,直到一串绝缘子测试完为止。

2. 导线接头测试 导线接头是个薄弱环节,经长期运行的接头,接触电阻可能会增大,接触恶化的接头,夜间可看到发热变红的现象。因此,除正常巡视外,还应定期测量接头的电阻。

(1) 电压降法 正常的接头两端的电压降,一般不超过同样长度导线的电压降的1.2倍,若超过2倍,应更换接头才能继续运行,以免引起事故。

测量时,可在带电线路直接测试负荷电流在导线连接处的电压降,也可在停电后,通直流电进行电压降的测量,但带电测试要注意安全。

(2) 温度法 红外线测温仪,可距被测点一定距离外进行测温,通过导线接头温度的测量,来检验接头的连接质量。

## (三) 检修

检修的目的在于恢复线路的完好,延长使用寿命,消除沿线不利于安全运行的因素,改善运行环境,保障安全和经济供电。应在每年春秋两季根据巡视检查与测试情况,对架空线路进行预防性全面检修,消除所发现的各种缺陷,以预防事故发生。

### 1. 检修周期

(1) 一般维护应根据架空线路存在的缺陷进行不定期检修。

(2) 根据周围环境及运行情况来确定检查周期,一般每年的2月和10月左右各登杆清扫检查一次。

(3) 木电杆的杆根腐朽程度检查,应根据木质情况而定,一般1~3年一次,遇有问题应及时处理。

(4) 拉线底把每5年检查一次腐朽程度。

### 2. 检修

#### (1) 一般维修

1) 线路名称及杆号的标志不清楚时,应重新描写。

2) 检查木电杆杆根的腐朽程度,当松木杆腐朽部分达杆径的2/3以上,杉木杆达1/2以上时,要打钢筋混凝土桩加固或更换。

3) 钢筋混凝土电杆有露筋或混凝土脱落时,要将钢筋上的铁锈除去,然后补高标号水泥混凝土加固。

4) 拉线松弛应紧好,瓷杆不正应调整。

5) 修复损坏的接地引下线及接地装置。

6) 加固电杆基础、扶正电杆、变压器台。

7) 砍伐或修剪线路走廊的树木,拆除鸟巢。

#### (2) 停电检修

清除绝缘子上的灰尘,并检查有无裂纹、损伤、放电网络痕迹,紧固松动的绝缘子,绝缘子串的开口销、弹簧销是否完好,针式绝缘子的芯棒是否弯曲。