

# 第一章 电的基本概念

## 第一节 物体的带电和电场

### 一、物质结构

在人们的生产劳动和日常生活中，每天都要用电。如电灯照明、放电影、听广播、看电视等，都离不开电。电，在工农业生产、科研以及国防等方面的应用就更广泛了。那么，电究竟是什么呢？要回答这个问题，首先需了解物质的结构。

自然界一切物质都是由分子组成，分子是由原子组成，而原子又是由原子核和一些电子组成，这些电子沿着一定轨道绕原子核不停地运动。整个原子结构与太阳系的行星绕太阳转动很相似。不同物质的原子所具有的电子数目是不相同的，如氢原子只有一个电子，而铝原子则有13个电子，氢原子与铝原子的结构如图1-1所示。那么，电子为什么不停地围绕原子核运动，而不从原子中飞逸出去呢？这是因为原子核和电子之间存在着吸引力。这种吸引力是由于原子核带正电荷，而电子带负电荷所产生。异性电荷相互吸引，而同性电荷则是相互排斥，这是电荷的基本特性。

既然原子核与电子都带有电荷，为什么平常物质不表现出电性呢？这是因为原子核所带的正电荷与电子的负电荷数量相等，正负电荷的相互作用使整个原子不显电性。

### 二、物体的带电

如前所述，由于一切物质都是由分子组成的，因而物体

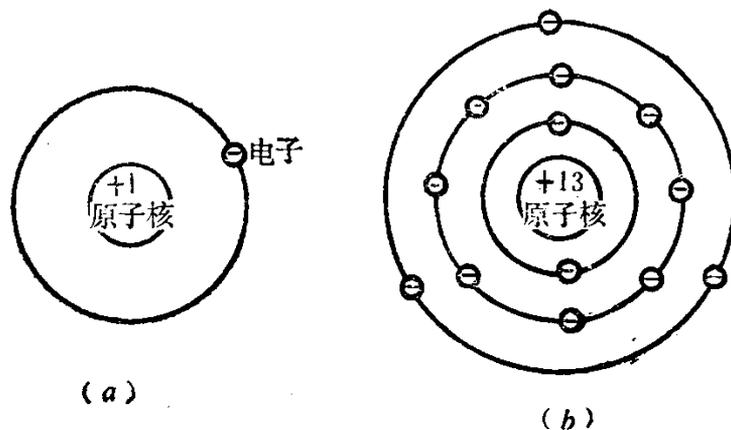


图 1-1 氢、铝原子的结构  
(a)氢原子；(b)铝原子

的内部存在着大量的电荷。一般情况下，物体内正电荷的总量和负电荷的总量相等，所以物体不呈现带电的特性，这时称物体处于中性状态。

当物体由于某种原因使电子增多或减少时，物体内的正负电荷的总量就不再相等，这时物体就显出电性，叫做物体带电或称带电体。我们熟悉的摩擦起电就是使物体带电的最简单的例子。当两种不同材料的物体互相摩擦时，一种物体要失去一些电子，另一种物体要得到电子。失去电子的物体由于电子数量的减少（即负电荷减少了而正电荷不变）而带正电，得到电子的物体由于负电荷的增多则带负电。

由此可见，物体带电是由于失去或者得到电荷所造成。电荷是一种物质，它不会凭空产生或消失，只能从一个物体上转移到另一个物体上，这叫做电荷守恒定律。

我们通常把物体所带电荷数量的多少叫做电量用  $Q$  表示，并取库仑做电量的单位，1 库仑的电量为  $6.25 \times 10^{18}$  个电子所带的电量。

### 三、电场

通过摩擦生电的实验表明，带有正负电荷的两个物体之间有力的作用，而且同性相斥，异性相吸，这是因为在带电体周围存在着电场。电场的主要特性是对处于电场中的电荷产生作用力，称之电场力。电场的强弱可由电荷在电场中受力大小来表示。同一电荷在电场中受力大的地方电场强，而受力小的地方电场弱。实验证明：靠近产生电场的带电体的地方电场强；离带电体越远，电场越弱；而且带电体所带电量越多，它周围的电场就越强。

电场的另一个特性，就是具有一定的方向，电场的方向为处于电场中的正电荷“ $+q$ ”所受力 $F$ 的方向。带正、负电荷的物体产生的电场方向如图 1-2(a)、(b)所示。

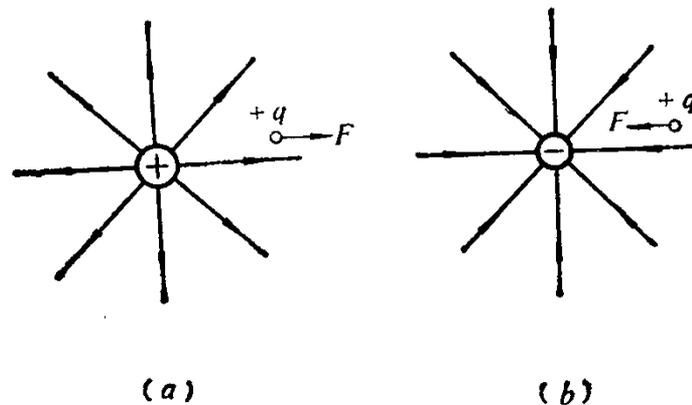


图 1-2 带电物体周围的电场  
(a)带正电荷的物体；(b)带负电荷的物体

## 第二节 电流

电气设备接通电源以后才能工作，如合上电源开关后，电动机立即就转动起来。这是因为在电动机中有电流通过的缘

故，那么，电流又是什么呢？下面就讲述这个问题。

### 一、导体中的电流

在金属导体中存在着大量电子，金属原子的内层电子被原子核紧紧束缚着，不能自由地运动，而原子的外层电子受原子核的束缚力较弱，可以脱离原子核的束缚，在金属中自由运动。这些自由运动的电子叫做自由电子。金属中的电流就是自由电子朝一个方向运动所形成的。

一般情况下，导体内的自由电子是处于互相碰撞，无定向的不规则的运动状态，因此形不成电流。如图1-3所示。

如果给导体两端加一个电场，则导体内的自由电子要受到电场力的作用。电场的正端要吸引电子，而负端排斥电子，所以自由电子要向正端运动，自由电子在电场力的作用下产生的定向运动就称为电流，如图1-4所示。

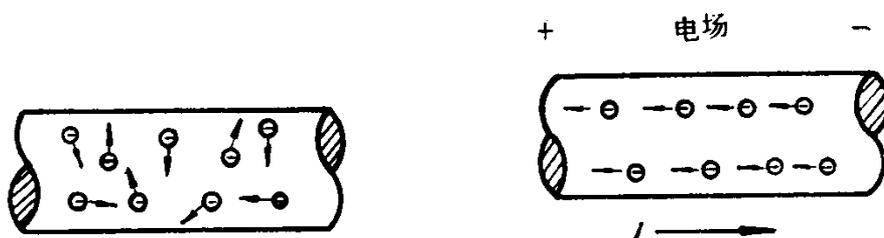


图 1-3 自由电子的不规则运动 图 1-4 自由电子的定向运动

### 二、电流的大小和方向

电流是用肉眼看不见的，但它的各种表现是可以被觉察到的。我们都知道照明用的灯泡，其照度大小不同，发光的强弱也是不同的。这是因为通过灯泡的电流大小不同，在灯泡内所做的功不一样的缘故。那么如何来决定电流的大小呢？

电流强度就是用来表示电流大小的一个物理量，电流强

度简称电流，用  $I$  表示。电流强度就是在电场的作用下，单位时间通过导体截面的电量。

设在时间  $t$  内通过导体截面  $S$  的电量为  $Q$ ，如图 1-5 所示，则电流强度为

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



图 1-5 通过导体截面的电量

电流的单位是安培，简称安，用  $A$  表示。如果每秒钟内通过导体截面的电量为 1 库仑时，则电流是 1 安。在计算大电流时，常以千安 ( $kA$ ) 为单位；计算小电流时，常以毫安 ( $mA$ ) 或微安 ( $\mu A$ ) 为单位。它们的换算关系如下：

$$1 \text{ 千安} = 10^3 \text{ 安}$$

$$1 \text{ 毫安} = \frac{1}{1000} \text{ 安} = 10^{-3} \text{ 安}$$

$$1 \text{ 微安} = \frac{1}{1000} \text{ 毫安} = 10^{-6} \text{ 安}$$

电流的大小可以用电流表来测量，我们常用的电灯一般电流在  $0.1 \sim 0.5$  安之间，而大型电动机的电流可达几百安。当电力系统发生短路时，其短路电流可达数十千安。如果有  $0.05$  安的电流通过人体的心脏就要危及人的生命，因此在工作中要注意安全用电。

电流是有一定方向的，人们开始发现电流的时候，认为是正电荷在运动，所以规定正电荷运动的方向为电流方向。这样就与电子运动的方向刚好相反，如图 1-4 所示。在电路中电流的方向常用箭头来表示。

在我们日常生活、工作中常用到的电流有直流和交流两种。电流的大小和方向不随时间变化的叫直流。如手电筒、半导体收音机及发电厂的事故照明和发电机的励磁等用的是直流电。电流的大小和方向随时间变化的称做交流。目前工

农业生产和人们生活中广泛用的是交流电，有些直流电也是由交流电经整流得到的，一般发电厂发出的电都是交流电。

### 第三节 电压与电位

导体中形成电流的内在因素是导体内有自由电子，而外界因素则是导体两端存在电场。电场对电子产生作用力，使电子产生定向的运动。不同的电场对电子产生的作用是不同的，我们常用电压这个物理量来表示电场对电荷作用的大小。

#### 一、电压

设有两个带电体  $A$ 、 $B$ ，并分别带有异性的电荷（ $A$ 带正电、 $B$ 带负电）形成电场。当用导体把这两个带电体连接起来后，在电场的作用下，正电荷则沿着电场力的方向由  $A$  向  $B$  运动，从而在导体中形成电流，如图 1-6 所示。

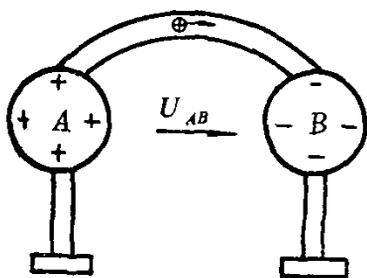


图 1-6 正电荷在导体中的运动

电流的大小与单位时间内通过导体截面的电量多少有关，而电场力在移动电荷时要做功，为了衡量电场对电荷做功的大小通常是用电压来表示。因此也可以认为电流是由电压产生的，我们将电场力移动单位正电荷由  $A$  到  $B$  所做的功就叫做  $AB$  间的电压，记作  $U_{AB}$ 。

如果电场将电量为  $Q$  的电荷从  $A$  移到  $B$  所做的功为  $W_{AB}$ ，那么  $AB$  间的电压为

$$U_{AB} = \frac{W_{AB}}{Q} \quad (1-2)$$

式(1-2)中, 电场做功的单位为焦耳, 电量的单位为库仑时, 则电压的单位是伏特, 简称伏或用  $V$  表示。

通常照明用的电压为 220 伏, 手电池的电压只有 1.5 伏, 对于高压常用千伏 ( $kV$ ) 做单位, 电压很低时用毫伏 ( $mV$ ) 做单位。它们之间的关系是:

$$1 \text{ 千伏} = 1000 \text{ 伏} = 10^3 \text{ 伏}$$

$$1 \text{ 毫伏} = \frac{1}{1000} \text{ 伏} = 10^{-3} \text{ 伏}$$

目前我国远距离高压输电线路的电压等级有 110、220、330 和 500 千伏。

电压不但有大小, 还有一定的方向, 通常规定正电荷运动的方向为电压的方向。即电压的方向是由正到负的。如图 1-6 所示。

## 二、电位

在分析电子电路时, 常用到电位这个量, 以便分析各点之间的电压。如果在电路中任选一参考点, 令其电位为零 (工程中常选大地为参考点), 则电路中某一点的电位就等于从该点到参考点之间的电压。如将电位用  $\varphi$  表示, 则任一点  $A$  的电位为

$$\varphi_A = U_{A0} \quad (1-3)$$

电位实际就是电压, 是对参考点的电压。因此它的单位也是伏特。在电场中任意两点的电位之差, 就等于这两点间的电压。即

$$U_{AB} = \varphi_A - \varphi_B = U_{A0} - U_{B0} \quad (1-4)$$

所以电压也称为电位差, 电压的方向是由高电位指向低电位。电流的方向与电压的方向是一致的, 它总是由高电位流向低电位的。如果在电路中两点电位相等, 这时电位差等

于零，就没有电流通过。我们把电位相等的点叫作等电位点，这是高压带电作业的理论基础。

#### 第四节 电源与电势

在图 1-6 中，如将带电体  $A$ 、 $B$  间接上导体，由于  $A$ 、 $B$  间存在电位差，所以在导体中产生电流。但是这个电流不能继续维持下去，因为随着电流的流通，带电体  $A$  上的正电荷流到  $B$  上与其负电荷中和了。所以  $A$ 、 $B$  上所带的电量将越来越少， $A$ 、 $B$  之间的电位差也随之减小，直到  $A$ 、 $B$  上的电荷完全中和， $A$  与  $B$  间的电位相等，导体中就没有电流通过了。

那么，要维持电流的继续存在，必须维持导体两端的电位差，这个电位差要靠电源来产生。

##### 一、电源

电源实质上是一种能量的转换装置，即将其它形式的能量转换为电能的一种设备，如发电机、干电池和蓄电池等。

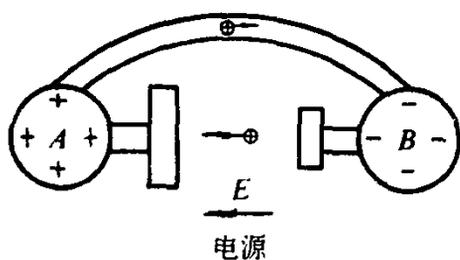


图 1-7 电源工作示意图

在各种电源中，它们都具有一个共同点，就是能在电源内移动电荷，使得一个极具有一定量的正电荷，另一个极具有一定量的负电荷，这样就在两极之间形成电场，产生了电位差。电源内部这种能移动电

荷的作用力称为电源力。图 1-7 为电源工作的示意图，电源力能够不断地将正电荷从负极移到正极，从而保持了两极之间的电位差，使电流在电路中持续不断地流通。

## 二、电动势

电源的电动势就是电源力将单位正电荷由电源负极移到正极所做的功 常用  $E$  表示。如图 1-7 所示，当电源力将正电荷  $Q$  从负极  $B$  移到正极  $A$  所做的功为  $W_{BA}$  时，则电源的电动势为

$$E = \frac{W_{BA}}{Q} \quad (1-5)$$

其中  $W_{BA}$  的单位是焦耳、 $Q$  的单位是库仑，故  $E$  的单位与电压相同，也用伏特表示。

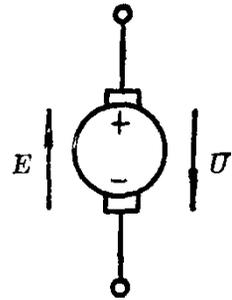


图 1-8 电压与电势的方向

电动势的方向为电源力移动正电荷的方向，即由低电位指向高电位。如图 1-8 所示，电势（电动势，以下简称电势） $E$  与电压  $U$  的方向相反，这是因为电势的方向是电源力移动正电荷的方向；而电压的方向是电场力移动正电荷的方向。电源力与电场力的方向是相反的，所以电势与电压的方向也相反。

一般将电势的大小和方向不随时间变化的电源，叫做直流电源。如干电池、蓄电池和直流发电机等都是直流电源。电势的大小和方向均随时间变化的电源，称为交流电源。交流发电机就是交流电源。

## 第五节 电阻、导体和绝缘体

### 一、电阻

导体中的自由电子在电场力的作用下，产生定向运动便形成电流。当电流通过导体时会受到阻力，因为自由电子在运动中不断与导体内的原子、分子发生碰撞，使自由电子受

到一定的阻力。导体对电流的这种阻力叫做电阻，用  $R$  表示。

电阻的单位是欧姆，或用欧（ $\Omega$ ）表示。大电阻常用千欧（ $k\Omega$ ）或兆欧（ $M\Omega$ ）做单位。它们的换算关系如下：

$$1 \text{ 千欧} = 1000 \text{ 欧} = 10^3 \text{ 欧}$$

$$1 \text{ 兆欧} = 1000 \text{ 千欧} = 10^6 \text{ 欧}$$

## 二、电阻的计算

导体存在电阻是一个客观现象，那么导体电阻的大小与哪些因素有关呢？实验证明，导体电阻与导体长度成正比，与导体截面积成反比，还与导体的材料有关。这是因为导体越长，自由电子运动路径就长，且与原子和分子碰撞机会增加，故表现为电阻增大。如导体截面积越大，自由电子运动的通道也大，而与原子和分子碰撞的机会将减少，故电阻要减小。不同材料单位体积内的自由电子数目不同，导电的能力也不同，因而电阻的大小也就不同。因此，导体电阻可由下式计算，即

$$R = \rho \frac{L}{S} \quad (1-6)$$

式中  $R$  ——导体电阻（欧）；

$L$  ——导体长度（米）；

$S$  ——导体截面（毫米<sup>2</sup>）；

$\rho$  ——电阻率（欧·毫米<sup>2</sup>/米）。

电阻率  $\rho$  表示长度为 1 米，截面是 1 平方毫米的导体所具有的电阻值。不同材料有不同的电阻率，几种常用电工材料的电阻率可由表 1-1 查得。

由表 1-1 可见，银、铜、铝的电阻率较小，它们都具有良好的导电性能。由于银较贵重，不宜大量使用，因此应用

表 1-1 几种常用材料的电阻率

材 料	电 阻 率 (欧·毫米 <sup>2</sup> /米)	材 料	电 阻 率 (欧·毫米 <sup>2</sup> /米)
银	0.0165	钨	0.055
铜	0.0175	镍铬合金	1.5
铝	0.0283	硬 橡 胶	$1 \times 10^{22}$

较广泛的导电材料是铜和铝。如高压输电线大都采用钢芯铝绞线。

### 三、电导

导体对于电流有一定的阻力，同时导体也具有传导电流的能力。电导就是用来表示导体传导电流能力大小的参数。

一根导线如具有的电阻越大，其传导电流的能力就越差，即说明电导就越小。反之如导体的电阻越小，则电导就越大。故可知电导与电阻互成倒数关系。电导用  $G$  表示，即

$$G = \frac{1}{R} \quad (1-7)$$

电导的单位为西门子，简称西（ $S$ ）。

电阻和电导都是用来表示导体导电性能的参数，在实际应用上可取其中一种。

例 1-1 有一根长为 1 公里，截面积为 5 平方毫米的铝导线，试求导线的电阻和电导。

解：由表 1-1 中查到铝的电导率  $\rho = 0.0283$  欧·毫米<sup>2</sup>/米，并代入式（1-6）可得

$$R = \rho \frac{L}{S} = 0.0283 \times \frac{1000}{5} = 5.66 \text{ 欧}$$

由式（1-7）可知电导为

$$G = \frac{1}{R} = \frac{1}{5.66} \approx 0.177 \text{西}$$

#### 四、导体和绝缘体

物体按其导电性能大致可分为导体、绝缘体和半导体三类，各种材料的导电性能可以用电阻或电导表示。

导体具有良好的导电性能，即电导大，电阻小的材料。导体材料的电阻率一般在 $10^{-2} \sim 1$ 范围内，金属材料大部分为良导体。如银、铜和铝等。

金属导体在电力工业中应用极广，从发电厂的发电机、变压器的绕组及高低压输电线，到用户的电动机线圈，灯泡的钨丝等都是用导电材料制成的。

通常将电阻极大，导电能力非常差，电流几乎不能通过的物体称为绝缘体。绝缘体的电阻率一般在 $10^{12} \sim 10^{22}$ 范围内。所以一般认为绝缘体是不能导电的。电工中常用的绝缘材料有橡胶、塑料、云母、陶瓷、油类、石棉及干燥的木材等。

绝缘材料在电力工业中与导体同样占有重要的地位。如变压器、油开关中的绝缘油，输电线与杆塔之间的瓷瓶等都是绝缘材料制造的。不同的绝缘材料，其绝缘性能各有差别。在高电压或温度高的地方，应采用陶瓷、云母、或石棉等耐高压、高温的绝缘材料。

绝缘材料长时间受温度、湿度和灰尘的影响后，绝缘性能要下降，这种现象叫做绝缘老化。绝缘材料老化后，由于绝缘强度的降低，可能在电气设备运行中造成绝缘损坏或称为绝缘击穿，影响设备的正常工作。如电机、变压器外壳的带电现象，就是由于绝缘强度降低造成的。所以，运行中的电气设备都要定期检查绝缘强度以保证运行安全。

此外，还有一类材料，它们的导电性能介于导体和绝缘体之间，称为半导体。半导体的电阻率为  $10^8$  左右。这一类材料有硅、锗、硒等。半导体材料在电子工业中有广泛的应用，如半导体二极管、晶体三极管及可控硅等元件都是由半导体材料制成的。

### 思考题与习题

- 1-1 物体是怎样带电的？
- 1-2 电荷有什么性质？
- 1-3 什么叫电场？
- 1-4 电流是如何形成的？它的方向是如何规定的？
- 1-5 电压与电动势有何区别？它们的方向是如何规定的？
- 1-6 什么是电位？
- 1-7 电源的作用是什么？
- 1-8 什么是电阻和电导？导体电阻与哪些因素有关？
- 1-9 试举几种良好的导体和良好的绝缘体，并举例说明它们的应用。
- 1-10 如图1-9所示，当电源的负极接地时，把电压表

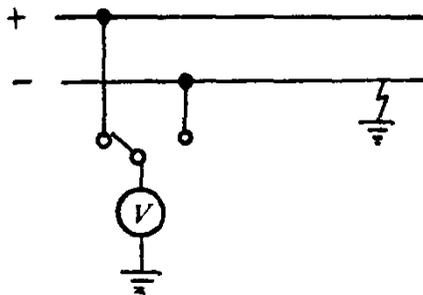


图 1-9

投向正极，指针有一定读数。当把电压表投向负极时，读数为零。试问这是为什么？利用此装置是否可以检查电源的正极接地？

1-11 有一根导线，每小时通过导线截面的电量为 900 库仑，试求导线中的电流。

1-12 两根长 600 米，截面积为 6 平方毫米的铜线，求其常温下的电阻。

1-13 绕制一个 1000 欧姆的电烙铁芯，试求需要多长 0.02 平方毫米截面的镍铬线。

## 第二章 直流电路

### 第一节 电路

电在实际应用中，从最简单的手电筒的工作到复杂的电子计算机的运算，都是由电路来完成的。

#### 一、电路的组成及电路元件的作用

电路就是电流所流经的路径，它由电路元件组成。当我们合上电动机的刀闸开关时，电动机立即就转动起来。这是因为电动机通过导线经开关与电源接成了电流的通路，并将电能转换成为机械能。电动机、电源等叫做电路元件，电路元件大体可分为四类。

1. 电源 为发电设备，其作用是将其他形式的能量转换为电能。如电池是将化学能转换为电能，而发电机是将机械能转换为电能。

2. 负载 即用电设备，它的作用是把电能转换为其他形式的能。如电炉是将电能转换为热能，电动机则把电能转换为机械能。

3. 控制电器 在电路中起控制作用，还可以保护电器设备。如开关、熔断器、接触器等。

4. 导线由导体制成，其作用就是把电源、负载和控制电器连接成一个电路，并将电源的电能传输给负载。

由此可见，电路的作用是产生、分配、传输和使用电能。图 2-1 就是一个最简单的电路：

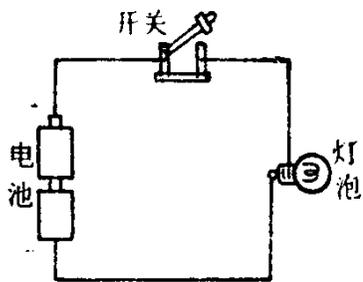


图 2-1 简单电路

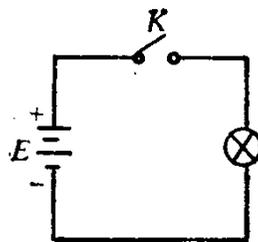


图 2-2 简单电路图

## 二、电路图

在实际工作中为了便于分析、研究电路，通常将电路的实际元件用图形符号表示在电路图中，称为原理电路图，也叫电路图。图 2-2 就是图 2-1 的原理电路图。一般电路图中，常用的电路元件的符号如表 2-1 所示。

表 2-1 常用电路元件的符号

元件名称	电路符号	元件名称	电路符号
电 源		导 线	
		开 关	
		熔 断 器	
电 灯		电 压 表	
电 阻		电 流 表	
电 感 线 圈		功 率 表	
电 容 器		接 地 点	
负 载			

在电路中，只有两个端点与电路其他部分相连的无分支电路叫做支路。在图 2-3 中共有 3 条支路。通常将 3 条支路以上的连接点称为节点。如图 2-3 中的 A 点和 B 点即为节

点。在电路中由支路组成的任一闭合路径叫做回路，图2-3中共有3个回路。如果电路中只有一个回路，叫做无分支电路，如图2-2所示的电路。如果电路中通过的是直流电流，则这种电路称为直流电路，本章所讨论的就是直流电路。

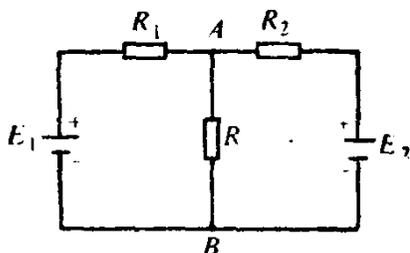


图 2-3 具有三个回路的电路

## 第二节 电路的欧姆定律

### 一、欧姆定律

电流、电压和电势是电路中的基本物理量，电阻是电路的一种参数。分析计算电路，就是研究以上各量之间的关系，确定它们的大小。欧姆定律就是反映电阻元件两端的电压与电流同电阻三者关系的定律。这是电路中很重要的一个基本定律。可用下式表示：

$$I = \frac{U}{R} \quad (2-1)$$

式中  $I$  —— 电流（安）；  
 $U$  —— 电压（伏）；  
 $R$  —— 电阻（欧）。

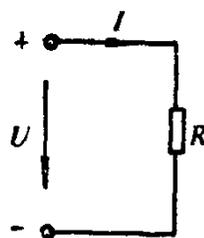


图 2-4 欧姆定律电路

由式( 2-1 )可知，通过电阻元件的电流与电阻两端的电压成正比，而与电阻成反比。

由试验可表明这一重要结论。如图 2-4 电路中，若已知

电阻为10欧，在电阻两端加10伏电压，则电阻中的电流是1安；如在电阻两端加100伏电压，这时电阻中的电流将为10安。当已知电压  $U=10$  伏，如  $R=5$  欧时，则  $I=2$  安； $R=2$  欧时， $I=5$  安。

## 二、欧姆定律的应用

对于任一支路的电阻电路，只要知道电路中的电压、电流和电阻这三个量中的任意两个量，就可由欧姆定律求得第三个量。下面举例说明。

例 2-1 一盏200瓦、220伏的电灯，灯泡的电阻是484欧，当电源电压为220伏时，求通过灯泡的电流。

解：已知电灯的电压和电阻，通过灯泡的电流可由式(2-1)求得

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

例 2-2 手电筒的电池电压为3伏，通过电珠的电流为150毫安，求电珠的电阻。

解：已知电压和电流，利用欧姆定律求得电珠的电阻为

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

例 2-3 一台发电机励磁线圈的电阻为2.2欧，需通过100安的电流建立磁场，求线圈两端的励磁电压。

解：已知电阻和电流，利用欧姆定律求得励磁电压为

$$U = IR = 100 \times 2.2 = 220 \text{伏}$$

在应用欧姆定律时，还应注意电压与电流方向一致，即电压由高电位指向低电位，电流由高电位流向低电位。如图2-4中的电压与电流的方向是一致的。

## 三、电压降和电压损失

由欧姆定律可知，电阻有电流通过时，两端必有电压。

这个电压习惯上叫做电压降。通常导线都是有电阻的，当用导线传输电流时，就产生电压降，因此直流输电线路末端的电压总是比始端的电压低。如图2-5所示，电路中 $U_2$ 是小于 $U_1$ 的，其小的数值等于线路电阻 $R_L$ 上的电压 $U_L$ 。输电线路电压降低的数值叫做电压损失。如果线路较长，电源电压较低，线路电流又较大，这样线路的电压损失就较大，供给负载的电压将会明显下降，影响设备的正常工作。

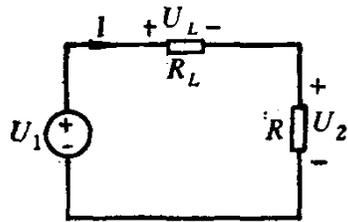


图 2-5 直流输电的电路

### 第三节 电路的基尔霍夫定律

欧姆定律可以确定电阻元件上电压与电流的关系，但只能用于无分支的电阻电路。对于一个比较复杂的电路，如图2-6所示的电路，如何来确定各支路电流和各部分电压的关系呢？只用欧姆定律一般是不能解决的。利用基尔霍夫定律即可表明支路电流之间的关系和回路电压间的关系。

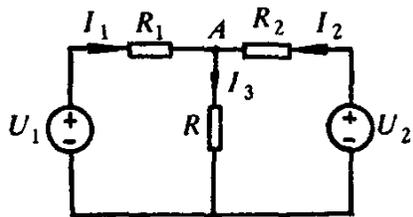


图 2-6 说明基尔霍夫电流定律的电路

只用欧姆定律一般是不能解决的。利用基尔霍夫定律即可表明支路电流之间的关系和回路电压间的关系。

#### 一、基尔霍夫电流定律

基尔霍夫电流定律也叫做基尔霍夫第一定律，它确定了电路中任一节点所连的各支路电流之间的关系。

基尔霍夫电流定律指出：对于电路中任一节点，流入节点的电流之和必等于流出该节点的电流之和。

基尔霍夫电流定律是电流连续原理在电路中的体现，即

任一瞬间从一个地方流入多少电荷，必定同时从这个地方流出相等电量的电荷。

在图2-6电路中，对于A节点 $I_1$ 、 $I_2$ 是流入节点的，而 $I_3$ 是由节点流出的。由基尔霍夫电流定律可将三个电流之间的关系用下式表示：

$$I_1 + I_2 = I_3$$

如果将上式 $I_3$ 移到左边可得

$$I_1 + I_2 - I_3 = 0$$

即流入（或流出）电路任一节点各电流的代数和等于零。

$$\sum I = 0 \quad (2-2)$$

式中符号 $\sum$ 是“代数和”的意思，说明各项电流可为正或负，如果规定流入节点的电流为正，那么流出节点的电流就是负的。反之也成立。在应用时应注意各支路电流的方向。

例2-4 如图2-7所示，已知 $I_1$ 为1安， $I_2$ 为2安， $I_3$ 为1安，试求电源发出的总电流 $I$ 。

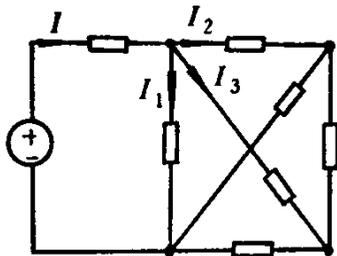


图 2-7 例2-4电路

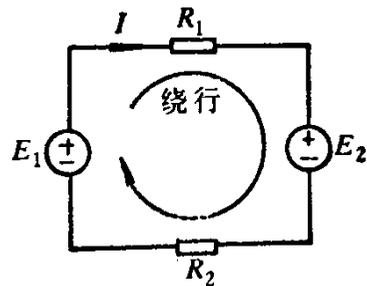


图 2-8 具有一个回路的电路

解：根据基尔霍夫电流定律列出电流的方程式：

$$I - I_1 - I_2 - I_3 = 0$$

$$I = I_1 + I_2 + I_3 = 1 + 2 + 1 = 4 \text{ 安}$$

即电源输出的电流为4安。

## 二、基尔霍夫电压定律

基尔霍夫电压定律也叫基尔霍夫第二定律，它确定了电路任一回路中各部分电压之间的相互关系。

基尔霍夫电压定律指出：对任一回路，沿任一方向绕行一周，各电源电势的代数和等于各电阻电压降的代数和。即

$$\sum E = \sum IR \quad (2-3)$$

或

$$\sum E = \sum U$$

如图2-8所示电路，如沿顺时针方向绕行，由基尔霍夫电压定律可列出它的回路电压方程。

$$E_1 - E_2 = IR_1 + IR_2$$

在应用基尔霍夫电压定律时应注意，先选定绕行方向，回路中凡是与绕行方向相同的电势或电流在式(2-3)中取正号，反之取负号。如图2-9所示的 $ABCD$ 回路，当顺时针绕行时，回路电压方程为

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

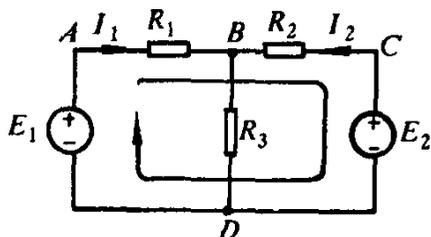


图 2-9 具有两个回路的电路

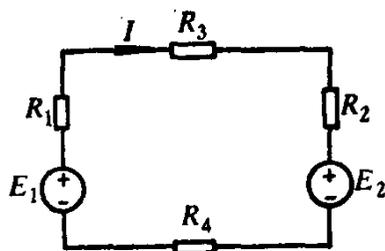


图 2-10

基尔霍夫电压定律是能量守恒定律在电路中的体现。因为电势是电源力对电荷所做的功，使电荷获得能量。而电压是电场力对电荷所做的功，使电荷失去能量。根据能量守恒可知，电荷得到的能量应与失去的能量相等，在电路中则体现为基尔霍夫电压定律的形式。

例 2-5 在图2-10所示电路中，已知电源电势 $E_1$ 、 $E_2$ 和

各电阻 $R_1$ 、 $R_2$ 、 $R_3$ 、 $R_4$ ，试求回路中的电流 $I$ 。

解：此电路为一分支的回路，故利用基尔霍夫电压定律按顺时针绕行方向列出回路方程为

$$\begin{aligned} E_1 - E_2 &= IR_1 + IR_2 + IR_3 + IR_4 \\ &= I(R_1 + R_2 + R_3 + R_4) \end{aligned}$$

由此可求出电流

$$I = \frac{E_1 - E_2}{R_1 + R_2 + R_3 + R_4}$$

由此可见，利用基尔霍夫电压定律即可求解回路上的电压和电流。

基尔霍夫定律是电路理论的基本定律，在应用基尔霍夫定律时必须注意：电流、电压、电势的方向及所选定的绕行方向的关系。

#### 第四节 电阻的串联电路

在电路中，电阻的连接方式是多种多样的，串联电路是最简单的一种。

将两个以上的电阻，依次首尾相连接，使各电阻通过同一电流，这种连接方式叫做电阻的串联。图 2-11所示为三个电阻的串联电路。

下面以三个电阻串联为例，说明串联电路的特点。

(1) 串联电路中，流过各电阻的电流相同。

这是因为电阻串联时，电路只有一条电流的通道，通过一个电阻的电流也必然通过其它电阻。

(2) 串联电路的总电压等于各电阻上电压降之和。

这可以由基尔霍夫电压定律来证明，如图 2-11 所示电路

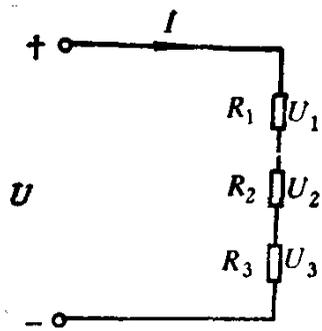


图 2-11 三个电阻串联电路

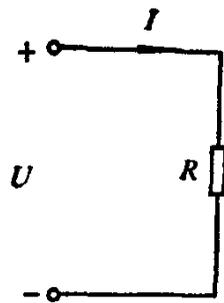


图 2-12 等效电阻

中，由式(2-3)就可列出回路的电压方程。即

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

所以

$$U = U_1 + U_2 + U_3$$

(3) 串联电路的总电阻为各电阻之和

由欧姆定律可知：

$$U_1 = IR_1; U_2 = IR_2; U_3 = IR_3$$

所以总电压为

$$U = IR_1 + IR_2 + IR_3 = I(R_1 + R_2 + R_3) = IR$$

其中

$$R = R_1 + R_2 + R_3 \quad (2-4)$$

$R$ 为串联电路的总电阻，通常叫做等效电阻，所谓等效电阻是指 $R$ 与 $R_1 + R_2 + R_3$ 数值相等，即在电路中的作用是相同的。这样就可以将三个电阻的串联电路用图2-12所示的等效电阻来表示。

由串联电路的特点可看出：如果在电路中串联一个电阻，那么电路的等效电阻就要增大。在电源电压不变的情况下，电路中的电流将要减小。所以串联电阻可起到限制电流的作用。例如在较大型的电动机起动时，为了防止起动电流过大，常在起动回路串入一个起动电阻，以减小起动电流。

串联电阻的另一个用途就是可以起到分压的作用，因为

电阻通过电流要产生电压降，承担了电路的一部分电压。如电阻分压器和多量程电压表就是利用了这个原理。

例2-6 如图 2-11 所示的三个电阻串联电路中， $R_1 = 10\text{欧}$ 、 $R_2 = 5\text{欧}$ 、 $R_3 = 20\text{欧}$ 、电流为 5 安，试求串联电路的总电压。

解：电路的等效电阻

$$R = R_1 + R_2 + R_3 = 10 + 5 + 20 = 35\text{欧}$$

电路的总电压

$$U = IR = 5 \times 35 = 175\text{伏}$$

此题也可先将每个电阻电压求出，然后根据基尔霍夫电压定律求总电压。例如：

$$U_1 = IR_1 = 5 \times 10 = 50\text{伏}$$

$$U_2 = IR_2 = 5 \times 5 = 25\text{伏}$$

$$U_3 = IR_3 = 5 \times 20 = 100\text{伏}$$

$$U = U_1 + U_2 + U_3 = 50 + 25 + 100 = 175\text{伏}$$

由此看出串联电路中的每个电阻电压与电阻的大小成正比。

## 第五节 电阻的并联电路

几个电阻头尾分别连在一起，即电阻都接在两个节点之间，各电阻承受同一电压，这种连接方式叫做电阻的并联，

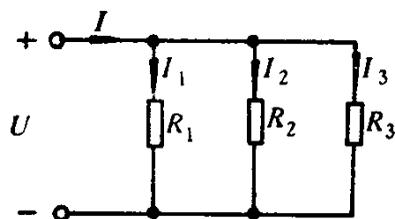


图 2-13 三个电阻并联电路

图2-13中的 $R_1$ 、 $R_2$ 、 $R_3$ 即为电阻的并联电路。

下面以图2-13三个电阻的并联为例，说明并联电路的特

点。

(1) 各并联电阻的电压相同。如通常照明用的电灯都是并联连接，各电灯的电压都相同。

(2) 并联电路的总电流为各电阻支路电流之和。由基尔霍夫电流定律可知，图2-13电路中的总电流为

$$I = I_1 + I_2 + I_3$$

(3) 并联电路等效电阻的倒数为各电阻的倒数之和。由欧姆定律可知，图2-13中各支路的电流为

$$I_1 = \frac{U}{R_1}; \quad I_2 = \frac{U}{R_2}; \quad I_3 = \frac{U}{R_3}$$

因为总电流

$$\begin{aligned} I &= \frac{U}{R_1} + \frac{U}{R_2} + \frac{U}{R_3} = U \left( \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} \right) \\ &= \frac{U}{R} \end{aligned}$$

所以 
$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} \quad (2-5)$$

也可用电导来表示

$$G = G_1 + G_2 + G_3 \quad (2-6)$$

即并联电路等效电导为各电导之和。

对于常见的两个电阻并联的电路，其等效电阻的倒数为

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

等效电阻为

$$R = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} \quad (2-7)$$

电阻并联的实例很多，如电灯与电视机，电炉与电动机等都是并联连接。并联适应于恒定电压的供电方式。由于这

种供电方式的电网电压一般不变，而且负载并联时，其中一个负载接通或切断，不会影响其它负载的正常工作，因此，供电系统都是采用恒定电压的供电方式，负载一般都是并联的。

由并联电路的特点还可看出，当电路增加一并联电阻后，则该电阻中将通过一定的电流，使总电流增大。因此，并联电阻可以起分流作用。如电流表并联一电阻后可以扩大电流表的量程。

例 2-7 某户装有 40 瓦和 25 瓦的电灯各一盏，它们的电阻分别是 1210 欧和 1936 欧；电源电压是 220 伏。求两盏电灯的总电流。

解：两电灯的等效电阻由式（2-7）求得

$$R = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} = \frac{1210 \times 1936}{1210 + 1936} \approx 745 \text{ 欧}$$

由欧姆定律可求得总电流

$$I = \frac{U}{R} = \frac{220}{745} = 0.295 \text{ 安}$$

也可由欧姆定律先求出各灯电流

$$I_1 = \frac{U}{R_1} = \frac{220}{1210} = 0.182 \text{ 安}$$

$$I_2 = \frac{U}{R_2} = \frac{220}{1936} = 0.113 \text{ 安}$$

再由基尔霍夫电流定律可知总电流

$$I = I_1 + I_2 = 0.182 + 0.113 = 0.295 \text{ 安}$$

由此可见，在并联电路中，并联电阻越多，其等效电阻越小，而且小于任一并联支路的电阻，所以在电路中并联一个电阻后，总电流增大。由欧姆定律可知，并联电路中各支路的电流与其支路电阻成反比。

## 第六节 电阻的混联电路

电阻的串联与并联是电路最基本的连接形式，在一些电路中，可能既有电阻的串联，又有电阻的并联，这种电路就叫做电阻的混联电路，如图2-14所示。

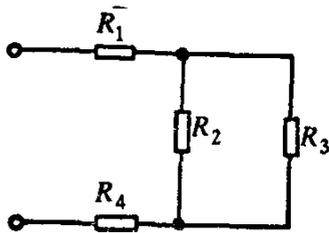


图 2-14 电阻的混联电路

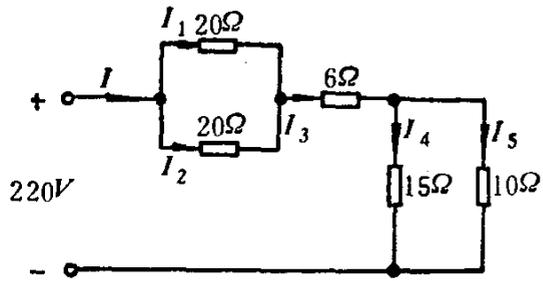


图 2-15

分析、计算混联电路的方法如下：

(1) 应用电阻的串联、并联逐步简化电路，求出电路的等效电阻；

(2) 由等效电阻和电路的总电压，根据欧姆定律求电路的总电流；

(3) 由总电流根据基尔霍夫定律和欧姆定律求各支路的电压和电流。

下面举例说明混联电路的分析与计算方法。

例2-8 如图 2-15所示，电路总电压为 220 伏，已知各电阻值，试求各电阻的电流和电压。

解：先求  $R_1$  和  $R_2$  的并联等效电阻

$$R_{1,2} = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} = \frac{20 \times 20}{20 + 20} = \frac{20}{2} = 10 \text{ 欧}$$

$R_4$  与  $R_5$  的并联等效电阻为

$$R_{4,5} = \frac{R_4 R_5}{R_4 + R_5} = \frac{15 \times 10}{15 + 10} = 6 \text{ 欧}$$

混联电路的等效电阻

$$R = R_{1,2} + R_3 + R_{4,5} = 10 + 6 + 6 = 22 \text{ 欧}$$

电路总电流

$$I = I_3 = \frac{220}{22} = 10 \text{ 安}$$

$R_1$ 、 $R_2$ 两端的电压

$$U_{1,2} = IR_{1,2} = 10 \times 10 = 100 \text{ 伏}$$

$R_3$ 上的电压

$$U_3 = IR_3 = 10 \times 6 = 60 \text{ 伏}$$

$R_4$ 、 $R_5$ 两端的电压

$$U_{4,5} = IR_{4,5} = 10 \times 6 = 60 \text{ 伏}$$

由于 $R_1 = R_2$ ，所以

$$I_1 = I_2 = \frac{100}{20} = 5 \text{ 安}$$

$R_4$ 、 $R_5$ 的电流分别为

$$I_4 = \frac{60}{15} = 4 \text{ 安}$$

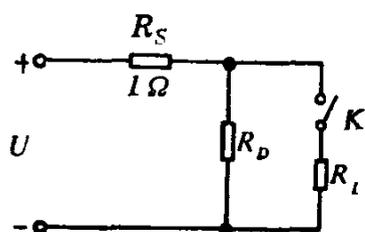


图 2-16 例 2-9 电路

$$I_5 = I_3 - I_4 = 10 - 4 = 6 \text{ 安}$$

例 2-9 若在照明线路上使用电炉时，电灯会明显地变暗。这由于电流增大后，在线路上的电压损失增加引起的。

图 2-16 为供给电灯、电炉的等效电路。设线路的起始端电压为 220 伏，线路电阻  $R_s$  为 1 欧，在线路末端接有 100 瓦 220 伏电灯 20 盏，每盏电灯的电阻为 484 欧，如果接入一个电阻为 12.1 欧的 4 千瓦电炉，问电灯电压将要降低百分之几？

解：由于每盏电灯的电阻相同，20 盏并联的等效电阻为

$$R_D = \frac{484}{20} = 24.2 \text{ 欧}$$

接入电炉前电路电流为

$$I = \frac{U}{R_s + R_D} = \frac{220}{1 + 24.2} = 8.73 \text{ 安}$$

电灯两端的电压为

$$\begin{aligned} U_D &= IR_D = U - IR_s \\ &= 220 - 8.73 \times 1 = 211.27 \text{ 伏} \end{aligned}$$

接入电炉后，电灯与电炉为并联，这时电路的等效电阻为

$$\begin{aligned} R &= R_s + \frac{R_D R_L}{R_D + R_L} \\ &= 1 + \frac{24.2 \times 12.1}{24.2 + 12.1} \approx 9.07 \text{ 欧} \end{aligned}$$

电路总电流

$$I' = \frac{U}{R} = \frac{220}{9.07} \approx 24.26 \text{ 安}$$

这时电灯两端的电压为

$$\begin{aligned} U'_D &= U - I' R_s \\ &= 220 - 24.26 \times 1 = 195.74 \text{ 伏} \end{aligned}$$

电炉接入后电灯电压降低

$$\begin{aligned} \frac{U_D - U'_D}{U_D} \times 100\% &= \frac{211.27 - 195.74}{211.27} \times 100\% \\ &= 7.35\% \end{aligned}$$

这说明电炉接入后，电流增大，在线路上的电压损失增加，使得电灯两端的电压降低，因此电灯明显暗下去。

## 第七节 电路的功率与电能

前面介绍了电压、电流、电阻，并研究了各量之间的相互关系。在电路分析计算时还经常遇到功率和电能的问题。在电力系统中，发电厂、输电线的主要任务就是发出和输送电功率。因此，电路中功率和电能的计算就成为电路计算的重要问题了。

### 一、电功率

电功率就是单位时间内电场力所做的功，图2-17是电路中的一个电阻，它两端的电压为  $U$ ，通过的电流是  $I$ ，由电压、电流的定义可知，电压  $U$  是电场力移动单位正电荷所做的功，而电流  $I$  是单位时间内通过电阻的总电量。因此单位时间内电场在电阻上做的功应为电压与电流的乘积，即

$$P = UI \quad (2-8)$$

式中  $P$  —— 电功率，当  $U$  用伏， $I$  以安为单位时， $P$  的单位是瓦特，简称瓦，或用  $W$  表示。比瓦大的单位为千瓦 ( $kW$ )、兆瓦 ( $MW$ )，比瓦小的单位是毫瓦 ( $mW$ )。

$$1 \text{ 千瓦} = 10^3 \text{ 瓦}$$

$$1 \text{ 兆瓦} = 10^3 \text{ 千瓦} = 10^6 \text{ 瓦}$$

$$1 \text{ 毫瓦} = 10^{-3} \text{ 瓦}$$

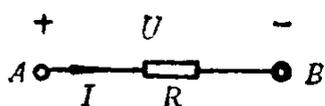
由欧姆定律可将式 (2-8) 变换为

图 2-17 电路中的一个电阻

$$P = UI = I^2 R = \frac{U^2}{R} = U^2 G \quad (2-9)$$

由此可见，电阻中消耗的功率与电阻大小及电阻上电压、电流有关。

例2-10 一只 220 伏，100瓦的灯泡，当接到电压为 220



伏的电源时，通过电流为多大？灯泡的电阻是多少？

解：由式(2-8)可知，电流及电阻为

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

$$R = \frac{U^2}{P} = \frac{U}{I} = \frac{220}{0.455} = 484 \text{欧}$$

## 二、电能

电动机、电灯的功率只表示它工作能力的大小，而它们所完成的工作量，不仅决定于其功率的大小，还与它们工作的时间长短有关。因此，电能就是用来表示电场在一段时间内所做的功。即

$$W = Pt \quad (2-10)$$

式中  $P$  —— 功率，以千瓦为单位；

$t$  —— 时间，以小时为单位；

$W$  —— 电能，其单位为千瓦·小时，或用  $kWh$  表示，实际上 1 千瓦·小时就是平常所说的 1 度电。

例2-11 一台 10 千瓦电动机，每天工作 8 小时，求一个月 30 天要用多少度电？

解：由式(2-10)可知电动机每天用电为

$$W_1 = Pt_1 = 10 \times 8 = 80 \text{度}$$

电动机 30 天用电为

$$W = 30 \times W_1 = 30 \times 80 = 2400 \text{度}$$

## 三、焦耳-楞次定律

电流通过电阻时，电阻就会发热，将电能转换为热能，这种现象叫做电流的热效应。

那么电阻中的电能转换为多少热能呢？十九世纪的科学

家焦耳和楞次通过大量的实验，几乎同时发现，电阻通过电流后所产生的热量与电流的平方、电阻及通电的时间成正比。这就是焦耳-楞次定律。电能转换为热能的关系可用下式表示：

$$Q=0.24I^2Rt \quad (2-11)$$

式中  $I$  —— 电流（安）；

$R$  —— 电阻（欧）；

$t$  —— 时间（秒）；

$Q$  —— 电阻上产生的热量（卡）；

0.24——热功当量，表示 1 瓦特秒电能所产生的热量为 0.24 卡。

例2-12 一个电热器接在电压为 220 伏的电源上，通过电热器的电流为 5 安。试求通电 1 小时所产生的热量。

解：由式（2-11）可知，式中的  $I^2R$  就是电阻上消耗的功率，所以电热器产生的热量为

$$\begin{aligned} Q &= 0.24UIt = 0.24 \times 220 \times 5 \times 60 \times 60 \\ &= 950400 \text{卡} \end{aligned}$$

### 思考题与习题

2-1 电路主要是由哪几部分组成？各部分起什么作用？什么叫支路、节点和回路？

2-2 欧姆定律和基尔霍夫定律确定了电路中哪些量之间的关系？如何应用？

2-3 电阻串联和并联时各有什么特点？如何求它们的等效电阻？

2-4 什么是电路的功率和电能？它们之间有何关系？

2-5 什么是电流的热效应？如何确定电流在电阻中产生的热量？

2-6 已知一个电阻是 44 欧，使用时通过的电流为 5 安，试求电阻两端的电压。

2-7 求图 2-18 所示电路中 6 欧电阻的电流和 A、B 两点之间的电压  $U_{AB}$ 。

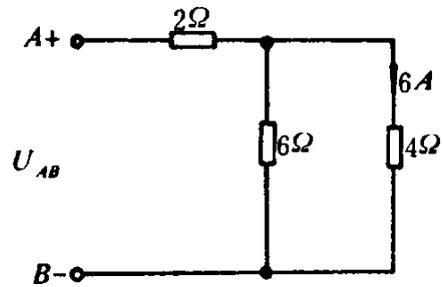


图 2-18

2-8 列出图 2-19 所示电路各节点的基尔霍夫电流方程和各回路的基尔霍夫电压方程。

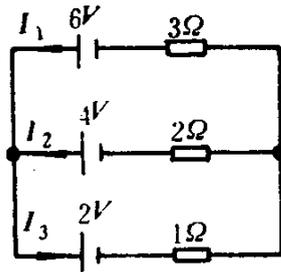


图 2-19

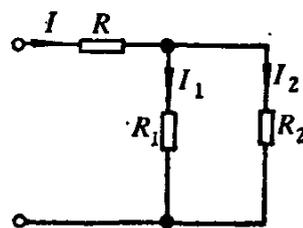


图 2-20

2-9 图 2-20 所示电路中，已知  $R_1 = 10$  欧， $I_1 = 2$  安， $I = 3$  安，求  $I_2$  及  $R_2$  的大小。

2-10 一台直流电动机运行时端电压  $U = 210$  伏，电流  $I = 5$  安，求电动机输入的电功率。

2-11 两根输电线，每根的电阻为 1 欧，通过的电流年平均值为 50 安，一年工作 4200 小时，求此输电线一年内的电能损耗。

2-12 有两个灯泡，一个为 220 伏、100 瓦，另一个为 220 伏、40 瓦，若把两个灯泡串联接到 220 伏电源上，试问哪一个灯泡亮些？

2-13 试求图2-21 (a)、(b)、(c)、(d) 所示电路的  $a$ 、 $b$  端等效电阻  $R_{ab}$ 。

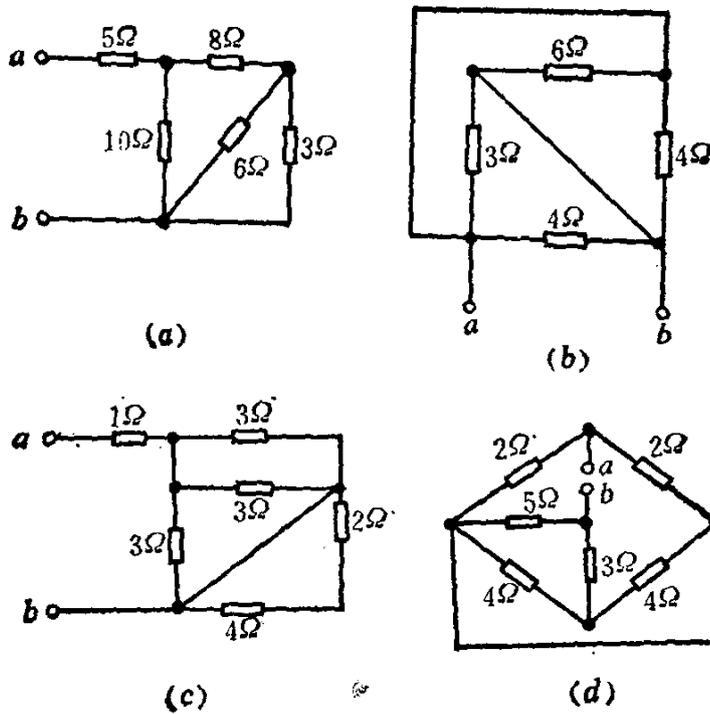


图 2-21

2-14 试求图 2-22所示电路中各电阻中的电流。

2-15 如图 2-23所示电路中，已知电流  $I = 10$  安、 $I_1 = 6$  安，电阻  $R_1 = 3$  欧、 $R_2 = 1$  欧、 $R_3 = 2$  欧。求电流表  $A_4$  和  $A_5$  的读数。

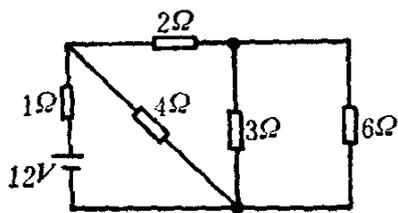
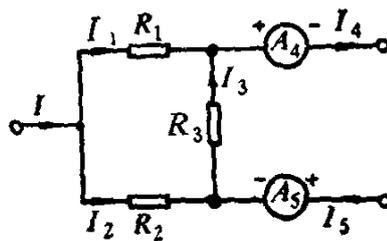


图 2-22



2-23

## 第三章 交流电的基本概念

### 第一节 电 磁 感 应

#### 一、磁场

一块永久磁铁，能够吸起铁沫，表现出它有磁力的作用。我们将磁力作用的空间称为磁场。磁场可由永久磁铁产生，也可由导线通过电流产生。

磁场可以用磁力线表示，磁力线上每一点的切线方向就是该点磁场的方向。永久磁铁产生的磁场如图 3-1 所示。同样，通过单导线电流所产生的磁场也可以用磁力线表示。此

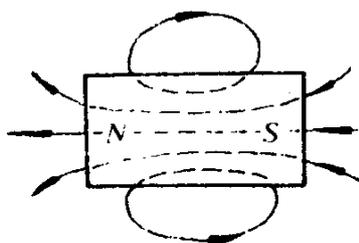


图 3-1 永久磁铁的磁场

时电流与磁力线方向的关系，可以用单导线右手定则来判定。如图 3-2 ( a ) 所示，用右手握导线，大拇指指电流方向，四指所指的方向即为磁力线方向。习惯上人们把这个定

则也称为右螺旋定则，如图 3-2 ( b ) 所示。如果螺旋前进的方向表示电流的方向，那么，螺旋柄旋转的方向，就表示导线周围磁力线的方向。

以上所讲的是一根直的载流导线所产生的磁场。当电流通过线圈时也要产生磁场，线圈中的电流与磁力线的方向关系可用线圈的右手定则判定。如图 3-3 所示，右手四指沿电流方向握住线圈，伸出拇指所指方向，就是磁力线的方向。

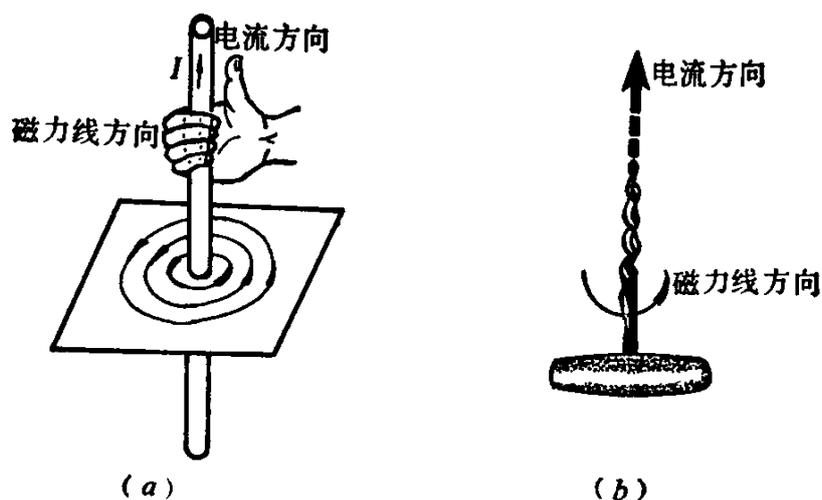


图 3-2 通电单导线的磁场  
 (a)单导线右手定则； (b)右螺旋定则

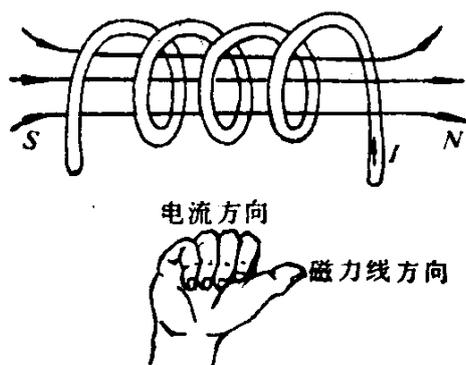


图 3-3 通电线圈的磁场

## 二、磁通与磁通密度

磁场是有大小或强弱的。例如仪表中的磁场与发电机转子产生的磁场是不相同的。一般将通过某一垂直面积  $S$  的磁力线数叫磁通，用  $\phi$  表示。磁通的单位是韦伯 (  $Wb$  )，较小的单位是马克斯威尔 (  $Mx$  )。

$$1 \text{ 韦伯} = 10^8 \text{ 马克斯威尔}$$

用磁通可以表示磁场的强弱，但不能表示磁场的方向。磁场内各点磁场的大小和方向，可用磁通密度这个物理量来

表示。磁通密度也叫磁感应强度，用  $B$  表示。磁通密度表示穿过磁场中某一单位面积内的磁通，即

$$B = \frac{\phi}{S} \quad (3-1)$$

式中  $\phi$  —— 穿过  $S$  的磁通（韦伯）；  
 $S$  —— 与磁场垂直的面积（米<sup>2</sup>）；  
 $B$  —— 磁通密度 韦伯 / 米<sup>2</sup>）。

磁通密度  $B$  的常用单位是高斯（1 韦伯 / 米<sup>2</sup> = 10<sup>4</sup> 高斯）。如一般电机和变压器的硅钢片铁芯的磁通密度约为 5000~17000 高斯，而地球的磁通密度约有 0.5 高斯。

由于磁通密度表示了磁场中各点磁场的大小和方向，因此  $B$  为一矢量，磁场中各点  $B$  的方向为磁力线上该点切线的方向。

### 三、电磁感应

#### （一）电磁感应现象

前面我们研究了电流可以产生磁场，说明电与磁是互相联系的，在一定的条件下电可以转化为磁，同样磁也可以转化为电。

1832年，英国科学家法拉弟发现了磁场产生电流的现象，并研究了将机械能转化为电能的方法，为现代的电工理论奠定了基础。

法拉弟通过实验证明：当导线周围的磁场发生变化时，可以在导线中产生感应电势。他把这种产生电势的方法叫做电磁感应。

#### （二）感应电势的方向

将一根直导体放在磁场中，并用导线与一个检流计接成闭合回路，如图 3-4 所示。当导体运动切割磁力线时，我们

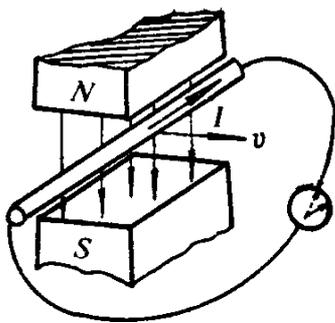


图 3-4 导体在磁场中运动产生感应电流

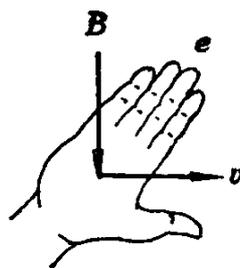


图 3-5 发电机右手定则

可以看到检流计的指针发生偏转，这说明导体中产生了电流；当导体改变运动方向，向反方向运动时，检流计的指针反偏，这说明电流改变了方向。由此看出感应电势的方向与磁场及导体的运动方向有关。直导体中产生感应电势的方向及导体的运动方向与磁场方向的关系可用发电机右手定则来判定：右手掌心迎向磁力线，大拇指指向导体运动方向，四指所指方向为感应电势  $e$  的方向，如图 3-5 所示。

如果导体不动，磁场运动同样可以在导体中产生感应电势，其方向仍可用发电机右手定则判定。

以上说明了直导体中的感应电势的方向，下面来讨论线圈中的感应电势的方向。

将线圈两端连接一检流计，然后把一块磁铁插入线圈，如图 3-6 (a) 所示。此时，发现检流计的指针偏转，说明线圈中产生了感应电势，在感应电势  $e$  的作用下，线圈与检流计构成的回路中产生了感应电流  $i$ ，故使检流计的指针偏转。若磁铁进入线圈后不再运动，检流计指针立即返回零位，如图 3-6 (b) 所示。当把磁铁由线圈中抽出时，可发现检流计的指针向反方向偏转，说明感应电势改变了方向，如图 3-6 (c) 所示。

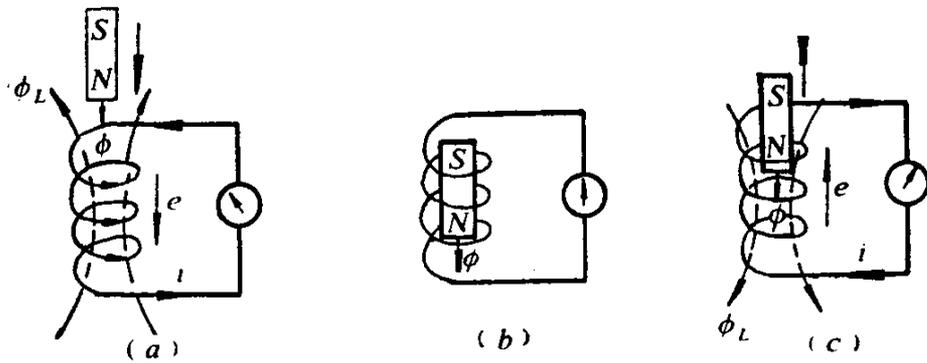


图 3-6 线圈中产生感应电势的方向

(a) 磁铁插入线圈； (b) 磁铁不运动； (c) 磁铁由线圈中抽出

1833年，俄国科学家楞次研究并确定了线圈中感应电势方向的规律，这就是楞次定律。楞次定律指出：线圈中感应电势的方向，总是使它所产生的电流形成的磁场，阻止原来磁场的变化。换句话说，就是当线圈内磁通  $\phi$  增加时，感应电流产生的新磁通  $\phi_L$  阻止它增加，即  $\phi_L$  与  $\phi$  的方向相反。当磁通  $\phi$  减少时，感应电流产生的磁通  $\phi_L$  阻止它减少，即  $\phi_L$  与  $\phi$  的方向相同，如图 3-6(c) 所示。

楞次定律反映了电磁感应的普遍规律，任何情况下，电磁感应都遵循这个定律。

### (三) 感应电势的大小

1. 线圈内的感应电势 如前所述，线圈内感应电势的大小与穿过线圈磁通的变化速度成正比，而与穿过线圈的磁通多少无关。图 3-6(b) 线圈中虽有磁通，但由于没有发生变化，所以不产生感应电势。由此可见，感应电势的大小取决于线圈中磁通的变化率，即单位时间内磁通变化量的多少。此外感应电势的大小还和线圈匝数成正比。

考虑到线圈匝数与线圈内磁通的变化率对感应电势的影响，感应电势的大小可由下式表示：

$$e = -N \frac{\Delta\phi}{\Delta t} \quad (3-2)$$

式中  $e$  —— 感应电势 (伏) ;

$N$  —— 线圈匝数 ;

$\frac{\Delta\phi}{\Delta t}$  —— 每匝线圈中磁通的变化率 (韦/秒) .

$\frac{\Delta\phi}{\Delta t}$  的意义是 : 设时间为  $t_1$  时 , 穿过线圈磁通为  $\phi_1$  , 当时间变化为  $t_2$  时 , 磁通变为  $\phi_2$  , 则

$$\Delta t = t_2 - t_1 \quad (\text{表示时间的变化量})$$

$$\Delta\phi = \phi_2 - \phi_1 \quad (\text{表示在 } \Delta t \text{ 时间内磁通的变化量})$$

式(3-2)中的负号表示感应电势的方向,与楞次定律是一致的。当磁通增加时,即 $\phi_2 > \phi_1$ ,则 $\Delta\phi/\Delta t$ 为正,此时感应电势 $e$ 则为负值,它表示在感应电势作用下,线圈中形成的感应电流所产生的磁通与原磁通方向相反,阻止原磁通增加。当磁通减少时,即 $\phi_2 < \phi_1$ ,则 $\Delta\phi/\Delta t$ 为负,感应电势 $e$ 则为正值,它表示了感应电流产生的磁通与原磁通相同,阻止线圈中原磁通的减少。可见,感应电势 $e$ 与磁通变化率 $\Delta\phi/\Delta t$ 的符号总是相反的。

2. 导线中的感应电势 对于直导线,切割磁力线所产生的感应电势的大小可由实验证明。当导线、磁场及导线的运动方向三者互相垂直时,感应电势与磁场的强弱、导线在磁场中的有效长度及导线的运动速度成正比。即

$$e = Blv \quad (3-3)$$

式中  $e$  —— 导线中的感应电势 (伏) ;

$l$  —— 导线在磁场中的有效长度 (米) ;

$v$  —— 导线运动速度 (米/秒) ;

$B$  —— 磁通密度 (韦/米<sup>2</sup>) .

例3-1 已知磁场的磁通密度为  $0.8$  韦/米<sup>2</sup>，导线的有效长度为  $0.2$ 米，导线在垂直于磁力线的方向上运动的速度是  $5$ 米/秒，求导线中产生感应电势的大小。

解：由式(3-3)求得导线中产生的感应电势为

$$e = Blv = 0.8 \times 0.2 \times 5 = 0.8 \text{伏}$$

例3-2 有一个线圈，匝数为  $600$  匝，如果磁通的变化率为  $0.4$ 韦/秒，磁通是增加的，试求线圈中感应电势的大小。

解：已知  $N = 600$  匝， $\frac{\Delta\phi}{\Delta t} = 0.4$ 韦/秒 故由式(3-2)求得

$$e = -N \frac{\Delta\phi}{\Delta t} = -600 \times 0.4 = -240 \text{伏}$$

因为  $\frac{\Delta\phi}{\Delta t}$  为正，原磁通是增加的，故感应电流产生的磁通应阻止原磁通增加，即与原磁通方向相反，所以感应电势  $e$  为负值。

## 第二节 交流电

目前在工农业生产，国防科研和人民日常生活中广泛应用的是交流电。这是由于交流电的电压可以经变压器进行变换：输电时将电压升高，可减少输电线上的功率损耗和电压降；用电时将电压降低，可保证用电安全，并可降低设备的绝缘要求。此外交流用电设备的造价也比较低，所以目前多使用交流电。由此可见，学习电工基础知识，就应对交流电的性质和规律有比较深入的了解。

为了区分直流电和交流电，可以用示波器观察它们的波

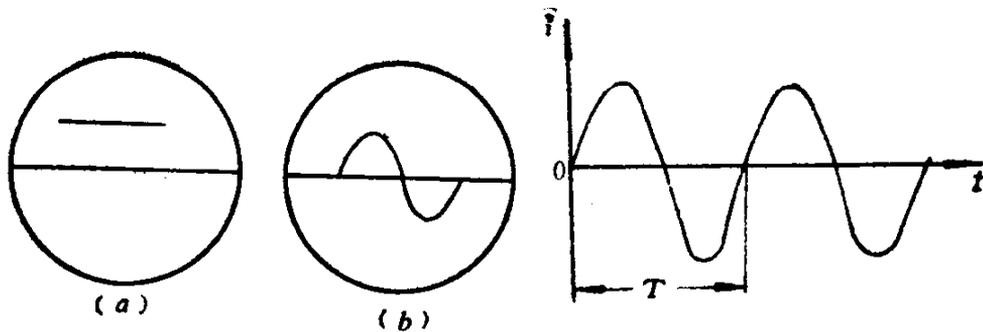


图 3-7 直流电与交流电波形图 图 3-8 正弦交流电波形图  
(a)直流电；(b)交流电

形，如图3-7所示。由此看出直流电的电压和电流的大小与方向不随时间变化，而交流电的电压和电流的大小与方向是随时间变化的。并将按正弦规律变化的交流电，称为正弦交流电。图3-8就是正弦交流电随时间变化的波形图。

#### 一、交流电的周期与频率

由波形图看出，正弦交流电是周期性的，即电流经过一段时间  $T$  后，又重复前面的变化。这种变化是周而复始，循环往复的。我们将完成一个循环所需的时间称周期，用  $T$  表示。周期的单位是秒。

一秒钟内变化的周期数叫做频率，用  $f$  表示。由定义可知频率与周期是互为倒数关系，即

$$f = \frac{1}{T} \quad (3-4)$$

频率的单位是赫芝，简称赫或用  $Hz$  表示。有时也可用千赫或兆赫为单位。

$$1 \text{ 千赫} = 1000 \text{ 赫} = 10^3 \text{ 赫}$$

$$1 \text{ 兆赫} = 1000 \text{ 千赫} = 10^6 \text{ 赫}$$

我国电力工业所用交流电的频率为50赫，称为工频；而无线电技术中用的频率为500千赫~几百兆赫。

## 二、交流的方向

由于交流电是随时间变化的，故将某一瞬间的数值称为瞬时值，并用小写字母  $e$ 、 $u$ 、 $i$  分别表示电势、电压和电流的瞬时值。一般将瞬时值中最大的数值叫最大值，用字母  $E_m$ 、 $U_m$ 、 $I_m$  表示。

在交流电路中，由于电流的大小和方向不断地变化，因此在一个周期内出现两次最大值（一次正的最大，一次负的最大）。交流电中的正负值是表示两者方向是相反的。在图 3-9 中，电流是按正弦规律变化的，在电路图中所标出的箭

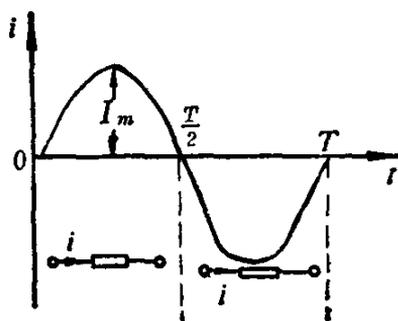


图 3-9 交流电的方向

头并不代表电流的实际方向，我们称之为“参考方向”，当电流的实际方向与参考方向一致时，电流为正值，当电流的实际方向与参考方向相反时，电流就是负值。因此，正负值在电路中只表示方向相反。

## 第三节 正弦交流电的产生

### 一、正弦电势的产生

交流发电机是利用电磁感应的原理将机械能转变为电能的发电设备。图 3-10 是发电机的简单结构图，它是由定子和转子组成。定子有一对磁极，磁极上有线圈，线圈通过直流电，便产生正弦分布的磁场，如图 3-11 所示。在磁极的中心处磁通密度最大为  $B_m$ 。在  $O-O'$  处  $B=0$ ， $O-O'$  平面称为中性面。以中性面为起始位置，磁通密度沿转子表面按正弦规

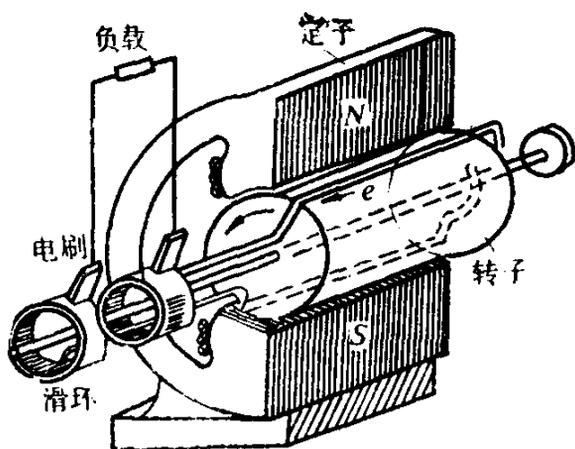


图 3-10 交流发电机结构图

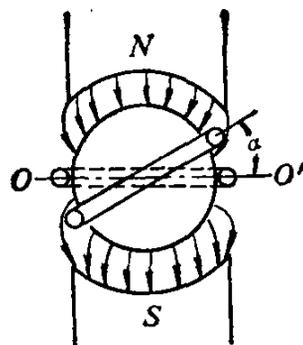


图 3-11 正弦分布的磁场

律分布。即：

$$B = B_m \sin \alpha$$

$\alpha$ 是转子线圈与中性面的夹角（见图3-11），它表示线圈在不同位置时，磁通密度  $B$  的大小也不同。如图 3-10 所示，转子铁芯也绕有线圈，线圈两端分别接在两个滑环上，滑环与轴固定在一起，而且与轴绝缘，滑环上放着静止的电刷。通过电刷、滑环便使线圈与外电路的负载接通。当发电机由原动机（汽轮机或水轮机）带动旋转时，转子线圈切割定子磁场产生正弦感应电势。

## 二、正弦电势的大小

当转子线圈从中性面开始旋转时，线圈中产生感应电势的大小可由式 (3-3) 求出。由图 3-10 可知，一匝线圈两条边所产生的感应电势  $e'$  和  $e''$  大小相等，且互相串联。因此一匝线圈内的感应电势为

$$e_1 = e' + e'' = 2Blv = 2lvB_m \sin \alpha$$

如果一个线圈由  $N$  匝组成，则总电势为

$$e = Ne_1 = 2NlvB_m \sin \alpha = E_m \sin \alpha \quad (3-5)$$

其中  $E_m = 2NlvB_m$ ，为电势的最大值。

由式(3-5)可见， $e$ 的大小随 $\alpha$ 按正弦规律变化。如果转子在 $t$ 时间内转过的角度为 $\alpha$ ，其角速度为 $\omega = \alpha/t$ ，因此感应电势可写为

$$e = E_m \sin \omega t \quad (3-6)$$

式(3-6)说明感应电势是随时间变化的正弦函数。通过上述讨论可知，要产生正弦电势，就需要建立一个按正弦规律分布的磁场。图3-10所示的发电机，定子是建立磁场的磁极，转子是产生感应电势的线圈。实际上大型发电机，定子是线圈(定子线圈产生电势)，转子是磁极，如图5-1所示。两种结构虽不同，但原理相同。

#### 第四节 正弦交流电的相位和参数

##### 一、相位和初相

在式(3-6)中所表示的是线圈开始运动的位置与中性面重合，即以这一点做为计算时间的起点，在 $t = 0$ 时， $e = 0$ 。

如果线圈转动前，并不是停留在中性面上，而是与中性面相距一个 $\psi$ 角，如图3-12所示，那么在 $t = 0$ 时，线圈中产生的感应电势为

$$e = E_m \sin \psi$$

若转子以 $\omega$ 的角速度旋转，经过时间 $t$ 后，转过 $\omega t$ 角度，此时线圈与中性面的夹角为 $(\omega t + \psi)$ ，所以感应电势为

$$e = E_m \sin (\omega t + \psi) \quad (3-7)$$

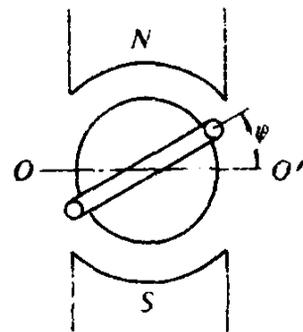


图 3-12 初相角

式(3-7)为正弦电势的一般表示式。也称作瞬时值表达式。

式中  $\omega t + \psi$ ——相位角，简称相位；

$\psi$ ——初相角，简称初相，表示  $t = 0$  时的相位。

但事实上，正弦交流电是连续变化的，并没有肯定的起点和终点，为了便于分析问题起点可任意选择，而且初相与起点的选择有关。

当电压、电流为正弦变化时，其瞬时值的一般表达式为

$$u = U_m \sin(\omega t + \psi_u)$$

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

## 二、正弦量的三要素

从电压、电流的瞬时值表达式可以看出，它们都是按正弦规律周期变化的。因此也将它们称为正弦量。如何来确定一个正弦量呢？从电压瞬时值公式可以看出，按正弦规律变化的交流电有三个要素，即  $U_m$ 、 $\omega$  和  $\psi_u$ 。如果这三个量已知，就可以将一个正弦电压确定下来。

### (一) 最大值

正弦量变化过程中的正弦波形的峰值，即为正弦量的最大值（如  $E_m$ 、 $U_m$  和  $I_m$ ）。如电压  $u = U_m \sin(\omega t + \psi_u)$  中，最大值为  $U_m$ 。

### (二) 角频率

转子是以  $\omega$  的角速度在磁场中旋转的，由图3-11可以看出，转子在磁场中旋转一周，转子线圈转过的角度为  $2\pi$  弧度，所需要的时间就是周期  $T$ 。因此

$$\omega = \frac{2\pi}{T} = 2\pi f \quad (3-8)$$

由上式可见，角速度与交流电的频率成正比。因此，称 $\omega$ 为角频率，它的单位是弧度/秒。

### (三) 初相

初相即为正弦量起始时刻的相位，它与时间起点（ $t = 0$ ）有关。在波形图上，为了避免混乱，规定正半波的起点与坐标原点之间的夹角为初相角。当 $\psi = 0$ 时，正半波起点刚好在原点上，如图 3-13 (a) 所示；当 $\psi > 0$ 时，正半波起点在原点的左边，如图 3-13 (b) 所示；当 $\psi < 0$ 时，正半波起点在原点的右边，如图 3-13 (c) 所示。

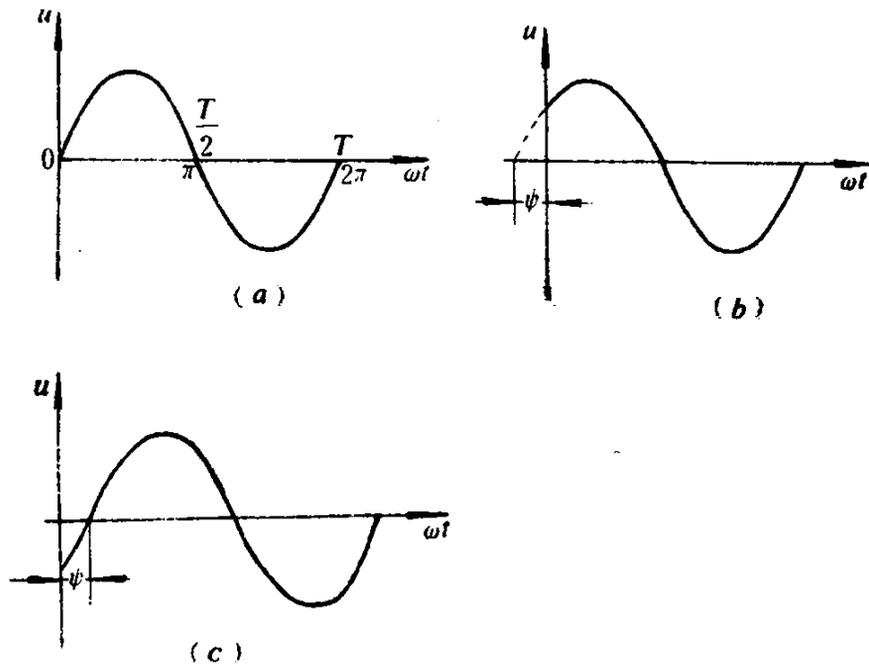


图 3-13 不同初相的波形图  
(a) $\psi = 0$  ; (b) $\psi > 0$  ; (c) $\psi < 0$

### 三、同频率正弦量的相位差

在一台发电机中，常有几个线圈，由于线圈在磁场中的位置不同，因此它们的初相就不同，但是它们的频率是相同的。另外 在同一电路中 电压与电流的频率相同 但往往初相

也是不同的，通常将两个同频率正弦量相位之差叫做相位差。

例如：

$$u_1 = U_{m1} \sin(\omega t + \psi_1)$$

$$u_2 = U_{m2} \sin(\omega t + \psi_2)$$

其相位差为

$$(\omega t + \psi_1) - (\omega t + \psi_2) = \psi_1 - \psi_2$$

可见，同频率正弦量的相位差为初相之差。任何时刻相位差都是不变的。

当两个同频率的正弦量的相位差为零时，称为同相，如图 3-14(a) 所示。当两个同频率正弦量的相位差为  $\frac{\pi}{2}$  时，称为正交，如图 3-14(b) 所示。当两个同频率正弦量的相位差为  $\pi$  时，称反相。如图 3-14(c) 所示。

如果两个同频率正弦量，其中电压  $u$  比电流  $i$  先达到最大值或先经过零值，则称  $u$  超前或叫  $i$  滞后  $u$ 。如图 3-14(d) 所示。

在交流电路的分析中，常需要比较几个同频率正弦量之间的相位关系。因此各正弦量不能各自选择时间起点，应选择某一个正弦量的初相为零做为参考正弦量，其它正弦量的初相可由相位差确定。在研究同一问题中，只能选定一个正弦量做为参考；而不能任意变动。

例 3-3 已知电路中电压  $u = U_m \sin(\omega t + \frac{\pi}{2})$  电流

$i = I_m \sin \omega t$ ，电路的频率为 50 赫芝。试求电压与电流的相位差，并说明超前滞后的关系，指出二者的时间差是多少？

解：已知  $\psi_u = \frac{\pi}{2}$ 、 $\psi_i = 0$ ，由此求得相位差为

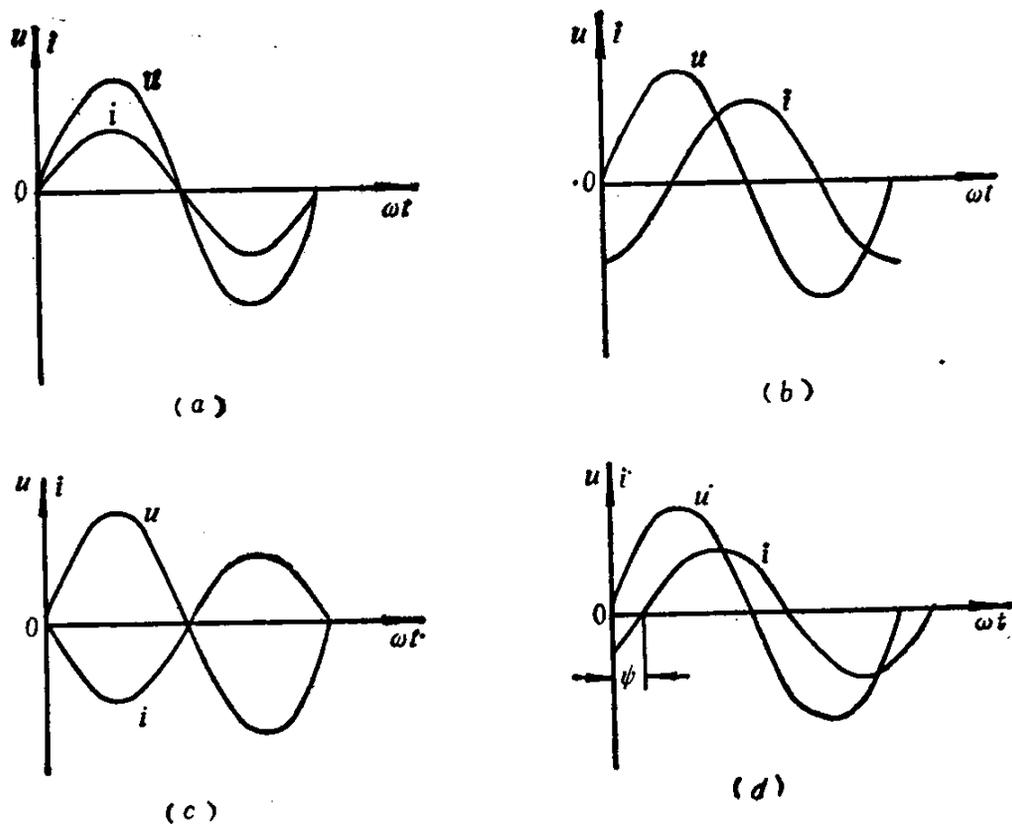


图 3-14 同频率正弦量的相位差  
 (a)  $u$ 、 $i$ 同相；(b)  $u$ 、 $i$ 正交；(c)  $u$ 、 $i$ 反相；(d)  $u$ 超前 $i$

$$\varphi = \psi_u - \psi_i = \frac{\pi}{2}$$

这说明  $u$  超前  $i$   $90^\circ$  角，二者的时间差为

$$t = \frac{\varphi}{\omega} = \frac{\frac{\pi}{2}}{100\pi} = \frac{1}{200} = 0.005 \text{ 秒}$$

即  $u$  经过零值以后，过 0.005 秒， $i$  到达零值。

### 第五节 交流电的有效值

交流电的大小是随时间变化的，不同的时刻有不同的数

值，称为瞬时值。在实际应用中，瞬时值或最大值均不能反映出交流电的真实效果。因此在交流电的计算、测量及实际应用中都采用有效值来表示交流电的大小。

### 一、什么是有效值

如图3-15所示，把两个完全相同的电阻  $R$ ，分别通入直流和交流电源，经过相同的时间，如果它们产生的热量相等，那么就可以说交流与直流对电阻的做功是等效的。人们就把直流电的数值叫做交流电的有效值。

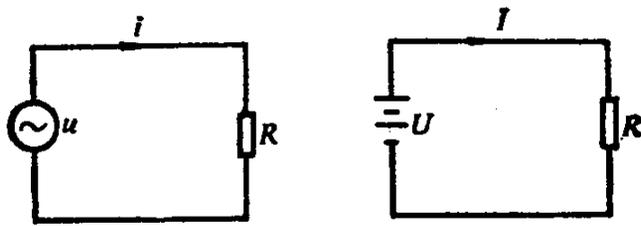


图 3-15 交流与直流作用同一电阻

交流电的有效值常用大写字母来表示，如电压  $U$ 、电流  $I$ 、电势  $E$  等。

### 二、正弦交流电的有效值

根据有效值的定义，通过数学运算可以证明：正弦交流

电有效值是最大值的  $\frac{1}{\sqrt{2}}$  倍，即

$$I = \frac{I_m}{\sqrt{2}} = 0.707I_m \quad (3-9)$$

$$U = \frac{U_m}{\sqrt{2}} = 0.707U_m \quad (3-10)$$

$$E = \frac{E_m}{\sqrt{2}} = 0.707E_m \quad (3-11)$$

有效值应用很普遍，通常所说交流电压、电流的数值，

如不特别加以注明，都是指有效值。例如我们接触到的 220 伏或 380 伏的交流电源，10 安或 20 安的熔断器以及 220 千伏、330 千伏的高压输电线等等都是指有效值。

例 3-4 通过测量得到某电动机的电压为 380 伏，电流为 20 安，试求电压、电流最大值，如果已知电压超前电流  $30^\circ$ ，试写出电压、电流的瞬时值表达式。

解：已知  $U = 380$  伏， $I = 20$  安，由式 (3-10) 和 (3-9) 可得

$$U_m = \sqrt{2} U = \sqrt{2} \times 380 = 537.4 \text{ 伏}$$

$$I_m = \sqrt{2} I = \sqrt{2} \times 20 = 28.2 \text{ 安}$$

如选  $i$  为参考正弦量，则  $u$ 、 $i$  瞬时值的表达式为

$$i = I_m \sin \omega t = 28.2 \sin \omega t$$

$$u = U_m \sin(\omega t + 30^\circ) = 537.4 \sin(\omega t + 30^\circ)$$

## 第六节 正弦量的表示方法

交流电的特点是大小和方向随时间变化，如何正确地表示交流电，这对分析、计算电路很重要。前面我们讲过正弦交流电的三要素，从中看出三要素一旦确定，那么正弦量也就随之而定了，所以表示正弦量，必须要体现三要素。

正弦量有多种表现方法，下面介绍几种常用的表示方法。

### 一、正弦函数式与波形图

1. 正弦函数式 正弦函数式也叫做瞬时值表达式，前面已经讲过。在瞬时值表达式中，均表示出正弦量的最大值、角频率和初相角三个要素，所以它体现了正弦量的特点。

2. 正弦波形图 根据正弦交流电随时间变化的规律，可

逐点在坐标上描出曲线做出波形图，如图 3-16 所示。由图可见，波形图也表示出了三要素。即曲线的高峰为最大值，曲线变化一个循环的时间为一个周期，正半波的起点与原点的夹角表示了初相。

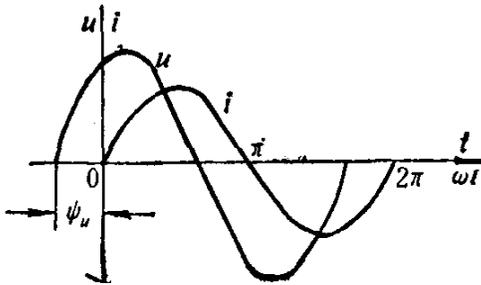


图 3-16 电压、电流波形图

在做波形图时，一般横轴表示时间  $t$  或相位角  $\omega t$ ，纵轴表示电压、电流或电势的瞬时值。为了比较电压和

电流的相位，因而常把电压和电流的波形图画在同一个坐标平面上（如图 3-16）。

## 二、用向量表示正弦量

正弦函数式清楚地体现了交流电的变化规律，当看到一个正弦量的瞬时值表达式后，可立即得出它的三要素。正弦量的波形图很形象地表示出交流电的规律，有几何的直观性。但是分析、计算交流电路时，常要进行电压或电流的加减运算，并可用正弦函数式直接运算，或在波形图上逐点进行加减，但是前者运算麻烦，后者运算不易准确，所以在工程技术中常采用向量表示正弦量。向量的加减运算比较方便的。

在平面直角坐标中以原点为起点画一个电流向量  $I_m$ ，向量的长度等于电流  $i$  的最大值  $I_m$ ，向量的初始位置与横轴的夹角等于  $i$  的初相  $\psi$ 。若  $I_m$  以  $\omega$  为角速度绕原点逆时针旋转，则可看到向量每时刻在纵轴的投影为电流  $i$  的瞬时值。可对应画出波形图，如图 3-17 所示。由此可见，向量  $I_m$  反映了正弦量的三要素，所以它可以用来表示一个正弦量。同理，电压和电势也可以用向量  $U_m$  和  $E_m$  表示。

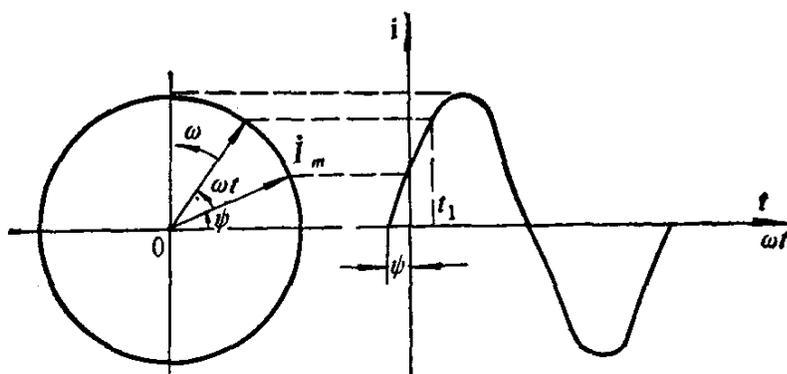


图 3-17 旋转向量表示正弦量

上面所介绍的是最大值向量。在实际中常用的是有效值，所以向量的长度也可用有效值表示，它只比最大值向量小了 $\sqrt{2}$ 倍。电流、电压和电势有效值的向量用 $\dot{I}$ 、 $\dot{U}$ 和 $\dot{E}$ 表示。

几个同频率正弦量用向量表示，可以画在同一个座标上。由于几个正弦量的频率相同，他们之间的相互位置是不变的，即相位差不变，所以同频率正弦量的相位差就是初相之差。因此在画向量时可以只画出每个向量的初始位置即可。为了便于研究，我们常把几个向量画在一起构成向量图。在画向量图时应选择其中一个向量做参考 如图 3-18 中是以 $\dot{U}_1$ 为参考向量，其他向量的位置可由它们与参考向量的相位差决定。

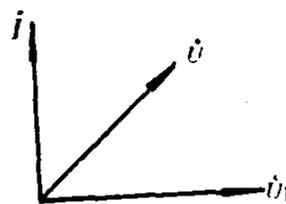


图 3-18 电压、  
电流向量图

向量图在分析、计算电路中和工程上有广泛的应用，可以用它来表示或分析几个同频率正弦量之间的相位和大小关系。而且可以很方便地进行加减运算。向量进行加减运算的方法是平行四边形作图法。如图 3-19(a) 中， $\dot{U} = \dot{U}_1 + \dot{U}_2$ ；

图(b)中,  $\dot{U} = \dot{U}_1 - \dot{U}_2$ 。向量在做减法时可利用加负向量的方法。即

$$\dot{U} = \dot{U}_1 - \dot{U}_2 = \dot{U}_1 + (-\dot{U}_2)$$

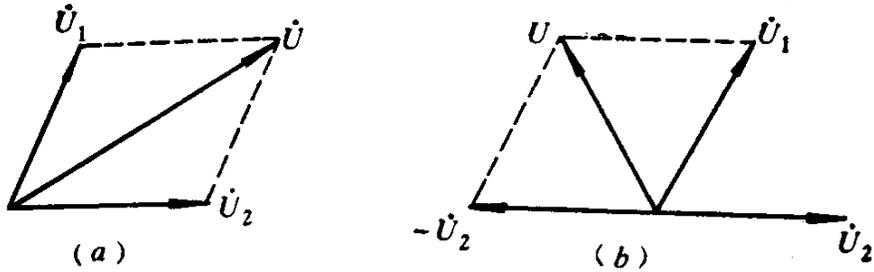


图 3-19 向量的合成  
(a)  $\dot{U}_1 + \dot{U}_2$ ; (b)  $\dot{U}_1 - \dot{U}_2$

以上介绍了三种常用的正弦量表示法,尤其是向量表示方法在进行正弦量的加减运算时很方便,在电路计算中常用来分析几个正弦量的相位关系。在此特别指出的是:由于正弦量之间存在大小和相位关系,所以不能用有效值和最大值直接进行加减运算,因为有效值和最大值没有体现出相位关系。

例3-5 画出  $u_A = 311\sin\omega t$  伏,  $u_B = 311\sin(\omega t - 120^\circ)$  伏和  $u_C = 311\sin(\omega t + 120^\circ)$  伏的向量图。

解:由已知电压最大值  $U_m = 311$  伏,可得有效值  $U = \frac{311}{\sqrt{2}} = 220$  伏。又知各电压的初相角为

$$\psi_A = 0 \quad \psi_B = -120^\circ \quad \psi_C = 120^\circ$$

选  $U_A$  为参考向量,  $U_B$  顺时针旋转  $120^\circ$ ,  $U_C$  逆时针旋转  $120^\circ$ 。所作向量图如图 3-20 所示。

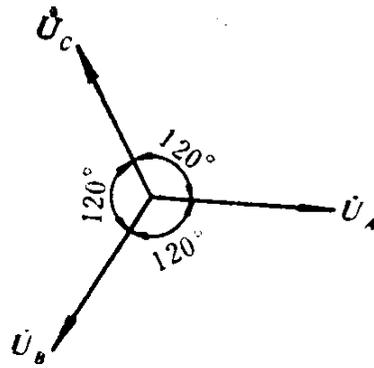


图 3-20 电压向量图

### 思考题与习题

3-1 试比较交流电与直流电的特点，并指出交流电的优点。

3-2 什么是正弦交流电？产生正弦交流电的条件是什么？

3-3 什么是正弦交流电的周期、频率和角频率？并说明三者之间的关系。

3-4 如何判断直导线和线圈中电流产生的磁场方向？

3-5 什么是磁通和磁通密度？

3-6 直导线与线圈产生感应电势的条件是什么？如何判断感应电势的大小与方向？

3-7 什么是正弦交流电的相位、初相和相位差？举例说明同相、超前和滞后。

3-8 什么是交流电的瞬时值、最大值和有效值？电源为380伏的正弦电压其电压最大值为多少？

3-9 何谓正弦量的三要素？

3-10 为什么同频率正弦量相位差为初相之差？初相在

瞬时值表达式、波形图及向量中如何表示？

3-11 什么是向量图？如何进行向量的加减运算？

3-12 试绘出正弦交流  $i_1 = I_m \sin \omega t$  和  $i_2 = I_m \sin\left(\omega t + \frac{\pi}{3}\right)$  的波形图。

3-13 已知  $u = \sqrt{2} \times 100 \sin 314t$  (伏)，电流  $i = \sqrt{2} \times 5 \sin(314t + 30^\circ)$  (安)，试求：

- (1) 电压、电流的有效值和最大值；
- (2) 电压与电流的相位差，并指出哪个超前；
- (3) 电压、电流的频率、周期与角频率。

3-14 在一个铁芯上绕有两个线圈，如图 3-21 所示，试分别指出当线圈 1 的开关 K 闭合和断开的瞬间在线圈 2 中所产生的感应电流的方向。

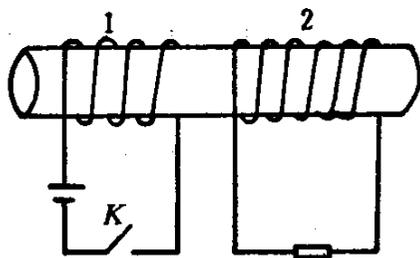


图 3-21

3-15 已知两个交流电压  $u_1 = \sqrt{2} \times 100 \sin 314t$  伏， $u_2 = \sqrt{2} \times 100 \sin\left(314t - \frac{\pi}{2}\right)$  伏，试利用向量图求出  $u_1 + u_2 = u$  的有效值和初相。写出  $u$  的瞬时值表示式，并说明为什么有效值  $U \neq U_1 + U_2$ ，初相  $\psi \neq \psi_1 + \psi_2$ 。

3-16 已知某电路中电压  $u_1 = 20\sin\left(\omega t + \frac{\pi}{6}\right)$  伏,  $u_2 = 10\sin\left(\omega t - \frac{5\pi}{6}\right)$  伏, 电流  $i = 5\sin\left(\omega t - \frac{\pi}{3}\right)$  安。试绘出电压, 电流的向量图, 并指出各正弦量之间的相位关系。

3-17 已知电压  $u = U_m\sin\left(\omega t + \frac{\pi}{6}\right)$ , 当  $t = 0$  时, 电压  $u_t = 220$  伏, 试求电压的最大值  $U_m$ 。

## 第四章 单相交流电路

### 第一节 交流电路的特点及分析方法

在前一章中，我们介绍了正弦交流电的一些特性及其表示方法。对交流电有了初步认识，但是并没有研究交流电路的内在规律。为了进一步讨论交流电路的特点及基本规律，应首先了解交流电路研究的主要问题，以及分析交流电路的基本方法。

#### 一、交流电路研究的主要问题

交流电路所研究的问题基本上与直流电路是相似的，即包括两个方面：

( 1 ) 电路中的电压、电流及元件参数之间的相互关系；

( 2 ) 电路中电源与负载之间的功率关系。

交流电路的上述关系要比直流电路复杂的多。这是因为：交流电压、电流的大小和方向随时间变化，并且存在相位关系；再者交流电路中的元件参数有电阻、电感和电容，而且三种元件上的电压、电流的关系是不相同的。因此，在学习交流电路的基本规律时应抓主要矛盾。由于我们所讨论的都是同频率正弦交流电，所以在研究交流电路时，关键是要掌握电压、电流的有效值关系和相位关系。

在直流电路中，由于只有电阻元件，因此电源只供给电阻功率。而在交流电路中，除电阻外还有电感和电容元件，电阻是消耗电能的元件，而电感和电容只是储存电能，并不消

耗能量。所以交流电路中的功率关系主要是研究：电阻、电感、电容元件和电源的功率大小及特性，还要讨论它们之间的能量交换。

## 二、交流电路的分析方法

分析交流电路的依据仍是电路的欧姆定律和基尔霍夫定律，不过定律中的电压和电流都要用瞬时值或向量表示。

基尔霍夫电流定律是电流连续性原理在电路中的体现，在交流电路中流入电路任一节点的电流瞬时值代数和等于零。即

$$\sum i = 0 \quad (4-1)$$

在同频率正弦交流电路中，基尔霍夫电流定律也可用流向量表示，即

$$\sum I = 0 \quad (4-2)$$

同样，根据能量守恒原理可知，基尔霍夫电压定律也适合于交流电路的情况。在交流电路任一回路中，各电源电势瞬时值的代数和等于其余各元件电压降瞬时值的代数和，即

$$\sum e = \sum u \quad (4-3)$$

在同频率正弦交流电路中可用向量表示为

$$\sum E = \sum U \quad (4-4)$$

在运用定律时特别注意的是：基尔霍夫定律对交流电路的有效值是不适用的，因为有效值没有表示出交流电的相位，因此它不能代表正弦量。

本章在分析和计算交流电路时主要采用向量分析与代数运算相结合的方法。因此掌握正弦量的向量表示方法及分析几个正弦量之间的相位关系，对计算电路是非常重要的。

在交流电路中，由于电压、电流的方向是随时间变化的，所以在分析、计算电路，规定电压、电流的参考方向

时，通常将电压与电流的参考方向规定为一致，即电压与电流方向相同。

## 第二节 纯电阻电路

一个实际的交流电路，如果电路中的电阻起主要作用，其它因素影响很小，就可将这种电路看作是纯电阻电路。如白炽灯、电烙铁、电炉子等都可看作是纯电阻，当把它们接到交流电源时，即组成纯电阻电路，如图 4-1 所示。下面讨论纯电阻电路中电压、电流及功率的关系和它们的变化规律。

### 一、电压、电流的关系

为了便于研究电压、电流的关系，我们首先在图 4-1 电路中规定电压和电流为一致的参考方向。除此以外还需要选择一个参考正弦量。在纯电阻电路中，如选电压为参考正弦

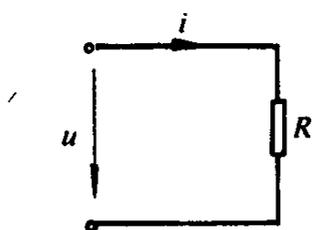


图 4-1 纯电阻电路

量，令初相等于零，则有

$$u = U_m \sin \omega t$$

由于欧姆定律对电阻电路的每一瞬间都成立，因此电阻中的电流为

$$i = \frac{u}{R} = \frac{U_m}{R} \sin \omega t$$

比较电压、电流两式可看出：纯电阻电路中的电压与电流是同频率，同相位的正弦量，其中，电流最大值为

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

两边同除以  $\sqrt{2}$  可得有效值

$$I = \frac{U}{R} \quad (4-5)$$

说明纯电阻电路电压与电流有效值之间符合欧姆定律。

纯电阻电路的电压、电流关系也可用波形图或向量图表示，如图 4-2 所示。

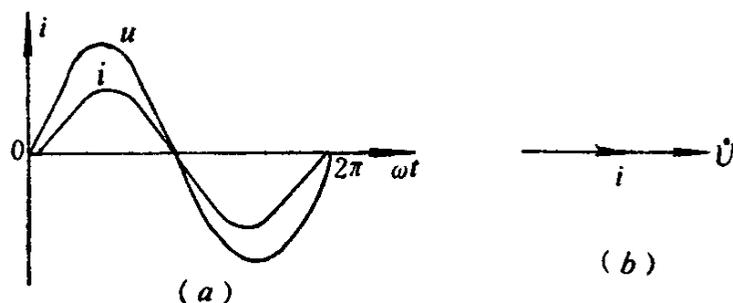


图 4-2 电阻电路电压、电流的波形图及向量图  
(a) 波形图；(b) 向量图

## 二、电路的功率

电阻上任一瞬间电压与电流瞬时值的乘积即为该瞬间电阻所消耗的功率，叫做瞬时功率，用小写字母  $p$  表示：

$$\begin{aligned}
 p &= ui \\
 &= U_m \sin \omega t \cdot I_m \sin \omega t \\
 &= U_m I_m \sin^2 \omega t
 \end{aligned}$$

利用三角变换可将上式变为

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

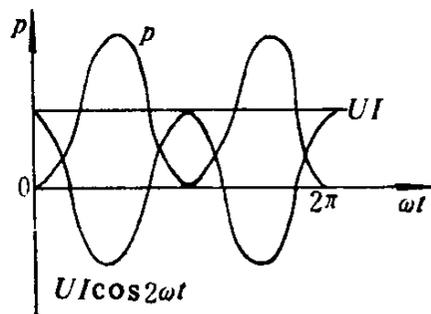


图 4-3 电阻电路瞬时功率曲线图

瞬时功率表明了各瞬间电阻消耗能量的情况。由上式可知，纯电阻电路的瞬时功率由两部分组成：一部分是常数项  $UI$ ，另一部分是两倍电源频率变化的  $UI \cos 2\omega t$ 。由此可做出瞬时功率的曲线，如图 4-3 所示。由功率的曲线图可见，

任一瞬间的功率都为正值，即瞬时功率  $p > 0$ 。这也可由电压、电流波形看出， $u$  与  $i$  始终同方向，根据  $p = ui$  就得知瞬时功率应为正，说明电阻在不断地消耗能量。

由于瞬时功率是随时间变化的，计算起来很不方便，因此实际中都用平均功率表示单位时间内电阻所消耗电能的大小。平均功率是瞬时功率在一个周期内的平均值，用大写字母  $P$  表示。由  $P$  的表达式和曲线图可知：瞬时功率的第一部分  $UI$  是常数，在一个周期内的平均值仍为  $UI$ 。而第二部分  $UI\cos 2\omega t$  是以两倍电源频率变化，在一个周期内的平均值为零。所以电阻电路的平均功率为

$$P = UI = I^2 R = \frac{U^2}{R} \quad (4-6)$$

$P$  的单位仍是瓦特或千瓦。

平常我们讲的功率，如白炽灯的功率是 40 瓦，电炉的功率为 2 千瓦等都是指平均功率。习惯上也将平均功率叫做有功功率，即电路所消耗的功率。

例 4-1 有一盏 220 伏、60 瓦的电灯，接在电压为 220 伏，频率是 50 赫的交流电源上。试求电灯的电流及电阻，并写出电压、电流的瞬时值表达式。

解：已知电灯电压为 220 伏，功率为 60 瓦，因此可由式 (4-6) 求出电流有效值为

$$I = \frac{P}{U} = \frac{60}{220} = 0.273 \text{ 安}$$

由式 (4-5) 可得电灯的电阻为

$$R = \frac{U}{I} = \frac{220}{0.273} = 807 \text{ 欧}$$

电源的频率为 50 赫，其角频率为

$$\omega = 2\pi f = 2\pi \times 50 = 314 \text{ 弧/秒}$$

如以  $u$  为参考正弦量，则有

$$u = \sqrt{2} \times 220 \sin 314t \text{ 伏}$$

$$i = \sqrt{2} \times 0.273 \sin 314t \text{ 安}$$

### 第三节 自感电势和电感线圈

#### 一、自感电势

当把一个电阻很小的线圈接到直流电源上时，发现电路中可通过很大的电流。如果将这线圈接入电压数值相同的交流电源上，结果线圈中的电流要比接在直流电源时小得多。为什么同一个线圈接在电压数值相同的直流和交流电源上，所通过的电流不同呢？这是因为在交流电路中线圈产生自感电势阻碍了电流通过的缘故。

线圈接在直流电源时，由于电流不变，所以它周围的磁场也不变。但在交流电路中，电流随时间变化，因此电流产生的磁场也在变化，由电磁感应定律可知，这个变化的磁场在线圈上要产生感应电势。这个感应电势是由于线圈本身电流变化引起的，故称为自感电势，这种现象叫自感应。

自感电势用  $e_L$  表示，其大小由式 ( 3-3 ) 决定，即

$$e_L = -N \frac{\Delta \phi_L}{\Delta t}$$

式中  $N$  仍为线圈匝数； $\frac{\Delta \phi_L}{\Delta t}$  为每匝线圈自感磁通的变化速率。式中负号是表示自感电势的方向，符合楞次定律。

#### 二、电感

电流通过线圈时，每匝线圈中都有磁通穿过，这个磁通叫做自感磁通，用  $\phi_L$  表示。穿过线圈的自感磁通的总和称为

自感磁链，用  $\psi_L$  表示。

如果线圈内没有铁磁材料，通过实验可知线圈的自感磁链与通过线圈的电流成正比。线圈的磁链与电流的比值叫做线圈的自感系数，简称电感用  $L$  表示。即

$$L = \frac{\psi_L}{i} \quad (4-7)$$

电感  $L$  的单位是亨利，简称亨 ( $H$ )，有时用小单位毫亨 ( $mH$ ) 或微亨 ( $\mu H$ ) 表示。

$$1 \text{ 亨} = 10^3 \text{ 毫亨} = 10^6 \text{ 微亨}$$

电感  $L$  的大小决定线圈的几何尺寸，匝数多少和线圈的性质。空心线圈的  $L$  是常数，而铁芯线圈的  $L$  不是常数，它随电流变化。如交流接触器和日光灯镇流器的电感就不是常数。本章所讨论的电感都认为是常数的情况。

### 三、电感线圈的电压与电流的关系

电感  $L$  是交流电路中的一个电路参数。了解电感线圈中电压与电流的关系，这对分析含有电感  $L$  的交流电路是很有必要的。

由式 (4-7) 可知，当线圈每匝通过相同的磁通  $\phi_L$  时，则  $\psi_L = N\phi_L = Li$ 。故自感电势可由下式表示：

$$e_L = -N \frac{\Delta\phi_L}{\Delta t} = -\frac{\Delta\psi_L}{\Delta t} = -L \frac{\Delta i}{\Delta t} \quad (4-8)$$

上式说明自感电势的大小取决于线圈的电感  $L$  和电流随时间变化的快慢。

在电路中如选择电感上的电压、电流和电势方向都相同，如图 4-4 所示，由基尔霍夫电压定律可知：

$$u_L = -e_L = L \frac{\Delta i}{\Delta t} \quad (4-9)$$

式 (4-9) 中  $u_L$  为电感电压，任一瞬间电感上的电压与

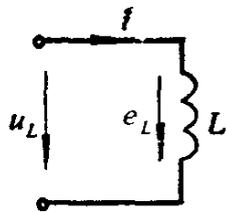


图 4-4 电感上电压、  
电流和电势的方向

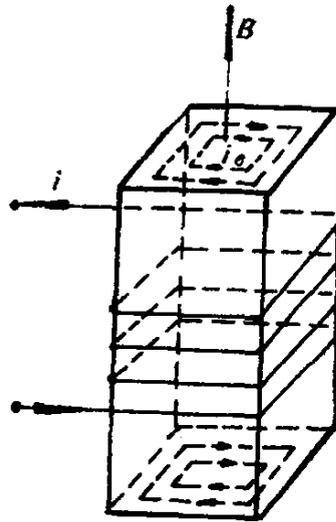


图 4-5 涡流

自感电势 $e_L$ 大小相等而方向是相反的。由于自感电势反抗电流的变化，与电压对电流的作用相反，故称自感反电势。

#### 四、涡流

涡流是电磁感应的一种特殊形式。在有铁芯的线圈中通入交流，铁芯中便产生交变磁通，也要产生感应电势。在此电势的作用下，铁芯中就形成自成回路的电流，称为涡流。如图 4-5 中的 $i_e$ 。涡流的方向可由楞次定律判定。

铁芯通过涡流后要发热，引起能量损耗，叫做涡流损失。由于发热会使铁芯和线圈温度升高，可能将线圈的绝缘烧坏。如变压器、电动机等许多电气设备运行了一段时间就会发热。发热的原因是：由于线圈电阻引起的；是由铁芯中涡流引起的。为了保证设备的正常运行，必须采取散热冷却的措施，如用油或风扇进行冷却等。此外，由于涡流是自感电流，它总是阻止磁通变化的，故涡流还有去磁的作用，使铁芯不能充分利用。

在电机和变压器等有铁芯线圈的设备中，为了减小涡流

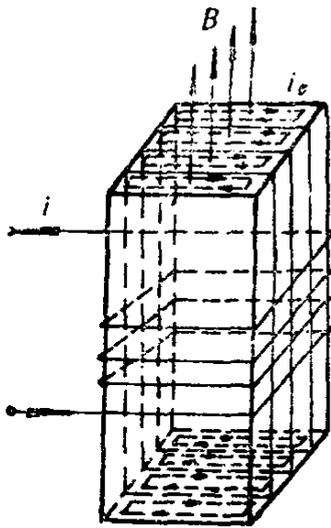


图 4-6 硅钢片叠成的铁芯线圈

带来的不良影响，常采用电阻大，导磁性能好的 0.35~0.5 毫米厚的硅钢片叠成铁芯；而且片与片之间涂有绝缘漆，用来增加涡流路径的电阻，以达到减小涡流的目的，如图 4-6 所示。

由于涡流对电机、变压器等设备是有害的，因此要加以限制。但在某些情况下，还可以利用涡流干燥设备，制造感应式电度表等。

#### 第四节 纯电感电路

电感线圈是电气设备中常见的元件之一。例如变压器、电动机和继电器的绕组等，都是电感元件。一般情况下一个线圈不但有电感  $L$ ，而且也有导线的电阻，如果电阻很小，可以略去不计，那么这种线圈可以看作是纯电感元件。如电力系统限制短路电流的电抗器，收音机中的扼流圈等都可以作为纯电感元件。

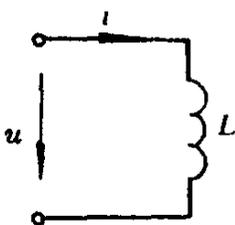


图 4-7 纯电感电路

由纯电感元件组成的电路称为纯电感电路。如图 4-7 所示。

##### 一、电压与电流的关系

在纯电感电路中，电压与电流的关系主要是指有效值之间的大小关系和电压、电流之间的相位关系。

在图4-7电感中通入正弦电流，由上节可知，在线圈中产生自感电势  $e_L$ ，其大小取决电流的变化率  $\frac{\Delta i}{\Delta t}$ ，方向由楞次定律确定。

电感两端的电压由基尔霍夫电压定律可知：电压与电势相平衡。即

$$u = -e_L = L \frac{\Delta i}{\Delta t}$$

由此可见，纯电感电路与电阻电路不同，电感两端的电压瞬时值不是与电流瞬时值成正比，而是与电流变化率成正比。即只有当电路中的电流发生变化时，电感两端才有电压。

如电路中有电流，但电流不变化则电感电压为零。例如电感线圈接在直流电路时不起作用，电感电压等于零，相当于短路。

为了研究问题的方便，我们以电流为参考正弦量，设： $i = I_m \sin \omega t$ ，其波形图如图4-8所示。由电流的波形图来观察电流变化率的规律，从而找出电感电压随电流变化的规律。

在波形图中取不同时刻的三段相同的  $\Delta t$ ，即  $\Delta t_1 = \Delta t_2 = \Delta t_3$ ，对应到波形上可以在纵轴上找到三个不同的  $\Delta i$ ，即  $\Delta i_1$ 、 $\Delta i_2$ 、 $\Delta i_3$ 。比较这三段的变化率，可看出  $\frac{\Delta i_1}{\Delta t_1}$  最大；

$\frac{\Delta i_3}{\Delta t_3}$  最小，几乎为零，当  $\Delta t$  取很小时， $\frac{\Delta i_3}{\Delta t_3} \approx 0$ 。由此可

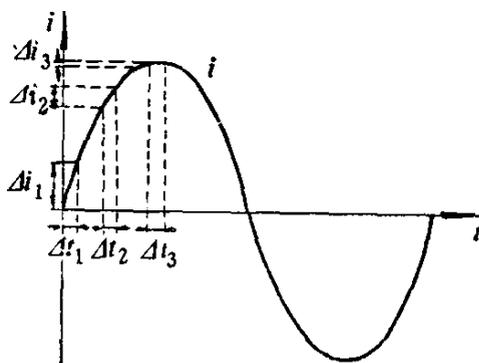


图 4-8 正弦电流的波形分析

见，正弦电流变化率的规律是：电流经过零值时  $\frac{\Delta i}{\Delta t}$  最大，电流到达最大值时  $\frac{\Delta i}{\Delta t} = 0$ ，其他时间介乎这两者之间。当电流由最大值减小时，其变化率的规律与电流增大时是相同的。只是由于  $\Delta i$  为负，故变化率  $\frac{\Delta i}{\Delta t} < 0$ 。

通过上述分析，根据电感电压与电流的变化率成正比的关系可知当电流为零时，电压为最大值，而当电流为最大时，电压为零。而且电流上升时电压为正，电流下降时电压为负。由此可做出电流、电压的波形图。如图 4-9 所示。图中根据电压与电势的平衡关系还画出了电势的波形图。

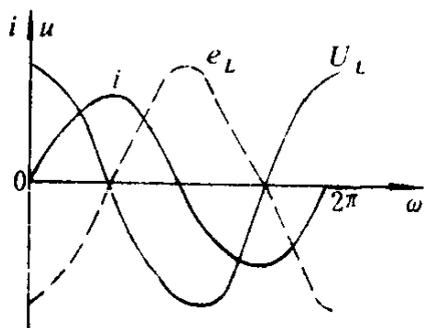


图 4-9 电感电路电压、电流和电势的波形图

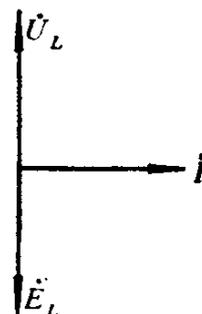


图 4-10 电感电路电压、电流和电势的向量图

从波形图中可以得到电压与电流相位关系的结论如下：纯电感电路的电压、电流都是同频率的正弦量，且电压超前电流  $90^\circ$ ，即  $u = U_m \sin\left(\omega t + \frac{\pi}{2}\right)$ 。由此，可做出向量图，如图 4-10 所示。

以上讨论了电感电压、电流的相位关系。那么电感的电压、电流的大小又存在着什么关系呢？如前所述，当电感线圈通过交流时，电流要受到自感电势的反抗。电流增加时，

自感电势阻碍电流增加；反之，电流减少时，自感电势又反抗电流的减少。因此，电感中的正弦电流要受到自感电势的阻碍，在电路中，为了体现自感电势所产生的这种阻力，采用电感电抗表示。电感电抗简称感抗，用 $X_L$ 表示，它的单位是欧姆。

感抗取决于电流的频率和线圈的电感量，可用下式表示：

$$X_L = \omega L = 2\pi fL \quad (4-10)$$

式中  $f$  —— 频率（赫芝）；

$L$  —— 自感（亨）；

$X_L$  —— 感抗（欧）。

由上式看出，当线圈电感是一定值时，频率越高，感抗愈大。这是因为频率越高，电流变化愈快，自感电势的作用就越强，所以 $X_L$ 就愈大。如果线圈接到直流上，即 $f=0$ ，则 $X_L=0$ ，所以电感在直流电路中不起作用，相当于短路，没有感抗压降。

当把电感元件接在交流电路时，感抗要阻止电流，所以在电感元件上要产生感抗压降。电感电压、电流的有效值与感抗的关系可由欧姆定律表示，即

$$I = \frac{U}{X_L} \quad (4-11)$$

感抗 $X_L$ 的作用与电阻 $R$ 相类似，在外加电压一定的情况下， $X_L$ 愈大则电流愈小。可见 $X_L$ 具有限制电流的作用，所以在交流电路中也常用电感线圈作为限流元件，如日光灯的镇流器，电力系统的电抗器等。

## 二、电路的功率和磁场能量

线圈接通电源后，线圈中有电流通过，在线圈的周围产

生磁场。磁场对铁磁材料有力的作用，说明它具有一定的磁场能量。这种能量是由电源供给的电能转换来的。所以线圈可以把电能转换为磁场能量，并储存在线圈中。通过实验和数学证明，磁场能量  $W_L$ （焦耳）与线圈电感  $L$  及电流  $i$  的平方成正比。即

$$W_L = \frac{1}{2} Li^2 \quad (4-12)$$

当把线圈与电源断开时，储存在线圈中的磁场能量要释放出来。如把电动机的开关切断时，在开关两端产生火花，这就是电动机线圈释放磁场能量所引起的。

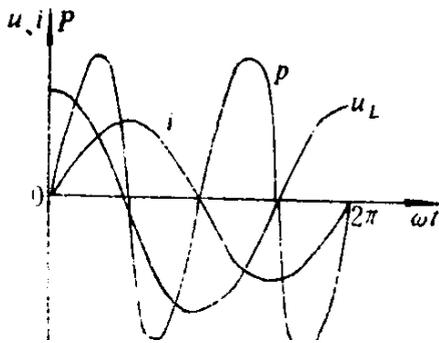


图 4-11 电感电路瞬时功率的波形图

在纯电感电路中，由瞬时功率的定义可知：

$$\begin{aligned} p &= ui = U_m \sin\left(\omega t + \frac{\pi}{2}\right) I_m \sin\omega t \\ &= \frac{1}{2} U_m I_m \sin 2\omega t \\ &= UI \sin 2\omega t \end{aligned}$$

由上式可做出瞬时功率的波形，如图 4-11 所示。瞬时功率

的波形图也可在电压和电流波形图上逐点相乘而得到。由波形图可看出，瞬时功率是两倍电流频率变化的正弦曲线。当电压与电流方向相同时瞬时功率为正。电压与电流方向相反时瞬时功率为负。

由图 4-11 可看出，在一个周期内瞬时功率的平均值为零，即平均功率等于零，说明纯电感电路不消耗能量。所以电感是一种不消耗电能，只是储存电能的元件。

从瞬时功率的波形可看出，在第一个和第三个  $\frac{1}{4}$  周期

内,  $p > 0$  电流  $|i|$  是增加的, 说明电感储存磁场能量, 把电源的能量转换为磁场能量。如图 4-12(a) 所示。在第二个和第四个  $\frac{T}{4}$  内,  $p < 0$ , 电流  $|i|$  是减小的, 说明磁场能量减少, 这时电感中储存的磁场能量又释放出来, 变换为电能返送还电源, 如图 4-12(b) 所示。因此, 纯电感电路只发生能量的交换, 而没有能量的消耗。

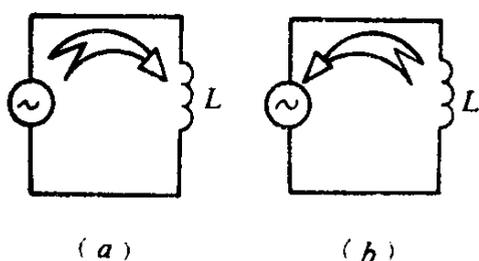


图 4-12 电感与电源之间的能量转换  
(a) 电能  $\rightarrow$  磁场能量; (b) 磁场能  $\rightarrow$  电能

线圈与电源之间的能量交换, 时而大时而小, 为了衡量它们能量交换的大小, 采用瞬时功率的最大值来表示, 称做电感的无功功率, 用  $Q_L$  表示。即

$$Q_L = UI = I^2 X_L = \frac{U^2}{X_L} \quad (4-13)$$

无功功率的单位是乏尔, 简称乏 (Var), 与此对应, 为了表示电阻消耗能量又将平均功率叫做有功功率。

例 4-2 有一电感线圈  $L = 0.7$  亨, 电阻略去不计, 将它接到 220 伏电源上。试求当电源频率为 50 赫和 50 千赫时, 线圈通过的电流。

解: 先求不同频率下的感抗

$$X_{L1} = 2\pi f_1 L = 2\pi \times 50 \times 0.7 \approx 220 \text{ 欧}$$

$$X_{L2} = 2\pi f_2 L = 2\pi \times 50 \times 10^3 \times 0.7$$

$$\approx 220 \times 10^3 = 220 \times 10^3 \text{ 欧}$$

线圈中的电流

$$I_1 = \frac{U}{X_{L1}} = \frac{220}{220} = 1 \text{ 安}$$

$$I_2 = \frac{U_2}{X_{L2}} = \frac{220}{220 \times 10^3}$$

$$= 1 \times 10^{-3} \text{ 安} = 1 \text{ 毫安}$$

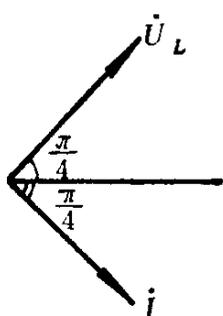


图 4-13 例 4-3 向量图

此例说明，当频率增加时，感抗增大，电流减小，所以电感随频率的增加，限流作用增大。

例 4-3 一个电感  $L = 0.0127$  亨的线圈，电阻略去不计，其端电压为  $u = \sqrt{2} \times 120 \sin\left(314t + \frac{\pi}{4}\right)$  伏，求电流瞬时值的表达式、电感的无功功率并作向量图。

解：由已知电感  $L = 0.0127$  亨求得感抗为

$$X_L = \omega L = 314 \times 0.0127 = 4 \text{ 欧}$$

$$\text{因此线圈电流 } I = \frac{U}{X_L} = \frac{120}{4} = 30 \text{ 安}$$

$$\text{电流初相 } \psi_i = \psi_u - \frac{\pi}{2} = \frac{\pi}{4} - \frac{\pi}{2} = -\frac{\pi}{4}$$

$$\text{电流瞬时值表达式 } i = \sqrt{2} \times 30 \sin\left(314t - \frac{\pi}{4}\right) \text{ 安}$$

$$\text{无功功率 } Q_L = UI = 120 \times 30 = 3600 \text{ 乏} = 3.6 \text{ 千乏}$$

所作向量图，电流滞后电压  $\frac{\pi}{2}$ ，如图 4-13 所示。

## 第五节 电 容 器

在交流电路中电容器也是电路的基本元件：它在电工技

术中应用很广泛，例如在电力系统中，用电容器调整电压，改善功率因数；在电子电路中用电容器隔断直流，并用于滤波等。

### 一、电容器的结构和种类

电容器是由绝缘材料隔开的两块导体组成，图4-14是平板电容器的示意图。被绝缘材料隔开的金属板叫极板，极板上联有电极并与电路相接。绝缘材料可以是空气、纸、云母、油等。电容器的种类很多，其大小、结构也有不同，但构成的原理是一样的。

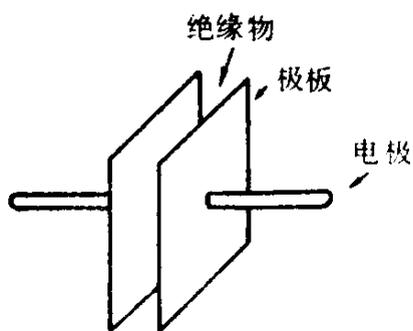


图 4-14 电容器

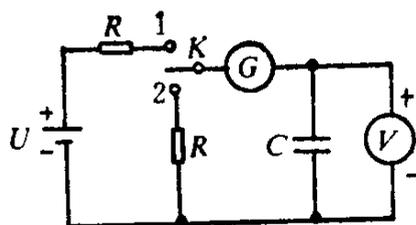


图 4-15 电容器的充放电

电容器除了人为制造的以外，还有自然形成的电容器，例如高压输电线的导线与导线之间或者导线与大地之间形成电容。又如变压器、电动机绕组每匝之间，绕组与外壳之间也形成电容。电容器的电路符号如图4-15中C或表2-1中所示。

### 二、电容器的充放电现象

电容器与直流电源接通时，电容器要进行充电。如图4-15所示，当将开关K合到“1”时，可看到检流计G的读数开始最大，以后逐渐减小到零。与此同时电压表的读数由零逐渐增大到电源电压U。当将K打开后，电压表读数仍为

$U$ ，说明电容器两极板有电场，这电场是由两极板上的正负电荷产生的，这些电荷是由电源供给的。电容器由电源得到电荷的过程叫做充电过程。电容器充电的标志是它有了一定的电压，且电压与充电电流方向一致。

当把充好电的电容器两极短接时，电容器要产生放电现象。如图4-15，将开关“K”由“1”倒向“2”时，可以看到检流计的读数开始最大，以后逐渐减小到零。但检流计指针偏转方向与充电时相反，电压表的读数也是由 $U$ 逐渐减小到零。这说明电容器极板上的电荷逐渐减少，我们把这个过程称为电容器的放电过程。电容器放电的标志是电容器的电压在不断地减小，而且放电电流与电压方向相反。

由上述可知，在电容器与直流电源接通时，电路中有充电电流；当电容器放电时，电路中有放电电流；其它情况下电路中没有电流。这说明电容器不能通过直流，有隔离直流电的作用。如果把电容器接到交流电源上，由于交流电源的电压大小和方向不断变化，使电容器反复地充电和放电，这时电路中就不断有充放电电流，因此认为电容器有通过交流电的作用。

### 三、电容量与电容器的耐压

电容器的基本性能是储存电荷而产生电场。电容器储存电荷的能力常用电容量 $C$ 表示，简称电容，实验证明，一般电容器充电后每一极板的电量 $q$ 与两个极板之间的电压 $u$ 的大小成正比，故将电量 $q$ 与电压 $u$ 的比值称为电容，即

$$C = \frac{q}{u_c} \quad (4-14)$$

式中  $q$  —— 电量（库）；

$u_c$  —— 电压（伏）；

**C**——电容量（法拉）。

电容单位法拉简称法，用  $F$  表示。由于法拉这个单位太大，实际上常用微法（ $\mu F$ ）或皮法（ $PF$ ）作为电容的单位。皮法（ $PF$ ）也称为微微法（ $\mu\mu F$ ）。

$$1 \text{ 微法} = 10^{-6} \text{ 法}$$

$$1 \text{ 皮法} = 10^{-12} \text{ 法}$$

如果加在电容器两个极板间的电压过高，就会使极间绝缘材料击穿，造成电容器的损坏。为了保证电容器正常工作，制造厂对电容器的使用电压有一定的规定。电容器允许使用的最高电压称为电容器的耐压。电容量和耐压是电容器的两个主要技术指标，在工作中选用电容器时，应使二者都满足要求。

#### 四、电容器的电场能量

电容器充电以后，极板上储存了电荷，形成电场，电场是具有能量的，所以电容器充电过程，就是它从电源吸取电能，转变为电场能量的过程。电容器储存电场能量的标志是两极之间存在电压。

电容器将电能转变为电场能量的大小，通过实验或数学推导可由下式确定。

$$W_c = \frac{1}{2} C u_c^2 \quad (4-15)$$

式中  $C$ ——电容（法）；

$u_c$ ——电容器电压（伏）；

$W_c$ ——电场能量（焦耳）。

电容器的充电就是将电源的电能转变为电场能量储存起来；而电容器放电，则是将储存的电场能量再释放出来。所以说电容器是一种储能元件，它与消耗电能的电阻元件有着

根本的区别，而和电感元件相似，都有储存电能的作用。

电容器储能的性质在实际中得到广泛地应用，如发电厂、变电站可利用电容器储存能量来实现某些高压开关的跳闸操作。即在正常情况下，电容器处于充电状态，当发生事故时，使电容器放电，供开关跳闸。

### 五、电容器的电压与电流的关系

电容器在充放电过程中，电路中有电流，也就是有电荷在电路中运动。我们知道在直流电路中，单位时间内通过导体截面的电量即为电流。由于直流电路中的电量  $Q$  不变，故

$$I = \frac{Q}{t}$$

但是，电容器充放电时，电流的大小在每一瞬间都是不同的。即电流是随时间变化的。这时电流应用下式表示

$$i_c = \frac{\Delta q_c}{\Delta t} \quad (4-16)$$

式中  $i_c$ ——充放电的瞬时电流；

$\Delta t$ ——很短的时间间隔；

$\Delta q_c$ ——是在  $\Delta t$  内电荷的变化量。

电容器充放电的标志是电容器电压发生变化，电量与电压的关系可由式 (4-14) 确定，即

$$q = C u_c$$

在电容器充放电过程中电量是变化的，用  $\Delta q$  表示；对应电容器的电压也是变化的，用  $\Delta u_c$  表示。所以上式可表示为

$$\Delta q_c = C \Delta u_c \quad (4-17)$$

将此式代入式 (4-16) 中，可得到电容器的电压与电流的关系：

$$i_c = \frac{\Delta q_c}{\Delta t} = C \frac{\Delta u_c}{\Delta t} \quad (4-18)$$

式(4-18)说明电容器电流的大小与电容电压的变化率成正比。即电容电压变化快，其电流大；电容电压变化慢，则电流小。如果电容电压不变化电流将为零。例如直流电源给电容器充电完毕后，虽然电容器两端有电源电压，但由于直流电压不变化，所以电路中是没有电流的。

由上述分析可知，电容电流的大小取决于电容电压变化的快慢，而不决定于电压的大小。这与电阻元件中电压与电流成正比的关系是完全不相同的。这也是电容元件起隔断直流，通过交流的基本原理。

## 六、电容器的串联与并联

在电路中，电容器同电阻一样有不同联接方式，电容的串联与并联是最常见的。下面讨论这两种联接方式的特点。

### (一) 电容器的串联

图4-16所示为三个电容器的串联电路，当接通电源后，在各电容器极板上带有相等数量的电荷 ( $q_1 = q_2 = q_3 = q$ )。因为从电源得来的电荷  $q$  只能达到和电源直接相连的最外面两极板上，同时在其它极板上将因静电感应而产生相同数量的电荷  $q$ ，所以在电容器的串联电路中通过的电荷量是相同的。

根据基尔霍夫电压定律可知，电源电压为各电容电压之和，即

$$U = U_1 + U_2 + U_3$$

因为 
$$U = \frac{q}{C}, \quad U_1 = \frac{q}{C_1},$$

$$U_2 = \frac{q}{C_2}, \quad U_3 = \frac{q}{C_3}$$

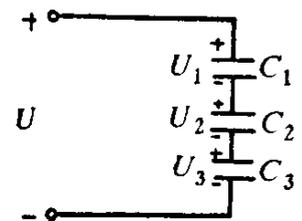


图 4-16 电容器的串联电路

所以 
$$\frac{q}{C} = \frac{q}{C_1} + \frac{q}{C_2} + \frac{q}{C_3}$$

简化后得 
$$\frac{1}{C} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3} \quad (4-19)$$

可见，电容器串联时，其等效电容  $C$  的倒数等于各电容倒数之和，串联的电容器个数越多，等效电容越小，而等效电容的耐压可提高。

### (二) 电容器的并联

电容器的并联电路如图 4-17 所示。电容器并联时各电容上的电压是相同的。如各电容不相同，则每个电容所带的电量也不同。如图中各电容器中的电量为：

$$q_1 = C_1 U; \quad q_2 = C_2 U; \quad q_3 = C_3 U$$

并联电容中总的电量为各电容中电量之和。即

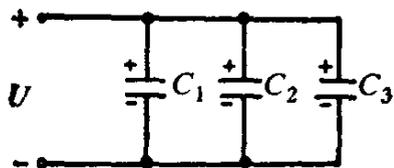


图 4-17 电容的  
并联电路

$$\begin{aligned} q &= q_1 + q_2 + q_3 \\ &= C_1 U + C_2 U + C_3 U \\ &= U(C_1 + C_2 + C_3) \end{aligned}$$

因此，并联的等效电容为

$$C = \frac{q}{U} = C_1 + C_2 + C_3 \quad (4-20)$$

可见，电容器并联时，等效电容为各电容之和。所以并联电容器越多，电容量越大，而耐压不变。在实际工作中常利用电容串并联的特点，来提高电容器的耐压和增加电容量。

## 第六节 纯电容电路

把一个电容器接到交流电源上，就组成一个纯电容电路。如图 4-18 所示。由于交流电压不断地变化，电容器就要不停地充电和放电，所以电路中就有持续的交流电流通过。

这个交流电流就是电容器的充放电电流。下面讨论电容电路的电压与电流的关系及电路的功率与能量。

### 一、电压与电流的关系

在图4-18中，如电源电压为 $u=U_m\sin\omega t$ ，由于电源是交流，所以电路中有电流，其大小由式（4-18）可知，电流与电压的变化率成正比。在纯电感电路中我们知道，正弦波变化率的规律为：曲线经过零值时最大，而曲线到达最大值时为零。电路中电流的方向，在充电时与电压方向相同，放电时与电压方向相反。根据上述原理可作出电流波形图。

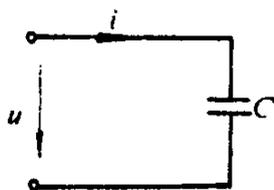


图 4-18 纯电容电路

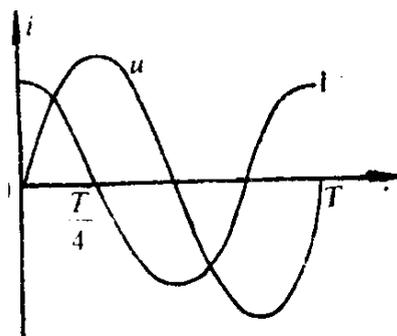


图 4-19 电容电路中电流、电压波形图

在第一个 $\frac{1}{4}$ 周期内，电压由零上升到最大值 $U_m$ 。在此期间电容器充电，电流由最大下降到零，方向与电压相同。

可做出 $i$ 的曲线。在第二个 $\frac{T}{4}$ 内，电压逐渐下降，于是电容器放电，电流与电压方向相反。同理，可做出此期间的曲线。

在第三个 $\frac{T}{4}$ 内，电压反方向增加，电容器反方向充电。

在第四个 $\frac{T}{4}$ 内，电容器反方向放电。所以电流在一个周期内随电压变化的曲线，如图4-19所示。

由电容电路中的电压、电流的波形可看出：纯电容电路的电流与电压是同频率的正弦量，而且电流的相位超前电压 $90^\circ$ 。如电压 $U = U_m \sin \omega t$ ，则电流为 $i = I_m \sin\left(\omega t + \frac{\pi}{2}\right)$ 。可画出电压、电流的向量，如图4-20所示。

以上讨论了电压与电流的相位关系。下面分析电压与电流有效值之间的关系。

在电容电路中由于电容器的充放电作用，在电路中形成电流。电流的大小与电压变化的快慢及电容量大小有关。为了表示电容器在交流电路中对电流的作用，采用电容电抗 $X_C$ 表示。 $X_C$ 简称容抗，单位为欧姆。

容抗的大小，取决于电源的频率和电容器的电容量，用下式表示：

$$X_C = \frac{1}{\omega C} = \frac{1}{2\pi f C} \quad (4-21)$$

式中  $C$  ——电容量（法）；  
 $f$  ——频率（赫）；  
 $X_C$  ——容抗（欧）。

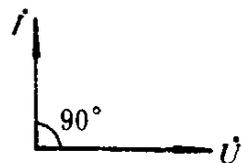


图 4-20 向量图

由式( 4-21 )可见，容抗与频率和电容量成反比。

在正弦电路中，容抗表示了电容阻碍电流的作用。电流在容抗上要产生电容电压降 $u_C$ 。电容压降有效值与电流有效值和容抗的关系可用欧姆定律表示，即

$$I = \frac{U}{X_C} = \omega C U \quad (4-22)$$

$X_C$ 与电阻 $R$ 和电感电路的 $X_L$ 相类似，在外加电压一定的情况下， $X_C$ 越大，电路电流 $I$ 越小。因此， $X_C$ 表明了电容对电流的阻碍作用。

容抗与电容量及电源频率成反比，说明电容  $C$  越大，电容器容纳的电荷越多，充放电电流就越大，故表现为容抗越小。电源频率越高，电压变化速度越快，在一定时间内充放电次数增加，即电路电流越大，故体现为容抗就越小。

在直流情况下，由于直流的频率等于零，故容抗  $X_C = \infty$ ，所以电路中没有电流。而在频率越高的交流电路中， $X_C$  越小，电流就越大。这就是电容器可以通交流，隔断直流的特性。

## 二、电路的功率和能量

由于电容电路的电压、电流是随时间变化的，所以电路的功率也是随时间变化，故电容电路的瞬时功率为

$$\begin{aligned} p &= ui = U_m \sin \omega t \cdot I_m \sin \left( \omega t + \frac{\pi}{2} \right) \\ &= U_m \sin \omega t \cdot I_m \cos \omega t \\ &= \frac{1}{2} U_m I_m \sin 2\omega t = UI \sin 2\omega t \end{aligned}$$

可见，电容电路的瞬时功率为两倍电源频率变化的正弦量，由上式或电压、电流的波形可以作出功率曲线，如图 4-21 所示。

由功率波形可看出，在一个周期内，瞬时功率的平均值等于零，即有功功率  $P = 0$ 。说明电容器是不消耗能量的元件。

从波形图上还可看出，在第一个和第三个  $\frac{1}{4}$  周期内，电压、电流同方向， $p > 0$ ，电容的电压  $|u|$  是增加的，表示电源向电容器充电；这时电容器将从电源获得能量，转变为电场能量储存在电容器中，如图 4-22 (a) 所示。在第二个

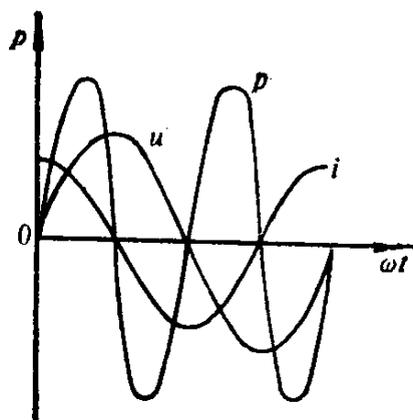


图 4-21 电容电路瞬时功率波形图

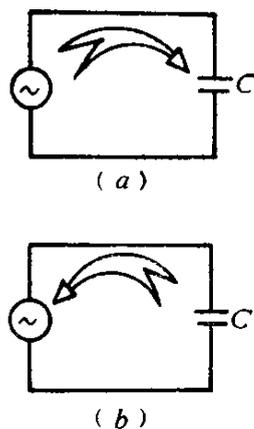


图 4-22 电容器与电源之间的能量转换

(a)电能 → 电场能量； (b)电场能量 → 电能

和第四个  $\frac{T}{4}$  内，电压与电流方向相反， $p < 0$ ，电容电压  $|u|$  是减小的，说明电容器向电源放电，把储存的电场能量释放出来，返还电源，如图 4-22 (b) 所示。

由此可见，电容电路只发生电容器同电源周期性的能量交换，没有能量的消耗。为了衡量能量交换的大小，用电容的无功功率  $Q_c$  表示，无功功率为能量交换过程中，瞬时功率的最大值。即：

$$Q_c = UI = I^2 X_c = \frac{U^2}{X_c} \quad (4-23)$$

$Q_c$  称电容的无功功率，单位是乏尔。它可以体现电容电路中能量交换的情况。

例 4-4 一个电容器的电容  $C$  为 100 微法，接在频率为 50 赫，电压为 220 伏的交流电源上，求电路中的电流。

解：100 微法 =  $100 \times 10^{-6}$  法，由式 (4-21) 可知容抗为

$$X_c = \frac{1}{2\pi fC} = \frac{10^6}{2 \times 3.14 \times 50 \times 100} \approx 31.8 \text{ 欧}$$

电路中电流为

$$I = \frac{U}{X_C} = \frac{220}{31.8} \approx 6.92 \text{安}$$

例 4-5 如例 4-14 中的电容器接于频率为 500 赫，电压为 220 伏的交流电源上，求电路中的电流。若电压的初相为  $\frac{\pi}{6}$ ，试写出电压、电流的瞬时值表达式，并绘出向量图。

解：已知  $f = 500$  赫， $\omega = 2\pi f = 3140$  弧度/秒，故容抗为

$$X_C = \frac{1}{2\pi fC} = \frac{10^6}{2 \times 3.14 \times 500 \times 100} \approx 3.18 \text{欧}$$

电路中电流为

$$I = \frac{U}{X_C} = \frac{220}{3.18} \approx 69.18 \text{安}$$

电压瞬时值表达式为

$$u = \sqrt{2} \times 220 \sin\left(3140t + \frac{\pi}{6}\right) \text{伏}$$

由于电流的初相

$$\psi_i = \psi_u + \frac{\pi}{2} = \frac{\pi}{6} + \frac{\pi}{2} = \frac{2\pi}{3} = 120^\circ$$

由此得电流瞬时值表达式

$$i = \sqrt{2} \times 69.18 \sin\left(3140t + \frac{2\pi}{3}\right) \text{安}$$

电流向量超前电压向量  $\frac{\pi}{2}$ ，如图 4-23 所示。

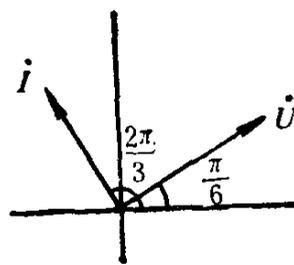


图 4-23 例 4-5 图

## 第七节 电阻、电感、电容的串联电路

前几节我们讨论了电阻、电感、电容单个元件组成的电路，得出了每种元件在正弦电源作用下电压与电流的大小和

相位关系及功率的特点。但在实际中，电路往往是由几种元件所组成。下面介绍电阻、电感和电容串联的电路。

### 一、电压与电流的关系

图4-24所示为 $R$ 、 $L$ 、 $C$ 的串联电路，由于串联电路中各元件通过电流是相同的，所以为了分析方便以电流为参考正弦量。设

$$i = I_m \sin \omega t$$

由三种元件的电压、电流关系可知，电阻上产生一个与电流同相的电压降，即

$$u_R = RI_m \sin \omega t$$

电感电压超前电流  $90^\circ$

$$u_L = X_L I_m \sin \left( \omega t + \frac{\pi}{2} \right)$$

电容电压滞后电流  $90^\circ$

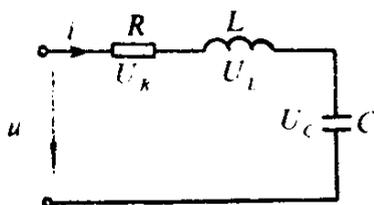


图 4-24 电阻、电感、电容串联电路

$$u_C = X_C I_m \sin \left( \omega t - \frac{\pi}{2} \right)$$

由基尔霍夫电压定律可知电路总电压

$$u = u_R + u_L + u_C \text{ 或用向量表示为 } \dot{U} = \dot{U}_R + \dot{U}_L + \dot{U}_C$$

由于 $u_R$ 、 $u_L$ 和 $u_C$ 都是同频率的正弦量，故可用瞬时值公式或正弦曲线相加求总电压。但是由于三种元件电压不同相，运算很不方便。最简单的方法是利用向量合成。根据三个元件上电压、电流的相位关系可做出向量图，如图4-25所示。图中设 $U_L > U_C$ 。

由向量图可求得电流与总电压有效值之间的关系：

$$\begin{aligned} U &= \sqrt{U_R^2 + (U_L - U_C)^2} \\ &= \sqrt{(RI)^2 + (X_L I - X_C I)^2} \\ &= I \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2} = IZ \quad (4-24) \end{aligned}$$

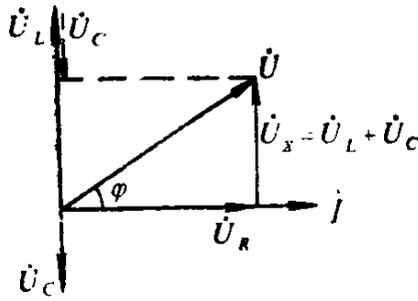


图 4-25 串联电路向量图

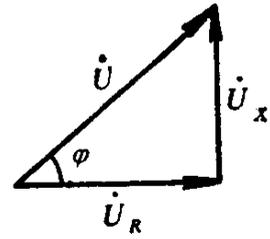


图 4-26 电压三角形

式(4-24)中的  $Z$  有阻止电流的作用，故称阻抗，单位是欧姆。阻抗不仅与  $R$ 、 $L$ 、 $C$  的大小有关，而且还与电源的频率有关。阻抗中的感抗与容抗之差，叫做电路的电抗，用  $X$  表示。电抗与电流的乘积即  $U_X = XI$  称为电抗压降，它表示了电感电压降与电容电压降之差。

向量图中的  $U_R$ 、 $U_X$  与  $U$  三者组成一个直角三角形，清楚地表示了三个电压之间的关系，称为电压三角形，如图 4-26 所示。

将电压三角形每边除以电流  $I$ ，可得到一个由  $R$ 、 $X$  和  $Z$  组成的直角三角形，它表示了电阻、电抗与阻抗三者之间的关系，称为阻抗三角形，如图 4-27 所示。

由向量图或电压三角形可看出，电路电压与电流之间的相位差为  $\varphi$ ，可由任一个三角形求得，即

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{U_X}{U_R} \quad \text{或} \quad \operatorname{tg} \varphi = \frac{X}{R}$$

可表示为反三角函数关系

$$\varphi = \operatorname{arctg} \frac{U_X}{U_R}$$

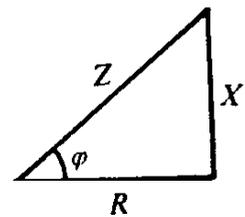


图 4-27 阻抗三角形

$$= \operatorname{arctg} \frac{X}{R} = \psi_u - \psi_i \quad (4-25)$$

$\varphi$  角常称为阻抗角，它反映了电压与电流的相位关系。

$\varphi$ 角的大小与  $R$ 、 $L$ 、 $C$  及频率有关。

计算出  $Z$  与  $\varphi$  后，便确定了电压与电流的关系，由此可写出电压的瞬时值表示式，即

$$\begin{aligned} u &= ZI_m \sin(\omega t + \varphi) \\ &= U_m \sin(\omega t + \varphi) \end{aligned}$$

也可用波形图表示，做出  $i$  与  $u$  的曲线，如图 4-28 所示。

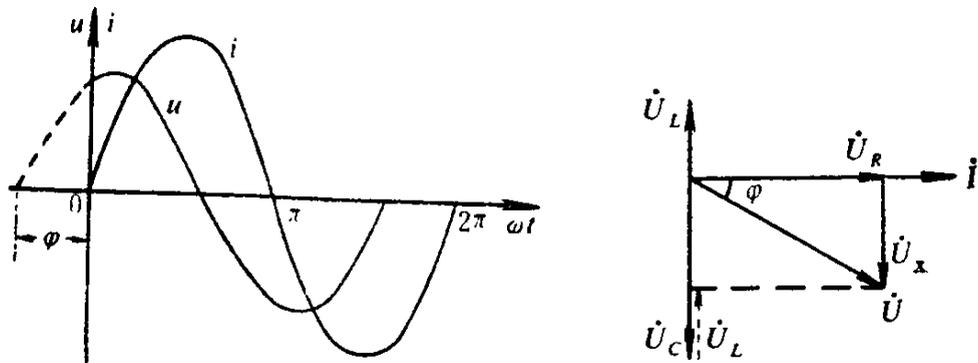


图 4-28 电压、电流波形图 图 4-29 容性电路向量图

以上讨论的是  $U_L > U_C$  的情况，即  $X_L > X_C$ ，这时  $X_L - X_C = X > 0$  故  $\varphi > 0$ ，说明电压超前电流。电路具有电阻电感的性质，因而称为感性电路，如电力系统就为感性电路。

当  $X_L < X_C$  时， $X < 0$ ，故  $\varphi < 0$ ，电感的作用小于电容的作用， $U_L < U_C$ 。这时由图 4-29 的向量图可知电压滞后电流，电路呈现电阻，电容性质，称为容性电路。

## 二、电路的功率

在  $R$ 、 $L$ 、 $C$  串联电路中，将电压与电流瞬时值的乘积称为电路的瞬时功率。即

$$p = ui$$

如设电路  $X_L > X_C$ ，即感性电路。在波形图上将电压与电流的曲线逐点相乘，可得到瞬时功率的曲线，如图 4-30 所示。

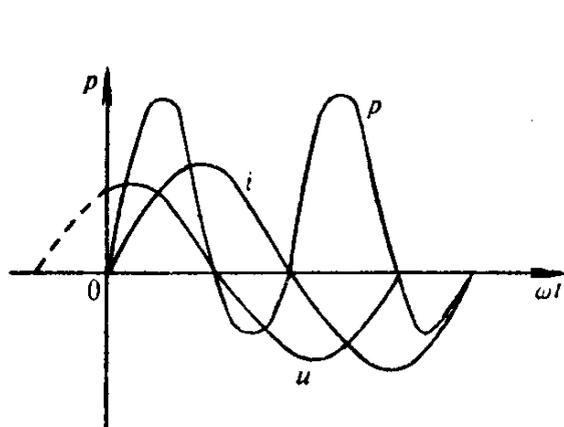


图 4-30 瞬时功率波形图

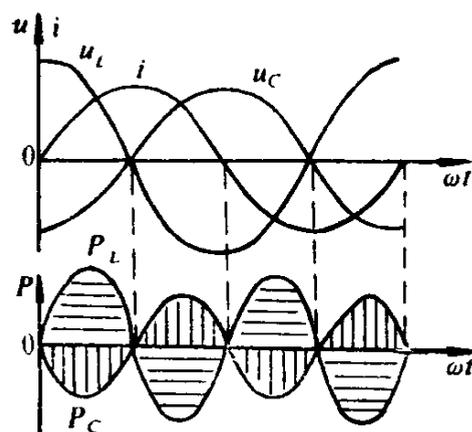


图 4-31 电感电容瞬时功率波形图

由瞬时功率波形图可看出，当  $u$  与  $i$  同方向时， $p > 0$ ，说明负载从电源吸收能量。当  $u$  与  $i$  方向相反时  $p < 0$ ，表示负载释放能量送还电源。但由于电路中有电阻，故吸收的能量总是大于返回电源的能量。

#### (一) 电路的有功功率

在电阻、电感和电容串联电路中，只有电阻是消耗电能的元件，而电感和电容只是进行能量的交换，没有能量的消耗。因此，电路在一个周期内的平均功率就是电阻上所消耗的功率，即：

$$P = U_R I = I^2 R = UI \cos \varphi \quad (4-26)$$

其中  $U_R = U \cos \varphi$  (可由电压三角形求得)

#### (二) 电路的无功功率

电感瞬时功率与电容的瞬时功率曲线如图 4-31 所示。由

于电感电压与电容电压是反相关系，所以它们的瞬时功率也为反相，即  $p_L$  为正时， $p_C$  为负。说明电感储存能量时，正是电容器在释放能量，可见电感与电容之间存在能量交换。也就是说电感无功与电容无功相互补偿。

一般情况下电感与电容的无功功率是不相等的，所以不能做到完全补偿，其余的部分要由电源提供，电源与电路负载间进行能量交换的大小，取决于电感无功与电容无功之差，称为电路的无功功率。即

$$\begin{aligned} Q &= Q_L - Q_C = U_L I - U_C I \\ &= (U_L - U_C) I = U_X I \\ &= I^2 X = UI \sin \varphi \end{aligned} \quad (4-27)$$

其中  $U_X = U \sin \varphi$  （由电压三角形可求得）

$Q$  的单位为乏尔或千乏。 $Q$  是用来表示负载与电源进行能量交换的大小，它等于电路中感性无功与容性无功互相补偿后所剩余的部分。

### （三）电路的视在功率与功率因数

在直流电路中，电压与电流的乘积即为电路的功率。但在交流电路中，一般情况下，电压乘以电流并不等于电路的平均功率。所以将电压有效值与电流有效值的乘积，称为电路的视在功率，单位为伏安（VA）或千伏安（kVA），用  $S$  表示。即

$$S = UI \quad (4-28)$$

将  $S$  代入式（4-26）中，得  $P = S \cos \varphi$ 。由此可见，有功功率为视在功率  $S$  乘以  $\cos \varphi$ 。 $\cos \varphi$  是表示设备发挥能力的一个系数，故称为功率因数，即

$$\cos \varphi = \frac{P}{S} \quad (4-29)$$

由上述  $P$ 、 $Q$ 、 $S$  三式可看出，如将电压三角形每边同乘以电流，就可得到一个由  $P$ 、 $Q$ 、 $S$  组成的直角三角形，叫做功率三角形。如图 4-32 所示。功率三角形表示了  $P$ 、 $Q$ 、 $S$  三者之间的关系，即

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

$$P = S \cos \varphi \quad \varphi = \arctg \frac{Q}{P}$$

其中， $\varphi$  角称为功率因数角，它就是电路的阻抗角；也是电压与电流的相位差角。

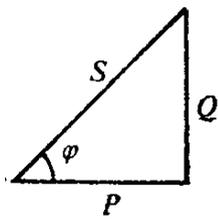


图 4-32 功率三角形

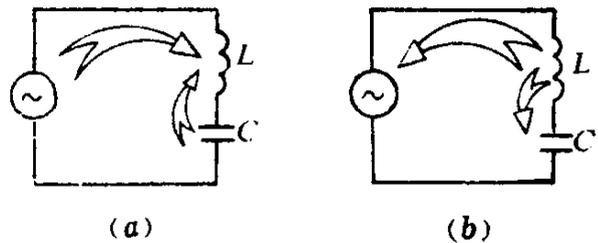


图 4-33 能量转换图

(a) 电感由电容和电源获得能量；

(b) 电感向电容和电源释放能量

### 三、电路的能量交换过程

由图 4-31 可见  $p_L$  与  $p_C$  是反相关系，表示电感与电容之间有能量的交换。

在第一个和第三个  $\frac{1}{4}$  周期内， $p_L > 0$ ，表示电感得到能量。而  $p_C < 0$  表示电容器释放能量。由于电路中的  $Q_L > Q_C$ ，所以在这段时间内，电感从电源及电容器两方面获得电场能量，并转变为磁场能量，储存在电感中。如图 4-33(a) 所示。

在第二和第四个  $\frac{T}{4}$  内， $p_L < 0$ ， $p_C > 0$ ，表示电感将

储存的磁场能量释放出来，一部分返还电源，一部分送还给电容器转变为电场能量，如图4-33(b)所示。

综上所述不难看出，在含有电阻、电感和电容的电路中，电源与电感、电容三者之间存在着能量交换；电感与电容是不消耗能量的，而电阻则要消耗电源的能量。

例4-6 在图4-34的电路中，已知 $R=4$ 欧、 $X_L=9$ 欧、 $X_C=6$ 欧、电源电压 $U=100$ 伏，试求电路中的电流、电压的相位差以及电阻、电感和电容上的电压，并画出向量图。

解：电路电抗

$$X = X_L - X_C = 9 - 6 = 3 \text{ 欧} (X > 0 \text{ 感性})$$

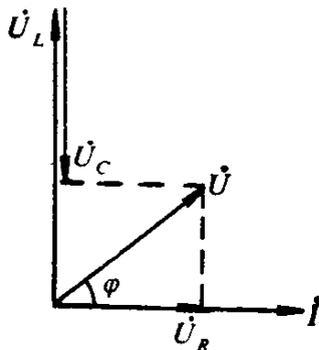
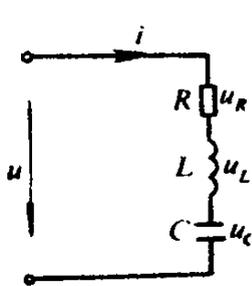


图 4-34 例4-6图      图 4-35 例4-6 电压、电流向量图

电路阻抗

$$Z = \sqrt{R^2 + X^2} = \sqrt{4^2 + 3^2} = 5 \text{ 欧}$$

电路中电流

$$I = \frac{U}{Z} = \frac{100}{5} = 20 \text{ 安}$$

电压、电流相位差

$$\varphi = \arctg \frac{X}{R} = \arctg \frac{3}{4} = 36.9^\circ$$

因为 $X_L > X_C$ ，电路为感性，故电压超前电流 $36.9^\circ$

电阻电压

$$\bar{U}_R = IR = 20 \times 4 = 80 \text{伏}$$

电感电压

$$U_L = IX_L = 20 \times 9 = 180 \text{伏}$$

电容电压

$$U_C = IX_C = 20 \times 6 = 120 \text{伏}$$

电压、电流的向量图，如图 4-35 所示（以电流为参考向量）。

例 4-7 一台单相电动机由 220 伏电源供电，电路中的电流是 11 安， $\cos\varphi = 0.83$ ，试求电动机的视在功率、有功功率和无功功率。

解：视在功率为

$$S = UI = 220 \times 11 = 2420 \text{伏安} = 2.42 \text{千伏安}$$

有功功率

$$P = S\cos\varphi = 2420 \times 0.83 = 2008 \text{瓦} \approx 2 \text{千瓦}$$

由  $\cos\varphi = 0.83$  可求知  $\varphi = 34^\circ$ ， $\sin\varphi = 0.56$ 。

无功功率

$$Q = S\sin\varphi = 2420 \times 0.56 = 1355 \text{乏} = 1.335 \text{千乏}$$

## 第八节 并联电路与功率因数的提高

前面所讨论的电路是无分支的串联电路，在实际中常会遇到许多有分支的并联电路。例如电力系统的大多数负荷是感应电动机，它的功率因数较低。为了提高电力系统的功率因数，常在负荷端并联电容器。又如单相电动机的电容起动电路以及电子电路中的选频电路与中频放大电路等等都是具有电阻的电感线圈与电容并联的电路。

### 一、并联电路的电压、电流与功率

图 4-36 所示，为电阻与电感串联后再与电容并联的电路。设外加电压为  $u$ ，则在  $R-L$  支路中产生的电流  $i_1$  的有效值为

$$I_1 = \frac{U}{Z_1} = \frac{U}{\sqrt{R^2 + (\omega L)^2}}$$

电流  $i_1$  滞后  $u$  的角度为

$$\varphi_1 = \arctg \frac{\omega L}{R}$$

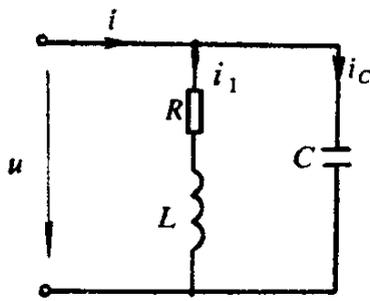


图 4-36 并联电路

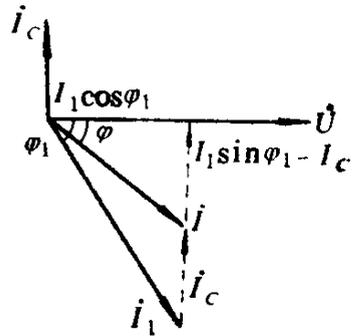


图 4-37 并联电路向量图

电容与  $R-L$  支路并联，其所加电压也为  $u$ ，电容支路的电流有效值为

$$I_c = \frac{U}{X_c} = \omega C U$$

电流  $I_c$  超前  $U 90^\circ$ ，向量图如图 4-37 所示。

根据基尔霍夫电流定律可知电路中总电流为

$$i = i_1 + i_c$$

也可用电流向量表示为

$$I = I_1 + I_c$$

由向量图上可求得  $i$  的有效值即

$$I = \sqrt{(I_1 \cos \varphi_1)^2 + (I_1 \sin \varphi_1 - I_c)^2} \quad (4-30)$$

其中， $I_1 \cos \varphi_1$  是  $I_1$  在  $\dot{U}$  上的投影，它与  $\dot{U}$  同相，具有电阻电流的性质，故称为电流的有功分量。

$I_1 \sin \varphi_1$  是  $\dot{I}_1$  在纵轴上的投影，它滞后电压  $U$   $90^\circ$ ，具有电感电流的性质。而电容电流  $\dot{I}_C$  与电感电流反相，二者互相补偿。将  $I_1 \sin \varphi_1 - I_C$  称为电流的无功分量。

由向量图可见， $I_1 \cos \varphi_1$ ， $I_1 \sin \varphi_1 - I_C$  与  $I$  构成直角三角形，常称为电流三角形。由三角形可求得总电流与电压的相位差。即

$$\varphi = \arctg \frac{I_1 \sin \varphi_1 - I_C}{I_1 \cos \varphi_1} \quad (4-31)$$

由式(4-31)可看出当  $I_1 \sin \varphi_1 > I_C$  时， $\varphi > 0$ ，为感性电路，如  $I_1 \sin \varphi_1 < I_C$  时则  $\varphi < 0$ ，为容性电路。

与串联电路相类似，并联电路的有功功率为电阻上消耗的功率。即

$$P = I_1^2 R = UI_1 \cos \varphi_1 = UI \cos \varphi$$

电路的无功功率为

$$Q = UI \sin \varphi$$

电路的视在功率

$$S = UI$$

## 二、功率因数的提高

通常功率因数  $\cos \varphi$  在  $0 \sim 1$  之间变化，电力系统的负荷大多数是感应电动机，在正常运行时， $\cos \varphi$  一般在  $0.7 \sim 0.85$  之间。但电动机在空载时功率因数只有  $0.2 \sim 0.3$ ，轻载时，功率因数也不高，这样使得电力系统的功率因数就不够高。因此，在实际中应设法提高功率因数。

### (一) 提高功率因数的意义

(1) 发电机的额定电压，额定电流是一定的，发电机

的容量即为它的视在功率。如果发电机在额定容量下运行，则发电机输出功率的大小取决于负载的功率因数。例如一台发电机的额定容量是117兆伏安，当负载功率因数为0.85时可输出100兆瓦的功率。而当负荷功率因数下降到0.5时，发电机只能输出58.5兆瓦。显然发电机的容量没有充分地利用。

(2) 功率因数过低时，在输电线路上将引起较大的电压降和功率损失。

在电压和线路输送的有功功率一定的情况下，根据  $I = \frac{P}{U \cos\varphi}$  可知线路电流与功率因数成反比。如  $\cos\varphi$  越高，电流越小。反之  $\cos\varphi$  越低，电流越大。由于线路上都有一定的电阻和电抗，电流越大，在线路上产生的电压降也就越大，因而使得负载端的电压随之降低。严重时要影响用电设备的正常运行。

此外，由于线路具有一定的电阻，电流增大后，在电阻上消耗的功率  $I^2 R$  也增大，造成电能的浪费。因此提高  $\cos\varphi$  可以减少电能在输电线路上的损耗。例如220千伏高压输电线上输送有功功率为100兆瓦，如供电电路的功率因数是0.6，每根输电线上的电流是438安培。如每根输电线的电阻是10欧，损失功率为1920千瓦。高压输电线都是三根，所以线路总损失功率为5760千瓦。如将电路的功率因数提高到0.9，线路电流减小到292安培。线路损失功率也减为2558千瓦。线路提高功率因数后每年可节约电能2768万度。可见功率因数在电力系统中有重大的经济意义。所以应努力提高电网的功率因数。

## (二) 提高功率因数的方法

提高功率因数的方法，首先是用户应合理选择和使用电

气设备。如感应式电动机的功率因数随所带的机械负载的大小而变，所以应该满载运行，避免空载或轻载运行。其次可在用户端安装补偿装置（如同步补偿器和电力电容器）。当采用电容补偿时可将电容器并联在负载的两端如图4-36所示。其原理由图4-37的向量分析可知，并联电容器以后，电容的无功可补偿负载的电感无功，使电路总无功功率减少，因而提高了电路的功率因数。并联电容器是供电部门常用来提高功率因数的一种方法。

### 思考题与习题

4-1 纯电阻电路的电压与电流相位差多少？

4-2 纯电感和纯电容电路中，电压与电流的相位差各是多少？如果把一个电感与一个电容并联接在正弦交流电源上，试画出电压、电流的波形图和向量图。

4-3 什么叫感抗、容抗和阻抗？它们的单位是什么？它们的大小与哪些因素有关？

4-4 什么叫有功功率、无功功率和视在功率？三者单位是什么？三者关系如何确定？

4-5 什么叫功率因数？其大小决定于什么？电路功率因数过低是什么原因造成的？为什么要提高功率因数？

4-6 为什么说电感在直流电路相当短路，而电容在直流电路相当开路？

4-7 试求3微法的电容器在50赫和1000赫交流电源下的容抗。

4-8 试求图4-38所示各交流电路中电流表的读数。

4-9 电感为0.1亨利的线圈，接到工频电压220伏电源

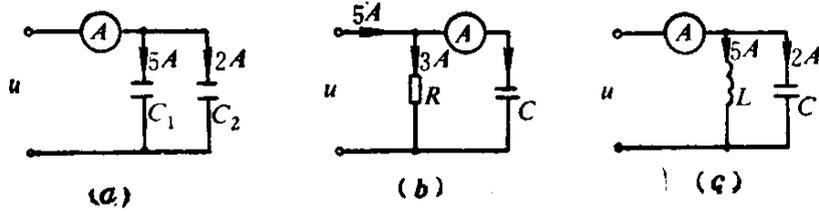


图 4-38

上，试求通过线圈的电流？

4-10 10微法的电容器，接到工频电压为 100 伏电源上，求电容器电路中的电流。

4-11 一个 5 欧电阻与一个 31.8 毫亨的电感线圈串联，接到频率为 50 赫，电压为 100 伏的交流电源上，试求串联电路中的电流。

4-12 已知一个  $R-L$  串联电路，其电阻和感抗均为 10 欧，试求当在电路上加 100 伏交流电压时，电流的大小及电流与电压的相位差。

4-13 用直流压降法测定某一线圈的电阻为 8 欧，然后用频率为 50 赫的交流测定阻抗为 12 欧，求此线圈的电感。

4-14 一个电容的容抗为 6 欧，与一个 8 欧的电阻串联，通过电流为 5 安，试求电源电压。

4-15 试求图 4-39 所示各电路中电压表  $V$  的读数。

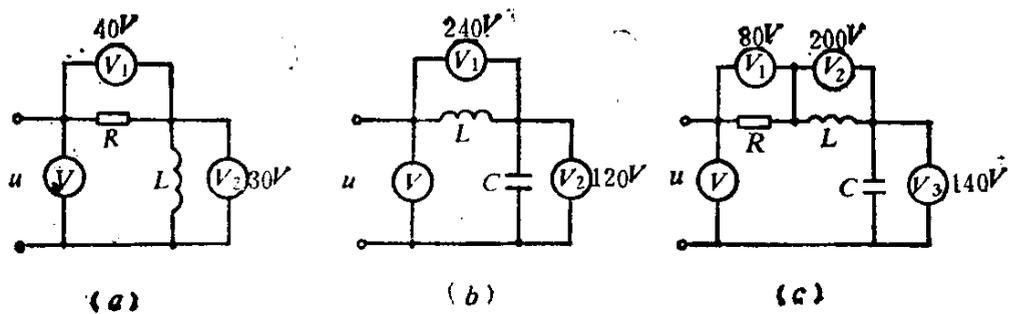


图 4-39

4-16 已知  $R-L-C$  串联电路，其  $R = 2$  欧， $X_L = 170$  欧， $X_C = 165$  欧，试求电路的阻抗及阻抗角。

4-17 一台单相电动机  $U = 220$  伏、 $I = 3$  安、 $\cos\varphi = 0.8$ ，试求其视在功率、有功功率和无功功率。

4-18 已知电源电压为 220 伏的电路，电路的电流为 10 安，消耗的功率为 1.5 千瓦，试求电路的功率因数。

4-19 有一盏 40 瓦的日光灯， $U = 220$  伏、 $\cos\varphi = 0.443$ ，为了提高它的功率因数，并联电容  $C = 4175$  微法，试求并联前后电路的总电流和功率因数。

## 第五章 三相交流电路

### 第一节 三相交流电势的产生

三相交流电是由三相交流发电机产生的。由于三相发电机、变压器、电动机比单相电机节省材料，性能可靠；而且三相输电比单相输电要优越，在传输功率相同的情况下，三相输电线可节省25%的有色金属；所以三相制得到了广泛地应用。目前的电力系统都是三相系统。所谓三相系统就是由三个频率和有效值都相同，而相位互差 $120^\circ$ 的正弦电势组成的供电体系。

在前面章节中曾介绍过单相交流发电机的结构，它只有

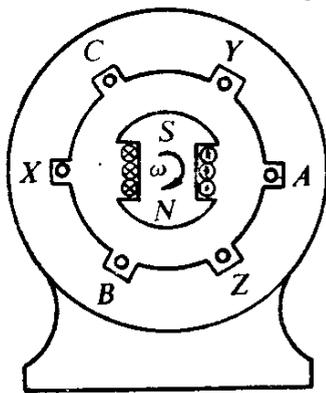


图 5-1 三相发电机示意图

一个绕组产生电势。三相交流发电机是在单相发电机的基础上发展而来的，如图 5-1 所示，它仍然是由定子和转子两部分组成。转子是磁极，定子上有三个独立而完全一样的绕组（ $A-X$ 、 $B-Y$ 、 $C-Z$ ），每一绕组称为一相。三相绕组的始端  $A$ 、 $B$ 、 $C$  彼此相差 $120^\circ$ ，它们的终端  $X$ 、 $Y$ 、 $Z$  也互相差 $120^\circ$ 。

当转子由原动机带动以  $\omega$  角速度作匀速旋转时，每一绕组都产生按正弦变化的感应电势。由于三相绕组的结构是相同的，只是位置彼此相隔 $120^\circ$ ，因此每相绕组产生的感应电

势最大值和频率都相同，只是相位上互差  $120^\circ$ 。最大值相等，频率相同，相位互差  $120^\circ$  的三相电势称为对称三相交流电势。其波形图和向量图如图 5-2 (a)、(b) 所示。图中都是以 A 相电势为参考。

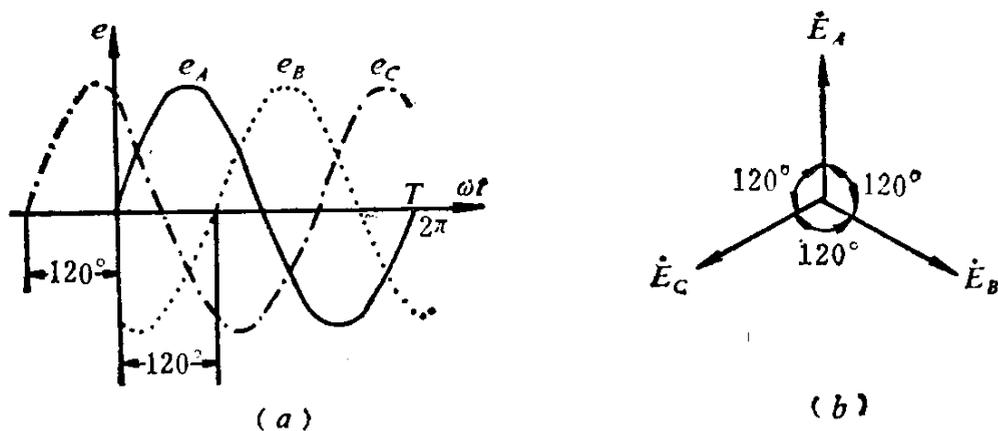


图 5-2 三相电势的波形图和向量图  
(a)波形图；(b)向量图

对称三相交流电势用瞬时值公式表示为

$$\left. \begin{aligned} e_A &= E_m \sin \omega t \\ e_B &= E_m \sin(\omega t - 120^\circ) \\ e_C &= E_m \sin(\omega t - 240^\circ) = E_m \sin(\omega t + 120^\circ) \end{aligned} \right\} \quad (5-1)$$

三相电势达到最大值的先后次序叫做相序。以上三相电势的相序为  $A-B-C$ ，称为正序。如任意两相对调后则称负序，如  $C-B-A$ 。在发电厂中，三相母线的相序是用颜色表示的，规定用黄色表示 A 相，绿色表示 B 相，红色表示 C 相。

一台三相发电机，相当于三个电源，它的供电方式有两种。一种是直接由每一相绕组单独供电，如图 5-3 所示。由于这种供电方式需要六根导线，既复杂又不经济，因此实际

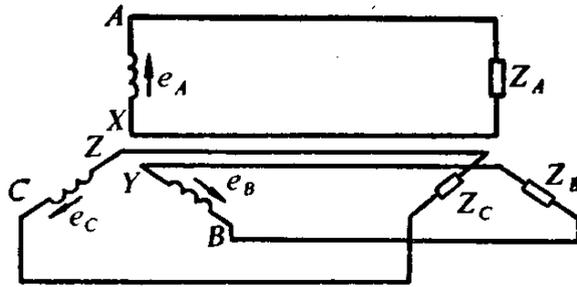


图 5-3 三相单独供电

中不采用。另一种方式是把三相适当地连接起来，可连接成星形或三角形，如图 5-4 所示。由于这种供电方式优点多，还可减少 2~3 根导线，因此实际工程中广泛采用这种连接供电。

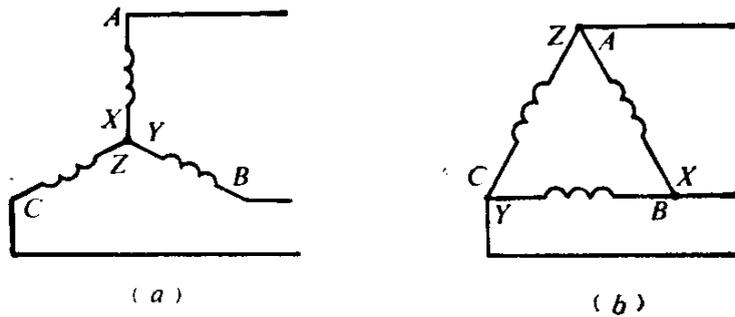


图 5-4 连接供电  
(a)星形；(b)三角形

## 第二节 三相电源的接法

作为三相电源的发电机或三相变压器都有三个绕组，在向负载供电时三相绕组通常是接成星形或三角形，下面讨论这两种连接方式供电的特点。

### 一、电源的星形连接

将电源的三相绕组的末端 X、Y、Z 连成一节点，而始

端  $A$ 、 $B$ 、 $C$  分别用导线引出接到负载，这种连接方式叫做星形连接，或称  $\gamma$  连接，如图 5-5 所示。

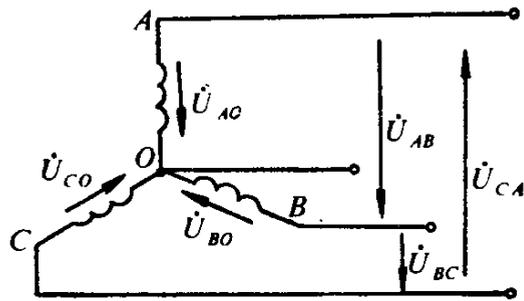


图 5-5 电源的星形连接

三相绕组末端所联成的公共点叫做电源的中性点，简称中点，在电路中用  $O$  表示。有些电源从中性点引出一根导线，叫做中性线或称零线。当中性线接地时，又叫地线。

从绕组始端  $A$ 、 $B$ 、 $C$  引出的三根导线称为端线，通常也叫火线。

由三根火线和一根零线所组成的供电方式叫做三相四线制，常用于低压配电。星形连接的电源，也可不引出中性线，由三根火线供电，称为三相三线制，多用于高压输电。如发电厂的母线和每回输电线都是三相三线制。而一般厂矿、农村的低压线路都是三相四线制。

在星形连接的电源中可以获得两种电压，即相电压和线电压。

相电压为每相绕组两端的电压，即火线与零线之间的电压。如图 5-5 中的  $U_{AO}$ 、 $U_{BO}$ 、 $U_{CO}$ ，它们分别表示  $A$ 、 $B$ 、 $C$  相的相电压向量，为了简单也常表示为  $U_A$ 、 $U_B$ 、 $U_C$ 。一般三相电源是对称的，所以相电压也是对称的，这时相电压的有效值都相等，可用  $U_{\text{相}}$  表示。

线电压为线路上任意两火线之间的电压。如图 5-5 中  $U_{AB}$ 、 $U_{BC}$ 、 $U_{CA}$  向量，分别表示  $AB$ 、 $BC$ 、 $CA$  间的线电压。线电压的有效值可用  $U_{\text{线}}$  表示。

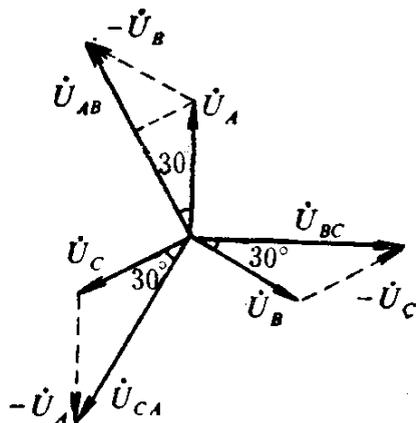


图 5-6 三相电压向量图

根据基尔霍夫电压定律可知线电压为对应的相电压向量之差。在图 5-5 中的线电压与相电压的关系可用电压向量表示（见图 5-6），即

$$\left. \begin{aligned} \dot{U}_{AB} &= \dot{U}_A - \dot{U}_B \\ \dot{U}_{BC} &= \dot{U}_B - \dot{U}_C \\ \dot{U}_{CA} &= \dot{U}_C - \dot{U}_A \end{aligned} \right\} \quad (5-2)$$

可见，在三相对称的情况下，可利用相电压的向量相减求出线电压如图 5-6 所示。由向量图利用几何关系可求得：

$$U_{AB} = 2 \cdot U_A \cos 30^\circ = \sqrt{3} U_A$$

而  $\dot{U}_{AB}$  的相位是超前  $\dot{U}_A$   $30^\circ$ 。同理可得：

$$U_{BC} = \sqrt{3} U_B$$

$$U_{CA} = \sqrt{3} U_C$$

用一般公式表示为

$$U_{\text{线}} = \sqrt{3} U_{\text{相}} \quad (5-3)$$

因此，对称三相电源星形连接时，线电压是相电压的  $\sqrt{3}$  倍，且线电压相位超前相电压  $30^\circ$ 。

在平时所指发电机或线路的电压都是线电压。如 220 千伏的高压输电线路，是指线电压为 220 千伏。在日常用电系统都采用三相四线制，因为这种系统有两种电压，用起来很方便。通常三相四线制的电压为 380/220 伏，即线电压是 380 伏，相电压为 220 伏。这种系统既可作为三相负载的电源，

也可给单相负载供电，如我们用来照明的电灯就是接在一根火线与零线之间的。

## 二、电源的三角形连接

将三相电源的绕组，依次首尾相连构成闭合回路，再以首端  $A$ 、 $B$ 、 $C$  引出导线接至负载，这种连接方式叫做三角形连接，或称为  $\Delta$  连接。如图 5-7 所示。

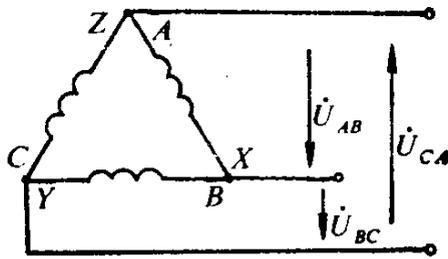


图 5-7 电源的三角形连接

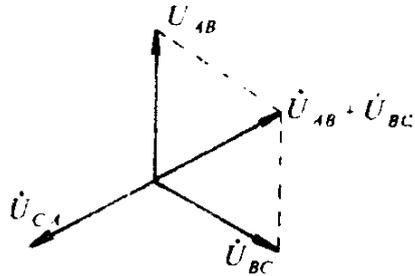


图 5-8 三相电压向量图

三角形连接的供电方式为三相三线制（如图 5-7），源为三角形连接时，线电压等于相电压。即

$$U_{\text{线}} = U_{\text{相}} \quad (5-4)$$

三相电压的向量如图 5-8 所示，由向量图中可看出，三相线电压向量之和等于零，即

$$\dot{U}_{AB} + \dot{U}_{BC} + \dot{U}_{CA} = 0$$

同理可由图 5-9 向量图求得三相电势之和也为零，即

$$E_A + E_B + E_C = 0$$

这说明当发电机绕组接成三角形时，在三个绕组构成的回路中总电势为零。因此在该回路中不会产生环流。

当一相绕组接反时，如  $B$  相接反。如图 5-10(a) 所示。这时回路电势不再为零。由图 5-10(b) 的向量图可知，回路

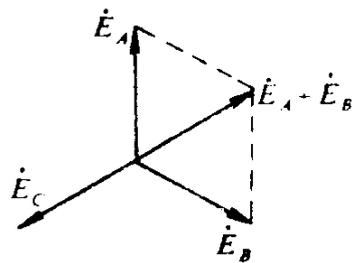


图 5-9 三相电势向量图

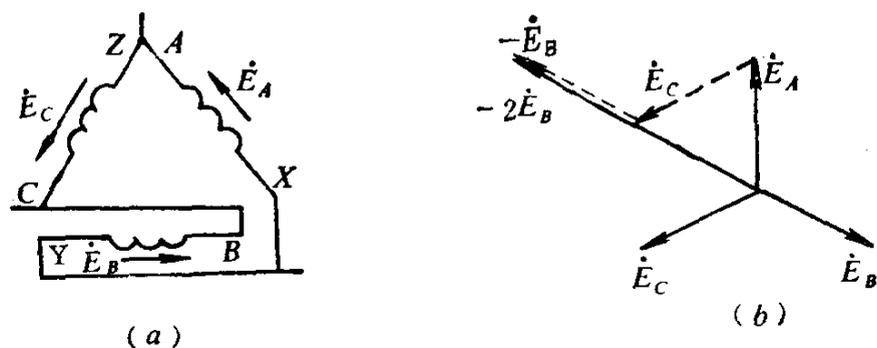


图 5-10 B相绕组反接的电源  
(a) B相接反; (b) 向量图

电势为

$$\dot{E}_A - \dot{E}_B + \dot{E}_C = -2\dot{E}_B$$

即在三角形回路中，有两倍电源相电势作用于绕组回路。此时，由于发电机绕组的阻抗很小，会产生很大的环流，可能烧毁发电机。

实际上三相发电机的电势总存在些不对称，仍可产生环流，所以发电机都不接成三角形。

### 第三节 三相负载的连接

电力系统的负载，按其对电源的要求，可分为单相负载和三相负载。人们日常照明用的电灯及电风扇、收音机等都是单相负载。在工矿和农村用来带动机械的三相电动机及大功率的三相电炉等，为三相负载。

在三相负载中，如各相负载的电阻和电抗都分别相同，则称为是三相对称负载。即三相负载的阻抗相等，阻抗角相同。

$$Z_A = Z_B = Z_C$$

$$\varphi_A = \varphi_B = \varphi_C$$

这是对称三相负载的条件。由对称三相电源和对称三相负载组成的系统，叫做对称三相系统。

### 一、三相负载的星形连接

三相负载的星形连接与电源的星形接法相仿，即将三相负载的末端连成节点，也叫中点用  $O'$  表示；负载的首端分别接到三相电源上。如将电源的中点与负载的中点用导线连接起来，这就是三相四线制系统，如图 5-11 所示。一般照明用的电灯，实际上是属于这种连接方式（如图 5-12）。

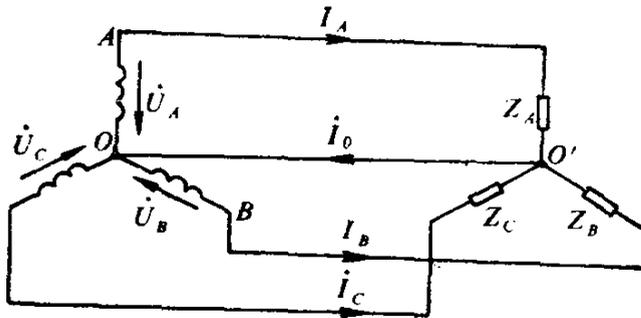


图 5-11 三相四线制电路

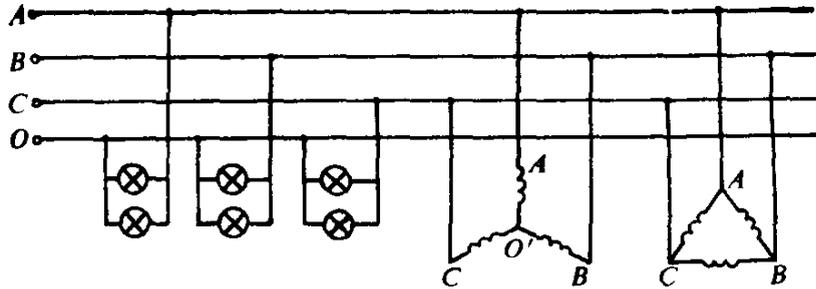


图 5-12 单相、三相负载的连接

在三相四线制中，常见的负载是三相电动机。它的三相绕组是绕在铁芯上的三组相同的线圈， $A-X$ 、 $B-Y$ 、 $C-Z$ 。每相绕组的首末端，都连到接线盒的接线端子  $A$ 、 $B$ 、 $C$  和  $X$ 、 $Y$ 、 $Z$  上。如图 5-13 所示。即把  $X$ 、 $Y$ 、 $Z$  连在一

起，同时将 A、B、C 与电源三根火线相接，这就是电动机的星形连接。它与电源的原理接线，见图 5-12。

在图 5-11 中，假设导线的阻抗很小，可以略去不计，那么负载端的线电压就与电源的线电压相等。如果中线的阻抗也略去不计，则负载的中点 O' 的电位与电源的中点 O 的电位相同，这种情况下负载的相电压与电源的相电压也相等。

各相负载的相电压知道以后，可以计算出各相的电流，即将每相负载中流过的电流，叫做相电流，用  $I_{\text{相}}$  表示。每相电流有效值为

$$I_A = \frac{U_A}{Z_A}, \quad I_B = \frac{U_B}{Z_B}, \quad I_C = \frac{U_C}{Z_C}$$

各相负载的相电压与相电流之间的相位差为：

$$\varphi_A = \arctg \frac{X_A}{R_A}, \quad \varphi_B = \arctg \frac{X_B}{R_B}, \quad \varphi_C = \arctg \frac{X_C}{R_C}$$

如果三相负载对称，这时三个相电流有效值相等，各相的相电压之间，相电流之间的相位差也相同（互差  $120^\circ$ ）。

因此三个相电流也是对称的，即

$$I_A = I_B = I_C = I_{\text{相}} = \frac{U_{\text{相}}}{Z_{\text{相}}}$$

$$\varphi_A = \varphi_B = \varphi_C = \varphi_{\text{相}} = \arctg \frac{X_{\text{相}}}{R_{\text{相}}}$$

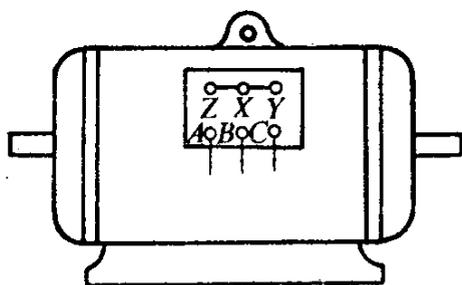


图 5-13 三相电动机的星形连接

在三相对称的情况下，先计算出一相的电流，然后由三

相对称关系可写出其它两相的电流。

以上讨论的是相电流。我们知道相电流是每相负载上的电流，而负载是由电源经线路供电，在线路上通过的电流叫做线电流。用  $I_{\text{线}}$  表示。由图 5-11 电路可看出；星形连接的电

路，线电流与相电流相等，即

$$\dot{I}_{\text{线}} = \dot{I}_{\text{相}} \quad (5-5)$$

求出电流后，可画出对称电路的电压、电流向量图，如图5-14所示。

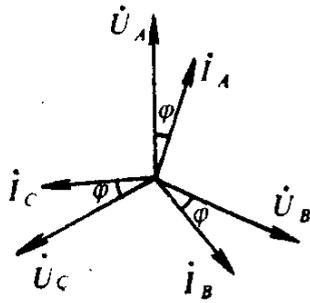


图 5-14 对称星形负载的电压、电流向量图

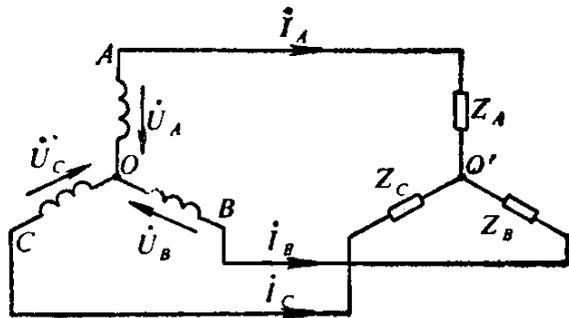


图 5-15 三相三线制

在三相四线制电路中，由基尔霍夫电流定律可知，中线电流等于三相电流之和，即

$$I_0 = I_A + I_B + I_C \quad (5-6)$$

在三相对称情况下，由图5-14的向量图可知，三相电流的向量和等于零，即

$$I_0 = I_A + I_B + I_C = 0$$

说明中线里没有电流。既然中线上没有电流通过，故可以把中线去掉，这时电路就成为三相三线系统，如图5-15所示。

例5-1 有一台三相异步电动机，为星形接线。接到线电压为380伏的三相对称电源上。当电动机在额定负载下运行时，它的每相等效电阻为8欧，等效电抗为6欧，试求电动机的电流和功率因数。

解：因负载和电源都是对称的，故可按一相计算。

$$U_{\text{相}} = \frac{U_{\text{线}}}{\sqrt{3}} = \frac{380}{1.73} = 220 \text{ 伏}$$

每相负载阻抗为

$$Z = \sqrt{R^2 + X^2} = \sqrt{8^2 + 6^2} = 10 \text{ 欧}$$

相电流为

$$I_{\text{相}} = \frac{U_{\text{相}}}{Z} = \frac{220}{10} = 22 \text{ 安}$$

星形接法线电流等于相电流。

电动机的功率因数为

$$\cos\varphi_{\text{相}} = \frac{R}{Z} = \frac{8}{10} = 0.8$$

## 二、三相负载的三角形连接

三相负载依次首尾相连，构成一闭合回路，再把三个连接点与电源三根火线相接，就构成负载的三角形连接。如图 5-16 所示。

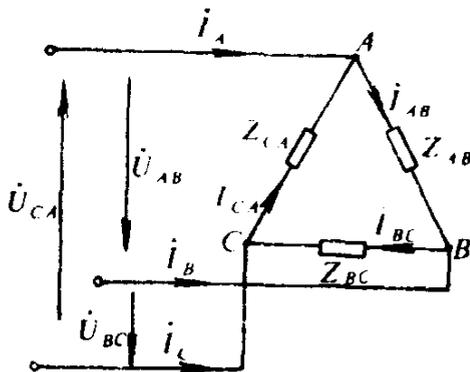


图 5-16 负载的三角形连接

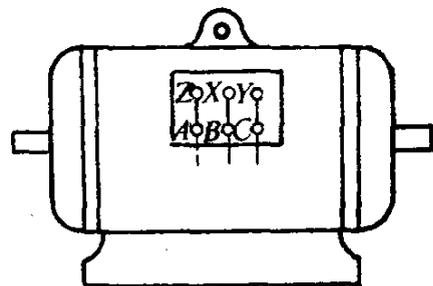


图 5-17 三相电动机的三角形连接

例如三相电动机要接成三角形，只需将接线端子 A 与 Z、B 与 X、C 与 Y 分别相连，再将 A、B、C 接到三相电源即可，如图 5-17 所示。

由图 5-16 可看出，各相负载的两端直接跨接在电源的线

电压上，所以，三角形连接的负载，其相电压等于线电压。  
即

$$U_{\text{相}} = U_{\text{线}} \quad (5-7)$$

当三相负载对称时，三相电流也是对称的，只要计算一相即可得其它两相电流。即：

$$I_{AB} = I_{BC} = I_{CA} = I_{\text{相}}$$

$$= \frac{U_{\text{相}}}{Z_{AB}} = \frac{U_{\text{线}}}{Z_{AB}}$$

相电流与相电压之间的相位差为

$$\varphi_{AB} = \varphi_{BC} = \varphi_{CA} = \varphi_{\text{相}}$$

$$= \arctg \frac{X_{AB}}{R_{AB}}$$

相电压与相电流的向量图如图 5-18 所示。

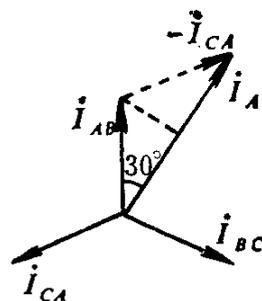
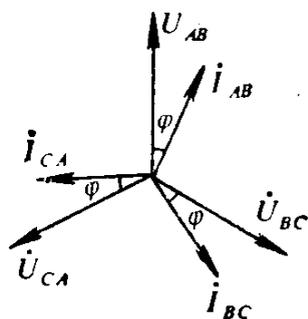


图 5-18 相电压与相电流的向量图 图 5-19 电流向量图

由图 5-16 的电路可看出，对于三角形连接的负载，线电流是不等于相电流的。它们之间的关系可由基尔霍夫电流定律确定，各节点电流方程如下：

$$\left. \begin{array}{l} \text{节点 A} \quad \dot{I}_A = \dot{I}_{AB} - \dot{I}_{CA} \\ \text{节点 B} \quad \dot{I}_B = \dot{I}_{BC} - \dot{I}_{AB} \\ \text{节点 C} \quad \dot{I}_C = \dot{I}_{CA} - \dot{I}_{BC} \end{array} \right\} \quad (5-8)$$

在三相对称情况下，可利用向量图，仿照星形接法时线电压与相电压关系的分析方法，求出三角形接法的线电流与相电流之间的大小和相位关系，如图 5-19 所示。

由向量图可知：

$$I_A = 2 I_{AB} \cos 30^\circ = \sqrt{3} I_{AB}$$

而且  $I_A$  滞后  $I_{AB}$   $30^\circ$ 。因为相电流是对称的，所以三相的线电流也是对称的，三角形连接时各线电流与相电流关系为

$$I_{\text{线}} = \sqrt{3} I_{\text{相}} \quad (5-9)$$

即线电流是相电流的  $\sqrt{3}$  倍，而且线电流相位滞后相电流  $30^\circ$ 。

例 5-2 有一台三角形接法的三相异步电动机，满载时每相电阻  $R = 9.8$  欧、电抗  $X_L = 5.3$  欧，并由线电压为 380 伏的三相电源供电，试求电动机的相电流和线电流。

解：电动机的每相阻抗

$$\begin{aligned} Z &= \sqrt{R^2 + X_L^2} \\ &= \sqrt{9.8^2 + 5.3^2} \approx 11.1 \text{ 欧} \end{aligned}$$

三角形接法时相电压等于线电压，则相电流为

$$I_{\text{相}} = \frac{U_{\text{相}}}{Z} = \frac{380}{11.1} \approx 34.2 \text{ 安}$$

线电流为相电流的  $\sqrt{3}$  倍，即

$$I_{\text{线}} = \sqrt{3} I_{\text{相}} = \sqrt{3} \times 34.2 \approx 59.3 \text{ 安}$$

例 5-3 大功率三相电动机在起动时，由于起动电流较大常采用降压起动。降压起动的方法之一是在电动机起动时，将三相绕组接成星形，当电动机达到额定转速后再改接成三角形。这叫做  $\text{Y}-\Delta$  起动。试计算电动机接成星形和三角形时，相电流及线电流的比值。

解：设电动机绕组的阻抗为  $Z$ ，电源线电压为  $U$ 。

(1)  $\text{Y}$ 接法时，各相绕组的相电压

$$U_{\text{相}} = \frac{U_{\text{线}}}{\sqrt{3}} = \frac{U}{\sqrt{3}}$$

线电流与相电流相等

$$I_{\text{线Y}} = I_{\text{相Y}} = \frac{U_{\text{相}}}{Z} = \frac{U}{\sqrt{3}Z}$$

(2)  $\Delta$ 接法时，相电压等于线电压，相电流与线电流为

$$I_{\text{相}\Delta} = \frac{U}{Z}$$
$$I_{\text{线}\Delta} = \sqrt{3} I_{\text{相}\Delta} = \frac{\sqrt{3}U}{Z}$$

(3) 相电流的比值

$$\frac{I_{\text{相}\Delta}}{I_{\text{相Y}}} = \frac{\frac{U}{Z}}{\frac{U}{\sqrt{3}Z}} = \sqrt{3}$$

(4) 线电流的比值

$$\frac{I_{\text{线}\Delta}}{I_{\text{线Y}}} = \frac{\frac{\sqrt{3}U}{Z}}{\frac{U}{\sqrt{3}Z}} = 3$$

由此可知，三相异步电动机星形起动时的相电流是三角形起动时，相电流的  $\frac{1}{\sqrt{3}}$  分之一，而星形起动时的线电流是三角形起动时线电流的三分之一。所以  $\text{Y}-\Delta$  降压起动电动机可以减小起动电流。

## 第四节 三相电路的功率

三相交流电路可以看成是三个单相交流电路的组合，三相交流电路的功率，可以由单相电路的功率推广而来。在三相电路中同样有有功功率、无功功率和视在功率。

### 一、有功功率

在三相电路中，根据能量守恒可知，三相电源发出的或三相负载消耗的总有功功率等于各相电源或负载的有功功率之和。即

$$\begin{aligned} P &= P_A + P_B + P_C \\ &= U_A I_A \cos\varphi_A + U_B I_B \cos\varphi_B + U_C I_C \cos\varphi_C \end{aligned} \quad (5-10)$$

式中  $U_A$ 、 $U_B$ 、 $U_C$ ——各相相电压；

$I_A$ 、 $I_B$ 、 $I_C$ ——各相相电流；

$\cos\varphi_A$ 、 $\cos\varphi_B$ 、 $\cos\varphi_C$ ——各相电路的功率因数。

在三相对称情况下，各相的有功功率相等，即

$$U_A = U_B = U_C = U_{\text{相}}$$

$$I_A = I_B = I_C = I_{\text{相}}$$

$$\varphi_A = \varphi_B = \varphi_C = \varphi_{\text{相}}$$

所以三相电路的总有功功率可简化为

$$P = 3U_{\text{相}} I_{\text{相}} \cos\varphi_{\text{相}} \quad (5-11)$$

可见，三相有功功率为一相有功功率的三倍。因为对称负载星形连接时，电流、电压的关系为

$$I_{\text{相}} = I_{\text{线}}; \quad U_{\text{相}} = \frac{U_{\text{线}}}{\sqrt{3}}$$

当负载作三角形连接时，

$$I_{\text{相}} = \frac{I_{\text{线}}}{\sqrt{3}}; \quad U_{\text{相}} = U_{\text{线}}$$

因此，对称三相电路的有功功率还可用线电压和线电流表示为

$$P = \sqrt{3} U_{\text{线}} I_{\text{线}} \cos \varphi_{\text{相}} \quad (5-12)$$

应特别指出是  $\cos \varphi_{\text{相}}$  中的功率因数角  $\varphi_{\text{相}}$ ，是指相电压与相电流之间的相位差，而不是线电压与线电流的相位差。

### 二、无功功率

同理可知三相电路中的总无功功率等于各相电路的无功功率之和，即

$$\begin{aligned} Q &= Q_A + Q_B + Q_C \\ &= U_A I_A \sin \varphi_A + U_B I_B \sin \varphi_B + U_C I_C \sin \varphi_C \end{aligned} \quad (5-13)$$

在对称三相电路中，不论负载是星形还是三角形接法，三相无功功率可用下式表示：

$$\begin{aligned} Q &= 3 U_{\text{相}} I_{\text{相}} \sin \varphi_{\text{相}} \\ &= \sqrt{3} U_{\text{线}} I_{\text{线}} \sin \varphi_{\text{相}} \end{aligned} \quad (5-14)$$

其中， $\varphi_{\text{相}}$  仍为相电压与相电流的相位差。

### 三、视在功率

在三相电路中，一般情况下，三相总视在功率并不等于各相视在功率之和，其大小应根据功率三角形由三相的有功功率和无功功率求得。即

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2} \quad (5-15)$$

当三相电路对称时，不论是星形还是三角形接法，都可由下式计算：

$$S = 3 U_{\text{相}} I_{\text{相}} = \sqrt{3} U_{\text{线}} I_{\text{线}} \quad (5-16)$$

例5-4 一台星形接法的三相电动机，接到相电压为220伏的三相电源上，其每相电流是10安，电动机的功率因数为0.72，试求电动机的有功功率和无功功率。

解：三相对称的有功功率为

$$\begin{aligned} P &= 3U_{\text{相}}I_{\text{相}}\cos\varphi_{\text{相}} \\ &= 3 \times 220 \times 10 \times 0.72 = 4752 \text{ 瓦} \\ &= 4.75 \text{ 千瓦} \end{aligned}$$

功率因数角

$$\begin{aligned} \varphi_{\text{相}} &= \arccos 0.72 = 44^\circ \\ \sin\varphi_{\text{相}} &= \sin 44^\circ = 0.69 \end{aligned}$$

无功功率

$$\begin{aligned} Q &= 3U_{\text{相}}I_{\text{相}}\sin\varphi_{\text{相}} \\ &= 3 \times 220 \times 10 \times 0.69 = 4554 \text{ 乏} \\ &= 4.55 \text{ 千乏} \end{aligned}$$

例5-5 有一台星形连接的三相电动机，接于线电压为380伏的电源上。电动机的功率为2.74千瓦，功率因数是0.83。试求电动机的相电流和线电流，如果将此电动机误接成三角形，仍接在上述电源上，那么它的相电流、线电流和功率将为多少？

解：星形连接相电流等于线电流

$$\begin{aligned} I_{\text{相}} = I_{\text{线}} &= \frac{P}{\sqrt{3}U_{\text{线}}\cos\varphi_{\text{相}}} \\ &= \frac{2.74 \times 10^3}{1.73 \times 380 \times 0.83} = 5 \text{ 安} \end{aligned}$$

电动机每相阻抗

$$Z = \frac{U_{\text{相}}}{I_{\text{相}}} = \frac{\frac{380}{\sqrt{3}}}{5} = \frac{220}{5} = 44 \text{ 欧}$$

### 三角形连接

$$I_{\text{相}} = \frac{U_{\text{相}}}{Z} = \frac{380}{44} = 8.6 \text{安}$$

$$I_{\text{线}} = \sqrt{3} I_{\text{相}} = \sqrt{3} \times 8.6 = 15 \text{安}$$

$$P = \sqrt{3} U_{\text{线}} I_{\text{线}} \cos \varphi_{\text{相}} \\ = \sqrt{3} \times 380 \times 15 \times 0.83 = 8220 \text{瓦}$$

由此例可见，如将Y接法的电动机误接成 $\Delta$ 形，在电源电压不变的情况下，电动机的线电流和功率都比Y接法时大了3倍，若不改接过来，会烧毁电动机。

### 思考题与习题

5-1 对称三相电路有何特点？

5-2 什么是相电压、线电压、相电流和线电流？

5-3 为什么三相电动机的电源可用三相三线制，而三相照明电源则用三相四线制？

5-4 星形连接时中线是否可有可无，为什么？

5-5 如果三相电动机每相绕组的额定电压是220伏，若接到线电压是380伏的三相电源时，电动机应如何连接？如电源线电压为220伏，电动机应如何连接？

5-6 在下边  内填入适当数字：

在对称三相电路中，当星形连接时，线电压的大小为相电压的  倍，且相位超前 ；在三角形连接时，线电流是相电流的  倍，且相位滞后 。

5-7 发电机的线电压为10.5千伏，当绕组为星形连接

时，各相绕组的电压为多少？

5-8 如图5-20所示，假设负载三相对称，已知安培表  $A_1$  的读数是10安，求安培表  $A_2$  的读数。

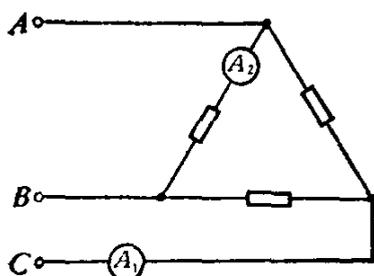


图 5-20

5-9 如图5-21所示，假设负载三相对称，电路中伏特表  $V_1$  的读数为380伏，求伏特表  $V_2$  的读数。

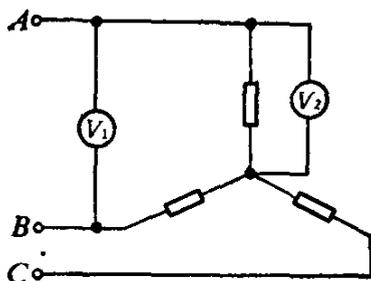


图 5-21

5-10 有一台容量为50千伏安的三相变压器，当变压器满载运行时，求负载功率因数为1、0.8、0.6及0.2时，变压器的输出功率。

5-11 已知电源的相电压为220伏，接成星形，试求下列两种情况，站在地上的人体所承受的电压。

(1) 中点不接地，如图5-22(a)所示。

(2) 中点接地，如图5-22(b)所示。

5-12 一星形负载，每相的电阻为5欧，感抗为3欧，

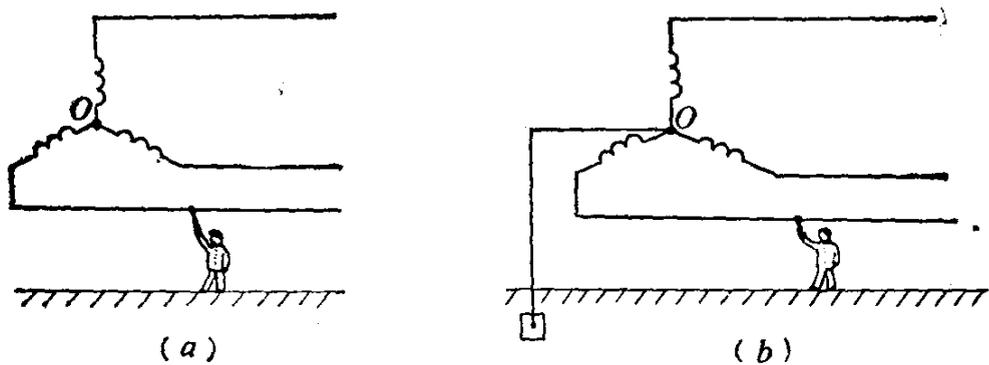


图 5-22

接到线电压为380伏的对称三相电源上，试求线电流及相电压与相电流的相位差。

5-13 已知某三相电动机的相电压为220伏，功率因数为0.8，输入功率为3千瓦，试求线路上的电流。

5-14 星形连接的三相电动机，运行时的功率因数是0.8，若电动机的相电压是220伏，线电流为10安，试求电动机的有功功率和无功功率。

5-15 QFSS-125-2型三相双水内冷汽轮发电机，其线电压是13.8千伏，线电流为6150安。若负载的功率因数从0.85降至0.6，试求该发电机的有功功率如何变化？

5-16 某超高压输电线路，线电压为220千伏，输送功率为120兆瓦。若每相输电线电阻为10欧，试计算负载功率因数为0.9时线路上的电压降及输电线一年的电能损耗。若负载功率因数由0.9降为0.6，则线路电压降及一年的电能损耗将是多少？（设线路一年运行300天）

## 第六章 变 压 器

### 第一节 变压器的用途

变压器是利用电磁感应原理制成的一种变换电压的电气设备，它主要用来升高或降低交流电压。

目前，在工农业生产和人民生活中用到的电能，大都是由发电厂供给的。发电厂一般建设在水力、煤碳等资源丰富的地方，而用户则是分散在城市和农村。这样，就存在着电能的输送和分配问题，变压器在传输电能中起了重要的作用。

在远距离输电中，随着输电线路电压的升高，在传输一定功率的电能时，输电电流将减小，从而使输电线路的损耗也明显降低。如果保持线路容许的损耗不变，则可减小导线的截面，并可节省大量的有色和黑色金属。这样，在架设线路时可降低成本。因此电力系统在远距离输电中都采用高压或超高压输电线路。

目前我国的输电电压的等级有35、110、220、330、500千伏等几种。在国际上输电线路的最高电压是750千伏。

在交流发电机中，由于绝缘的限制和其它因素的影响，输出的电压并不高。一般发电机的额定电压有6.3、10.5、13.8、15.75、18千伏等几种，因此在输电以前，要用升压变压器将电压升到输电电压。

在用电方面，数百千伏的高电压是不能直接使用的，因此电能通过高压输电线路送到城市和农村附近时，需用降压

变压器将电压降低为 6 或 10 千伏的高压配电电压。

用户的各种电器，其额定电压是不一样的，但绝大多数是 220 伏和 380 伏，少数用电设备的额定电压也有 3 或 6 千伏的（如发电厂给水泵电机的电压即为 3 或 6 千伏）。所以用户还需要将高压配电电压再用降压变压器降为 380/220 伏。

从发电厂到用户，根据不同的要求，需要将供电电压变换多次，这就要靠变电站或变压器来完成。发电厂与各级变电站和各种电压等级的输配电线路连为一体，叫做电力网，也称电力系统。图 6-1 为常见的简单电力系统图。

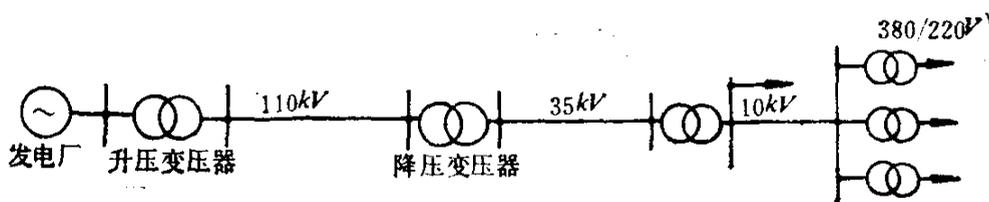


图 6-1 简单电力系统接线图

总之凡是需要使电压升高或降低的地方，都要用到变压器。如行灯的电压为安全电压只有 36 伏。在电子电路中，常需要多种电源电压，如晶体管收音机和电视机需要整流的电压只有几伏到几十伏，这些都需要变压器进行变压。

由此可见：变压器是电力系统和电子电路中的一种重要的电气设备。

例 6-1 某工厂到发电厂 30 公里，由三相三线送电。输电线路采用 185 平方毫米钢芯铝绞线，每公里导线电阻为 0.17 欧。如输送功率为 20000 千瓦，假定  $\cos\varphi=1$ ，计算当输电线电压为 35 千伏、110 千伏、6.3 千伏时，输电线的功率损耗。

解：（1）电压为 35 千伏时

输电线每相线电流

$$I_{\text{线}} = \frac{P}{\sqrt{3} U_{\text{线}} \cos\varphi_{\text{相}}} \\ = \frac{20000}{\sqrt{3} \times 35 \times 1} \approx 330 \text{安}$$

每相导线的电阻

$$R = 0.17 \times 30 = 5.1 \text{欧}$$

三相输电线总功率损耗

$$\Delta P = 3I_{\text{线}}^2 R = 3 \times 330^2 \times 5.1 = 1666 \text{千瓦}$$

功率损失占输送功率的百分比

$$\frac{\Delta P}{P} = \frac{1666}{20000} \times 100\% = 8.33\%$$

( 2 ) 电压为 110 千伏时

$$I_{\text{线}} = \frac{20000}{\sqrt{3} \times 110 \times 1} \approx 105 \text{安}$$

$$\Delta P = 3 \times 105^2 \times 5.1 = 168.7 \text{千瓦}$$

$$\frac{\Delta P}{P} = \frac{168.7}{20000} \times 100\% = 0.84\%$$

( 3 ) 电压为 6.3 千伏时

$$I_{\text{线}} = \frac{20000}{\sqrt{3} \times 6.3 \times 1} = 1835 \text{安}$$

$$\Delta P = 3 \times 1835^2 \times 5.1 = 51500 \text{千瓦} > P$$

由此可见，当输电电压为 110 千伏时，线路损失只占输送功率的 0.84%；输电电压为 35 千伏时，线路损失为 8.33%。当输电线输送的功率和导线截面一定情况下，输电电压越高，线路电流越小，线路功率损失就越小。当电压为 6.3 千伏时，线路损失超过了输送的功率，也就是说，能量全部损

失在线路上。因此 6.3 千伏的输电线路根本不可能把 20000 千瓦的功率送到 30 公里以外去。如果输送的功率更大，距离更远，那么就必须采用超高压输电线路。

## 第二节 变压器的工作原理

如果在一个用硅钢片叠成的铁芯上绕上两个匝数不等的线圈，就构成了一个最简单的单相变压器，如图 6-2 所示。一般将接电源的线圈，叫做变压器一次线圈或称初级线圈；接负载的线圈叫做二次线圈，也称次级线圈。如果一次线圈的电压大于二次线圈电压则称为降压变压器；反之，称为升压变压器。

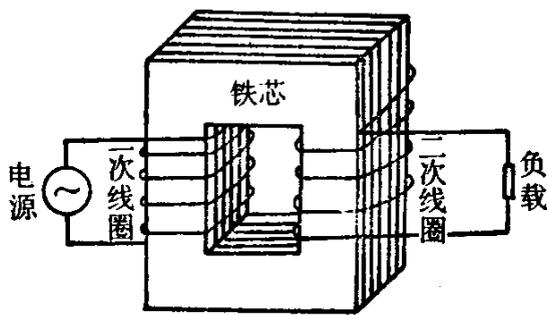


图 6-2 单相变压器

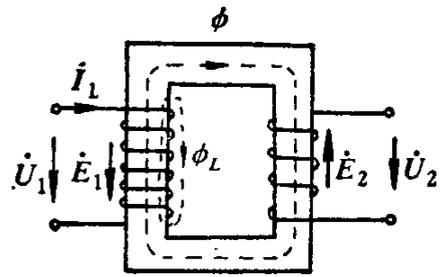


图 6-3 变压器铁芯中的磁通

如果把变压器的一次线圈接在正弦交流电源上，那么在一次线圈中就通过正弦交变的电流。在电流的作用下，铁芯中将产生正弦交变的磁通。由于一、二次线圈是绕在同一铁芯上，所以铁芯中的磁通  $\phi$  也要穿过二次线圈，如图 6-3 所示。由电磁感应原理可知，交变的磁通穿过线圈将在线圈中产生感应电势。二次线圈中的这个感应电势是由于一次线圈中通过交变电流产生的，因此叫做互感电势。我们把一个线

圈中磁通变化在另一个线圈中产生感应电势这种现象称为互感现象，变压器就是利用互感或电磁感应原理制成的。

下面我们定性地讨论变压器初级电压与次级电压的关系。

在变压器中，由于铁芯是硅钢片叠成，因此具有良好的导磁性能，绝大部分的磁通既穿过一次线圈，也穿过了二次线圈，这部分磁通叫做主磁通。另外还有少量的磁通只穿过一次或二次线圈，称为漏磁通。由于漏磁通与主磁通相比很小，我们讨论时就将其忽略。主磁通和漏磁通分别用  $\phi$  和  $\phi_L$  表示。它们在铁芯中的路径，见图 6-3。

由图 6-3 可见，穿过一、二次线圈每匝的主磁通都是相同的。因此，在每一匝线圈内产生的感应电势都相等。所以每个线圈的总电势应与线圈的匝数成正比。设一次线圈有  $N_1$  匝，二次线圈有  $N_2$  匝，则一次线圈中的感应电势的有效值  $E_1$  与二次线圈中的感应电势  $E_2$  的比值，应等于它们的线圈匝数之比。即

$$\frac{E_1}{E_2} = \frac{N_1}{N_2} \quad (6-1)$$

简单来看，由于一次线圈与电源相接，感应电势  $E_1$  应等于电源电压  $U_1$ ；二次线圈开路的情况下  $U_2$  就等于  $E_2$ 。

所以

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{N_1}{N_2} = K \quad (6-2)$$

由式( 6-2 )可见变压器的一、二次电压之比等于一、二次线圈的匝数之比。如果一次线圈的匝数比二次线圈匝数多，即  $N_1 > N_2$ ，那么  $U_2 < U_1$ ，这就是降压变压器。反之  $N_1 < N_2$ ， $U_2 > U_1$ ，这样的变压器就是升压变压器。通常将变压器一、二次线圈的匝数比叫做变压比，简称变比，用

$K$ 表示。

变压器是一种传递电能的设备，它可以改变交流电的电压，而不能产生电能。由能量守恒定律可知，如果略去变压器内部的能量损失，那么二次输出的能量必然等于一次输入的能量。根据能量与电压、电流的关系可知，如果变压器传递的能量一定，则电压与电流成反比，因此变压器在改变电压的同时也改变了电流。即

$$\frac{U_2}{U_1} = \frac{I_1}{I_2} = \frac{N_2}{N_1} = \frac{1}{K} \quad (6-3)$$

说明变压器一、二次线圈中的电流之比等于它们的匝数的反比。测量用的电流互感器就是根据这个原理制成的。

变压器除可以改变电压、电流外，还可以改变阻抗和相位，如电子电路中的输入，输出变压器及振荡变压器等。

电力系统中使用的是三相电力变压器，三相变压器的基本原理与单相变压器相同。三相变压器的一、二次侧各有三个互相绝缘的绕组，分别套在三个铁芯柱上。一、二次绕组各连成星形或三角形。三相变压器的结构原理如图 6-4 所示。由图中可看出就每一相来讲，相当于一个单相变压器。

一、二次绕组的相电压，相电流与绕组匝数之间的关系与单相变压器相同。

例 6-2 某台三相电力变压器，其一次绕组的电压为 6 千伏，二次绕组电压为 230 伏。求该变压器的变比？若一次线圈为 1500 匝，试问二次线圈应为多少匝？

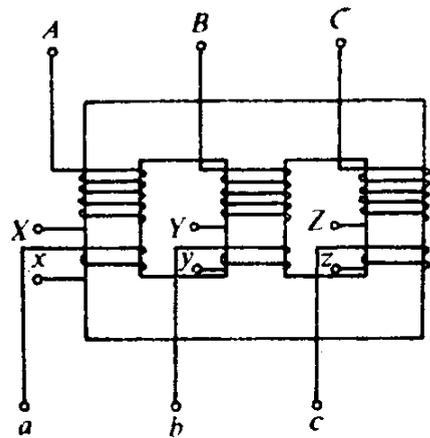


图 6-4 三相变压器

解：由公式 ( 6-2 ) 可知变比

$$K = \frac{U_1}{U_2} = \frac{6000}{230} \approx 26$$

二次线圈的匝数为

$$N_2 = \frac{N_1}{K} = \frac{1500}{26} \approx 58 \text{匝}$$

### 第三节 变压器的极性

一台三相变压器一、二次侧各有三个线圈。而且各侧线圈还必须按一定方式，考虑线圈的首端与末端的正确连接。在三相变压器中，一般用  $A$ 、 $B$ 、 $C$  分别表示三个一次线圈的始端；用  $X$ 、 $Y$ 、 $Z$  表示一次线圈的末端。二次线圈的始端与末端则分别用  $a$ 、 $b$ 、 $c$  和  $x$ 、 $y$ 、 $z$  来表示。

一个线圈有两个端头，哪个作为始端，哪个作为末端，这就是本节要研究的变压器的极性问题。下面以一相为例进行讨论。

在图 6-5(a) 中，变压器一、二次线圈的绕向相同，我们分别将一次侧  $A$ 、 $a$  作为首端， $X$ 、 $x$  为末端。当一次线圈接通电源时，由于两线圈装在同一铁芯上，绕向又相同，因此，一、二次线圈中感应电势的方向在任何时间都是相同的，即两电势是同相位。也就是说感应电势在一次线圈  $A$  端为正时，二次线圈中的感应电势在  $a$  端也必为正。我们就将  $A$  与  $a$  端叫做同极性端，或称同名端，并标以符号“\*”或“+”，以便识别。

在图 6-5(b) 中，两线圈绕向相反，但一、二次线圈，始末端的符号不变。这样两线圈中的感应电势成反相，这时一次线圈的  $A$  与二次线圈的  $x$  端为同名端。

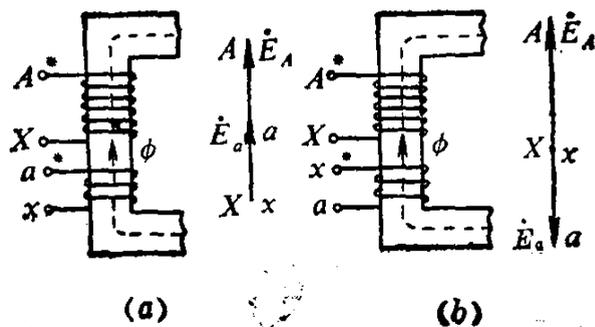


图 6-5 变压器的极性

(a) 一、二次线圈绕向相同； (b) 一、二次线圈绕向相反

由此可见，变压器一、二次线圈绕组的极性决定于两线圈的绕法，绕法确定后，线圈的同极性端也就确定了。

对于一台已装配好的变压器，线圈的绕向是看不见的，如果出线的同名端也没注明，这时可用交流电压表通过试验来确定同名端。试验的原理电路如图 6-6 所示。试验时先将  $X$  与  $x$  端连接起来，然后在高压侧加一个电压比较低的试验用交流电源。在接通电源后，用电压表分别测量出  $A$ - $a$  端之间的电压  $U_{Aa}$  和一、二次电压  $U_{AX}$ 、 $U_{ax}$ ，根据基尔霍夫电压定律可得

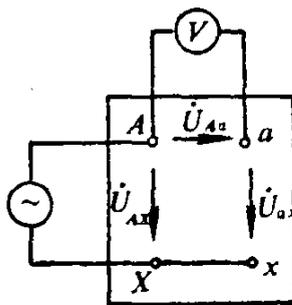


图 6-6 变压器极性的测定

即  $U_{Aa}$  为一、二次电压向量之差，由图 6-5 中的向量图可知，如  $U_{Aa}$  的数值为  $U_{AX}$  与  $U_{ax}$  有效值之差 即说明  $\dot{U}_{AX}$  和  $\dot{U}_{ax}$  为同相 则  $A$  与  $a$  为同名端。如果  $U_{Aa}$  是两电压之和，说明  $U_{AX}$  与  $U_{ax}$  是反相 则  $A$  与  $x$  为同名端。这样就确定了变压器的极性。

$$U_{Aa} = U_{AX} - U_{ax}$$

即  $U_{Aa}$  为一、二次电压向量之差，由图 6-5 中的向量图可知，如  $U_{Aa}$  的数值为  $U_{AX}$  与  $U_{ax}$  有效值之差 即说明  $\dot{U}_{AX}$  和  $\dot{U}_{ax}$  为同相 则  $A$  与  $a$  为同名端。如果  $U_{Aa}$  是两电压之和，说明  $U_{AX}$  与  $U_{ax}$  是反相 则  $A$  与  $x$  为同名端。这样就确定了变压器的极性。

## 第四节 特殊变压器

### 一、自耦变压器

自耦变压器是一种只有一个线圈的变压器，即一、二次共用一部分线圈。单相自耦变压器的原理电路图如图6-7所示。

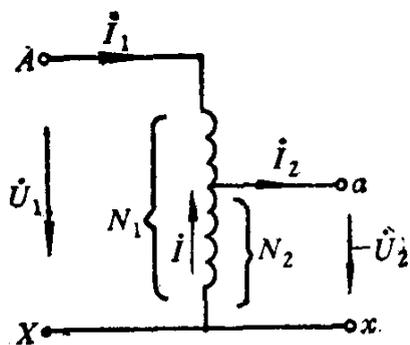


图 6-7 自耦变压器的原理电路

自耦变压器的原理与普通变压器相同，都是按电磁感应原理制造的，其一、二次电压之间的关系仍为：

$$\frac{U_1}{U_2} \approx \frac{N_1}{N_2} = K_A$$

(6-4)

式中  $K_A$ ——自耦变压器的变比。

由自耦变压器的一、二次侧电磁关系可知，一次侧的电流  $I_1$  与二次侧的电流  $I_2$  及  $I$  的实际方向，如图6-7所示，根据基尔霍夫电流定律可知，公共线圈中的电流  $I$  的大小应为  $I_2$  与  $I_1$  两电流之差。这样公共线圈部分可用细导线绕制，以节省导电材料，这是自耦变压器的优点。但由于高、低压绕组之间不但有磁的联系而且还直接有电的联系，故对低压侧绝缘要求很高，所以自耦变压器的变比一般不大于 2。

自耦变压器可以用于连接不同电压等级的电网，也可做为普通的升压或降压变压器。由于它比普通的电力变压器成本低，效率高，故现在电力系统中的大型自耦变压器日益增多。

在某些试验中，常用调压器来连续地改变电源电压，以达到试验的要求。这样的调压器一般常采用自耦调压器。这种调压器有单相的，也有三相的。单相自耦调压器的原理电路如图 6-8 所示。

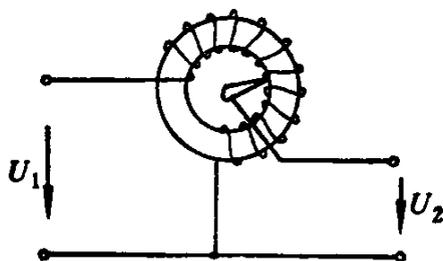


图 6-8 调压器的原理电路

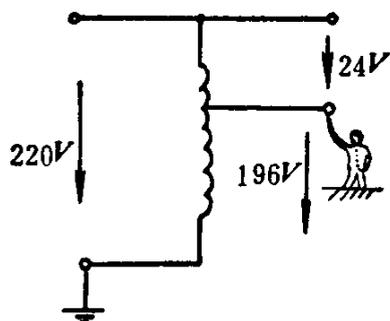


图 6-9 自耦变压器的错误接法

自耦调压器的工作原理与自耦变压器相同。它是由环形铁芯，和绕在铁芯上的线圈构成。二次侧的一端接到电刷触头上，可在线圈上自由滑动，这样就改变了二次线圈的匝数，从而可平稳地调节输出电压。这种调压器一般容量比较小，电压也只有几百伏。

在实际应用中，自耦变压器不允许作为安全变压器使用，因为一旦接错线，将会发生触电事故。如图 6-9 所示，虽然二次侧电压只有 24 伏，但当人触及二次侧的任一根线都有危险。

## 二、互感器

互感器是电工测量和自动保护装置中使用的仪用变压器。互感器的主要作用是：①使测量仪表和继电器与高压隔离，以保证安全工作；②将高电压，大电流按比例变小，便于测量，这样可扩大仪表的量程。

根据互感器的不同用途，可分为电压互感器和电流互感器。

### (一) 电压互感器

电压互感器的作用是将电网或电气设备上的高电压降低为低电压后，再供给测量仪表和继电器的电压线圈，这样可利用低电压仪表，间接地测量出高电压。

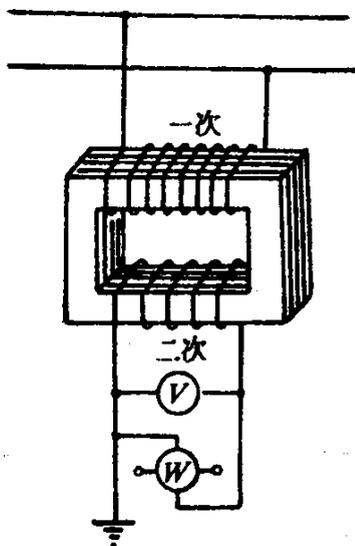


图 6-10 电压互感器  
原理结构图

电压互感器的结构原理与接线如图6-10所示。它是由两个相互绝缘，绕在同一铁芯上的线圈组成。当一次线圈接电压 $U_1$ 时，则在二次线圈内感应出电压 $U_2$ 。一次与二次的电压之比叫做变压比，通常用 $K_V$ 表示，即：

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

或

$$U_1 = \frac{N_1}{N_2} U_2 = K_V U_2 \quad (6-5)$$

由上式可看出，利用电压互感器可将一次高电压变为低电压，然后利用电压表测量出二次电压 $U_2$ ，再将 $U_2$ 乘上变压比 $K_V$ ，就得到被测量的一次电压 $U_1$ 。

电压互感器在使用中应注意以下几点。

(1) 电压互感器要与仪表配套使用。因为电压互感器的一次电压高低不同，而二次电压一般都是100伏。这样就使得仪表和继电器，实现标准化，在测量不同等级的电压时只要配用不同变压比的电压互感器即可。所以要求仪表或仪

器一定要与互感器配套，否则就不能正确地反映一次电压。

(2) 电压互感器在运行中，其二次线圈不能短路。如果电压互感器的二次线圈在运行中短路，则在二次电路的阻抗显然就要减小，因而会出现很大的短路电流，使二次线圈因严重发热而烧毁。因此，在电压互感器二次侧也应装设熔断器，作为短路事故的保护。

(3) 电压互感器的铁芯、外壳和二次线圈要接地。因为一次电压一般都很高，而二次电压只有100伏，容易造成一、二次线圈间的绝缘击穿，使二次或铁芯、外壳带有高电压，危及到工作人员和二次设备的安全，所以二次要接地。

(4) 二次的仪表和仪器的电压线圈都应并联接到电压互感器的二次线圈上。

电压互感器可以制成单相的，也可以做成三相的，在一般电路图中，常将电压互感器用符号YH表示。电压互感器在发电厂和各级变电站的测量、保护中起着重要的作用。

### (二) 电流互感器

电流互感器也叫变流器，用符号LH表示。电流互感器的作用是把大电流变成小电流，供电给测量仪表和继电器的电流线圈。间接地测量出大电流，而且还可隔离高压，保证了工作人员和仪表及仪器的安全。

电流互感器的原理结构与电路接线如图6-11所示。其特点是一次线圈只有一匝或几匝，用粗导线绕成；二次线圈的

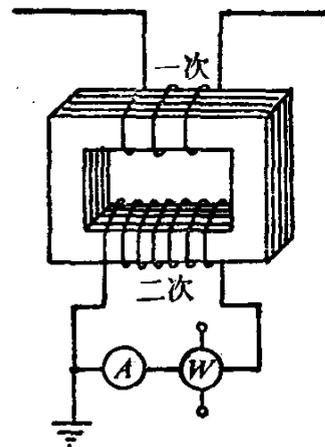


图 6-11 电流互感器原理结构图

匝数较多，用较细的导线绕成。根据变压器的工作原理可知，电流互感器一、二次电流之间的关系为：

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{N_2}{N_1} = K_I$$

或 
$$I_1 = \frac{N_2}{N_1} I_2 = K_I I_2 \quad (6-6)$$

上式中的  $K_I$  叫做电流互感器的变流比。由式中可看出只要二次线圈的匝数比一次线圈的匝数多，即可将一次大电流变为二次的小电流。测量出二次电流的大小后乘上变流比可得到一次电流的数值。

在使用电流互感器时应注意以下几点。

(1) 电流互感器要与仪表配套使用。因为  $LH$  的一次电流大小不同，而二次电流一般都是 5 安，这样就要求电流表在测量不同的一次电流时，应配用不同的电流互感器。

(2) 严禁将电流互感器的二次线圈开路。因为一次线圈的匝数比二次线圈匝数少，这样当二次开路时就会在二次感应出一个很高的电压危及工作人员和仪表设备的安全。

(3) 为了防止一、二次间绝缘击穿，二次侧和铁芯应接地。

(4) 二次仪表及仪器的电流线圈应串联接到电流互感器的二次线圈上。由于电流线圈的阻抗都很小，所以  $LH$  的二次近似短路状态。

电流互感器比电压互感器应用的范围更广，它不但可以用在高电压的电流测量，而且也常用于低电压大电流的测量，我们常用的钳形电流表就是  $LH$  的一种具体应用。

钳形电流表，俗称卡表。它是由电流互感器和一只配套的电流表构成，如图 6-12 所示。其特点是  $LH$  的二次线圈套

在可以开、合的铁芯上，并与电流表相连。测量时，先张开铁芯，将待测电流的导线放入钳中，然后闭合铁芯。这样载流导线便成为  $LH$  的一次线圈，经过电流变换后，可在电流表上读取电流的数值。这种电流表的优点是测量线路电流时，可以不用断开线路导线。

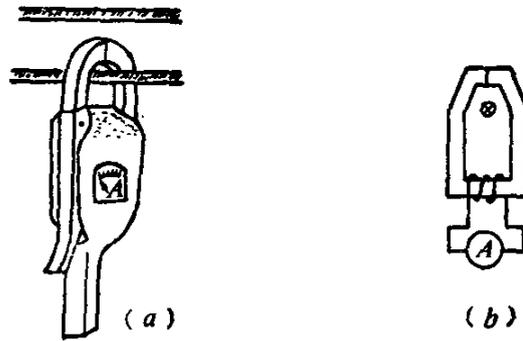


图 6-12 钳形电流表

### 三、电焊变压器

工程中常用的交流电焊机，实际上是由变压器与电抗器串联组成，如图6-13所示。电焊变压器的二次电压通常为60~70伏。电抗器的铁芯有可调节的气隙，这样可以改变电抗器的感抗，达到起弧限流的目的。

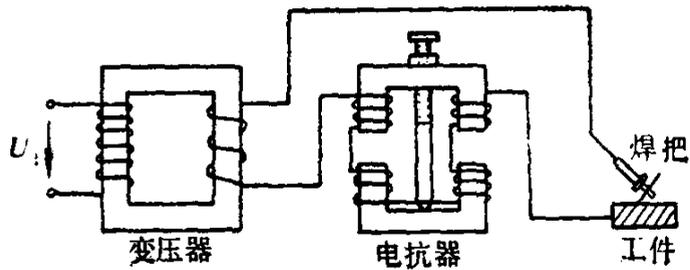


图 6-13 电焊变压器

在焊接起弧时，焊条与工件接触，变压器二次侧经电抗器短路。为了使短路电流不致过大，因而烧坏变压器，则要

求二次侧电压迅速下降，所以常采取增大变压器和电抗器的漏磁通方法，以增加内部阻抗压降来减小短路电流。这也是电焊变压器的突出特点。

以上介绍了几种常用的特殊变压器，特殊变压器的种类还很多，象电子电路中的脉冲变压器，高频变压器和中频变压器等，它们的结构都与普通变压器不同，在此就不赘述了。

## 思考题与习题

6-1 变压器在电力系统中起什么作用？

6-2 变压器是根据什么原理制造的？如果给变压器一次侧加一直流，结果如何？

6-3 为什么变压器的低压线圈必须用较粗的导线绕制，而高压线圈则用较细的导线。

6-4 什么是变压器的极性？怎样试验变压器的极性？

6-5 为什么电流互感器的二次线圈严禁开路运行；而电压互感器的二次线圈严禁短路运行？

6-6 单相变压器的一次侧电压  $U_1 = 3000$  伏，变比  $K = 15$ ，求二次测电压  $U_2$ 。当二次电流  $I_2 = 60$  安时，求一次电流。

6-7 一台容量为 2 千伏安的单相变压器，一次电压是 220 伏，二次电压为 24 伏，试求一、二次的电流各为多少？

## 第七章 三相异步电动机

### 第一节 三相异步电动机的构造

异步电动机又叫做感应式电动机，它是实际应用中最常见的一种交流电动机。由于异步电动机具有结构简单，价格低廉，工作可靠，维修方便等优点，所以在发电厂和工农业生产中得到了广泛的应用。

三相异步电动机主要由两个基本部分组成，即定子（固定部分）和转子（转动部分）。图 7-1 为三相鼠笼式异步电动机的结构图。

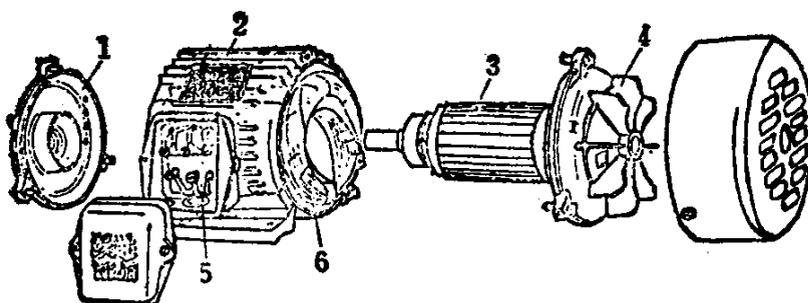


图 7-1 三相鼠笼式异步电动机的结构

1—端盖；2—定子；3—转子；4—风翼；5—接线盒；6—定子绕组

定子和转子彼此由空气隙隔开，为了增强磁场，空气隙应尽可能的小，一般为 $0.3\sim 1.5$ 毫米，电机容量越大，气隙就越大些。

#### 一、定子

三相异步电动机的定子主要由机座和装在机座内的圆筒形铁芯及铁芯上的定子绕组组成。机座是由铸铁或铸钢制

成，在机座内装有定子铁芯，铁芯是由互相绝缘的硅钢片叠成。铁芯的内圆周表面冲有均匀分布的平行槽，在槽中放置了对称三相绕组。图7-2(a)、(b)、(c)，分别为未装绕组和装有三相绕组的异步电动机的定子及定子硅钢片的形状。

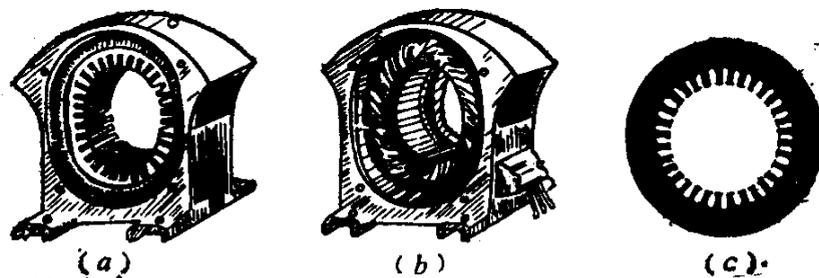


图 7-2 异步电动机的定子

(a)未装绕组的定子；(b)装有三相绕组的定子；

(c)定子硅钢片的形状

三相异步电动机的定子绕组共有六个引线端，固定在接线盒内的接线柱上，按现行国家标准规定， $D_1$ 、 $D_2$ 、 $D_3$ 表示各相绕组的始端， $D_4$ 、 $D_5$ 、 $D_6$ 表示末端。实际中也有用A、B、C、X、Y、Z，或用1、2、3、4、5、6表示绕组的始末端。定子绕组在机座接线盒的排列次序，如图7-3所示。

定子绕组有星形和三角形两种接法。若把 $D_4$ 、 $D_5$ 、 $D_6$ 接在一起， $D_1$ 、 $D_2$ 、 $D_3$ 分别接到电源的A、B、C各相上，电动机就为星形接法，如图7-4所示。如把 $D_1$ 和 $D_6$ 、 $D_2$ 和 $D_4$ 、 $D_3$ 和 $D_5$ 接在一起，再从三个连接端处分别接到电源A、B、C各相上，就是三角形接法，如图7-5所示。究竟采用哪一种接法，要根据电动机绕组的额定电压和电源的电压来确定。

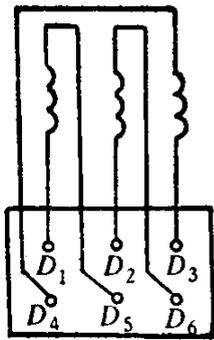
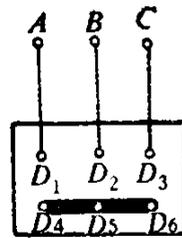
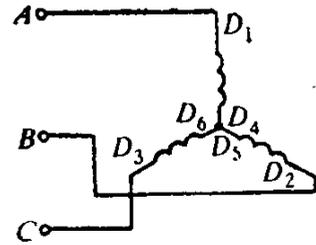


图 7-3 三相电动机定子绕组在接线盒中的排列



(a)



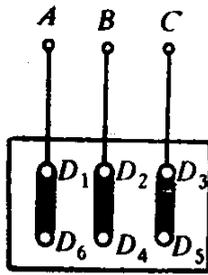
(b)

图 7-4 电动机星形接法

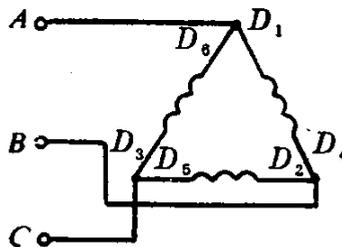
(a) 实际接线图；(b) 原理接线图

## 二、转子

三相异步电动机的转子根据构造上的不同，分为鼠笼式和绕线式两种型式。转子铁芯是由互相绝缘的硅钢片叠成圆柱形，其表面冲有均匀分布的平行槽，用来嵌放转子绕组。转子硅钢片的形状，如图 7-6 所示。



(a)



(b)

图 7-5 电动机三角形接法

(a) 实际接线图；(b) 原理接线图

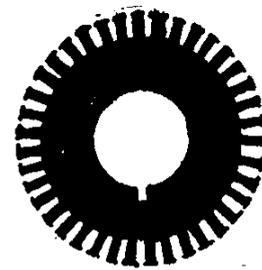


图 7-6 转子硅钢片形状

鼠笼式转子的铁芯槽里放置着粗铜条，铜条的两端用短路环焊接起来，形状象个圆筒形捕鼠的笼子，因此叫做鼠笼式转子，如图 7-7 所示。

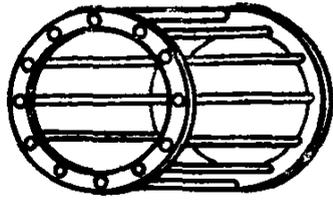


图 7-7 鼠笼式转子绕组

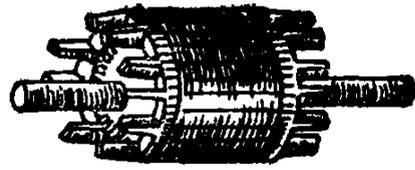


图 7-8 铸铝式转子

目前，100千瓦以下的鼠笼式电动机通常采用铸铝式。即把溶化了的铝液浇注到转子铁芯槽内，同时把转子端的短路环和冷却电机风扇也一起用铝铸成，这种方法既简单又节省了铜。图 7-8所示为铸铝式转子。

绕线式转子绕组和定子绕组相似，也是三相对称绕组。转子的三相绕组通常接成星形，三相绕组的始端分别接到与轴固定的三个铜制滑环上。环与环，环与轴都彼此绝缘。在各环上用弹簧压着碳质电刷，通过电刷使转子绕组与变阻器接通。绕线式转子的结构如图 7-9 所示。绕线式转子的特点是：转子绕组通过滑环和电刷与外边的变阻器接通，以改变异步电动机的起动性能或调节电动机的转速。在正常工作情况下，转子绕组是短接的，不接入附加电阻。绕线式与鼠笼式只是转子在构造上有所不同，它们的作用原理是一样的。

### 三、其它部件

电动机的其它部件有端盖、轴承盖、轴承、风扇、风扇罩、接线板和接线盒等。

端盖是支撑转子并遮盖电动机内部用的。一般是铸铁的，用螺丝固定在机座上。端盖中间是轴承，每一个轴承的内外侧都有轴承盖，以防止润滑油外流和灰尘进入轴承内。风扇是冷却电机用的，一般由铸铝制成，装在转子后轴端。风扇罩罩在风扇外面，用螺钉固定在机座上。接线板在接线

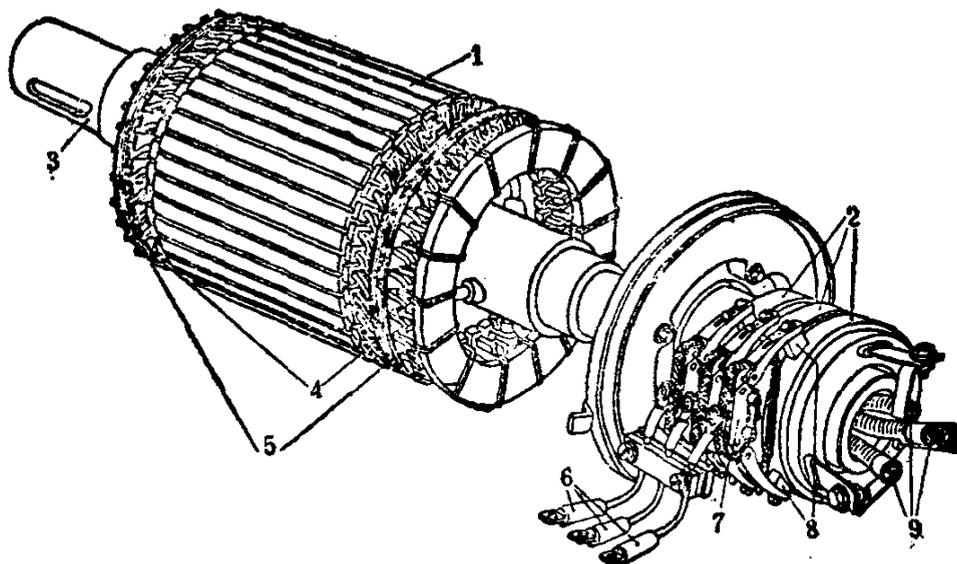


图 7-9 绕线式转子

1—转子铁芯；2—滑环；3—转轴；4—三相转子绕组；5—镀锌钢丝箍；  
6—电刷外接线；7—刷架；8—电刷；9—转子绕组出线头

盒内，定子绕组的引出线固定在接线板的接线柱上。

为了适应各种不同工作环境的需要，异步电动机的外壳可制成开启式，封闭式，防护式，防爆式等不同型式。例如在发电厂中，汽机房底层比较潮湿，宜采用防护式异步电动机；室外设备，最好选用封闭式异步电动机；而在蓄电池室，制氢室等处，则应选用防爆式异步电动机。

## 第二节 三相异步电动机的工作原理

### 一、磁场对电流的作用

我们常把带有电流的导体叫做载流导体。当载流导体处于磁场当中时，要受到电磁力的作用，使它向一定方向运动。

实验证明：电磁力的大小与磁感应强度  $B$ ，导体上的电

流  $I$  及导体在磁场中的有效长度  $l$  成正比。在均匀磁场中，当导体与磁场相互垂直时，电磁力的大小为

$$F = BIl \quad (7-1)$$

式(7-1)中，当  $B$  的单位为韦伯、 $I$  的单位为安培、 $L$  的单位为米时，电磁力  $F$  的单位是牛顿。载流导体在磁场中所受电磁力的大小还与磁场和导体的相互位置有关，可以证明：当磁场与导体垂直时电磁力最大，平行时电磁力等于零。

由实验还可知，电磁力的方向既与电流的方向垂直又与

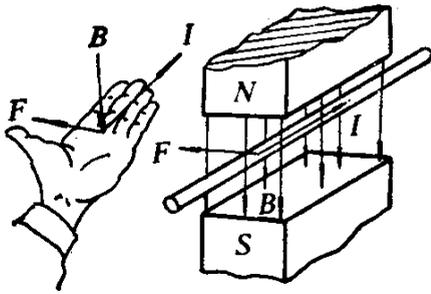


图 7-10 左手定则

磁场的方向垂直。三者之间的关系可用左手定则表示。如图7-10所示，将左手的手掌摊平，使大拇指与其余四指垂直，让手掌迎着磁场方向，四指指电流方向，那么大拇指所指的方向就是电磁力的方向。

由左手定则还可知，如要改变导体所受电磁力的方向，只要改变导体电流的方向或者改变磁场的方向即可。

电动机和一些测量仪表就是利用电磁力的原理制成的。

## 二、旋转磁场

电流可以产生磁场，这是电磁现象中的客观规律，若在三相异步电动机的定子绕组中，通入三相对称交流电流，就会产生一个旋转磁场。下面用图解方法分析三相电流产生的旋转磁场。

为了讨论方便，假定电动机的定子只有六个线槽，绕有三个绕组， $A-X$ 、 $B-Y$ 、 $C-Z$ ，如图7-11所示。三个绕组（假定接成星形）在定子铁芯槽上的布置彼此相隔  $120^\circ$ 。

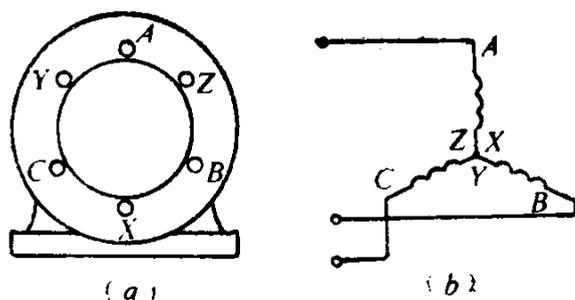


图 7-11 三相异步电动机定子及接线  
(a)定子；(b)星形联接

当把电动机的定子绕组的三个始端  $A$ 、 $B$ 、 $C$  接到对称三相交流电源时，绕组中便有对称三相电流  $i_A$ 、 $i_B$ 、 $i_C$ 。设三相电源的相序是  $A-B-C$ ， $i_A$  的初相为零，则对称三相电流为

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

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

$$i_C = I_m \sin(\omega t - 240^\circ)$$

其三相电流的波形如图 7-12 所示。现利用三相电流的波形来分析旋转磁场的形成。分析时规定，当电流为正时电流由绕组的始端流入，从末端流出；当电流为负时由末端流入，从始端流出。凡电流流进绕组的那一端用“ $\otimes$ ”表示，流出来的那一端用“ $\odot$ ”表示。

当  $t = 0$  时， $i_A = 0$ ， $i_B$  为负， $i_C$  为正。此时  $A$  相绕组没有电流； $B$  相绕组中的电流是从“ $Y$ ”端流入，由“ $B$ ”端流出； $C$  相绕组中的电流是从“ $C$ ”端流入，由“ $Z$ ”端流出。此时，用右手螺旋定则可判断，三相电流在定子中建立的合成磁场的方向为由  $A$  指向  $X$ 。如图 7-12( $t_0$ ) 所示。

当  $t = \frac{T}{6}$  时， $i_A$  为正， $i_B$  为负， $i_C = 0$ 。此刻合成磁场

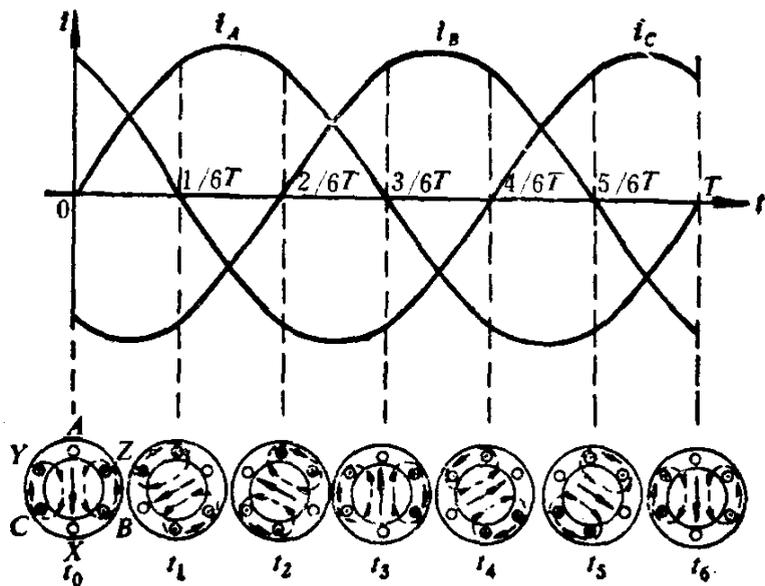


图 7-12 三相交流建立旋转磁场的过程

的方向是由 Z 指向 C。与  $t = 0$  时相比，合成磁场的方向在空间按顺时针方向旋转  $60^\circ$ ，如图 7-12( $t_1$ ) 所示。

当  $t = \frac{T}{3}$  时， $i_A$  为正， $i_B = 0$ ， $i_C$  为负。此时合成磁场的方向是由 B 指向 Y，与  $t = \frac{T}{6}$  时相比，合成磁场的方向又按顺时针向前旋转  $60^\circ$ ，如图 7-12( $t_2$ ) 所示。

当  $t = \frac{T}{2}$  时， $i_A = 0$ ， $i_B$  为正， $i_C$  为负。合成磁场的方向是由 X 指向 A，与  $t = \frac{T}{3}$  时相比，磁场又顺时针旋转了  $60^\circ$ ，如图 7-12( $t_3$ ) 所示。

按照上述方法分析可知，电流每经过  $\frac{T}{6}$ ，则合成磁场顺时针旋转  $60^\circ$ ，若电流经过一个周期，则合成磁场也旋转了一周。电流不断通过，磁场就不断地旋转。所以三相电流的

合成磁场是一个旋转磁场。

从图7-12可看出，对于三相绕组形成的一对磁极的旋转磁场来说，电流变化一个周期，旋转磁场转一周。也就是说，旋转磁场每秒钟的转数等于交流电的频率  $f$ ，如果用  $n_1$  表示旋转磁场每分钟的转数，则

$$n_1 = 60f \quad (7-2)$$

对于两对磁极的电动机，电流变化一周，旋转磁场只转过一对磁极位置。即在空间只转了半周，所以旋转磁场的转速为  $\frac{60f}{2}$ 。

依此类推，当旋转磁场有  $P$  对磁极时，旋转磁场的速度  $n_1$  与电流频率  $f$  和磁极对数  $P$  的关系为

$$n_1 = \frac{60f}{P} \quad (7-3)$$

$n_1$  表示了旋转磁场每分钟的转数与交流电的频率成正比，与电动机定子绕组的磁极对数成反比。 $n_1$  通常称为同步转速。当电源为工频 50 赫时，对于不同磁极对数的电机，其旋转磁场的转速为

$$P = 1, n_1 = \frac{60 \times 50}{1} = 3000 \text{ 转/分}$$

$$P = 2, n_1 = \frac{60 \times 50}{2} = 1500 \text{ 转/分}$$

$$P = 3, n_1 = \frac{60 \times 50}{3} = 1000 \text{ 转/分}$$

$$P = 4, n_1 = \frac{60 \times 50}{4} = 750 \text{ 转/分}$$

可见，三相电动机磁极对数越多，其同步转速就越低。

### 三、三相异步电动机的工作原理

三相异步电动机是利用旋转磁场和电磁感应原理工作

的。图 7-13 为异步电动机的工作原理图。当定子绕组与三相电源接通后，在空间产生一个旋转磁场。假设旋转磁场以  $n_1$  的转速顺时针旋转，则转子中的笼条被旋转磁场的磁力线切割，在笼条中产生感应电势。电势的方向由发电机右手定则确定。在这里应用发电机右手定则时，可假设转子笼条向逆时针方向旋转切割磁力线，这与实际上磁场向顺时针方向旋转切割转子是相当的。在图 7-13 中，用符号  $\otimes$  和  $\odot$  分别表示电势进入和穿出的方向。

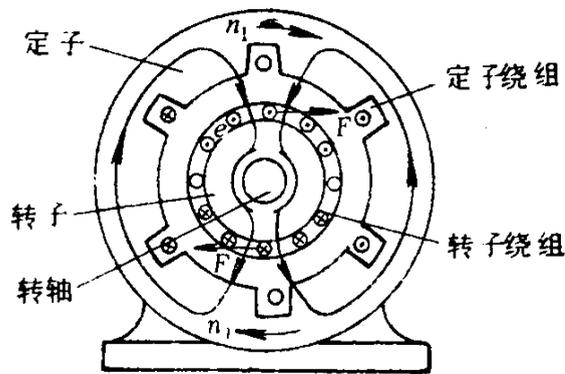


图 7-13 三相异步电动机的工作原理

由于转子笼条被短路环短接着，因此在感应电势的作用下，转子鼠笼中将产生与感应电势方向一致的感应电流。电流的大小与转子切割磁场的速度有关，当转子静止时，旋转磁场与转子相对切割的速度最大，感应电流也最大。

转子笼条中有了感应电流，就要受到旋转磁场电磁力作用，方向由左手定则判定。从图 7-13 中可以看到，电磁力  $F$  的方向与旋转磁场的旋转方向一致，也为顺时针方向。电磁力通过鼠笼作用在转子上形成转矩，于是转子在转矩的作用下沿着旋转磁场的方向旋转起来。

转子的转速必须小于旋转磁场的转速，因为如果转子的

转速与旋转磁场的转速相等，则转子与旋转磁场之间便无相对运动，因而转子导体不再切割磁力线，也就不能产生感应电势和电流。那么，转子导体在磁场中就不会受到电磁力的作用，转子也不能转动。因此，转子的转速一定要小于旋转磁场的转速，两个转速不能同步，所以将这种电动机叫做异步电动机。由于异步电动机的原理是建立在电磁感应基础上的，因此也称为感应电动机。

如果用  $n_2$  表示电动机的转速，则同步转速  $n_1$  与  $n_2$  之差叫做转速差，简称转差，用  $\Delta n$  表示，即

$$\Delta n = n_1 - n_2 \quad (7-4)$$

转差与同步转速之比称为异步电动机的转差率，用  $s$  表示：

$$s = \frac{n_1 - n_2}{n_1} \times 100\% = \frac{\Delta n}{n_1} \times 100\% \quad (7-5)$$

转差率表示了转子与旋转磁场之间相对运动的速度大小，当转子不动时，其转差率为 1，如果电机转速接近同步转速，则转差率接近于零。显然，转差率  $s$  越小，转子转的越快；反之  $s$  越大，转子转的越慢。

例 7-1 一台四极异步电动机，转子实际转速为 1440 转/分，试求这台电动机的转差率。

解：同步转速

$$n_1 = \frac{60f}{P} = \frac{60 \times 50}{2} = 1500 \text{ 转/分}$$

转差率为

$$s = \frac{n_1 - n_2}{n_1} \times 100\% = \frac{1500 - 1440}{1500} \times 100\% = 4\%$$

例 7-2 一台四对磁极的异步电动机，接在工频电源上，其转差率为 2%，试求异步电动机的转速。

解：同步转速

$$n_1 = \frac{60f}{P} = \frac{60 \times 50}{4} = 750 \text{转/分}$$

电动机转速：

$$n_2 = (1-s)n_1 = (1-0.02) \times 750 = 735 \text{转/分}$$

### 第三节 三相异步电动机的起动

电动机接通电源后开始转动，转速要逐渐增高，直到正常转速为止，这一段过程称为起动过程。起动过程的时间一般为几秒钟。下面介绍异步电动机在起动时的特点和常用的几种起动方法。

#### 一、异步电动机的起动电流

鼠笼式异步电动机在起动时有两个特点：一是起动电流很大，二是起动转矩较小。这是因为电动机在接通电源的瞬间，旋转磁场与尚未转动的笼条之间有最大的相对速度。因此，在鼠笼中产生最大的感应电势，由于笼条是短路的，所以要产生很大的转子电流。一般起动时的转子电流约为额定负载时的 5 ~ 8 倍。异步电动机转子电流是由定子通过感应电势供给的，所以当转子电流很大时，定子电流也很大。鼠笼式电动机的起动电流一般为额定电流的 4 ~ 7 倍。例如：JO<sub>2</sub>-93-4型三相异步电动机，其额定功率为100千瓦，额定电流为183.5安，电源电压是380伏，此电动机在起动时，起动电流将达到1000安以上。电动机在起动后，转子转速逐渐增加，笼条切割旋转磁场的速度越来越小，因此定子电流也逐渐减小。对于容量不大的电动机大约经过 5 ~ 10秒钟的起动时间，转速可达到稳定的数值。

电动机的起动电流很大，会使线路电压降低很多，引起

电网电压较大的波动，影响电网上其它电气设备的正常运行。再者由于起动时定子和转子电流很大，会使定子绕组和转子过度发热，而且起动时间越长，发热越厉害，结果将加速绝缘老化，缩短电机的使用寿命。此外，在过大电流的冲击下，定子绕组和转子笼条也会受过大的电磁力作用，因而产生变形。所以，为了保证电动机安全可靠运行，必须设法降低起动电流。

## 二、鼠笼式异步电动机的起动

三相异步电动机的起动方式有直接起动和降压起动两种。直接起动也称全压起动，它所用的设备简单，投资少，起动时间短，起动方式可靠，为较小容量电动机采用。但当电动机的容量较大或电源变压器的容量和线路压降的规定不允许直接起动时，就必须采用降压起动。降压起动的目的是为了减小起动电流，但是因为转矩与外加的电压平方成正比，所以起动转矩也降低。因此，降压起动方法，用在轻载起动的电动机上，或者容量较大的电动机上。下面介绍这两种不同的起动方法。

### （一）全压起动

全压起动即将电动机直接接到电网上起动。电动机能否采用直接起动应由电源变压器的容量，起动次数及电动机型式等因素决定。

电源变压器的容量是否允许电动机在额定电压下直接起动，可根据下面的公式来判断，即

$$\frac{I_{起}}{I_{额}} \leq \frac{3}{4} + \frac{\text{变压器容量}}{4 \times \text{电动机容量}} \quad (7-6)$$

如果电动机的起动电流倍数（ $I_{起}/I_{额}$ ）小于上式右边的数值时，则可直接起动。

直接起动常用的设备有三相胶盖瓷底刀闸开关、铁壳开关、交流接触器以及自动空气开关等。

图7-14为用开关控制电动机直接起动的原理电路，起动时合上开关 $K$ ，则三相交流电压通过熔断器 $RD$ 、开关 $K$ 直接加到电机 $D$ 上。

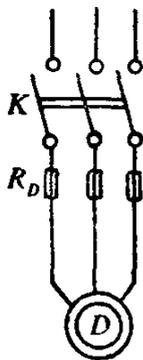


图 7-14 三相异步电动机的直接起动电路图

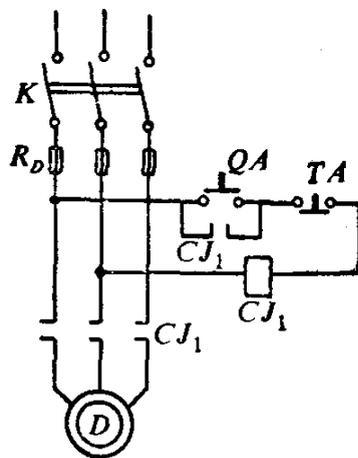


图 7-15 交流接触器控制电动机的原理电路

图 7-15 为交流接触器控制电动机的电路。下面利用图 7-15 简单说明交流接触器控制电动机的起动原理。

三相电源通过刀闸和熔断器经接触器的触头  $CJ_1$  与电动机相接，这条电路叫主电路。由起动按钮  $QA$ ，停止按钮  $TA$  和带有活动铁芯的线圈  $CJ_1$  串联的电路，对接触器进行控制，叫控制电路。起动按钮  $QA$  是常开按钮， $QA$  平常处于断开状态，只有在手指按下按钮时才接通电源，手松开后，电路又重新断开。停止按钮  $TA$  是常闭按钮。 $TA$  常处于接通状态，手指按下，电路断开，手指松开，电路又重新接通。

交流接触器的动作原理是：起动电动机时，先把刀闸开

关合上，然后按下起动按钮 $QA$ ，控制电路接通， $CJ_1$ 线圈通电，电磁铁吸引住衔铁， $CJ_1$ 的三个触头和一个联锁触头 $CJ_1$ 闭合，使起动按钮两端接通，起自保持作用，此后松开起动按钮，电动机照常运行。停机时，按下停止按钮 $TA$ ，使控制电路断开， $CJ_1$ 线圈断电， $CJ_1$ 主触头和联锁触头都自动断开，电动机就停止运行。

## (二) 降压起动

利用起动设备将电压适当降低，然后加在电动机的定子绕组上起动，以限制起动电流，等到电动机转速升到正常值时，再将电动机的电压恢复到额定值。这种起动方法称为降压起动。常用于较大容量的电动机在空载或轻载情况下起动。常用的降压起动方法有以下几种：

1. 定子绕组串联电阻或电抗降压起动图7-16所示为在定子绕组中串入电阻的起动线路。起动时，先打开开关 $K_2$ ，再合上开关 $K_1$ ，此时三相交流电源通过电阻 $R$ 加在电动机定子绕组上，其中电源电压的一部分降落在电阻 $R$ 上，从而使加在电动机定子绕组上的电压降低，达到了降压起动的目的。

待电动机转子转速上升至正常转速后，再合上开关 $K_2$ ，利用 $K_2$ 将电阻 $R$ 短路，则电动机就在额定电压下运行。

同理，可将电阻换为电抗进行降压起动，电抗起动比电阻起动时消耗电能较少，但设备成本较贵。

2. 星-三角起动 凡是正常运行时定子绕组作三角形连接的电动机，可利用星形与三角形变换绕组接法进行降压起动。如图7-17所示，为采用三相双投开关进行 $Y-\Delta$ 变换的起动线路。起动时，先将开关 $K_2$ 投向位置“1”，使定子绕组接成星形。然后合上开关 $K_1$ 起动电机，当转速升高后，

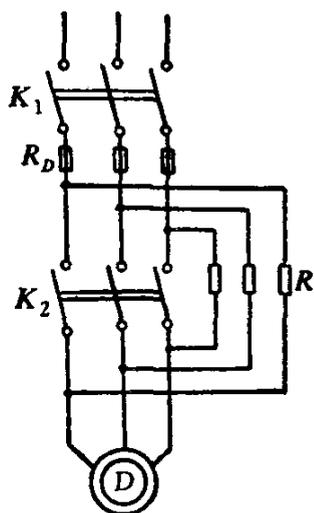


图 7-16 定子绕组串联电阻起动线路图

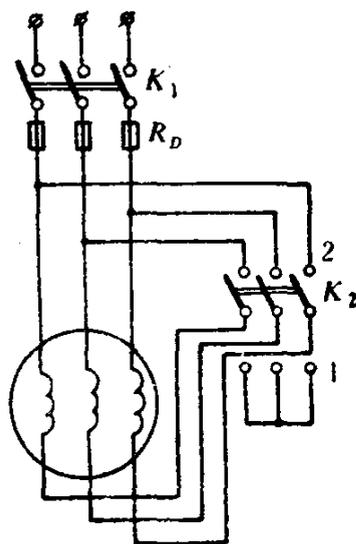


图 7-17 电动机星-三角起动线路图

再将  $K_2$  投向位置“2”，电机便接成三角形正常运行。

由第五章例5-3可知，星形接法时起动电流是三角形接法时的三分之一。因此这种方法对于降低起动电流很有效，

缺点是起动转矩降低较多，故一般只用于轻载或空载起动。由于这种起动方法简单，设备费用低，所以常为三角形连接的电动机采用。

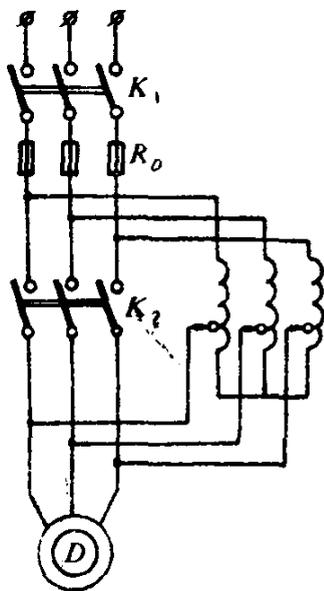


图 7-18 电动机采用自耦变压器起动的原理电路

### 3. 自耦变压器降压起动

这种起动方法是利用自耦变压器将电动机在起动过程中的端电压降低，以达到降压起动的目的。图7-18为原理接线图。

起动时，合上开关  $K_1$ ，电机的定子绕组便接在自耦变

压器的二次侧，降低了起动电压，从而减小了起动电流。待电动机转速上升至额定值后，再合上 $K_2$ ，于是电动机就工作在额定电压下正常运行。

自耦变压器降压起动的设备通常可分手动和自动控制两类。用这种方法起动的特点是，电动机的起动转矩较大，但设备较复杂，通常用于高压或大容量电动机的起动。

## 第四节 三相异步电动机的运行与维护

### 一、起动前的检查

异步电动机在起动前应做如下检查，以利电动机的安全运行。

(1) 新装的和停机三个月以上的电动机，起动前应测量绝缘电阻，看其是否符合绝缘标准。一般对于低压电动机可用摇表进行测量，高压电动机要进行耐压试验。

(2) 检查电动机端盖、轴承压盖及机座等处螺丝有无松动现象。

(3) 用手拨动转子，检查转动是否灵活，有无摩擦杂音，并检查轴承润滑等情况。

(4) 检查导线、熔丝与开关接触处是否紧密，有无松动，断股等现象。

(5) 检查接地线接触是否可靠。

(6) 检查传动装置是否良好。

(7) 检查三相电源电压是否对称。

(8) 通知有关人员，说明电动机即将起动。

### 二、起动时应注意的事项

(1) 合上开关后，如果电动机转子不转动，应立即拉

闸，查明原因，消除故障后才允许重新合闸；

( 2 ) 合上开关后，如果电动机发生异常响声，应立即拉闸，检查电动机和传动装置及保险等；

( 3 ) 合上开关后，应注意观察电动机带动的机械及电流表、电压表的情况，如有异常，应立即拉闸检查；

( 4 ) 起动时如发现电动机冒火或电动机振动过大，应立即停机检查；

( 5 ) 一般电动机空载起动不能连续超过 3 ~ 5 次，在运行中停机不久再次起动不能连续超过 2 ~ 3 次；

( 6 ) 若电动机运转方向反了，应立即拉闸调换电源任意两相的接线即改变三相的相序，从而改变了旋转磁场的旋转方向，也就改变了电动机的转动方向。

### 三、运行中注意事项

发电厂中的大型电动机都装有继电保护装置，在电动机发生事故时，保护装置动作使电动机脱离电源。对于用熔断器保护的电动机应注意监视其运行情况；如果合上开关，电动机运转后，电动机处于无人监视下运行，当发生故障时（特别是当一相熔丝烧断，电动机在缺相运行情况下），不及时处理，就会烧毁电动机，因此要对电动机进行运行监视。

( 1 ) 通过看电压表监视电源电压的变化。要求电压的变化与电动机额定电压的偏差在  $\pm 5\%$  范围内，同时要求三相电压基本对称。

( 2 ) 由电流表监视电动机的三相电流。要求电流不能超过电动机铭牌上规定的额定电流。没有装电流表的电动机，可利用钳形电流表定时检查三相电流是否平衡或过载。

( 3 ) 监视电动机的温升。电动机在运行中都不能超过

制造厂所规定的温升限度。大型电动机都用温度计监视，没有温度计的一般可用手摸外壳的方法来判断。当手觉得非常烫以致难以忍受时，说明电机温度已超过 $90^{\circ}\text{C}$ 了。此外还要注意轴承的温度是否正常。

(4) 在运行中要经常检查电动机有无不正常的振动和响声。在正常运行时电动机产生一种均匀的响声，没有杂音和怪叫声。若运行中发出特别大的嗡嗡声，表示电流过大，这是由于过负载或各相电流显著不平衡引起的；发出时高时低的嗡嗡声，而且机身振动，表示转子断条；如发出丝丝声，表示轴承润滑油不足；咕噜咕噜声，表示轴承中钢珠损坏；若从定子外壳上能听到嘶嘶声，表示定子叠片松弛；不均匀的喳喳声，表示定子与转子相摩擦。运行人员发现电动机有不正常的音响后，应立即停机，对电动机进行检查、修理，校正安装。

(5) 电动机在运行中如运行人员嗅闻到有绝缘漆的焦味，应立即切断电源，停机检查。

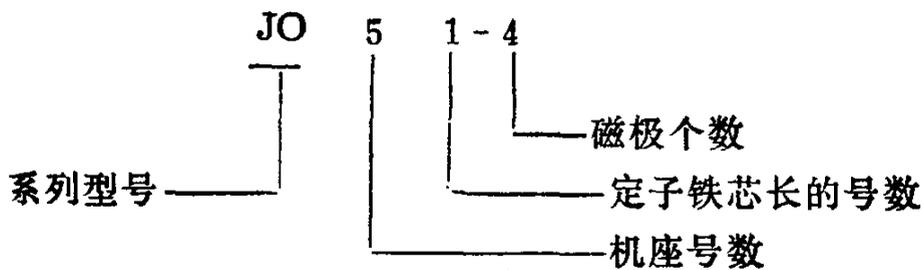
除此以外，还应注意轴承，通风等情况是否良好。

## 第五节 三相异步电动机的铭牌

每台电动机的机座都装有一块铭牌，上面记载着这台电动机的各种额定值和性能，它对我们使用，检查和修理电动机都有很大帮助。

现将铭牌中主要项目的意义作一简单介绍。

1. 型号 型号表示电动机的种类和型式。国产电动机的型号一律用汉语拼音字母和数字表示，例如：



型号中汉语拼音代号的意义见表7-1:

表 7-1 异步电动机型号中字母的意义

字 母	汉 语 名 称	字 母	汉 语 名 称
J	交 流 异 步	B	防 爆 型
L	铝 绕 线	O	封 闭 型
D	多 速	K	高 速
R	绕 线 式	Z	起 重、冶 金
Q	高 起 动 转 矩	H	高 转 差 率
S	双 鼠 笼		

2. 额定容量  $P_e$ 。 额定容量又称额定功率，指在额定运行情况下，电动机轴上输出的机械功率，单位是千瓦。

3. 额定转速  $n_e$ 。 电动机在额定频率和额定负载下运行时，每分钟的转数叫做额定转速。

4. 额定电压  $U_e$ 。 在额定运行情况下，定子绕组端应加的线电压值。通常在铭牌上标有两种电压值，例如380/220伏，表示定子绕组采用三角形或星形连接时的线电压值。

5. 额定电流  $I_e$ 。 电动机在额定运行情况下，定子的线电流值。对应于定子绕组的不同接法，通常在铭牌上标有两种额定电流值。

6. 额定功率因数  $\cos\varphi_e$ 。  $\varphi_e$ 表示电动机在额定运行状态下，定子相电流与相电压之间的相位差。

7.接法 三相异步电动机定子绕组有两种接法，星形和三角形接线，究竟采取哪种接法取决于电源的电压。

8.定额 定额也称工作方式，分为三种。

(1)连续：表示电动机在额定条件下可以长时间连续使用，绕组不会过热。

(2)短时：表示电动机不能连续使用，只能按制造厂规定的时间短时使用。

(3)断续：这种电动机的工作是短时的，但是可以多次断续重复使用。

9.温升 温升是指电动机绕组温度比规定环境温度（一般是 $35^{\circ}\text{C}$ ）所高出的度数。例如铭牌上的温升是 $60^{\circ}\text{C}$ 那就是说电动机定子绕组的温度不能超过 $60+35=95$ 度。

此外，铭牌上还注明有电源频率，电机重量以及制造厂名，出厂编号，出厂年月等。

## 思考题与习题

7-1 为什么目前使用得最广泛的电动机是异步电动机？

7-2 异步电动机由哪几部分组成？各起什么作用？

7-3 什么叫旋转磁场？三相异步电动机的旋转磁场是如何产生的？

7-4 异步电动机的旋转磁场的转速、磁极对数和电源频率之间有什么关系？

7-5 何谓同步转速？什么叫异步？

7-6 如何改变三相异步电动机的转子转向？

7-7 什么叫异步电动机的转差率？

7-8 电动机铭牌上有哪些主要数据？各代表什么意义？

7-9 鼠笼式异步电动机为什么要降压启动？常用的降压启动方法有哪几种？试比较其特点？

7-10 启动电动机时应注意些什么？在运行中应监视哪些方面？

7-11 已知一台  $\text{JO}_2-61-2$  型三相异步电动机的磁极对数  $P=1$ ， $n_e=2940$  转/分，电源频率为 50 赫，求此电动机的额定转差率。

## 第八章 电气设备的二次电路

为满足安全生产和可靠供电的需要，电力系统除了安装一次电路所需的设备外，还需要安装二次电路设备，以实现  
对一次电气设备的控制、监视及保护。

电气设备的二次电路（或称二次回路），包括控制电路、保护电路、监视电路、测量电路及自动控制电路等五部分组成。但并不是每个电气设备均完全具备这些电路，而是根据设备的容量，生产过程中的重要程度及生产流程要求等分别配备所需电路。

### 第一节 控制电路

控制电路也称操作电路，就是按照生产要求、值班人员能够就地或远方控制电气设备运行（或停用）的接线电路。

控制电路的接线一般可分为两大类，一种是利用操作开关（或按钮）接通或切断控制电路的方法来控制电源开关合闸或断路，使电气设备达到运行与停止的目的。这种接线在一般低压设备电路中采用，例如第七章的图7-14、7-15和图8-1为三相异步电动机的简单控制电路，该种接线是符合低压设备，如交流接触器、直流接触器、磁力启动器等电气设备的  
要求而设计的。这种控制电路的电源，一般是直接由动力本身的电源供给。即根据开关磁力线圈的额定电压等级，有取用相电压作为控制电源的，也有取用线电压作为控制电

源的。同时，为了提高重要设备的供电可靠性，实现自动控制和程序控制，除保留动力本身电源作为控制电源外，还应增加弱电电源或直流电源作为附加控制电路。如利用控制继电器的动作，代替人为的操作开关（或按钮），即可实现控制动力设备的运行与停止。

另一种是利用操作开关（或按钮）接通合闸继电器、跳闸继电器或跳闸线圈电路的方法，控制开关设备的操作机构，达到电气设备运行或停止的目的。这种接线在一般高压设备及大容量低压设备二次电路中采用。它是配合带操作机构的各种类型开关设计的。它的控制电源一般都采用专用的直流电源供电（如图 8-2），也有用专用的交流电源供电。

## 第二节 保护电路

为了防止电气设备可能发生各种类型的故障，保证人身安全，减少设备的损坏程度及保证重要用户的可靠运行，要求装设各种保护装置，并要求保护装置有足够的可靠性，选择性与灵敏度。为达到上述目的，仅在一次接线电路中采取某些保护装置，如熔断器、一次过电流继电器等是很不够的，因此有必要增设保护电路。

保护电路是采用各种类型的继电器，或利用控制电路的特殊接线来实现的。保护继电器线圈均采用小电流，低电压电源供电。除了保护低电压小容量电气设备的继电器是直接取用电源外，高电压或大容量电气设备的继电器线圈都是间接取用电源的。也就是说，电流的取用是通过接在电气设备一次接线中的电流互感器，将大电流变成小电流输出，作为供给电流型继电器线圈的电流（如图 8-2）。但电流互感器

的选用应保证电气设备在额定电流时，二次电流不应超过 5 安培。电压的取用，是通过接在该电气设备电源上的电压互感器，将高电压变成低电压（一般二次线电压为 100 伏）输出，作为供给电压型继电器线圈的电源。

保护电路的元件是根据电气设备在生产过程中的地位，电气设备本身的要求配置的。保护电路实际上就是利用保护继电器的触点，切断磁力开关线圈的控制电路或接通控制电路中的跳闸电路，使开关设备跳闸，切断动力电路电源，达到保护电气设备的目的。

### 第三节 测量电路与监视电路

测量电路就是表计电路。它可将电气设备的运行情况直接告诉人们，如电流表、电压表是直接反映电气设备工作情况；功率表、电度表是指示或计量电气设备用电情况的。

测量电路的电源与保护电路的电源一样，除低电压小容量电气设备直接取用于动力电源外，其余高电压及大容量电气设备的测量电路电源，都是通过电流互感器，电压互感器间接取用的。

监视电路就是监视电气设备工作情况的电路。监视电路是由灯光监视电路和音响电路两部分组成。

灯光监视电路有两种形式，一种是直接说明某种光字信号电路，另一种是指示电气设备工作状况的指示灯电路。光字信号电路的电源，一般都采用专用电源供电，如直流电源或低压交流电源；一般是利用保护继电器或开关设备的辅助接点，接通某信号灯的电路，而使该信号灯亮，指示出设备发生了某种异常。电气设备工作状况的指示灯电路的电源，

一般都取用控制电路电源。指示灯的装设，有表示电气设备在运行状态的红灯和表示电气设备在备用状态的绿灯，特殊电路还装设有表示事故自动跳闸的黄灯。红、绿指示灯的作用有三：一是指示电气设备的运行与停止状态，或指示机械设备的开启或关闭状态；二是监视控制电路的电源是否正常；三是利用红灯来监视跳闸电路是否正常，用绿灯监视合闸电路是否正常。同时，在较重要的电气设备二次接线中，增设闪光电源电路，当电气设备自动投入运行时，红灯会闪光。当电气设备自动跳闸时，绿灯会闪光。这样就可以通过红、绿灯来区分电气设备的工作状况。

音响电路是配合灯光监视电路而装设的另一种电路。为了及时排除故障，除该设备发出适当的灯光信号外，还发出适当的音响信号，以便于工作人员及时引起注意，并根据灯光监视发出的信号进行必要的处理。

音响电路一般是由延时警铃电路、瞬时警铃电路及事故喇叭电路组成。延时警铃信号表示电气设备发生了一般异常情况；瞬时警铃信号表示电气设备发生了急需处理的异常情况；事故喇叭信号表示电气设备及生产过程中发生了不能继续运行的故障，开关设备已自动跳闸。三种信号根据需要选用。它们的电源可与光字信号电路合用，也可由单独电源供电。

#### 第四节 自动控制电路

自动控制电路就是能够以最快的速度，最理想的条件，自动停用与故障设备在生产过程中有关的设备，自动启用故障设备的备用设备及自动调整电气设备运行情况的专用电

路。它是利用故障设备的开关继电器辅助接点及自动装置的继电器接点接于有关电气设备的控制电路中来实现的。它可以达到防止故障的扩大，尽可能的保证生产的继续进行及减轻工作人员劳动量的目的。

## 第五节 电气设备的二次接线举例

例8-1 图 8-1 是一台低压交流电动机的电路图。其中，三相交流电源通过熔断器 $1RD$ 、 $2RD$ 、 $3RD$ 、磁力启动器主触点 $Q$ 、再经过接于 $A$ 、 $C$ 相的热继电器的热元件 $RJ$ 和接于 $B$ 相上的电流互感器 $LH$ ，送给电动机。这部份电路为电动机 $D$ 的一次电路。电动机的二次电路接线部分是 $A$ 相电源经过停止按钮 $TA$ 、启动按钮 $HA$ 、热继电器触点 $RJ$ 、磁力启动器线圈 $Q$ ，然后接到 $C$ 相电源。在整个电路中，停止按钮与启动按钮是作为控制用的；热继电器触点 $RJ$ ，是电动机的过负荷保护。此外，当电源电压低到一定程度时，启动器线圈由于吸力不够而使其辅助触点 $Q$ 断开，因而切断了控

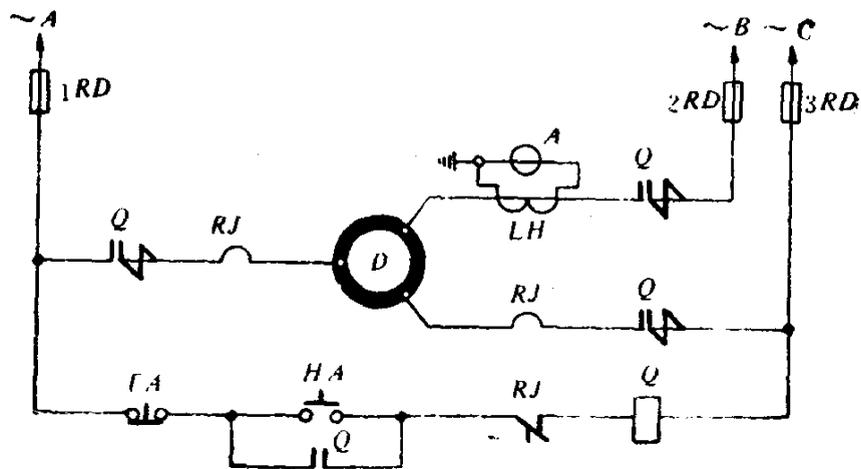


图 8-1 低压电动机接线图

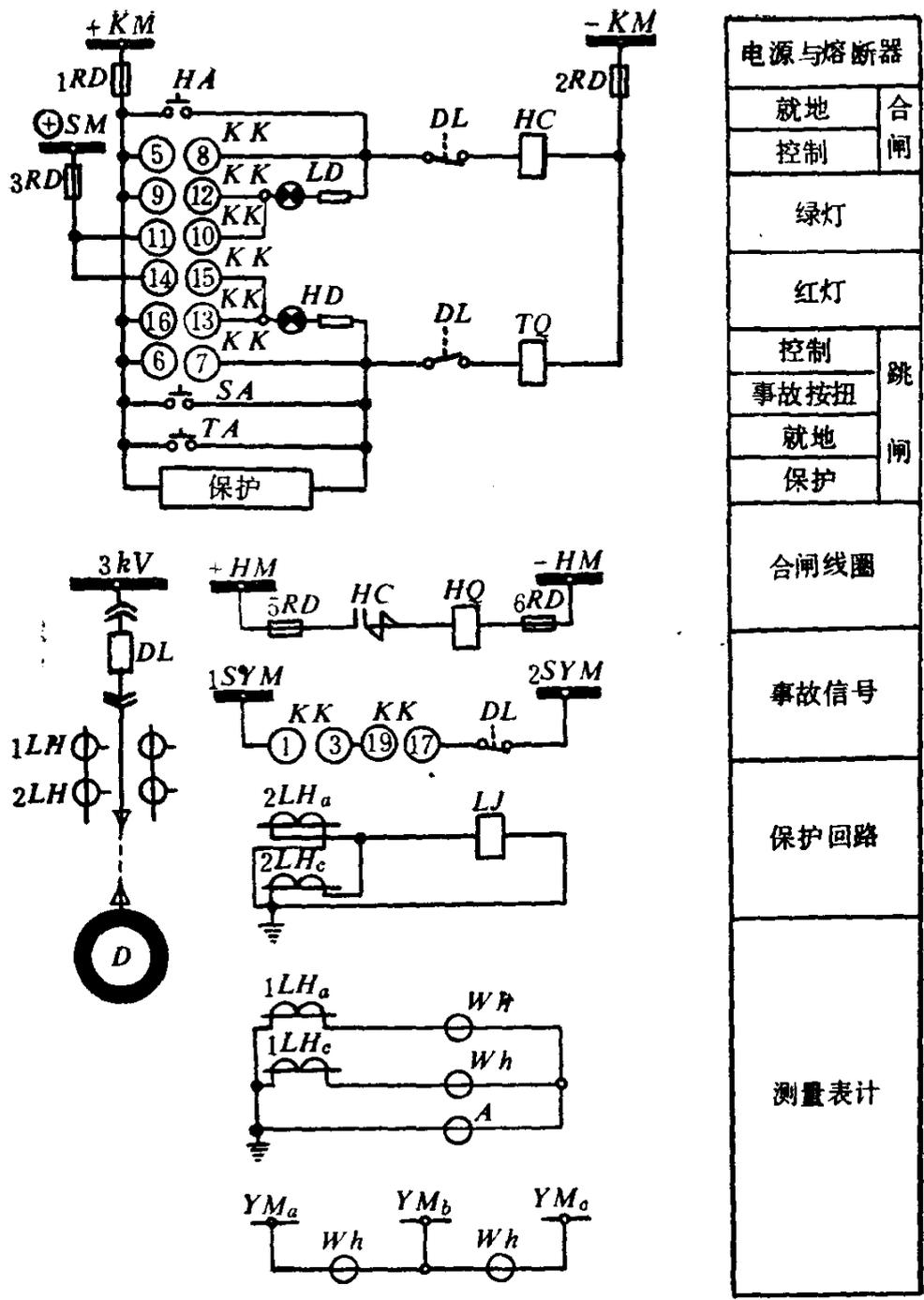
制电路电源；当电源电压恢复后，该电动机就不会自行启动，因为此时辅助触点  $Q$  是断开的。这是利用控制电路的辅助触点的自保持作用来达到低电压保护目的。电流互感器  $LH$  的二次接电流表  $A$ ，是供测量用的。

例 8-2 图 8-2 是一台高压（3 千伏）交流电动机的接线图。一次电路是由高压电源经过断路器  $DL$ 、电流互感器  $1LH$ 、 $2LH$  和电缆，至电动机。电动机的停止和运行，决定于断路器  $DL$  的跳闸和合闸。

断路器  $DL$  的跳闸与合闸，是由控制电路来完成的。控制电路的电源是由直流电源供给，利用操作开关  $KK$  位置的改变，使操作开关触点接通或断开，来控制断路器的合闸或跳闸。红灯  $HD$  与绿灯  $LD$  是作为监视电路用的。事故信号电路是当断路器自动跳闸时发出音响信号用的。合闸电路是因为断路器合闸时，需要很大的电流，才能吸起合闸铁芯，使操纵机构动作合闸，因此，专设合闸电路。

图 8-2 中，操作开关  $KK$  共有预合闸、合闸时、合闸后、预跳闸、跳闸时、跳闸后等 6 个位置。

1. 操作开关  $KK$  在跳闸后的位置 操作开关  $KK$  的触点 ⑨⑫和 ⑭⑮接通。操作电源  $+KM$  经熔断器  $1RD$ 、 $KK$  ⑨⑫触点、绿灯  $LD$ 、断路器  $DL$  常闭辅助触点（断路器跳闸后接通，合闸后断开的触点）、合闸接触器  $HC$  线圈、熔断器  $2RD$ ，到操作电源  $-KM$ ，回路呈通路，绿灯亮。此时由于灯泡与串联电阻的电阻很大，合闸接触器  $HC$  线圈，虽有一定电压和一定电流通过，但达不到合闸接触器启动所需的电压、电流，因而合闸接触器  $HC$  不会启动。闪光电源  $\oplus SM$  经  $3RD$ 、 $KK$  ⑭⑮触点、红灯  $HD$ ，到断路器  $DL$  常开辅助触点（断路器合闸后通，跳闸后断开的触点），此时该触点断



电源与熔断器	
就地	合闸
控制	跳闸
绿灯	
红灯	
控制	跳闸
事故按钮	
就地	
保护	
合闸线圈	
事故信号	
保护回路	
测量表计	

图 8-2 高压电动机二次接线图

开，切断了电路，故红灯不亮，只有当自动控制电路使该断路器自动合闸后，该触点接通，此电路再经跳闸线圈  $TQ$ 、熔断器  $2RD$  到操作电源  $-KM$ ，电路呈通路，红灯闪光。

2. 操作开关  $KK$  扭到预合闸位置 操作开关  $KK$  触点⑪⑩ ⑯⑬、 通，闪光电源  $\oplus SM$  经熔断器  $3RD$ 、 $KK$ ⑪⑩触点、绿灯  $LD$ 、断路器  $DL$  常闭辅助触点、合闸接触器  $HC$  线圈、熔断器  $2RD$ ，到操作电源  $-KM$ ，电路呈通路，绿灯闪光，表示断路器准备合闸。操作电源  $+KM$  经熔断器  $1RD$ 、 $KK$ ⑯⑬触点、红灯  $HD$ ，到断路器  $DL$  常开辅助触点，此时该触点断开，电路不通，红灯不亮。事故信号回路中操作开关  $KK$  仅 通， $KK$ ⑲⑰ 不通，电路不通，不发信号。

3. 操作开关  $KK$  扭到合闸时的位置 操作开关  $KK$  触点⑤⑧ ⑪⑩ ⑯⑬ 通，操作电源  $+KM$  经熔断器  $1RD$ 、 $KK$ ⑤⑧触点、断路器  $DL$  常闭辅助触点、合闸接触器  $HC$  线圈、熔断器  $2RD$ ，到操作电源  $-KM$ ，电路呈通路。此时，全部电压都加到合闸接触器  $HC$  线圈上，使合闸接触器  $HC$  启动。在合闸线圈电路中，合闸电源  $+HM$  经熔断器  $5RD$ 、合闸接触器  $HC$  主触点、合闸线圈  $HQ$ 、熔断器  $6RD$ ，到合闸电源  $-HM$ ，电路呈通路；很大的电流通过合闸线圈，吸起断路器的合闸铁芯，利用合闸铁芯的强大冲击力，将断路器合闸。其余操作开关  $KK$  触点⑪⑩ ⑯⑬、 通的作用同预合闸情况。但此时由于操作开关  $KK$ ⑤⑧触点接通，短接了绿灯  $LD$ ，故绿灯停止闪光。

4. 操作开关  $KK$  扭到合闸后位置 操作开关  $KK$  触点⑪⑩ ⑯⑬、 ⑲⑰通，闪光电源  $\oplus SM$  经熔断器  $3RD$ 、 $KK$ ⑪⑩、绿灯  $LD$ ，到断路器  $DL$  常闭辅助触点，由于断路

器  $DL$  已合闸，该辅助触点断开，电路不通。常闭辅助触点  $DL$  的作用是当断路器自动跳闸时（包括接通事故按钮  $SA$ ，保护动作等），该辅助触点接通，使电路呈通路，绿灯闪光，表示该断路器事故跳闸。操作电源  $+KM$  经熔断器  $1RD$ 、 $KK$  ⑩⑬、红灯  $HD$ 、断路器  $DL$  常开辅助触点、跳闸线圈  $TQ$ 、熔断器  $2RD$ ，到操作电源  $-KM$ ，电路呈通路，红灯亮。此时，由于灯泡与串联电阻的电阻很大，跳闸线圈  $TQ$  虽有一定的电压，并通过一定的电流，但未达到跳闸线圈启动所需要电压和电流，故跳闸线圈不会启动。在事故信号电路中， $1SYM$ 、 $2SYM$  是事故信号小母线，当断路器  $DL$  在合闸状态时，该电路中断路器  $DL$  常闭辅助触点在断开位置，因此操作开关  $KK$  ①③、⑱⑰ 触点虽都接通，但电路不通。只有当断路器自动跳闸时，该电路中断路器  $DL$  常闭辅助触点才接通，电路呈通路，就会发出音响信号。

5. 操作开关  $KK$  扭到预跳闸位置 操作开关  $KK$  触点 ⑨⑩、⑭⑮、通，操作电源  $+KM$  经熔断器  $1RD$ 、 $KK$  ⑨⑩触点、绿灯  $LD$ ，到断路器  $DL$  常闭辅助触点，由于该断路器在合闸状态，该触点不通，故电路不通，绿灯不亮。闪光电源  $+SM$  经熔断器  $3RD$ 、 $KK$  ⑭⑮ 触点、红灯  $HD$ 、断路器  $DL$  常开辅助触点、跳闸线圈  $TQ$ 、熔断器  $2RD$ ，到操作电源  $-KM$ ，电路呈通路，红灯闪光，表示该设备准备跳闸。事故信号电路中，操作开关  $KK$  ⑱⑰ 被断开，信号电路解除。

6. 操作开关  $KK$  扭到跳闸时位置 操作开关  $KK$  触点 ⑨⑩、⑭⑮、⑥⑦ 通。操作开关  $KK$  触点 ⑨⑩、⑭⑮ 通的情况同预跳闸时一样。操作电源  $+KM$  经熔断器  $1RD$ 、 $KK$  触点 ⑥⑦、断路器  $DL$  常开辅助触点、跳闸线圈  $TQ$ 、熔断器  $2RD$ ，到操作电源  $-KM$ ，电路呈通路。此时全部电压加在跳闸线

圈上，跳闸铁芯吸起，利用冲击力将机构脱开，断路器 **DL** 跳闸。

断路器 **DL** 跳闸后，操作开关 **KK** 又恢复到跳闸后位置。

其余保护电路，测量表计电路从略。

### 思考题与习题

8-1 二次电路由哪几部分组成？试述它们的作用。

8-2 红、绿指示灯不亮，对电气设备有何影响？