

# 第一章 电路基本原理

## 第一节 电流与电压

$u(t)$  和  $i(t)$  这两个变量是电路中最基本的概念，描述了电路中各种不同的关系。

### 电荷与电流

电荷与电流的概念是说明一切电气现象的基础原则。而电荷也是电路的最基本的量。电荷是构成物质的原子的电气属性，单位是库仑 (C)。

通过基础物理学，我们了解到一切物质都是由被称为原子的基本粒子构造而成的，每个原子中都包含电子、质子和中子。我们还知道电子上的电荷带负电，每个电子上的电量是  $1.60210 \times 10^{-19}$  库仑。质子带与电子相等的正电荷。原子上质子与电子的数目相等，使其呈中性。

我们来考虑电荷的运动。电或电荷的独特之处就是它们可以移动，也就是说电荷可以从一个地方移动到另一个地方，从而转换成另外一种形式的能量。

当把一根导线接在电池（一种电源）的两端时，电荷受迫而运动，正电荷与负电荷分别向相反的两个方向移动。这种电荷的移动产生了电流。习惯上，我们把正电荷移动的方向或负电荷移动的反方向称为电流的方向，如图 1-1 所示。这种说法是由美国科学家、独创家本杰明·富兰克林提出的。即使我们知道金属导体中的电流是由于带负电荷的电子（运动）而产生的，（我们）也运用默认的习惯，将正电荷运动的方向定义为电流的方向。因此，电流是单位时间内电荷的变更率，单位是安培 (ampere, A)。

在数学上，电流  $i$ 、电荷  $q$  和时间  $t$  的关系为

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

将等式的两边同时进行积分，则可得到电荷在时间  $t$  和  $t_0$  之间的变更。有

$$q = \int_t^{t_0} i dt \quad (1-2)$$

在等式 (1-1) 中我们给电流  $i$  的定义表现了电流不是一个定值量，电荷随时间的变更不同，电流也与之呈不同的函数关系。

### 电压、电能与电功率

使电子在导体中定向运动须要做功或能量转换。功由外电动势供应，最典型的的就是图 1-1 中的电池。外电动势也可理解为电压或电位差。电路中， $a$ 、 $b$  两点之间的电压  $U_{ab}$  等于从  $a$  到  $b$  移动单位电荷所需能量（所做的功），有

$$U_{ab} = \frac{dw}{dq} \quad (1-3)$$

$w$  代表电能，单位是焦耳 (J)； $q$  代表电量。单位是库仑 (C)。电压  $U_{ab}$  的单位是伏特 (V)，为纪念独创伏达电堆的意大利物理学家亚历山德罗·安东尼奥·伏特而命名。因此电压（电位差）是移动单位电荷所须要的能量，单位是伏特 (V)。

图 1-2 显示了电气元件（用一个矩形框代替） $a$ 、 $b$  两点间的电压。符号+和-用来定义参考方向或电压极性。 $U_{ab}$  可以用两种方法诠释：①  $a$  点的电位比  $b$  点高出  $U_{ab}$ ；② 相对  $b$  点而言， $a$  点的电位是  $U_{ab}$ 。通常，有以下逻辑关系：

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

虽然电流和电压是电路中最基本的两个量，仅仅用它们两个是不够的。在实际应用中，我们还要知道功率和电能。为了将电能和电功率与电流和电压联系起来，我们回忆一下物理中讲过的功率是单位时间内汲取或消耗的能量，单位是瓦特（W）。我们用它表达电功率、电能之间的关系

$$p = \frac{dw}{dt} \quad (1-5)$$

其中  $p$  是电功率，单位是瓦特（W）， $w$  是电能，单位是焦耳（J）， $t$  是时间，单位是秒（s）。依据等式（1-1）、（1-3）、（1-5），我们得出

$$p = ui \quad (1-6)$$

由于  $u$  和  $i$  视乎时间而定，等式（1-6）中的功率  $p$  是（一个）时间变量，称为瞬时功率。电气元件产生或消耗的功率是元件两端电压和通过元件电流的乘积。假如功率带有“+”号，意味着功率被输出或者说该元件消耗功率。相反，假如功率带“-”号，意味着该元件释放功率。但怎样才能知道功率带“+”号还是带“-”号呢？

在确定功率符号时电流方向和电压极性起主要作用。因此留意图 1-3（a）中电压和电流的关系特别重要。若想要功率带“+”号，电压方向与电流极性必需听从图 1-3（a）中所示状况。这就被称为关联参考方向。在关联参考方向下，电流从电压的正极端流入。这种  $p = ui$  或  $ui > 0$  的状况意味着元件消耗电能。假如  $p = -ui$  或  $ui < 0$ ，向图 1-3（b）那样，（则表明）元件在释放或产生电能。

事实上，任何电路都必需遵守能量守恒定律。所以，电路中功率的代数和在任何时刻肯定是零，即

$$\sum p = 0 \quad (1-7)$$

这再次证明一个事实：电路中电能的总产生等于总消耗。由等式（1-7）可得从  $t_0$  到  $t$  时刻，电气元件产生或消耗的总电能为

$$w = \int_t^{t_0} p dt \quad (1-8)$$

## 其次节 电路元件

电路其实就是简洁地把各种元件连接到一起。在电路中有两种元件：无源元件和有源元件。有源元件能够产生电能，而无源元件则不能。电阻、电容和电感是无源元件中的代表，而电压源和电流源是有源元件中最重要的，通常为与之连接的电路供应电能。

### 独立电源

志向的独立电源属于有源元件，能供应固定的电压或电流，完全不受电路中其他因素的影响。

独立电压源是一种两端保持固定电压的二段元件，比如电池或发电机。该电压完全不受元件中电流的影响。在图 1-4 (a) 所示电压源的符号中，两端之间有  $u$  伏特的电压。图中的极性表示  $a$  端电位比  $b$  端高出  $u$  伏。这样，假如  $u > 0$ ，则表明  $a$  端电位比  $b$  端电位高；而假如  $u < 0$ ，当然表示  $a$  端电位比  $b$  端低。

在图 1-4 (a) 中，电压  $u$  可能是时变的，也可能是固定的。当电压固定的时候，我们可将其写作  $U$ 。图 1-4 (b) 中的符号通常用于固定电压源，例如两端电压为  $U$  伏的电池。对固定电压源而言我们既可以运用图 1-4 (a)，也可以运用图 1-4 (b)。

或许我们会发觉其实图 1-4 (b) 的极性标注有点多余，因为电源的极性可以通过长线与短线的相对位置推断出来。

独立电流源是供应固定电流的二段元件，元件中的电流完全不受电压的影响。图 1-5 是独立电流源的符号，其中  $i$  为固定电流，箭头的方向表明白电流的流向。

独立电源通常只给外电路输出电能而不消耗。那么假如电源两端的电压为  $u$ ，而电流  $i$  从电压  $u$  的正极流出，说明电源向外电路释放功率，其值为  $p=ui$ ；反之则为汲取功率。例如在图 1-6 (a) 中电池向外电路释放 24W 功率，而在图 1-6 (b) 中电池汲取 24W 功率。当对其充电时，就会发生这种状况。

### 受控源

志向受控源是一种有源元件，其输入量受另一电压或电流限制。

受控源通常用菱形符号表明，如图 1-7 所示。由于受控源的限制由回路中的电压、电流或其他因素来完成，而电源可以既是电压源又可以是电流源，所以受控源可分为四类，分别是：

- (1) 电压限制电压源 (VCVS)
- (2) 电流限制电压源 (CCVS)
- (3) 电压限制电流源 (VCCS)
- (4) 电流限制电流源 (CCCS)

晶体管、运算放大器和集成电路中的电路等元件的元件模型中可以用到受控源。

应当留意的是，志向电压源可以向电路供应随意电流以保证其端电压为规定值，而志向电流源可以向电路供应随意电压以保证规定电流。因此，理论上志向电源可以供应无限的电能。还应当留意的是电源不仅为电路供应电能，还可以消耗电路中的电能。对电压源而言，我们知道它的输出电压，而不能确定输出电流；同理，我们可以确定电流源的输出电流但不能确定其输出电压。

## 第六节 正弦沟通电路分析与三相电路

### 电路元件的相量关系

通过建立电阻、电感、电容三种无源器件相电压与相电流之间的关系，我们可以将正弦稳态电路的分析进一步简化。

电阻是最简洁的状况。在时域中，如图 1-17 (a) 所示，若通过电阻  $R$  的电流为  $i=I_m\cos(\omega t+\varphi)$ ，依据欧姆定律， $R$  两端的电压则为

$$u(t)=Ri(t)=RI_m\cos(\omega t+\varphi) \quad (1-23)$$

换成相量形式则为

$$\dot{U}_m = RI_m\angle\varphi = R\dot{I}_m \quad \dot{U} = R\dot{I} \quad (1-24)$$

图 1-17(b)表明在相量域内电阻的电压-电流关系依旧与时域中一样遵循欧姆定律。式 1-24 中电压和电流的关系是矢量关系，如图 1-18 的相量图所示。

对于电感  $L$  而言，假设流过内部的电流为  $i=I_m\cos(\omega t+\varphi)$ ，则电感两端的电压为

$$u=L\frac{di}{dt}=-\omega L I_m\sin(\omega t+\varphi) \quad (1-25)$$

还可写作

$$u=\omega L I_m\cos(\omega t+\varphi+90^\circ) \quad (1-26)$$

转换成相量形式为

$$\dot{U} = \omega LI_m e^{j(\varphi+90^\circ)} = \omega LI_m e^{j\varphi} e^{j90^\circ} = \omega LI_m\angle\varphi e^{j90^\circ} \quad (1-27)$$

由于  $I_m\angle\varphi = \dot{I}$ ， $e^{j90^\circ} = j$ ，故有

$$\dot{U} = j\omega L\dot{I} \quad (1-28)$$

表明电压的大小为  $\omega LI_m$ ，相位为  $\varphi+90^\circ$ ，电流与电压相位相差  $90^\circ$ 。详细说来，电压滞后电流  $90^\circ$ 。图 1-19 为电感的电压-电流关系图，图 1-20 为其相量图。

对电容  $C$  而言，假设两端的电压为  $u=U_m\cos(\omega t+\varphi)$ ，则流过电容的电流为

$$i=C\frac{du}{dt} \quad (1-29)$$

类似于电感的分析步骤，可得

$$\dot{I} = j\omega C\dot{U} \quad (1-30)$$

表明电压与电流相位相差  $90^\circ$ ，详细而言，电流超前电压  $90^\circ$ 。图 1-21 为电容的电压-电流关系，图 1-22 为其相量图。

### 正弦沟通电路分析

对于沟通电路，欧姆定律和基尔霍夫定律也同样适用。电路简化分析的方法（节点分析法、网孔分析法、戴维南定理等）都可以用以分析沟通电路。由于这些方法在直流部分都已经提过了，所以我们主要来介绍沟通电路的分析步骤。

沟通电路的分析通常包括三步：

- (1) 将电路变形为相量域或频域形式;
- (2) 用节点分析法、网孔分析法、叠加定理等解决;
- (3) 将相量形式的结果转换回时域形式。

### 三相平衡电压

典型三相系统包括三个电压源以及通过导线与之连接的负载。一个三相系统相当于三个单相电路。电路中的电压源既可以像图 1-23 (a) 那样作星形连接, 也可以像图 1-23 (b) 那样作三角形连接。

现在来看图 1-23 (a) 中星形连接的电压源。电压  $\dot{U}_{an}$ 、 $\dot{U}_{bn}$ 、 $\dot{U}_{cn}$  分别是 a、b、c 线之间的电压, 称为相电压。假如三个电压源的幅值和频率都相同, 而相位相差  $120^\circ$  的话, 就可称为三相平衡, 即

$$\dot{U}_{an} + \dot{U}_{bn} + \dot{U}_{cn} = 0 \quad (1-31)$$

$$|U_{an}| = |U_{bn}| = |U_{cn}| \quad (1-32)$$

由于三相电压相位互差  $120^\circ$ , 他们之间存在两种相序: 一种如图 1-24 (a) 所示, 用数学语言表示为

$$\dot{U}_{an} = U_p \angle 0^\circ$$

$$\dot{U}_{bn} = U_p \angle -120^\circ$$

$$\dot{U}_{cn} = U_p \angle -240^\circ = U_p \angle +120^\circ$$

其中  $U_p$  为电压有效值。这种相序称为 abc 相序或正序。在正序中,  $\dot{U}_{an}$  相位超前于  $\dot{U}_{bn}$ ,  $\dot{U}_{bn}$

超前  $\dot{U}_{cn}$ 。另一种状况如图 1-24 (b) 所示, 称为负序或 acb 相序。在负序中,  $\dot{U}_{an}$  超前  $\dot{U}_{cn}$ ,

而  $\dot{U}_{cn}$  超前  $\dot{U}_{bn}$ 。事实上, 相序就是相电压各自达到最大值的次序, 由相量图中各波形达到最高点的先后确定。

在三相配电系统中相序特别重要, 确定着负载电动机的转动方向。

与三相电源的连接形式一样, 三相负载也既可以作星形连接也可作三角形连接, 视实际应用而定。图 1-25 (a) 表示的是星形负载, 而图 1-25 (b) 表示的是三角形负载。在图 1-25 (a) 中, 假如没有中线, 则称为三线制系统, 否则称为四线制系统。(当然, 三角形连接的结构确定了不行能存在中线) 只有阻抗大小和阻抗角均相同, 才能称为平衡负载。

由于三相电源和负载都既可以星形连接又可以三角形连接, 故可以有四种组合方式: Y-Y 连接 (也就是 Y 形电源, Y 形负载)、Y- $\Delta$  连接、 $\Delta$ - $\Delta$  连接、 $\Delta$ -Y 连接。

在此提出平衡三角形负载比平衡星形负载应用更为广泛。因为负载作三角形连接时, 阻抗变更比较便利。星形连接时由于存在中线, 阻抗变更不太便利。而另一方面, 由于三相电压稍有不平衡就会在三角形电源的网孔中产生环流, 因而实际中三角形连接的电源并不常用。

# 其次章 电子学

## 第一节 引言

假如只是说现在我们生活在电子时代的话好像保守了点。从无处不在的集成电路到同样无处不在的计算机，我们每天都在接触电子设备和电子系统。在飞速发展的技术型社会中的每个领域——科学、工程、音乐、医药、维护甚至谍报领域中，电子学都起相当大，而且越来越大的作用。

总的来说，须要我们关切的工作都可以归结到“信号处理”方面。现在就来探究一下这一方面的详细含义。

### 信号

凡是其大小或随时间的变更包含信息的物理变量都可以称为信号。信息可以是无线广播的演讲和音乐，可以是室内温度一类的物理量，也可以是类似于股票交易记录的数字数据。在电子系统中，携带信息的变量是电压和电流。当我们说“信号”的时候，就意味着电压和电流。然而，我们探讨的很多概念都可以用在含有不同信息的变量的系统中，比如，机械系统和液压系统通常可以用相应的电气系统模拟代替。所以对电气系统性质的理解，为对更广泛范围的物理现象的理解奠定了基础。

### 模拟信号和数字信号

信号有两种方式来携带信息、模拟信号靠随时间连续变更的电压电流来携带信息，比如，在图 2-1 中，当两点的温度不相同，热电偶就会输出一个电压。假如两点间温度发生变更，那么热电偶两端的电压也跟着变更。这电压就是用模拟的形式体现了温度的差异。

另一种信号称为数字信号。数字信号可以在两个离散的范围呈现肯定值。这种信号常用于表示开-关或是-否的状态。在一般家用温度调整器中，就应用数字信号来限制炉温。当室温降到预设温度以下时，调整器温度闭合将炉子打开；当室温足够高时，开关断开使关闭。开关中的电流依据温度的变更输出一个信号：在“太冷”时使炉子打开，“不太冷”时使炉子关闭。

信号处理系统是一些部件与设备之间相互联系的状况，它可以接收一个或者多个输入信号，并将输入信号作某种形式的处理，比如提炼信息或提升信息的质量，并将信息在恰当的时间以恰当的方式输出。

图 2-2 描述了这种系统的部件组成。中间的两个图代表着两种处理方式（模拟和数字），而他们之间的方框代表模拟信号与数字信号的相应转换（A/D 为模-数，D/A 为数-模），其余的方框包含输入与输出——将信号带入或带出系统。

有很多有物理量转化而来的电信号是通过被称为传感器的仪器而得到的。我们已经接触过一类模拟传感器，即热电偶。热电偶将温度差（物理量）转化为电压（电量）。通常，传感器是将物理量或机械量转换成相应电压或电流的设备。然而，与热电偶不同的是，大多数传感器须要外加某种激励才能工作。

系统的输出可以有很多形式，取决于输入信号包含信息要达到的目的。要显示这些信息，既可以用模拟形式（例如用仪表指针的指向表示变量数值），也可以用数字形式（利用一系列数码显示管显示相应的数字），另外的形式有将输出转化为声音（用扬声器），或者将输出信号作为另一个系统的输入，再或者将输出作为某种触发信号。

## 第四节 运算放大器

### 引言

运算放大器属于高增益差动放大器，于二战期间臻于完善。运算放大器促成了模拟计算机的独创，有一段时间内模拟计算机称为“差动分析器”，因为当时用它来解差动方程。差动放大器还是很多重要仪器的基础组成部分。

模拟运算放大器由基本差动放大器、反馈电路以及其他供应线性响应、稳定度、漂移消退等属性的补偿放大电路组成。这种困难的形式是由于运算放大器既放大沟通信号也放大直流信号，各级放大之间不允许耦合的存在。这样的话，由于温度变更和电源波动等缘由产生的输出电压的漂移会导致一些长期的变更，隔离它们也就变得更加困难。

晶体管独创出来以后，固态运算放大器被用作积分电路。现在，运算放大器用来构造高品质、低功耗的模拟放大器，并且能够在很多状况下避开运用单独的晶体管放大电路。对大多数放大电路以及很多测量限制电路来说，只要采纳带反馈电路的运算放大器就可以满意设计要求了。运算放大器以双列直插式或其它形式在集成电路方面的应用使模拟信号问题的处理方式在很多方面上与数字逻辑问题相像，即通过集成电路间的相互联系。

### 运算放大电路

图 2-5 为运算放大器的符号。它有两个输入端：用+号标注的称为同向输入端，而用-号标注的称为反向输入端。运算放大器所放大的是两个输入电压的差值。由于放大器的开环增益可达到  $10^5$ — $10^6$  倍，所以即便只有几微伏的电压差也能输出相当可观的数值。由于运算放大器属于差动放大器，所以两个输入端之间必需建立起恰当的联系。

假如两个输入端分别加上两个不同的正电压，而同相端的电位比反相端高的话，运算放大器就会输出最大（饱和）值；假如电压关系换过来，即反相输入电压大于同相输入电压，则运算放大器会输出最小值，即负的饱和值。不论什么时候电压关系发生变更，输出极性都会很快速地转换过来。哪怕电压大小仅仅变更了几微伏，运算放大器也能马上输出一个足够大的电压波动，所以运算放大器很适合做比较器。

当运算放大器工作在线性范围之内时，必定在同相和反相输入端存在一点电压差异。在分析运算放大电路时，由于运算放大器的高开环增益，所以我们不能将输出差异忽视。有些状况下我们会将其看作 0。而由于负反馈的电压可以使输出端电压差减小，所以当输出电压反馈到输入端时输出电压不会接着增大。

运算放大器还具有两个另外的属性：输入阻抗大，约为  $10^6\Omega$ ；输出阻抗小，大约  $100\Omega$ 。这两个属性使运算放大器更加有用，因为它们使得电流很小的信号源也能干脆驱动运算放大器。同时，运算放大器也能驱动对信号有较高要求的设备。

概括起来，良好的运算放大器应当具有大到 100 万或更大的开环增益，特别小的同相端与反相端电压差，高输入阻抗，低输出阻抗。而志向的运算放大器的开环增益应为无穷大，同相端与反相端应等电位，输入阻抗无穷大，输出阻抗为零。

很多运算放大器须要两个大小相等但极性相反电源，典型的有  $\pm 12V$  和  $\pm 15V$ 。其它的运算放大器可能只须要一个单电源，如  $+15V$ 。运算放大器输出电压的有效范围大约是电源的 80%，当供电电源为双边  $\pm 15V$  时，输出的最大电压约为  $\pm 12V$ 。

很多运算放大器都存在其局限性，须要说明的有其中两个。一个是当信号频率上升时，增益会快速下降。频率即使上升微小——仅为  $10Hz$ ，电压增益就起先下降（每上升  $10Hz$ ，功率下降  $20dB$ ）。通过加入负反馈扩展频带，可以消退这种增益-频率的限制。另一种则为大多数运算放大器在输入信号变更时作出反应的速率不够。与数字门电路相比，运算放大器在这方面有缺陷。一般运算放大器的转换速率约为  $1V/\mu s$ 。TTL 数字门的转换速率大约是运算放大器的 500 倍。

应用负反馈产生的优势加强了运算放大器的重要性。运算放大器与门电路同时运用，处理分析数据，共同发挥最大优势。

## 第三章 电力电子技术

### 第一节 半导体开关

在电力电子系统中，半导体开关是至关重要的组成部件。半导体开关原来被认为可以当作机械开关的替代品，但是由于半导体本身性质以及制造工艺的缘故，受到了很大限制。

#### 开关损耗

电力电子装置中主要有两种损耗：①开关损耗②寄生损耗。寄生损耗包括电感和变压器的线圈电阻损耗、电容的介电损耗、磁滞和涡流损耗等。而开关损耗则相对显著，能够得到限制。开关损耗进一步可以分为三种：①通态损耗②断态损耗③暂态损耗。

#### 通态损耗

电气开关在通态时可以通过很大的电流，但开关两端存在电压。通态功率损耗由

$$P_{on}=u_{son}i_f \quad (3-1)$$

计算而得。

$u_{son}$  代表通态状况下的开关电压，而  $i_f$  代表通态状况下流过开关的电流。比如，典型的电力二极管和其他电力晶体管在通态时两端会存在约 0.5V-1V 的压降。通态电流也许为几百到几千安。所以说通态损耗特别重要。

#### 断态损耗

电气开关在断态可以承受很高的电压，但仍有漏电流从中通过。断态功率损耗由

$$P_{off}=u_{soff}i_r \quad (3-2)$$

计算而得。

$u_{soff}$  代表断态反向电压，而  $i_r$  代表开关中的反向电流。比如，典型电力二极管和其它电力晶体管在断态时反向电压会高达几百到几千伏，而反向电流只有几微安到几毫安。

#### 暂态损耗

实际开关设备的电压转换速度和电流换向速度都受到限制。这样的转换速度使开关器件中的功率损耗更加上升。我们分别从两种负载状况探讨开关损耗：感性负载和容性负载。

#### 感性负载中的开关

假设电感足够大，从而它产生一个稳定的电流  $I_o$ 。设初始开关是断开的，电感通过二极管 V1 放出大小为  $+I_o$  的电流。当开关闭合时，流过开关的电流起先由零线性地增大至  $+I_o$ ，其间二极管 V1 维持导通。导通的二极管两端电压为零（志向二极管），那么，开关两端的电压保持定值  $U_s$ 。当电流不再上升，二极管截止，开关两端的电压线性地下降至零。

当开关再次断开，两端电压又起先线性地上升至  $+U_s$ ，其间二极管 V1 截止，流过开关的电流与流过电感的电流都为  $I_o$ 。开关两端的电压达到零以后，流过开关的电流起先由  $I_o$  向下着陆，着陆的电流通过此时导通的二极管流通。最终流过开关的电流下降至零。如图 3-1 所示，为感性负载的开关波形。

其开关损耗由

$$P_{sw}=\frac{1}{2} U_s I_o [t_{on1}+t_{on2}+t_{off1}+t_{off2}] f (s) \quad (3-3)$$

计算得出。

感性负载中的开关功率损耗与阻性负载类似，但数值上大约是阻性负载功耗的六倍。开关频率的上限也大约是阻性负载的一半。

$$f_{s\max} = \frac{1}{t_{on1} + t_{on2} + t_{off1} + t_{off2}} \quad (3-4)$$

### 容性负载中的开关

假设电容足够大，从而产生一个稳定的电压  $U_o$ 。设初始开关是闭合的，那么流过开关的电流是  $I_s$ ，电容两端的电压为  $U_o$ ，开关两端的电压为零，二极管 V1 反偏。当开关断开时，开关两端的电压起先上升至  $+U_o$ ，其间二极管始终截止。电压上升的过程中，通过开关的电流保持为  $I_s$ 。当电压不再上升时，二极管导通，开关两端的电压固定为  $U_o$ ，流过开关的电流线性地降到零。

当开关再次闭合时，流过其中的电流起先线性地上升至  $I_s$ ，其间二极管 V1 维持导通。开关两端的电压保持定值  $U_o$ 。流过开关的电流到达  $I_s$  之后，二极管截止，开关两端的电压线性地降到零。

容性负载的开关损耗与感性负载大致相像。

减小开关损耗的方法通常有两种：①将开关中的能量转移至无损耗电路，或者②在零电流或零电压状态下开关。第一种方法称为缓冲，其次种称为零电压或零电流开关。

## 第四章 电机学

### 第一节 感应电机运行原理

图4-1所示的旋转磁铁和铜盘试验说明白感应电机运行的基本原理。当蹄形磁铁转动时，旋转磁场穿过磁盘，使其内部产生感应电流。产生的定向电流致使铜盘跟随蹄形磁铁的旋转而转动。依据弗莱明右手定则，当旋转方向如图所示时，感应电流的方向亦如图所示。

弗莱明右手定则：将右手的拇指、食指和中指均相互垂直放置，食指指向磁场的方向，拇指指向导体相对运动的方向，则中指的方向就是感应电动势的方向。应当留意导体相对运动的方向与磁场旋转方向相反。

通过应用弗莱明右手定则，可以确定铜盘所受的力与磁场旋转的方向一样。

弗莱明左手定则：将左手的拇指、食指和中指均相互垂直放置，食指指向磁场的方向，中指指向感应电流的方向，则拇指的方向就是受力的方向。尽管铜盘会随着旋转磁场一同旋转，但它恒久不会达到与磁铁同样的速度。这是因为假如可以达到的话，它们之间就不存在相对运动了，而铜盘中的感应电流也随之失去。旋转磁场与铜盘的速度差称为滑差，它对于感应电机的运行至关重要。感应电动机中，旋转磁场由定子绕组供应，而转子的导体中产生感应电流。虽然蹄形磁铁和铜盘与现在的感应电机结构上有相当大的差异，但是基本工作原理是相通的。

旋转磁场对感应电动机的运行至关重要。在实际电机中旋转磁场是通过空间上交替布置的绕组和时间相位上相互交替的励磁电压来实现的。

转子由叠在一起的硅钢片冲压而成，转子绕组由带有冲压槽的导杆组成。导杆两端用短路环进行短路。带有短路环而不含铁芯在内的结构称为鼠笼型，如图4-2所示。在小型或中型功率的电机中，转子用铸铝来代替铁芯。在大功率沟通电机中，铸铝铁芯并不适用，所以在槽内插入铜导杆。铜导杆在两端都用铜短路环予以短路，短路环被焊在导杆上。有时候运用青铜或其它合金代替铜制作鼠笼以及短路环。不同的转子生产厂家对于运用铸铝还是铜的分界点不同，但几乎全部上千马力的电动机转子都运用带导杆的铁芯。

另一种取决于电动机大小的结构特点是运用的绕组类型。对中小型沟通电机来说，大多数采纳散绕形式。这类绕组采纳圆形截面的导线构成，将它们放入定子槽内，使之在尾端呈现菱形。由于导线随意地绕在固定线圈上，所以称为“散绕”。而对于大型沟通电机，尤其是2300V以上的高电压电机来说，就要用到模绕线圈了。这些线圈采纳矩形截面的导线构成，将它们弯曲成型后缠上绝缘带。在制作定子绕组时，线圈被做成适当的尺寸，以便将整个线圈放入定子槽内。由于将模绕线圈在放入定子槽之前更易增加额外绝缘，所以它的高电压绕组中得到应用。

以上内容仅为本文档的试下载部分，为可阅读页数的一半内容。如要下载或阅读全文，请访问：<https://d.book118.com/278100100011006115>