

# 《项目1 直流电路的应用》单元教学设计

## ——《任务1.1 电路的基本概念及常用电路元件》

 课 题	<h3 style="color: #00AEEF;">一、电 路</h3>		 课型	新课
授课班级			授课时数	1
教学目标	1. 理解电路的组成。 2. 理解电路的状态。 3. 能识读基本的电气符号和简单的电路图。			
教学重点	能识读基本的电气符号和简单的电路图。			
教学难点	能识读基本的电气符号和简单的电路图。			
教学方法	读书指导法、分析法、演示法、练习法。			
时间分配	<b>教学内容</b>			<b>教学方 法</b>
<b>导入新课</b> 5min	<p>众所周知，公路是走车辆行人的，水路是走船只的，航线是飞机飞行的路线，那电路是谁通行的路线呢？电路就是电流流过的路径，例如常见的手电筒，它的电路就如图 1.1 所示，合上开关，电流从电源正极流出，通过导线传输，经过开关、灯泡回到电源负极，形成电流通路，灯泡发光；断开开关，电路不通，电流被阻断，灯泡不亮。</p> <div data-bbox="384 1086 1157 1310" style="text-align: center;">  </div> <p style="text-align: center;">图 1.1 手电筒实物电路</p>			通过让学生观察常见的电路，引发其思考。
<b>讲授新课</b> 30min	<p><b>1.电路的组成</b></p> <p>电路是由电源、负载、导线和开关等按一定的方式连接起来的闭合回路。</p> <p><b>【电源】</b> 电路中把其它形式的能转换成电能的装置，其作用是向负载提供电能。常见的有干电池、蓄电池和发电机，如图 1.2 所示。</p> <div data-bbox="391 1579 1189 1758" style="text-align: center;">  </div> <p style="display: flex; justify-content: space-around;"> <span>(a) 干电池</span> <span>(b) 蓄电池</span> <span>(c) 发电机</span> </p> <p style="text-align: center;">图 1.2 常见电源</p> <p><b>【负载】</b> 负载又称为用电器，它是消耗电能的装置，其作用是把电能转换成其它形式的能，常见的有电灯、电炉、电动机等。</p> <p><b>【导线】</b> 用来把电源和负载连接成一个闭合回路，在电路中承担电流输送与分配的任务。常见的导线有铜线和铝线，如图 1.3 所示。</p>			运用演示法进行教学。         可联系实际，举出适当的例子。



图 1.3 常见导线截面图

**【开关】** 用来把电源和负载接通或断开的装置，常见的有按钮、空气开关等。

例如图 1.4 所示手电筒实物电路的电路图。在电路图中，电路组成的元器件和连接情况是用国家统一规定的图形和文字符号来表示的。

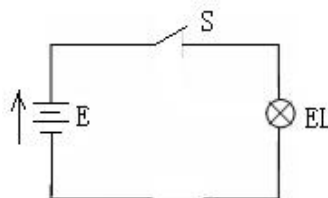


图 1.4 手电筒电路图

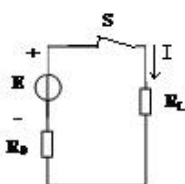
## 2. 电路的状态

**【通路】** 也称为闭路。如图 1.5 (a) 所示，当开关 S 闭合，电路中有电流流过，即为通路状态。

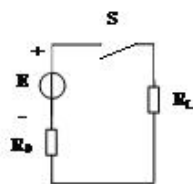
**【开路】** 也称为断路。如图 1.5 (b) 所示，当开关 S 断开，电路中没有电流流过，即为开路状态。

**【短路】** 如图 1.5 (c) 所示，a、b 两点用导线接通，这时电流不经过负载，只从导线 ab 回到电源，即为短路状态。

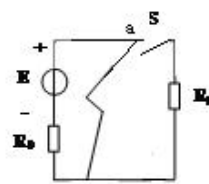
**【提示】** 短路时会产生很大的电流，会损坏电源和导线，应尽量避免。



(a) 通路状态






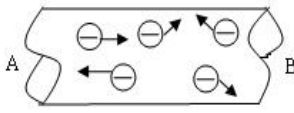
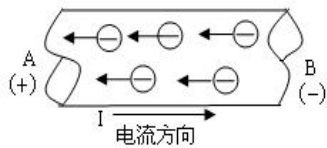
(b) 开路状态

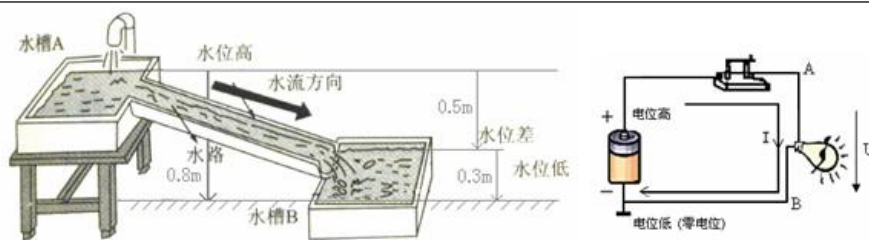


(c) 短路状态

图 1.5 电路的状态

<p>课堂总结 10min</p>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 电路的定义。</li> <li>2. 电路的基本组成部分。</li> <li>3. 电路的两大功能。</li> <li>4. 电路图形的图形符号和文字符号必须严格按照国家标准规范化。</li> </ol>	<p>归纳总结本节课的知识点。</p>
 <p>布置作业</p>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 我们家里有各种各样的电器，找出说明书，看看电路图，你认识哪些符号，哪些又是你不认识的。</li> <li>2. 能力测试 1-1、2-11。</li> </ol>	
<p>教学反思</p>		
 <p>课 题</p>	<h2 style="color: #00AEEF;">二、电路中的常用物理量</h2>	 <p>课型</p> <p style="text-align: right;">新课</p>
<p>授课班级</p>		<p>授课时数</p> <p style="text-align: right;">2</p>

<b>教学目标</b>	1. 理解电路中的常用物理量的概念。 2. 掌握电路中的常用物理量符号、单位和它们之间的关系。 3. 会用万用表测量直流电路的电流、电压和电位。
<b>教学重点</b>	1. 能掌握电路中的常用物理量的定义、符号、单位和它们之间的关系。 2. 会用万用表测量直流电路的电流、电压和电位。
<b>教学难点</b>	1. 能掌握电路中的常用物理量的定义、符号、单位和它们之间的关系。 2. 会用万用表测量直流电路的电流、电压和电位。
<b>教学方法</b>	读书指导法、分析法、演示法、练习法。
<b>时间分配</b>	<b>教学内容</b>
<b>导入新课</b> 5min	我们去买电冰箱，销售员除了介绍电器的外观，材料等特点外，还会介绍它的耗电有多低，有多省电。那么用什么评价耗电的大小呢？其实就是功率，它是电路中的一个基本物理量。本节我们就学习电路中常用的物理量电流、电压、电位、电动势、电能和电功率。
<b>讲授新课</b> 75min	<p><b>1. 电流</b></p> <p><b>【电流的概念】</b> 电荷的定向移动形成电流。在金属导体中存在大量自由电子在做无序不规则的运动，如图 1.6 (a) 所示；当有电场存在时，金属导体中的自由电子在电场力作用下定向移动，就形成了电流，如图 1.6 (b) 所示。</p> <div style="display: flex; justify-content: space-around; align-items: center;"> <div style="text-align: center;">  <p>(a) 金属导体中自由电子无序运行</p> </div> <div style="text-align: center;">  <p>(b) 电流的形成</p> </div> </div> <p style="text-align: center;">1.6 电流的形成</p> <p><b>【电流的大小】</b> 表征电流大小的物理量称为电流强度，用单位时间内通过导体横截面的电量多少来衡量，简称电流，用字母 <math>I</math> 表示。若在 <math>t</math> 秒内通过导体横截面的电量为 <math>Q</math>，则电流 <math>I</math> 可表示为：</p> $I = \frac{Q}{t} \quad (1-1)$ <p>式中，<math>I</math> 表示电流，单位是安[培]，用符号 A 表示；<math>Q</math> 表示电量，单位是库[仑]，用符号 C 表示；<math>t</math> 表示时间，单位是秒，用符号 S 表示。</p> <p>如果在 1s 内通过导体横截面的电量为 1C，则导体中的电流即为 1A。</p> <p>电流的单位除 A 外，还有千安 (kA)、毫安 (mA)、微安 (uA)，它们之间的换算关系为：</p> $1 \text{ kA} = 10^3 \text{ A} = 10^6 \text{ mA} = 10^9 \text{ uA}.$ <p><b>【电流的方向】</b> 人们习惯上规定正电荷的移动方向为电流的方向，因此，带负电的自由电子移动方向跟电流方向相反，如图 1.6 (b) 所示。</p> <p><b>2. 电压、电位和电动势</b></p> <p><b>【电压的概念】</b> 如图 1.7 (a) 所示，水流从水位高的 A 点向水位低的 B 点流动，那是因为 A、B 点间有水压。其实电流就像水流，电压就像水压，电位就像水位，如图 1.7 (b) 中，电池就是为电路提供电压的装置。电池的正极电位高，负极电位低，正、负极之间存在电压，在电压的作用下，电流从正极向负极处流动。</p>



(a) 水压示意图

(b) 电压示意图

图 1.7 电压及其类比

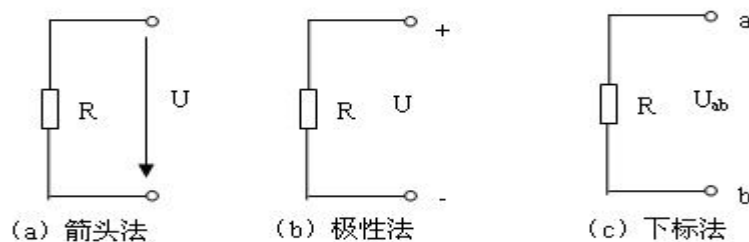
**【电压的大小】**在电路中电压的大小等于电场力把单位正电荷从高电位点移到低电位点所做的功，即：

$$U_{ab} = \frac{W}{Q} \quad (1-2)$$

式中， $U_{ab}$ 表示电压，单位为伏（特），用符号 V 表示；W 表示功，单位为焦[耳]，用符号 J 表示；Q 表示电量，单位为库[仑]（C）。

**【电压的方向】**电压的实际方向由高电位指向低电位。电压方向有三种表示法：

- 1) 箭头法：用带箭头的线段表示电压的方向，如图 1.8（a）所示；
- 2) 极性法：在电路的两点或元件两端标上极性表示电压的方向，如图 1.8（b）所示；
- 3) 下标法：用符号 U 加双下标字母表示，如  $U_{ab}$  表示电压方向从 a 指向 b 如图 1.7（c）所示。



(a) 箭头法

(b) 极性法

(c) 下标法

图 1.8 电压的方向

**【电位】**电路中某点相对于参考点的电压称为该点的电位，用 V 表示，如  $V_a$  表示 a 点的电位。单位也为伏[特]（V）。参考点的电位规定为零电位。一般选用大地作为参考点，用符号 “ $\perp$ ” 表示；在电子仪器中常把金属机壳或电路的公共节点作为参考点，用符号 “ $\perp$ ” 表示。

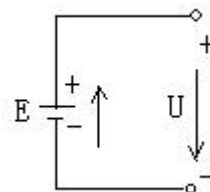






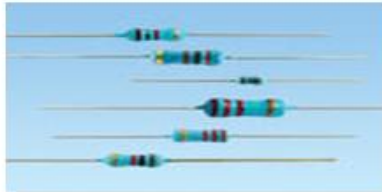

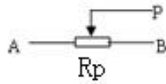
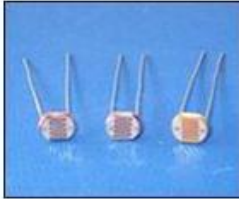



图 1.9 电动势和电压的方向

**【提示】**电路中两点之间的电压等于这两点的电位之差，即  $U_{AB}=V_A-V_B$ ；电路中某一点 A 的电位，等于该点 A 与参考点 O 之间的电压，即  $V_A=V_{AO}=V_A-V_O$ 。

**【电动势】**电动势是衡量电源将非电能转化为电能本领的物理量，用符号 E 表示，单位是伏（V）。电动势仅存在于电源的内部，它的方向是从低电位端指向高电位端，即从电源的负极指向正极。电源两端的电位差称之为电源的端



	<p>电压。</p> <p>对于一个电源来说，在开路状态下，电源两端的电压与电源的电动势大小相等而方向相反，如图 1.9 所示。</p> <p><b>3. 电功和电功率</b></p> <p><b>【电功】</b></p> <p>在一段时间内，电流通过负载时所做的功，称为电功，用 <math>W</math> 表示。在电路中电功的计算公式为：</p> $W = UIt \quad (1-3)$ <p>式中，<math>W</math> 表示电路消耗的电功，单位是焦耳，用符号 J 表示；<math>U</math> 表示电路两端的电压 (V)；<math>I</math> 表示流经电路的电流 (A)；<math>t</math> 表示通电时间 (S)。</p> <p>电功的常用单位为 kW·h，也就是我们常说的“度”，<math>1 \text{ kW} \cdot \text{h} (\text{度}) = 3.6 \times 10^6 \text{ J}</math> (焦耳)。</p> <p><b>【电功率】</b></p> <p>单位时间内电流所做的功称为电功率，简称功率。它是表明电流消耗电能快慢程度的物理量，用字母 <math>P</math> 表示，计算公式为</p> $P = \frac{W}{t} \quad (1-4)$ <p>代入 <math>W = UIt</math> 可以得到 <math>P = UI \quad (1-5)</math></p> <p>式中，<math>P</math> 为电功率，单位是瓦[特]，用符号 W 表示；<math>U</math> 表示电路两端的电压 (V)；<math>I</math> 表示流经电路的电流 (A)。</p>		
<p><b>课堂总结</b> 10min</p>	<p>1. 电流的定义、符号、单位。 2. 电压和电动势的定义、符号、单位。 3. 电功和电功率的定义、符号、单位。</p>		
<p> <b>布置作业</b></p>	<p>1. 我们家里有各种各样的电器，找出说明书，看看电路图，你认识哪些符号，哪些又是你不认识的。 2. 某电热器上标有“220V，1000W”字样：其中“220V”表示_____，“1000W”表示_____。电热器正常工作时通过的电流强度是_____安，电阻是_____欧，正常工作 2 小时消耗电能_____度。</p>		
<p><b>教学反思</b></p>			
<p> <b>课 题</b></p>	<p><b>三、电路的基本元件</b></p>	<p> <b>课型</b></p>	<p>新课</p>
<p><b>授课班级</b></p>		<p><b>授课时数</b></p>	<p>2</p>
<p><b>教学目标</b></p>	<p>1. 能识读电阻器、电位器、电感和电容的外形与结构。 2. 能理解欧姆定律的概念及应用。 3. 能识读常见电阻、电感和电容，并会用万用表检测电阻。</p>		
<p><b>教学重点</b></p>	<p>1. 能理解欧姆定律的概念及应用。 2. 能识读常见电阻、电感和电容并会用万用表检测电阻。</p>		
<p><b>教学难点</b></p>	<p>能理解欧姆定律的概念及应用。</p>		
<p><b>教学方法</b></p>	<p>读书指导法、分析法、演示法、练习法。</p>		

时间分配	教学内容	
导入新课 5min	我们用户在每月缴纳电费时，都要加上电损耗的费用。那么电是怎样损耗掉的呢？电能从发电厂输送到千家万户的过程中，由于线路上存在电阻，因此一部分电能转化为热能损耗掉了。	
讲授新课 75min	<p>1. 电阻</p> <p>当电流流过导体时，导体会对电流起阻碍作用，这种阻碍作用称为导体的电阻。用大写字母 <math>R</math> 表示，单位为欧（姆），用符号 <math>\Omega</math> 表示。金属导体的电阻大小可以用以下公式计算：</p> $R = \rho \frac{l}{S} \quad (1-6)$ <p><b>【提示】</b> 式（1-6）称为电阻定律，式中的电阻率 <math>\rho</math> 与材料性质有关，也称为电阻系数。</p> <p><b>【想一想】</b> 绝缘材料有没有电阻？</p> <p>2. 电阻器</p> <p>电阻器是电子电路中使用率最高的元件，有固定电阻器和可调电阻器两大类。</p> <p><b>【固定电阻器】</b> 固定电阻器的阻值是固定不变的，常见的有碳膜电阻、金属膜电阻、绕线电阻和水泥电阻等，如图 1.10 所示。</p> <div style="display: flex; justify-content: space-around;"> <div style="text-align: center;">  <p>(a) 绕线式电阻器</p> </div> <div style="text-align: center;">  <p>(b) 膜式电阻器</p> </div> </div> <p style="text-align: center;">图 1.10 固定电阻器</p> <p><b>【可变电阻器】</b> 可变电阻器是阻值在预定范围内可调节的电阻，常用于调节电路中的电位，故又称做电位器。常见的可变电阻器如图 1.11 所示。</p> <div style="display: flex; justify-content: space-around;"> <div style="text-align: center;">  <p>(a) 滑动变阻器</p> </div> <div style="text-align: center;">  <p>(b) 符号</p> </div> </div> <p style="text-align: center;">1.11 可变电阻器</p> <p><b>【特种电阻】</b> 除以上常见的电阻器外，还有一些具有特殊功能的电阻器，</p> <div style="display: flex; justify-content: space-around;"> <div style="text-align: center;">  <p>光敏电阻</p> </div> <div style="text-align: center;">  <p>压敏电阻</p> </div> <div style="text-align: center;">  <p>磁敏电阻</p> </div> <div style="text-align: center;">  <p>热敏电阻</p> </div> </div> <p style="text-align: center;">图 1.12 特种电阻器</p>	

比如光敏电阻、压敏电阻、磁敏电阻、热敏电阻等，广泛应用在各种电子设备中，如图 1.12 所示。

**【想一想】**

自己都见过些什么样的电阻器？

**3. 欧姆定律**

德国物理学家欧姆通过大量的实验研究，于 1827 年总结出电阻元件的电压和电流的关系：流过电阻  $R$  的电流  $I$  与电阻两端的电压  $U$  成正比，与电阻  $R$  成反比，即：

$$I = \frac{U}{R} \quad \text{或} \quad U = RI \quad (1-7)$$

这就是后来以他的名字命名的欧姆定律。示电阻 ( $\Omega$ )。

如果以电压为横坐标，电流为纵坐标，可画出电阻的  $U$ - $I$  关系曲线，称为电阻的伏安特性曲线，如图 1.13 所示。

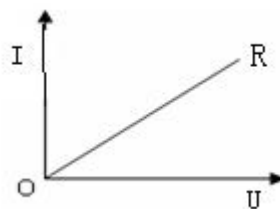


图 1.13 电阻伏安特性曲线

**【线性电阻和非线性电阻】**

电阻值不随电压、电流的变化而变化的电阻称为线性电阻。线性电阻的阻值是一个常量，线性电阻上的电压与电流的关系服从为欧姆定律，如各种膜式电阻器、线绕电阻器等。

电阻值随着电压、电流的变化而改变的电阻，称为非线性电阻，非线性电阻上的电压和电流的关系，不服从欧姆定律，如白炽灯、压敏电阻器、热敏电阻器等。

**4. 电阻元件的连接**

(1) 串联电路

把电阻一个接一个地首尾依次连接起来，就组成串联电路，如图 1.14 所示。串联电路的基本特点是：

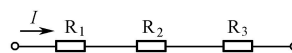


图 1.14 电阻的串联

- a. 电路中各处的电流强度相等。
- b. 电路两端的总电压等于各部分电路两端的电压之和。

**串联电路的总电阻。**用  $R$  代表串联电路的总电阻， $I$  代表电流强度，根据欧姆定律可得，

$$R = R_1 + R_2 + R_3 \quad (1-8)$$

即串联电路的总电阻等于各个电阻之和。

**串联电路的电压分配。**在串联电路中，

$$U_1 = IR_1, \quad U_2 = IR_2, \quad \dots \quad U_n = IR_n$$

即串联电路中各个电阻两端的电压与它的阻值成正比。

**串联电路的功率分配。**串联电路中某个电阻  $R_k$  消耗的功率  $P_k = IU_k$ ，而  $U_k = IR_k$ ，因此  $P_k = I^2 R_k$ ，各个电阻消耗的功率分别是：

$$P_1 = I^2 R_1, \quad P_2 = I^2 R_2, \quad \dots, \quad P_n = I^2 R_n$$

即串联电路中各个电阻消耗的功率与它的阻值成正比。

### (2) 并联电路

把两个或两个以上电阻接到电路中的两点之间，电阻两端承受的是同一个电压的电路，叫做电阻并联电路。图 1.15 是三个电阻  $R_1$ 、 $R_2$ 、 $R_3$  组成的并联电路。并联电路的基本特点是：

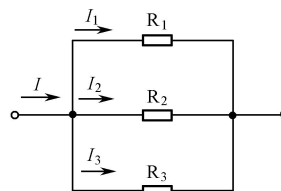


图 1.15 电阻的并联

a. 电路中各支路两端的电压相等。

b. 电路中的总电流强度等于各支路的电流强度之和。

**并联电路的总电阻。**用  $R$  代表并联电路的总电阻， $U$  代表电压，根据欧姆定律可得，

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} \quad (1-9)$$

即并联电路总电阻的倒数，等于各个电阻的倒数之和。

若是两个电阻并联，可得

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

由此可见，并联电路的总电阻小于其中任意一个电阻的电阻值。

**并联电路的电流分配。**在并联电路中，由于

$$I_1 = \frac{U}{R_1}, \quad I_2 = \frac{U}{R_2}, \quad \dots, \quad I_n = \frac{U}{R_n} \quad (1-10)$$

即并联电路中通过各个电阻的电流强度与它的阻值成反比。

$$\left. \begin{aligned} I_1 &= \frac{U}{R_1} = \frac{R}{R_1} I = \frac{R_2}{R_1 + R_2} I \\ I_2 &= \frac{U}{R_2} = \frac{R}{R_2} I = \frac{R_1}{R_1 + R_2} I \end{aligned} \right\} \quad (1-11)$$

式 (1-10) 就是两个电阻并联时的分流公式。

**并联电路的功率分配。**并联电路中，各个电阻消耗的功率分别是：

$$P_1 = \frac{U^2}{R_1}, \quad P_2 = \frac{U^2}{R_2}, \quad \dots, \quad P_n = \frac{U^2}{R_n}$$

可得

$$P_1 R_1 = P_2 R_2 = \dots = P_n R_n \quad (1-12)$$

即并联电路中各个电阻消耗的功率与它的阻值成反比。

### (3) 混联电路

在实际电路中，既有电阻的串联又有电阻的并联，这种电路被称为电阻的混联。分析电阻混联的一般步骤：

① 计算各串联电阻和并联电阻的等效电阻，再计算总的等效电阻。

② 用欧姆定律求出总电流。

③ 根据串联电阻分压关系，并联电阻分流关系，逐步计算出各支路电流、各部分电压以及电路的其他参数。

## 5. 电容元件

电容器简称电容，它由两个极板及它们之间的介质组成。可以储存电场能

量，电容元件本身不消耗能量。利用电容器充、放电和隔直、通交特性，在电路中常用于调谐、滤波、耦合、旁路、能量转换等。电容器用符号  $C$  表示，电容的单位为法拉 ( $F$ )，法拉太大，实际应用中常用微法 ( $\mu F$ ) 和皮法 ( $pF$ ) 等。电容器的外形示意图及有关图形符号如图 1.16 所示。

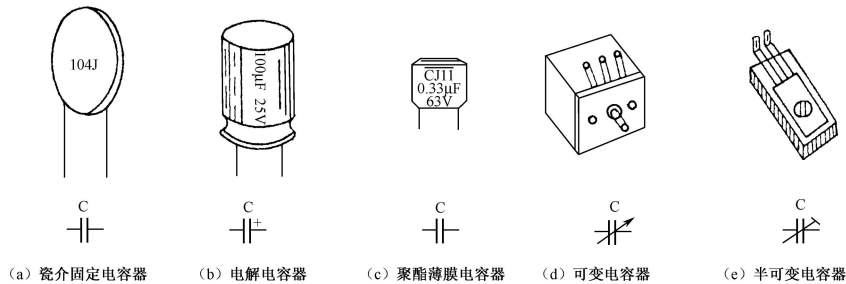


图 1.16 电容器形状及图形符号

(1) 电容器的分类

- ①按其结构分 有固定电容器、半可变电容器、可变电容器三大类。
- ②按电容器介质材料分 有电解电容器、有机介质电容器、无机介质电容器三大类。

(2) 电容器的电压、电流特性

电容器是一种聚集电荷的元件，其聚集的电荷量与所加的电压成正比，即

$$q = Cu \quad (1-13)$$

当电容器极板上的电荷  $q$  或两极板间的电压  $u_C$  发生变化时，电路中就会产生电流  $i_C$ ，在图 1.17 中所规定的参考方向下，其数学表达式为

$$i_C = \frac{dq}{dt} = C \frac{du_C}{dt} \quad (1-14)$$

式 (1-14) 表明，在某一时刻电容电路中的电流  $i_C$  与该时刻电容电压  $u_C$  变化率成正比，而与该时刻电容电压  $u_C$  的数值无关，这一特性称为电容的动态特性：电容元件也称为动态元件。

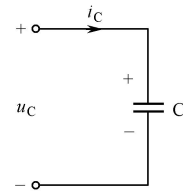


图 1.17 电容元件

其电场能量  $W_C$  的大小与电容量  $C$  和电容两端的电压  $U$  的关系如下：

$$W_C = \frac{1}{2} CU^2 \quad (1-15)$$

(3) 电容元件的连接

①电容器的串联

把几个电容器一个接一个地连接在一起，构成一个无分支电路的连接方式，叫做电容器的串联。如图 1.18 所示。

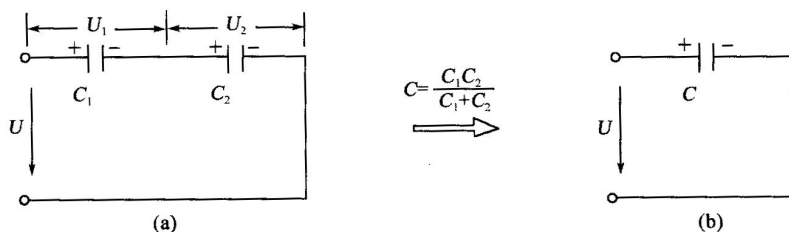


图 1.18 电容器的串联

串联电容器的等效电容  $C$ 、电压  $U$ 、电量  $Q$  与每个电容器的电容、电压、

电量的关系为：

a.各个电容器上所带的电量都相等，并等于电容器串联后的等效电容器上所带的电量  $Q$ ，即

$$Q = Q_1 = Q_2 = \dots = Q_n$$

b.电容器总电压  $U$  等于每个电容器两端电压之和，即

$$U = U_1 + U_2 + \dots + U_n$$

c.串联电容的等效电容  $C$  的倒数，等于各个串联电容器电容量的倒数和，即

$$\frac{1}{C} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \dots + \frac{1}{C_n} \quad (1-16)$$

若是两个电容器串联，可得

$$C = \frac{C_1 C_2}{C_1 + C_2}$$

由此可见，串联电路的总电容器小于其中任意一个电容器的电容，且串联的电容器越多，其总电容就越小。

### ②电容器的并联

把两个或多个电容器同极性连接在一起，接入电路的连接方式为电容器的并联。如图 1.19 (a) 所示，它的等效电路如图 1.19 (b) 所示。

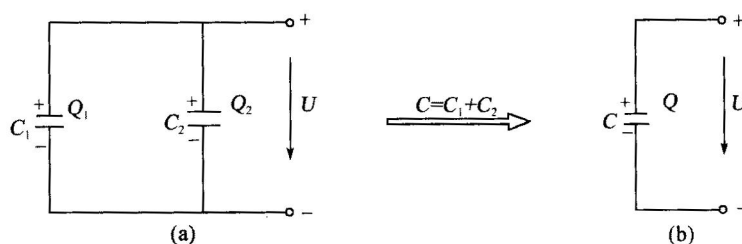


图 1.19 电容器的并联

并联电容器的等效电容  $C$ 、电压  $U$ 、电量  $Q$  与每个电容器的电容、电压、电量的关系为：

a.并联电容器两端的电压相同，且等于电源电压，即

$$U = U_1 = U_2 = \dots = U_n$$

b.并联电容器的总电量  $Q$  等于各并联电容器的电量之和，即

$$Q = Q_1 + Q_2 + \dots + Q_n$$

c.并联电容的等效电容  $C$  等于各并联电容器电容量之和，即

$$C = C_1 + C_2 + \dots + C_n \quad (1-17)$$

### ③电容器的混联

一个电路中，既有串联又有并联的连接方式，叫做电容器的混联，

## 6.电感元件

电感器是用漆包线在绝缘骨架上绕制而成的一种能够存储磁场能量的电子元件。电感器是电子线路的重要元件之一，它与电阻、电容、晶体管等元器



件组合构成各种功能的电子电路。在调谐、振荡、耦合、匹配、滤波等电路中都是重要元件。电容器用符号  $C$  表示，电感的单位为亨利 ( $H$ )，实际应用中常用毫亨 ( $mH$ ) 和微亨 ( $\mu H$ ) 等。电感器的外形示意图如图 1.20 所示。

(1) 电感线圈的分类

- ①按电感线圈圈芯性质分 有空心线圈和带磁芯的线圈。
- ②按绕制方式不同分 有单层线圈、多层线圈、蜂房线圈等。
- ③按电感量变化情况分 有固定电感和微调电感等。



图 1.20 电感器的外形示意图

(2) 电感器的电压、电流特性

如图 1.21 所示，当通过线圈的电流发生变化时，由于穿过线圈的磁通也相应地发生变化，因此在线圈两端产生感应电压，以  $u_L$  表示，根据电磁感应定律，有

$$u_L = \frac{d\psi}{dt} = L \frac{di}{dt} \quad (1-18)$$

式 (1-18) 还表明了电感元件的一个重要特性，如果电感两端的电压保持为有限值，则流过电感的电流只能连续变化而不能跃变。电感也是一种有“记忆”功能的元件，其磁场能量  $W_L$  的大小与电感量  $L$  和通过电感的电流  $I$  的关系如下：

$$W_L = \frac{1}{2} LI^2$$

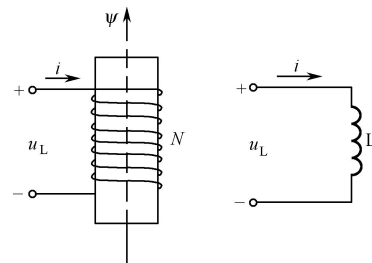

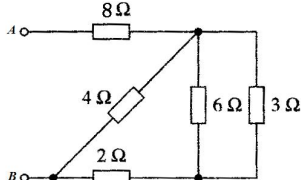


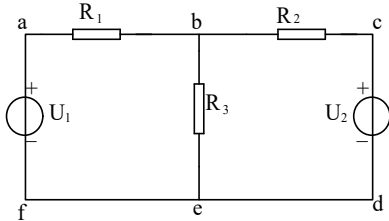
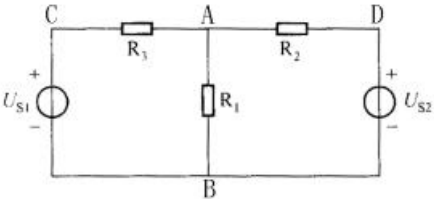


图 1.21 电感元件及其表示符号

<p><b>课堂总结</b> 10min</p>	<p>1. 电阻器、电位器、电感和电容的外形与结构。 2. 欧姆定律的概念及应用。 3. 电阻、电容和电感元件的串、并联电路计算。</p>	
<p> <b>布置作业</b></p>	<p>1. 求图所示电路的等效电阻 <math>R_{AB}</math>。</p> 	
<p><b>教学反思</b></p>		

——《任务 1.2 电路的基本定律和电源的等效变换》

 <b>课 题</b>	<h2 style="color: blue;">一、基尔霍夫定律</h2>	 <b>课型</b>	新课
<b>授课班级</b>		<b>授课时数</b>	2
<b>教学目标</b>	1. 掌握支路、节点、回路和网孔的概念，并能正确判断。 2. 掌握基尔霍夫定律，熟练正确列出电路 KCL 和 KVL 方程。		
<b>教学重点</b>	会应用 KCL、KVL 列出电路方程，计算电压、电流。		
<b>教学难点</b>	会应用 KCL、KVL 列出电路方程，计算电压、电流。		
<b>教学方法</b>	任务驱动法、分析法、演示法、练习法。		
<b>时间分配</b>	<b>教学内容</b>	<b>教学 方法</b>	
<b>导入新课</b> 5min	<p>在实际电路中，往往会遇到一些不能用串并联简化的电路，例如下图所示电路，这就是复杂电路。在复杂电路中，包含多个电源和多个电阻，因而不能直接用欧姆定律求解，必须利用其它定理定律才能求解。</p> <div style="text-align: center;">  </div> <p style="text-align: center;">图 1.21 复杂直流电路</p>	通过让学生观察常见的电路，引发其思考。	
<b>讲授新课</b> 30min	<p><b>1.常用的电路名词</b></p> <p><b>【支路】</b>由一个或几个元件首尾相接构成的一段无分支的电路。在图 1.22 中有三条支路，即 bafe、be、bcde 支路。</p> <p><b>【节点】</b>三条或三条以上支路的连接点称为节点，如上图中 b 点和 e 点。</p> <p><b>【回路】</b>电路中任意一个闭合路径称为回路，如上图中的 abefa、bcdeb、abcdefa。都是回路。</p> <p><b>【网孔】</b>内部不含支路的回路称为网孔。如上图中的 abefa、bcdeb。</p> <p><b>2.基尔霍夫电流定律</b></p> <p><b>【基尔霍夫电流定律】</b>也称基尔霍夫第一定律或节点电流定律(简称 KCL)。此定律说明了连接在同一节点上的几条支路中电流之间的关系。其内容为：在任一瞬间，流入任一节点的电流之和恒等于流出这个节点的电流之和，，即</p>	<div style="text-align: center;">  </div> <p style="text-align: center;">图 1.22 复杂电路</p>	运用演示法进行教学。

$$\sum I_{\text{入}} = \sum I_{\text{出}}$$

例如图 1.23 所示电路，有五条支路会聚于 A 点，其中  $I_1$  和  $I_3$  是流入节点的， $I_2$ 、 $I_4$  和  $I_5$  是流出节点的，于是可得

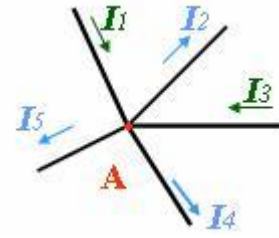


图 1.23 支路电流

$$I_1 + I_3 = I_2 + I_4 + I_5$$

或 
$$I_1 + I_3 - I_2 - I_4 - I_5 = 0$$

因此，如果我们规定流入节点的电流为正，流出节点的电流为负，那么，基尔霍夫电流定律内容也可叙述为：对于电路中任意一个节点，电流的代数和恒等于零，即

$$\sum I = 0$$

例：在图中所示电路中，已知  $I_1=2\text{mA}$ ， $I_2=5\text{mA}$ ， $I_3=10\text{mA}$ ，试求电流  $I_4$ 。

解：图 1.24 中可看作广义节点，设流入节点为正，流出节点为负，由 KCL 得

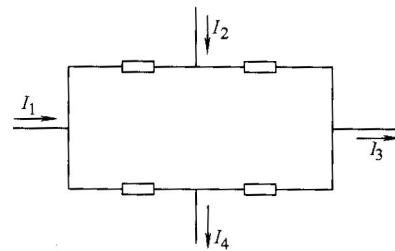
$$I_1 + I_2 - I_3 - I_4 = 0$$

代入已知数据，得

$$2\text{mA} + 5\text{mA} - 10\text{mA} - I_4 = 0$$

解得 
$$I_4 = -3\text{mA}$$

$I_4$  为负值，表明  $I_4$  的实际方向与图示的参考方向相反。图 1.24



### 3.基尔霍夫电压定律

【基尔霍夫电压定律】也称基尔霍夫第二定律或回路电压定律（简称 KVL）。其内容是：对于电路中的任一回路，沿回路绕行方向的各段电压的代数和等于零，其表达式为：

$$\sum U = 0$$

例如图 1.25 所示电路中，回路 cadbc 中电源电动势、电流和各段电压的参考方向均已标出。从 c 点开始沿顺时针方向绕行一周回到 c 点时，c 点的电位数不变。也就是说，从一点出发绕回路一周回到该点时，各部分电压的代数和等于零。按照环线所示的回路参考方向可列出下列方程：

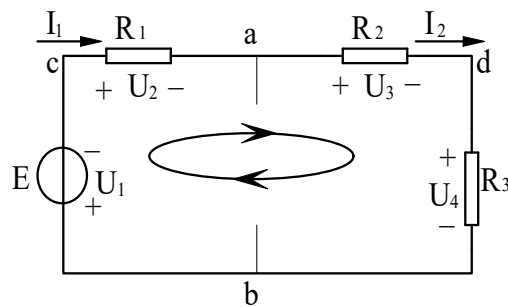


图 1.25 KVL 定律应用

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

基尔霍夫电压定律的内容又可叙述为：在任一闭合回路中，各个电阻上电

可联系实际，举出适当的例子。

压的代数和等于各个电动势的代数和，即：

$$\sum IR = \sum E$$

**【提示】** 基尔霍夫电压定律是能量守恒定律在电路中的体现，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同电量的电荷。

**例** 如图所示电路中，已知  $R_1=300\Omega$ ,  $R_2=200\Omega$ ,  $R_3=100\Omega$ ,  $U_{S1}=-4V$ ,  $U_{S2}=6V$ ,  $U_{S3}=5V$ 。求  $U_{AC}$  及 B 点的电位  $U_B$ 。

**解** 设回路的绕行方向和各个电流、电压的参考方向如图 1.27 所示。

由电路图可知，该电路中只有一个闭合回路 ABCFA，因此，回路 ABCFA 中流过的电流都等于  $I_1$ 。而对于节点 C，由 KCL 可知  $I_1 - I_1 + I_2 = 0$ ，即  $I_2 = 0$ 。

由 KVL，可列出方程如下：

$$U_{S1} + I_1 R_1 - U_{S2} + I_1 R_2 = 0$$

代入已知数据得

$$-4 + 300 \times I_1 - 6 + 200 \times I_1 = 0$$

$$\text{得 } I_1 = 0.02A$$

$$\text{于是有 } U_{ac} = U_{ab} + U_{bc} = U_{S1} + R_1 I_1$$

$$\text{即 } U_{AC} = -4 + 300 \times 0.02 = 2V$$

$$U_B = U_{BC} + U_{CD} + U_{DE} = R_1 I_1 - U_{S3} + R_3 I_2 = 300 \times 0.02 - 5 + 100 \times 0 = 1V$$

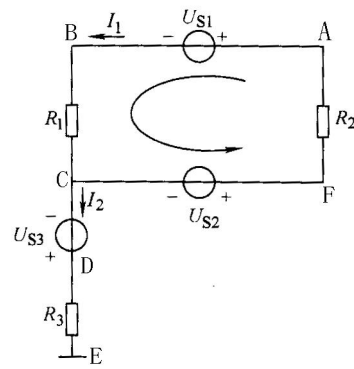


图 1.27

可联系实际，举出适当的例子。

**课堂总结**  
10min

1. 支路、节点、回路和网孔的基本概念，并能正确判断。
2. 基尔霍夫定律的内容，正确列出电路 KCL 和 KVL 方程。

归纳总结本节课的知识点。

**布置作业**

1. 求图 1.28 中电流  $I_4$  的数值。已知  $I_1=2A$ ,  $I_2=-3A$ ,  $I_3=1A$ 。

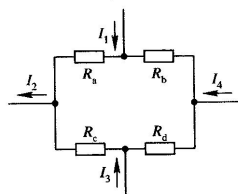


图 1.28 题 1 图

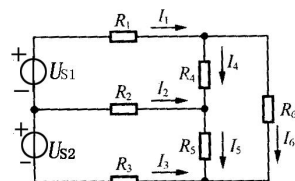


图 1.29 题 2 图

2. 在图 1.29 所示电路中，已知  $I_1=2A$ ,  $I_2=3A$ ,  $I_4=-1A$ ，求  $I_3$ ,  $I_5$ ,  $I_6$ 。
3. 在图 1.30 所示电路中，有多少支路和节点？并求  $U_{ab}$  和  $I$  的值。



$$U = U_S - R_0 I = IR$$

由上式表明，实际电压源的端电压  $U$  不再等于  $U_S$ ，而与负载电流有关。电流愈大，内阻上的电压降越大，端电压便越低，其伏安特性是一条下降的直线。

### 【电压源特性】

(1) 几个理想电压源或实际电压源相串联，其等效电压源的电动势，等于这几个电压源电动势的代数和；总内阻为各电压源内阻的串联值。

(2) 电动势不相等的理想电压源不允许并联。

(3) 任一支路与理想电压源  $U_S$  并联时，其等效电压源的电压仍等于  $U_S$ ，而等效电压源的输出电流则等于原电路相应的电流  $I$ 。要特别指出，等效是对外部电路而言的，与电压源  $U_S$  并联支路的存在与变化对电压源的电流是有影响的。

## 2. 电流源

通常所说的电流源一般是指理想电流源，其基本特性是所发出的电流  $I_S$  固定不变，但电流源的两端电压却与外电路有关，如图 1.33 所示。

实际电流源是含有一定内阻  $r$  的电流源，如图 1.34 所示。

当实际电流源的内阻  $R_0$  远大于负载电阻  $R$  时，可将其视为理想电流源。

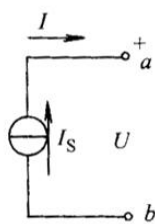


图 1.33 理想电流源

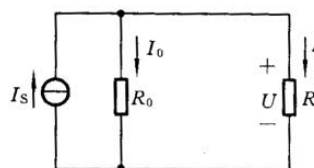


图 1.34 实际电流源

由图可知，负载电流

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

由上式表明，负载电流  $I$  总是小于定值电流  $I_S$  的，且负载电流越小，内电阻上电流越大，内部损耗越大。所以不应使实际电流源处于空载状态。由上式可作出其伏安特性曲线，如图 1.35 所示，也是一条下降的直线。

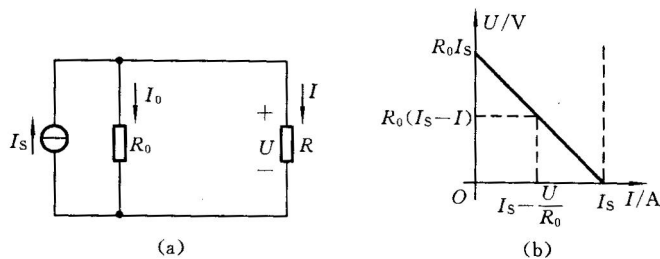


图 1.35 实际电流源及其伏安特性



### 【电流源特性】

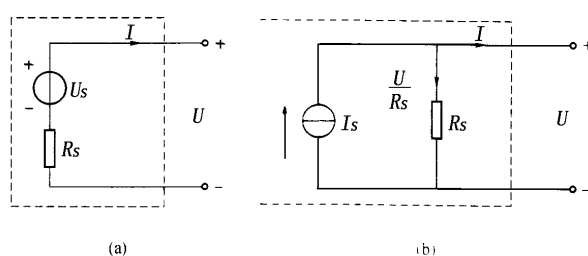
(1) 当几个电流源并联时，其等效电流源的电流，等于这几个电流源电流的代数和；总内阻为各电流源内阻的并联值。

(2) 电流不相等的理想电流源，不允许串联。

(3) 任一支路与电流源  $I_S$  串联时，其等效电流源的电流仍等于  $I_S$ ，而等效电流源的端电压，则等于原电路相应外部电路的电压  $U$ 。等效只对外部电路有效，但对内部，电流源相串联的支路产生变化或者将它去掉，对电流源本身的端电压是有影响的。

### 3. 两种实际电源模型之间的等效变换

一个实际电源既可以用电压源模型来等效代替，也可以用电压源模型来等效代替。如图 1.36 所示。

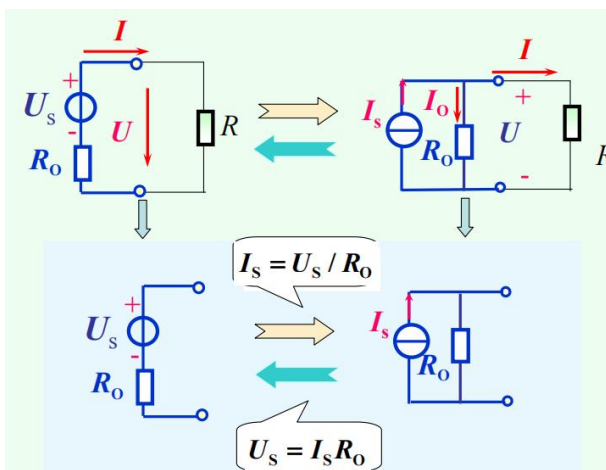


等效变换的条件

$$I_S = \frac{U_S}{R_S} \quad \text{或} \quad U_S = R_S \cdot I_S$$

例：实际电源模型的等效变换。


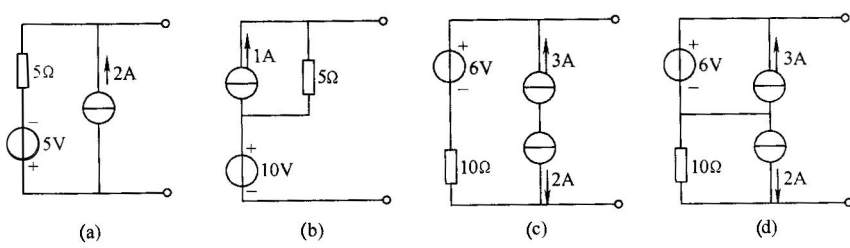
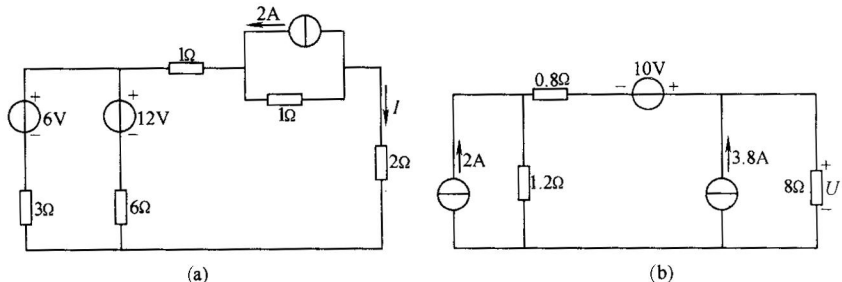
对外电路而言，如果将同一负载  $R$  分别接在两个电源上， $R$  上得到相同的电流电压，则两个电源对  $R$  而言是等效的。





可联系实际，举出适当的例子。

课堂总结  
10min

1. 电压源和电流源的特性。
2. 电压源与电流源及其等效变换的条件和注意事项。

 <b>布置作业</b>	<p>1. 将下图所示各电路化为最简形式的电压源模型和电流源模型。</p>  <p style="text-align: center;">图 1.37 题 1</p> <p>2. 利用电源模型等效变换的方法求下图所示电路中的电压或电流。</p>  <p style="text-align: center;">图 1.38 题 2</p>
<b>教学反思</b>	

### ——《任务三 汽车电路基本元器件》

 <b>课 题</b>	<h2 style="color: #00AEEF;">汽车电路基本元器件</h2>	 <b>课型</b>	新课
<b>授课班级</b>		<b>授课时数</b>	2
<b>教学目标</b>	能认识并检测汽车电路基础器件，正确选用各电器元件。		
<b>教学重点</b>	会用检测汽车电路基础器件。		
<b>教学难点</b>	正确选用各电器元件。		
<b>教学方法</b>	任务驱动法、分析法、演示法、练习法。		
<b>时间分配</b>	<b>教学内容</b>	<b>教学 方法</b>	
<b>导入新课</b> 5min	为了防止过载或短路烧坏用电设备与导线，常在负载与电源之间串联保险装置。汽车上的保险装置通常有 3 种；一种是易熔线；一种是熔断器（保险丝），易熔线与熔断器熔断后都需要更换；还有一种是断路器，断路器动作会切断电源与负载的联系，电路在排除故障后可自行恢复。	通过让学生观察常见的电器元件，引发其思考。	
<b>讲授新课</b>	1. 熔断器		

30min

熔断器俗称保险丝，在电路中起保护作用。当电路发生短路或严重过载时，它的熔丝能自动迅速熔断，从而切断电路，防止烧坏电路连接导线和电气设备，并把故障限制在最小范围内。熔断器的主要元件是熔丝（片），其材料是锌、锡、铅、铜等金属的合金。常见熔断器按外形可分为熔片式、熔管式、绝缘式、缠丝式、插片式、瓷插式和螺旋式等。它们的结构如图 1.45 所示。

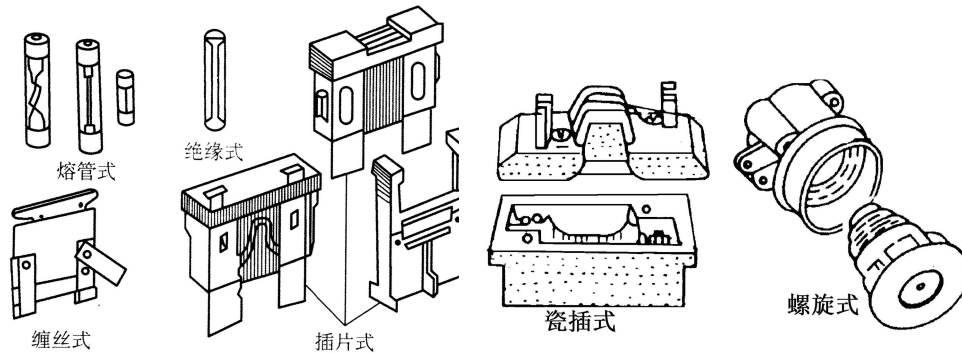


图 1.45 熔断器的种类

一般情况下，环境温度在 18~32℃、流过熔断器的电流为额定电流的 1.1 倍时，熔丝不熔断；达到 1.35 倍时，熔丝在 60s 内熔断；达到 1.5 倍时，20A 以内的熔丝在 15s 内熔断，30A 熔丝在 30s 内熔断。

熔丝的颜色 30A 一绿色，25 A一白色，20A 一黄色，15A 一蓝色，10 A一红色，7.5A一棕色，5A一米色。

熔断器在使用中应注意以下几点：

- (1) 熔断器熔断后，必须找到故障原因，彻底排除故障。
- (2) 更换熔断器时，一定要与原规格相同；汽车上增加用电设备时，不要随意改用容量大的熔断器，最好另外再安装熔断器。
- (3) 熔断器支架与熔断器接触不良会产生电压降和发热现象，安装时要保证良好接触。

行驶中熔断器熔断后的应急处理：可用其他电路相同或稍大容量的熔断器替代；如果其他电路需要工作，可暂时采用细导线代替其他电路的熔断器。一旦到达目的地或有新熔断器时，应及时更换。

除了熔断器，汽车中还有易熔线也是常用的熔断装置，图 1.46 为熔断器和易熔线的图形符号。

### 2.易熔线

易熔线是一种截面积一定，能长时间通过较大电流的合金导线。当电路中电流过载或发和短路故障时，易熔线在数秒内熔断，从而切断电路，以保护用电设备。易熔线主要用在电源电路和大电流电路中。易熔线在使用时应注意：

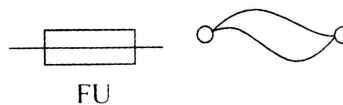


图 1.46 熔断器和易熔线的图形符号

- (1) 绝对不允许换用比规定容量大的易熔线。
- (2) 易熔线熔断，可能是主要电路发生短路，因此需要仔细检查，彻底排除隐患。
- (3) 不能和其他导线绞合在一起。

### 3. 断路器

#### (1) 电路断路器的分类

易过载的电路和负载设备常用电路断路器进行保护，它可以安装在熔断器盒面板上或电路的线路中。电路断路器分为为三种常用类型，即自动复位电路断路器、手动复位电路断路器和正温度系数（PTC）固态电路断路器。

##### ①自动复位电路断路器

自动复位电路断路器又称可循环电路断路器，如图 1.47 所示。断路器是机械装置，它利用两种不同金属（双金属）的热效应断开电路，如果额外的电流经过双金属带，双金属带弯曲，触点开路，阻止电流通过；双金属带冷却后，触点自动闭合，电流又可以在电路中流动。

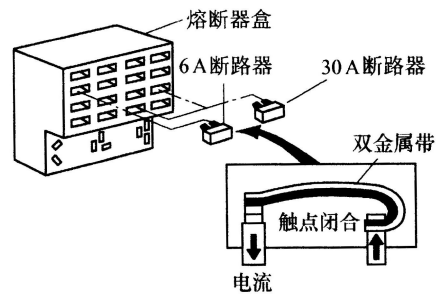


图 1.47 断路器

##### ②手动复位电路断路器

手动复位电路断路器又称为可复位电路断路器，它有两种形式。一种是通过按下断路器上的按钮复位，另一种是通过断开电路电源并让电路断路器冷却复位，如图 1.48 所示。

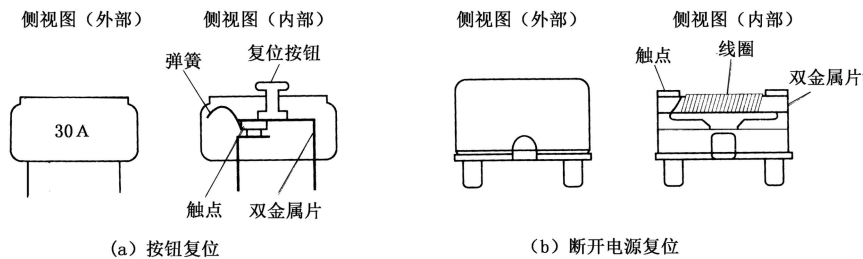


图 1.48 可复位电路断路器

##### ③PTC 固态电路断路器

PTC 固态电路断路器，如图 1.49 所示，这种电路断路器常线绕于负载元件的内部。当电流超出了设计极限，PTC 固态电路断路器的电阻就会一直增加，直到电路断路。只有电路中的高电流状态消失后，PTC 固态电路断路器才能恢复导通。

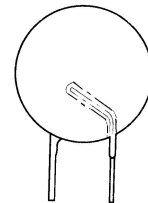


图 1.49 PTC 固态电路断路器

#### (2) 电路断路器的应用

汽车电路断路器的一个代表应用电动车窗电路。电动车窗由可逆电机牵引，每个电机都由一个内置式断路器保护。如果车窗开关打开太久（车窗受到阻碍或达到上下极限后），断路器会将电路断开，待冷却之后又会自动复位。

前照灯电路是应用断路器代替熔断器的一个例子。前照灯电路中任何地方发生短路或接地都会引起额外的电流，并会因此断开电路。在夜晚突然失去前照灯会产生灾难性的后果，可是，断路器在断开电路后又会迅速闭合电路，从而避免了电路过热，也提供了充足的电流以保持至少部分前照灯能够工作。

## 二、电子开关

点火开关主要用来接通和切断点火电路，同时还用以控制起动机、发电机励磁、收音机、空调、刮水器、点烟器、仪表、信号灯、进气热和其他电器设备电路。

点火开关是汽车电路是最重要的开关之一，是各条电路分支的控制枢纽，是多挡接线柱开关。其主要功能是：锁住转向盘轴（LOCK），运行/点火（ON或IG）挡、起动（ST或Start）挡、附件（Acc）挡，如果用于柴油车则增加预热（HEAT）挡。其中起动、预热挡因为工作电流很大，开关不宜接通过久，所以这两挡在操作时必须用手克服弹簧力，扳住钥匙，一松手就弹回点火挡，不能自行定位，其他挡均可自行定位。点火开关的结构及表示方法如图 1.50 所示。

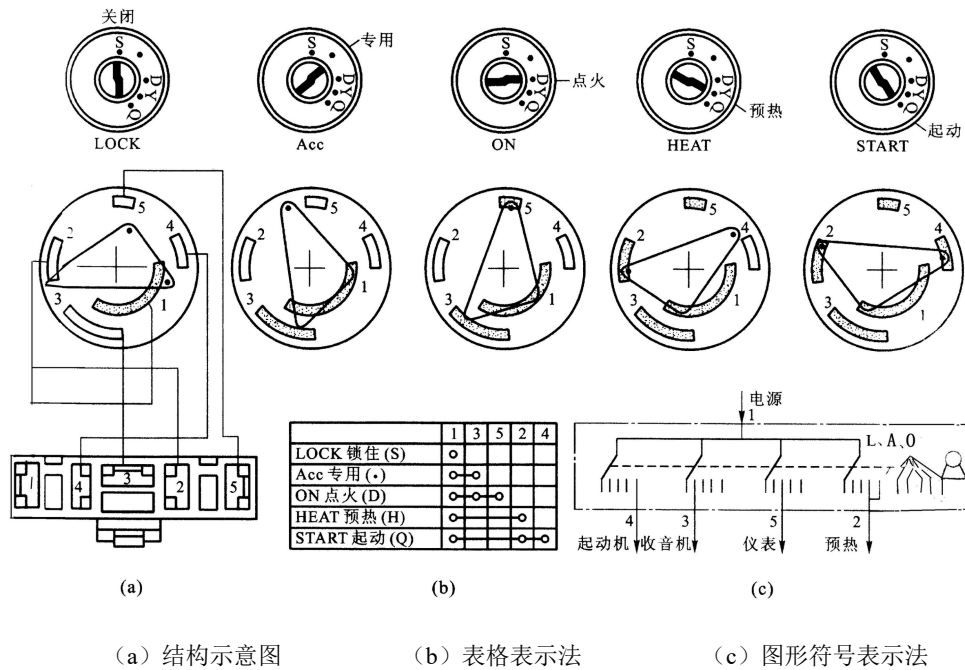



图 1.50 点火开关的结构及表示方法

除了点火开关，将多种开关功能集成在一起而构成的组合开关在现代汽车上使用非常广泛，如灯光组合开关、风扇组合开关等。因此在识图时应了解开关在不同状态下，开关内部触点（插头）和电路接线（插座）之间的对应关系。

## 三、继电器

另一种广泛应用于汽车中的开关是电磁式开关，这种开关又称为继电器，如图 1.51 所示。

### 1. 继电器概述

	<p>电磁继电器一般由铁心、线圈、衔铁、触点簧片等组成。只要在继电器线圈两端加上一定的电压，线圈中就会流过一定的电流，从而产生电磁效应，衔铁就会在电磁力的作用下（吸引）克服返回弹簧的拉力吸向铁心，从而带动衔铁的动触点与静触点（常开触点）吸合，当线圈失电后，电磁吸力也随之消失，衔铁就会在弹簧反作用力的作用下返回原来的位置使动触点与原来的静触点（常闭触点）吸合，这样反复吸合与释放，达到了接通与切断电路的目的。</p> <p>继电器是一种电子控制器件，它具有控制系统（又称输入回路）和被控制系统（又称输出回路）。继电器具有动作性，工作稳定，使用寿命长，体积小，广泛应用于电力保护领域，如自动化装置，遥控、测量及通信等装置中。继电器实际上是用较小的电流去控制较大电流的一种“自动开关”，在电路中起着自动调节、安全保护电路转换等作用。</p> <p>汽车喇叭电路就是应用继电器实现控制的一个例子，如图 1.52 所示。按下图中的喇叭开关，电路中的继电器线圈得电，有电流通过，继电器常开触点闭合，接通蓄电池和喇叭部件间的电路。</p> <p style="text-align: center;"><b>2.继电器的检测</b></p> <p>继电器的检测方法有两种，即继电器的在车检测与离车检测。在车检测时可以先用万用表测量继电器两个线圈接线端子是否有电，如果一端有，那么另一端可以连上搭铁线，此时如果听到“咔”的响声，那么继电器是好的；如果此时无声无息（无动作），那么继电器是坏的。</p>	
<p><b>课堂总结</b> 10min</p>	<p>能认识并检测汽车电路基础器件，正确选用各电器元件。</p>	<p>归纳总结本节课的知识点。</p>
 <p><b>布置作业</b></p>		
<p><b>教学反思</b></p>		

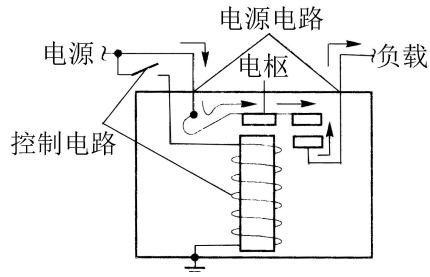


图 1.51 继电器

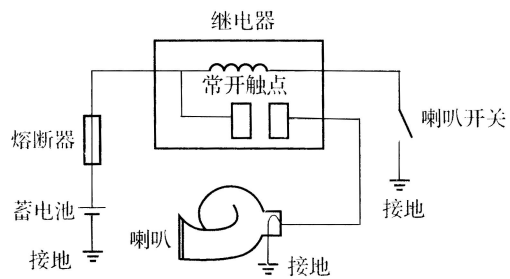


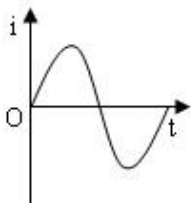
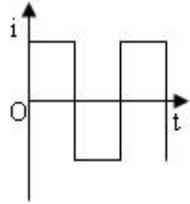
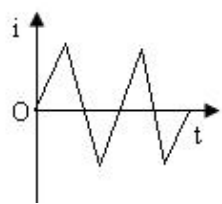
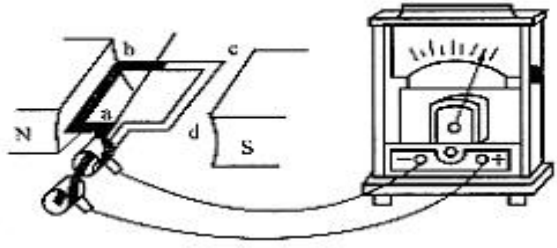


图 1.52 继电器在喇叭电路中用作大电流开关



# 《项目二 交流电路的应用》单元教学设计

## ——《任务一 正弦交流电电路》

 <b>课 题</b>	<h3>正弦交流电路</h3>	 <b>课型</b>	新课
<b>授课班级</b>		<b>授课时数</b>	2
<b>教学目标</b>	1. 掌握正弦交流电的基本概念，熟悉正弦交流电的三要素和表示方法。 2. 会比较同频率正弦交流电的相位，正确理解正弦交流电的最大值与有效值的关系。		
<b>教学重点</b>	正弦量相量表示。		
<b>教学难点</b>	正弦量相量计算。		
<b>教学方法</b>	任务驱动法、分析法、演示法、练习法。		
<b>时间分配</b>	<b>教学内容</b>	<b>教学 方法</b>	
<b>导入新课</b> 5min	<p>如图 2.1 所示，大小和方向都随时间做周期性变化的电流称为交流电，其中按正弦规律变化的交流电称为正弦交流电，简称交流电。我们日常生产生活中大量使用的就是正弦交流电。</p> <div style="display: flex; justify-content: space-around; align-items: flex-end;"> <div style="text-align: center;">                       a) 交流正弦波                 </div> <div style="text-align: center;">                       b) 交流方波                 </div> <div style="text-align: center;">                       c) 交流三角波                 </div> </div> <p style="text-align: center;">图 2.1 常见交流电流波形</p>	通过让学生观察常见的电路图，引发其思考。	
<b>讲授新课</b> 75min	<p><b>一、正弦交流电的三要素</b></p> <p><b>1. 正弦交流电的产生</b></p> <p>如图 2.2 所示为一个简单的交流发电机模型图，它由一对磁极与转子线圈组成，在外力作用下转子线圈匀速转动，穿过线圈平面的磁通量不断变化，根据电磁感应定律，线圈中就产生大小和方向都随时间按正弦规律变化的感应电动势，即正弦交流电。</p> <div style="text-align: center;">  </div> <p style="text-align: center;">图 2.2 交流发电机模型图</p> <div style="background-color: #e0f0ff; padding: 5px; margin: 10px 0;"> <p><b>【提示】</b>日常生活中，各类插座提供的就是 220V 工频正弦交流电。</p> </div> <p><b>2. 表征正弦交流电的物理量</b></p> <p>(1) 周期和频率</p> <p><b>【周期】</b>正弦交流电按正弦规律变化一周所需的时间称为周期，用符号 T</p>		运用实验演示进行教学。

表示，单位是秒（s）。如图所示。

**【频率】**正弦交流电在一秒内按正弦规律变化的周期数称为频率，用符号  $f$  表示，单位是赫[兹]（Hz）。根据定义，周期和频率互为倒数，即

$$T = \frac{1}{f}$$

**【角频率】**正弦交流电在单位时间内变化的弧度数称为角频率，常用  $\omega$  表示，单位是弧度/秒（rad/s）。在一个周期  $T$  内，正弦交流电变化了  $2\pi$  弧度，角频率和频率之间的关系为：

$$\omega = \frac{2\pi}{T} = 2\pi f$$

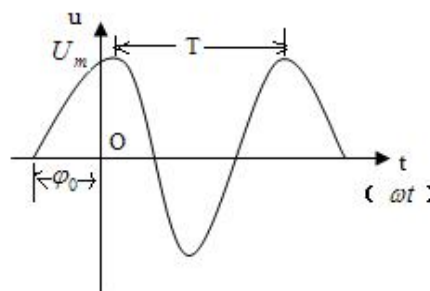


图 2.3 正弦交流电压波形

**【提示】**周期和频率都是用来表示交流电变化快慢的物理量。我国电力系统的标准频率为 50Hz，称为工频，美国、日本和德国采用的工频是 60Hz。

### (2) 瞬时值、最大值和有效值

**【瞬时值】**正弦交流电在某一瞬间的大小称为瞬时值，用小写字母表示，如  $e$ 、 $u$ 、 $i$  分别表示电动势、电压、电流的瞬时值。

**【最大值】**正弦交流电变化时出现的最大瞬时值称为最大值，用大写字母加下标  $m$  表示，如  $E_m$ 、 $U_m$ 、 $I_m$  分别表示电动势、电压、电流的最大值。

**【有效值】**交流电的有效值是根据交流电的热效应来规定的，让交流电与直流电分别通过同样阻值的电阻，如果在相同的时间内产生的热量相等，那么就把它一直流电的数值叫做这个交流电的有效值。

电动势、电压和电流的有效值分别用大写字母  $E$ 、 $U$ 、 $I$  表示，正弦交流电的有效值与最大值之间有如下关系：

$$I = \frac{I_m}{\sqrt{2}}$$

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

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

### (3) 相位和相位差

**【相位】**在正弦交流电压表达式  $u = U_m \sin(\omega t + \varphi_0)$  中， $(\omega t + \varphi_0)$  称为交流电的相位，它表示  $t$  时刻交流电对应的角度。 $t=0$  时的相位  $\varphi_0$  称为初相位，简称初相，它反映了交流电起始时刻的状态。

**【相位差】**两个同频率正弦交流电的相位之差称为相位差，用  $\Delta\varphi$  来表示。如果交流电的频率相同，相位差就等于初相之差，即

$$\Delta\varphi = (\omega t + \varphi_1) - (\omega t + \varphi_2) = \varphi_1 - \varphi_2$$

设正弦量:  $i = I_m \sin(\omega t + \psi_i)$   $u = U_m \sin(\omega t + \psi_u)$

$i$ 和 $u$ 的相位差为:  $\varphi = (\omega t + \psi_i) - (\omega t + \psi_u)$

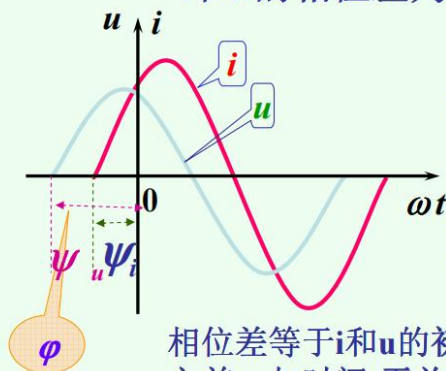
$$= \psi_i - \psi_u$$

如果:  $\varphi = \psi_i - \psi_u > 0$

称 $i$ 超前 $u$   $\varphi$ 角。

如果:  $\varphi = \psi_i - \psi_u < 0$

称 $i$ 滞后 $u$   $\varphi$ 角  
(如图所示)。



相位差等于 $i$ 和 $u$ 的初相之差,与时间 $t$ 无关。

**注意**

①同频率的正弦量才能比较相位; ②相位差和初相都规定不得超过 $180^\circ$ 。

如果:  $\varphi = \psi_i - \psi_u = 0$

称 $i$ 与 $u$ 同相位,简称同相。

如果:  $\varphi = \psi_i - \psi_u = \pm 90^\circ$

称 $i$ 与 $u$ 正交。

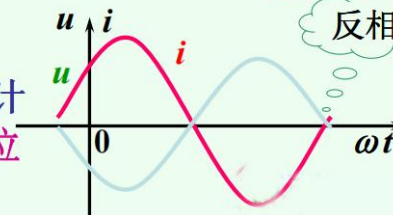
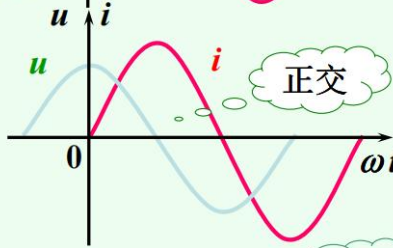
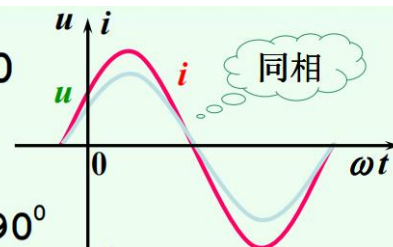
其特点是: 当一正弦量的值达到最大时, 另一正弦量的值刚好是零。

如果:  $\varphi = \psi_i - \psi_u = \pm 180^\circ$

称 $i$ 与 $u$ 反相。

**注意**

当两个同频率的正弦量计时起点改变时, 它们的初相位角改变, 但相位差不变。



可联系生活实际, 举出适当的例子。

**例 2-1** 已知一正弦电流  $i = 50\sqrt{2} \sin(314t - 60^\circ) A$ , 试求 (1) 最大值、有效值; (2) 频率和周期; (3) 相位和初相位。

**解:** (1) 由正弦电流  $i$  的表达式可得

最大值 
$$I_m = 50\sqrt{2} A$$

有效值 
$$I = \frac{1}{\sqrt{2}} I_m = 50 A$$

(2) 角频率 
$$\omega = 314 \text{ rad/s}$$

频率 
$$f = \frac{\omega}{2\pi} = \frac{314}{2 \times 3.14} = 50 \text{ Hz}$$

周期  $T = \frac{1}{f} = \frac{1}{50} = 20ms$

(3) 相位  $\varphi = (314t - 60^\circ)rad$

初相位  $\varphi = -60^\circ$

## 二. 正弦交流电的表示方法

**【解析式表示法】**用三角函数式来表示正弦交流电随时间变化的方法称为三角函数表示法。正弦交流电动势、电压和电流的瞬时值采用三角函数表示法分别是：

$$e = E_m \sin(\omega t + \varphi_e)$$

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

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

**【波形图表示法】**根据三角函数式计算得到的数据，将它们描绘在平面直角坐标系中画出曲线的方法，称为波形图表示法。其中用横坐标表示时间  $t$  或角度  $\omega t$ ，纵坐标表示正弦量的瞬时值。

**【相量表示法】**在平面直角坐标系中，相量可以用一条有向线段表示。该线段的长度等于正弦量的有效值，其与 X 轴正方向的夹角等于正弦量的初相位。相量的符号用有效值符号上加一圆点表示。

如正弦电压的相量用  $\dot{U}$  表示，正弦电流的

相量用  $\dot{I}$  表示等。

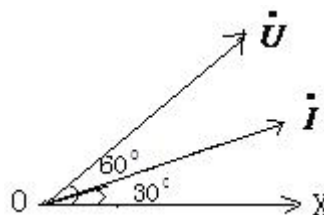


图 2.5 正弦交流电的相量表示法

**例 2-2** 已知  $i_1 = 3\sqrt{2} \sin(\omega t + 60^\circ)A$ ， $i_2 = 4\sqrt{2} \sin(\omega t - 30^\circ)A$ ，求相量  $\dot{I}_1$ 、 $\dot{I}_2$  及  $i_1 + i_2$ ，并画出相量图。如图 2.6 所示。

**解：**  $i_1$ 、 $i_2$  的有效值分别为

$$\dot{I}_1 = (3\sqrt{2} / \sqrt{2}) / 60^\circ = 3 / 60^\circ A$$

$$\dot{I}_2 = (4\sqrt{2} / \sqrt{2}) / -30^\circ = 4 / -30^\circ A$$

所以  $\dot{I} = \dot{I}_1 + \dot{I}_2 = 3 / 60^\circ + 4 / -30^\circ$

$$= 1.5 + j2.6 + 3.46 - j2$$

$$= (4.96 + j0.6) A = 5 / 6.9^\circ A$$

总电流  $i = i_1 + i_2 = 5\sqrt{2} \sin(\omega t + 6.9^\circ)A$

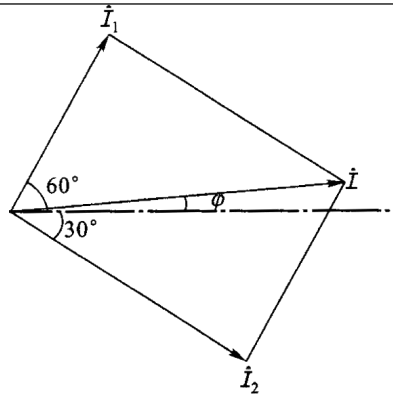


图 2.6 相量图



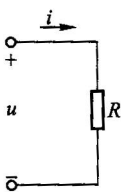
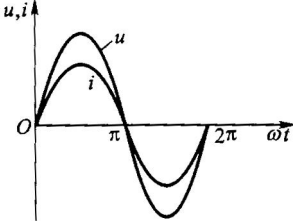
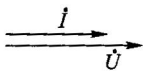
**注意：**

1. 只有对**同频率**的正弦周期量，才能应用对应的相量来进行代数运算。
2. 只有**同频率**的正弦量才能画在同一相量图上。
3. 正弦量与相量是**对应关系**，而不是**相等关系**（正弦交流电是时间的函数）。
4. 可推广到多个同频率的正弦量运算。

$$\begin{aligned} \sum i = 0 &\rightarrow \sum \dot{I} = 0 \\ \sum u = 0 &\rightarrow \sum \dot{U} = 0 \end{aligned}$$

基尔霍夫定律的相量形式

——《任务二 单相交流电路》

 课 题	单相交流电路		 课型	新课
授课班级			授课时数	2
教学目标	1. 掌握纯电阻交流电路的分析及相关计算。 2. 掌握纯电容交流电路的分析及相关计算。 3. 掌握纯电感交流电路的分析及相关计算。			
教学重点	R、L、C 元件电压与电流的相量关系与相量图，感抗、容抗计算。			
教学难点	R、L、C 电路电压和电流的关系。			
教学方法	任务驱动法、分析法、演示法、练习法。			
时间分配	教学内容			教学 方法
导入新课 5min	在实际电路中，电灯、电熨斗是只含电阻的负载，而日光灯、电风扇是除含有电阻外还具有电感和电容的负载，交流电作用在不同类型的负载上时，有各自不同的特性，本节我们来认识交流电路中的电阻、电感和电容。			通过让学生观察常见的电路图，引发其思考。
讲授新课 75min	<p>一、纯电阻电路</p> <p>1. 电压与电流关系</p> <p>电阻元件的电压电流关系由欧姆定律确定，在 <math>u</math>、<math>i</math> 参考方向一致时，两者的关系为</p> $u = iR$ <p>设电流为参考正弦量，即</p> $i = I_m \sin \omega t$ <p>则</p> $u = Ri = RI_m \sin \omega t = U_m \sin \omega t$ <p>由此可见，在纯电阻电路中，<math>u</math>、<math>i</math> 为同频率的正弦量，它们的相位相同。可画出 <math>u</math>、<math>i</math> 的波形图和相量图，如图 2.7 (b)、(c) 所示。</p> <div style="display: flex; justify-content: space-around; align-items: center;"> <div data-bbox="523 1518 644 1709">  <p>(a)</p> </div> <div data-bbox="692 1518 986 1738">  <p>(b)</p> </div> <div data-bbox="1034 1599 1177 1671">  <p>(c)</p> </div> </div> <p style="text-align: center;">图 2.7 纯电阻电路</p> <p>其有效值形式和相量形式分别为</p> $U = RI$ $\dot{U} = R\dot{I}$ <p><b>例 2-3</b> 在纯电阻电路中，如图 2-9 所示，已知加在电阻 <math>R</math> 上的电压瞬时值</p>			运用演示法进行教学。
				可联系



实际,举出适当的例子。

表达式  $u = 110\sqrt{2} \sin(200t + 60^\circ)$  (V), 电阻  $R=50\Omega$ , 求通过电阻 R 的电流  $i$ 。

**解:** 由电压表达式可写出正弦交流电压的相量, 为

$$\dot{U} = 110\angle 60^\circ \text{ (V)}$$

则电流相量式为

$$\dot{I} = \frac{\dot{U}}{R} = \frac{110\angle 60^\circ}{50} = 2.2\angle 60^\circ \text{ (A)}$$

把相量式换成电流瞬时值表达式, 为

$$i = 2.2\sqrt{2} \sin(200t + 60^\circ) \text{ (A)}$$

## 2. 电阻元件上的功率

### (1) 瞬时功率

瞬时电压与瞬时电流的乘积称为瞬时功率。

设

$$u = \sqrt{2}U \sin \omega t$$

$$i = \sqrt{2}I \sin \omega t$$

则瞬时功率为

$$p = ui = \sqrt{2}U \sin \omega t \times \sqrt{2}I \sin \omega t$$

$$= 2UI \sin^2 \omega t = UI(1 - \cos 2\omega t)$$

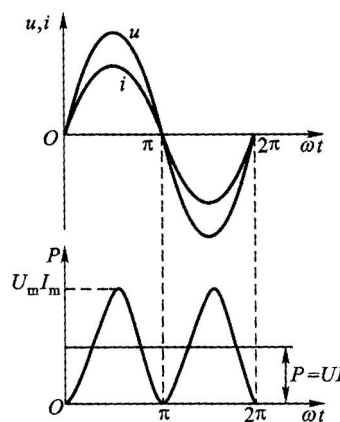


图 2.8 电阻元件功率

波形图如图 2.8 所示, 在任何时候  $p \geq 0$ , 即吸收功率, 说明电阻元件是耗能元件, 在电路中只能做负载消耗电能。

(2) 平均功率, 瞬时功率在一个周期内的平均值称为平均功率。

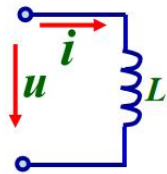
$$P = \frac{1}{T} \int_0^T p dt = \frac{1}{T} \int_0^T [UI - UI \cos 2(\omega t + \varphi)] dt = UI$$

因此  $P = UI = \frac{U^2}{R}$ , 平均功率又称为有功功率, 单位为瓦(W)或千瓦(KW)

表示。

## 二、纯电感交流电路

### 1. 电压与电流关系



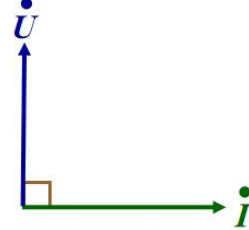
解析式:  $\begin{cases} \text{设 } i = I_m \sin \omega t \\ \text{则 } u_L = L \frac{di}{dt} = L \frac{d(I_m \sin \omega t)}{dt} \\ = I_m \omega L \cos \omega t \\ = U_{Lm} \sin(\omega t + 90^\circ) \end{cases}$

相量表达式:

$$\dot{I} = I \angle 0^\circ$$

$$\dot{U}_L = j \dot{I} \omega L = U_L \angle 90^\circ$$

相量图:



电感元件上  $u$  超前  $i$   $90^\circ$  电角。

电感元件上电压、电流的有效值关系为:

$$U = \omega L I = 2\pi f L I = I X_L$$

其中:  $X_L = 2\pi f L = \omega L$  称为电感元件的电抗, 简称感抗。感抗反映了电感元件对正弦交流电流的阻碍作用; 感抗的单位与电阻相同, 也是欧姆【 $\Omega$ 】。

感抗与哪些因素有关?

$X_L$  与频率成正比; 与电感量  $L$  成正比

直流下频率  $f=0$ , 所以  $X_L=0$ 。  $L$  相当于短路。

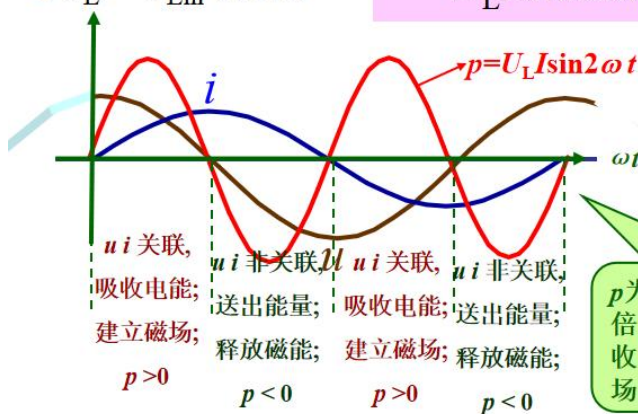
直流情况下感抗为多大?

由于  $L$  上  $u$ 、 $i$  为微分 (或积分) 的动态关系, 所以  $L$  是动态元件。

## 2. 电感元件上的功率

(1) 瞬时功率

$$\begin{cases} i = I_m \sin \omega t \\ u_L = U_{Lm} \cos \omega t \end{cases} \quad \text{则 } p = u_L \cdot i = U_{Lm} \cos \omega t \cdot I_m \sin \omega t = U_L I \sin 2\omega t$$



结论:

电感元件上只有能量交换而不耗能, 为储能元件

$p$  为正弦波, 频率为  $ui$  的 2 倍; 在一个周期内,  $L$  吸收的电能等于它释放的磁场能。

(2) 平均功率

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T p dt = \frac{1}{T} \int_0^T U I \sin 2\omega t dt = 0 \quad (2-24)$$

在正弦交流电路中，电感元件与电源之间不停地有能量的往返交换。在一个周期内电感元件从电源取用的能量等于它归还给电源的能量，电感元件并不消耗能量，因此平均功率为零。

### (3) 无功功率

为反映电感元件与电源之间能量相互转换的规模，把电感瞬时功率的最大值定义为无功功率，用  $Q_L$  表示，即

$$Q_L = UI$$

无功功率的单位为乏 (var) 或千乏 (kvar)。

由于 
$$U = X_L I$$

所以 
$$Q_L = UI = X_L I^2$$

应当注意无功功率并不是“无用”功率，因为电感负载与电源之间的能量相互转换是正常工作所必需的，“无功”含义是说它没有被消耗掉。

为了加以区分，常把实际消耗的功率，即平均功率  $P$  称为有功功率。

**例 2-4** 一个 80mH 的电感线圈，内阻可忽略不计，接在  $u = 220\sqrt{2} \sin 100\pi t V$  的电源上，求流过线圈的电流  $i$  无功功率  $Q_L$ 。若电源频率变为 500Hz 时，流过线圈的电流将如何变化？

**解：**从电压解析式可知： $U = 220V$ ， $f = 50Hz$ 。

$$X_L = 2\pi fL = 2 \times 3.14 \times 50 \times 80 \times 10^{-3} = 25.12\Omega$$

$$I = \frac{U}{X_L} = \frac{220}{25.12} = 8.76A$$

因为纯电感电路电压超前电流  $90^\circ$ ，所以

$$i = 8.76\sqrt{2} \sin(100\pi t - 90^\circ) A$$

$$Q_L = UI = 220 \times 8.76 = 1927.2 \text{ var}$$

当  $f = 500Hz$  时

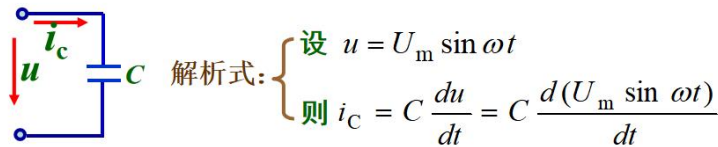
$$X_L = 2\pi fL = 2 \times 3.14 \times 500 \times 80 \times 10^{-3} = 251.2\Omega$$

$$I = \frac{U}{X_L} = \frac{220}{251.2} = 0.876A$$

由此可知，频率增高，感抗增大，电流减少。

## 三、纯电容电路

### 1. 电压与电流关系



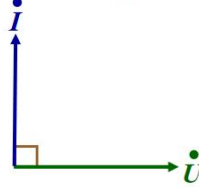
相量表达式:

$$\dot{U} = U \angle 0^\circ$$

$$\dot{I}_C = j\dot{U}\omega C = I_C \angle 90^\circ$$

$$\begin{aligned} &= U_m \omega C \cos \omega t \\ &= I_{Cm} \sin(\omega t + 90^\circ) \end{aligned}$$

相量图:



电容元件上  $i$  超前  $u$   $90^\circ$  电角。

电容元件上电压、电流的有效值关系为:

$$I_C = U\omega C = U2\pi f C = U/X_C$$

其中:  $X_C = \frac{1}{\omega C}$  称为电容元件的电抗, 简称容抗。容抗反映了电容元

件对正弦交流电流的阻碍作用; 容抗的单位与电阻相同, 也是欧姆【 $\Omega$ 】。

容抗与哪些因素有关?

$X_C$  与频率成反比; 与电容量  $C$  成反比

直流下频率  $f=0$ , 所以  $X_C = \infty$ 。C 相当于开路。

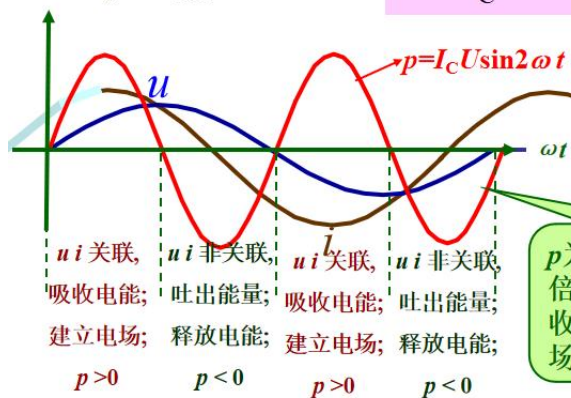
直流情况下容抗为多大?

由于  $C$  上  $u$ 、 $i$  为微分 (或积分) 的动态关系, 所以  $C$  也是动态元件。

## 2. 电容元件上的功率

### (1) 瞬时功率

$$\begin{cases} u = U_m \sin \omega t \\ i_c = I_{Cm} \cos \omega t \end{cases} \quad \text{则} \quad \begin{aligned} p &= i_c \cdot u = I_{Cm} \cos \omega t \cdot U_m \sin \omega t \\ &= I_C U \sin 2\omega t \end{aligned}$$



### (2) 平均功率

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T p dt = \frac{1}{T} \int_0^T UI \sin 2\omega t dt = 0$$

在正弦交流电路中, 电容元件与电源之间不停地有能量的往返交换。在一

个周期内电容元件从电源取用的能量等于它归还给电源的能量，电容元件并不消耗能量，因此平均功率为零。

(3) 无功功率

为反映电容元件与电源之间能量相互转换的规模，把电容元件瞬时功率的最大值定义为无功功率，用  $Q_C$  表示，即

$$Q_C = UI$$

无功功率的单位为乏 (var) 或千乏 (kvar)。

由于 
$$U = X_C I$$

所以 
$$Q_C = UI = X_C I^2$$

**例 2-5** 已知电压  $u = 55\sqrt{2} \sin(\omega t + 30^\circ) \text{V}$ ，电容  $C = 22\mu\text{F}$ ，分别求电压频率为 50Hz 和 50KHz 时通过电容的电流及无功功率。

**解：**当频率 50Hz 时

$$\omega = 2\pi f = 2 \times 3.14 \times 50 = 314 \text{ rad/s}$$

$$X_C = \frac{1}{\omega C} = \frac{1}{314 \times 22 \times 10^{-6}} = 144.8 \Omega$$

$$I = \frac{U}{X_C} = \frac{55}{144.8} = 0.38 \text{ A}$$

$$Q_C = UI = 55 \times 0.38 = 20.9 \text{ var}$$

当频率为 50KHz 时

$$X_C = \frac{1}{\omega C} = \frac{1}{2\pi f C} = \frac{1}{2 \times 3.14 \times 50 \times 10^3 \times 22 \times 10^{-6}} = 0.1448 \Omega$$

$$I = \frac{U}{X_C} = \frac{55}{0.1448} = 380 \text{ A}$$

$$Q_C = UI = 55 \times 380 = 20900 \text{ var}$$

由上计算可知，电容对低频交流电的容抗较大，对电流的阻碍作用也大，相反对高频交流电容抗较小，对电流有阻碍作用也小。因此电容具有通高频阻低频的作用。

<p><b>课堂总结</b> 10min</p>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 交流电路的电压与电流的关系，能熟练画出相应的相量图。</li> <li>2. 纯电阻、纯电感、纯电容电路中的能量转换，会分析和计算单一参数的交流电路。</li> <li>3. 用双踪示波器测量 R、L、C 元件的阻抗频率特性阻抗角。</li> </ol>	<p>归纳总结本节课的知识点。</p>
------------------------------	---	---------------------

 <b>布置作业</b>	<p>1.在电阻 <math>R=100\Omega</math> 的电路路上，加上 <math>u = 311\sin(314t + 30^\circ)V</math> 的电压，求该电路中电流的有效值及电流的解析式，并画相量图。</p> <p>2. 把一个 <math>L = 100mH</math> 的纯电感元件接在电压 <math>u = 220\sqrt{2}\sin 314tV</math> 交流电源上。求感抗 <math>X_L</math>，电流 <math>I</math>，有功功率 <math>P</math>，无功功率 <math>Q</math>，画出电压、电流相量图。</p> <p>3.把一个 <math>C=60\mu F</math> 的纯电容元件接在频率分别为 <math>f_1=50Hz</math> 和 <math>f_2=500Hz</math> 的不同电源上，电源电压均为 <math>15V</math>。求分别接在两个不同频率电源时的容抗 <math>X_C</math>，电流 <math>I</math> 及无功功率 <math>Q</math>。</p>			
<b>教学反思</b>				
 <b>课 题</b>	<b>RLC 串联电路的分析与技能操作</b>		 <b>课型</b>	新课
<b>授课班级</b>		<b>授课时数</b>	2	
<b>教学目标</b>	<p>1. 掌握 RLC 串联交流电路中的能量转换，串联谐振的条件及特点。</p> <p>2. 掌握 RLC 串联交流电路中电压与电流的关系，能熟练地画出相应的相量图，学会用相量分析较复杂的交流电路，掌握 RLC 串联交流电路中的功率计算。</p> <p>3. 会测定 RLC 串联谐振电路的频率特性曲线，进一步加深对串联谐振电路特性的理解。</p>			
<b>教学重点</b>	有功功率、无功功率、视在功率、功率因素及提高功率因素意义和方法。			
<b>教学难点</b>	提高功率因数的有关计算。			
<b>教学方法</b>	任务驱动法、分析法、演示法、练习法。			
<b>时间分配</b>	<b>教学内容</b>	<b>教学 方法</b>		
<b>导入新课</b> 5min	<p>实际交流电路通常是由为电阻、电感和电容等元件组合而成。其中 RLC 串联的交流电路在工程应用中占有重要的地位。那 RLC 串联交流电路中的电压与电流是什么关系？功率和能量是怎样转换的？RLC 串联谐振电路的谐振条件和特点是什么？</p>	通过让学生观察常见的电路，引发其思考。		
<b>讲授新课</b> 75min	<p style="text-align: center;"><b>一、RLC 串联电路电压与电流的关系</b></p> <p><b>【RLC 串联电路】</b>是由电阻、电感和电容串联组成的交流电路。</p> <p>当电路两端加一正弦电压 <math>u</math> 时，电路中产生的同一电流在 <math>R</math>、<math>L</math>、<math>C</math> 两端分别形成 <math>u_R</math>、<math>u_L</math>、<math>u_C</math>，其参考方向标于图上。如图所示：</p> <div style="display: flex; justify-content: space-around; align-items: center;"> <div data-bbox="459 1736 662 2027">  <p style="text-align: center;">(a) 电路图</p> </div> <div data-bbox="710 1736 1029 2027">  <p style="text-align: center;">(b) 相量图</p> </div> </div>	运用演示法进行教学。		

图 2.9 RLC 串联电路

根据基尔霍夫电压定律，可列出

$$u = u_R + u_L + u_C$$

设电流  $i$  为参考正弦量，其瞬时表达式为

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

则有

$$\begin{aligned} u &= u_R + u_L + u_C \\ &= U_{Rm} \sin \omega t + U_{Lm} \sin(\omega t + 90^\circ) + U_{Cm} \sin(\omega t - 90^\circ) \\ &= U_m \sin(\omega t + \varphi) \end{aligned}$$

由于电路中各处电压、电流都是同频率的正弦量，故可写成相量形式：

$$\dot{U} = \dot{U}_R + \dot{U}_L + \dot{U}_C = \dot{I}R + j\dot{I}X_L - j\dot{I}X_C = \dot{I}[R + j(X_L - X_C)]$$

以电流相量为参考相量，可画出相量图如图 (b) 所示。

$$\begin{aligned} U &= \sqrt{U_R^2 + (U_L - U_C)^2} = \sqrt{(IR)^2 + (IX_L - IX_C)^2} \\ &= I\sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2} = IZ \\ |Z| &= \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2} \end{aligned}$$

$|Z|$  为电路中总阻抗， $R$ ， $X_L - X_C$  三者之间的关系可用一个直角三角形——阻抗三角形来表示，如图 2.10 所示。

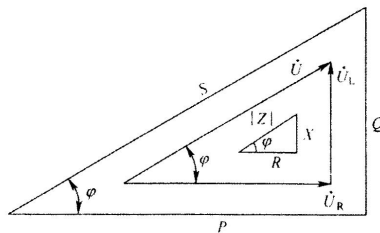


图 2.10 RLC 电路的电压、阻抗、功率三角形

电压  $u$  与电流  $i$  之间的相位差  $\varphi$  由下式求得

$$\varphi = \arctan \frac{U_L - U_C}{U_R} = \arctan \frac{X_L - X_C}{R}$$

#### 有关电路性质讨论？

由以上分析可知：

- (1) 当  $X_L > X_C$  时， $\varphi > 0$ ，表明电压  $u$  超前电流  $i$  一个角  $\varphi$ ，电路呈电感性。
- (2) 当  $X_L < X_C$  时， $\varphi < 0$ ，表明电流  $i$  超前电压  $u$  一个角  $\varphi$ ，电路呈电容性。
- (1) 当  $X_L = X_C$  时， $\varphi = 0$ ，表明电压  $u$  与电流  $i$  同相，此时电路呈电阻性。

#### 二、RLC 串联电路的功率

可联系实际，举出适当的例子。

### 1.瞬时功率

设 RLC 串联电路的瞬时电压和电流分别为

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

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

由电路的瞬时功率  $p$  为

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

### 2.平均功率（有功功率）

由于电阻元件上要消耗电能，相应的有功功率  $P$  为

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T P dt [UI \cos \varphi - UI \sin(2\omega t + \varphi)] = UI \cos \varphi$$

### 3.无功功率

电感元件和电容元件与电源之间进行能量交换，用无功功率  $Q$  衡量其能量交换的规模，其大小为

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

由电压三角形可得：

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

$$Q = U \sin \varphi$$

### 4.视在功率

在交流电路中，把电压与电流的有效值的乘积定义为正弦交流电路的视在功率，用符号  $S$  表示，即

$$S = UI$$

视在功率  $S$  的单位是伏安（VA）或千伏安（KVA）。

由于

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

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

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

功率因数 
$$\cos \varphi = \frac{P}{S} = \frac{U_R}{U} = \frac{R}{|Z|}$$

**【提示】**功率三角形适用于任何交流电路，其中  $\varphi$  角为电路的总电压和总电流的相位差。电路的有功功率表示电路中消耗的功率，视在功率则表示电源可能提供的功率。

**例 2-6** 将  $R=17\Omega$ ， $L=0.14\text{H}$  的线圈与  $C=106\mu\text{F}$  的电容器串联，接到 220V，50Hz 的交流电源上，求电流  $I$ ，电压  $U_R$ ， $U_L$ ， $U_C$ ，有功功率  $P$ 、无功功率  $Q$  和



视在功率 S。

解：先求感抗和容抗，再求总阻抗。

$$X_L = 2\pi fL = 2\pi \times 50 \times 0.14 = 44\Omega$$

$$X_C = \frac{1}{2\pi fC} = \frac{1}{2\pi \times 50 \times 106 \times 10^{-6}} = 30\Omega$$

$$|Z| = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2} = \sqrt{17^2 + (44 - 30)^2} = 22\Omega$$

电流有效值  $I = \frac{U}{|Z|} = \frac{220}{22} = 10A$

电阻上的电压  $U_R = IR = 10 \times 17 = 170V$

电感上的电压  $U_L = IX_L = 10 \times 44 = 440V$

电容上的电压  $U_C = IX_C = 10 \times 30 = 300V$

有功功率  $P = RI^2 = 17 \times 10^2 = 1700W$

无功功率  $Q = (X_L - X_C)I^2 = 14 \times 10^2 = 1400 \text{ var}$

视在功率  $S = UI = 220 \times 10 = 2200V \cdot A$

可联系实际，举出适当的例子。

### 三、串联谐振电路

**【谐振】**是含有 R、L、C 的一端口电路，在特定条件下出现端口电压、电流同相位的现象时，称电路发生了谐振。

#### 1. 串联谐振条件和谐振频率

根据串联谐振的定义，当电路发生谐振时，产生串联谐振的条件为  $X_L = X_C$ ，即

$$\omega_0 L = \frac{1}{\omega_0 C}$$

由此得：

谐振条件

#### 1. 串联谐振条件和谐振频率

根据串联谐振的定义，当电路发生谐振时，产生串联谐振的条件为  $X_L = X_C$ ，即

$$\omega_0 L = \frac{1}{\omega_0 C}$$

谐振角频率

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}$$

仅与电路参数有关

谐振频率 
$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$$

谐振时电源的频率称为谐振频率，用  $f_0$  表示。

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$$

## 2. 串联谐振的特点

(1) 电流与电压同相位，电路呈纯电阻性。

(2) 串联谐振时电路阻抗最小，在电压一定时，电路中电流最大。当发生串联谐振时，其电抗为

$$X = X_L - X_C = 0$$

电路的阻抗为最小，即

$$|Z| = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2} = R$$

电流最大，即

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

(3) 串联谐振时电感两端的电压，电容两端的电压比总电压大很多。

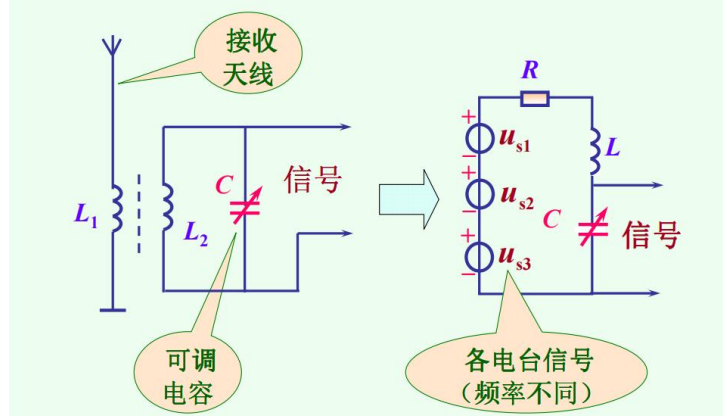
**【品质因数】**——Q 值电路处于串联谐振时，电感或电容上的电压和总电压之比。

$$\text{谐振时: } \begin{cases} U_L = \frac{X_L}{R} U = \frac{\omega_0 L}{R} U \\ U_C = \frac{X_C}{R} U = \frac{1}{\omega_0 C R} U \end{cases}$$

$$\therefore Q = \frac{U_L}{U} = \frac{U_C}{U} = \frac{\omega_0 L}{R} = \frac{1}{\omega_0 R C}$$

在谐振状态下,若  $R < X_L$ 、 $R < X_C$ , Q 则体现了电容或电感上电压比电源电压高出的倍数。

**应用举例：**无线电接收设备的输入调谐电路如图。



课堂总结

1.RLC 串联交流电路中的能量转换，串联谐振的条件及特点。

归纳总

10min	2. RLC 串联交流电路中电压与电流的关系，能熟练地画出相应的相量图，学会用相量分析较复杂的交流电路，掌握 RLC 串联交流电路中的功率计算。 3. 串联谐振电路的频率特性曲线。	结本节课的知识点。
 布置作业	1. 在 RLC 串联电路中，电阻 $R=30\Omega$ ，电感线圈 $L=445\text{mH}$ ，电容器的电容 $C=32\mu\text{F}$ ，电路的总电压 $u=220\sin 314t\text{V}$ ，求：（1）电路电流的瞬时值 $i$ 的表达式；（2）电阻 $R$ 、电感线圈 $L$ 、电容 $C$ 两端的电压有效值各是多少？ 2. 在 RLC 串联电路中，已知电阻 $R=10\Omega$ ， $L=0.2\text{H}$ ， $C=10\mu\text{F}$ ，在频率分别为 200Hz 和 300Hz 时，电路分别呈现什么性质？	
教学反思		
 课 题	<b>RLC 并联电路的分析与技能操作</b>	 课型
授课班级		授课时数
		2
教学目标	1. 了解 RLC 并联交流电路中的能量转换，并联谐振的条件及特点。 2. 掌握 RLC 并联交流电路中电压与电流的关系，能熟练地画出相应的相量图，学会用相量分析较复杂的交流电路，掌握 RLC 并联交流电路中的功率计算及提高电路功率因数的意义和方法。 3. 理解日光灯电路的工作原理，并学会接线。学会使用功率表、功率因数表。	
教学重点	RLC 并联交流电路中电压与电流的关系，能熟练地画出相应的相量图。	
教学难点	RLC 并联交流电路中的功率计算及提高电路功率因数的意义和方法。	
教学方法	任务驱动法、分析法、演示法、练习法。	
时间分配	教学内容	教学方法
导入新课 5min	RLC 并联交流电路常见的是电感（等效为 RL 串联电路）与电容器的并联电路。RLC 并联交流电路中的电压与电流的关系是什么？功率和能量是怎样转换的？RLC 并联谐振电路的谐振条件和特点是什么？	通过让学生观察常见的电路，引发其思考。
讲授新课 75min	<p>二、RLC 并联电路电压与电流的关系</p> $I = \sqrt{(I_1 \cos \varphi_1)^2 + (I_1 \sin \varphi_1 - I_2)^2}$ <p>式中：<math>I_1 = \frac{U}{Z_1} = \frac{U}{\sqrt{R^2 + X_L^2}}</math> 为感性负载的电流</p> $\varphi_1 = \arctan \frac{X_L}{R} \quad I_2 = \frac{U}{Z_2} = \frac{U}{X_C} = \omega C U$ <p>总电流滞后总电压的相位差：</p> $\varphi = \arctan \frac{I_1 \sin \varphi_1 - I_2}{I_1 \cos \varphi_1}$ <p>电压与电流同相位时，发生谐振</p> <p>有关电路性质讨论？</p> 	运用演示法进行教学。

由以上分析可知：  
由以上分析可知：

- (1) 当  $I_1 \sin \varphi_1 > I_C$ ，时，总电流  $\dot{I}$  滞后于电压  $\dot{U}$ ，整个电路为感性负载；
- (2) 当  $I_1 \sin \varphi_1 < I_C$ ，时，总电流  $\dot{I}$  超前于电压  $\dot{U}$ ，整个电路为容性负载；

讲授新课  
75min

- (3) 当  $I_1 \sin \varphi_1 = I_C$ ，时，总电流  $\dot{I}$  与电压  $\dot{U}$  同相，整个电路为阻性负载，此时总电流  $I$  的数值最小，而总的功率因数为最大， $\cos \varphi_1 = 1$ 。

## 二、RLC 并联电路的功率

### 1. 并联电路总的有功功率

线圈支路的有功功率  $P_1 = UI_1 \cos \varphi$ ，无功功率  $Q_L = UI_1 \sin \varphi_1$ ；电容器不取用有功功率，它的无功功率  $Q_C = UI_C$ ，故电路的总有功功率就等于线圈支路的有功功率：

$$P = UI \cos \varphi = UI_1 \cos \varphi_1$$

### 2. 并联电路总的无功功率

$$Q = Q_L - Q_C = I_1^2 X_L - I_C^2 X_C = UI \sin \varphi_1$$

可见， $Q < Q_L$ ，即总的无功功率比线圈支路的无功功率要小。

## 三、并联谐振电路

$I_1 \sin \varphi_1 = I_C$  总电流与电压同相，整个电路

呈纯电阻性，这种状态称为并联谐振。

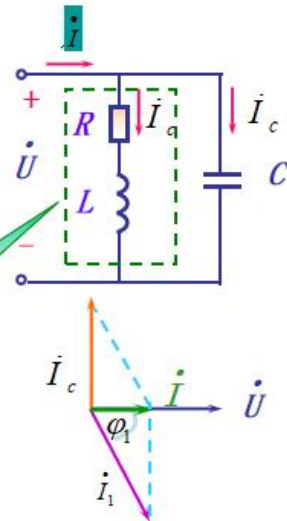
### 1. 并联谐振条件和谐振频率

一般线圈电阻  $R \ll X_L$  (忽略R) 得：

$$\frac{1}{\omega_0 L} \approx \omega_0 C \Rightarrow \omega_0 \approx \frac{1}{\sqrt{LC}}$$

谐振频率

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$$



### 2. 并联谐振的特点

- (1) 总阻抗最大，且为纯电阻性，其值为

$$Z = \frac{L}{RC} = \frac{(\omega_0 L)^2}{R} = R_0$$

这时电路阻抗模为最大，相当于纯电阻，电路总电流为最小，为

可联系生活实际，举出适当的例子。

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

(2) 电路谐振时，电压与电流同相，电路呈阻性，电源与电路间没有发生能量交换，能量交换只发生在电容与电感之间。

(3) 电感支路与电容支路电流近似相等，且为总电流的  $Q$  倍

$$Q = \frac{I_1}{I_0} = \frac{\frac{U}{\omega_0 L}}{\frac{U}{R_0}} = \frac{R_0}{\omega_0 L} = \frac{(\omega_0 L)^2}{R} = \frac{\omega_0 L}{R}$$

(4) 在并联电路中，当信号频率等于电路谐振频率时，电路阻抗最大，电流通过时电路两端产生的电压也最大。

#### 四、功率因数的提高

##### 1. 功率因数提高的意义

$$P = UI \cos \varphi$$

(1) 功率因数  $\cos \varphi$  过低，电源设备的容量不能充分利用。

(2) 功率因数  $\cos \varphi$  过低，将增加电力网中输电线路上的电能损耗。当电源电压  $U$  和负载功率  $P$  一定时，电源供给负载的电流（即输电线路上的电流）为

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

显然，功率因数越低，则线路电流越大。

##### 2. 提高功率因数的方法

设需求的  $\cos \varphi$  为已知，由相量图分析可求得应并联电容器电容值的公式：

$$\text{因为： } I_C = I_1 \sin \varphi_1 - I \sin \varphi = \frac{P}{U} (\tan \varphi_1 - \tan \varphi) = \omega C U$$

$$\text{所以： } C = \frac{P}{\omega U^2} (\tan \varphi_1 - \tan \varphi)$$


**例：**在 RLC 的并联电路中，电压  $u = 60 \sin(1000t + 60^\circ) V$ ，电阻  $R = 30 \Omega$ ，电感线圈的感抗  $X_L = 50 \Omega$ ，电容器的容抗  $X_C = 50 \Omega$ ，求：(1) 电路中的电流  $I$ ；(2) 电路中的有功功率  $P$ 、感性无功功率  $Q_L$ 、容性无功功率  $Q_C$  和视在功率  $S$ 、电路的功率因数。

**解：**(1) 因为  $X_L = X_C$ ，所以电路的阻抗  $Z = R = 30 \Omega$ 。则电路中的电流为




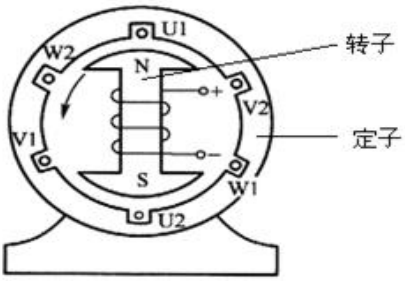
$$I = \frac{U}{Z} = \frac{60}{\sqrt{2} \times 30} = 1.41 A$$

$$(2) \text{ 电路中的有功功率 } P = I^2 R = 1.41^2 \times 30 = 60 W$$

$$\text{感性无功功率 } Q_L = I^2 X_L = 1.41^2 \times 50 = 100 \text{ var}$$

	<p>容性无功功率 <math>Q_C = I^2 X_C = 1.41^2 \times 50 = 100 \text{ var}</math></p> <p>视在功率</p> $S = \sqrt{P^2 + (Q_L - Q_C)^2} = \sqrt{60^2 + (100 - 100)^2} = 60V \cdot A$ <p>电路的功率因数 <math>\cos \varphi = \frac{P}{S} = \frac{60}{60} = 1</math></p> <p><b>【想一想】</b> 1.电压三角形与功率三角形的几何关系？ 2.电动机为什么需要无功功率？</p> <p><b>【提示】</b> 在实际电力系统中，并不要求功率因数提高到 1。因为这样做经济效果并不显著，反而会增加大量的设备投资。根据具体的电路，通过经济技术比较，把功率因数提高到 0.9-0.95 即可。</p>	
<p><b>课堂总结</b> 10min</p>	<p>1. RLC 并联交流电路中的能量转换，并联谐振的条件及特点。 2. RLC 并联交流电路中电压与电流的关系。 3. RLC 并联交流电路中的功率计算及提高电路功率因数的意义和方法。</p>	<p>归纳总结本节课的知识点。</p>
<p> <b>布置作业</b></p>	<p>1.在 RLC 并联电路中，电阻 <math>R=30\Omega</math>，电感线圈 <math>L=445\text{mH}</math>，电容器的电容 <math>C=32\mu\text{F}</math>，求：（1）要使电路发生谐振，电源的频率 <math>f</math> 为多少？（2）当电源的频率为 <math>10\text{KHz}</math> 时，保持线圈不变，并联谐振时的电容 <math>C</math> 的值。</p> <p>2. 在 LC 并联谐振电路中，已知线圈内阻 <math>R = 2\Omega</math>，线圈 <math>L = 64\text{mH}</math>，电容 <math>C = 0.1\mu\text{F}</math>，求电路的谐振频率、品质因素、谐振等效阻抗、总电流和支路电流。</p> <p>3. 有一只日光灯，接在 <math>220\text{V}</math>、<math>50\text{Hz}</math> 的正弦交流电上，正常工作时额定功率 <math>P = 40\text{W}</math>，功率因数为 <math>0.4</math>，试求电路中的电流，如要日光灯电路功率因素增大到 <math>0.8</math>，需要并联多大的电容器，此时电路的电流变为多少？</p>	
<p><b>教学反思</b></p>		

——《任务三 三相交流电路》

 <b>课 题</b>	<h2 style="color: blue;">三相交流电路</h2>	 <b>课型</b>	新课
<b>授课班级</b>		<b>授课时数</b>	2
<b>教学目标</b>	1. 了解三相正弦交流电的产生过程。 2. 会分析星形连接方式下线电压和相电压、线电流和相电流的关系。 3. 会分析三角形连接方式下线电压和相电压、线电流和相电流的关系。		
<b>教学重点</b>	1. 对称三相交流电源的连接特点。 2. 对称三相负载的连接特点。		
<b>教学难点</b>	1. 三相交流电路的线、相电压的关系，线、相电流的关系。 2. 三相负载的线、相电压的关系，线、相电流的关系。		
<b>教学方法</b>	读书指导法、分析法、演示法、练习法。		
<b>时间分配</b>	<b>教学内容</b>	<b>教学 方法</b>	
<b>导入新课</b> 5min	在工厂、实验室或需要安装大功率空调的场所，我们常常见到的如图所示四孔插座。它与一般两孔、三孔插座不同之处，在于它引入的是三相正弦交流。三相正弦交流电是三个频率相同、相位互差 120°、幅度大小相等的电压组成的。目前，世界各国电力系统普遍采用三相交流电源，如有需要单相供电的地方，可以应用三相交流电中的一相。		通过让学生观察常见的电路，引发其思考。
<b>讲授新课</b> 75min	<p style="text-align: center;"><b>一、三相正弦交流电的产生</b></p> <p>三相交流发电机有三个绕组，可以产生三相电源。图 3.1b 为三相交流发电机原理示意图，如图 3.1 所示它主要由定子和转子构成。定子中嵌有三个完全相同且相互独立的绕组，在空间位置上彼此相隔 120°，分别用 U1U2、V1V2、W1W2 表示。U1、V1、W1 表示各相绕组的首端，； U2、V2、W2 表示各相绕组的末端。每个绕组称为发电机的一相，分别称为 U 相、V 相和 W 相。</p> <div style="display: flex; justify-content: space-around; align-items: center;"> <div style="text-align: center;">                       (a) 实物图                 </div> <div style="text-align: center;">                       (b) 原理示意图                 </div> </div> <p style="text-align: center;">图 3.1 三相交流发电机</p> <p>当转子在外加驱动力的作用下顺时针匀速旋转时，就相当于定子每相绕组以角速度 <math>\omega</math> 逆时针旋转，作切割磁感线运动，从而产生感应电动势 <math>e_U</math>、<math>e_V</math>、<math>e_W</math>。由于三个绕组结构相同，在空间相差 120° 的角度，因此，三个感应电动势 <math>e_U</math>、<math>e_V</math>、<math>e_W</math> 的频率相同、最大值相等、相位彼此相差 120°。各相电动势的三角函数表达式为：</p>		运用演示法进行教学。

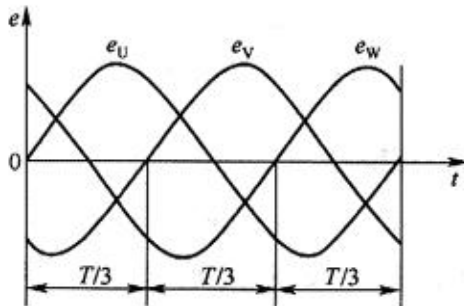


$$e_U = e_m \sin \omega t$$

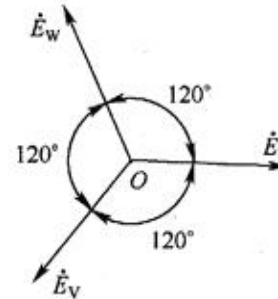
$$e_V = e_m \sin(\omega t - 120^\circ)$$

$$e_W = e_m \sin(\omega t - 240^\circ) = e_m \sin(\omega t + 120^\circ)$$

如果以  $e_U$  为参考正弦量，则三相电动势波形如图 3.2 (a) 所示，相量如图 3.3 (b) 所示。



a) 波形图



b) 相量图

图 3.2 三相电动势

**【三相电动势】**是在电工技术和电力工程中，把这种有效值相等、频率相同、相位上相差  $120^\circ$  的三相电动势。具有供给三相电动势的电源称为三相电源。

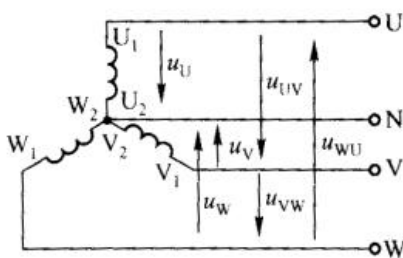
各个相电压表达式分别为： $U_U = U_m \sin \omega t$ ； $U_V = U_m \sin(\omega t - 120^\circ)$ ；

$U_W = U_m \sin(\omega t + 120^\circ)$ 。

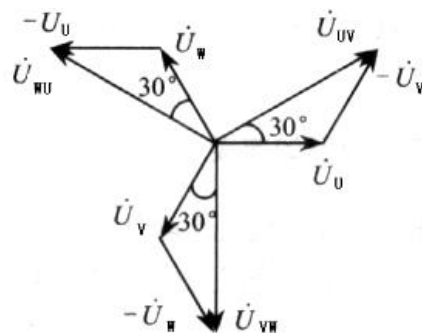
**【提示】**通常把三相电动势到达最大值的先后次序，称做相序。按 U—V—W 的次序循环的相序称为正相序；按 U—W—V 的次序循环的相序称为逆相序。相序是由发电机电枢的旋转方向决定的，通常采用正相序。电力系统通常用不同的颜色来区别电源的 U、V、W 三相，黄色表示 U 相，绿色表示 V 相，红色表示 W 相。

## 二、三相电源的连接

### 1. 星形连接 (Y 形)



(a) 三相交流电的星形连接



(b) 相电压与线电压的相量图

图 3.3 三相电源星形连接与相量图

**【中性线】**如果把三相发电机绕组的三个末端连在一点，这一点称为中性点，用 N 表示，从中点引出的导线称为中性线。

**【三相四线制】**从绕组的三个始端引出三条输电线，称为相线（或端线），俗称火线，这种连接方法称为三相电源的星形（Y 形）连接，由三根相线、一

根中线构成的供电系统称为三相四线制。通常低压供电网都采用三相四线制。

**【线电压】**相线与中性线间的电压称为相电压，而任意相线之间的电压称为线电压。相量图如图 3-3(b)所示，图中  $\dot{U}_U$ 、 $\dot{U}_V$  和  $\dot{U}_W$  为相电压相量， $\dot{U}_{UV}$ 、 $\dot{U}_{VW}$  和  $\dot{U}_{WU}$  为线电压相量。由图可知线电压也是频率相同、幅度相等、相位互差  $120^\circ$  的三相对称交流电，但在相位上比相电压超前  $30^\circ$ 。

线电压与相电压的关系为： $u_{UV} = u_U - u_V$ ， $u_{VW} = u_V - u_W$ ，

$$u_{WU} = u_W - u_U$$

相量关系式为：

$$\left. \begin{aligned} \dot{U}_{UV} &= \dot{U}_U - \dot{U}_V \\ \dot{U}_{VW} &= \dot{U}_V - \dot{U}_W \\ \dot{U}_{WU} &= \dot{U}_W - \dot{U}_U \end{aligned} \right\}$$

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

**【提示】**在我国照明电路中，相电压为 220V，线电压一般给动力线路供电，为 380V。

## 2. 三角形连接 ( $\Delta$ 形)

**【三角形连接】**如图所示，如果将交流发电机三相绕组的首、末端依次相连，从三个连接点引出三根端线，这种连接方法称为三角形连接。

**【三相三线制供电】**这种供电方式只用三根输电线，称为三相三线制供电。

$$U_{UV} = U_{VW}, U_{VW} = U_{WU}, U_{WU} = U_{UV}$$

即

$$U_L = U_P$$

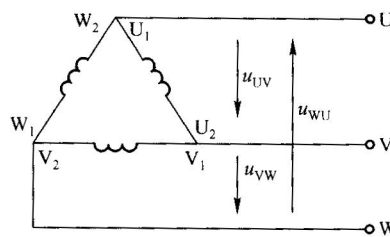


图 3.4 三相电源三角形连接

**【提示】**当对称三相电源作三角形连接时，由于闭合回路中的电源总电压为零，所以电源内部无环流。若接错，将可能形成很大的环流，以致烧坏绕组，这是不允许的。发电机绕组一般不采用三角形连接而采用星形连接。

## 三、三相负载连接

### 1. 负载星形连接

若将三相负载的始端  $U_1$ 、 $V_1$ 、 $W_1$  分别接在电源的三根相线上，将各相负载的末端  $U_2$ 、 $V_2$ 、 $W_2$  联结在一起接中性线，这种连接方式叫做三相负载的星形（ $\text{Y}$ ）联结，如图 3.5 (a) 所示。

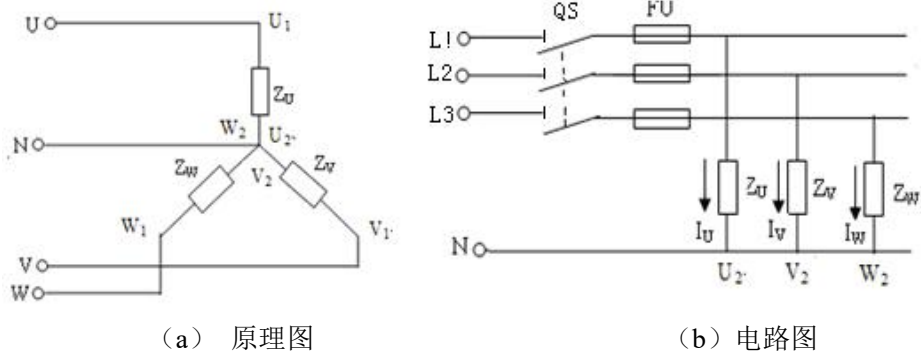


图 3.5 三相负载星形联结

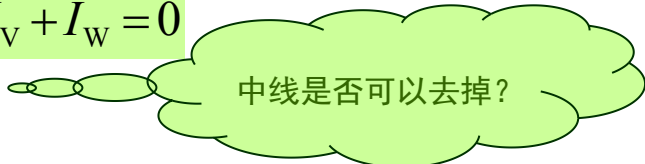
如图 3.5 (b) 所示为三相负载星形联结的电路图，在图中， $Z_U$ 、 $Z_V$ 、 $Z_W$  为各相负载的阻抗，每相负载两端的电压为相电压。如果忽略输电线上的阻抗，则负载的相电压等于电源的相电压；三相负载的线电压就是电源的线电压。

**【提示】** 目前我国电力电网低压供电系统中的线电压为 380V，相电压为 220V，常写作“电源电压 220/380V”。

### 问题及讨论

负载对称时 ( $Z_U = Z_V = Z_W = Z$ )

$$\dot{I}_N = \dot{I}_U + \dot{I}_V + \dot{I}_W = 0$$



**例 3-1** 电路如图所示的三相四线制电路中，电源线电压为 380V，负载为电灯，三相电阻分别为  $R_1 = 30\Omega$ 、 $R_2 = 15\Omega$ 、

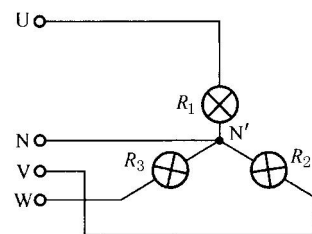
$R_3 = 10\Omega$ ，试求：各相电压、各线电流。

**解：** 每相负载所承受的相电压为

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

各相电流为 
$$I_U = \frac{U_P}{R_1} = \frac{220}{30} = 7.3A$$

$$I_V = \frac{U_P}{R_2} = \frac{220}{15} = 14.7A$$



可联系实际，举出适当的例子。

$$I_W = \frac{U_P}{R_3} = \frac{220}{10} = 22 A$$

因为各线电流等于各相电流，所以有

$$I_{UL} = I_U = 7.36 A, \quad I_{VL} = I_V = 14.7 A, \quad I_{WL} = I_W = 22 A$$

### 2. 负载三角形连接

把三相负载分别接在三相交流电源的每两根相线之间的连接方法称为三角形（ $\Delta$ ）联结，如图 3.6（a）所示。

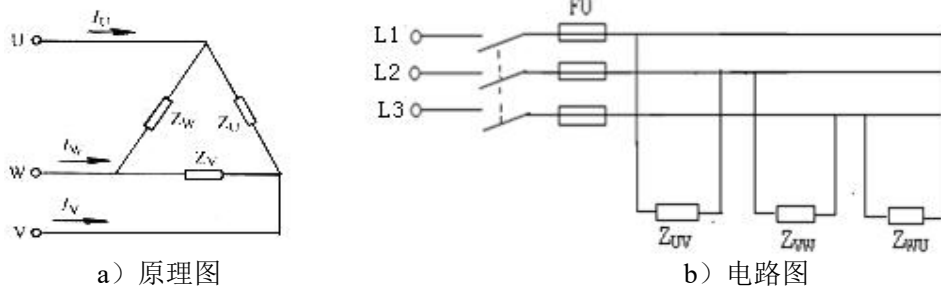


图 3.6 三相负载的三角形联结

如图 3.6（b）所示为三相负载三角形联结的电路图。在三角形联结中，由于各相负载是接在两根相线之间，因此，负载的相电压就是线电压，即：


$$U_L = U_P$$

当对称三相负载作三角形联结时，三个相电流是对称的，三个线电流也是对称的，线电流是相电流的  $\sqrt{3}$  倍，即

$$I_L = \sqrt{3} I_P$$




**【提示】**三相交流电路，一般负载可以接成星形也可以接成三角形。在实际中应正确选择负载的联结方式，要根据三相负载铭牌上所标注的接线方法或额定电压选择所需接线方式，否则负载不能正常工作，有时也会产生严重不良后果。

可联系实际，举出适当的例子。

<p><b>课堂总结</b> 10min</p>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 三相正弦交流电。</li> <li>2. 三相负载的联结方式</li> <li>3. 星形和三角形连接方式下线电压和相电压、线电流和相电流的关系。</li> </ol>	<p>归纳总结本节课的知识点。</p>
<p> <b>布置作业</b></p>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 我们家里有各种各样的电器，找出说明书，看看电路图，你认识哪些符号，哪些又是你不认识的。</li> <li>2. 能力测试 1-1、2-11。</li> </ol>	
<p><b>教学反思</b></p>		

# 《项目三 电磁感应及电磁元器件在汽车中的应用》单元教学设计

## ——《任务一 磁路和电磁铁》

 <b>课 题</b>	<h3>磁路和电磁铁</h3>	 <b>课型</b>	新课
<b>授课班级</b>		<b>授课时数</b>	2
<b>教学目标</b>	1. 认识磁场及其基本物理量。 2. 认识电磁感应现象。 3. 能正确熟练使用楞次定律与右手定则。 4. 掌握磁路及磁路欧姆定律，并学会磁路的分析方法。 5. 掌握互感线圈同名端的实验判定方法。		
<b>教学重点</b>	1. 磁路及磁路欧姆定律 2. 能正确熟练使用楞次定律与右手定则。 3. 互感线圈同名端的实验判定方法。		
<b>教学难点</b>	1. 磁路的分析方法。 2. 能正确熟练使用楞次定律与右手定则。 3. 互感线圈同名端的实验判定方法。		
<b>教学方法</b>	任务驱动法、分析法、演示法、练习法。		
<b>时间分配</b>	<b>教学内容</b>	<b>教学 方法</b>	
<b>导入新课</b> 5min	指南针是我国古代四大发明之一。地球是个大磁体，指南针在地球的磁场作用下，磁针的北极始终指向地理的北极，利用这一性能可以辨别方向，常用于航海、大地测量、旅行及军事等方面，如图 6.1 为指南针。		结合生产实践，通过案例，让学生观察思考。
<b>讲授新课</b> 75min	<p><b>一、磁场及其基本物理量</b></p> <p><b>1. 磁场的概念</b></p> <p>喇叭的结构示意图如图 6.2 所示，收音机收到电台发射机已将声音转换成的电信号后，经过检波、混频、放大等电路，最终到达负载——喇叭，再受到电声喇叭中永久磁铁的磁场作用而使线圈振动发声。这样便将电台发射的已转换为电信号的声音复原了。电声喇叭中的永久磁铁的磁场在这种电—声转换中起着重要的作用。喇叭则将电线圈的振动发声放大。</p> <p>如果将一根磁铁放在另一根磁铁的附近，两根磁铁的磁极之间会产生相互作用的磁力，同名磁极相互排斥，异名磁极相互吸引。磁极之间相互作用的磁力，是通过磁极周围的磁场传递的。磁极在自己周围空间里产生磁场，对处在它里面的磁极均产生磁场力的作用。</p>		运用演示法进行教学。

磁场可以用磁力线（磁感线）来表示，磁力线存在于磁极之间的空间中。在一般情况下，磁力线不能被阻挡或隔绝，它可以穿过任何物质，可以穿过磁铁及其周围空间形成闭合环路，磁力线的方向从北极（N极）出来，进入南极（S极），磁力线在磁极处最密集，并在该处产生最大磁场强度，离磁极最远，磁力线越疏。

磁铁在自己周围的空间产生磁场，条形磁铁周围的磁场方向如图 6.3 所示。通电导体在其周围的空间也产生磁场。通电直导线产生的磁场如图 6.4 所示。

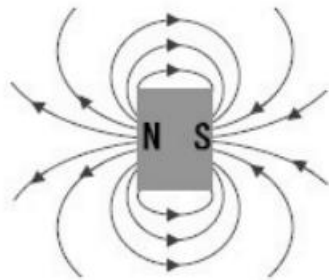


图 6.3 条形磁铁的磁力线

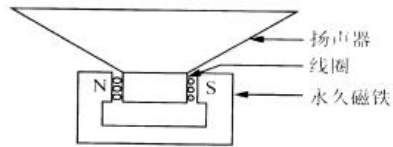


图 6.2 收音机中应用的永磁式电声扬声器示意图

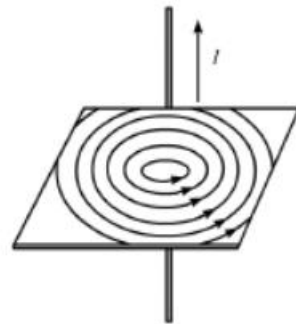


图 6.4 通电直导线的磁场

**【安培定则】**用右手握住导线，让伸直的大拇指所指的方向跟电流方向一致，那么弯曲的四指所指的方向就是磁力线的环绕方向。磁力线是一些围绕线圈的闭合曲线，其方向也可用安培定则来判定；让右手弯曲的四指和线圈电流的方向一致，那么伸直的拇指所指的方向就是线圈中心轴线上磁力线的方向。

## 2. 磁场中的基本物理量

**【磁体】**具有磁性的物质就称为磁体，磁体可分为天然磁体（如吸铁石）和人造磁体两大类。常见的人造磁体有条形、蹄形和针形等，如图 6.5 所示。

任何一个磁体都有两个磁极，即 N 极和 S 极。磁体之间的相互的作用力表现为同性相斥，异性相吸。

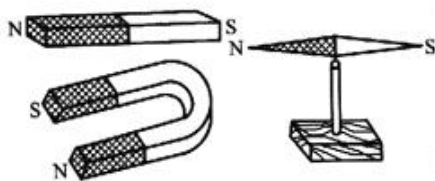


图 6.5 人造磁体

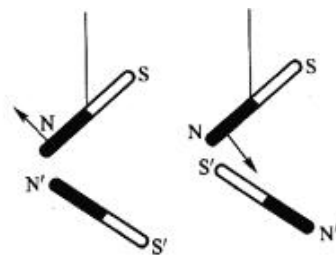


图 6.6 磁极间的相互作用力

**【磁通】**把垂直穿过磁场中某一截面的磁感线条数称为磁通，用字母  $\Phi$  表示，单位为韦伯 (Wb)，简称韦。它反应了磁场中这一截面上磁场的强弱。

**【磁导率  $\mu$ 】**磁导率  $\mu$  是一个用来表示磁场介质磁性的物理量，也就是用来衡量物质导磁能力的物理量。它与磁场强度的乘积就等于磁感应强度，即

$$B = \mu H$$

磁导率  $\mu$  的单位是亨利每米 (H/m)。即

可联系实际，举出适当的例子。

可联系实际，举出适当的例子。



$$\mu \text{ 的单位} = \frac{B \text{ 的单位}}{H \text{ 的单位}} = \frac{Wb/m^2}{A/m} = \frac{V \cdot s}{A \cdot m} = \frac{\Omega \cdot s}{m} = \frac{H}{m}$$

式中的欧秒 ( $\Omega \cdot s$ ) 又称亨利 (H), 是电感的单位。

由实验测出, 真空的磁导率

$$\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} H/m$$

因为这是一个常数, 所以将其他物质的磁导率和它去比较是很方便的。

任意一种物质的磁导率  $\mu$  和真空的磁导率  $\mu_0$  的比值, 称为该物质的相对磁导率  $\mu_r$ , 即

$$\mu_r = \frac{\mu}{\mu_0}$$

**【磁感应强度】** 单位面积上垂直穿过的磁感线数, 称为磁感应强度, 用字母  $B$  来表示, 如图 6.7 所示。在匀强磁场中, 磁感应强度可表示为

$$B = \frac{\Phi}{S} \quad (4-1)$$

式中,  $B$  表示磁感应强度, 单位是特 (T);

$S$  表示与磁场方向垂直的平面面积, 单位是平方米 ( $m^2$ )。

**【提示】**

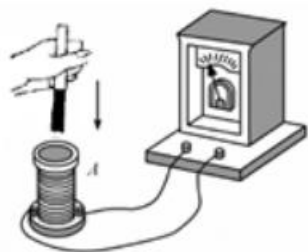
若磁场中各点磁感应强度的大小和方向相同, 这种磁场就称为匀强磁场。

二、电磁感应 (自感、互感)

1. 电磁感应现象



如图 6.8 所示, 把线圈 A 的两端接在电流计上。在这个回路中没接电源, 所以电流计的指针并不偏转。现在把一根磁棒插入线圈, 在插入的过程中, 电流计的指针发生偏转, 这表明线圈中产生了电流, 如图 6.8 (a)。这种电流叫做感应电流。当磁棒插在线圈内不动时, 电流计的指针就不再偏转, 这时线圈中没有感应电流。再把磁棒从线圈内拔出, 在拔出的过程中, 电流计指针又发生偏转, 偏转的方向与插入磁棒时相反, 这表明感应电流与前面相反, 如图 6.9 (b)。



(a) 插入磁棒

图 6.8 电磁感应现象演示之一

如图 6.9 所示, 取另一个线圈  $A'$  与直流电源相连。用这个通电线圈  $A'$  代替磁棒重复上面的实验, 可以观察到同样的现象。也就是说, 在通电线圈  $A'$  和线圈 A 相对运动的过程中, 线圈 A 中产生感

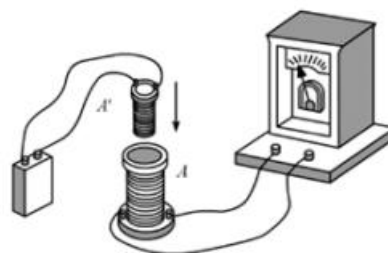


图 6.9 电磁感应现象演示之二

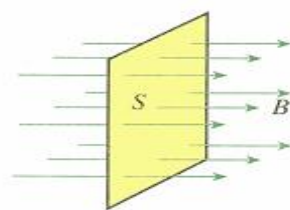


图 6.7 磁感应强度

可联系实际, 举出适当的例子。

课堂实验, 得出结论。



应电流；相对运动的速度越快，感应电流越大；相对运动的方向不同（插入或拔出）感应电流的方向也不同。

**【结论】**当穿过一个闭合导体回路所围面积的磁通量发生变化时，不管这种变化是由于什么原因所引起的，回路中就会产生电流。

变化的磁场能在导体中产生感应电动势，这种现象称为电磁感应现象。由电磁感应产生的电动势称为感应电动势，由感应电动势引起的电流称为感应电流。

## 2. 电磁感应定律

实验表明，导体回路中感应电动势  $\varepsilon$  的大小与穿过回路的磁通量的变化率成正比。这个结论叫做法拉第电磁感应定律。用公式来表示就是

$$\varepsilon \propto \frac{d\Phi}{dt} \quad \text{或} \quad \varepsilon = -k \frac{d\Phi}{dt}$$

式中， $k$  是比例常数，它的数值决定于式中各量的单位。如果  $\Phi$  的单位用  $Wb$ ， $t$  的单位用  $s$ ， $\varepsilon$  的单位用  $V$ ，则  $k=1$ ，于是

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

### 【楞次定律】

闭合导体回路中感应电流的磁场总是要阻碍引起感应电流的磁通量的变化，这就是楞次定律。如图 6.10(a) 所示，当磁铁插入线圈时，穿过线圈的磁通量增加，感应电流的磁场与原磁场方向相反；图 6.10(b) 中，当磁铁从线圈中抽出时，穿过线圈的磁通量减少，感应电流的磁场与原磁场方向相同。



6.10 用楞次定律判定感应电流的方向

利用楞次定律可以判定感应电流的方向，方法是右手握拳，拇指指向磁场变化的反方向，则四指方向即为感应电流的方向。由此可判定图 6.10a 中感应电流的方向为顺时针，图 6.10b 中感应电流的方向为逆时针。

例 6-1 如图所示，磁感应强度为  $B = 0.1T$  的均匀磁场垂直纸面向里，一矩形导体线框 ABCD 平放在纸面内，线框的 CD 边可以沿着 AD 和 BC 边滑动。设 CD 边的长度为  $l = 10cm$ ，向右滑动的速度为  $v = 1.0m/s$ 。求线框中感应电动势的大小。

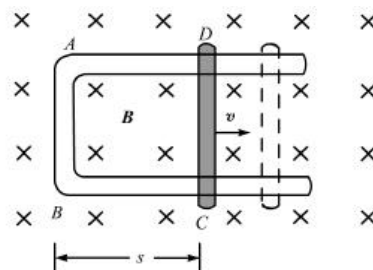
解： 设 BC 之间的距离为  $s$ ，则通过导体线框的磁通量为

$$\Phi = Bls$$

$$v = \frac{ds}{dt}$$

$$\varepsilon = \frac{d\Phi}{dt} = \frac{d(Bls)}{dt} = Bl \frac{ds}{dt} = Blv$$

$$\varepsilon = 0.10 \times 0.10 \times 1.0 = 1.0 \times 10^{-2} V$$



例 6-1 图

可联系

实际,举出适当的例子。

例 6-2 把磁棒的一极用 1.5s 的时间由线圈的顶部一直插到底部。在这段时间内穿过每一匝线圈的磁通量改变了  $5.0 \times 10^{-5} W_b$ , 线圈的匝数为 60, 求线圈中感应电动势的大小。若闭合回路的总电阻为  $800\Omega$ , 求感应电流的大小。

解: 已知  $\Delta t = 1.5s, \Delta\Phi = 5.0 \times 10^{-5} W_b, N = 60, R = 800\Omega$ , 即得

$$\varepsilon = N \frac{\Delta\Phi}{\Delta t} = 60 \times \frac{5.0 \times 10^{-5}}{1.5} = 2.0 \times 10^{-3} V$$

由闭合电路的欧姆定律可知

$$I = \frac{\varepsilon}{R} = \frac{2.0 \times 10^{-3}}{800} = 2.5 \times 10^{-6} A$$

### 3. 自感与互感

#### (1) 自感

**【自感现象】** 由于流过线圈本身的电流变化而引起感应电动势的现象, 称为自感现象。这个感应电动势称为自感电动势。

当电流流过回路时, 在回路内要产生磁通, 此磁通称为自感磁通, 用符号  $\Phi_L$  表示。当电流流过匝数为  $N$  的线圈时, 线圈的每一匝都有自感磁通穿过, 如果穿过线圈每一匝的磁通都一样, 那么, 这个线圈的自感磁链  $\Psi_L$  为

$$\Psi_L = N\Phi_L$$

为了表明各个线圈产生自感磁链的能力, 将线圈的自感磁链与电流的比值称为线圈的自感系数, 简称自感, 用符号  $L$  表示, 即

$$L = \frac{\Psi_L}{I}$$

$L$  表示一个线圈通过单位电流时所产生的磁链, 单位为亨利, 用字母 H 表示。

#### (2) 互感

**【互感现象】** 如图 6.11 所示, 将两个线圈缠在同一铁心骨架上, 交流铁心线圈的绕组接正弦交流电源, 绕组 II 接交流电压表, 当绕组中有电流流过时, 绕组 II 上连接的电压表指针发生了偏转。实验表明, 绕组 II 上虽然没有直接连接电源, 但当

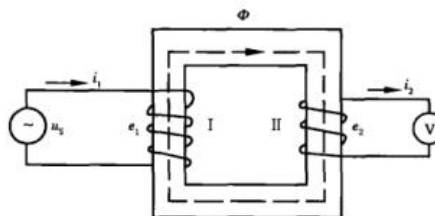


图 6.11 互感现象实验电路

绕组 I 中的电流发生变化时, 会在绕组 II 上感应出一个电压, 这种由于一个线圈中的电流发生变化, 而在另一个线圈中产生感应电压的现象, 称为互感现象。在两个有磁耦合的线圈中, 互感磁链与产生该磁链的电流的比值, 称为这两个线圈的互感系数, 简称互感, 用符号  $M$  表示, 即

$$M = M_{12} = M_{21} = \frac{\Psi_{21}}{i_1} = \frac{\Psi_{12}}{i_2}$$

互感系数的单位和自感系数一样, 也是亨利 (H)。互感系数  $M$  取决于两个耦合线圈的几何尺寸、匝数、相对位置和磁介质。当磁介质为非铁磁性物质时,  $M$  是常数。

工程上常用耦合系数  $k$  表示两个线圈耦合的紧密程度, 耦合系数定义为

$$k = \frac{M}{\sqrt{L_1 L_2}}$$

显然,  $k \leq 1$ 。当  $k=1$  时, 称为两个线圈为全耦合, 此时自感磁通全部为互感磁通。

当线圈 I 中的电流  $i_1$  变化时, 在线圈 II 中产生变化的互感磁链  $\Psi_{21}$ , 而  $\Psi_{21}$  的变化将在线圈 II 中产生互感电动势  $e_{M2}$  及互感电压  $u_{21}$ 。如果选择电流  $i_1$  与  $\Psi_{21}$  的参考方向满足右手螺旋关系, 且  $u_{21}$  与  $e_{M2}$  方向一致并与  $\Psi_{21}$  的参考方向符合右手螺旋定则, 根据电磁感应定律, 可得

$$u_{21} = -e_{M2} = \frac{d\Psi_{21}}{dt} = M \frac{di_1}{dt}$$

同理 
$$u_{12} = -e_{M1} = \frac{d\Psi_{12}}{dt} = M \frac{di_2}{dt}$$

### 三、磁路及磁路欧姆定律

#### 1. 磁路

磁路是指由铁心所限定的磁通的路径。

#### 2. 磁路欧姆定律

以图 6.12 所示的磁路为例, 根据安培环路定律

$$\oint Hdl = \sum I$$

可得出

$$Hl = NI$$

式中,  $N$ ——线圈的匝数;

$l$ ——磁路 (闭合回线) 的平均长度;

$H$ ——磁路铁心的磁场强度。

上式中线圈匝数与电流的乘积  $NI$  称为磁通势, 用字母  $F$  代表, 即

$$F = NI$$

磁通就是由它产生的。它的单位是安培 (A)。

将  $H = B/\mu$  和  $B = \Phi/S$  代入式 (6-12), 得

$$\Phi = \frac{NI}{\frac{l}{\mu S}} = \frac{F}{R_m}$$

式中,  $R_m$ ——磁路的磁阻,

$S$ ——磁路的截面积。

表列出了电路与磁路对应的物理量及其关系式。

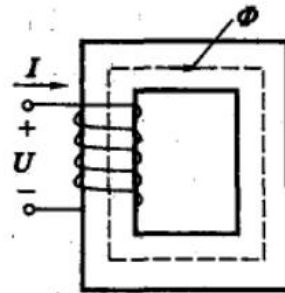



图 6.12 磁路

	<table border="1" style="width: 100%; text-align: center;"> <thead> <tr> <th style="width: 50%;">电 路</th> <th style="width: 50%;">磁 路</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>电流 <math>I</math></td> <td>磁通 <math>\Phi</math></td> </tr> <tr> <td>电阻 <math>R = \rho \frac{l}{S}</math></td> <td>磁阻 <math>R_m = \frac{l}{\mu S}</math></td> </tr> <tr> <td>电阻率 <math>\rho</math></td> <td>磁导率 <math>\mu</math></td> </tr> <tr> <td>电动势 <math>E</math></td> <td>磁动势 <math>E_m = IN</math></td> </tr> <tr> <td>电路欧姆定律 <math>I = \frac{E}{R}</math></td> <td>磁路欧姆定律 <math>\Phi = \frac{E_m}{R_m}</math></td> </tr> </tbody> </table>	电 路	磁 路	电流 $I$	磁通 $\Phi$	电阻 $R = \rho \frac{l}{S}$	磁阻 $R_m = \frac{l}{\mu S}$	电阻率 $\rho$	磁导率 $\mu$	电动势 $E$	磁动势 $E_m = IN$	电路欧姆定律 $I = \frac{E}{R}$	磁路欧姆定律 $\Phi = \frac{E_m}{R_m}$	
电 路	磁 路													
电流 $I$	磁通 $\Phi$													
电阻 $R = \rho \frac{l}{S}$	磁阻 $R_m = \frac{l}{\mu S}$													
电阻率 $\rho$	磁导率 $\mu$													
电动势 $E$	磁动势 $E_m = IN$													
电路欧姆定律 $I = \frac{E}{R}$	磁路欧姆定律 $\Phi = \frac{E_m}{R_m}$													
	<p><b>【提示】</b>在实际应用中，判断感应电动势方向用楞次定律，计算感应电动势的大小用电磁感应定律。</p> <p><b>【想一想】</b> 发电机的工作原理是什么？</p>													
<b>课堂总结</b> 10min	1. 磁场及其基本物理量； 2. 电磁感应现象； 3. 磁路及磁路欧姆定律，并学会磁路的分析方法； 4. 互感线圈同名端的实验判定方法。	归纳总结本节课的知识点。												
 <b>布置作业</b>	1. 磁场有哪些基本物理量？ 2. 为什么不能应用 $F = \Phi R_m$ 来计算磁路？ 3. 自感为 0.2H 的线圈中，当电流在 1/16s 内由 2A 均匀减小到零时，求线圈中自感电动势的大小？ 4. 一铁芯上绕有线圈 100 匝，已知铁芯中磁通量与时间的关系为 $\Phi = 8.0 \times 10^{-5} \sin 100\pi t$ ，式中 $\Phi$ 的单位为 $W_b$ ，t 的单位是 s。求在 $t = 1.0 \times 10^{-2} s$ 时线圈的感应电动势。													
<b>教学反思</b>														

# 《项目四 汽车中的电动机和交流发电机》单元教学设计

## ——《任务一 直流电动机》

 课 题	<h3>直流电动机</h3>	 课型	新课
授课班级		授课时数	4
教学目标	1. 了解直流电动机的结构、型号和铭牌。 2. 掌握直流异步电动机的工作原理。 3. 掌握直流异步电动机的结构和工作原理。		
教学重点	1. 直流电动机的工作原理。 2. 串励直流电动机的结构和工作原理。		
教学难点	1. 直流电动机的工作原理。 2. 串励直流电动机的结构和工作原理。		
教学方法	任务驱动法、分析法、演示法、练习法。		
时间分配	教学内容	教学方法	
导入新课 5min	<p>异步电动机是把交流电能转变为机械能的动力机械，广泛应用于工业(如：机床、纺织机械、起重机矿山机械等)、农业(脱粒机、粉碎机、水泵及加工机械等)、家用电器(电风扇、空调、洗衣机、电冰箱及小功率电动工具等)。</p> 	通过让学生观察电动机,引发其思考。	
讲授新课 75min	<p><b>一、直流电机的工作原理</b></p> <p><b>1. 电磁感应与右手定则</b></p> <p>从物理学中可知,在一个均匀磁场 <math>B</math> 中,当放置一根有效长度为 <math>l</math> 的导体,作垂直切割磁力线运动时,则在导体 <math>l</math> 上产生感应电动势。这种由于导体切割磁力线而在导体上感应电动势的现象称为电磁感应。其电动势的大小取决于单位时间内切割磁力线的多少,按法拉第电磁感应定律来计算,有</p> $e = Blv$ <p>式中, <math>v</math> 为导体运动的速度。</p> <p>而电动势 <math>e</math> 的方向按右手定则确定,即将右手掌伸开,让磁力线垂直指向掌心,大拇指指向导体运动方向,则与大拇指成 <math>90^\circ</math> 的其余四指所指方向便是导体中感应电动势的方向,如图 4.1 所示。</p>		运用演示法进行教学。

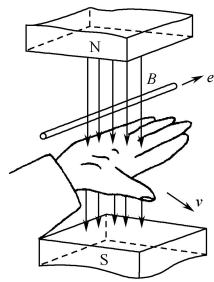


图 4.1 电磁感应及右手定则

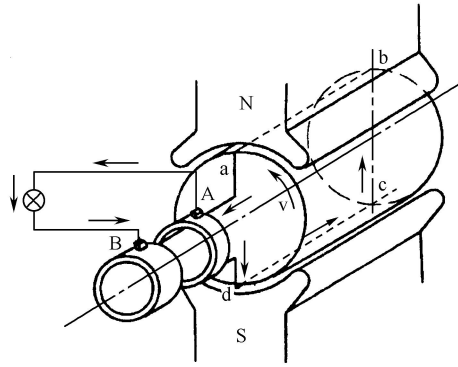


图 4.2 交流发电机原理模型

如果一匝对称线圈  $abcd$  (两有效边  $l_{ab}$  和  $l_{cd}$ )，置于按正弦规律变化磁场  $B_x = B_m \sin x$  中，线圈两端  $a$  和  $d$  分别与线圈一起转动的两个铜环焊接，再在两个铜环上分别压着固定不动的两个电刷  $A$  和  $B$ ，如图 4.2 所示。当线圈以  $v$  速度作逆时针旋转时，则在  $A, B$  两刷间产生的感应电动势为

$$e_{AB} = e_{ad} = e_{cd} + e_{ab} = 2B_m l_{ab} v \sin x$$

(4-1)

式中， $B_m$  为最大磁场密度，单位为  $\text{Wb}/\text{m}^2$ ； $l_{ab}$  为导体有效长度，单位为  $\text{m}$ ； $v$  为切割线速度，单位为  $\text{m}/\text{s}$ 。

由此可见，导体等速运动切割磁力线时，导体上的感应电动势在时间上也按正弦规律变化，即同  $B_x$  的规律变化，而不是直流电动势。显然，如果磁场波形是半个正弦波的话，则导体中感应电动势在时间上也是半个正弦波。

## 2. 直流发电机工作原理

如果将图 4.2 中的两个铜环去掉一个，而将留下的一个剖成互相绝缘的两个半圆环，线圈两个端点分别接在两个半圆环上，将  $A, B$  两电刷也分别压在两个半圆环上，且固定不动，其位置分别与磁极  $N, S$  对正，电机线圈仍以逆时针方向旋转，如图 4.3 所示，那么在图示瞬间，导线  $ab$  处于  $N$  极下，与  $A$  电刷连接，电动势  $e_{ab}$  由  $b$  指向  $a$ ，则  $A$  电刷为“+”（正极）；当线圈转过  $180^\circ$  时，导体  $cd$

处于  $N$  极下，且与  $A$  电刷连接，电动势  $e_{cd}$  由  $c$  指向  $d$ ，则  $A$  电刷仍为“+”。

可见， $A$  电刷始终与处于  $N$  极下导体连接，不管哪根导体，一旦转到  $N$  极下，所产生的感应电动势方向都一样，永远指向  $A$  电刷，故  $A$  电刷为正极。同理， $B$  电刷始终为“-”（负极）。显然，对某根导体来说，如  $l_{ab}$ ，在  $N$  极下感应电动势方向由  $b$  指向  $a$ ，转过  $180^\circ$  后，处于  $S$  极下，感应电动势方向由  $a$  指向  $b$ ，即导体内部感应电动势为交流电动势，但电刷两端间电动势却不变， $A$  电刷永为正， $B$  电刷永为负，都是直流电动势。

图 4.4 为一个线圈交流电动势经两个半圆铜环与电刷两端引出的电动势波形，它显然是半波整流状态，有明显脉动。如果把一个圆铜环剖为互相绝缘的四等份，分别与两个线圈连接，则脉动将减半。

在实际发电机中，发电机的转动部分不只一个线圈，而是由许多个线圈均匀分布在发电机转动部分表面，按一定规律连接起来。如若发电机每磁极下的导体数大于 8 时，电动势脉动的幅度将小于 1%。

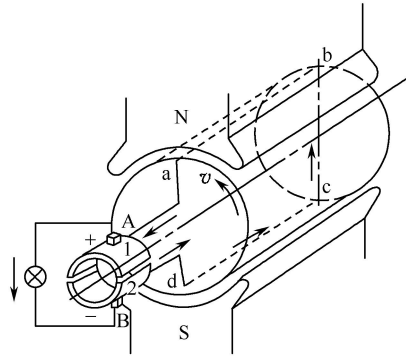


图 4.3 利用换向器获得直流电动势

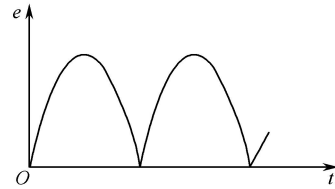


图 4.4 一个线圈电刷两端电动势的波形

### 3. 直流电动机的工作原理

直流电动机的工作原理是基于电磁力定律，若磁场  $B_x$  与导体  $l$  互相垂直，且导体  $l$  中通以电流  $i$ ，则作用于载流导体  $l$  上的电磁力为

$$f_x = B_x il \quad (4-2)$$

式中， $f_x$  为电磁力的大小，单位为 N； $B_x$  为每极磁通下的瞬时值，单位为  $\text{Wb}/\text{m}^2$ ； $i$  为导体中流过的电流，单位为 A； $l$  为导体的有效长度，单位为 m。电磁力的方向按左手定则来确定。

欲使电动机连续旋转，必须使载流导体在磁场中所受到的电磁力形成一种方向不变的转矩，这需要用换向器和电刷装置配合来实现。

把电刷 A、B 接到一个直流电源上，电刷 A 接电源的正极，电刷 B 接电源的负极，此时在电枢线圈中将有电流通过。

如图 4.5 所示。电刷 A、B 两端恒加直流电压  $U$ ，在此瞬间位置，导体  $l_{ab}$  处于 N 极下，电流从 a 到 b，导体  $l_{ab}$  受到电磁力作用而向左运动，导体  $l_{cd}$  处于 S 极下，电流是从 c 到 d，所受到电磁力作用方向向右，从而形成一转矩，使线圈逆时针方向旋转；当转过  $90^\circ$  时，电刷不与换向片接触，而与换向片间绝缘接触，此时线圈无电流，转矩消失，但由于惯性作用，转子仍向前转，这时导体  $l_{ab}$  与  $l_{cd}$  交换位置，即  $l_{cd}$  处于 N 极下，与 A 刷连接， $l_{ab}$  处于 S 极下，与 B 电刷连接，电流从 d 进从 a 出，导体  $l_{cd}$  受电磁力作用，电磁力方向向左，导体  $l_{ab}$  受到向右的电磁力，保持原来转矩方向不变，从而使电动机继续沿着逆时针方向旋转。

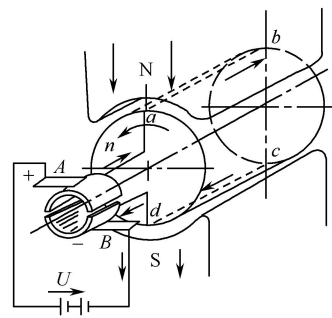


图 4.5 直流电动机工作原理示意图

由此可见，直流电动机的换向器和电刷装置是将直流电流引入处于 N 极（或 S 极）下的导体，而不是恒接入某个线圈，才使电动机有单一方向的转矩。电动机在此方向不变的转矩作用下转动。

同直流发电机相同，实际的直流电动机的电枢并非单一线圈，磁极也并非一对。由此可见，发电机与电动机，两者并无本质上差别，只是外界条件不同而已。

可联系实际，举出适当例子。



所以，同一台直流电机，既可作为发电机运行，也可以作为电动机运行，仅仅改变电流  $I_a$  的方向。这就是电机的可逆原理，汽车中常用到这种电动机。

## 二、直流电动机结构

直流电机可作为电动机运行，也可作为发电机运行。不管是电动机还是发电机，其结构基本是相同的，即都有可旋转部分和静止部分。可旋转部分称为转子，静止部分称为定子。小型直流电动机的结构如图 4.6 所示，其剖面图如图 4.7 所示。

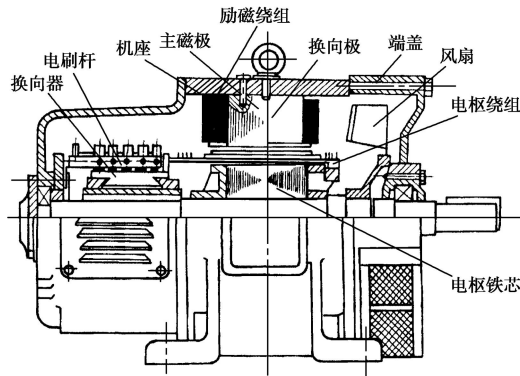


图 4.6 小型直流电动机的结构

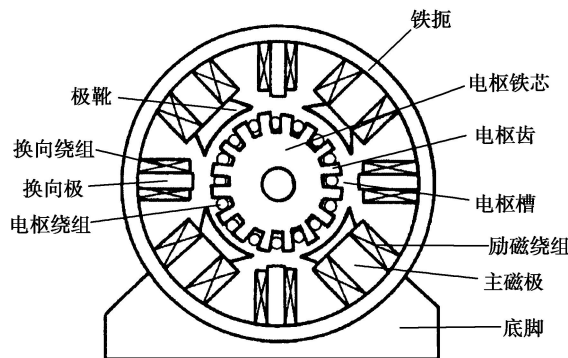


图 4.7 小型直流电动机的剖面图

### 1. 定子部分

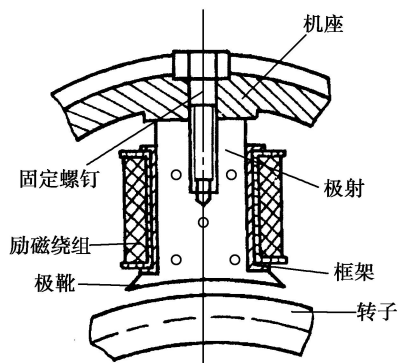


图 4.8 直流电动机主磁极的结构

定子主要由主磁极、机座、换向磁极、电刷装置和端盖组成。主磁极的作用是产生恒定，有一定空间分布形状的气隙磁通密度。主磁极由主磁极铁芯和放置在铁芯上的励磁绕组构成。主磁极铁芯分成极身和极靴，极靴的作用是使气隙磁通密度的空间分布均匀并减小气隙磁阻，同时极靴对励磁绕组也起支撑作用。为减小涡流损耗，主磁极铁芯用 1.0~1.5mm 厚的低碳钢板冲成一定形状，用铆钉把冲片铆紧，然后再固定在机座上。主磁极上的线圈是用来产生主磁通的，称为励磁绕组。主磁极的结构如图 4.8 所示。当给励磁绕组通入直流电时，各主磁极均产生一定极性，相邻两主磁极的极性是 N、S 交替出现的。

可联系实际，举出适当例子。

可联系实际，举出适当

的例子。

直流电动机的机座有两种形式，一种为整体机座，另一种为叠片机座。整体机座是用导磁效果较好的铸钢材料制成的，该机座能同时起到导磁和机械支撑作用。由于机座起导磁作用，因此机座是主磁路的一部分，称为定子铁轭。主磁极、换向极及端盖均固定在机座上，机座上用薄板冲叠片压成定子铁轭，再把定子铁轭固定在一个起支撑作用的机座里，这样定子铁轭和机座是分开的，机座只起支撑作用，可用普通钢板制成。叠片机座主要用于主磁通变化快，调速范围较高的场合，如图 4.8 所示。

换向极又叫附加极，结构如图 4.9 所示。其作用是改善直流电动机的换向，一般电动机容量超过 1kW 时均应安装换向极。

换向极的铁芯比主磁极的简单，一般用整块钢板制成，在其上放置换向极绕组，换向极安装在相邻的两主磁极之间，并总是和主磁极串联在一起。

电刷装置是直流电动机的重要组成部分。通过该装置把电动机电枢中的电流与外部静止电路相连或把外部电源与电动机电枢相连。电刷装置与换向片一起完成机械整流，把电枢中的交变电流变成电刷上的直流或把外部电路中的直流变换为电枢中的交流。电刷的结构如图 4.10 所示。

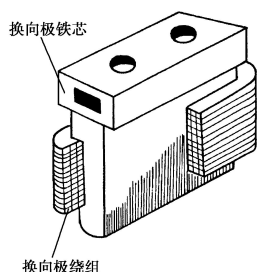


图 4.9 换向极的结构

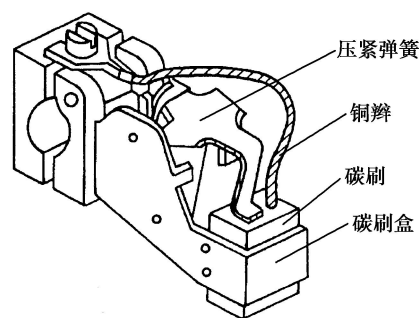


图 4.10 电刷的结构

电动机的端盖主要起支撑作用。端盖固定于机座上，其上放置轴承支撑直流电动机的转轴，使直流电动机能够旋转。

## 2. 转子部分

直流电动机的转子是电动机的转动部分，由电枢铁芯、电枢绕组、换向器、电动机转轴和轴承等部分组成。

电枢铁芯是主磁路的一部分，同时对放置在其上的电枢绕组起支撑作用。为减少电动机旋转时铁芯中的磁通方向发生变化引起磁滞损耗和涡流损耗，电枢铁芯通常用 0.5mm 厚的低硅钢片或冷轧硅钢片冲压成型，为减小损耗，在硅钢片的两侧涂绝缘漆，为放置绕组，在硅钢片上冲出转子槽。冲制好的硅钢片叠装成电枢铁芯。如图 4.11 所示为小型直流电动机的电枢冲片形状和电枢铁芯装配图。

电枢绕组是直流电动机的重要组成部分。绕组由带绝缘的导体绕制而成，对于小型电动机常采用铜导线绕制，对于大中型电动机常采用成型线圈。在电动机中每一个线圈称为一个元件，多个元件有规律地连接起来形成电枢绕组。绕制好的绕组或成型绕组放置在电枢铁芯上的槽内，放置在铁芯槽内的导线部分在电动机运转时将产生感应电动势，称为元件的有效部分；在电枢槽内两端把有效部分连接起来的部分称为端接部分，端接部分仅起连接作用，在电动机运行过程中不产生感应电动势。

换向器又称整流子，对于发电机，换向器的作用是把电枢绕组中的交变电动势转变为直流电动势向外部输出直流电压；对于电动机，它是把外界供给的直流电流转变为绕组中的交变电流以使电动机旋转。换向器的结构如图 4.12 所示。

换向器是由换向片组合而成的，是直流电动机的关键部件。

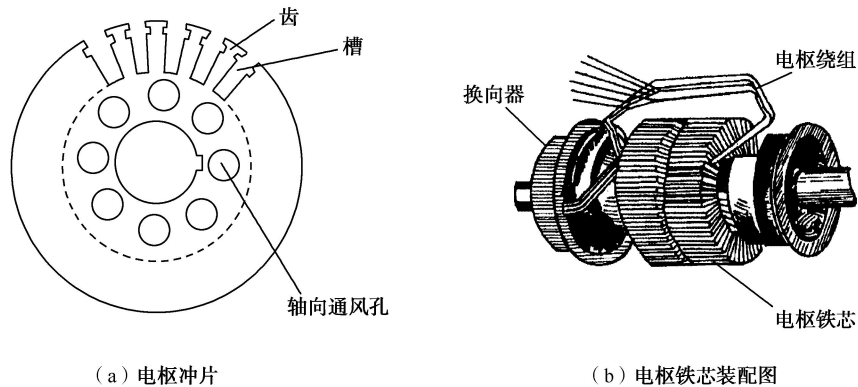


图 4.11 电枢冲片形状和电枢铁芯装配图

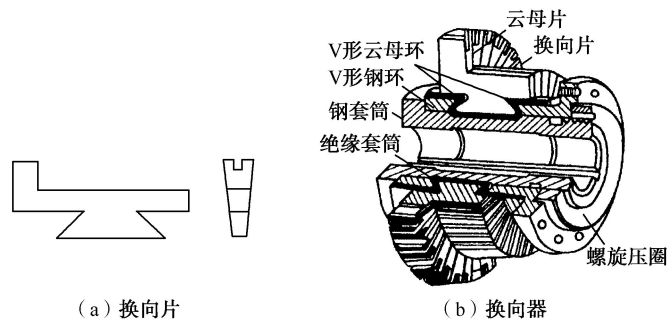


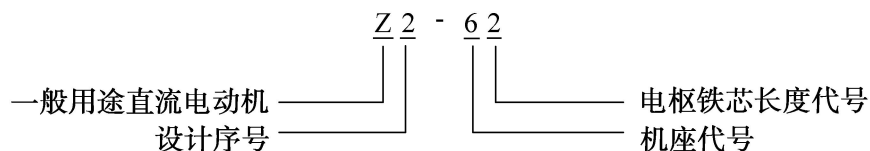
图 4.12 换向器的结构

换向片采用导电性能好、硬度大、耐磨性能好的紫铜或铜合金制成。换向片的底部制成燕尾形状，各换向片拼成圆筒形套筒上，相邻换向片间以 0.6~1.2mm 厚的云母片作为绝缘，换向片下部的燕尾嵌在两端的 V 形钢环内，换向片与 V 形云母片绝缘，最后用螺旋压圈压紧。换向器固定在转轴的一端。

### 3. 铭牌数据及主要系列

铭牌镶在电动机机座的外表面上，上面标明电动机主要额定数据及电动机产品数据，供使用时参考。铭牌数据主要包括电动机型号、电动机额定功率、额定电压、额定电流、额定转速和励磁电流及励磁方式等，此外还有电动机的出厂数据、出厂编号、出厂日期等。

电动机的产品型号表示电动机的结构和使用特点，国产电动机的型号一般采用大写的汉语拼音字母和阿拉伯数字表示，其格式为：第一部分字符用大写的汉语拼音表示产品代号，第二部分字符用阿拉伯数字表示设计序号，第三部分字符是机座代号，用阿拉伯数字表示，第四部分字符表示电枢铁芯长度代号，用阿拉伯数字表示。以 Z2-62 为例说明如下。



第一部分字符含义如下：

- Z 系列：一般用于直流电动机。
- ZJ 系列：精密机床用直流电动机。
- ZT 系列：广调速直流电动机。
- ZQ 系列：直流牵引电动机。

ZH 系列：船用直流电动机。

ZA 系列：防爆安全型直流电动机。

ZKJ 系列：挖掘机用直流电动机。

ZZJ 系列：冶金起重直流电动机。

关于其他系列直流电动机的型号及具体参数可查阅电动机手册。

额定功率  $P_N$ ：是指额定条件下电动机所能供给的功率。额定功率对于电动机和发电机是不同的。对于电动机额定功率是指电动机轴上输出的额定机械功率；对于发电机是指电刷间输出的额定电功率。额定功率的单位为 kW。

额定电压  $U_N$ ：是指在额定工况条件下，电动机出线端的平均电压。对于电动机是指输入额定电压；对于发电机是指输出额定电压。电压的单位为 V。

额定电流  $I_N$ ：是指电动机在额定电压情况下，运行于额定功率，此时的电流值为电动机的额定电流，其单位为 A。

额定转速  $n_N$ ：是指对应于额定电压、额定电流，电动机运行于额定功率时所对应的转速，转速的单位为 r/min。

额定励磁电流  $I_{fN}$ ：是指对应于额定电压、额定电流、额定转速及额定功率时的励磁电流，单位为 A。

励磁方式：是指直流电动机的励磁线圈与其电枢线圈的连接方式。根据电枢线圈与励磁线圈的连接方式不同，直流电动机励磁有他励、并励、串励和复励等方式，如图 4.13 所示。

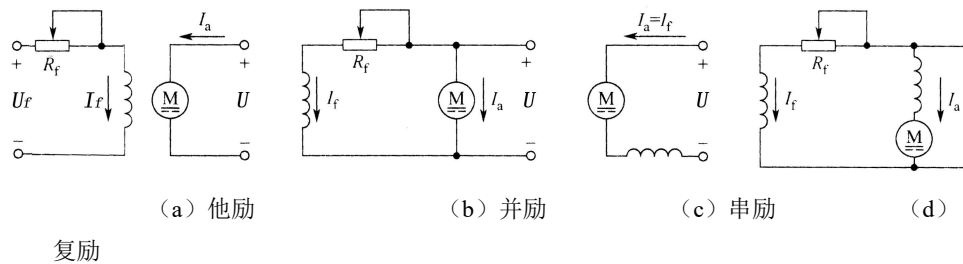


图 4.13 直流电动机的分类接线图

此外电动机的铭牌上还标有其他数据，如励磁电压、出厂日期、出厂编号等。

### 三、直流电动机的电枢电动势与电磁转矩

直流电动机的电枢，就是指电刷间的电动势，可用下式表示：

$$E = C_e \Phi n \quad (4-3)$$

式中， $E$ ——电枢电动势 V；

$C_e$ ——电动势常数，取决于电动机结构；

$\Phi$ ——每个磁极的磁通 Wb；

$n$ ——电枢转速 r/min。

不论电动机作为发电机或作为电动机运行，电枢电动势都是存在的，不过发电机的电枢电动势是电源电动势，在电动势的作用下产生电流，电动势与电流的方向一致，如图 4.14 (a) 所示，此时发电机输出电功率；而电动机的电枢电动

势是反电动势，它与外加电压（电流）的方向相反，如图 4.14 (b) 所示，此时电动机消耗电功率。

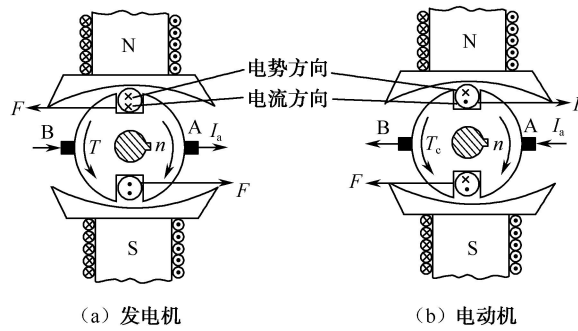


图 4.14 直流电动机中电枢电动势、电流、转速、转矩的方向

在直流电动机中当电枢绕组内有电流通过时，此电流将与磁场相互作用，使电枢上每根导体受到电磁力  $F$  的作用，此电磁力  $F$  在电动机转轴上产生电磁转矩。直流电动机的电磁转矩可用下式表示：

$$T = C_T \Phi I_a \quad (4-4)$$

显然，直流电动机不论作为发电机运行或是作为电动机运行，电磁转矩都是存在的，只是在发电机中，电磁转矩的方向与电枢旋转方向相反，如图 4.14 (a) 所示，它起着阻止电枢旋转的作用，是阻转矩；而在电动机中，电磁转矩是推动电枢旋转的驱动转矩，所以它的方向与电枢旋转方向相同，如图 4.14 (b) 所示。

#### 四、串励直流电动机的运行

串励直流电动机的接线图如图 4.15 所示，其特点是励磁绕组与电枢绕组串联，励磁电流  $I_f$  等于电枢电流  $I_a$ ，主磁通  $\Phi$  是电枢电流  $I_a$  的函数。则有

$$I_f = I_a \quad (4-5)$$

$$U = E + I_a R \quad (4-6)$$

$$R = R_a + R_f + R_{st} \quad (4-7)$$

当  $I_a$  较小时，磁路未饱和时， $\Phi$  与  $I_a$  成正比，即

$$\Phi = k I_a \quad (4-8)$$

式中， $k$  为比例常数。此时，电磁转矩  $T$  与  $I_a$  的平方成正比，即

$$T = C_T \Phi I_a = C_T k I_a^2 \quad (4-9)$$

$$I_a = \sqrt{\frac{T}{C_T k}} \quad (4-10)$$

下面来分析串励直流电动机的机械特性、起动、反转、调速和制动。

##### 1. 串励直流电动机的机械特性

直流电动机机械特性一般表达式为

$$n = \frac{U}{C_e \Phi} - \frac{R}{C_e C_T \Phi^2} T \quad (4-11)$$

将式(4-9)和式(4-10)代入式(4-11)中, 不难得出在磁路不饱和时串励电动机的机械特性为

$$n = \frac{\sqrt{C_T k}}{C_e k} \frac{U}{\sqrt{T}} - \frac{R}{C_e K} \quad (4-12)$$

式(4-12)表明, 当磁路不饱和时, 串励电动机的转速  $n$  与  $\sqrt{T}$  成反比, 其机械特性为非线性软特性, 如图 4.16 中曲线  $AB$  段所示。

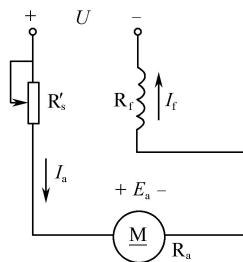


图 4.15 串励电动机的接线图

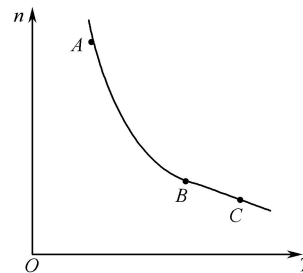


图 4.16 串励电动机的固有特性

当  $I_a$  较大, 磁路饱和时,  $\Phi$  基本保持不变, 这时串励电动机的机械特性与他励电动机的机械特性相似, 变为较硬的直线特性, 如图 4.16 中曲线  $BC$  段所示。

串励电动机的固有特性是在  $U = U_N$ ,  $R'_a = 0$  时的特性 (如图 4.16 所示), 具有以下特点:

- ① 它是一条非线性的软特性, 负载时的转速降落很大。
- ② 空载时,  $T = 0$ ,  $I_a = 0$ ,  $\Phi = 0$ ,  $n_0 = \frac{U}{C_e \Phi} = \infty$ , 即理想空载转速为无穷大。

但实际上, 即使  $I_a = 0$ , 由于存在剩磁通  $\Phi_0$ , 故空载转速  $n_0 = \frac{U}{C_e \Phi_0}$  为一有限值,

但其值很高, 一般可达  $(5 \sim 6) n_N$ , 这就是所谓的“飞车”现象, 因此, 串励电动机是不允许空载或轻载运行的。

- ③ 由于  $T$  正比于  $I_a$  的平方, 起动和过载时  $I_a$  较大, 故串励电动机的起动转矩大, 过载能力强。

串励电动机同样可以采用电枢串电阻、改变电压和改变磁通的方法来获得各种人为特性。

(1) 电枢串电阻时的人为特性

由式(4-11)或式(4-12)可见, 串入电阻后, 转速降增大, 所以电枢串电阻的人为特性位于固有特性的下方, 且特性变得更软, 如图 4.17 所示。从电路上分析, 在  $T (I_a)$  相同时, 串入电阻后, 电阻压降增大, 因为电源电压不变, 所以电枢反电动势减小, 转速必然减小。

(2) 降低电压时的人为特性

由式(4-11)可知, 降低电压时, 理想空载转速降低, 其人为特性向下平移。从电路上分析, 电压下降后, 电枢反电动势随之减小, 转速也必然减小, 所以降

压的人为特性于固有特性的下方，如图 4.18 所示。

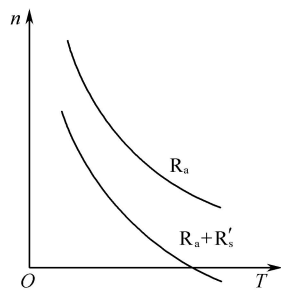


图 4.17 串电阻时的人为特性

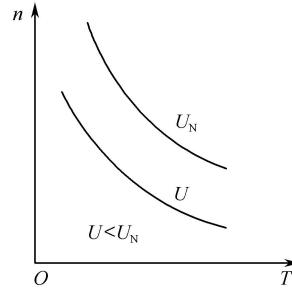
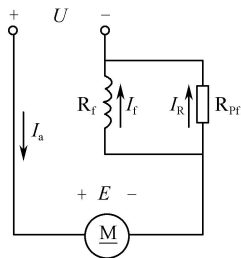


图 4.18 降低电压时的人为特性

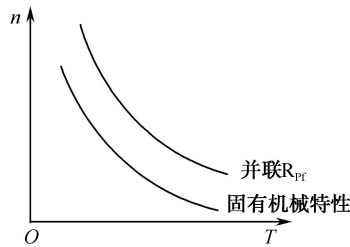
性

### (3) 改变磁通时的人为特性

串励电动机改变磁通的方法之一是在励磁绕组上并联一个分流电阻  $R_{pf}$ ，如图 4.19 (a) 所示。与固有特性相比，在  $I_a$  相同的情况下，此时，因  $I_f < I_a$ ，故  $\Phi$  减小，因此人为特性位于固有特性的上方，如图 4.19 (b) 所示。



(a) 接线图



(b) 人为机械特性

图 4.19 减弱磁通时的人为特性

## 2. 串励电动机的起动、反转与调速

### (1) 起动与反转

为了限制起动电流，串励电动机的起动方法与并励电动机一样，也是采用电枢串电阻起动和降低电源电压起动。但由于  $T$  与  $I_a^2$  成正比，所以串励电动机的起动转矩较大，适用于重载起动的生产机械上，例如起重、运输设备等。

串励电动机也可反向运转，但不能用改变电源极性的方法，因这时电枢电流与磁通同时反向，使电磁转矩依然保持原来方向，则电动机不可能反转。改变电枢或励磁绕组的接线极性可使其反转，反转时机械特性与正转时相同，但位于第三象限。

### (2) 调速

串励电动机的调速也是采用电枢电阻、降压和弱磁三种调速方法。其中电枢串电阻调速比较常用，弱磁调速用得较少。

### 3. 串励电动机的制动

对于串励电动机，若不考虑剩磁，只有  $n$  趋于无穷大时，才能出现  $E=U$ ，要使  $E>U$ ，显然无法实现。虽然电机中存在少量的剩磁，但要使  $E>U$ ，转速将高达不能允许的数值，故串励电动机不存在回馈制动状态。

串励电动机只有能耗制动和反接制动两种制动方法，下面分别进行分析。

#### (1) 能耗制动

串励电动机的能耗制动分为他励式和自励式两种。



他励式能耗制动时，是把励磁绕组由串励形式改接成他励形式，即把励磁绕组单独接到电源上，电枢绕组外接制动电阻  $R_B$  后形成闭路，如图 4.20 (a) 所示。由于串励电动机的励磁绕组电阻  $R_f$  很小，如果采用原来的电源，因电压较高，则必须在励磁回路中串入一个较大的限流电阻  $R_{sf}$ 。此外还必须保持励磁电流  $I_f$  的方向与电动状态时相同，否则不能产生制动转矩（因  $I_a$  已反向）。他励式能耗制动时的机械特性为一直线，如图 4.20 (b) 中直线  $BC$  所示，其制动过程与他励电动机的能耗制动完全相同。他励式能耗制动的效果好，应用较广泛。

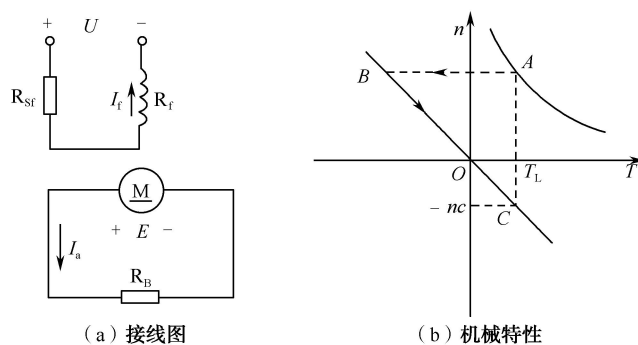


图 4.20 串励电动机的他励式能耗制动

自励式能耗制动时，电枢回路脱离电源后，通过制动电阻形成闭路，但为了实现制动，必须同时改接串励绕组，以保证励磁电流的方向不变，如图 4.21 (a) 所示。自励式能耗制动时的机械特性如图 4.21 (b) 中曲线  $BO$  所示。由图可见，自励式能耗制动开始时制动转矩较大，随着转速下降，电枢电动势和电流也下降，同时磁通也减小，从公式  $T = C_T \Phi I_a$  可见，制动转矩下降很快，制动效果变弱，所以制动时间较长且制动不平稳。由于这种制动方式不需要电源，因此主要用于事故停车。

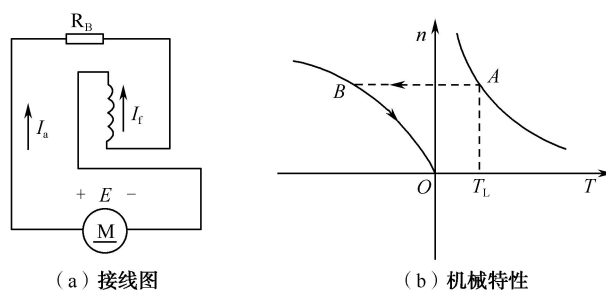


图 4.21 串励电动机的自励式能耗制动

## (2) 反接制动

串励电动机的反接制动也有电压反接制动和倒拉反接制动两种。串励电动机进行电压反接制动时，并不是将电源反接，因为这样将会造成  $I_a$  和  $I_f$  同时改变方向，电磁转矩方向不变，起不到制动作用。因此，只能将电枢两端反接，而励磁绕组的接法不变，如图 4.22 (a) 所示。为了限制过大的制动电流，还应串入制动电阻  $R_B$ 。其机械特性如图 4.22 (b) 中曲线  $BC$  所示。图中  $A$  点是正向电动工作点， $B$  点是制动起始点，减速时，工作点由  $B$  点沿特性曲线向  $C$  点移动，到达  $C$  点时，转速为零，若要停车，应断开电源，否则电动机将反向起动并加速到  $D$  点，在  $D$  点处于反向电动运行。

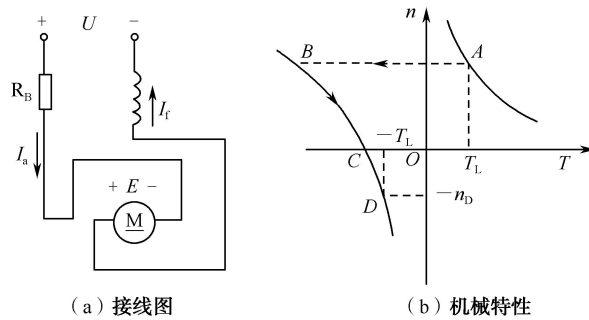


图 4.22 串励电动机的电压反接制动

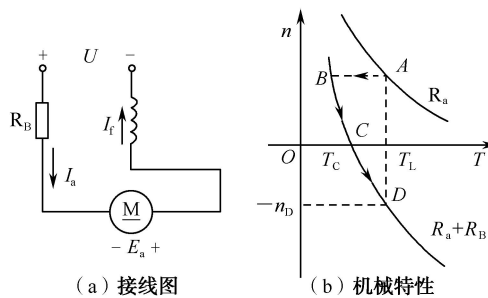


图 4.23 串励电动机倒拉反接制动

串励电动机倒拉反转反接制动只适用于位能性负载。方法是保持电压极性不变，电枢回路串入一个较大的电阻  $R_B$ ，使电动机倒拉反转，其接线图和机械特性如图 4.23 所示。在图 4.23 (b) 中， $A$  点是电动运行工作点，当电枢回路串入  $R_B$  后，工作点移至  $B$  点，并进入制动减慢运行，当工作点到达  $C$  点时，转速减至零，但由于电磁转矩小于负载转矩 ( $T_C < T_L$ )，于是在位能负载倒拉下，电动机反转并加速，直到  $D$  点进入反接制动状态稳定运行，匀速下放重物。

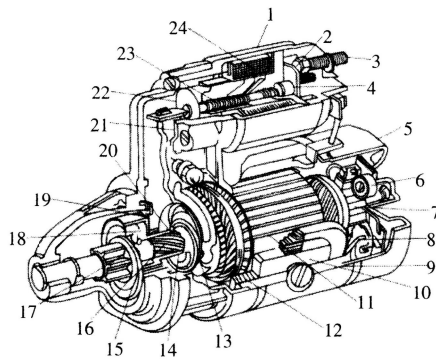
## 五、汽车用起动电动机

汽车发动机是靠外力起动的，需要通过外力带动发动机曲轴旋转以实现起动。发动机的起动方法很多，汽车常用的有电动机起动和手摇起动两种。电动机起动用电动机作为机械动力，当将电动机轴上的齿轮与发动机飞轮周缘的齿圈啮合时，动力就传到飞轮和曲轴，使之旋转。电动机本身又用蓄电池作为能源。目前绝大多数汽车发动机都采用电动机起动。

起动系统主要由蓄电池、点火开关、起动继电器、起动机等组成，其作用是利用起动机将蓄电池的电能转换为机械能，再通过传动机构将发动机拖转起动。

### 1. 基本结构

汽车用起动机一般由直流电动机、单向传动机构和电磁操纵机构三大部分组成。起动机的总成如图 4.24 所示。不同类型的汽车上使用的起动机尽管形式不同，但其直流电动机部分基本相似，主要的区别就在于传动机构和控制装置各有差异。



1—电磁开关；2—触点；3—蓄电池接线柱；4—动触点；5—前端盖；6—电刷弹簧；7—换向器；  
8—电刷；9—机壳；10—磁极；11—电枢；12—磁场绕组；13—导向环；14—止推环；  
15—单向离合器；16—电枢轴；17—驱动齿轮；18—传动机构；19—制动盘；20—啮合弹簧；  
21—拨叉；22—活动铁芯；23—复位弹簧；24—电磁开关

图 4.24 起动机总成

### (1) 直流电动机

直流电动机的作用是将蓄电池输入的电能转换为机械能，产生电磁转矩。依据磁场绕组和电枢绕组连接方式的不同，起动用直流电动机可分为并励、串励、复励三种形式。

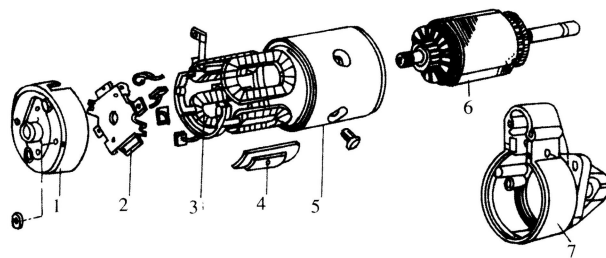
### (2) 单向传动机构

单向传动机构的作用是在发动机起动时，使起动机的驱动齿轮与飞轮齿圈啮合，将电动机的转矩传给发动机飞轮；在发动机起动后，使起动机与飞轮自动脱离。

### (3) 操纵机构

操纵机构的作用是接通或切断起动机与蓄电池之间的主电路。

汽车用起动机的直流电动机的结构如图 4.25 所示，主要由机壳、磁极、电枢、换向器和电刷组件等部件组成。

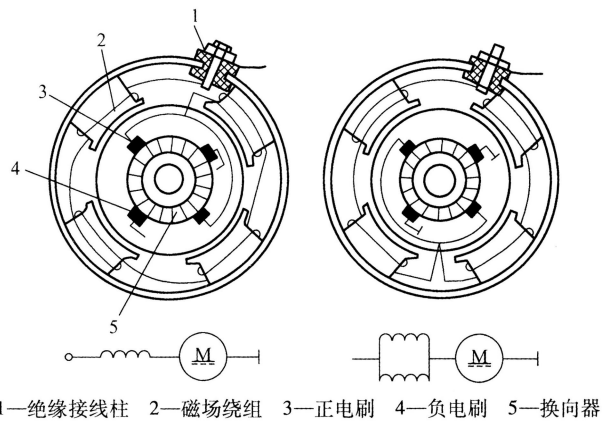


1—前端盖；2—电刷和电刷架；3—磁场绕组；4—磁极铁芯；5—机壳；6—电枢；7—后端盖

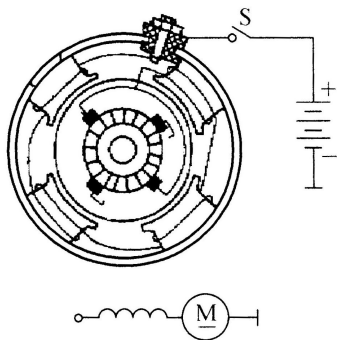
图 4.25 直流电动机的结构

## 2. 励磁绕组连接

一般汽车用起动机的电动机有 4 个励磁绕组。励磁绕组有两种连接方式：一种是四个绕组与电枢绕组串联，另一种是两个绕组先串联后再并联复式接法，然后与电枢绕组串联。连接方式如图 4.26 所示。复式接法可以在绕组导体截面相同的情况下增大起动电流，从而提高起动转矩。励磁绕组一端接在外壳的绝缘接线柱上，另一端与两个非搭铁电刷相连，如图 4.27 所示。



1—绝缘接线柱 2—磁场绕组 3—正电刷 4—负电刷 5—换向器



(a) 四个绕组相互串联 (b) 两个绕组先串联后并联

图4.26 励磁绕组的接法

图4.27 外壳的绝缘接线柱

### 3. 起动机分类

在各种起动机三个组成部分中，电动机部分一般没有本质的差别，而控制方法和传动结构的啮入方式则有很大差异，因此起动机是按控制方法和传动机构的啮入方式的不同来分类的。

(1) 按控制方法的不同可分为机械控制式和电磁控制式。

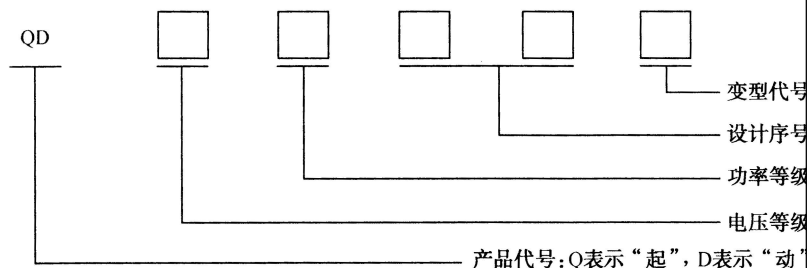
现代汽车大多采用电磁控制式这种方式，借按钮或钥匙控制电磁铁，再由电磁铁控制主电路开关，以接通或切断主电路。由于装有电磁铁，可进行远距离控制，操作省力。

(2) 按传动机构啮入方式的不同可分为惯性啮合式；强制啮合式；电枢移动式；齿轮移动式；同轴式起动机。

除上述以外，还有磁极为永久磁铁的永磁式起动机及内装减速齿轮的减速起动机等。

### 4. 起动机型号

根据 QC/T 73—93《汽车电气设备产品型号编制方法》的规定，起动机型号如下：



QDJ 表示减速起动机；QDY 表示永磁起动机（包括永磁减速起动机）；J、Y 分别表示“减”、“永”。

电压等级：1 代表 12V；2 代表 24V。

功率等级：含义见表 4.2。

表 4.2 起动机功率等级

功率等级代号		1	2	3	4	5	6	7	
功率 (kW)	起动机								
	减速起动机	~1	>1~2	>2~3	>3~4	>4~5	>5~6	>6~7	>7
	永磁起动机								

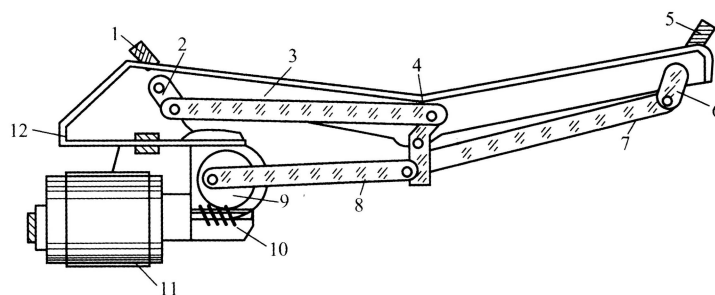
如 QDI24，表示额定电压为 12V、功率为 1~2kW、第四次设计的起动机。

## 六、永磁电动机在汽车中的应用

汽车中除了使用串励电动机外，用永磁铁构成定子的永磁电动机也得到广泛地应用。永磁电动机的磁场恒定，机械特性与他励电动机类似，在电动刮水器、电动车窗等汽车部件中都有应用。

刮水器是专门用来清除汽车风窗玻璃上的雨水、雪或灰尘的部件。根据其驱动方式的不

分为电动式、真空式和气动式三种。目前使用最广泛的是电动刮水器。电动刮水器主要由直流电动机、减速机构、自动停位器、刮水器开关和联动机构及刮片组成，如图 4.28 所示。



1、5—刷架 2、4、6—摆杆 3、7、8—拉杆 9—蜗轮 10—蜗杆 11—电动机 12—底板

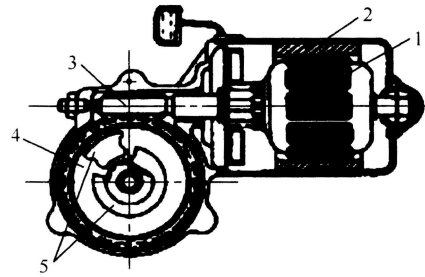
图 4.28 电动刮水器

刮水器电机按磁场结构不同可分为绕线式和永磁式两种，由于永磁式电机具有体积小、质量轻、结构简单等特点，故在轿车上得到了广泛的应用。永磁式电机如图 4.29 所示，它主要由一个永磁式直流电机、一个蜗轮、蜗杆减速器和一个自动停位器组成。

电动机主要由磁极、电枢、电刷等组成，其磁极由铁氧体永久磁铁构成，磁场的强弱不能改变。为了改变电动机转速，采用三刷电动机，利用三个电刷来改变正、负电刷之间串联的电枢线圈的个数，从而改变电动机的转速。

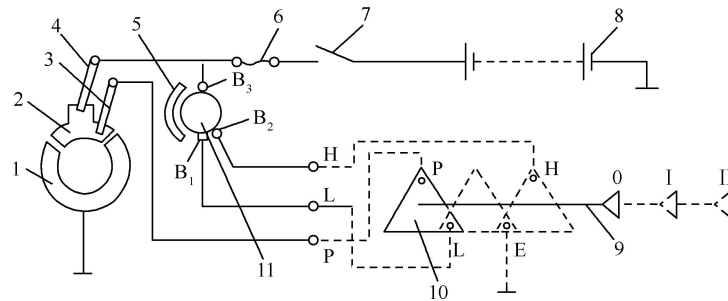
### 1. 永磁式电动刮水器电路

由于永磁电动机的磁极是铁氧体永久磁铁，其磁场强弱是不能改变的，为了得到两种转速，汽车上常采用三刷式（即三个电刷）电动机。永磁电动机双速刮水器工作原理如图 4.30 所示，图中  $B_3$  为高、低速公用电刷， $B_1$  为低速电刷， $B_2$  为高速电刷， $B_1$  与  $B_2$  相差  $60^\circ$ ，用以改变两电刷间的导体数。



1—电枢；2—永久磁铁磁极；  
3—蜗杆；4—蜗轮；5—自动停位滑片

图 4.29 永磁式电机



1、2—自动停位器滑片；3、4—自动停位器触片；5—永久磁铁；6—熔断丝；7—总开关；  
8—蓄电池；9—刮水器变速开关； $B_1$ 、 $B_2$ 、 $B_3$ —电刷；10—接触片；11—电枢

图 4.30 永磁电动机双速刮水器工作原理

接通电源开关 7，当把变速开关 9 拉到“ I ”挡时，电流从蓄电池的“+”极→总开关 7→熔断丝 6→高、低速共用电刷  $B_3$ →电枢 11→低速电刷  $B_1$ →接线柱 L→接触片 10 (LE)→接线柱 E→搭铁→蓄电池“-”极，构成回路。电流通过电刷  $B_3$  和  $B_1$  之间的有效导体数较多，电动机转速较低，故刮水片以低速状态刮去挡风玻璃上的雨和雪。

当变速开关拉到“ II ”挡时，电流则从蓄电池的“+”极→总开关 7→熔断丝 6→高、低速共用电刷  $B_3$ →电枢 11→高速电刷  $B_2$ →接线柱 H→接触片 10(HE)→接线柱 E→搭铁→蓄电池“-”极，构成回路。此时电流通过  $B_3$  和  $B_2$  间的有效导体数减少，转速升高，从而使刮水片在快速摆动下扫除挡风玻璃上的雨或雪。当变速开关推到“ 0 ”挡时，若刮水片没有停在行程末端的下限位置而妨碍驾驶员视线，由于自动停位器触片 3 与自动停位器滑片 1 接触，电流继续流入电枢，其电路为：蓄电池“+”极→电源开关 7→熔断丝 6→电刷  $B_3$ →电枢 11→电刷  $B_1$ →接线柱 L→接触片 10(LP)→接线柱 p→自动停位器触片 3→自动停位器滑片 1→搭铁→蓄电池“-”极，构成回路，电动机以低速运转，直至蜗轮转至图 4.29 所示的位置，电路中断。但由于电枢的惯性，电动机不会立即停止转动，将以发电机的形式继续运转，利用发电制动，从而使刮水片停在规定的位置。发电制动短路电路为：电枢“+”极→电刷  $B_3$ →触片 4→滑片 2→触片 3→接线柱 P→接触片 10(PL)→接线柱 L→电刷  $B_1$ →电枢“-”极。

### 2. 电动座椅电路

电动座椅有两向、四向、六向移动等多种类型。两向座椅只能进行前后移动；

四向座椅除前后移动外还可以升降；六向座椅除前后移动外，还可使座椅的前部和后部分别升降。

电动座椅由双向电动机、传动装置和座椅调节器等组成。传动装置包括变速器、联轴装置和电磁阀等。座椅调节器的主要部件是螺旋千斤顶和齿轮传动机构。传动装置与座椅调节器之间用软轴联接。

当电路开关接通后，电动机和其电磁阀同时通电，电磁阀柱塞和爪形接头接合，电动机的动力即通过齿轮、驱动轴使软轴转动，再驱动座椅调节器运动。当调节器达到终点时，软轴停止转动。如此时电动机仍在转动，其动力即为装在电动机和变速器之间的橡胶联轴节所吸收，这样也可防止座椅万一卡住时电动机过载损坏。当开关断电后，复位弹簧能使电磁阀柱塞和爪形接头分离，回到原来位置。

大多数电动座椅使用永磁式电动机，通过开关控制电流流向，可使电动机按不同方向旋转，如图 4.31 所示。

另外，也有的电动座椅采用串励式电动机，用两个磁场线圈使电动机进行双向运动。这种电动机一般用继电器控制电流方向，因此当开关换向时可听到继电器吸合的“咔哒”声。

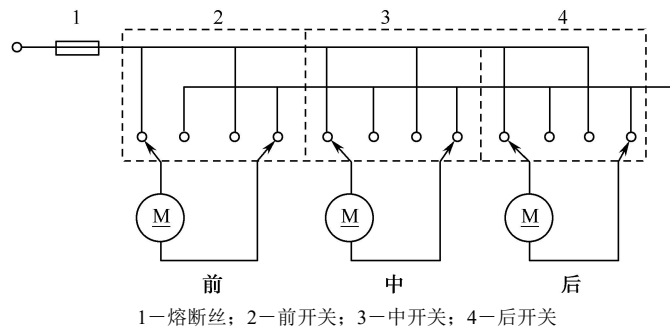


图 4.31 六向电动座椅电路

### 3. 电动天窗电路

电动天窗系统原理与电动车窗系统基本相同，利用开启和关闭两个继电器，改变电动机电流的方向，驱动电动机实现正/反转，使天窗实现不同状态下的工作。现以广州本田雅阁轿车为例介绍电动天窗的工作原理。

在没有打开任何车门的情况下，将点火开关从打开位置旋至关闭位置时，电动天窗仍能工作 10min，电动天窗电路如图 4.32 所示。电路原理如下：

① 电动天窗继电器电路。当打开点火开关时，电动车窗继电器电路接通，电路为蓄电池正极→多路控制装置（前乘客席侧）（点火开关断开定时器电路）→电动车窗继电器（前乘客席侧仪表板下熔断器/继电器盒）→G581 搭铁→蓄电池负极。

② 天窗开启电路。当电动天窗开关置于开启位置时，电路为蓄电池正极→（发动机盖下熔断器/继电器盒）No.41（100A）、No.51（40A）→电动车窗继电器触点→（前乘客席侧仪表板下熔断器/继电器盒）熔断器 No.7（20A）→天窗开启继电器线圈→天窗开关 6 端子→天窗开关 2 端子→G501 搭铁→蓄电池负极。天窗继电器接通，将触点吸到图 4.32 中左边位置。

此时，电路为蓄电池正极→（发动机盖下熔断器/继电器盒）No.41（100A）、No.51（40A）→（前乘客席侧仪表板下熔断器/继电器盒）熔断器 No.1（30A）→天窗开启继电器触点→天窗电动机 1 号端子→天窗电动机 2 号端子→天窗关闭继电器触点→G501 搭铁→蓄电池负极。天窗电动机开始工作，天窗开启。



③ 天窗关闭电路。当电动天窗开关打到关闭位置时，电路中的电流由蓄电池正极→（发动机盖下熔断器/继电器盒）No.41（100A）、No.51（40A）→电动车窗继电器触点→（前乘客席侧仪表板下熔断器/继电器盒）熔断器 No.7（20A）→天窗关闭继电器线圈→天窗倾斜开关关闭触点端子 1→天窗倾斜开关关闭触点端子 3→天窗开关 4 端子→天窗开关 2 号端子→G501 搭铁→蓄电池负极。天窗关闭继电器接通，将触点吸到图 4.32 右边位置。

此时，电路中的电流由蓄电池正极→发动机盖下熔断器/继电器盒 No.41（100A）、No.51（40A）→熔断器 No.1（30A）（前乘客席侧仪表板下熔断器/继电器盒）→天窗关闭继电器触点→天窗电动机 2 号端子→天窗电动机 1 号端子→天窗开启继电器触点→G501 搭铁→蓄电池负极。天窗电动机开始工作，天窗关闭。

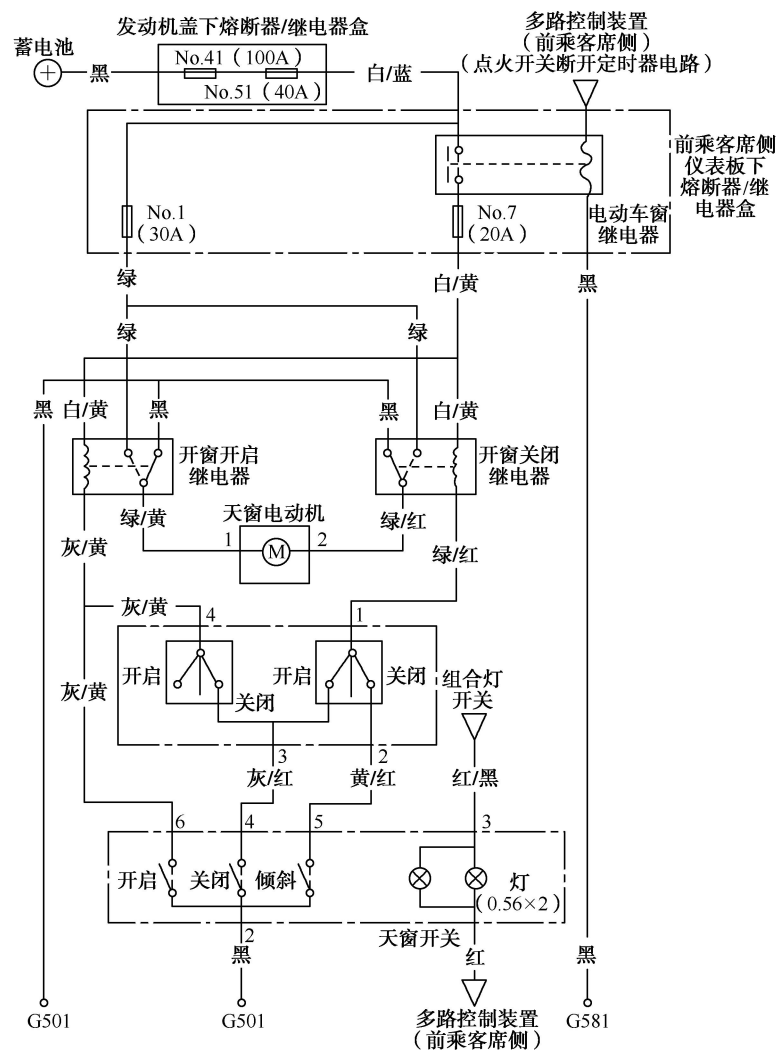


图 4.32 广州本田雅阁轿车电动天窗电路

#### 4. 电动门锁电动机

电动门锁是一个电气系统，具有锁门和开门功能，当钥匙开关转到锁止位置时，所有车门同时锁住，当钥匙开关转到开锁位置时，所有车门同时打开。因为一把钥匙可以控制全车的车门，因此也称为中央控制门锁系统。电动门锁系统的电动机一般采用双向永磁电动机，如图 4.33 所示，利用门锁开关控制电动机的电流方向，使其连接杆做推拉动作，控制车门的锁止或打开。以锁门控制电路为例，说明其工作过程。

图 4.34 所示为美国福特公司采用的门锁控制电路，由门锁开关、继电器和永磁电动机等组成。其中门锁开关是钥匙开关，是可以转动的，转动到不同位置，将使不同的触点闭合。门锁继电器由线圈、触点组成，触点的状态由线圈是否有电流决定，如锁止线圈通电时，触点 5 闭合、触点 6 断开，断电时，触点 5 断开、触点 6 闭合。各门锁电动机是并联在一起的，当通电时同时转动，断电时，同时停止，步调协调一致。

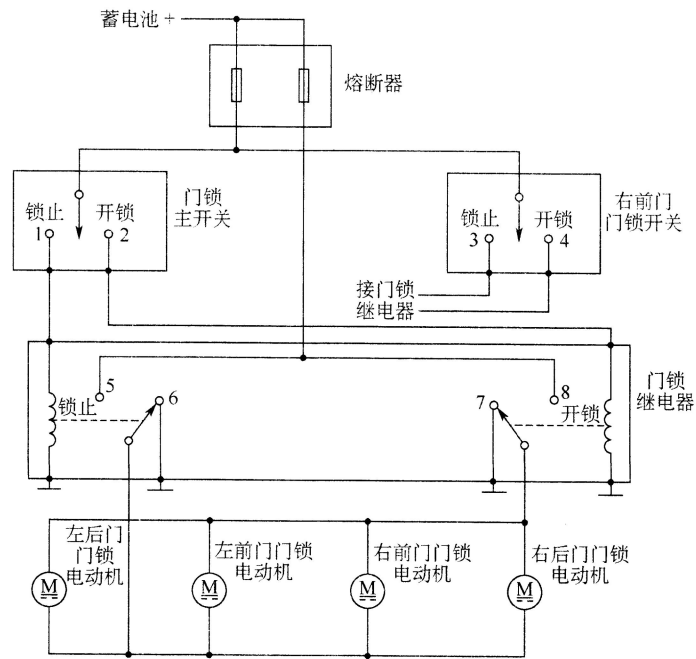
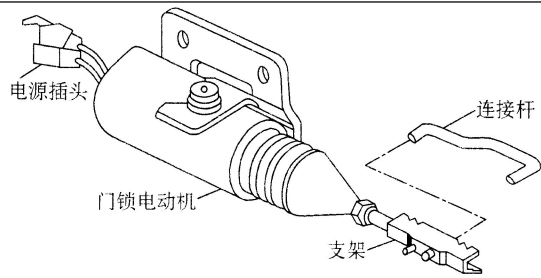





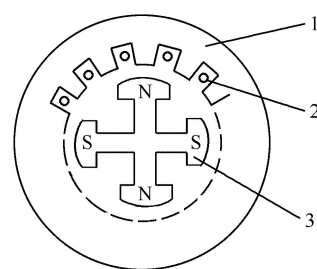
图 4.34 福特公司采用的电动门锁控制电路

锁门的控制过程如下：当门锁主开关转到锁止位置时，触点 1 闭合，门锁继电器的锁止线圈通电，触点 5 闭合。这时，各门锁电动机通电，其电流方向为蓄电池正极→门锁继电器触点 5→各门锁电动机→门锁继电器触点 7→搭铁，电动机旋转并拉动连接杆，将车门锁上。

<p><b>课堂总结</b> 10min</p>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 直流电动机的结构、型号和铭牌；</li> <li>2. 直流电动机的工作原理；</li> <li>3. 串励直流电动机电动机的结构；</li> <li>4. 串励直流电动机电动机的工作原理。</li> </ol>	<p>归纳总结本节课的知识点。</p>
<p> <b>布置作业</b></p>		
<p><b>教学反思</b></p>		

## ——《任务二 三相交流发电机》

 <b>课 题</b>	<h3>交流发电机</h3>	 <b>课型</b>	新课
<b>授课班级</b>		<b>授课时数</b>	4
<b>教学目标</b>	1. 了解三相交流发电机的结构、型号和铭牌。 2. 掌握三相交流发电机的工作原理。 3. 掌握三相交流发电机的结构和工作原理。		
<b>教学重点</b>	1. 三相交流发电机的工作原理。 2. 三相交流发电机的结构和工作原理。		
<b>教学难点</b>	1. 三相交流发电机的工作原理。 2. 串励直流电动机的结构和工作原理。		
<b>教学方法</b>	任务驱动法、分析法、演示法、练习法。		
<b>时间分配</b>	<b>教学内容</b>	<b>教学方法</b>	
<b>导入新课</b> 5min	三相交流同步发电机是怎么工作的？		通过让学生观察三相交流发电机引发其思考。
<b>讲授新课</b> 75min	<p><b>一、三相交流同步发电机的工作原理</b></p> <p>同步电机是相对于异步电机而言的，同步电机的特点是转子的转速 <math>n</math> 与频率 <math>f</math> 之间具有固定不变的关系，即 <math>n = \frac{60f}{p}</math>，或 <math>f = \frac{pn}{60}</math>，转速 <math>n</math> 称为同步转速。同步电机主要作为发电机，也可作为电动机或补偿机。</p> <p>图 4.53 可以用来说明同步发电机的工作原理：定子结构与一般异步电机相似，铁芯叠片开槽，并装上定子三相绕组。电机转子上装了磁极，每个磁极上均套上一个励磁线圈，并把它们按一定规律连接起来，称为励磁绕组。励磁绕组通入直流电，产生磁场，当原动机拖动电机转子旋转时，磁场与定子绕组有相对运动，会在定子绕组中感应出交流电势，即定子三相绕组会产生三相交流电势。定子绕组里交流电势的频率 <math>f</math> 决定于电机的极对数 <math>p</math> 和转子速度 <math>n</math>，即</p> $f = \frac{pn}{60}$ <p>式中，<math>n</math>——同步转速，单位为 r/min；<math>p</math>——磁极对数；<math>f</math>——交流电势的频率，单位为 Hz。</p> <p>我国规定，电力电网频率为 50Hz，则 <math>p=1</math>，<math>n=3000\text{r/min}</math>；<math>p=2</math>，<math>n=1500\text{r/min}</math>。例如，作为同步电机运行，则除了在转子上加直流励磁外，必须在定子三相绕</p>		运用演示法进行教学。



1—定子铁芯；2—定子绕组；3—磁极

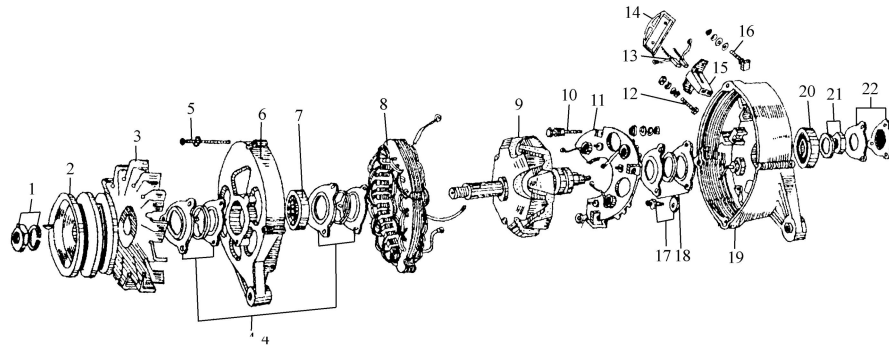
图 4.53 同步电机运行原理图

组加上三相交流电。此外，定子绕组产生旋转磁场，转子好似磁铁，显然，转子磁铁会按旋转磁场一样的速度旋转，即  $n = \frac{60f}{p}$ 。

可见，不论是发电机或电动机，结构一定（极对数一定）时，转速  $n$  与频率  $f$  间有严格的关系，我们称为同步关系。故称这类电机为同步电机。

## 二、三相交流同步发电机的结构

汽车用交流发电机是由一个三相同步交流发电机及硅二极管组成的整流器所组成，图 4.54 所示为国产 JF 型系列硅整流发电机的结构图。



1—紧固螺母及弹簧垫圈；2—传动带轮；3—风扇；4—前端轴承油封及护圈；5—组装螺栓；6—前端盖；7—前轴承；8—定子；9—转子；10—“+”（电枢）接线柱；11—组件板；12—“-”（搭铁）接线柱；13—电刷及压簧；14—电刷盒外盖；15—电刷盒；16—“F”（磁场）接线柱；17—组件板固定螺栓；18—后端盖轴承油封及护圈；19—后端盖；20—后轴承；21—转轴固定螺母及弹簧垫圈；22—后轴承纸垫及护盖

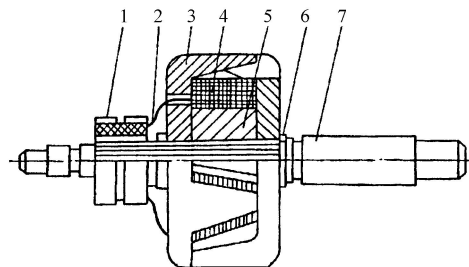
图 4.54 硅整流发电机结构图

### 1. 三相同步交流发电机

三相同步交流发电机由转子、定子、传动带轮、风扇、前后端盖及电刷等部件组成。

#### （1）转子

转子由转子轴、励磁绕组、两块爪形磁极、集电环等组成，如图 4.55 所示，由低碳钢制成的两块六爪磁极压装在转子轴上，其空腔内装有励磁绕组，励磁绕组的二根引出线分别焊在与轴绝缘的两个压装在轴上的集电环上。集电环与装在后端盖内的两个电刷相接触，两个电刷通过引线分别接在两个螺钉接线柱上，这两个接线柱即为发电机的“+”极（电枢）接线柱和“-”极（搭铁）接线柱。当这两个接线柱与直流电源相接时，便有电流流过励磁绕组，从而产生磁场。



1—集电环；2—引线；3—爪形磁极；4—励磁绕组；5—磁轭；6—定位圈；7—转子轴

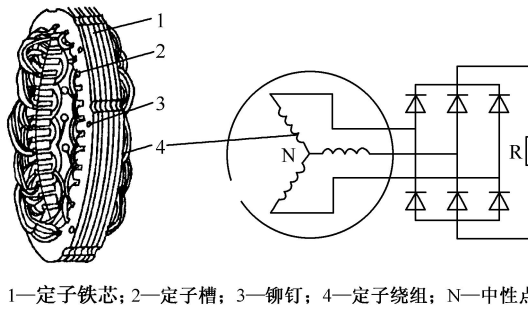


图 4.55 转子结构

图 4.56 定子结构与三相绕组的星形连接图

连接图

(2) 定子

定子由定子铁芯和定子绕组组成，定子铁芯由相互绝缘的内圆带嵌线槽的圆环状硅钢片叠成，嵌线槽内嵌入三相对称的定子绕组。绕组的接法有星形、三角形两种方式，一般采用星形连接，即每相绕组的首端分别与整流器的硅二极管相接，每相绕组的尾端接在一起，形成中性点（N），如图 4.56 所示为定子绕组结构和星形连接图。

(3) 前后端盖

前后端盖用非导磁性材料铝合金制成，漏磁少，并具有轻便、散热性好等优点。在后端盖内装有电刷架和电刷。汽车上使用的交流发电机的前后端盖上通常设有通风口。当传动带轮和风扇一起旋转时，使空气高速流经发电机内部进行冷却。有些工作环境恶劣的工程机械、农用拖拉机等为防止灰尘、泥水进入发电机内部，常采用外形尺寸较大的封闭交流发电机，以保证其散热的需要。

(4) 电刷与电刷架

两只电刷装在电刷架的方孔内，利用弹簧的压力使其与集电环保持良好的接触。电刷与电刷架的结构有外装式和内装式两种，其构造如图 4.57 所示。搭铁电刷的引出线用螺钉直接固定在后端盖上（标记“-”），此方式称为内搭铁；搭铁电刷的引出线与机壳绝缘接到后端盖外部的接线柱上（标记 F<sub>2</sub>），这种方式称为外搭铁。

(5) 风扇

一般用 1.6mm 厚的钢板冲制或用铝合金压铸而成，并用半圆键装在前端盖外侧的转轴上。

(6) 传动带轮

通常用铸铁或铝合金制成，分单槽和双槽两种，利用风扇的半圆键装在风扇外侧的转轴上，再用弹簧垫片和螺母紧固。

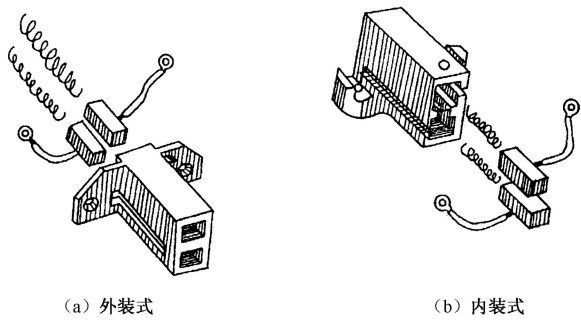


图 4.57 电刷及电刷架

可联系实际，举出适当例子。

## 2. 整流器

整流器的作用是把三相同步交流发电机产生的三相交流电变成直流电输出，它一般用 6 个硅二极管接成三相桥式全波整流电路。

### (1) 正极管

正极管的中心引线为二极管的正极，外壳为负极，在管壳底上一般标有红色标记。在负极搭铁的硅整流发电机中，3 个正二极管的外壳压装在组件板的 3 个座孔内，共同组成发电机的正极，由一个与后端盖绝缘的组件板固定螺栓通至机壳外，作为发电机的火线接线柱“B”（“+”，“A”或“电枢”接线柱）。

### (2) 负极管

负极管的中心引线为二极管的负极，外壳为正极，管壳底部一般有黑色标记。3 个负极管的外壳压装在后端盖的 3 个孔内，和发电机外壳一起成为发电机的负极，图 4.58 为硅二极管的安装示意图。

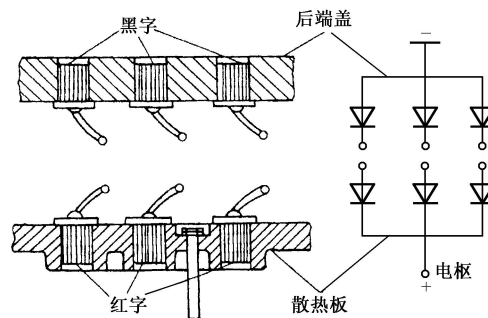


图 4.58 硅二极管安装示意图

CA1091 型汽车用的外搭铁硅整流发电机，把整流器单独装在后端盖外。上海桑塔纳轿车用 JFZ1813Z 型硅整流发电机整流器也安装在后端盖外侧，只要打开塑料防尘罩即可取出，不需将硅整流发电机解体，维修方便。

有些硅整流发电机的整流器采用 9 只二极管，增加的是 3 只小功率磁场二极管，专门用来供给励磁电流，这样可以提高发电机的电压调节精度。采用磁场二极管后，仅用简单的充电指示灯即可指示发电机发电情况，省装了一只充电指示灯继电器。

还有些发电机为了提高中性点电压，提高发电机输出功率，增加了 2 只二极管对中性点电压进行整流，并汇入发电机的输出端。同时具备上述两种功能的发电机整流器共有 11 只硅二极管，图 4.59 为几种不同发电机的整流器。

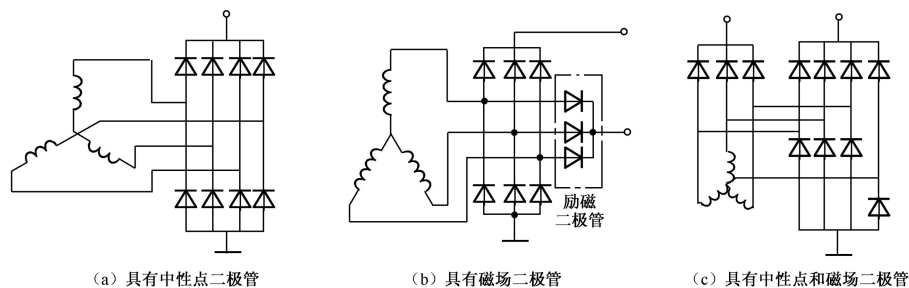


图 4.59 具有中性点和磁场二极管的整流器

## 三、交流发电机的工作原理及特性

### 1. 交流发电机的工作原理

#### (1) 三相交流电动势的产生

当外加直流电压作用在励磁绕组两端点的接线柱之间时，励磁绕组中便有电流

可联系实际，举出适当例子。

可联系实际，举出适当的例子。

通过，产生轴向磁场，两块爪形磁极被磁化，形成了 6 对相间排列的磁极。磁极的磁力线经过转子与定子之间的气隙、定子铁芯形成闭合磁路。转子旋转时，励磁绕组所产生的磁场也随之转动，形成旋转磁场。固定不动的三相定子绕组在旋转磁场的作用下，产生三个频率相同、幅值相等、相位互差  $120^\circ$  电角度的正弦电动势  $e_A$ 、 $e_B$  和  $e_C$ ，其瞬时值分别为

$$e_A = \sqrt{2}E_\Phi \sin \omega t \quad (4-13)$$

$$e_B = \sqrt{2}E_\Phi \sin (\omega t - 120^\circ) \quad (4-14)$$

$$e_C = \sqrt{2}E_\Phi \sin (\omega t - 240^\circ) \quad (4-15)$$

每相绕组电动势的有效值为

$$E_\Phi = 4.44KfN\Phi \quad (4-16)$$

对已知发电机，上式中的  $K$ 、 $N$  都已确定，以电机常数  $C$  代替。这样，上式也可以定成

$$E_\Phi = Cn\Phi \quad (4-17)$$

式中， $C$ ——电机常数， $C = 4.44KN \frac{P}{60}$ ；

$p$ ——磁极对数；

$n$ ——转子的转速 (r/min)。

式 (4-17) 表明，在与电机结构有关的常数不变的前提下，每相绕组的电动势有效值的大小和转子的转速及磁极的磁通成正比。

### (2) 整流原理和过程

在交流发电机中，整流器是利用硅二极管的单相导电性能进行整流的。在图 4.60 中所示的三相桥式全波整流电路中，3 个正二极管的正极引出线分别同 3 相绕组的首端相连，在某一瞬间，只有与电位最高的一相绕组相连的正二极管导通。同样，3 个负二极管的引出线也同三相绕组的首端相连，在同一瞬间，只有与电位最低的一相绕组相连的负二极管导通。这样反复循环，6 只二极管轮流导通，在负载两端便得到一个较平稳的脉动的直流电压。

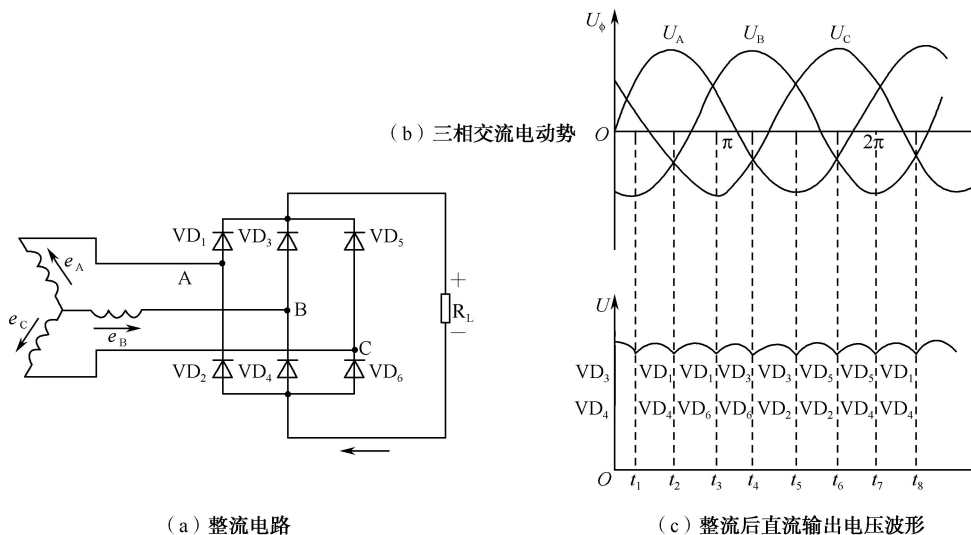




图 4.60 整流电路和电压波形图

在发电机空载运行时，如将三相绕组和二极管内阻的电压降忽略不计，发电机的直流电动势数值为三相交流电电压的 1.35 倍，是三相交流电相电压的 2.34 倍。

每一只硅二极管在一个周期内只导通 1/3 的时间，流过每个管子的电流为负载电流的 1/3。

有些交流发电机将三相绕组中性点引出，标记为“N”接线柱，它和发电机外壳之间的电压称为中性点电压，它是通过 2 个中性点二极管整流后得到的直流电压，等于发电机直流输出电压的一半，即  $U_w = U / 2$ 。

### (3) 交流发电机的励磁方式

交流发电机发电时，需由蓄电池供给励磁电流，此时为他励。当发电机电压达到蓄电池电压时，即由发电机自己供给励磁电流，也就是由他励转变为自励。

由于交流发电机转子的爪极剩磁较弱，所以发电机在低速运转时，加在硅二极管上的正向电阻较大，较弱的剩磁产生的很小的电动势很难克服二极管的正向电阻，致使发电机正向电压不能迅速建立起来，这样，发电机低速充电的要求就不能满足。

## 2. 交流发电机的工作特性

交流发电机的工作特性是指发电机经整流后输出的直流电压、电流和转速之间的关系，包括输出特性、空载特性和外特性。其中输出特性最为重要。

汽车发动机的转速从怠速到最高转速的变化范围很大，由它带动旋转的发电机转速也相应较大范围内变化，研究发电机的特性，应以转速为基准来分析各有关参数之间的关系。

### (1) 输出特性

交流发电机的输出特性又称负载特性或输出电流特性，是指发电机输出电压一定时（对于 12V 电系，规定为 14V；对于 24V 电系，规定为 28V），发电机的输出电流与转速之间的关系，即输出电压  $U$  为常数时的  $I-n$  曲线。

如图 4.61 所示的试验电路可用来测得交流发电机的输出特性。

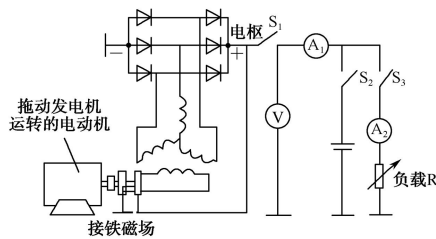


图 4.61 交流发电机试验接线图

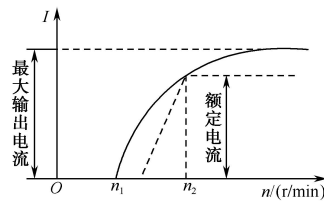


图 4.62 交流发电机的输出特性

交流发电机输出特性曲线  $I = f(n)$  表明：

① 当发电机转速很低时，发电机端电压低于额定电压，发电机不能向外供电。

② 转速超过  $n_1$  时，发电机的输出电流  $I$  随着转速的升高，随着电阻  $R$  的减小而升高。转速等于  $n_2$  时，发电机输出额定功率。额定功率为额定电压与额定电流之积。因此， $n_2$  又称为满载转速。

空载转速和满载转速是交流发电机的主要性能指标，在产品说明书中均有规定。在使用中，应定期检测这两个数据，看是否符合规定值。依此可判断发电机是否处于良好的工作状态。

③ 发电机转速达到一定值时，其输出电流不再随转速的升高而升高，也不再随负载电阻的减小而升高，这时的电流值称为发电机的最大输出电流或限流值。

(2) 交流发电机自动限制电流的机理

① 定子绕组具有一定阻抗  $Z$ ，对通过绕组的电流起阻碍作用。阻抗  $Z$  是由绕组的电阻  $R$  和感抗  $X_L$  组成的：

$$Z = \sqrt{R^2 + X_L^2} \quad (4-18)$$

② 定子电流增加时，电枢反应也增强，感应电动势也会下降。

(3) 空载特性

发电机空载时，发电机端电压与转速的关系称为空载特性。

(4) 外特性

转速一定时，发电机端电压与输出电流的关系称为外特性

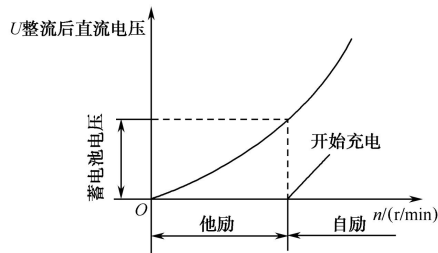


图 4.63 空载特性

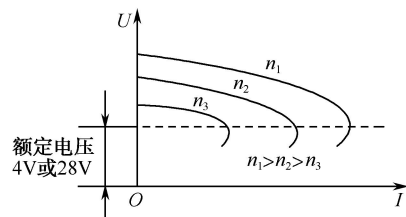



图 4.64 外特性

#### 四、交流发电机的型号

根据我国汽车行业推荐标准 QC/T 73—1993 《汽车电气设备产品型号编制方法》的规定，汽车交流发电机的型号由五部分组成：

- ① ② ③ ④ ⑤

- (1) 产品代号。由字母表示，有 JF、JFZ、JFB、JEW 4 种，分别表示普通交流发电机、整体式交流发电机、带泵交流发电机和无刷交流发电机。
- (2) 电压等级代号。用一位阿拉伯数字表示，1—12V、2—24V、6—6V。
- (3) 电流等级代号。用一位阿拉伯数字表示，各代号表示的电流等级见表 4.3。
- (4) 设计序号。用 1~2 位阿拉伯数字表示产品的顺序。
- (5) 变型代号。用字母表示，交流发电机是以调整臂位置作为变形代号，从驱动端看，Y——右边、Z——左边，无字母则表示在中间位置。

<p>课堂总结 10min</p>	<p>1. 交流发电机的结构、型号和铭牌； 2. 交流发电机的工作原理。</p>	<p>归纳总结本节课的知识点。</p>
 <p>布置作业</p>		
<p>教学反思</p>		

# 《项目四 汽车中的电动机和交流发电机》单元教学设计

## ——《任务一 直流电动机》

 课 题	<h3>直流电动机</h3>	 课型	新课
授课班级		授课时数	4
教学目标	1. 了解直流电动机的结构、型号和铭牌。 2. 掌握直流异步电动机的工作原理。 3. 掌握直流异步电动机的结构和工作原理。		
教学重点	1. 直流电动机的工作原理。 2. 串励直流电动机的结构和工作原理。		
教学难点	1. 直流电动机的工作原理。 2. 串励直流电动机的结构和工作原理。		
教学方法	任务驱动法、分析法、演示法、练习法。		
时间分配	教学内容	教学方法	
导入新课 5min	<p>异步电动机是把交流电能转变为机械能的动力机械，广泛应用于工业(如：机床、纺织机械、起重机矿山机械等)、农业(脱粒机、粉碎机、水泵及加工机械等)、家用电器(电风扇、空调、洗衣机、电冰箱及小功率电动工具等)。</p> 	通过让学生观察电动机,引发其思考。	
讲授新课 75min	<p><b>一、直流电机的工作原理</b></p> <p><b>1. 电磁感应与右手定则</b></p> <p>从物理学中可知,在一个均匀磁场 <math>B</math> 中,当放置一根有效长度为 <math>l</math> 的导体,作垂直切割磁力线运动时,则在导体 <math>l</math> 上产生感应电动势。这种由于导体切割磁力线而在导体上感应电动势的现象称为电磁感应。其电动势的大小取决于单位时间内切割磁力线的多少,按法拉第电磁感应定律来计算,有</p> $e = Blv$ <p>式中, <math>v</math> 为导体运动的速度。</p> <p>而电动势 <math>e</math> 的方向按右手定则确定,即将右手掌伸开,让磁力线垂直指向掌心,大拇指指向导体运动方向,则与大拇指成 <math>90^\circ</math> 的其余四指所指方向便是导体中感应电动势的方向,如图 4.1 所示。</p>		运用演示法进行教学。

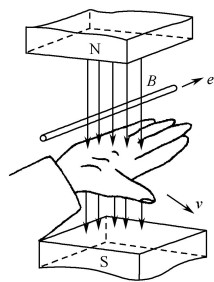


图 4.1 电磁感应及右手定则

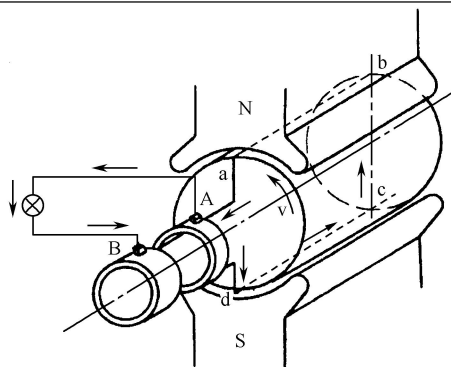


图 4.2 交流发电机原理模型

如果一匝对称线圈  $abcd$  (两有效边  $l_{ab}$  和  $l_{cd}$ )，置于按正弦规律变化磁场  $B_x = B_m \sin x$  中，线圈两端  $a$  和  $d$  分别与线圈一起转动的两个铜环焊接，再在两个铜环上分别压着固定不动的两个电刷  $A$  和  $B$ ，如图 4.2 所示。当线圈以  $v$  速度作逆时针旋转时，则在  $A, B$  两刷间产生的感应电动势为

$$e_{AB} = e_{ad} = e_{cd} + e_{ab} = 2B_m l_{ab} v \sin x$$

(4-1)

式中， $B_m$  为最大磁场密度，单位为  $\text{Wb}/\text{m}^2$ ； $l_{ab}$  为导体有效长度，单位为  $\text{m}$ ； $v$  为切割线速度，单位为  $\text{m}/\text{s}$ 。

由此可见，导体等速运动切割磁力线时，导体上的感应电动势在时间上也按正弦规律变化，即同  $B_x$  的规律变化，而不是直流电动势。显然，如果磁场波形是半个正弦波的话，则导体中感应电动势在时间上也是半个正弦波。

## 2. 直流发电机工作原理

如果将图 4.2 中的两个铜环去掉一个，而将留下的一个剖成互相绝缘的两个半圆环，线圈两个端点分别接在两个半圆环上，将  $A, B$  两电刷也分别压在两个半圆环上，且固定不动，其位置分别与磁极  $N, S$  对正，电机线圈仍以逆时针方向旋转，如图 4.3 所示，那么在图示瞬间，导线  $ab$  处于  $N$  极下，与  $A$  电刷连接，电动势  $e_{ab}$  由  $b$  指向  $a$ ，则  $A$  电刷为“+”（正极）；当线圈转过  $180^\circ$  时，导体  $cd$

处于  $N$  极下，且与  $A$  电刷连接，电动势  $e_{cd}$  由  $c$  指向  $d$ ，则  $A$  电刷仍为“+”。

可见， $A$  电刷始终与处于  $N$  极下导体连接，不管哪根导体，一旦转到  $N$  极下，所产生的感应电动势方向都一样，永远指向  $A$  电刷，故  $A$  电刷为正极。同理， $B$  电刷始终为“-”（负极）。显然，对某根导体来说，如  $l_{ab}$ ，在  $N$  极下感应电动势方向由  $b$  指向  $a$ ，转过  $180^\circ$  后，处于  $S$  极下，感应电动势方向由  $a$  指向  $b$ ，即导体内部感应电动势为交流电动势，但电刷两端间电动势却不变， $A$  电刷永为正， $B$  电刷永为负，都是直流电动势。

图 4.4 为一个线圈交流电动势经两个半圆铜环与电刷两端引出的电动势波形，它显然是半波整流状态，有明显脉动。如果把一个圆铜环剖为互相绝缘的四等份，分别与两个线圈连接，则脉动将减半。

在实际发电机中，发电机的转动部分不只一个线圈，而是由许多个线圈均匀分布在发电机转动部分表面，按一定规律连接起来。如若发电机每磁极下的导体数大于 8 时，电动势脉动的幅度将小于 1%。

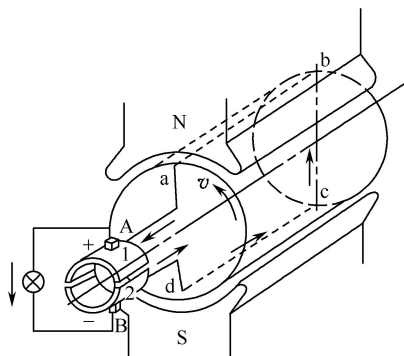


图 4.3 利用换向器获得直流电动势

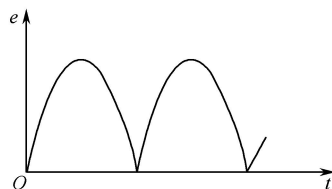


图 4.4 一个线圈电刷两端电动势的波形

### 3. 直流电动机的工作原理

直流电动机的工作原理是基于电磁力定律，若磁场  $B_x$  与导体  $l$  互相垂直，且导体  $l$  中通以电流  $i$ ，则作用于载流导体  $l$  上的电磁力为

$$f_x = B_x il \quad (4-2)$$

式中， $f_x$  为电磁力的大小，单位为 N； $B_x$  为每极磁通下的瞬时值，单位为  $\text{Wb}/\text{m}^2$ ； $i$  为导体中流过的电流，单位为 A； $l$  为导体的有效长度，单位为 m。电磁力的方向按左手定则来确定。

欲使电动机连续旋转，必须使载流导体在磁场中所受到的电磁力形成一种方向不变的转矩，这需要用换向器和电刷装置配合来实现。

把电刷 A、B 接到一个直流电源上，电刷 A 接电源的正极，电刷 B 接电源的负极，此时在电枢线圈中将有电流通过。

如图 4.5 所示。电刷 A、B 两端恒加直流电压  $U$ ，在此瞬间位置，导体  $l_{ab}$  处于 N 极下，电流从 a 到 b，导体  $l_{ab}$  受到电磁力作用而向左运动，导体  $l_{cd}$  处于 S 极下，电流是从 c 到 d，所受到电磁力作用方向向右，从而形成一转矩，使线圈逆时针方向旋转；当转过  $90^\circ$  时，电刷不与换向片接触，而与换向片间绝缘接触，此时线圈无电流，转矩消失，但由于惯性作用，转子仍向前转，这时导体  $l_{ab}$  与  $l_{cd}$  交换位置，即  $l_{cd}$  处于 N 极下，与 A 刷连接， $l_{ab}$  处于 S 极下，与 B 电刷连接，电流从 d 进从 a 出，导体  $l_{cd}$  受电磁力作用，电磁力方向向左，导体  $l_{ab}$  受到向右的电磁力，保持原来转矩方向不变，从而使电动机继续沿着逆时针方向旋转。

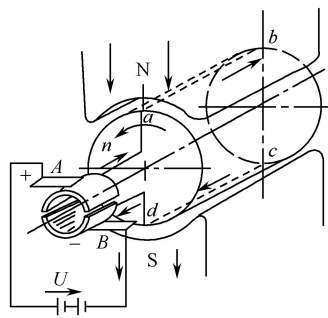


图 4.5 直流电动机工作原理示意图

由此可见，直流电动机的换向器和电刷装置是将直流电流引入处于 N 极（或 S 极）下的导体，而不是恒接入某个线圈，才使电动机有单一方向的转矩。电动机在此方向不变的转矩作用下转动。

同直流发电机相同，实际的直流电动机的电枢并非单一线圈，磁极也并非一对。由此可见，发电机与电动机，两者并无本质上差别，只是外界条件不同而已。

可联系实际，举出适当例子。

所以，同一台直流电机，既可作为发电机运行，也可以作为电动机运行，仅仅改变电流  $I_a$  的方向。这就是电机的可逆原理，汽车中常用到这种电动机。

## 二、直流电动机结构

直流电机可作为电动机运行，也可作为发电机运行。不管是电动机还是发电机，其结构基本是相同的，即都有可旋转部分和静止部分。可旋转部分称为转子，静止部分称为定子。小型直流电动机的结构如图 4.6 所示，其剖面图如图 4.7 所示。

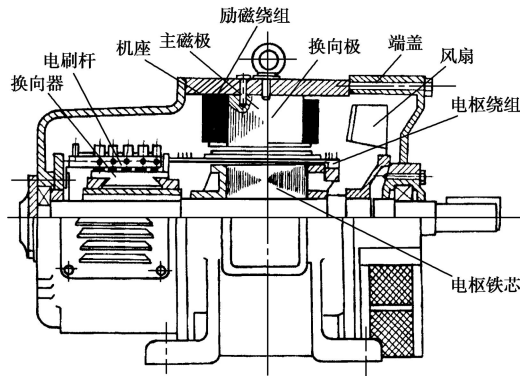


图 4.6 小型直流电动机的结构

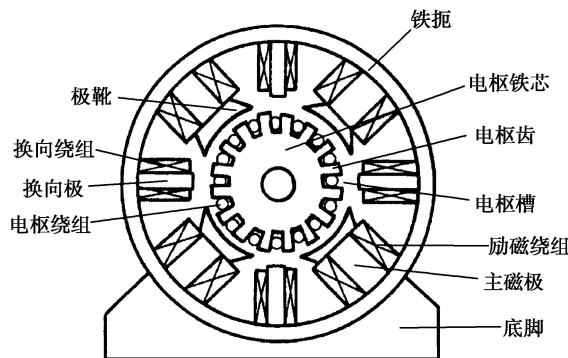


图 4.7 小型直流电动机的剖面图

### 1. 定子部分

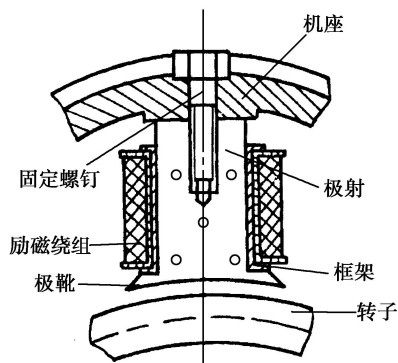


图 4.8 直流电动机主磁极的结构

定子主要由主磁极、机座、换向磁极、电刷装置和端盖组成。主磁极的作用是产生恒定，有一定空间分布形状的气隙磁通密度。主磁极由主磁极铁芯和放置在铁芯上的励磁绕组构成。主磁极铁芯分成极身和极靴，极靴的作用是使气隙磁通密度的空间分布均匀并减小气隙磁阻，同时极靴对励磁绕组也起支撑作用。为减小涡流损耗，主磁极铁芯用 1.0~1.5mm 厚的低碳钢板冲成一定形状，用铆钉把冲片铆紧，然后再固定在机座上。主磁极上的线圈是用来产生主磁通的，称为励磁绕组。主磁极的结构如图 4.8 所示。当给励磁绕组通入直流电时，各主磁极均产生一定极性，相邻两主磁极的极性是 N、S 交替出现的。

可联系实际，举出适当例子。

可联系实际，举出适当

的例子。

直流电动机的机座有两种形式，一种为整体机座，另一种为叠片机座。整体机座是用导磁效果较好的铸钢材料制成的，该机座能同时起到导磁和机械支撑作用。由于机座起导磁作用，因此机座是主磁路的一部分，称为定子铁轭。主磁极、换向极及端盖均固定在机座上，机座上用薄板冲叠片压成定子铁轭，再把定子铁轭固定在一个起支撑作用的机座里，这样定子铁轭和机座是分开的，机座只起支撑作用，可用普通钢板制成。叠片机座主要用于主磁通变化快，调速范围较高的场合，如图 4.8 所示。

换向极又叫附加极，结构如图 4.9 所示。其作用是改善直流电动机的换向，一般电动机容量超过 1kW 时均应安装换向极。

换向极的铁芯比主磁极的简单，一般用整块钢板制成，在其上放置换向极绕组，换向极安装在相邻的两主磁极之间，并总是和主磁极串联在一起。

电刷装置是直流电动机的重要组成部分。通过该装置把电动机电枢中的电流与外部静止电路相连或把外部电源与电动机电枢相连。电刷装置与换向片一起完成机械整流，把电枢中的交变电流变成电刷上的直流或把外部电路中的直流变换为电枢中的交流。电刷的结构如图 4.10 所示。

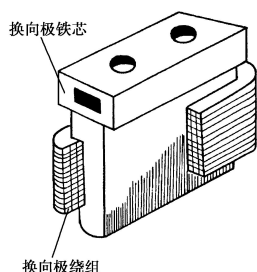


图 4.9 换向极的结构

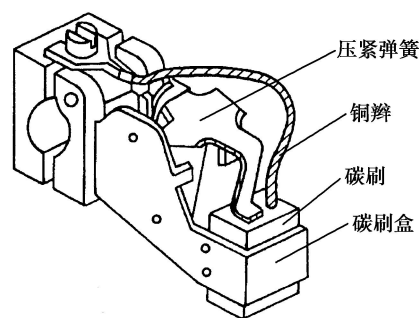


图 4.10 电刷的结构

电动机的端盖主要起支撑作用。端盖固定于机座上，其上放置轴承支撑直流电动机的转轴，使直流电动机能够旋转。

## 2. 转子部分

直流电动机的转子是电动机的转动部分，由电枢铁芯、电枢绕组、换向器、电动机转轴和轴承等部分组成。

电枢铁芯是主磁路的一部分，同时对放置在其上的电枢绕组起支撑作用。为减少电动机旋转时铁芯中的磁通方向发生变化引起磁滞损耗和涡流损耗，电枢铁芯通常用 0.5mm 厚的低硅钢片或冷轧硅钢片冲压成型，为减小损耗，在硅钢片的两侧涂绝缘漆，为放置绕组，在硅钢片上冲出转子槽。冲制好的硅钢片叠装成电枢铁芯。如图 4.11 所示为小型直流电动机的电枢冲片形状和电枢铁芯装配图。

电枢绕组是直流电动机的重要组成部分。绕组由带绝缘的导体绕制而成，对于小型电动机常采用铜导线绕制，对于大中型电动机常采用成型线圈。在电动机中每一个线圈称为一个元件，多个元件有规律地连接起来形成电枢绕组。绕制好的绕组或成型绕组放置在电枢铁芯上的槽内，放置在铁芯槽内的导线部分在电动机运转时将产生感应电动势，称为元件的有效部分；在电枢槽内两端把有效部分连接起来的部分称为端接部分，端接部分仅起连接作用，在电动机运行过程中不产生感应电动势。

换向器又称整流子，对于发电机，换向器的作用是把电枢绕组中的交变电动势转变为直流电动势向外部输出直流电压；对于电动机，它是把外界供给的直流电流转变为绕组中的交变电流以使电动机旋转。换向器的结构如图 4.12 所示。



换向器是由换向片组合而成的，是直流电动机的关键部件。

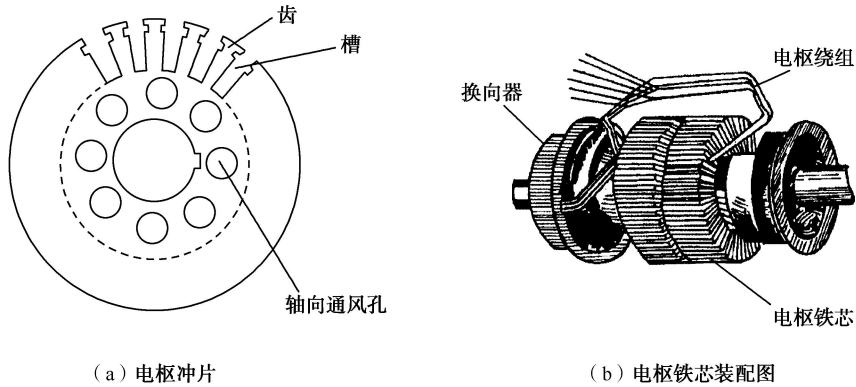


图 4.11 电枢冲片形状和电枢铁芯装配图

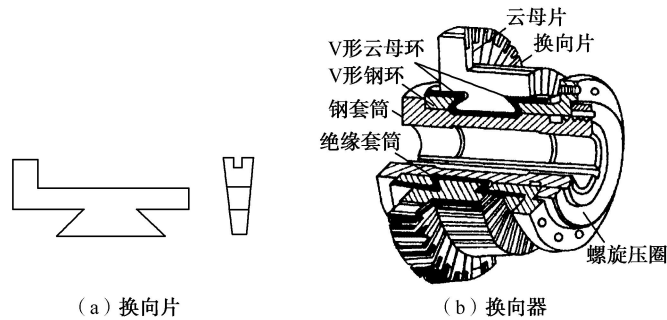


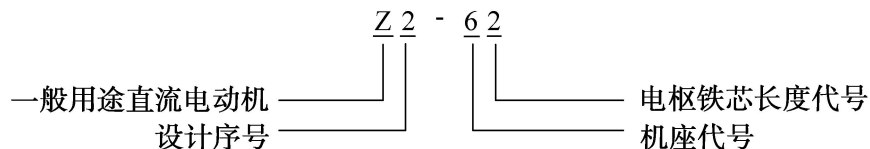
图 4.12 换向器的结构

换向片采用导电性能好、硬度大、耐磨性能好的紫铜或铜合金制成。换向片的底部制成燕尾形状，各换向片拼成圆筒形套筒上，相邻换向片间以 0.6~1.2mm 厚的云母片作为绝缘，换向片下部的燕尾嵌在两端的 V 形钢环内，换向片与 V 形云母片绝缘，最后用螺旋压圈压紧。换向器固定在转轴的一端。

### 3. 铭牌数据及主要系列

铭牌镶在电动机机座的外表面上，上面标明电动机主要额定数据及电动机产品数据，供使用时参考。铭牌数据主要包括电动机型号、电动机额定功率、额定电压、额定电流、额定转速和励磁电流及励磁方式等，此外还有电动机的出厂数据、出厂编号、出厂日期等。

电动机的产品型号表示电动机的结构和使用特点，国产电动机的型号一般采用大写的汉语拼音字母和阿拉伯数字表示，其格式为：第一部分字符用大写的汉语拼音表示产品代号，第二部分字符用阿拉伯数字表示设计序号，第三部分字符是机座代号，用阿拉伯数字表示，第四部分字符表示电枢铁芯长度代号，用阿拉伯数字表示。以 Z2-62 为例说明如下。



第一部分字符含义如下：

- Z 系列：一般用于直流电动机。
- ZJ 系列：精密机床用直流电动机。
- ZT 系列：广调速直流电动机。
- ZQ 系列：直流牵引电动机。

ZH 系列：船用直流电动机。

ZA 系列：防爆安全型直流电动机。

ZKJ 系列：挖掘机用直流电动机。

ZZJ 系列：冶金起重直流电动机。

关于其他系列直流电动机的型号及具体参数可查阅电动机手册。

额定功率  $P_N$ ：是指额定条件下电动机所能供给的功率。额定功率对于电动机和发电机是不同的。对于电动机额定功率是指电动机轴上输出的额定机械功率；对于发电机是指电刷间输出的额定电功率。额定功率的单位为 kW。

额定电压  $U_N$ ：是指在额定工况条件下，电动机出线端的平均电压。对于电动机是指输入额定电压；对于发电机是指输出额定电压。电压的单位为 V。

额定电流  $I_N$ ：是指电动机在额定电压情况下，运行于额定功率，此时的电流值为电动机的额定电流，其单位为 A。

额定转速  $n_N$ ：是指对应于额定电压、额定电流，电动机运行于额定功率时所对应的转速，转速的单位为 r/min。

额定励磁电流  $I_{fN}$ ：是指对应于额定电压、额定电流、额定转速及额定功率时的励磁电流，单位为 A。

励磁方式：是指直流电动机的励磁线圈与其电枢线圈的连接方式。根据电枢线圈与励磁线圈的连接方式不同，直流电动机励磁有他励、并励、串励和复励等方式，如图 4.13 所示。

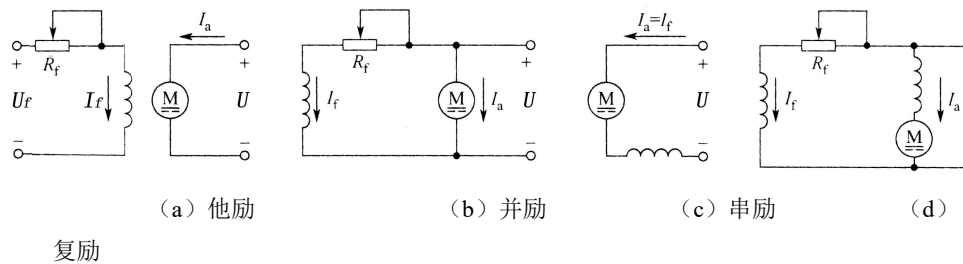


图 4.13 直流电动机的分类接线图

此外电动机的铭牌上还标有其他数据，如励磁电压、出厂日期、出厂编号等。

### 三、直流电动机的电枢电动势与电磁转矩

直流电动机的电枢，就是指电刷间的电动势，可用下式表示：

$$E = C_e \Phi n \quad (4-3)$$

式中， $E$ ——电枢电动势 V；

$C_e$ ——电动势常数，取决于电动机结构；

$\Phi$ ——每个磁极的磁通 Wb；

$n$ ——电枢转速 r/min。

不论电动机作为发电机或作为电动机运行，电枢电动势都是存在的，不过发电机的电枢电动势是电源电动势，在电动势的作用下产生电流，电动势与电流的方向一致，如图 4.14 (a) 所示，此时发电机输出电功率；而电动机的电枢电动

势是反电动势，它与外加电压（电流）的方向相反，如图 4.14 (b) 所示，此时电动机消耗电功率。

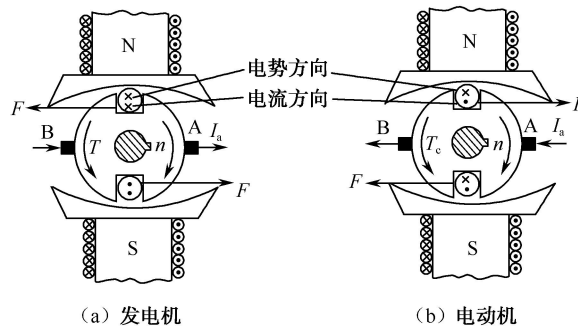


图 4.14 直流电动机中电枢电动势、电流、转速、转矩的方向

在直流电动机中当电枢绕组内有电流通过时，此电流将与磁场相互作用，使电枢上每根导体受到电磁力  $F$  的作用，此电磁力  $F$  在电动机转轴上产生电磁转矩。直流电动机的电磁转矩可用下式表示：

$$T = C_T \Phi I_a \quad (4-4)$$

显然，直流电动机不论作为发电机运行或是作为电动机运行，电磁转矩都是存在的，只是在发电机中，电磁转矩的方向与电枢旋转方向相反，如图 4.14 (a) 所示，它起着阻止电枢旋转的作用，是阻转矩；而在电动机中，电磁转矩是推动电枢旋转的驱动转矩，所以它的方向与电枢旋转方向相同，如图 4.14 (b) 所示。

#### 四、串励直流电动机的运行

串励直流电动机的接线图如图 4.15 所示，其特点是励磁绕组与电枢绕组串联，励磁电流  $I_f$  等于电枢电流  $I_a$ ，主磁通  $\Phi$  是电枢电流  $I_a$  的函数。则有

$$I_f = I_a \quad (4-5)$$

$$U = E + I_a R \quad (4-6)$$

$$R = R_a + R_f + R_{st} \quad (4-7)$$

当  $I_a$  较小时，磁路未饱和时， $\Phi$  与  $I_a$  成正比，即

$$\Phi = k I_a \quad (4-8)$$

式中， $k$  为比例常数。此时，电磁转矩  $T$  与  $I_a$  的平方成正比，即

$$T = C_T \Phi I_a = C_T k I_a^2 \quad (4-9)$$

$$I_a = \sqrt{\frac{T}{C_T k}} \quad (4-10)$$

下面来分析串励直流电动机的机械特性、起动、反转、调速和制动。

##### 1. 串励直流电动机的机械特性

直流电动机机械特性一般表达式为

$$n = \frac{U}{C_e \Phi} - \frac{R}{C_e C_T \Phi^2} T \quad (4-11)$$

将式(4-9)和式(4-10)代入式(4-11)中, 不难得出在磁路不饱和时串励电动机的机械特性为

$$n = \frac{\sqrt{C_T k}}{C_e k} \frac{U}{\sqrt{T}} - \frac{R}{C_e K} \quad (4-12)$$

式(4-12)表明, 当磁路不饱和时, 串励电动机的转速  $n$  与  $\sqrt{T}$  成反比, 其机械特性为非线性软特性, 如图 4.16 中曲线  $AB$  段所示。

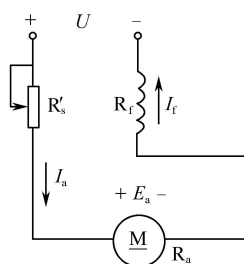


图 4.15 串励电动机的接线图

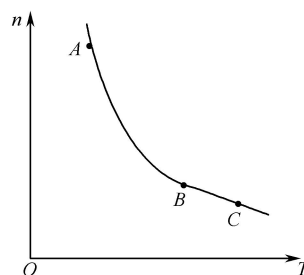


图 4.16 串励电动机的固有特性

当  $I_a$  较大, 磁路饱和时,  $\Phi$  基本保持不变, 这时串励电动机的机械特性与他励电动机的机械特性相似, 变为较硬的直线特性, 如图 4.16 中曲线  $BC$  段所示。

串励电动机的固有特性是在  $U = U_N$ ,  $R'_a = 0$  时的特性 (如图 4.16 所示), 具有以下特点:

- ① 它是一条非线性的软特性, 负载时的转速降落很大。
- ② 空载时,  $T = 0$ ,  $I_a = 0$ ,  $\Phi = 0$ ,  $n_0 = \frac{U}{C_e \Phi} = \infty$ , 即理想空载转速为无穷大。

但实际上, 即使  $I_a = 0$ , 由于存在剩磁通  $\Phi_0$ , 故空载转速  $n_0 = \frac{U}{C_e \Phi_0}$  为一有限值,

但其值很高, 一般可达  $(5 \sim 6) n_N$ , 这就是所谓的“飞车”现象, 因此, 串励电动机是不允许空载或轻载运行的。

- ③ 由于  $T$  正比于  $I_a$  的平方, 起动和过载时  $I_a$  较大, 故串励电动机的起动转矩大, 过载能力强。

串励电动机同样可以采用电枢串电阻、改变电压和改变磁通的方法来获得各种人为特性。

(1) 电枢串电阻时的人为特性

由式(4-11)或式(4-12)可见, 串入电阻后, 转速降增大, 所以电枢串电阻的人为特性位于固有特性的下方, 且特性变得更软, 如图 4.17 所示。从电路上分析, 在  $T (I_a)$  相同时, 串入电阻后, 电阻压降增大, 因为电源电压不变, 所以电枢反电动势减小, 转速必然减小。

(2) 降低电压时的人为特性

由式(4-11)可知, 降低电压时, 理想空载转速降低, 其人为特性向下平移。从电路上分析, 电压下降后, 电枢反电动势随之减小, 转速也必然减小, 所以降

压的人为特性于固有特性的下方，如图 4.18 所示。

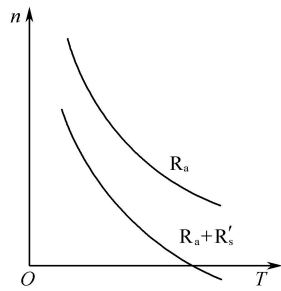


图 4.17 串电阻时的人为特性

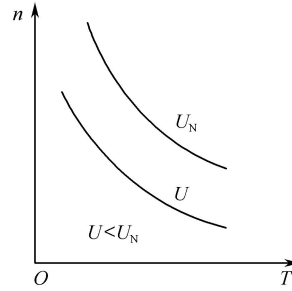
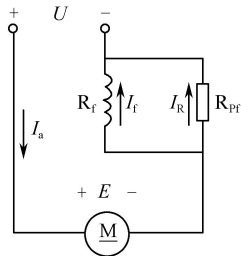


图 4.18 降低电压时的人为特性

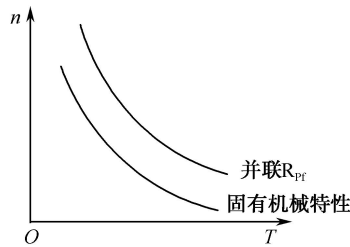
性

### (3) 改变磁通时的人为特性

串励电动机改变磁通的方法之一是在励磁绕组上并联一个分流电阻  $R_{pf}$ ，如图 4.19 (a) 所示。与固有特性相比，在  $I_a$  相同的情况下，此时，因  $I_f < I_a$ ，故  $\Phi$  减小，因此人为特性位于固有特性的上方，如图 4.19 (b) 所示。



(a) 接线图



(b) 人为机械特性

图 4.19 减弱磁通时的人为特性

## 2. 串励电动机的起动、反转与调速

### (1) 起动与反转

为了限制起动电流，串励电动机的起动方法与并励电动机一样，也是采用电枢串电阻起动和降低电源电压起动。但由于  $T$  与  $I_a^2$  成正比，所以串励电动机的起动转矩较大，适用于重载起动的生产机械上，例如起重、运输设备等。

串励电动机也可反向运转，但不能用改变电源极性的方法，因这时电枢电流与磁通同时反向，使电磁转矩依然保持原来方向，则电动机不可能反转。改变电枢或励磁绕组的接线极性可使其反转，反转时机械特性与正转时相同，但位于第三象限。

### (2) 调速

串励电动机的调速也是采用电枢电阻、降压和弱磁三种调速方法。其中电枢串电阻调速比较常用，弱磁调速用得较少。

### 3. 串励电动机的制动

对于串励电动机，若不考虑剩磁，只有  $n$  趋于无穷大时，才能出现  $E=U$ ，要使  $E>U$ ，显然无法实现。虽然电机中存在少量的剩磁，但要使  $E>U$ ，转速将高达不能允许的数值，故串励电动机不存在回馈制动状态。

串励电动机只有能耗制动和反接制动两种制动方法，下面分别进行分析。

#### (1) 能耗制动

串励电动机的能耗制动分为他励式和自励式两种。

他励式能耗制动时，是把励磁绕组由串励形式改接成他励形式，即把励磁绕组单独接到电源上，电枢绕组外接制动电阻  $R_B$  后形成闭路，如图 4.20 (a) 所示。由于串励电动机的励磁绕组电阻  $R_f$  很小，如果采用原来的电源，因电压较高，则必须在励磁回路中串入一个较大的限流电阻  $R_{sf}$ 。此外还必须保持励磁电流  $I_f$  的方向与电动状态时相同，否则不能产生制动转矩（因  $I_a$  已反向）。他励式能耗制动时的机械特性为一直线，如图 4.20 (b) 中直线  $BC$  所示，其制动过程与他励电动机的能耗制动完全相同。他励式能耗制动的效果好，应用较广泛。

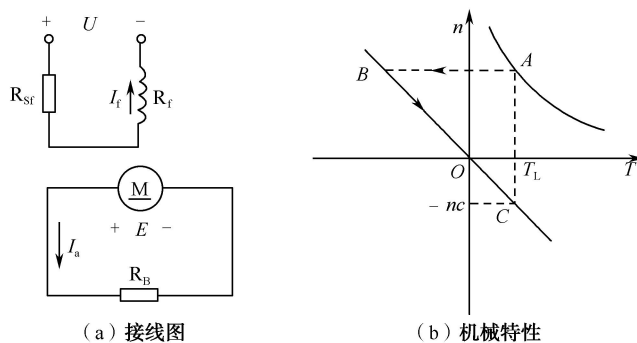


图 4.20 串励电动机的他励式能耗制动

自励式能耗制动时，电枢回路脱离电源后，通过制动电阻形成闭路，但为了实现制动，必须同时改接串励绕组，以保证励磁电流的方向不变，如图 4.21 (a) 所示。自励式能耗制动时的机械特性如图 4.21 (b) 中曲线  $BO$  所示。由图可见，自励式能耗制动开始时制动转矩较大，随着转速下降，电枢电动势和电流也下降，同时磁通也减小，从公式  $T = C_T \Phi I_a$  可见，制动转矩下降很快，制动效果变弱，所以制动时间较长且制动不平稳。由于这种制动方式不需要电源，因此主要用于事故停车。

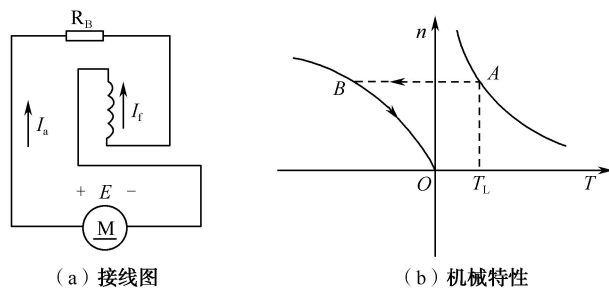


图 4.21 串励电动机的自励式能耗制动

## (2) 反接制动

串励电动机的反接制动也有电压反接制动和倒拉反接制动两种。串励电动机进行电压反接制动时，并不是将电源反接，因为这样将会造成  $I_a$  和  $I_f$  同时改变方向，电磁转矩方向不变，起不到制动作用。因此，只能将电枢两端反接，而励磁绕组的接法不变，如图 4.22 (a) 所示。为了限制过大的制动电流，还应串入制动电阻  $R_B$ 。其机械特性如图 4.22 (b) 中曲线  $BC$  所示。图中  $A$  点是正向电动工作点， $B$  点是制动起始点，减速时，工作点由  $B$  点沿特性曲线向  $C$  点移动，到达  $C$  点时，转速为零，若要停车，应断开电源，否则电动机将反向起动并加速到  $D$  点，在  $D$  点处于反向电动运行。

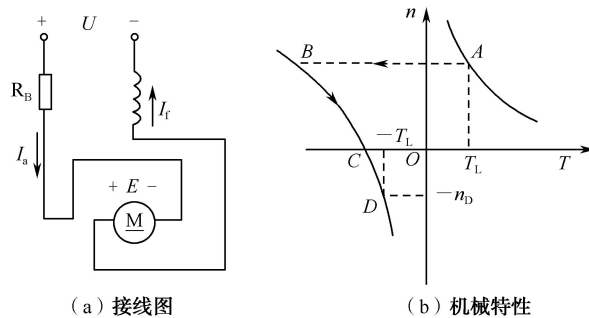


图 4.22 串励电动机的电压反接制动

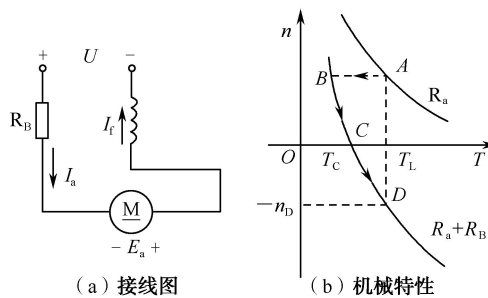


图 4.23 串励电动机倒拉反接制动

串励电动机倒拉反转反接制动只适用于位能性负载。方法是保持电压极性不变，电枢回路串入一个较大的电阻  $R_B$ ，使电动机倒拉反转，其接线图和机械特性如图 4.23 所示。在图 4.23 (b) 中， $A$  点是电动运行工作点，当电枢回路串入  $R_B$  后，工作点移至  $B$  点，并进入制动减慢运行，当工作点到达  $C$  点时，转速减至零，但由于电磁转矩小于负载转矩 ( $T_C < T_L$ )，于是在位能负载倒拉下，电动机反转并加速，直到  $D$  点进入反接制动状态稳定运行，匀速下放重物。

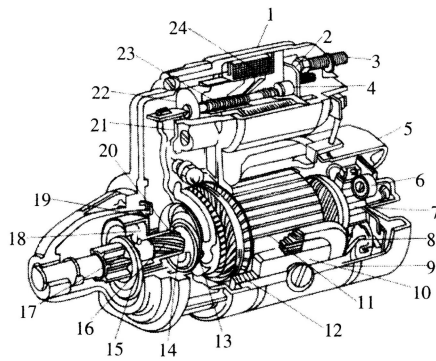
## 五、汽车用起动电动机

汽车发动机是靠外力起动的，需要通过外力带动发动机曲轴旋转以实现起动。发动机的起动方法很多，汽车常用的有电动机起动和手摇起动两种。电动机起动用电动机作为机械动力，当将电动机轴上的齿轮与发动机飞轮周缘的齿圈啮合时，动力就传到飞轮和曲轴，使之旋转。电动机本身又用蓄电池作为能源。目前绝大多数汽车发动机都采用电动机起动。

起动系统主要由蓄电池、点火开关、起动继电器、起动机等组成，其作用是利用起动机将蓄电池的电能转换为机械能，再通过传动机构将发动机拖转起动。

### 4. 基本结构

汽车用起动机一般由直流电动机、单向传动机构和电磁操纵机构三大部分组成。起动机的总成如图 4.24 所示。不同类型的汽车上使用的起动机尽管形式不同，但其直流电动机部分基本相似，主要的区别就在于传动机构和控制装置各有差异。



1—电磁开关；2—触点；3—蓄电池接线柱；4—动触点；5—前端盖；6—电刷弹簧；7—换向器；  
8—电刷；9—机壳；10—磁极；11—电枢；12—磁场绕组；13—导向环；14—止推环；  
15—单向离合器；16—电枢轴；17—驱动齿轮；18—传动机构；19—制动盘；20—啮合弹簧；  
21—拨叉；22—活动铁芯；23—复位弹簧；24—电磁开关

图 4.24 起动机的总成

### (1) 直流电动机

直流电动机的作用是将蓄电池输入的电能转换为机械能，产生电磁转矩。依据磁场绕组和电枢绕组连接方式的不同，起动用直流电动机可分为并励、串励、复励三种形式。

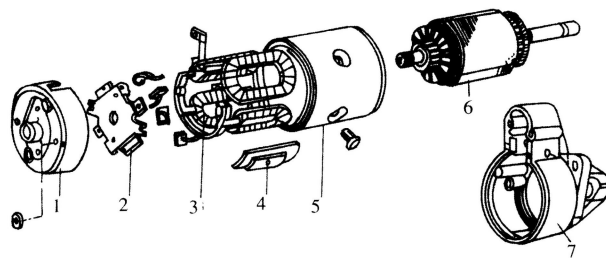
### (2) 单向传动机构

单向传动机构的作用是在发动机起动时，使起动机的驱动齿轮与飞轮齿圈啮合，将电动机的转矩传给发动机飞轮；在发动机起动后，使起动机与飞轮自动脱离。

### (3) 操纵机构

操纵机构的作用是接通或切断起动机与蓄电池之间的主电路。

汽车用起动机的直流电动机的结构如图 4.25 所示，主要由机壳、磁极、电枢、换向器和电刷组件等部件组成。



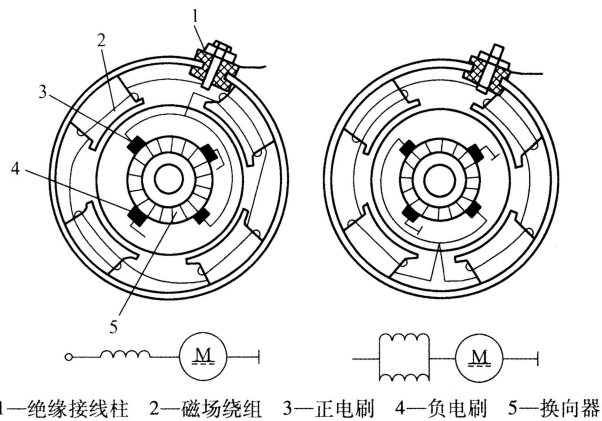
1—前端盖；2—电刷和电刷架；3—磁场绕组；4—磁极铁芯；5—机壳；6—电枢；7—后端盖

图 4.25 直流电动机的结构

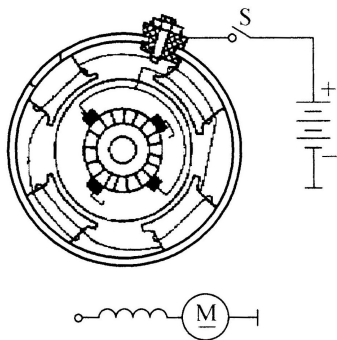
## 5. 励磁绕组连接

一般汽车用起动机的电动机有 4 个励磁绕组。励磁绕组有两种连接方式：一种是四个绕组与电枢绕组串联，另一种是两个绕组先串联后再并联复式接法，然后与电枢绕组串联。连接方式如图 4.26 所示。复式接法可以在绕组导体截面相同的情况下增大起动电流，从而提高起动转矩。励磁绕组一端接在外壳的绝缘接线柱上，另一端与两个非搭铁电刷相连，如图 4.27 所示。





1—绝缘接线柱 2—磁场绕组 3—正电刷 4—负电刷 5—换向器



(a) 四个绕组相互串联 (b) 两个绕组先串联后并联

图4.26 励磁绕组的接法

图4.27 外壳的绝缘接线柱

## 6. 起动机分类

在各种起动机三个组成部分中，电动机部分一般没有本质的差别，而控制方法和传动结构的啮入方式则有很大差异，因此起动机是按控制方法和传动机构的啮入方式的不同来分类的。

(1) 按控制方法的不同可分为机械控制式和电磁控制式。

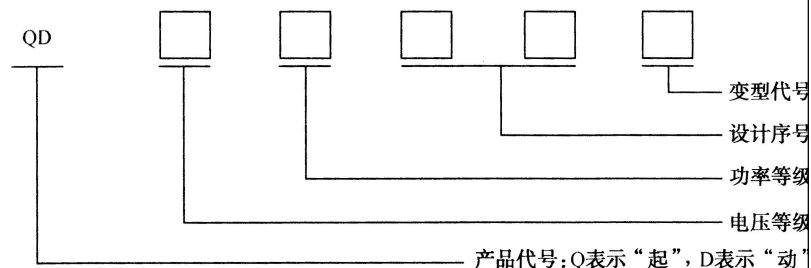
现代汽车大多采用电磁控制式这种方式，借按钮或钥匙控制电磁铁，再由电磁铁控制主电路开关，以接通或切断主电路。由于装有电磁铁，可进行远距离控制，操作省力。

(2) 按传动机构啮入方式的不同可分为惯性啮合式；强制啮合式；电枢移动式；齿轮移动式；同轴式起动机。

除上述以外，还有磁极为永久磁铁的永磁式起动机及内装减速齿轮的减速起动机等。

## 4. 起动机型号

根据 QC/T 73—93《汽车电气设备产品型号编制方法》的规定，起动机型号如下：



QDJ 表示减速起动机；QDY 表示永磁起动机（包括永磁减速起动机）；J、Y 分别表示“减”、“永”。

电压等级：1 代表 12V；2 代表 24V。

功率等级：含义见表 4.2。

表 4.2 起动机功率等级

功率等级代号		1	2	3	4	5	6	7	
功率 (kW)	起动机								
	减速起动机	~1	>1~2	>2~3	>3~4	>4~5	>5~6	>6~7	>7
	永磁起动机								

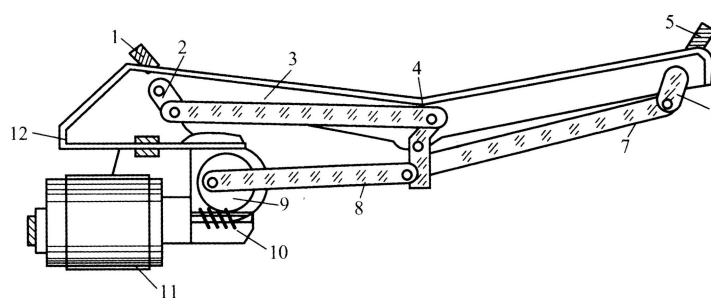
如 QD124，表示额定电压为 12V、功率为 1~2kW、第四次设计的起动机。

## 六、永磁电动机在汽车中的应用

汽车中除了使用串励电动机外，用永磁铁构成定子的永磁电动机也得到广泛地应用。永磁电动机的磁场恒定，机械特性与他励电动机类似，在电动刮水器、电动车窗等汽车部件中都有应用。

刮水器是专门用来清除汽车风窗玻璃上的雨水、雪或灰尘的部件。根据其驱动方式的不

分为电动式、真空式和气动式三种。目前使用最广泛的是电动刮水器。电动刮水器主要由直流电动机、减速机构、自动停位器、刮水器开关和联动机构及刮片组成，如图 4.28 所示。



1、5—刷架 2、4、6—摆杆 3、7、8—拉杆 9—蜗轮 10—蜗杆 11—电动机 12—底板

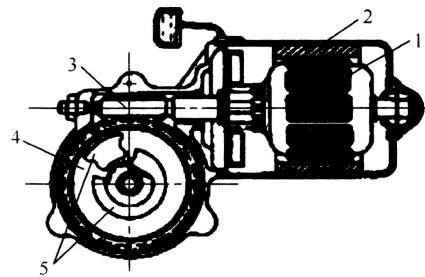
图 4.28 电动刮水器

刮水器电机按磁场结构不同可分为绕线式和永磁式两种，由于永磁式电机具有体积小、质量轻、结构简单等特点，故在轿车上得到了广泛的应用。永磁式电机如图 4.29 所示，它主要由一个永磁式直流电机、一个蜗轮、蜗杆减速器和一个自动停位器组成。

电动机主要由磁极、电枢、电刷等组成，其磁极由铁氧体永久磁铁构成，磁场的强弱不能改变。为了改变电动机转速，采用三刷电动机，利用三个电刷来改变正、负电刷之间串联的电枢线圈的个数，从而改变电动机的转速。

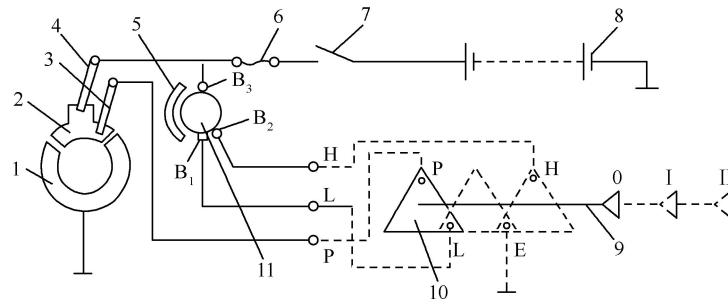
### 1. 永磁式电动刮水器电路

由于永磁电动机的磁极是铁氧体永久磁铁，其磁场强弱是不能改变的，为了得到两种转速，汽车上常采用三刷式（即三个电刷）电动机。永磁电动机双速刮水器工作原理如图 4.30 所示，图中  $B_3$  为高、低速公用电刷， $B_1$  为低速电刷， $B_2$  为高速电刷， $B_1$  与  $B_2$  相差  $60^\circ$ ，用以改变两电刷间的导体数。



1—电枢；2—永久磁铁磁极；  
3—蜗杆；4—蜗轮；5—自动停位滑片

图 4.29 永磁式电机



1、2—自动停位器滑片；3、4—自动停位器触片；5—永久磁铁；6—熔断丝；7—总开关；  
8—蓄电池；9—刮水器变速开关； $B_1$ 、 $B_2$ 、 $B_3$ —电刷；10—接触片；11—电枢

图 4.30 永磁电动机双速刮水器工作原理

接通电源开关 7，当把变速开关 9 拉到“ I ”挡时，电流从蓄电池的“+”极→总开关 7→熔断丝 6→高、低速共用电刷  $B_3$ →电枢 11→低速电刷  $B_1$ →接线柱 L→接触片 10（LE）→接线柱 E→搭铁→蓄电池“-”极，构成回路。电流通过电刷  $B_3$  和  $B_1$  之间的有效导体数较多，电动机转速较低，故刮水片以低速状态刮去挡风玻璃上的雨和雪。

当变速开关拉到“ II ”挡时，电流则从蓄电池的“+”极→总开关 7→熔断丝 6→高、低速共用电刷  $B_3$ →电枢 11→高速电刷  $B_2$ →接线柱 H→接触片 10（HE）→接线柱 E→搭铁→蓄电池“-”极，构成回路。此时电流通过  $B_3$  和  $B_2$  间的有效导体数减少，转速升高，从而使刮水片在快速摆动下扫除挡风玻璃上的雨或雪。当变速开关推到“ 0 ”挡时，若刮水片没有停在行程末端的下限位置而妨碍驾驶员视线，由于自动停位器触片 3 与自动停位器滑片 1 接触，电流继续流入电枢，其电路为：蓄电池“+”极→电源开关 7→熔断丝 6→电刷  $B_3$ →电枢 11→电刷  $B_1$ →接线柱 L→接触片 10（LP）→接线柱 p→自动停位器触片 3→自动停位器滑片 1→搭铁→蓄电池“-”极，构成回路，电动机以低速运转，直至蜗轮转至图 4.29 所示的位置，电路中断。但由于电枢的惯性，电动机不会立即停止转动，将以发电机的形式继续运转，利用发电制动，从而使刮水片停在规定的位置。发电制动短路电路为：电枢“+”极→电刷  $B_3$ →触片 4→滑片 2→触片 3→接线柱 P→接触片 10（PL）→接线柱 L→电刷  $B_1$ →电枢“-”极。

### 2. 电动座椅电路

电动座椅有两向、四向、六向移动等多种类型。两向座椅只能进行前后移动；

四向座椅除前后移动外还可以升降；六向座椅除前后移动外，还可使座椅的前部和后部分别升降。

电动座椅由双向电动机、传动装置和座椅调节器等组成。传动装置包括变速器、联轴装置和电磁阀等。座椅调节器的主要部件是螺旋千斤顶和齿轮传动机构。传动装置与座椅调节器之间用软轴联接。

当电路开关接通后，电动机和其电磁阀同时通电，电磁阀柱塞和爪形接头接合，电动机的动力即通过齿轮、驱动轴使软轴转动，再驱动座椅调节器运动。当调节器达到终点时，软轴停止转动。如此时电动机仍在转动，其动力即为装在电动机和变速器之间的橡胶联轴节所吸收，这样也可防止座椅万一卡住时电动机过载损坏。当开关断电后，复位弹簧能使电磁阀柱塞和爪形接头分离，回到原来位置。

大多数电动座椅使用永磁式电动机，通过开关控制电流流向，可使电动机按不同方向旋转，如图 4.31 所示。

另外，也有的电动座椅采用串励式电动机，用两个磁场线圈使电动机进行双向运动。这种电动机一般用继电器控制电流方向，因此当开关换向时可听到继电器吸合的“咔哒”声。

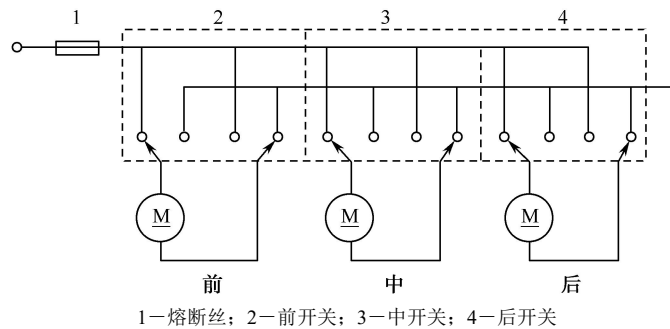


图 4.31 六向电动座椅电路

### 3. 电动天窗电路

电动天窗系统原理与电动车窗系统基本相同，利用开启和关闭两个继电器，改变电动机电流的方向，驱动电动机实现正/反转，使天窗实现不同状态下的工作。现以广州本田雅阁轿车为例介绍电动天窗的工作原理。

在没有打开任何车门的情况下，将点火开关从打开位置旋至关闭位置时，电动天窗仍能工作 10min，电动天窗电路如图 4.32 所示。电路原理如下：

① 电动天窗继电器电路。当打开点火开关时，电动车窗继电器电路接通，电路为蓄电池正极→多路控制装置（前乘客席侧）（点火开关断开定时器电路）→电动车窗继电器（前乘客席侧仪表板下熔断器/继电器盒）→G581 搭铁→蓄电池负极。

② 天窗开启电路。当电动天窗开关置于开启位置时，电路为蓄电池正极→（发动机盖下熔断器/继电器盒）No.41（100A）、No.51（40A）→电动车窗继电器触点→（前乘客席侧仪表板下熔断器/继电器盒）熔断器 No.7（20A）→天窗开启继电器线圈→天窗开关 6 端子→天窗开关 2 端子→G501 搭铁→蓄电池负极。天窗继电器接通，将触点吸到图 4.32 中左边位置。

此时，电路为蓄电池正极→（发动机盖下熔断器/继电器盒）No.41（100A）、No.51（40A）→（前乘客席侧仪表板下熔断器/继电器盒）熔断器 No.1（30A）→天窗开启继电器触点→天窗电动机 1 号端子→天窗电动机 2 号端子→天窗关闭继电器触点→G501 搭铁→蓄电池负极。天窗电动机开始工作，天窗开启。

③ 天窗关闭电路。当电动天窗开关打到关闭位置时，电路中的电流由蓄电池正极→（发动机盖下熔断器/继电器盒）No.41（100A）、No.51（40A）→电动车窗继电器触点→（前乘客席侧仪表板下熔断器/继电器盒）熔断器 No.7（20A）→天窗关闭继电器线圈→天窗倾斜开关关闭触点端子 1→天窗倾斜开关关闭触点端子 3→天窗开关 4 端子→天窗开关 2 号端子→G501 搭铁→蓄电池负极。天窗关闭继电器接通，将触点吸到图 4.32 右边位置。

此时，电路中的电流由蓄电池正极→发动机盖下熔断器/继电器盒 No.41（100A）、No.51（40A）→熔断器 No.1（30A）（前乘客席侧仪表板下熔断器/继电器盒）→天窗关闭继电器触点→天窗电动机 2 号端子→天窗电动机 1 号端子→天窗开启继电器触点→G501 搭铁→蓄电池负极。天窗电动机开始工作，天窗关闭。

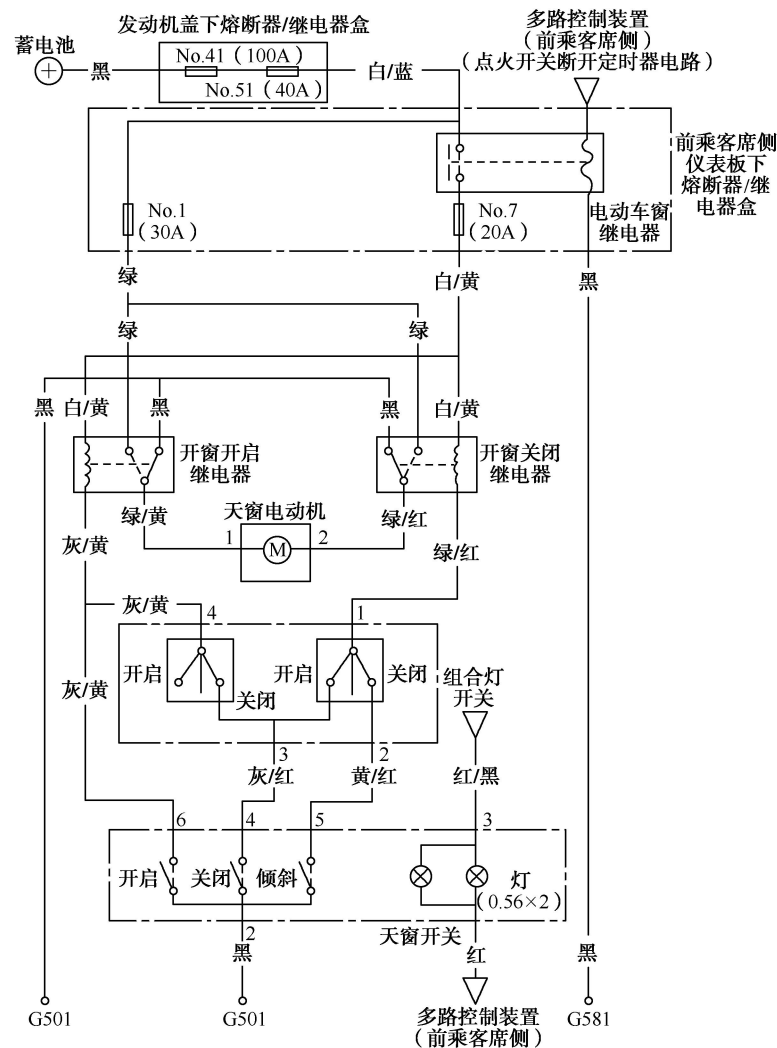


图 4.32 广州本田雅阁轿车电动天窗电路

#### 4. 电动门锁电动机

电动门锁是一个电气系统，具有锁门和开门功能，当钥匙开关转到锁止位置时，所有车门同时锁住，当钥匙开关转到开锁位置时，所有车门同时打开。因为一把钥匙可以控制全车的车门，因此也称为中央控制门锁系统。电动门锁系统的电动机一般采用双向永磁电动机，如图 4.33 所示，利用门锁开关控制电动机的电流方向，使其连接杆做推拉动作，控制车门的锁止或打开。以锁门控制电路为例，说明其工作过程。

图 4.34 所示为美国福特公司采用的门锁控制电路，由门锁开关、继电器和永磁电动机等组成。其中门锁开关是钥匙开关，是可以转动的，转动到不同位置，将使不同的触点闭合。门锁继电器由线圈、触点组成，触点的状态由线圈是否有电流决定，如锁止线圈通电时，触点 5 闭合、触点 6 断开，断电时，触点 5 断开、触点 6 闭合。各门锁电动机是并联在一起的，当通电时同时转动，断电时，同时停止，步调协调一致。

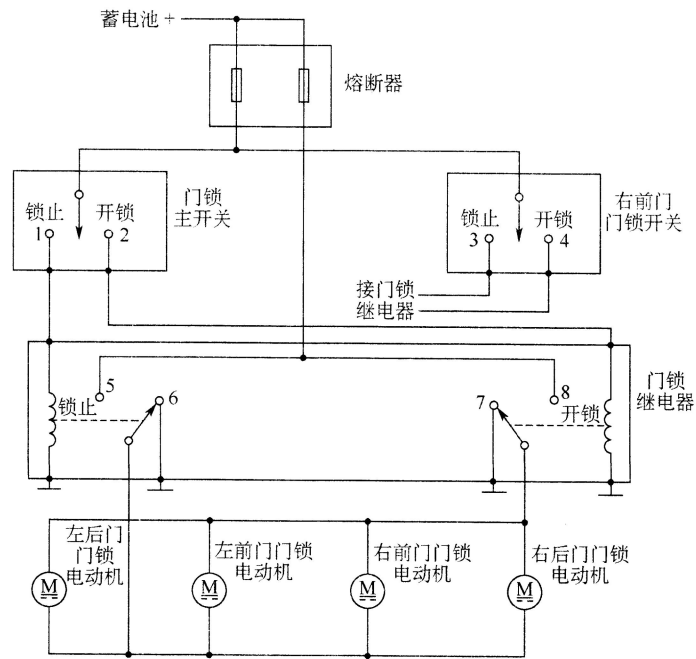
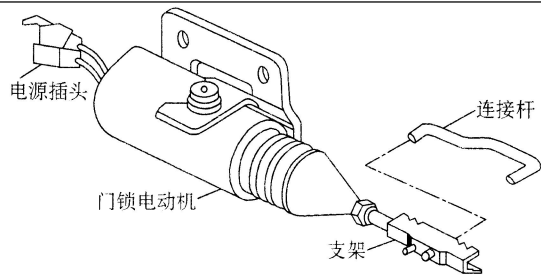





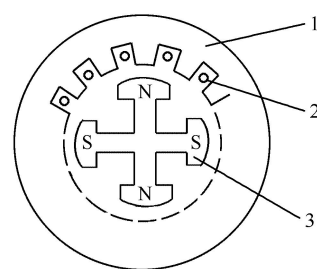
图 4.34 福特公司采用的电动门锁控制电路

锁门的控制过程如下：当门锁主开关转到锁止位置时，触点 1 闭合，门锁继电器的锁止线圈通电，触点 5 闭合。这时，各门锁电动机通电，其电流方向为蓄电池正极→门锁继电器触点 5→各门锁电动机→门锁继电器触点 7→搭铁，电动机旋转并拉动连接杆，将车门锁上。

<p><b>课堂总结</b> 10min</p>	<p>1. 直流电动机的结构、型号和铭牌； 2. 直流电动机的工作原理； 3. 串励直流电动机电动机的结构； 4. 串励直流电动机电动机的工作原理。</p>	<p>归纳总结本节课的知识点。</p>
<p> <b>布置作业</b></p>		
<p><b>教学反思</b></p>		

## ——《任务二 三相交流发电机》

 <b>课 题</b>	<h3>交流发电机</h3>	 <b>课型</b>	新课
<b>授课班级</b>		<b>授课时数</b>	4
<b>教学目标</b>	1. 了解三相交流发电机的结构、型号和铭牌。 2. 掌握三相交流发电机的工作原理。 3. 掌握三相交流发电机的结构和工作原理。		
<b>教学重点</b>	1. 三相交流发电机的工作原理。 2. 三相交流发电机的结构和工作原理。		
<b>教学难点</b>	1. 三相交流发电机的工作原理。 2. 串励直流电动机的结构和工作原理。		
<b>教学方法</b>	任务驱动法、分析法、演示法、练习法。		
<b>时间分配</b>	<b>教学内容</b>	<b>教学方法</b>	
<b>导入新课</b> 5min	三相交流同步发电机是怎么工作的？		通过让学生观察三相交流发电机引发其思考。
<b>讲授新课</b> 75min	<p><b>一、三相交流同步发电机的工作原理</b></p> <p>同步电机是相对于异步电机而言的，同步电机的特点是转子的转速 <math>n</math> 与频率 <math>f</math> 之间具有固定不变的关系，即 <math>n = \frac{60f}{p}</math>，或 <math>f = \frac{pn}{60}</math>，转速 <math>n</math> 称为同步转速。同步电机主要作为发电机，也可作为电动机或补偿机。</p> <p>图 4.53 可以用来说明同步发电机的工作原理：定子结构与一般异步电机相似，铁芯叠片开槽，并装上定子三相绕组。电机转子上装了磁极，每个磁极上均套上一个励磁线圈，并把它们按一定规律连接起来，称为励磁绕组。励磁绕组通入直流电，产生磁场，当原动机拖动电机转子旋转时，磁场与定子绕组有相对运动，会在定子绕组中感应出交流电势，即定子三相绕组会产生三相交流电势。定子绕组里交流电势的频率 <math>f</math> 决定于电机的极对数 <math>p</math> 和转子速度 <math>n</math>，即</p> $f = \frac{pn}{60}$ <p>式中，<math>n</math>——同步转速，单位为 r/min；<math>p</math>——磁极对数；<math>f</math>——交流电势的频率，单位为 Hz。</p> <p>我国规定，电力电网频率为 50Hz，则 <math>p=1</math>，<math>n=3000\text{r/min}</math>；<math>p=2</math>，<math>n=1500\text{r/min}</math>。例如，作为同步电机运行，则除了在转子上加直流励磁外，必须在定子三相绕</p>		运用演示法进行教学。



1—定子铁芯；2—定子绕组；3—磁极

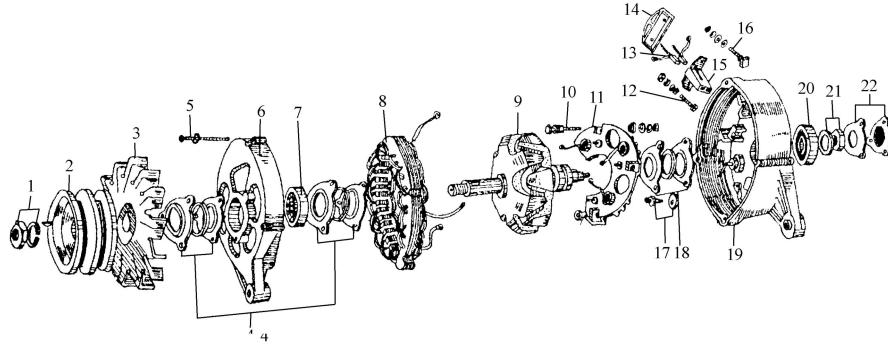
图 4.53 同步电机运行原理图

组加上三相交流电。此外，定子绕组产生旋转磁场，转子好似磁铁，显然，转子磁铁会按旋转磁场一样的速度旋转，即  $n = \frac{60f}{p}$ 。

可见，不论是发电机或电动机，结构一定（极对数一定）时，转速  $n$  与频率  $f$  间有严格的关系，我们称为同步关系。故称这类电机为同步电机。

## 二、三相交流同步发电机的结构

汽车用交流发电机是由一个三相同步交流发电机及硅二极管组成的整流器所组成，图 4.54 所示为国产 JF 型系列硅整流发电机的结构图。



1—紧固螺母及弹簧垫圈；2—传动带轮；3—风扇；4—前端轴承油封及护圈；5—组装螺栓；6—前端盖；7—前轴承；8—定子；9—转子；10—“+”（电枢）接线柱；11—组件板；12—“-”（搭铁）接线柱；13—电刷及压簧；14—电刷盒外盖；15—电刷盒；16—“F”（磁场）接线柱；17—组件板固定螺栓；18—后端盖轴承油封及护圈；19—后端盖；20—后轴承；21—转轴固定螺母及弹簧垫圈；22—后轴承纸垫及护盖

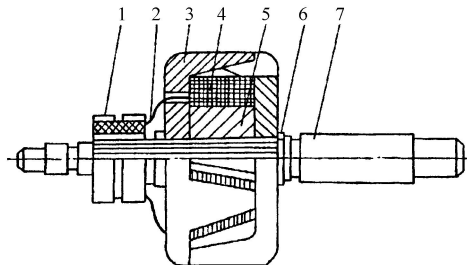
图 4.54 硅整流发电机结构图

### 1. 三相同步交流发电机

三相同步交流发电机由转子、定子、传动带轮、风扇、前后端盖及电刷等部件组成。

#### （1）转子

转子由转子轴、励磁绕组、两块爪形磁极、集电环等组成，如图 4.55 所示，由低碳钢制成的两块六爪磁极压装在转子轴上，其空腔内装有励磁绕组，励磁绕组的二根引出线分别焊在与轴绝缘的两个压装在轴上的集电环上。集电环与装在后端盖内的两个电刷相接触，两个电刷通过引线分别接在两个螺钉接线柱上，这两个接线柱即为发电机的“+”极（电枢）接线柱和“-”极（搭铁）接线柱。当这两个接线柱与直流电源相接时，便有电流流过励磁绕组，从而产生磁场。



1—集电环；2—引线；3—爪形磁极；4—励磁绕组；5—磁轭；6—定位圈；7—转子轴



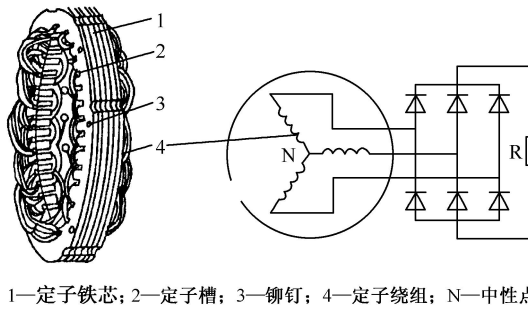


图 4.55 转子结构

图 4.56 定子结构与三相绕组的星形连接图

连接图

(2) 定子

定子由定子铁芯和定子绕组组成，定子铁芯由相互绝缘的内圆带嵌线槽的圆环状硅钢片叠成，嵌线槽内嵌入三相对称的定子绕组。绕组的接法有星形、三角形两种方式，一般采用星形连接，即每相绕组的首端分别与整流器的硅二极管相接，每相绕组的尾端接在一起，形成中性点（N），如图 4.56 所示为定子绕组结构和星形连接图。

(3) 前后端盖

前后端盖用非导磁性材料铝合金制成，漏磁少，并具有轻便、散热性好等优点。在后端盖内装有电刷架和电刷。汽车上使用的交流发电机的前后端盖上通常设有通风口。当传动带轮和风扇一起旋转时，使空气高速流经发电机内部进行冷却。有些工作环境恶劣的工程机械、农用拖拉机等为防止灰尘、泥水进入发电机内部，常采用外形尺寸较大的封闭交流发电机，以保证其散热的需要。

(4) 电刷与电刷架

两只电刷装在电刷架的方孔内，利用弹簧的压力使其与集电环保持良好的接触。电刷与电刷架的结构有外装式和内装式两种，其构造如图 4.57 所示。搭铁电刷的引出线用螺钉直接固定在后端盖上（标记“-”），此方式称为内搭铁；搭铁电刷的引出线与机壳绝缘接到后端盖外部的接线柱上（标记 F<sub>2</sub>），这种方式称为外搭铁。

(5) 风扇

一般用 1.6mm 厚的钢板冲制或用铝合金压铸而成，并用半圆键装在前端盖外侧的转轴上。

(6) 传动带轮

通常用铸铁或铝合金制成，分单槽和双槽两种，利用风扇的半圆键装在风扇外侧的转轴上，再用弹簧垫片和螺母紧固。

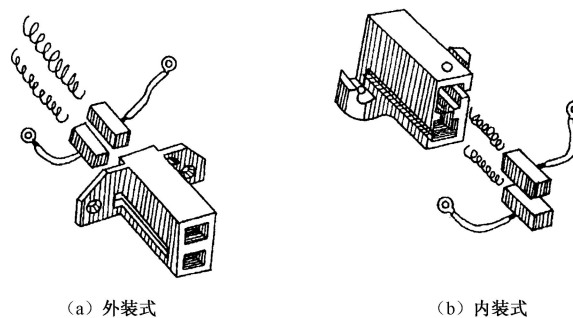


图 4.57 电刷及电刷架

可联系实际，举出适当例子。

## 2. 整流器

整流器的作用是把三相同步交流发电机产生的三相交流电变成直流电输出，它一般用 6 个硅二极管接成三相桥式全波整流电路。

### (1) 正极管

正极管的中心引线为二极管的正极，外壳为负极，在管壳底上一般标有红色标记。在负极搭铁的硅整流发电机中，3 个正二极管的外壳压装在组件板的 3 个座孔内，共同组成发电机的正极，由一个与后端盖绝缘的组件板固定螺栓通至机壳外，作为发电机的火线接线柱“B”（“+”，“A”或“电枢”接线柱）。

### (2) 负极管

负极管的中心引线为二极管的负极，外壳为正极，管壳底部一般有黑色标记。3 个负极管的外壳压装在后端盖的 3 个孔内，和发电机外壳一起成为发电机的负极，图 4.58 为硅二极管的安装示意图。

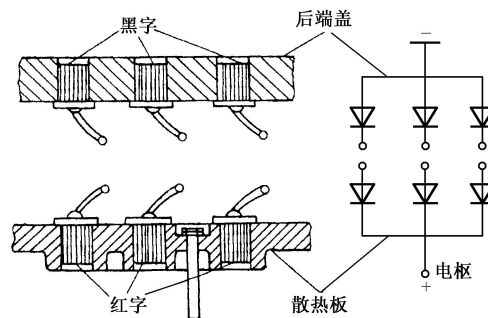


图 4.58 硅二极管安装示意图

CA1091 型汽车用的外搭铁硅整流发电机，把整流器单独装在后端盖外。上海桑塔纳轿车用 JFZ1813Z 型硅整流发电机整流器也安装在后端盖外侧，只要打开塑料防尘罩即可取出，不需将硅整流发电机解体，维修方便。

有些硅整流发电机的整流器采用 9 只二极管，增加的是 3 只小功率磁场二极管，专门用来供给励磁电流，这样可以提高发电机的电压调节精度。采用磁场二极管后，仅用简单的充电指示灯即可指示发电机发电情况，省装了一只充电指示灯继电器。

还有些发电机为了提高中性点电压，提高发电机输出功率，增加了 2 只二极管对中性点电压进行整流，并汇入发电机的输出端。同时具备上述两种功能的发电机整流器共有 11 只硅二极管，图 4.59 为几种不同发电机的整流器。

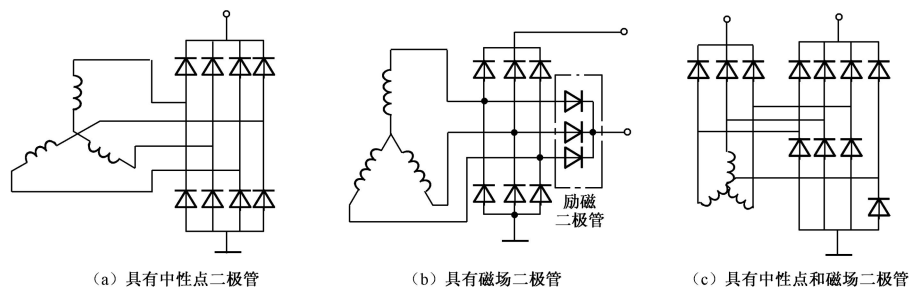


图 4.59 具有中性点和磁场二极管的整流器

## 三、交流发电机的工作原理及特性

### 1. 交流发电机的工作原理

#### (1) 三相交流电动势的产生

当外加直流电压作用在励磁绕组两端点的接线柱之间时，励磁绕组中便有电流

可联系实际，举出适当例子。

可联系实际，举出适当的例子。

通过，产生轴向磁场，两块爪形磁极被磁化，形成了6对相间排列的磁极。磁极的磁力线经过转子与定子之间的气隙、定子铁芯形成闭合磁路。转子旋转时，励磁绕组所产生的磁场也随之转动，形成旋转磁场。固定不动的三相定子绕组在旋转磁场的作用下，产生三个频率相同、幅值相等、相位互差 $120^\circ$ 电角度的正弦电动势 $e_A$ 、 $e_B$ 和 $e_C$ ，其瞬时值分别为

$$e_A = \sqrt{2}E_\Phi \sin \omega t \quad (4-13)$$

$$e_B = \sqrt{2}E_\Phi \sin (\omega t - 120^\circ) \quad (4-14)$$

$$e_C = \sqrt{2}E_\Phi \sin (\omega t - 240^\circ) \quad (4-15)$$

每相绕组电动势的有效值为

$$E_\Phi = 4.44KfN\Phi \quad (4-16)$$

对已知发电机，上式中的 $K$ 、 $N$ 都已确定，以电机常数 $C$ 代替。这样，上式也可以定成

$$E_\Phi = Cn\Phi \quad (4-17)$$

式中， $C$ ——电机常数， $C = 4.44KN \frac{P}{60}$ ；

$p$ ——磁极对数；

$n$ ——转子的转速 (r/min)。

式(4-17)表明，在与电机结构有关的常数不变的前提下，每相绕组的电动势有效值的大小和转子的转速及磁极的磁通成正比。

### (2) 整流原理和过程

在交流发电机中，整流器是利用硅二极管的单相导电性能进行整流的。在图4.60中所示的三相桥式全波整流电路中，3个正二极管的正极引出线分别同3相绕组的首端相连，在某一瞬间，只有与电位最高的一相绕组相连的正二极管导通。同样，3个负二极管的引出线也同三相绕组的首端相连，在同一瞬间，只有与电位最低的一相绕组相连的负二极管导通。这样反复循环，6只二极管轮流导通，在负载两端便得到一个较平稳的脉动的直流电压。

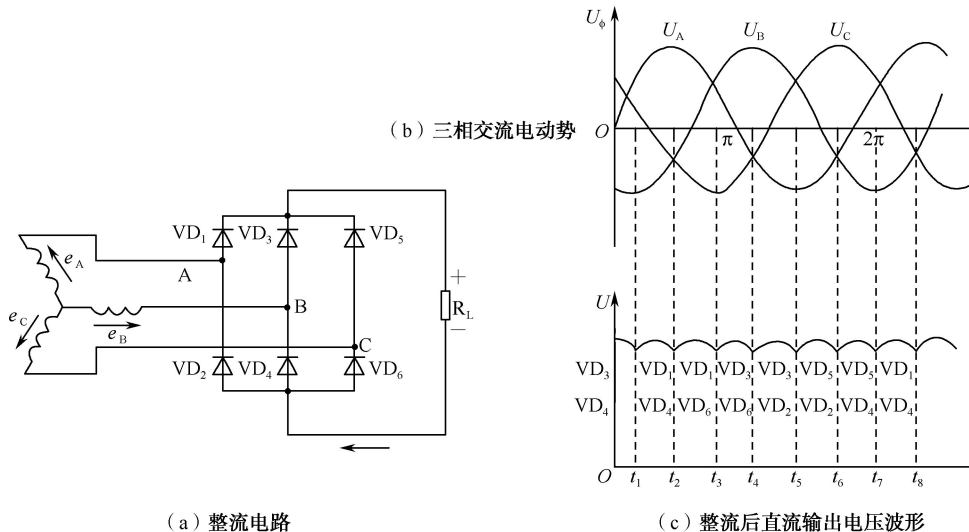


图 4.60 整流电路和电压波形图

在发电机空载运行时，如将三相绕组和二极管内阻的电压降忽略不计，发电机的直流电动势数值为三相交流电相电压的 1.35 倍，是三相交流电相电压的 2.34 倍。

每一只硅二极管在一个周期内只导通 1/3 的时间，流过每个管子的电流为负载电流的 1/3。

有些交流发电机将三相绕组中性点引出，标记为“N”接线柱，它和发电机外壳之间的电压称为中性点电压，它是通过 2 个中性点二极管整流后得到的直流电压，等于发电机直流输出电压的一半，即  $U_w = U / 2$ 。

### (3) 交流发电机的励磁方式

交流发电机发电时，需由蓄电池供给励磁电流，此时为他励。当发电机电压达到蓄电池电压时，即由发电机自己供给励磁电流，也就是由他励转变为自励。

由于交流发电机转子的爪极剩磁较弱，所以发电机在低速运转时，加在硅二极管上的正向电阻较大，较弱的剩磁产生的很小的电动势很难克服二极管的正向电阻，致使发电机正向电压不能迅速建立起来，这样，发电机低速充电的要求就不能满足。

## 2. 交流发电机的工作特性

交流发电机的工作特性是指发电机经整流后输出的直流电压、电流和转速之间的关系，包括输出特性、空载特性和外特性。其中输出特性最为重要。

汽车发动机的转速从怠速到最高转速的变化范围很大，由它带动旋转的发电机转速也相应较大范围内变化，研究发电机的特性，应以转速为基准来分析各有关参数之间的关系。

### (1) 输出特性

交流发电机的输出特性又称负载特性或输出电流特性，是指发电机输出电压一定时（对于 12V 电系，规定为 14V；对于 24V 电系，规定为 28V），发电机的输出电流与转速之间的关系，即输出电压  $U$  为常数时的  $I-n$  曲线。

如图 4.61 所示的试验电路可用来测得交流发电机的输出特性。

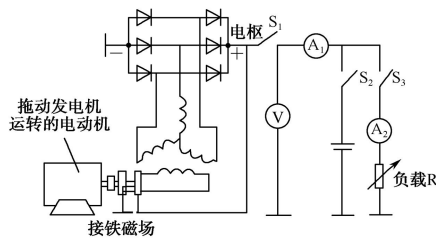


图 4.61 交流发电机试验接线图

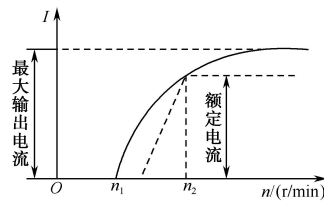


图 4.62 交流发电机的输出特性

交流发电机输出特性曲线  $I = f(n)$  表明：

① 当发电机转速很低时，发电机端电压低于额定电压，发电机不能向外供电。

② 转速超过  $n_1$  时，发电机的输出电流  $I$  随着转速的升高，随着电阻  $R$  的减小而升高。转速等于  $n_2$  时，发电机输出额定功率。额定功率为额定电压与额定电流之积。因此， $n_2$  又称为满载转速。

空载转速和满载转速是交流发电机的主要性能指标，在产品说明书中均有规定。在使用中，应定期检测这两个数据，看是否符合规定值。依此可判断发电机是否处于良好的工作状态。

③ 发电机转速达到一定值时，其输出电流不再随转速的升高而升高，也不再随负载电阻的减小而升高，这时的电流值称为发电机的最大输出电流或限流值。

(2) 交流发电机自动限制电流的机理

① 定子绕组具有一定阻抗  $Z$ ，对通过绕组的电流起阻碍作用。阻抗  $Z$  是由绕组的电阻  $R$  和感抗  $X_L$  组成的：

$$Z = \sqrt{R^2 + X_L^2} \quad (4-18)$$

② 定子电流增加时，电枢反应也增强，感应电动势也会下降。

(3) 空载特性

发电机空载时，发电机端电压与转速的关系称为空载特性。

(4) 外特性

转速一定时，发电机端电压与输出电流的关系称为外特性

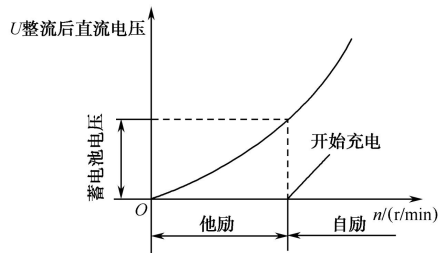


图 4.63 空载特性

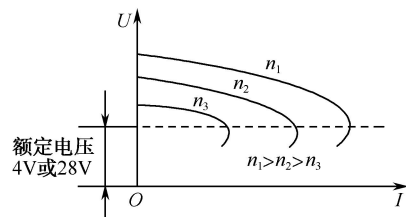


图 4.64 外特性

#### 四、交流发电机的型号

根据我国汽车行业推荐标准 QC/T 73—1993 《汽车电气设备产品型号编制方法》的规定，汽车交流发电机的型号由五部分组成：

- ① ② ③ ④ ⑤


(1) 产品代号。由字母表示，有 JF、JFZ、JFB、JEW 4 种，分别表示普通交流发电机、整体式交流发电机、带泵交流发电机和无刷交流发电机。

(2) 电压等级代号。用一位阿拉伯数字表示，1—12V、2—24V、6—6V。

(3) 电流等级代号。用一位阿拉伯数字表示，各代号表示的电流等级见表 4.3。



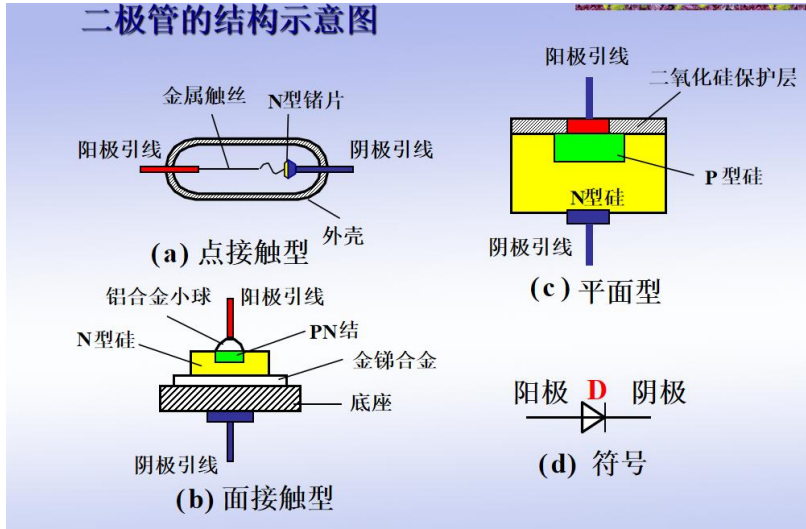
(4) 设计序号。用 1~2 位阿拉伯数字表示产品的顺序。

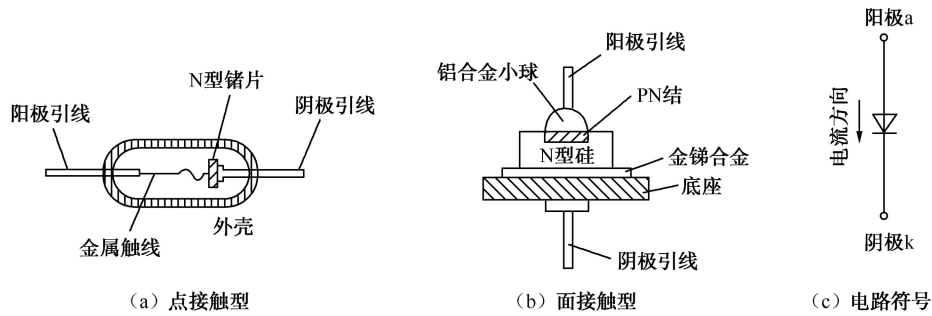
(5) 变型代号。用字母表示，交流发电机是以调整臂位置作为变形代号，从驱动端看，Y——右边、Z——左边，无字母则表示在中间位置。

<p>课堂总结 10min</p>	<p>1. 交流发电机的结构、型号和铭牌； 2. 交流发电机的工作原理。</p>	<p>归纳总结本节课的知识点。</p>
 <p>布置作业</p>		
<p>教学反思</p>		

# 《项目五 半导体元器件在汽车中的应用》单元教学设计

## ——《任务一 二极管应用电路》

 <b>课 题</b>	<b>二极管应用电路</b>	 <b>课型</b>	新课
<b>授课班级</b>		<b>授课时数</b>	2
<b>教学目标</b>	1.了解 PN 结的形成与特性； 2.了解二极管的结构及工作原理； 3.掌握二极管的特性曲线和主要参数；		
<b>教学重点</b>	1.半导体二极管的伏安特性及主要参数； 2.稳压二极管的伏安特性及主要参数；		
<b>教学难点</b>	1.PN 结的单向导电性。 2. 伏安特性，二极管电路计算。		
<b>教学方法</b>	任务驱动法、分析法、演示法、练习法。		
<b>时间分配</b>	<b>教学内容</b>	<b>教学方法</b>	
<b>导入新课</b> 5min		通过让学生观察常见的二极管引发其思考。	
<b>讲授新课</b> 75min	<b>一、二极管</b> 1. 二极管的结构、符号和分类 半导体二极管的种类很多，按材料来分，最常用的有硅管和锗管两种；按结构不同可分为点接触型和面接触型两类。 点接触型二极管的结构如图 5.1 (a) 所示，它是由一根细金属丝（如金镓合金）和一块半导体（如 N 型锗）的表面接触，然后通过很大的瞬时正向电流，使金属触丝与半导体在接触点处熔接在一起，根据杂质补偿原理，便形成了 PN 结。 面接触型（或面结型）二极管的 PN 结是用合金法（或扩散法）制成的。其结构如图 5.1 (b) 所示，这类二极管的结面积大，极间电容也大，允许通过的正向电流大，适用于低频大功率场合。如 2CP10 是面结型硅二极管，常用于整流。二极管的电路符号如图 5.1 (c) 所示，箭头表示二极管正向电流方向。		运用实验演示进行教学。



## 2. 二极管的伏安特性

流过二极管的电流  $I$  与其端电压  $U$  的关系称为二极管的伏安特性曲线。测量伏安特性曲线的实验电路如图 5.2 所示。

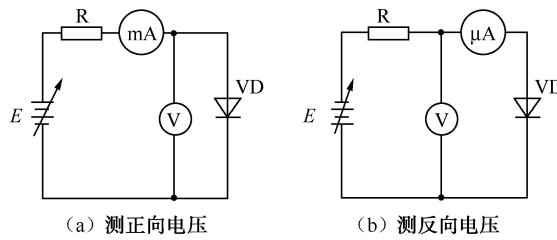


图 5.2 实验电路

各种不同型号二极管的伏安特性曲线大体相同。图 5.3 所示的是面接触型硅二极管 (2CP10) 的伏安特性曲线，图 5.4 所示的是点接触型锗二极管 (2AP10) 的伏安特性曲线。下面对二极管的特性加以说明。

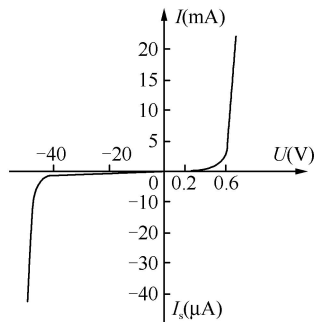


图 5.3 硅二极管 (2CP10) 的伏安特性曲线

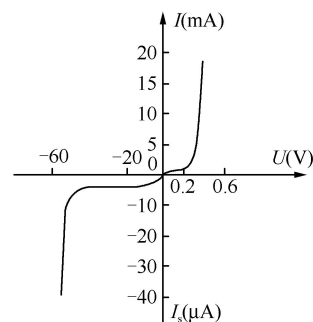


图 5.4 锗二极管 (2AP10) 的伏安特性曲线

## 3. 二极管开关特性

由于二极管具有单向导电性，所以在数字电路中经常把它当作开关使用。图 5.5 (a) 给出了二极管组成的开关电路图，图 (b) 为二极管导通状态下 ( $U > 0$  时) 的等效电路，图 (c) 为二极管在截止状态下 ( $U < 0$  时) 的等效电路，图中忽略了二极管的正向压降。

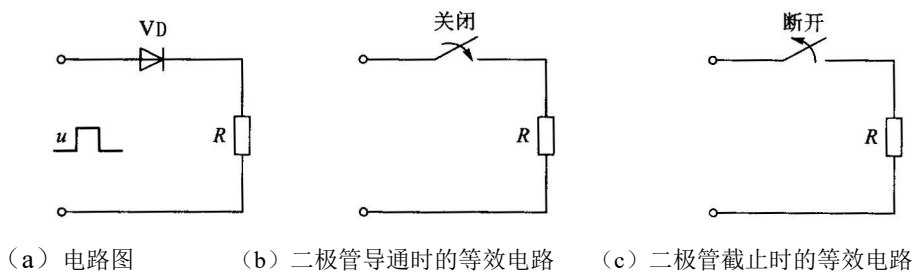


图 5.5 二极管组成的开关电路图及其等效电路

#### 4. 二极管的主要参数

(1) 最大整流电流  $I_{DM}$

$I_{DM}$  指二极管长期运行时允许通过的最大正向平均电流。

(2) 最高反向工作电压  $U_{RM}$

工作时加在二极管两端的反向电压不得超过此值，否则二极管可能会被击穿。

(3) 最大反向电流  $I_{RM}$

$I_{RM}$  指最高反向工作电压下流过二极管的反向电流。

(4) 最高工作频率  $f_M$

该值主要决定于 PN 结电容（二极管的电容效应）的大小。

#### 5. 二极管的类型和命名

二极管根据其外形、结构、材料、功率和用途可分成不同类型，不同类型的二极管都按国家标准来命名，它由四部分组成，其命名方法如表 5.1 所示。

表 5.1 二极管型号名称

第一部分 (数字)		第二部分 (汉语拼音字母)		第三部分 (汉语拼音字母)		第四部分 (数字)
电极数		材料和特性		二极管类型		同类二极管序号
序号	含义	符号	含义	符号	含义	
2	二极管	A	N 型锗	P	普通管	同类二极管某些性能参数有差别
		B	P 型锗	Z	整流管	
		C	N 型硅	K	开关管	
		D	P 型硅	W	稳压管	

#### 6. 特殊二极管

(1) 稳压二极管

稳压二极管就是通过对半导体内进行特殊的工艺处理制成的，它具有很陡峭的反向特性曲线。稳压管的反向击穿是可逆的，即当切断外加电压后，PN 结仍能恢复原状。

稳压二极管符号及其伏安特性曲线如图 5.6 所示。稳压二极管工作在反向击穿区，由图可见，特性曲线愈陡，稳压性能愈好。值得注意的是，稳压管的电流方向和普通二极管相反，因此正常工作时，稳压管阴极接高电位，阳极接低电位。稳压管的等效电路可以看成是一个串并联电路， $VD_z$  为稳压二极管，它决定稳压管的电流方向； $r_z$  表示稳压管等效动态电阻， $U_z$  为稳压值；并联二极管  $VD_1$  表示稳压管正向导通时和普通二极管一样。

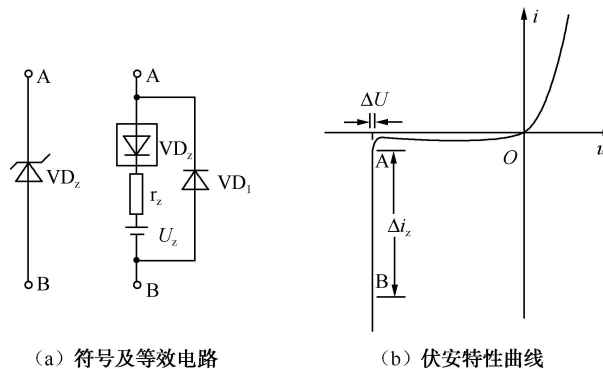


图 5.6 稳压二极管符号及其伏安特性曲线



## (2) 发光二极管

发光二极管是一种能将电能转换成光能的半导体器件，有时简称为 LED (Light-Emitting-Diode)。它是由磷砷化镓、镓铝砷或磷化镓等化合物材料制成的。其内部结构是一个 PN 结，具有单向导电性。当外加正向电压时，P 区的空穴扩散到 N 区，与 N 区的电子复合，N 区的电子扩散到 P 区，与 P 区的空穴复合。电子和空穴复合时会释放出能量，产生光子，因此二极管会发出一定颜色的光，颜色由材料的成分和杂质的种类决定。

## (3) 光电(敏)二极管

光电(敏)二极管是一种能将光能转换成电能的半导体器件。在 PN 结受到光线照射时，可以激发产生电子-空穴对，从而提高了少数载流子的浓度。当外加反向电压时，少数载流子增多，少数载流子漂移电流显著增大。

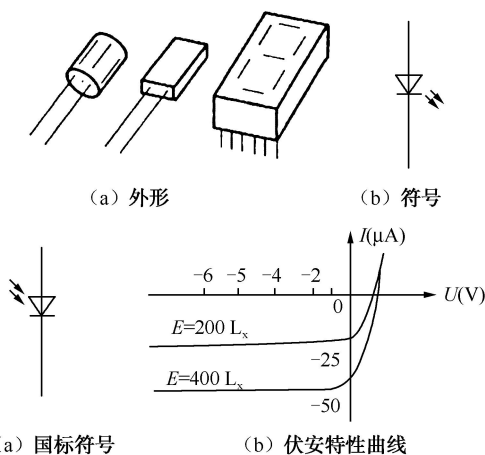


图 5.7 发光二极管外形及符号

图 5.8 光电二极管符号和伏安特性曲线

## 二、二极管整流电路

### 1. 单相半波整流电路

如图 5.9 所示为单相半波整流电路。为方便分析电路，可忽略整流二极管正向导通时的压降，对照图 5.9 电路可知：当  $u > 0$  时，二极管 VD 导通，负载电阻  $R_L$  上有电流  $i_o$  流过，负载两端的电压  $u_o = i_o R_L$ ；当  $u < 0$  时，二极管 VD 截止，负载电阻  $R_L$  上没有电流  $i_o$  流过，负载两端的电压  $u_o = 0$ 。设

$$u = \sqrt{2}U \sin \omega t \quad (5-1)$$

则电路中各电量的波形如图 5.10 所示。

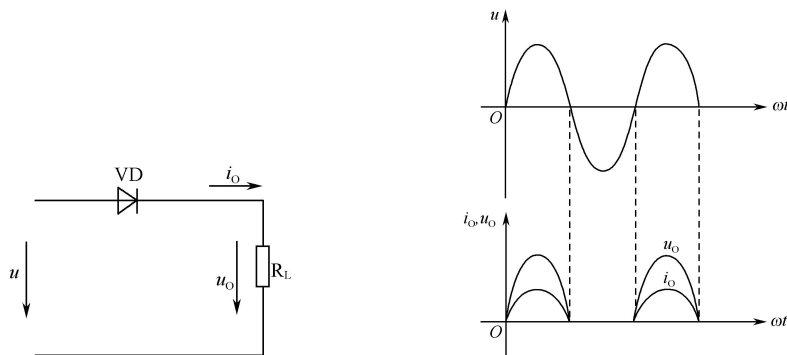


图 5.9 单相半波整流电路

图 5.10 单相半波整流电路各电量波形图

由图 5.10 所示波形可知，输出电压  $u_o$  的波形为正弦波形的一半。因此，输出电

压的平均值  $U_o$ 。通过下式求得：

$$U_o = \frac{1}{2\pi} \int_0^\pi \sqrt{2}U \sin \omega t d(\omega t) = \frac{\sqrt{2}}{\pi} U = 0.45U \quad (5-2)$$

流过负载电阻  $R_L$  上的平均电流  $I_o$  为

$$I_o = \frac{U_o}{R_L} = 0.45 \frac{U}{R_L} \quad (5-3)$$

## 2. 单相桥式整流电路

单相桥式整流电路如图 5.11 所示。所谓桥式整流就是将四个整流二极管连接成一个电桥对交流电进行整流。为方便分析电路，同样不考虑整流二极管正向导通时的压降，对照图 5.11 所示电路中各电量的参考方向可知：当  $u > 0$  时，二极管  $VD_1$  和  $VD_2$  处于正向偏置导通，而  $VD_3$  和  $VD_4$  处于反向偏置截止，此时，电路通过的电流  $i_o$  经由

$$A \rightarrow VD_1 \rightarrow R_L \rightarrow VD_2 \rightarrow B$$

当  $u < 0$  时，二极管  $VD_3$  和  $VD_4$  处于正向偏置导通，而  $VD_1$  和  $VD_2$  处于反向偏置截止，此时，电路通过的电流  $i_o$  经由

$$B \rightarrow VD_3 \rightarrow R_L \rightarrow VD_4 \rightarrow A$$

由上分析可知，交流电压不管是正半周还是负半周，负载上通过的电流总是一个方向，负载两端的电压  $u_o = i_o R_L$  极性也不改变。如图 5.12 所示为单相桥式整流电路中各电量的波形图。与单相半波整流电路相比较，单相桥式整流电路输出电压  $u_o$  波形多了半个波形，因此，单相桥式整流电路是全波整流电路，其输出电压的平均值  $U_o$  也正好是单相半波整流电路输出电压的平均值的两倍，即

$$U_o = 0.9U \quad (5-4)$$

流过负载电阻  $R_L$  上的平均电流  $I_o$  为

$$I_o = \frac{U_o}{R_L} = 0.9 \frac{U}{R_L} \quad (5-5)$$

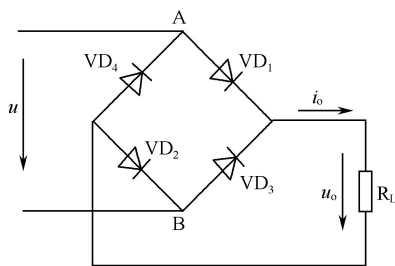


图 5.11 单相桥式整流电路

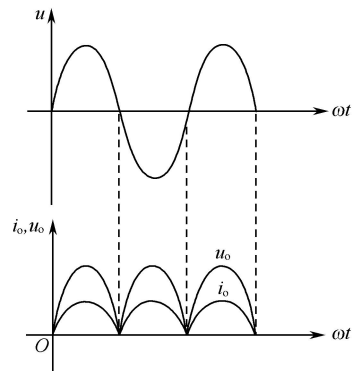


图 5.12 单相桥式整流电路各电量波形图

由于在一个周期内，每个二极管只有 1/2 时间导通，因此，流过每个二极管的平均电流为负载平均电流的 1/2。由电路分析可知二极管承受的最大反向电压与单相半波整流电路相同，为电源电压的最大值  $\sqrt{2}U$ 。

## 3. 三相半波整流电路

三相半波整流电路如图 5.13 所示，三相交流电源一般做星形连接，中线 N 直接

与负载的一端相连接。对于对称的三相电源，其三个电压  $u_U$ 、 $u_V$ 、 $u_W$  彼此之间有  $120^\circ$  的相位差，若以  $u_U$  为参考，则它们的波形如图 5.14 所示。

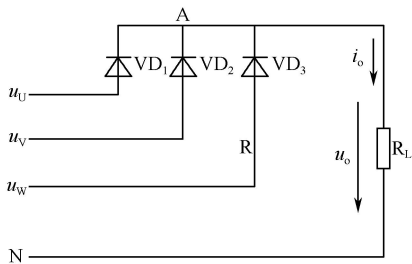


图 5.13 三相半波整流电路

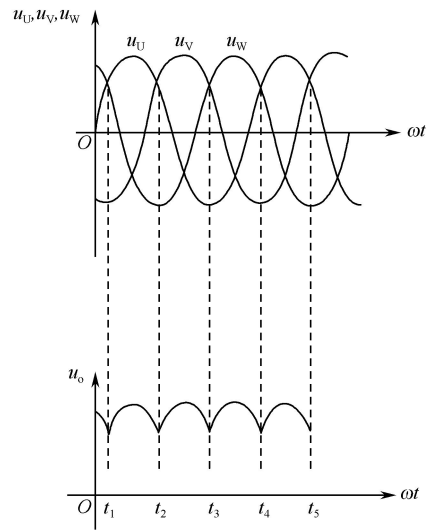


图 5.14 三相半波整流电源电压和负载端电压波形图

在三相半波整流电路中，三个整流二极管是否导通取决于加在二极管两端的电压极性，对照图 5.13 和图 5.14 进行以下分析：

在  $0 \sim t_1$  期间，因  $u_W > u_U > u_V$ ，因此，二极管  $VD_3$  最先导通，当  $VD_3$  导通后，电路中 A 点电位被钳制在近似于  $u_W$  的电位，从而使二极管  $VD_1$  和  $VD_2$  处于截止状态。这时，电流流经的路径为

$$u_W \rightarrow VD_3 \rightarrow R_L \rightarrow N$$

负载两端电压近似等于  $u_W$ 。

在  $t_1 \sim t_2$  期间，因  $u_U > u_V > u_W$ ，因此，二极管  $VD_1$  最先导通，当  $VD_1$  导通后，电路中 A 点电位被钳制在近似于  $u_U$  的电位，从而使二极管  $VD_2$  和  $VD_3$  处于截止状态。这时电流流经的路径为

$$u_U \rightarrow VD_1 \rightarrow R_L \rightarrow N$$

负载两端电压近似等于  $u_U$ 。

同理，在  $t_2 \sim t_3$  期间，负载两端电压近似等于  $u_V$ 。

因此，输出电压就是三相电源电压波形的包络线，由数学分析可知，负载两端的平均电压，即输出平均电压为

$$U_o = 1.17U_p \quad (5-6)$$

式中， $U_p$  为三相交流输入电源相电压的有效值。

负载的平均电流为

$$I_o = \frac{U_o}{R_L} = 1.17 \frac{U_p}{R_L} \quad (5-7)$$

由于在一个周期内，每个二极管只有 1/3 时间导通，因此，流过每个二极管的平均电流为负载平均电流的 1/3。由电路分析可知，二极管承受的最大反向电压为三相电源线电压的最大值  $\sqrt{2} U_L$ 。

#### 4. 三相桥式整流电路

汽车交流发电机专用的是三相桥式整流电路，如图 5.15 所示。

$0 \sim t_1$  期间电流流经的路径为

$$C \rightarrow VD_5 \rightarrow R_L \rightarrow VD_4 \rightarrow A$$

负载两端电压近似等于  $u_W - u_U = u_{WU}$ ，即电源的线电压。

通过计算可得输出电压的平均值为

$$U_o = 2.34U_p \quad (5-8)$$

式中， $U_p$  为三相交流输入电源相电压的有效值。

负载的平均电流

$$I_o = \frac{U_o}{R_L} = 2.34 \frac{U_p}{R_L} \quad (5-9)$$

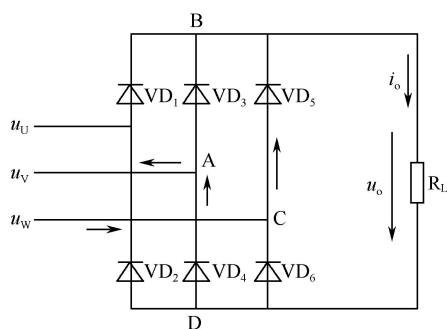


图 5.15 三相桥式整流电路

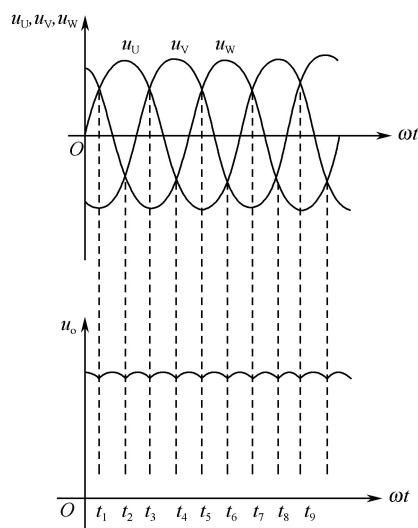


图 5.16 三相桥式整流电源电压和负载端电压波形图

由于在一个周期内，每个二极管只有 1/3 时间导通，因此，流过每个二极管的平均电流为负载平均电流的 1/3。由电路分析可知，二极管承受的最大反向电压为

三相电源线电压的最大值  $\sqrt{2} U_1$ 。

### 三、二极管限幅电路

利用二极管的单向导电性和导通后两端电压基本不变的特点，可组成限幅（削波）电路。用来限制输出电压的幅度。

图 5.17 (a) 所示为一单向限幅电路图中，图中， $u_i$  为正弦信号，其幅值大于直流电源电压  $E$ 。当  $u_i > E$  时，二极管 VD 截止，输出电压  $u_o = E$ ；当  $u_i < E$  时，VD 正向导通， $u_o = u_i$ 。

$u_o$  的波形如图 5.17 (b) 所示。由图可见，只有  $u_o$  的正半周的幅度受到了限制，而负半周的幅度没有受到限制，故该电路称为单向限幅电路。

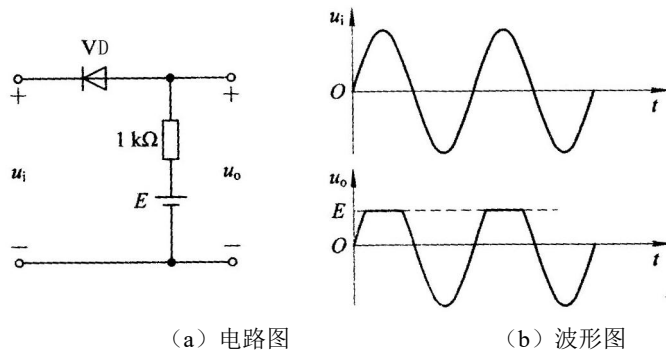


图 5.17 二极管单向限幅电路

图 5.18 (a) 所示为一双向限幅电路。其中，直流电源电压  $E_1 = E_2$ ， $u_i$  为正弦信号。其幅值大于直流电源电压。

当  $E > u_i > 0$  时，二极管 VD<sub>1</sub>、VD<sub>2</sub> 均截止，输出电压  $u_o = u_i$ ；当  $u_i > E$  时，VD<sub>1</sub> 正向导通，VD<sub>2</sub> 仍截止， $u_o = E_1$ 。

在负半周当  $|u_i| < E$  时，二极管 VD<sub>1</sub>、VD<sub>2</sub> 均截止，输出电压  $u_o = u_i$ ，VD<sub>2</sub> 正向导通，VD<sub>1</sub> 仍截止， $u_o = -E_1$ 。

$u_o$  的波形如图 5.18 (b) 所示。由图可见， $u_o$  的正、负半周的幅度同时受到了限制，该电路称为双向限幅电路。

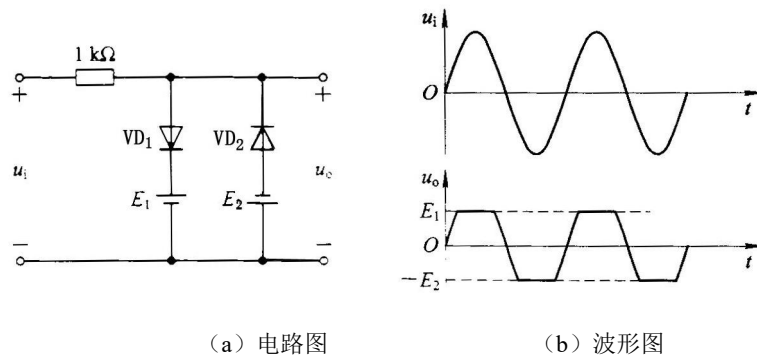
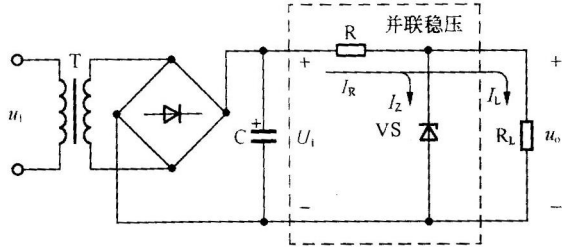
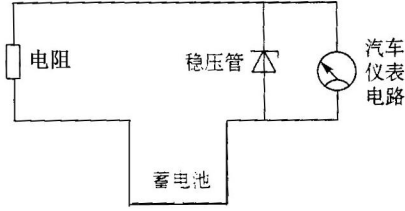



图 5.18 二极管双向限幅电路

二极管限幅电路可用作保护电路。以保护半导体器件不受过电压的危害，也可用来产生数字信号中的恒幅波。

### 四、二极管稳压电路

由稳压管组成的稳压电路是一种最简单的直流稳压电路。在图 5.19 中，稳压电路由限流电阻 R 和稳压管 VD<sub>Z</sub> 构成。当电源电压出现波动或者负载电阻（电流）

	<p>变化时,该稳压电路能自动维持负载电压 <math>U_o</math> 基本稳定。</p> <p>假设负载不变,当交流电源电压突然增加时,整流输出电压 <math>U_i</math> 增加,负载压 <math>U_o</math> 也随之增大。但是对于稳压管两端的反向电压,该电压的微小变化将会使流过稳压管的电流 <math>I_Z</math> 显著变化,因此 <math>I_Z</math> 将随着 <math>U_o</math> 的增大而显著增加,使流过电阻 <math>R</math> 的电流增大,导致 <math>R</math> 两端的压降增加, <math>U_i</math> 的增加电压绝大部分降落在 <math>R</math> 上,负载电压 <math>U_o</math> 保持待近似不变。相反,当交流电源电压减低时,上述电压、电流的变化过程刚好相反,负载电压 <math>U_o</math> 亦保持近似不变。</p> <p>假设整流输出电压 <math>U_i</math> 不变,当负载电流 <math>I_L</math> 突然增大(负载降低)时,电阻 <math>R</math> 上的压降增大,导致负载电压 <math>U_o</math> 下降。流过稳压管的电流 <math>I_Z</math> 显著减少,从而 <math>I_R</math> 基本不变,电阻 <math>R</math> 上的压降近似不变,因此负载电压 <math>U_o</math> 保持稳定。当负载电流减少时,稳压过程类似。</p>  <p style="text-align: center;">图 5.19 稳压管稳压电路</p>	
<p><b>课堂总结</b> 10min</p>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1.二极管、三极管的构成及其工作原理;</li> <li>2.二极管的伏安特性和主要参数;</li> <li>3..二极管组成的电路。</li> </ol>	<p>归纳总结本节课的知识点。</p>
 <p><b>布置作业</b></p>		
<p><b>教学反思</b></p>		

——《任务二 三极管放大电路及其应用》



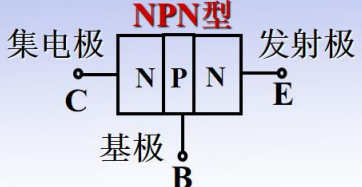
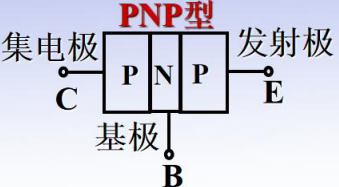
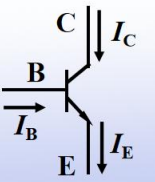
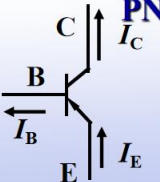
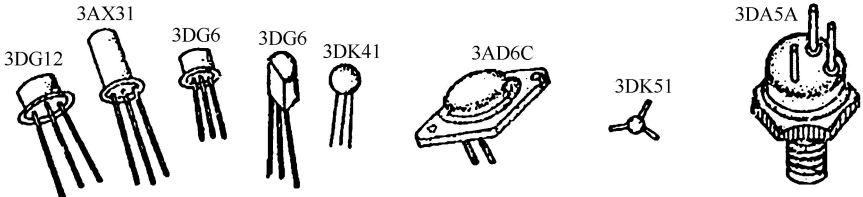
 <b>课 题</b>	<h2 style="color: #00AEEF;">三极管放大电路及其应用</h2>	 <b>课型</b>	新课
<b>授课班级</b>		<b>授课时数</b>	2
<b>教学目标</b>	1.掌握三极管的结构及工作原理； 2.掌握三极管的特性曲线和主要参数； 3.掌握三极管的放大特征、特性曲线和主要参数。		
<b>教学重点</b>	半导体三极管的输入、输出特性及主要参数。		
<b>教学难点</b>	半导体三极管的放大作用。		
<b>教学方法</b>	任务驱动法、分析法、演示法、练习法。		
<b>时间分配</b>	<b>教学内容</b>		<b>教学 方法</b>
导入新课 5min	<div style="background-color: #e6f2ff; padding: 10px;"> <p><b>1. 三极管的结构</b></p> <div style="display: flex; justify-content: space-around;"> <div style="text-align: center;"> <p><b>NPN型</b></p>  </div> <div style="text-align: center;"> <p><b>PNP型</b></p>  </div> </div> <p><b>符号:</b></p> <div style="display: flex; justify-content: space-around;"> <div style="text-align: center;"> <p><b>NPN型三极管</b></p>  </div> <div style="text-align: center;"> <p><b>PNP型三极管</b></p>  </div> </div> </div>		通过让学生观察常见的三极管引发其思考。
讲授新课 75min	<p><b>1. 三极管的结构</b></p> <p>三极管按照频率分，有高频管、低频管；按照功率分，有小、中、大功率管；按照半导体材料分，有硅管、锗管；按结构分，有NPN型管和PNP型管。常见的三极管外形如图5.22所示。</p> <div style="text-align: center;">  </div>		运用实验演示进行教学。

图 5.22 三极管外形

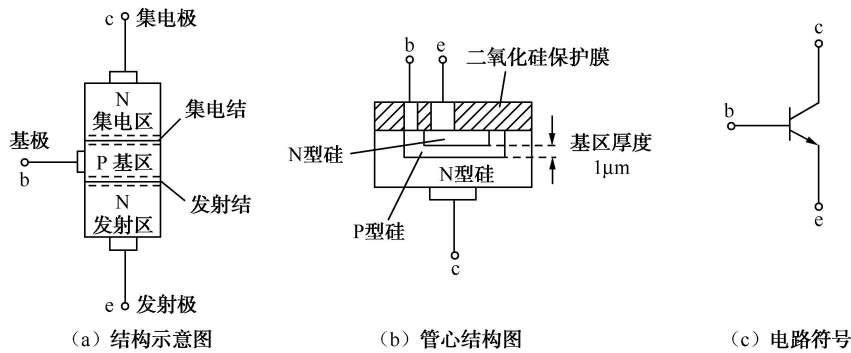


图 5.23 NPN 型三极管

5.23 (a) 所示的是 NPN 型三极管的结构示意图。。

同理，PNP 型三极管也是由两个 PN 结的三层半导体制成的，不过中间是 N 型半导体，两边是 P 型半导体，如图 5.24 (a) 所示。图 5.24 (b) 所示为用合金法制成的锗管的管心结构。它是在很薄的 N 型锗片两边各放一个钢球，经高温烧结成两个 PN 结。杂质浓度大的 P 型区引线做发射极，另一个面积较大的 P 型区引线为集电极，N 型基区引线做基极。低频管 3AX1、高频管 3AG6 等均属此种结构。图 5.24 (c) 所示为 PNP 型三极管的电路符号，发射极箭头是向内的，也表示发射结正偏时发射极电流的实际方向。

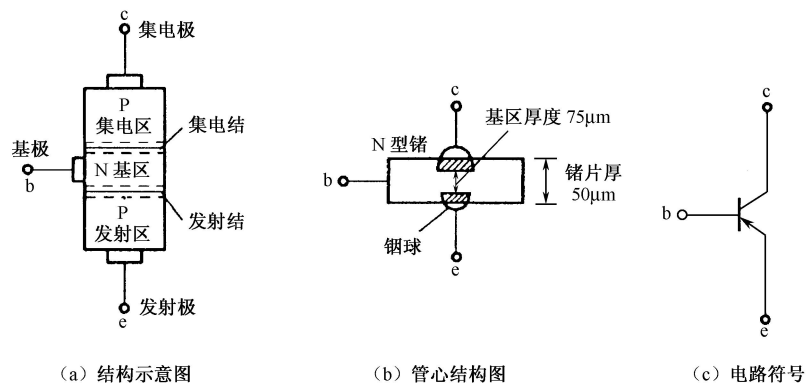


图 5.24 PNP 型三极管

## 2. 三极管的放大原理

### (1) 三极管的电流分配与放大实验

为了了解三极管的电流分配关系和放大作用，先做一个实验。实验电路如图 5.25 所示。

三极管的三个电极构成了两个回路：基极与发射极回路、集电极与发射回路。发射极是两个回路的公共端，所以此种接法的电路叫共发射极电路，这是一种最常用的电路。电源  $E_B$  经电阻  $R_B$  给发射结加上正向电压（也叫正向偏压）， $E_C$  经  $R_C$  给集电结加上反向电压（也叫反向偏压）。

发射结加较小的正向偏压，集电结加较大的反向偏压，这是保证三极管具有电流放大作用的外部条件。

调节  $R_P$  的阻值，基极电流  $I_B$  发生变化，集电极电流  $I_C$  和发射极电流  $I_E$  也相应地发生变化。

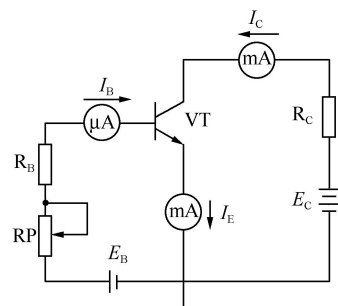


图 5.25 三极管的电流分配与放大实验电路



(2) 三极管的电流放大

① 晶体管各电极间的电流分配关系满足晶体管发射极电流等于基极电流与集电极电流之和，即满足式 (5-10)。

$$I_E = I_B + I_C \quad (5-10)$$

② 在一定范围内，基极电流  $I_B$  增大时，集电极电流  $I_C$  成比例相应增大， $I_B$  与  $I_C$  的比值称为直流电流放大系数，用字母  $\bar{\beta}$  表示，即满足式 (1-19)。

$$\bar{\beta} = \frac{I_C}{I_B} \quad (5-11)$$

$\bar{\beta}$  值的大小体现了晶体管的电流放大能力。

③ 在一定范围内，集电极电流  $I_C$  会因基极电流  $I_B$  的变化而变化。集电极电流变化量  $\Delta I_C$  与基极电流变化量  $\Delta I_B$  的比值称为晶体管的交流电流放大系数，以  $\beta$  表示，即满足式 (5-12)。

$$\beta = \frac{\Delta I_C}{\Delta I_B} \quad (5-12)$$

一般情况下， $\bar{\beta} = \beta$ 。

④ 基极开路时，即  $I_B=0$  时，集电极电流很小，这个微小的集电极电流称为穿透电流。该值越小，晶体管质量越好。

⑤ 当  $I_B$  增大到一定数值后， $I_C$  保持不变，即  $I_B$  失去了对  $I_C$  的控制作用。

### 3. 三极管的特性曲线

三极管的特性曲线是指三极管各电压与电流之间的关系曲线，它是三极管内部载流子运动的外部表现。

#### (1) 输入特性曲线

输入特性是指  $U_{CE}$  为定值时，输入回路中基极电流  $i_B$  与发射结压降  $u_{BE}$  之间的函数关系，即

$$i_B = f(u_{BE}) \Big|_{u_{CE}=\text{常数}}$$

输入特性曲线如图 5.26 (a) 所示，在输入回路中，发射结是一个正向偏置的 PN 结，因此，输入特性就与二极管正向伏安特性相似，不同的是输出电压  $U_{CE}$  对输入特性有影响。当  $U_{CE} \geq 1V$  时，不同  $U_{CE}$  值的输入曲线基本重合。

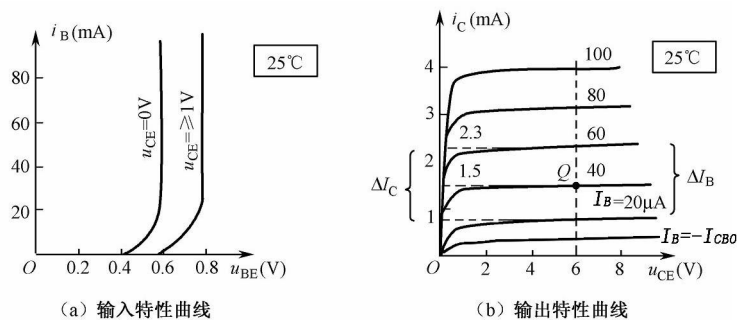


图 5.26 3DG6 共射特性曲线

## (2) 输出特性曲线

共射电路的输出特性曲线是指在基极电流  $i_B$  一定的情况下，三极管的输出回路中，发射极之间的电压  $u_{CE}$  与集电极电流  $i_C$  之间的关系曲线，用函数表示为

$$i_C = f(u_{CE}) \Big|_{i_B = \text{常数}} \quad (5-13)$$

图 5.26 (b) 所示为硅三极管 3DG6 的输出特性曲线，根据三极管处于截止、放大和饱和三种工作状态，在其输出特性曲线上，可以划分为三个区域：截止区、放大区和饱和区。

① 截止区。在输出特性曲线上，对应于  $I_B = -I_{CBO}$  的那条曲线以下的区域称为截止区。在截止区，三极管的发射结和集电结都处于反偏。对于 NPN 型管来说，此时  $u_{BE} < 0$ ， $u_{BC} < 0$ 。由于发射结和集电结都处于反偏，所以发射区不能向基区注入载流子， $I_E = 0$ ， $I_C = I_{CBO}$ ， $I_B = -I_{CBO}$ 。由于三极管各极电流非常小，极间电阻很大，三个极可视为开路状态。在工程上，常把  $I_B = 0$  以下区域定为截止区，此时， $I_C = (1 + \beta) I_{CBO} = I_{CEO}$ （称为穿透电流）， $I_E = I_C = I_{CEO}$ 。

② 放大区。由图 5.26 (b) 所示， $u_{CE} > 1V$  以后，各条输出特性曲线比较平坦， $i_C$  基本上不受  $u_{CE}$  的影响，这是因为  $u_{CE}$  大于 1V 后集电结的反偏电场已足够强，能使发射区注入到基区的电子的绝大部分越过集电结到达集电区，所以  $u_{CE}$  再增加， $i_C$  也增加不了多少。另一方面，当基极电流增加时，特性曲线又将平行地向上移动，即当  $i_B$  变化一个  $\Delta i_B$  时，就有一个  $\Delta i_C$  与之对应，因此我们把某一工作点下（如图 5.26(b) 中的  $Q$  点） $i_C$  的增量  $\Delta i_C$  与  $\Delta i_B$  之比称为共发射极电流放大系数，用  $\beta$  表示，即

$$\beta = \frac{\Delta i_C}{\Delta i_B} \quad (5-14)$$

$\beta > 1$ ，这就体现了三极管共射电路的电流放大作用。

在放大区，三极管的发射结加正向偏置，集电结加反向偏置。对于 NPN 型三极管来说， $u_{BE} > 0$ ， $u_{BC} < 0$ 。

③ 饱和区。如图 5.26 所示电路中，由于电源  $E_C$  的电压一定，当  $i_C$  增大时，相应的  $u_{CE}$  必然减小，当  $u_{CE}$  小于 0.5V 后， $i_C$  随  $u_{CE}$  增加而增加，且不同  $i_B$  的各条曲线重合在一起。这是因为  $u_{CE} < 0.5V$  后，集电结的反偏压很小，对于基区中扩散到集电结边缘的载流子收集能力不足，造成非平衡载流子在基区积累， $u_{CE}$  稍有增加， $i_C$  增加很快，但  $i_B$  增加时， $i_C$  几乎不变，即  $i_C$  不受  $i_B$  控制，三极管没有放大作用。

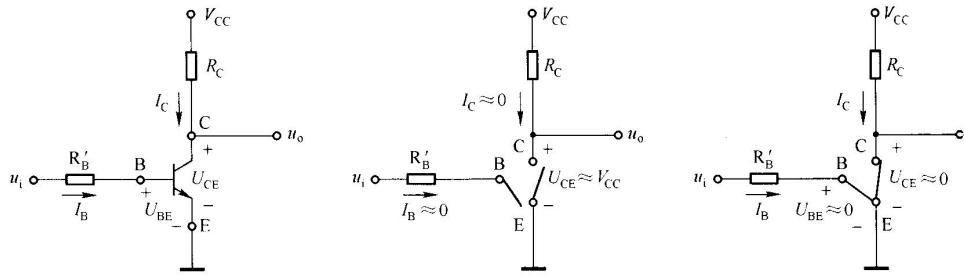
一般认为当  $u_{CE} = u_{BE}$ ，即  $u_{CB} = 0$  时，三极管达到临界饱和状态。当  $u_{CE} < u_{BE}$  时，称为过饱和状态。三极管饱和时的管压降（饱和压降）用  $U_{CES}$  表示，一般小功率管  $U_{CES} < 0.5V$ 。

三极管工作在饱和区时，发射结和集电结都处于正向偏置状态。对于 NPN 型三极管来说， $u_{BE} > 0$ ， $u_{BC} > 0$ 。

#### 4. 三极管开关特性

三极管在模拟电路中主要工作在放大状态，而在脉冲数字电路中，三极管作为最基本的开关元件，它应工作在截止和饱和状态。三极管工作状态的转化如图 5.27 所示。

当三极管处于截止工作状态时，发射结反偏，集电结反偏，基极电流  $I_B \approx 0$ ，集电极电流  $I_C \approx 0$ ，则三极管输出电压  $U_{CE} \approx V_{CC}$  此时 C-E 间导电电阻很大，相当于开关断开。



(a) 共射极放大电路      (b) 截止状态等效电路      (c) 饱和状态

等效电路

图 5.27 三极管工作状态转换

当三极管处于饱和工作状态时，发射结正偏， $U_{BE} \approx 0$ ， $I_C$  增大， $U_{CE} = V_{CC} - I_C R_C$  下降至 0.3V 左右，集电结由反偏转为正偏，由于  $U_{CE}$  很小，接近于零，相当于三极管 C-E 间短路，则开关闭合。

#### 5. 三极管的主要参数

##### (1) 电流放大系数

① 共射极电流放大系数。共射极电流放大系数有直流放大系数  $\bar{\beta}$  和交流放大系数  $\beta$  两种。如果忽略三极管的反向饱和电流，则有：

$$\bar{\beta} = \frac{I_{CN}}{I_I} = \frac{I_C - I_{CBO}}{I_B + I_{CBO}} \approx \frac{I_C}{I_B} \quad (5-15)$$

$$\beta = \frac{\Delta I_C}{\Delta I_B} \quad (5-16)$$

显然  $\bar{\beta}$  与  $\beta$  的含义是不同的，但对于一个良好的晶体管，由于  $I_{CEO}$  很小，而且输出特性曲线的间隔比较均匀，因而两者在数值上差异是很小的，可近似认为  $\bar{\beta} \approx \beta$ ，以后在计算中对于两者不加严格区别。

② 共基极电流放大系数。共基极电流放大系数也有直流放大系数和交流放大系数两种，分别用  $\bar{\alpha}$  和  $\alpha$  表示。它们的定义与  $\bar{\beta}$  与  $\beta$  相似。忽略  $I_{CBO}$  可得：

$$\bar{\alpha} = \frac{I_{CN}}{I_E} = \frac{I_C - I_{CBO}}{I_E} \approx \frac{I_C}{I_E} \quad (5-17)$$

可见,  $\alpha$  是指在交流工作状态下, 集电极电流  $I_C$  与发射极电流  $I_E$  的比值。同理

$$\alpha = \frac{\Delta I_C}{\Delta I_E} \quad (5-18)$$

$$\alpha \approx \bar{\alpha}$$

根据式 (5-10) 和式 (5-16) 可得:

$$\alpha = \frac{\Delta I_C}{\Delta I_E} = \frac{\beta \Delta I_B}{(1 + \beta) \Delta I_B} = \frac{\beta}{1 + \beta} \quad (5-19)$$

③ 复合管电流放大系数。

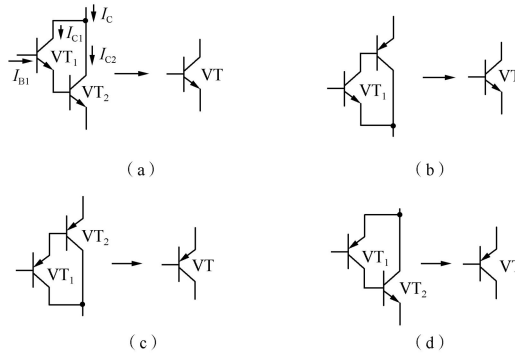


图 5.28 两个三极管组成的复合管电路形式

单个三极管组成的放大电路的放大能力有限, 为了增大电路的放大能力, 可以采用复合管的形式, 如图 5.28 所示。由  $VT_1$ 、 $VT_2$  组成的复合管的等效形式由  $VT_1$  决定。由图 5.28 (a) 可得:

$$I_C = I_{C1} + I_{C2} = \beta_1 I_{B1} + (1 + \beta_1) \beta_2 I_{B1} \quad (5-20)$$

其电流放大倍数为

$$\beta = \frac{I_C}{I_{B1}} \approx \beta_1 \beta_2 \quad (5-21)$$

(2) 极间反向电流

① 集电极-基极反向饱和电流  $I_{CBO}$ 。集电极-基极反向饱和电流  $I_{CBO}$  表示发射极开路, c、b 间加上一定反向电压时的反向电流。

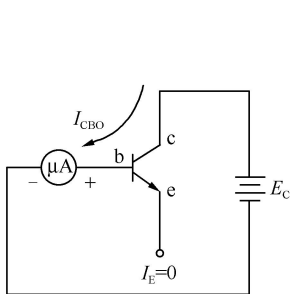


图 5.29  $I_{CBO}$  的测量电路

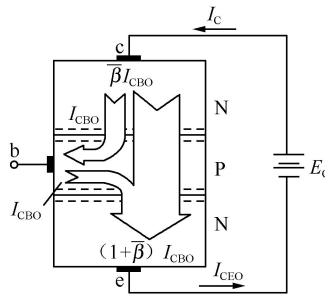


图 5.30 穿透电流  $I_{CEO}$  的形成

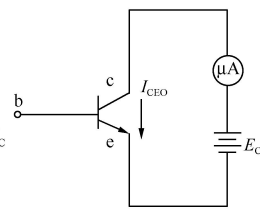


图 5.31  $I_{CEO}$  的测量电路

② 穿透电流  $I_{CEO}$ 。

$$I_C = I_{CBO} + \bar{\beta} I_{CBO} = (1 + \bar{\beta}) I_{CBO}$$

$$I_E = (1 + \bar{\beta}) I_{CBO}$$

### (3) 极限参数

① 集电极最大允许电流  $I_{CM}$ 。当集电极电流超过一定值时，三极管的  $\beta$  值要减小。当  $I_C = I_{CM}$  时，三极管的  $\beta$  值下降到额定值的  $2/3$ 。

② 集电极最大允许耗散功率  $P_{CM}$ 。

③ 反向击穿电压。反向电压很高时，三极管的两个 PN 结都会发生反向击穿。击穿电压主要有以下几项：

$BU_{CBO}$ ：指发射极开路时，集电极和基极间的反向击穿电压。

$BU_{CEO}$ ：指基极开路时，集电极和发射极间的反向击穿电压。

$BU_{EBO}$ ：指集电极开路时，发射极和基极间的反向击穿电压。

$BU_{CER}$ ：指基极与发射极间接有电阻  $R$  时，集电极和发射极间的反向击穿电压。它们的对应关系为

$$I_{CEO} > I_{CER} > I_{CBO}$$

$$BU_{CEO} < BU_{CER} < BU_{CBO}$$

### (4) 三极管的频率参数

三极管频率特性的常用参数有  $f_\alpha$ 、 $f_\beta$ 、 $f_T$ 。

① 共基极截止频率  $f_\alpha$ ：是指当  $\alpha$  降至低频的  $1/\sqrt{2}$  时所对应的频率。

② 共发射极截止频率  $f_\beta$ ：是指当  $\beta$  降至低频的  $1/\sqrt{2}$  时所对应的频率。

③ 特征频率  $f_T$ ：是指当  $\beta$  降为 1 时所对应的频率。

根据理论计算可证明，三个频率参数之间的关系为：

$$f_\alpha \approx (1 + \beta) f_\beta$$

$$f_T \approx \beta f_\beta$$

## 6. 温度对晶体管特性的影响

(1) 温度对  $I_{CEO}$  和  $I_{CBO}$  的影响

(2) 温度对  $\beta$  的影响

晶体管的  $\beta$  值随温度的升高而增加，温度每升高  $1^\circ\text{C}$ ， $\beta$  值约增大  $0.5\% \sim 1\%$ 。

(3) 温度对  $U_{BE}$  的影响

## 二、光敏晶体管

光敏晶体管与普通晶体管相同也有两个 PN 结和三个电极，但其集电结采用光敏二极管结构。

其输出特性曲线表示其光控特性，如图 5.33 (d) 所示，图中  $E$  为光照强度，简称照度； $P_{CM}$  集电极最大功耗。

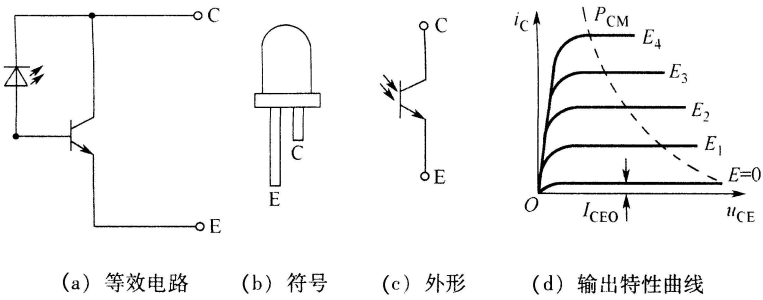


图 5.33 光敏晶体管

光敏晶体管与光敏二极管相比灵敏度比较高，制成复合管（达林顿管）形式时，能输出较大的电流而直接驱动某些继电器，因此在要求灵敏度高、带负载能力强的电路中应选用光敏晶体管。光敏二极管一般在要求响应快、对温度敏感小的电路中使用。

光敏晶体管的应用是实现光电转换，其基本应用电路如图 5.34 所示，光敏晶体管在受到光照时，将光信号转变为集电极电流，电流流过电阻生成电压，使输出端 A 的电位随外界光线的照射而发生变化，实现了光电转换。光敏晶体管在汽车上主要应用于多种传感器中，实现空气流量检测、转向角度检测、车速测量、位置测量等功能。

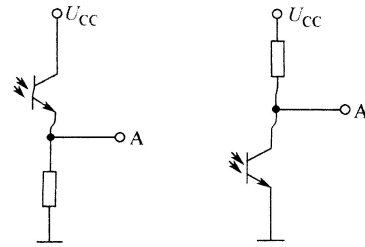


图 5.34 光敏晶体管基本应用

### 三、共射极电压放大电路

#### 1. 电路组成及各元件的作用

##### (1) 电路中各元件的作用

在图 5.35 所示电路中，三极管 VT 为放大器的核心，起电流放大作用，它将微小的基极电流变化量转换成较大的集电极电流变化量，反映了三极管的电流控制作用。直流电源  $E_c$ 、 $E_b$  使三极管的发射结正偏，集电结反偏，确保三极管工作在放大状态。它又是整个放大器的能量提供者。放大器实现信号放大的能量是由  $E_c$  通过三极管转换而来的，绝非三极管本身产生的。集电极电阻  $R_c$  的作用是将集电极电流的变化量转换成集电极电压的变化量，以实现电压放大。基极偏置电阻  $R_b$  供给三极管合适的基极偏置电流  $I_b$ ，从而确定三极管的直流工作状态（又称直流工作点）。在  $E_c$  确定后，当  $R_b$  的值选定以后， $I_b$  也就固定了，所以称这种共射极放大器为固定偏置放大器。耦合电容  $C_1$  和  $C_2$  的作用是隔直流通交流，使电路的静态工作点不受输入端的信号源和输出端负载的影响；对交流信号呈现的容抗很小，可近似认为短路，以便有效地传递交流信号。

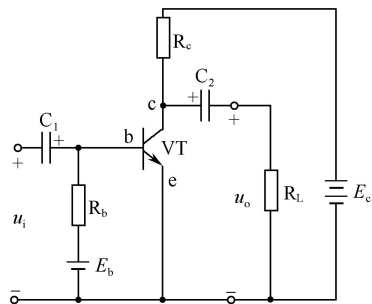


图 5.35 NPN 单级电压放大器

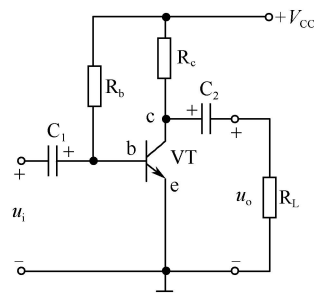


图 5.36 单电源供电电路

若用 PNP 型三极管构成放大器，则只需将电源极性反接，耦合电容的极性对调即可。

(2) 电路中电压、电流的符号及正方向的规定

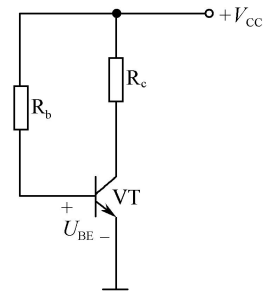
放大器在无信号输入时，三极管各电极的电压、电流都是直流，用大写字母表示，下标也以大写字母表示。当放大器输入交流信号时，其电压、电流都是在直流成分的基础上叠加了一个交流成分，用小写字母代表电量性质，而下标采用大写字母形式。纯交流信号瞬时值均用小写字母表示。而交流信号有效值是用大写字母代表电量性质，小写字母作为下标。电流的正方向用箭头所指的方向表示，电压的极性和“+”、“-”表示。电路中电压、电流的符号规定如表 5.4 所示。

表 5.4 三极管各极电压、电流符号

	直 流	交流瞬时值	交流有效值	交直流叠加
电 流	$I_B$ $I_C$ $I_E$	$i_b$ $i_c$ $i_e$	$I_b$ $I_c$ $I_e$	$i_B$ $i_C$ $i_E$
电 压	$U_{BE}$ $U_{CE}$ $U_E$	$u_{be}$ $u_{ce}$ $u_e$	$U_{be}$ $U_{ce}$ $U_e$	$u_{BE}$ $u_{CE}$ $u_E$
输入信号		$u_i$	$U_i$	
输出信号		$u_o$	$U_o$	

2. 共射极放大器的静态分析

当放大器无输入信号时 ( $u_i=0$ )，电路中的电压、电流都不变 (直流)，称为静止状态，简称静态。此时放大器中的电压、电流都是直流分量。只允许直流电流通过的路径称为直流通路。直流通路是计算静态工作点的依据。画放大器直流通路的方法是将电容器看成开路。因此图 5.36 所示放大器的直流通路如图 5.37 所示。放大器在静态时三极管的电压和电流称为静态工作点。静态分析主要是求  $I_C$ 、 $I_B$ 、 $U_{CE}$  的值。要分析一个给定放大电路的静态工作点可以采用估算法和图解法实现，下面分别介绍这两种方法。



(1) 估算法求静态工作点

根据图 5.37 所示的直流通路，依据基尔霍夫电压定律可得静态基极电

图 5.37 基本放大电路的直流通路

$$I_B = \frac{V_{CC} - U_{BE}}{R_b} \approx \frac{V_{CC}}{R_b} \quad (5-22)$$

由于  $U_{BE}$  比  $V_{CC}$  小得多，故可以忽略不计，根据集电极电流与基极电流的关系可得

$$I_C = \beta I_B + I_{CEO} \approx \beta I_B \quad (5-23)$$

静态时集电极电压为

$$U_{CE} = V_{CC} - I_C R_c \quad (5-24)$$

(2) 图解法求静态工作点

图解法就是利用晶体管的特性曲线，用作图的方法分析放大电路的电压、电流之间的关系。

通常对于放大电路的输入部分，由于  $U_{BE}$  基本恒定，可以采用计算的方法先求解  $I_B, I_B \approx V_{CC}/R_b$ 。对于输出电路，如图 5.38 (a) 所示，为了便于分析，将

输出回路以  $a, b$  为界分成左右两个部分。左边  $I_C$  与  $U_{CE}$  之间的关系为非线性，输出特性曲线如图 5.36 (b) 所示。右边为线性电路，有

$$U'_{CE} = V_{CC} - I_C R_c$$

或

$$I_C = \frac{V_{CC} - U'_{CE}}{R_c} \quad (5-25)$$

这是一条直线方程，斜率为  $-1/R_c$ ，在纵坐标和横坐标的截距分别为  $V_{CC}/R_c$ 、 $V_{CC}$ 。根据这两个数据即可做出直流负载线  $MN$ ，如图 5.38 (b) 所示。

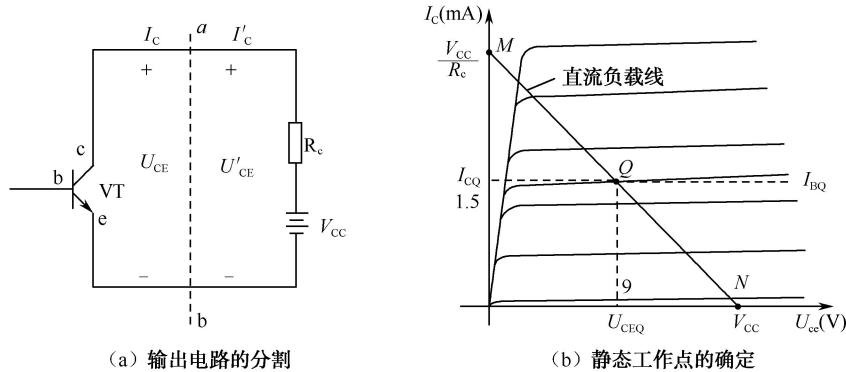


图 5.38 直流负载线与静态工作点的求法

由估算的方法已经求出了输入回路的偏置电流  $I_B$ 。在输出特性曲线中找出  $I_{BQ}$  对应的那条曲线与直流负载线  $MN$  的交点，该交点就是静态工作点  $Q$ 。因为该点所对应的电压、电流既满足输入回路的要求，也满足输出回路的要求。在图 5.38 (b) 中，过  $Q$  点做纵坐标轴的垂线与纵坐标轴的交点（垂足）即为  $I_{CQ}$ ；过  $Q$  点做横坐标的垂线与横坐标轴的交点即为  $U_{CEQ}$ 。

### 3. 共射极放大器的动态分析

#### (1) 图解法

放大电路的动态情况是在静态的基础上，在输入端加交流电压信号  $u_i = U_m \sin \omega t$ ，由于耦合电容  $C_1$ 、 $C_2$  容量较大，其容抗很小，所以对交流信号可视为短路。 $u_i$  相当于直接加到晶体管的发射结上，因此发射结实际电压为静态值  $U_{BE}$  叠加上交流电压  $u_i$ ，即  $u_{BE} = U_{BE} + u_i$ ， $u_{BE}$  的变化引起基极电流相应的变化，即  $i_B = I_B + i_b$ ， $i_B$  的变化引起集电极电流相应的变化，即  $i_C = I_C + i_c$ ， $i_C$  的变化引起集电极电压相应的变化，即  $u_{CE} = V_{CC} - i_C R_c$ 。根据上面变化过程的分析可知，即当输入  $u_i$  增大时， $u_{BE}$  增大， $i_B$  和  $i_C$  也随之增大， $u_{CE}$  减小，即  $u_{CE}$  的变化与  $i_C$  的变化相反，所以经过耦合电容  $C_2$  传送到输出端的输出电压  $u_o$  与  $u_i$  反相。只要电路参数选取适当， $u_o$  的幅值将比  $u_i$  幅值大得多，从而实现放大的功能。各处的电流、电压波形如图 5.39 所示。



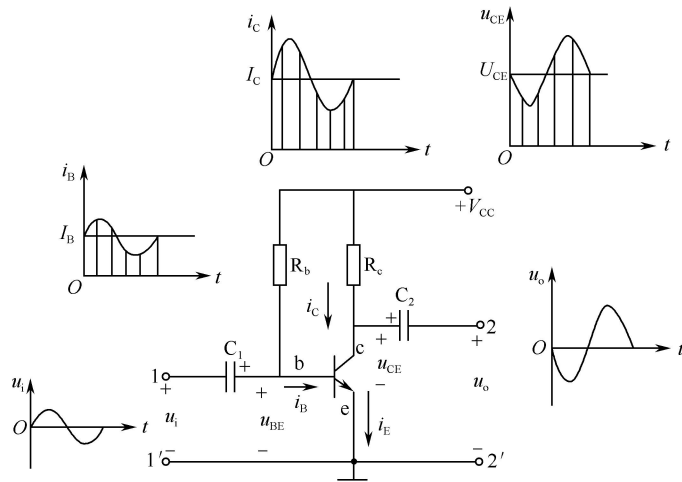


图 5.39 正弦信号输入时放大电路的工作情况

如图 5.40 所示电路，已知  $R_c=6k\Omega$ ， $V_{CC}=20V$ ， $R_b=500k\Omega$ ，利用图解法可求出其静态工作点：

$$I_B=40\mu A, I_C=1.5mA, U_{CE}=9V$$

放大电路的静态工作点为其直流负载线与三极管输出特性曲线的交点，如图 5.41 所示。由于电容  $C_1$ 、 $C_2$  对交流可视作短路，而直流电源内阻很小，对交流也可视为短路，由此可画出图 5.40 的交流通路如图 5.42 所示。直流负载线反映了静态时电流  $I_{CE}$  和电压  $U_{CE}$  的关系，由于  $C_2$  对于直流相当于开路，负载电阻  $R_L$  上无直流电压和电流分量，故直流负载线的斜率为  $\tan\alpha=-1/R_c$ ，而对于交流信号， $C_2$  可视作短路，负载电阻  $R_L$  与  $R_c$  并联， $R_L'=R_L\parallel R_c$ ，故交流负载线的斜率为  $\tan\alpha'=-1/R_L'$ 。因为  $R_L<R_L$ ，所以交流负载线比直流负载线要陡一些。当输入信号为零时，放大电路仍应工作在静态工作点  $Q$ ，所以交流负载线也要经过  $Q$  点。由此可知，交流负载线是一条经过  $Q$  点，斜率为  $-1/R_L$  的直线。如图 5.41 所示。

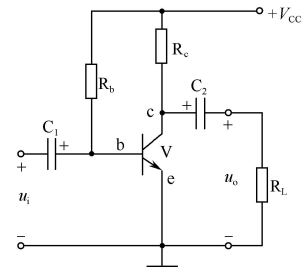


图 5.40 共发射极基本放大电路

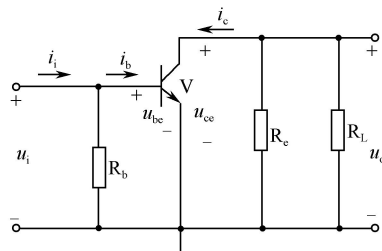
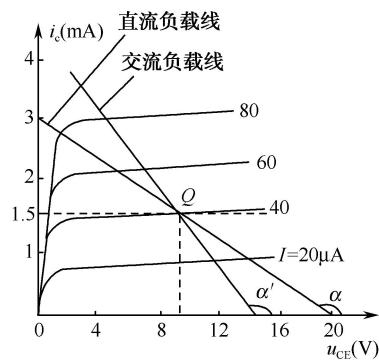


图 5.41 图解求输出电路交、直流负载线

图 5.42 交流通路

根据上面对电路动态情况所做分析，下面介绍动态图解分析过程（见图 5.43）。

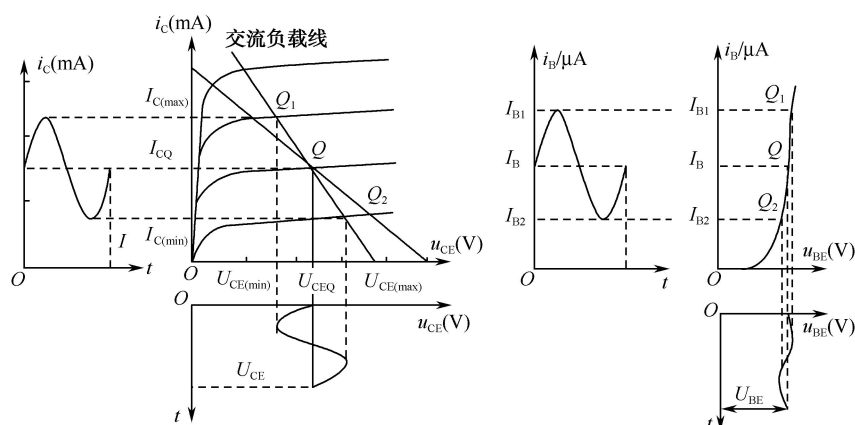


图 5.43 动态图解分析过程

- ① 在输出特性曲线上做交流负载线。
- ② 在输出特性曲线的左边和下面分别做  $i_c$ 、 $u_{CE}$  对应时间  $t$  的坐标系。
- ③ 在输入特性曲线的左边和下面分别做  $i_B$ 、 $u_{BE}$  对应时间  $t$  的坐标系。
- ④ 在输入特性曲线上找出工作点  $Q$ ，并由该点向  $u_{BE} \sim t$  坐标系做垂线，以此垂线为基点在  $u_{BE} \sim t$  坐标系上画出输入信号的波形图。
- ⑤ 由输入信号的两峰点向输入特性曲线做垂线分别交  $Q_1$ 、 $Q_2$  点。
- ⑥ 由  $Q$ 、 $Q_1$ 、 $Q_2$  三点向  $i_{BE} \sim t$  坐标系做垂线，分别交纵坐标于  $I_B$ 、 $I_{B1}$ 、 $I_{B2}$ 。以  $I_{B1}$ 、 $I_{B2}$  为最大值和最小值，根据  $u_i$  的周期画出  $i_B$  的波形图。
- ⑦ 在输出特性曲线上找到  $I_B$ 、 $I_{B1}$ 、 $I_{B2}$  所对应的曲线与交流负载线的交点  $Q$ 、 $Q_1$ 、 $Q_2$ 。
- ⑧ 由  $Q$ 、 $Q_1$ 、 $Q_2$  向  $i_c \sim t$ 、 $u_{CE} \sim t$  坐标系分别做垂线，分别交电流轴和电压轴的交点为  $I_{CQ}$ 、 $I_{C(max)}$ 、 $I_{C(min)}$ 、 $U_{CEQ}$ 、 $U_{CE(min)}$ 、 $U_{CE(max)}$ 。
- ⑨ 由图计算电压放大倍数  $A_u$ 。

$$A_u = \frac{U_{CE(max)} - U_{CE(min)}}{U_{BE(max)} - U_{BE(min)}} = \frac{U_o}{U_i} \quad (5-26)$$

由上分析可知，输出电压  $u_o$  为  $u_{CE}$  的交流分量，其相位与  $u_i$  相反，电压放大倍数为输出电压的有效值与输入电压有效值的比值。

## (2) 静态工作点与非线性失真

① 截止失真。静态工作点设置的太高或太低都会产生非线性失真。如图 5.44 (a) 所示，输入信号为正弦电压，由于静态工作点  $Q_1$  的位置太低，在输入信号的负半周，三极管进入截止区，输出波形产生了严重的失真，这种失真是由于晶体管的截止而引起的，故称为截止失真。

② 饱和失真。如图 5.44 (b) 所示，静态工作点  $Q_2$  设置的太高，这种情况下，在输入正弦信号的正半周三极管进入了饱和区工作，输出波形产生了严重的失真，这种失真由于晶体管进入饱和区工作而引起的，故称为饱和失真。因此，放大电路必须设置合适的静态工作点，才能保证不产生非线性失真，一般静态工作点应选在交流负载线的中部。如果输入信号的幅值太大，会同时产生截止失真和饱和失真。

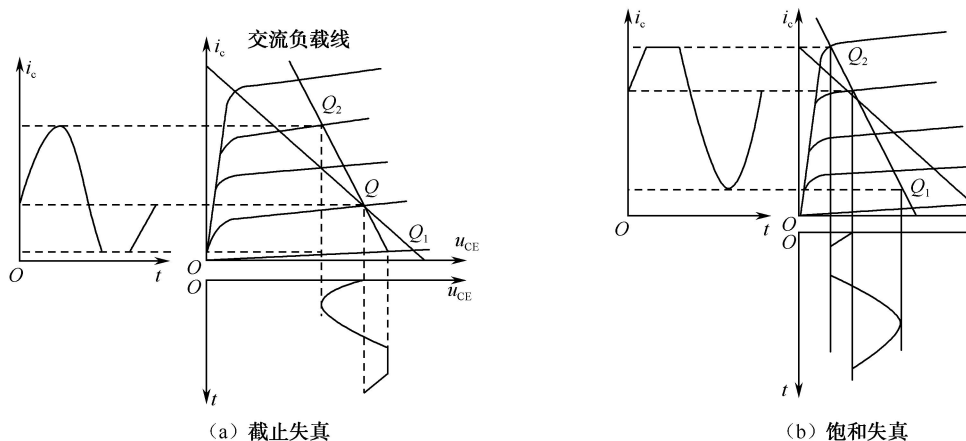


图 5.44 静态工作点与非线性失真

### (3) 估算法

在输入信号较小，确定放大电路一定工作在放大区时，输出电流与输入电流成简单的线性关系，可以采用估算法进行电路分析。

① 估算电压放大倍数。首先做出放大电路的交流通路。对交流信号而言，三极管的发射结可等效成一个电阻  $r_{be}$ ，称为三极管的输入电阻，可以通过经验公式估算

$$r_{be} = 300 + (1 + \beta) \frac{26(\text{mV})}{I_E(\text{mA})} (\Omega) \quad (5-27)$$

由上式可知  $r_{be}$  与  $\beta$  和  $I_E$  有关， $r_{be}$  随着  $\beta$  的增加而增加，随着  $I_E$  的增大而减小。一般  $r_{be}$  的值为几百到几千欧姆。

根据图 5.45 放大电路的交流通路分析可得

$$i_c = \beta \cdot i_b \quad (5-28)$$

$$u_i = i_b r_{be} \quad (5-29)$$

$$u_o = -i_c R_L' = -\beta i_b R_L' \quad (\text{其中 } R_L' = R_L \parallel R_c) \quad (5-30)$$

放大电路的电压放大倍数为

$$A_u = \frac{u_o}{u_i} = \frac{-\beta i_b R_L'}{i_b r_{be}} = -\beta \frac{R_L'}{r_{be}} \quad (5-31)$$

上式中负号说明输出电压与输入电压反相。

② 输入电阻  $r_i$ 。放大器的输入端总是与信号源相关联的，相对于信号源而言放大器是一个负载，可以用一个电阻来等效代替，此电阻即为放大电路的输入电阻  $r_i$ 。由微变等效电路图可知

$$r_i = \frac{u_i}{i_i} = R_b \parallel r_{be} \approx r_{be} \quad (5-32)$$

③ 输出电阻  $r_o$ 。放大电路对于负载来说相当于信号源，其电源的电动势为放大电路输出开路时的端电压，其内阻即为放大电路的输出电阻，从三极管的输出端看进去的电阻为

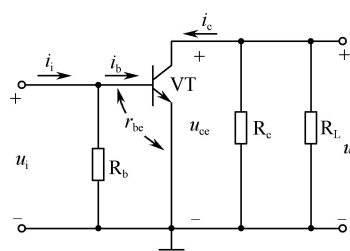


图 5.45 交流通路

$$r_o \approx R_c \quad (5-33)$$

$R_c$ 一般为几千欧姆，所以共发射极放大电路的输出电阻较高。如果放大电路的输出电阻较高，负载获取的电压就会变小，即放大电路的带负载能力较差。一般我们希望放大电路的输出电阻越小越好。

例 5.3 如图 5.40 所示电路，已知  $V_{CC}=12V$ ， $R_c=4k\Omega$ ， $R_b=400k\Omega$ ， $R_L=4k\Omega$ ，三极管的  $\beta=40$ 。(1) 计算电路的静态工作点；(2) 计算电路的电压放大倍数  $A_u$ ，输入电阻  $r_i$ ，输出电阻  $r_o$ 。

解：(1) 电路静态工作点的计算。

$$I_B = \frac{V_{CC} - U_{BE}}{R_b} \approx \frac{V_{CC}}{R_b} = \frac{12}{400} \text{mA} = 30\mu\text{A}$$

$$I_C = \beta I_B = 40 \times 30\mu\text{A} = 1.2\text{mA}$$

$$U_{CE} = V_{CC} - I_C R_c = 12 - 1.2 \times 4 = 7.2\text{V}$$

(2) 电压放大倍数  $A_u$ ，输入电阻  $r_i$ ，输出电阻  $r_o$  的计算。

$$r_{be} = 300 + (1 + \beta) \frac{26(\text{mV})}{I_E(\text{mA})} = 300 + (1 + 40) \frac{26}{1.23} = 1167\Omega \approx 1.2\text{k}\Omega$$

$$A_u = -\beta \frac{R_L // R_c}{r_{be}} = -40 \frac{4 // 4}{1.2} \approx -67$$

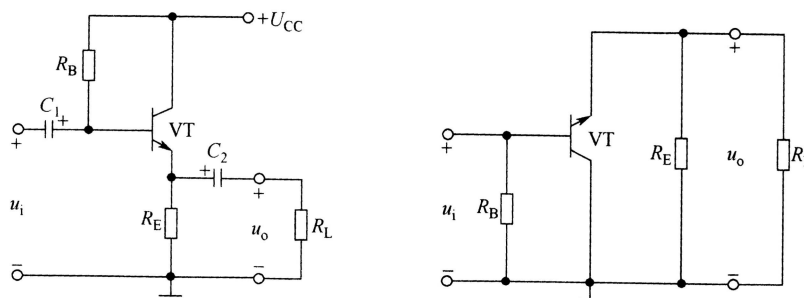
$$r_i = R_b // r_{be} \approx r_{be} = 1.2\text{k}\Omega$$

$$r_o \approx R_c = 4\text{k}\Omega$$

## 四、共集极放大电路

### 1. 结构特点

共集放大电路如图 5.46 (a) 所示，图 5.46 (b) 是它的交流通路。由交流通路可知，信号的输入回路和输出回路都以集电极为公共端，故称为共集电极放大电路，简称共集电路。因输出信号由发射极对地输出，又称为射极输出器。



(a) 共集放大电路

(b) 交流通路

图 5.46 共集放大电路及其交流通路

### 2. 性能特点

射极输出器的输出与输入的关系： $u_o = u_i - u_{be} \approx u_i$ ，所以其输出电压跟随输入电压变化，电压跟随性能好。此外，它还有输入电阻很高，而输出电阻很低的

优点，因此在实际中获得了广泛应用，如多级放大电路的输入级、中间级和输出级等都使用了射极输出器。

## 五、差动放大电路

### 1. 结构特点

差动放大电路通常用于直流放大电路（放大直流信号）的输入级，如图 5.47 所示。其结构特点是：①电路对称，即要求左右两边的元器件特性及参数尽量一致；②双端输入，可以分别在两个输入端与地之间输入信号  $u_{i1}$ ， $u_{i2}$ ；③双电源，即除了集电极电源  $U_{CC}$  外，还有一个发射极电源  $U_{EE}$ ，一般取  $|U_{CC}|=|U_{EE}|$ 。

差动放大电路的两个输入信号  $u_{i1}$  与  $u_{i2}$  间存在三种可能：①  $u_{i1}$  与  $u_{i2}$  大小相等，方向相同，称为共模输入；②  $u_{i1}$  与  $u_{i2}$  大小相等，方向相反，称为差模输入；③  $u_{i1}$  与  $u_{i2}$  既非共模，又非差模时，称为任意输入。任意输入时，可将输入信号分解为一对共模信号  $u_{ic}$  和一对差模信号  $u_{id}$ ，即

$$u_{ic} = \frac{u_{i1} + u_{i2}}{2}$$

$$u_{id} = \pm \frac{u_{i1} - u_{i2}}{2}$$

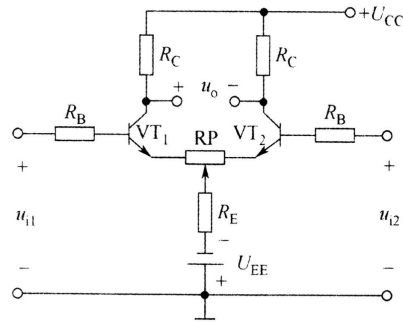


图 5.47 差动放大电路

### 2. 性能特点

共模抑制比  $K_{CMR}$  定义为差模放大倍数  $A_d$  与共模放大倍数  $A_c$  之比，即

$$K_{CMR} = \left| \frac{A_d}{A_c} \right|$$

在理想情况下，差动放大电路  $K_{CMR} \rightarrow \infty$ 。

## 六、互补对称功率放大电路

### 1. 结构特点

图 5.48 是互补对称功率放大电路的原理图，图中，一对晶体管类型不同（一个是 NPN 管，另一个是 PNP 管），但特性参数完全相同，称为对称管。对称管都从发射极输出信号，是两个射极输出器，因此功放电路由两个射级输出器组成。当有信号输入时，在信号的正半周，NPN 管导通，PNP 管截止，负载上的输出波形为正半周。信号处于负半周时，PNP 管导通，NPN 管截止，负载上的输出波形为负半周。由于两管对称，工作时，轮流工作，互相补充，故称为互补对称电路。

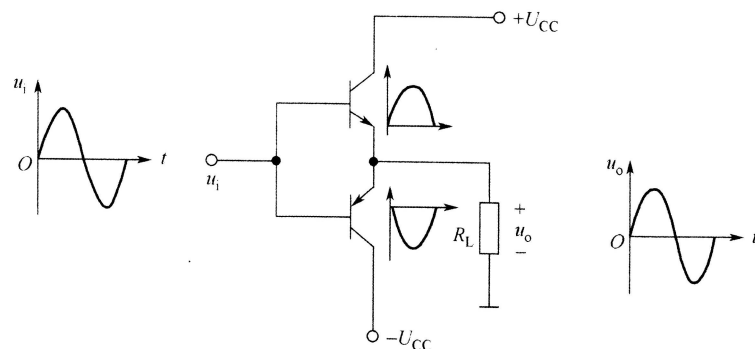


图 5.48 互补对称功率放大电路

## 2. 性能特点

因为互补对称电路在无信号输入时,  $I_B=0$ ,  $I_C \approx 0$ , 管子本身的损耗很小, 所以电路的效率高; 有信号输入时, 两管交替工作, 并且管子往往在接近极限运用状态下工作, 输出功率大; 两管都是射极输出, 所以输出电阻低也是它的主要特点。

## 六、三极管在汽车中的应用

### 1. 汽油机用电子转速表电路

汽油机用电子转速表的转速信号一般取自点火系统的分电器触点(如为电子点火系统, 则取自点火线圈“-”接线柱)。图 5.49 是利用电容器充放电的脉冲式电子转速表的原理图。当发动机工作时, 分电器触点不断开闭, 其开闭次数与发动机转速成正比(曲轴每转一圈, 四冲程四缸发动机, 触点开闭两次; 六缸发动机, 触点开闭三次)。触点开闭产生断续电流, 经积分电路  $R_1$ 、 $R_2$ 、 $C_1$  整形送至三极管  $VT_1$ , 从而取得一个具有固定幅值(电流值)和脉冲宽度(时间)的矩形波电流, 此电流通过毫安表(mA)。

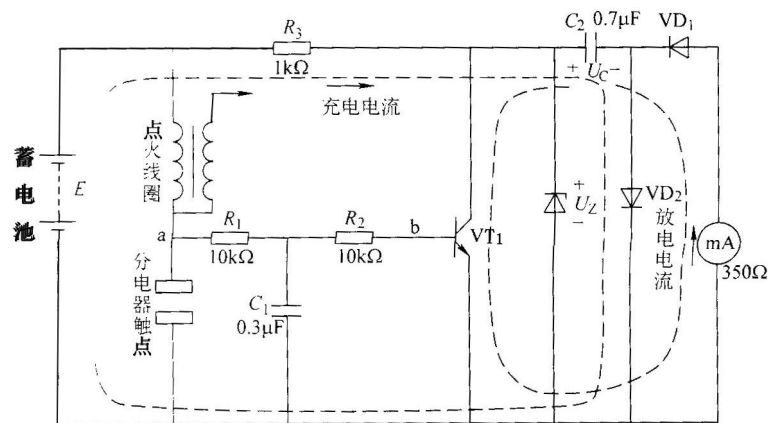


图 5.49 汽油机用电子转速表

### 2. 国产 BD-71F 型有触点电感储能式电子点火系电路

国产 BD-71F 型有触点电感储能式电子点火系电路如图 5.50 所示。图中  $R_1$ 、 $R_2$  组成分压器, 用来控制大功率三极管  $VT_1$  的基极电流,  $R_2$  不仅是  $VT_1$  的偏流电阻, 还是  $VT_3$  的负载电阻。  $R_3$  为  $VT_3$  的偏流电阻,  $C$  用来保护三极管  $VT_1$ , 二极管  $VD_2$  的作用是保证前级 ( $VT_3$ ) 饱和时, 后级 ( $VT_1$ ) 能可靠截止。

电路分析如下:

合上点火开关  $S$ , 当触点  $K$  闭合时, 三极管  $VT_3$  的基极搭铁, 发射结被短路,  $VT_3$  截止。蓄电池通过  $R_2$ ,  $VD_2$  向大功率三极管  $VT_1$  提供偏流, 使其导通。于是, 接通了初级回路产生的初级电流, 其路线为: 蓄电池“+”极→点火开关  $S$ →点火线圈初级绕组  $N_1$ →附加电阻  $R_f$ → $VT_1$  (ce 极)→搭铁→蓄电池“-”极。

当触点被顶开时,  $VT_3$  基极搭铁被解除, 蓄电池通过  $R_3$  向  $VT_3$  提供偏流, 使  $VT_3$  导通, 于是  $VT_1$  的发射结被短路,  $VT_1$  截止, 点火线圈中的初级电流被切断, 在次级绕组中产生高压电动势。

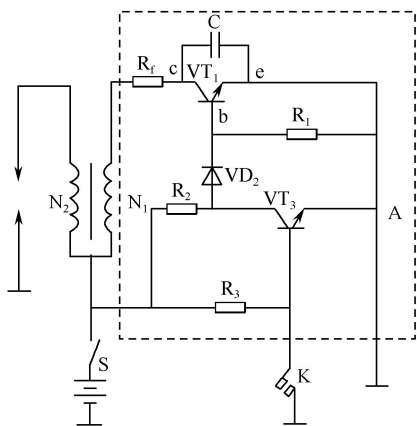


图 5.50 国产 BD-71F 型电子点火系电路

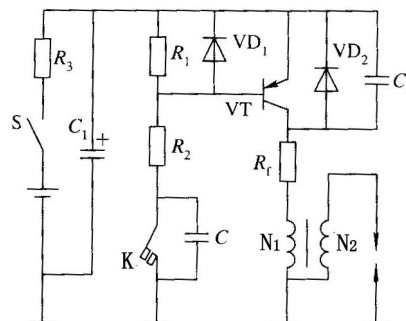


图 5.51 博士触点式电子点火系原理电路

电路

博士触点式电感储能电子点火系在国外应用较广泛，其原理电路如图 5.51 所示。工作原理请读者自行分析。

### 3. JKF667 型电子点火控制器

JKF667 型电子点火控制器电路如图 5.52 所示。电路分析如下：

合上点火开关 S，蓄电池经 R<sub>3</sub> 向 VT<sub>1</sub> 提供基极电流使其导通。于是，VT<sub>2</sub> 的基极电位接近零，使 VT<sub>2</sub> 和 VT<sub>3</sub> 截止。这样，即使点火开关接通，只要发动机不运转，点火线圈初级绕组内无电流通过，可以防止点火开关未切断而使点火线圈过热及蓄电池长期放电的现象发生。

当发动机运转时，分电器轴带动转子转动，传感线圈便产生交变信号电压。当输出电压为负时，使 VT<sub>1</sub> 的基极电位下降至负值，VT<sub>1</sub> 截止。于是蓄电池通过 R<sub>4</sub> 向 VT<sub>2</sub> 提供偏置电流，使 VT<sub>2</sub> 和 VT<sub>3</sub> 导通，点火线圈初级绕组中有电流通过。当输出电压为正时，使 VT<sub>1</sub> 的基极电位升高，VT<sub>1</sub> 导通，VT<sub>2</sub> 和 VT<sub>3</sub> 截止，初级电流被切断，次级绕组中感应高压电动势。

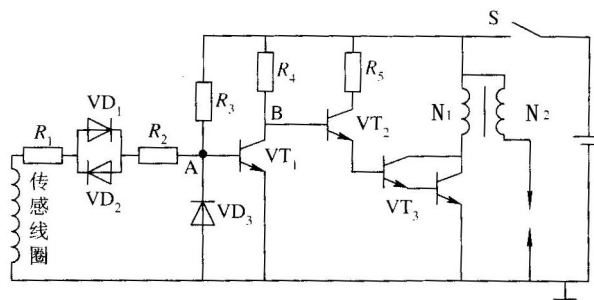


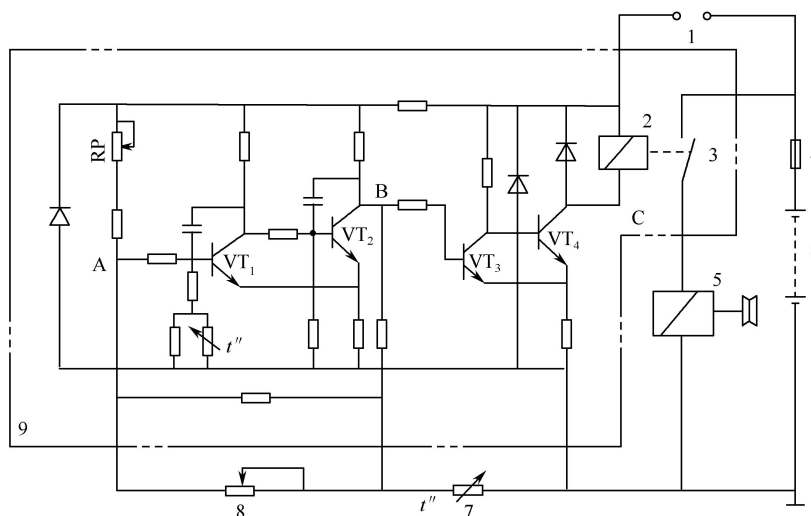
图 5.52 JKF667 型电子点火控制器电路

### 4. 汽车空调中电子式温度控制器电路

目前使用的电子式温度控制器主要是热敏电阻式。热敏电阻具有负温度系数，当热敏电阻本身的温度升高时，其电阻值减小，反之，电阻值增大。

热敏电阻式温度控制器主要由热敏电阻温度传感器、可调电阻、电子放大器和执行继电器等元件组成，其电路如图 5.53 所示。该电路由 4 只三极管 VT<sub>1</sub>~VT<sub>4</sub>、热敏电阻 7、温度控制电位器 8 和继电器 2 等主要元件组成。车内冷气温度由电位器 8 设定，热敏电阻 7 用于检测冷气温度，安装在蒸发器出风口处。当车内温度高于设定温度时，热敏电阻阻值较小，使 B 点的电位较低，则三极管 VT<sub>3</sub> 截止、VT<sub>4</sub> 导通，于是继电器线圈 2 通电，触点 3 闭合，接通了电磁离合器电路，


压缩机工作，使车内温度下降。而当车内降低到最低设定温度时，热敏电阻阻值加大，使 B 点的电位达到  $VT_3$  的工作偏压， $VT_3$  导通、 $VT_4$  截止，继电器线圈 2 断电，触点 3 断开，切断了电磁离合器电路，压缩机停止工作。如此反复来控制车内冷气温度的高低，使之保持在所设定的温度范围之内。





1—点火开关；2—继电器线圈；3—继电器触点；4—熔断丝；5—电磁离合器；

6—蓄电池；7—热敏电阻；8—温度控制电位器；9—电路板

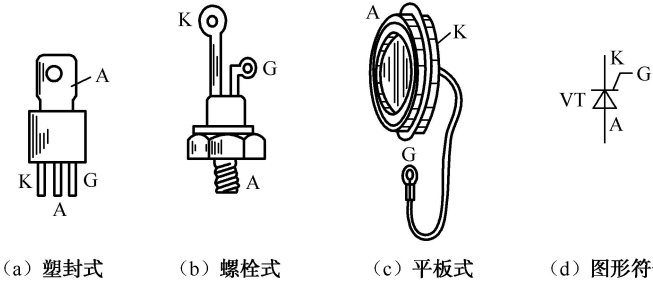
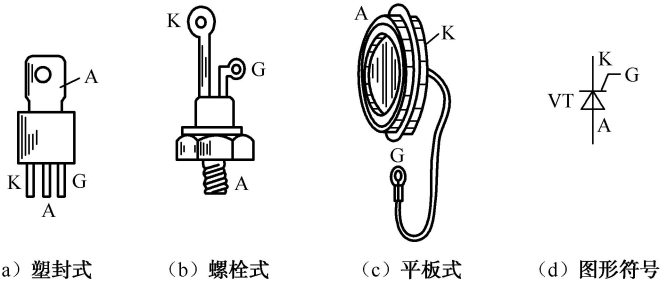
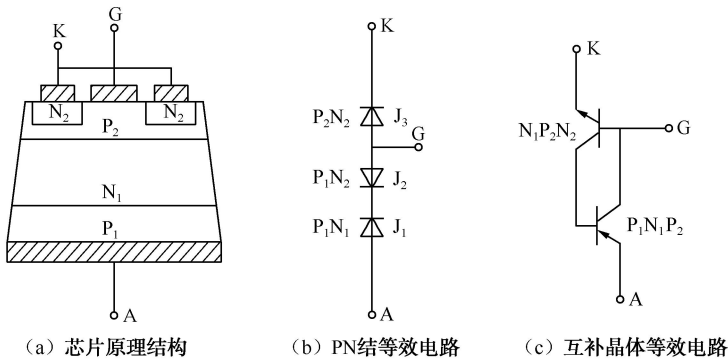
图 5.53 热敏电阻式温度控制器电路

<p><b>课堂总结</b> 10min</p>	<p>1.三极管的构成及其工作原理； 2.三极管基本知识，输入、输出特性曲线及三个工作区域的条件及其特点； 3..三极管组成的电路。</p>	<p>归纳总结本节课的知识点。</p>
<p> <b>布置作业</b></p>		
<p><b>教学反思</b></p>		

### ——《任务三 晶闸管及应用》

<p> <b>课 题</b></p>	<p><b>晶闸管及应用</b></p>		<p> <b>课型</b></p>	<p>新课</p>
<p><b>授课班级</b></p>		<p><b>授课时数</b></p>	<p>2</p>	
<p><b>教学目标</b></p>	<p>掌握晶闸管的结构、工作原理、性能指标，了解其在汽车电子电路中的应用。</p>			
<p><b>教学重点</b></p>	<p>晶闸管的工作原理。</p>			
<p><b>教学难点</b></p>	<p>晶闸管的应用。</p>			



教学方法	任务驱动法、分析法、演示法、练习法。		
时间分配	教学内容		教学方法
导入新课 5min	 <p>(a) 塑封式 (b) 螺栓式 (c) 平板式 (d) 图形符号</p>		通过让学生观察常见的晶闸管引发其思考。
讲授新课 75min	<p><b>一、晶闸管的基本结构和工作原理</b></p> <p><b>1. 晶闸管的结构</b></p> <p>晶闸管包括普通晶闸管、双向晶闸管、可关断晶闸管和逆导晶闸管等。其外形及符号如图 5.55 所示。</p>  <p>(a) 塑封式 (b) 螺栓式 (c) 平板式 (d) 图形符号</p> <p>图 5.55 晶闸管的外形和图形符号</p> <p>晶闸管有三个电极：阳极 A，阴极 K 和门极 G。它的管芯是由四层(<math>P_1N_1P_2N_2</math>)三端 (A、K、G) 半导体构成，具有三个 PN 结，即 <math>J_1</math>、<math>J_2</math>、<math>J_3</math>。因此，晶闸管可以用三个 PN 结串联来等效，如图 5.56 (b) 所示；也可以把图 5.56 (a) 中间层的 <math>N_1</math> 和 <math>P_2</math> 分成两部分，构成一个 <math>P_1N_1P_2</math> 型和另一个 <math>N_1P_2N_2</math> 型的晶体管互补电路，其等效电路如图 5.56 (c) 所示。</p>  <p>(a) 芯片原理结构 (b) PN 结等效电路 (c) 互补晶体等效电路</p> <p>图 5.56 晶闸管的内部芯片及等效电路</p> <p><b>2. 晶闸管的工作原理</b></p> <p>为了说明晶闸管的导电原理，可先观察晶闸管的简单实验情况。</p> <p>(1) 反向阻断实验</p> <p>如图 5.57 (a) 所示，晶闸管有两个回路：</p> <p><math>E_A (-) \rightarrow R_L \rightarrow VT (A \text{ 极} - K \text{ 极}) \rightarrow E_A (+)</math></p> <p><math>E_G (+) \rightarrow R_G \rightarrow \text{开关 } S \rightarrow VT (G \text{ 极} - K \text{ 极}) \rightarrow E_G (-)</math></p>		运用实验演示进行教学。

前一回路称为晶闸管的主电路，后一回路称为晶闸管的控制电路。由主电路可知，此时晶闸管的阳极电位低于阴极，加在晶闸管上的电压为反向电压。在此状态下，不论控制电路是否接通，电灯 HL 均不亮，晶闸管不导通。此时称晶闸管处于反向阻断状态。

从晶闸管的结构图可见，当晶闸管承受反向电压时，对  $J_2$  结来说虽为正向偏置，但对于  $J_1$  和  $J_3$  结则为反向偏置，它们的电阻很大，晶闸管只有极小的反向漏电流通过，所以晶闸管处于阻断状态。

要使晶闸管导通必须同时具备下列两个条件：

- ① 阳极 A 和阴极 K 之间施加正向电压。
- ② 控制极 G 与阴极 K 之间施加正向触发电压。

为了说明晶闸管的工作原理，我们把四层结构的晶闸管看成由 PNP 和 NPN 型两个晶体管连接而成，每一个晶体管的基极与另一个晶体管的集电极相连，如图 5.58 所示。阳极 A 相当于 PNP 型晶体管  $VT_1$  的发射极，阴极 K 相当于 NPN 型晶体管  $VT_2$  的发射极。

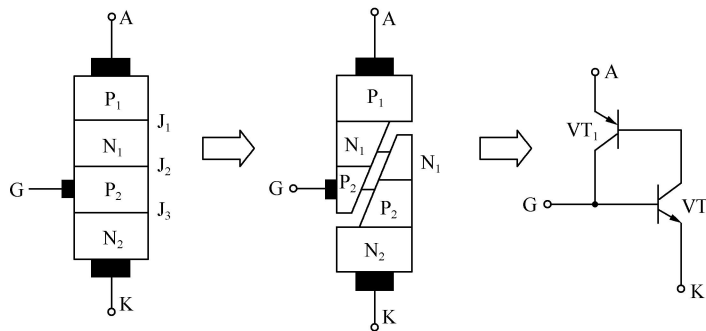


图 5.58 把晶闸管看成由 PNP 和 NPN 型两个晶体管的组合

如果晶闸管阳极加正向电压  $E_A$  控制极加正向电压  $E_G$ （见图 5.59），那么晶体管  $VT_2$  处于正向偏置，电压  $E_G$  产生的控制极电流就是  $VT_2$  的基极电流，由于  $VT_2$  的放大作用， $i_{C2} = \beta_2 i_{B2}$ 。而  $i_{C2}$  又是晶体管  $VT_1$  的基极电流， $VT_1$  的集电极电流

$i_{C1} = \beta_1 i_{C2} = \beta_1 \beta_2 i_{B2}$ 。此电流又流入  $VT_2$  基极，再一次放大。这样循环下去，形

成了强烈的正反馈，使两个晶体管很快达到饱和导通。这就是晶闸管的导通过程，导通后的管压降很小，即  $U_{AK} \approx 1V$ ，电源电压几乎全部加在负载上，晶闸管中就流过负载电流，即  $I_A \approx E_A / R_L$ 。

在晶闸管导通之后，它的导通状态完全依靠管子自身的反馈作用来维持，即使控制极电流  $i_G$

消失，晶闸管仍然处于导通状态。所以，控制极的作用仅仅是触发一下晶闸管使其导通，导通之后控制极就失去控制作用了。所以触发电压常常是一个具有一定幅度而存在时间很短的脉冲电压。要想关断晶闸管，必须将阳极电流减小到使之不能维持正反馈过程，当然也可以将阳极电源切断或者在晶闸管的阳极和阴极加上一个反向电压。

需要指出：触发电压不能太低，否则不能产生足够的触发电流，晶闸管就不能

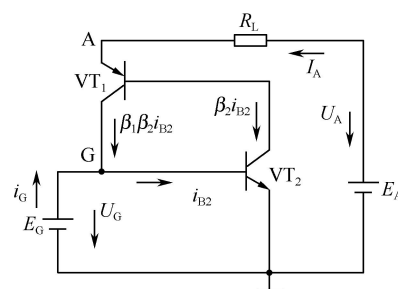


图 5.59 晶闸管的工作原理

触发导通。因此，控制极必须加上适当大小的触发电压，才能触发晶闸管使其导通。

### 三、晶闸管的伏安特性

晶闸管的伏安特性是指阳、阴极电压  $U_A$  与阳极电流  $I_A$  的关系，如图 5.60 所示。

第 I 象限是晶闸管的正向伏安特性。当  $I_G = 0$  时，由于  $J_2$  结处于反向偏置，因此，晶闸管只能流进很小的正向漏电流，此时，晶闸管处于“正向阻断状态”，当  $U_A = U_{BO}$  时， $J_2$  结被击穿，电流突然上升，晶闸管由阻断状态变为正向导通状态，用这种方法使管子导通是不可控的，而且多次这样硬导通会损坏管子。所以，正常使用时，应有适当的  $I_G$  流入门极，相应的正向转折电压远小于  $U_{BO}$ 。

第 III 象限是晶闸管的反向伏安特性。此时， $J_1$  和  $J_3$  结反偏、晶闸管只流过很小的反向电流，当反向电压增大到反向击穿电压  $U_{RO}$  时， $J_1$  和  $J_3$  结被击穿，晶闸管反向导通，此时功耗很大，晶闸管可能损坏。

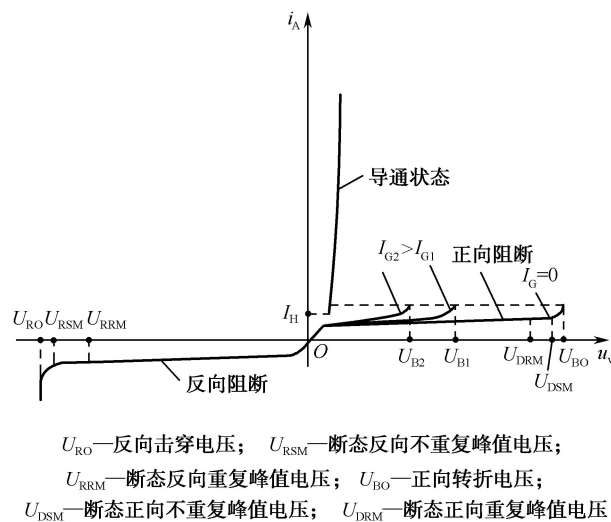


图 5.60 晶闸管的伏安特性

### 四、晶闸管的主要参数和型号

要正确使用晶闸管，不仅需要了解晶闸管的工作原理及特性，而且还要了解晶闸管参数。

#### (1) 正向阻断峰值电压 $U_{DRM}$

在控制极断开和晶闸管正向阻断的情况下，允许重复加到晶闸管阳极与阴极之间的正向峰值电压。

#### (2) 反向阻断峰值电压 $U_{RRM}$

在控制极断开的情况下，允许重复加到晶闸管阳极与阴极之间的反向峰值电压。

#### (3) 额定电压 $U_{Tn}$

通常用  $U_{DRM}$  和  $U_{RRM}$  中较小的那个数值（单位用 kV 表示）标称器件上的额定电

压。由于瞬时过电压会使晶闸管遭到损坏，因而晶闸管的额定电压应选为其正常工作峰值电压的 2~3 倍，以保证安全。

(4) 通态平均电压  $U_F$

晶闸管导通时管压降的平均值，一般在 0.4~1.2V，管压降越小，元件功耗越小。

(5) 额定正向平均电流  $I_F$

在环境温度不超过 40℃和规定的散热条件下，晶闸管的阳极与阴极之间允许的工频（50Hz）正弦半波电流的平均值。

(6) 维持电流  $I_H$

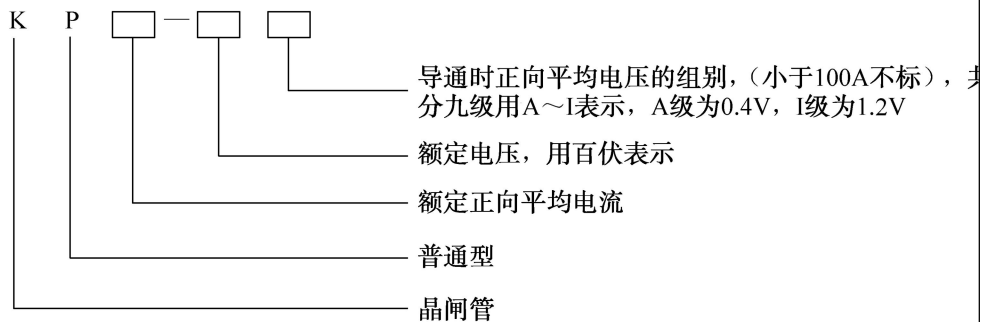
在规定的环境温度和门极断开的情况下，维持晶闸管继续导通所需的最小阳极电流，称为维持电流  $I_H$ 。当晶闸管的阳极电流小于此值时，晶闸管将自行关断。 $I_H$  一般为几十至二三百毫安。

(7) 门极触发电流  $I_{GT}$

指晶闸管由断态转入通态所必需的最小门极电流。

(8) 门极触发电压  $U_{GT}$

指产生门极触发电流所必需的最小门极电压。  
目前我国生产的普通型晶闸管的型号组成如下：



例如，型号为 KP100-12G 的晶闸管，表示它是普通型，额定电流为 100A，额定电压为 1200V，正向导通管压降为 G 组（即 1V）。

### 五、晶闸管分类

#### 1. 普通晶闸管

普通晶闸管（SCR），就是上述介绍过的晶闸管。即由 PNP 半导体材料构成的四层三端半导体器件，三个引出端分别为阳极 A、阴极 K 和门极 G。

#### 2. 双向晶闸管

双向晶闸管是五层三端半导体器件，如图 5.61（a）所示。它的外观与普通晶闸管相似，也有三个电极：P<sub>1</sub> 与 N<sub>4</sub> 共同引出主电极 T<sub>1</sub>；P<sub>2</sub> 与 N<sub>2</sub> 共同引出主电极 T<sub>2</sub>；P<sub>3</sub> 与 N<sub>3</sub> 共同引出控制极 G。双向晶闸管的内部结构可等效为 P<sub>1</sub>N<sub>1</sub>P<sub>2</sub>N<sub>2</sub> 和 N<sub>4</sub>P<sub>1</sub>N<sub>1</sub>P<sub>2</sub> 两只反向并联的普通晶闸管，如图 5.61（b）所示。因此，无论给双向晶闸管的主电极 T<sub>1</sub>、T<sub>2</sub> 间加正向电压还是反向电压，只要控制极有触发信号（无论正负）双向晶闸管就可以被触发导通。双向晶闸管具有可控的双向导通特性。图 5.61（c）为双向晶闸管的图形符号。

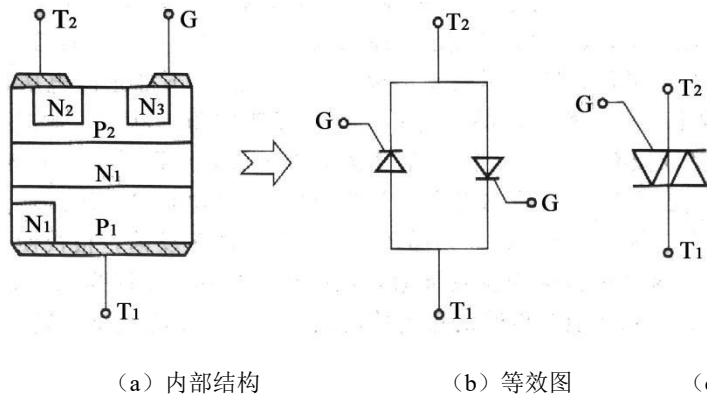


图 5.61 双向晶闸管

### 3.可关断晶闸管

可关断晶闸管（GTO）也称门控晶闸管。其主要特点是当门极加反向触发信号时晶闸管能自行关断。可关断晶闸管（以 P 型门极为例）是由 PNPN 四层半导体材料构成，其三个电极分别为阳极 A、阴极 K 和门极 G。图 5.62 所示是可关断晶闸管的结构和电路图形符号。可关断晶闸管也具有单向导电特性，即当其阳极 A、阴极 K 两端加正向电压，在门极 G 上加正的触发电压时，晶闸管将导通。

### 4.光控晶闸管

光控晶闸管（LAT）俗称光控硅，内部由 PNPN 四层半导体材料构成，可等效为两个晶体管和一个光敏二极管组成的电路，如图 5.63 所示。

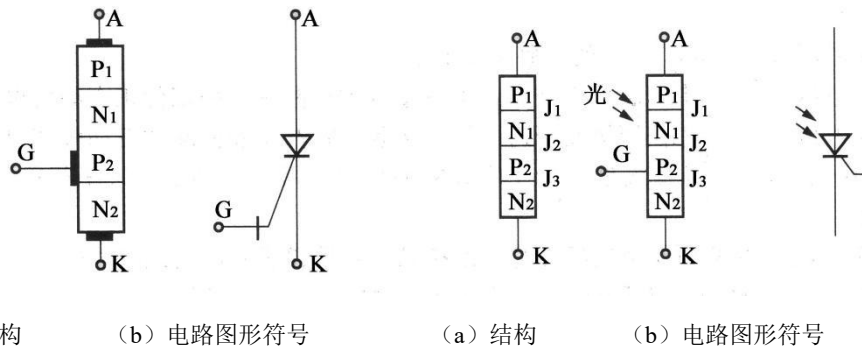



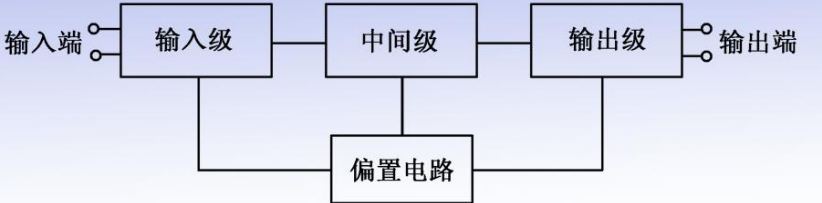
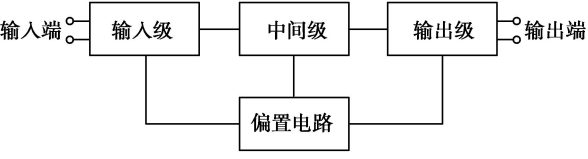


图 5.62 可关断晶闸管的结构和电路图形符号

图 5.63 光控晶闸管的结构和电路图形符号

<p><b>课堂总结</b> 10min</p>	<p>1.晶闸管的构成及其工作原理； 2.晶闸管在汽车中的应用。</p>	<p>归纳总结本节课的知识点。</p>
<p> <b>布置作业</b></p>		
<p><b>教学反思</b></p>		

——《任务四 集成运算放大电路及应用》

 <b>课 题</b>	<h2 style="color: #00AEEF;">集成运算放大电路及应用</h2>	 <b>课型</b>	新课
<b>授课班级</b>		<b>授课时数</b>	2
<b>教学目标</b>	1.明确集成运算放大器组成、电路符号； 2.理解理想集成运算放大器特性； 3.掌握集成运放在线性、非线性状态下的特点； 4.明确常用集成运放种类及其封装； 5.了解集成运放使用注意。		
<b>教学重点</b>	1.集成运放在线性、非线性状态下的特点； 2.集成运放使用注意。		
<b>教学难点</b>	1.理想集成运算放大器特性； 2.集成运放在线性、非线性状态下的特点。		
<b>教学方法</b>	任务驱动法、分析法、演示法、练习法。		
<b>时间分配</b>	<b>教学内容</b>	<b>教学 方法</b>	
<b>导入新课</b> 5min	<div style="background-color: #e6f2ff; padding: 10px;"> <h3 style="color: #c00000; margin: 0;">1. 集成运算放大器的基本组成</h3>  </div>	通过让学生观察常见的集成运算放大器引发其思考。	
<b>讲授新课</b> 75min	<h3>一、集成运算放大器的基本组成</h3> <p>集成运算放大器是一种集成化的半导体器件，简称为集成运放组件。实际的集成运放组件有许多不同的型号，每一种型号的内部线路都不同。从使用的角度看，我们感兴趣的只是它的参数和特性指标及使用方法。集成运算放大器的类型很多，电路也各不相同，但从电路的总体结构上看，基本上都由输入级、中间放大级、功率输出级和偏置电路四个部分组成，如图 5.55 所示。</p>  <p style="text-align: center;">图 5.55 集成运算放大器的组成框图</p> <p>常用的集成运算放大器有 LM324、UA741、OP07、NE5532 等型号，其引脚和连接图查阅相关芯片资料即可获得。</p>		运用实验演示进行教学。

## 二、集成运算放大器的特点

(1) 以目前的工艺水平在集成电路工艺中还难以制造电感元件，制造容量大于 200pF 的电容也比较困难，而且性能很不稳定，所以集成电路中要尽量避免使用电容器。而运算放大器各级之间都采用直接耦合，基本上不采用电容元件，必须使用电容器的场合，也大多采用外接的办法。

(2) 运算放大器的输入级都采用差动放大电路，它要求两管的性能应该相同。而集成电路中的各个晶体管是通过同一工艺过程制作在同一硅片上，容易获得特性一致，因此，容易制成温度漂移很小的运算放大器。

(3) 在集成电路中，比较合适的电阻的阻值为  $100\Omega \sim 30k\Omega$ 。制作高阻值的电阻成本高，占用面积大，且阻值偏差大。在集成运算放大器中往往利用晶体管恒流源代替电阻，当必须使用高阻值电阻时，需采用外接方式。

## 三、集成运算放大器的基本分析方法

在分析运算放大器时，为便于分析和计算，将它视为理想运算放大器，即：

开环电压放大倍数  $A_u = \infty$ ；

输入电阻  $r_i = \infty$ ；

输出电阻  $r_o = 0$ ；

共模抑制比  $K_{CMR} = \infty$ 。

集成运算放大器的传输特性曲线（表示输出电压与输入电压之间关系的曲线称为传输特性曲线）如图 5.57 所示。其中（a）图为理想运放的特性曲线，（b）图为实际运放的特性曲线。其传输特性曲线分为线性区和饱和区两个部分。

在线性区，输出电压与输入电压呈简单的线性关系，但由于集成运放的开环电压放大倍数  $A_u$  非常大，所以输入电压  $u_i$  的允许变化范围是极其小的。例如，设  $A_u$  为 10000，集成运放的最大输出电压为  $\pm 12V$ ，则输入电压的线性变化范围为  $\pm 1.2mV$ ，而目前广泛应用的集成运放的开环电压放大远远大于 10000，即使输入毫伏级以下的信号，也足以使集成运放饱和。所以要使集成运放工作在线性区，通常要引入深度负反馈。

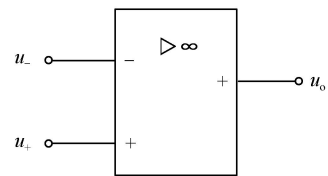


图 5.56 理想运算放大器的符号

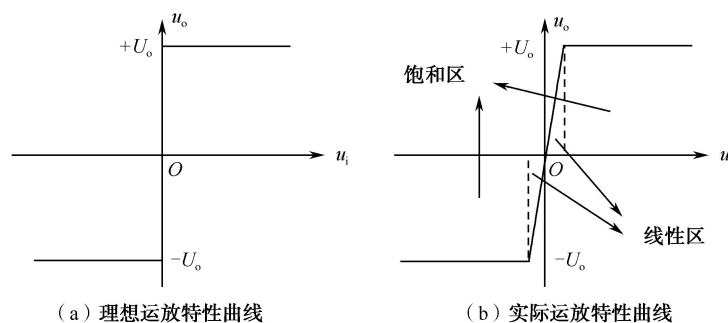


图 5.57 传输特性曲线

对于工作在线性区的理想运算放大器分析时有以下两条简化原则。

(1) 集成运算放大器同相输入端和反相输入端的电位相等（虚短）。在线性工作范围内，集成运算放大器两个输入端之间的电压为  $u_i = u_+ - u_- = u_o / A_u$ ，因为  $u_o$  为一有限值，而  $A_u$  为无穷大，所以

$$u_i = u_+ - u_- = 0$$

即

$$u_+ = u_- \quad (5-34)$$

(2) 集成运算放大器同相输入端和反相输入端的输入电流等于零（虚断）。因为理想集成运算放大器的输入电阻  $r_i = \infty$ ，所以由同相输入端和反相输入端流入集成运算放大器的信号电流为零，即

$$i_+ = i_- = 0 \quad (5-35)$$

由第一个结论可知，集成运算放大器同相输入端和反相输入端的电位相等，因此，两个输入端之间好像短路，但又不是真正的短路（即不能用一根导线把同相输入端和反相输入端短接起来），故这种现象称为“虚短”。理想集成运算放大器工作在线性区域时，“虚短”现象总是存在的。

由第二个结论可知，理想集成运算放大器的两个输入端不从外部电路取用电流，两个输入端之间好像断开一样，但又不能真正断开，故这种现象通常称为“虚断”。对于理想集成运算放大器，无论它是工作在线性区，还是工作在线性区，该结论总是成立的。

当理想集成运算放大器工作在饱和区（非线性区）时，输出电压只有如下两种可能：

当  $u_+ > u_-$  时， $u_o = U_{o+}$

当  $u_+ < u_-$  时， $u_o = U_{o-}$

其中  $U_{o+}$ 、 $U_{o-}$  分别为集成运放正向饱和输出电压值和负向饱和输出电压值。

#### 四、运算放大器组成的基本运算电路

##### (1) 反相比例运算电路

反相运算电路是一类线性放大电路，待放大的输入信号加在反相输入端与参考端之间，经放大后的输出信号与输入信号相位相反，这是应用最为广泛的一种输入方式，可构成反相比例、加法、微分、积分、对数等运算电路。

如图 5.58 所示的电路，输入信号  $u_i$  加到电阻  $R_1$  和集成运放的反相输入端之间，反馈电阻  $R_f$  跨接在输出端与反相输入端之间，形成电压并联负反馈，其作用是使电路工作在线性状态。该电路称为反相输入比例运算放大电路，它是反相输入运算电路中最基本的形式。

运算放大器工作在线性区的两条依据是

$$u_+ = u_- \quad i_+ = i_- = 0$$

$R_1$  上无电压降，则  $u_+ = u_- = 0$ ，即集成运算放大器反相输入端的电位近似等于“地”电位，但又不是“地”电位，这种现象称为“虚地”。“虚地”是反相输入运算电路的一个重要特点。应用“虚地”的特点分析反相输入运算电路是十分方便的。利用“虚地”的概念可知

$$\frac{u_i - u_-}{R_1} = \frac{u_- - u_o}{R_f}$$

即

$$\frac{u_i}{R_1} = -\frac{u_o}{R_f}$$

所以闭环电压放大倍数为

$$A_{uf} = \frac{u_o}{u_i} = -\frac{R_f}{R_1} \quad (5-36)$$

式 (5-36) 中负号表示输出电压与输入电压反相位。这就是反相比例运算电路名称的由来。

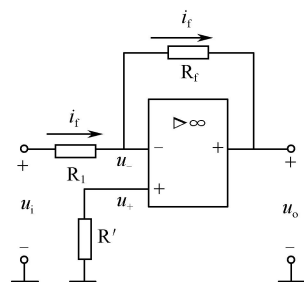


图 5.58 反相比例运算电路



电路中同相输入端的外接电阻  $R$  为平衡电阻，它的作用是保证运算放大器差分输入级输入端静态电路的平衡。 $R$  的取值应为  $R=R_1 // R_f$ 。

(2) 同相比例运算电路

如图 5.59 所示电路，输入信号  $u_i$  经外接电阻  $R_2$  加到集成运放的同相输入端与地之间。而反相输入端经电阻  $R_1$  接地，反馈电阻跨接在输出端和输入端之间，形成电压串联负反馈。

根据运算放大器工作在线性区的两条依据：

$$u_+ = u_- = u_i, \quad i_+ = i_- = 0$$

可得

$$i_i = i_f$$

所以

$$\frac{0 - u_i}{R_1} = \frac{u_i - u_o}{R_f}$$

即

$$u_o = \left(1 + \frac{R_f}{R_1}\right) u_i$$

闭环电压放大倍数为

$$A_{uf} = \frac{u_o}{u_i} = 1 + \frac{R_f}{R_1} \quad (5-37)$$

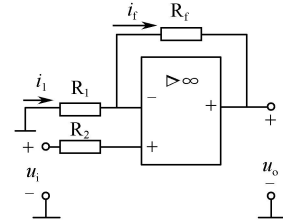


图 5.59 同相比例运算电路

(3) 反相加法运算电路

在实际应用中，常要对一组信号进行组合处理。利用反相比例运算电路的输入端增加若干输入，通过把电压信号转变成电流信号后进行相加，即可构成反相加法运算电路。电路如图 5.61 所示。

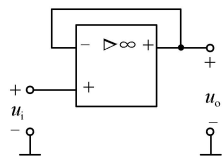


图 5.60 电压跟随器

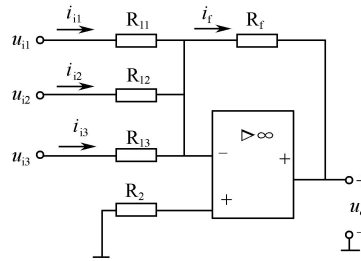


图 5.61 反相加法运算电路

路

按节点电流定律可得

$$i_f = i_{i1} + i_{i2} + i_{i3}$$

依据理想运算放大器工作在线性区的两条结论：

$$u_+ = u_-, \quad i_+ = i_- = 0$$

整理得

$$u_o = -\left(\frac{R_f}{R_{11}} u_{i1} + \frac{R_f}{R_{12}} u_{i2} + \frac{R_f}{R_{13}} u_{i3}\right) \quad (5-38)$$

当  $R_{11}=R_{12}=R_{13}=R_1$  时，

$$u_o = -\frac{R_f}{R_1} (u_{i1} + u_{i2} + u_{i3}) \quad (5-39)$$

当  $R_1=R_f$  时，

$$u_o = -(u_{i1} + u_{i2} + u_{i3}) \quad (5-40)$$

式中,  $R_2$  为平衡电阻, 其取值为  $R_2=R_{11} // R_{12} // R_{13} // R_f$ 。

#### (4) 减法运算电路

如图 5.62 所示, 输入信号  $u_{i1}$  和  $u_{i2}$  分别加至集成运算放大器的反相输入端和同相输入端。利用工作在线性状态运算放大器的“虚短”和“虚断”性质, 应用叠加定理进行分析。

先设  $u_{i2}$  单独作用, 而  $u_{i1}=0$ , 此时电路相当于一个反相比例运算电路, 由  $u_{i1}$  产生的输出电压  $u_{o1}$  为

$$u_{o1} = -\frac{R_f}{R_1} u_{i1}$$

再设  $u_{i1}$  单独作用, 而  $u_{i2}=0$ , 此时电路相当于一个同相比例运算电路, 由  $u_{i2}$  产生的输出电压  $u_{o2}$  为

$$u_{o2} = (1 + \frac{R_f}{R_1}) u_+ = (1 + \frac{R_f}{R_1}) (\frac{R_3}{R_2 + R_3}) u_{i2}$$

由此可得总输出电压为

$$u_o = u_{o1} + u_{o2} = (1 + \frac{R_f}{R_1}) (\frac{R_3}{R_2 + R_3}) u_{i2} - \frac{R_f}{R_1} u_{i1} \quad (5-41)$$

当  $R_1=R_2$ ,  $R_3=R_f$  时,

$$u_o = \frac{R_f}{R_1} (u_{i2} - u_{i1}) \quad (5-42)$$

可见, 输出电压与两个输入电压的差值成正比, 所以该电路又称为差分比例运算电路。

当  $R_1=R_f$  时,

$$u_o = u_{i2} - u_{i1} \quad (5-42)$$

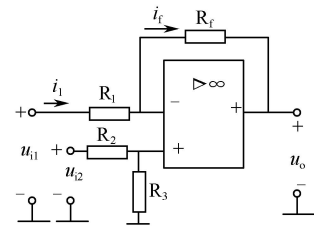


图 5.62 减法运算电路

## 五、基本运算电路的应用举例

### (1) 电压电流变换器

电压电流变换器是将输入的电压信号转变成与之成正比的电流信号。在一定的负载变换范围内, 若保持输入电压不变, 输出电流就恒定不变, 电压电流变换器就相当于一个恒流源。如图 5.63 所示为同相输入的电压电流变换电路, 在理想运放的条件下有

$$i_L = i_1 = -\frac{u_i}{R_1} \quad (5-43)$$

故经负载电阻  $R_L$  上的电流  $i_L$  与输入电压  $u_i$  成正比, 而与负载电阻  $R_L$  的大小无关, 只要输入电压恒定, 输出电流也就恒定。

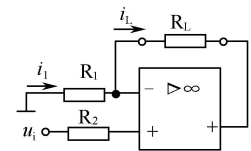


图 5.63 电压电流变换电路

### (2) 电压比较器

集成运放不仅可以对信号进行运算, 还可以对信号进行处理, 包括信号的滤波、比较与选择、采样与保持等。其中, 电压比较器就是一种典型的集成运放非线性应用电路。

图 5.64 (a) 所示是一个简单的单值电压比较器电路图。图中, 运放的同相输入端接参考电压  $U_{REF}$ , 反相输入端接输入电压  $u_i$ 。运放处于开环工作状态, 当  $u_i$

$> U_{REF}$ 时，输出电压  $u_o = -U_{om}$ ；当  $u_i < U_{REF}$ 时，输出电压  $u_o = +U_{om}$ 。其传输特性如图 5.64 (b) 所示。

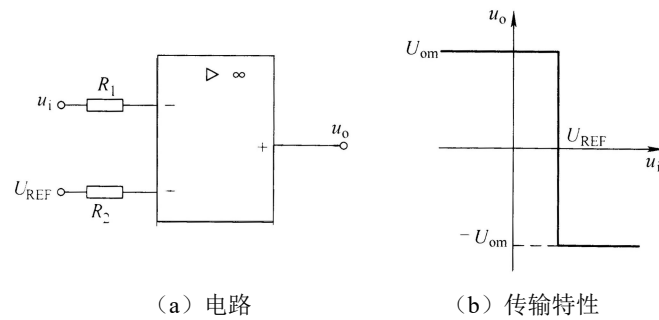


图 5.64 单值电压比较器电路图

特别地，若运放的同相输入端接地，则参考电压为  $U_{REF} = 0V$ ，这时的电压比较器称为过零比较器。当过零比较器的输入信号  $u_i$  为正弦波时，输出电压为正负宽度相同的矩形波，如图 5.65 所示。

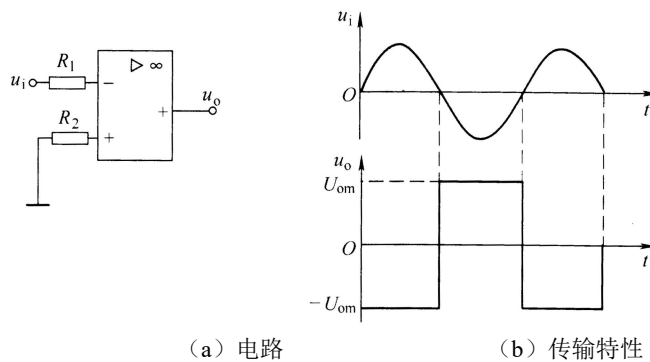


图 5.65 电压过零比较电路

### (3) 测量放大器

在自动控制测量系统中，一般是通过传感器将如温度、压力、位移等非电量信息转换成电压信号，但这种电压信号的变化往往非常小，通过一个运算放大器构成的差分放大电路往往不够用，常用几个运算放大器构成多级运算放大电路，将微弱的电信号放大到足够的幅度和大小。

电路如图 5.66 所示， $A_1$ 、 $A_2$  组成第一级运放， $A_3$  组成第二级差分运放。该电路均采用同相输入，所以输入电阻较高；电路结构对称，能很好地抑制零点漂移。由于电路结构上下对称，可以确定电阻  $R_1$  的中间电位为地电位。

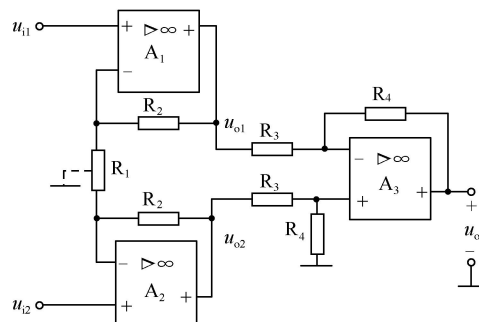





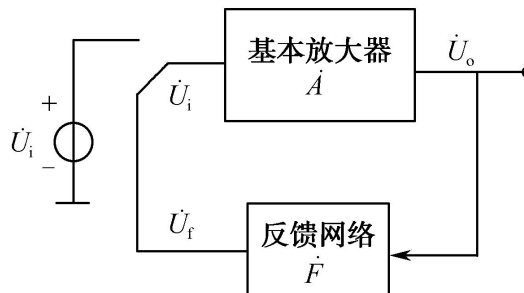
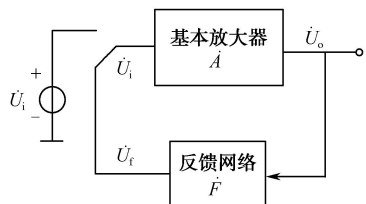
图 5.66 测量放大器电路

根据同相比值运算电路的性质，有  $A_1$  的输出电压为

	$u_{o1} = (1 + \frac{R_2}{R_1/2})u_{i1} = (1 + \frac{2R_2}{R_1})u_{i1}$ <p>A<sub>2</sub> 的输出电压为</p> $u_{o2} = (1 + \frac{2R_2}{R_1})u_{i2}$ <p>第二级构成减法运算电路，<math>u_{o1}</math>、<math>u_{o2}</math> 分别为 A<sub>3</sub> 的反相端和同相端输入信号。则 A<sub>2</sub> 的输出电压为</p> $u_o = \frac{R_4}{R_3}(u_{o2} - u_{o1})$ <p>将 <math>u_{o1}</math>、<math>u_{o2}</math> 代入，可得</p> $u_o = \frac{R_4}{R_3}(1 + \frac{2R_2}{R_1})(u_{i2} - u_{i1})$ <p>即电路总的电压放大倍数为</p> $A_{uf} = \frac{u_o}{u_{i1} - u_{i2}} = -\frac{R_4}{R_3}(1 + \frac{2R_2}{R_1}) \quad (5-44)$	
课堂总结 10min	<ol style="list-style-type: none"> <li>1.明确集成运算放大器组成、电路符号。</li> <li>2.理解理想集成运算放大器特性。</li> <li>3.掌握集成运放在线性、非线性状态下的特点。</li> <li>4.明确常用集成运放种类及其封装。</li> </ol>	归纳总结本节课的知识点。
 布置作业		
教学反思		

### ——《任务五 正弦波振荡电路》

 课 题	<b>正弦波振荡电路</b>	 课型	新课
授课班级		授课时数	2
教学目标	正弦波振荡电路的振荡条件及电路组成，了解正弦波振荡器的应用。		
教学重点	正弦波振荡电路的振荡条件及电路组成		
教学难点	正弦波振荡器的应用。		
教学方法	任务驱动法、分析法、演示法、练习法。		
时间分配	教学内容	教学方法	

<p>导入新课 5min</p>		<p>通过让学生观察常见的正弦波振荡电路引发其思考。</p>
<p>讲授新课 75min</p>	<p><b>一、正弦波振荡器的振荡条件及基本组成</b></p> <p>正弦波振荡器由放大器和反馈网络组成，如图 5.81 所示。假设开关置向外加信号输入端，这时在基本放大电路的信号输入端加入了一定频率和幅度的正弦波信号 <math>\dot{U}_i</math>，此信号经放大器放大后产生输出信号 <math>\dot{U}_o</math>，而 <math>\dot{U}_o</math> 又作为反馈网络的输入信号，经反馈网络后产生反馈信号 <math>\dot{U}_f</math>。如果反馈信号与原来的输入信号 <math>\dot{U}_i</math> 大小和相位均相同，这时将开关拨到反馈信号端，放大器和反馈网络组成闭环系统。此时，在没有外加信号输入的情况下，输出端可输出一定频率和幅度的信号 <math>\dot{U}_o</math>，从而产生自激振荡。</p> <p>(1) 振荡的平衡条件</p> <p>当反馈信号 <math>\dot{U}_f</math> 等于电路的输入信号 <math>\dot{U}_i</math> 时，电路的输出 <math>\dot{U}_o</math> 保持稳定，电路由此达到了稳定状态，因为电路振荡的平衡条件是 <math>\dot{U}_i = \dot{U}_f</math>。</p> <p>由图 5.81 可知</p> $A_u = \frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_i}, F_u = \frac{\dot{U}_f}{\dot{U}_o} \quad (5-45)$ $\dot{U}_f = F_u \dot{U}_o = A_u F_u \dot{U}_i \quad (5-46)$ <p>由此可得振荡的平衡条件为</p> $\dot{A}_u \dot{F}_u = \left  \dot{A}_u \dot{F}_u \right  \angle \varphi_a + \varphi_f = 1 \quad (5-47)$ <p>根据相量的性质，振荡的平衡条件包含了两个方面的平衡内容： 振幅平衡条件：</p> $\left  \dot{A}_u \dot{F}_u \right  = 1 \quad (5-48)$	<p>运用实验演示进行教学。</p>  <p>图 5.81 正弦波振荡电路组成框图</p>

相位平衡条件:

$$\varphi_a + \varphi_f = 2n\pi \quad (n = 0, 1, 2, \dots) \quad (5-49)$$

对于一个振荡电路, 只有同时满足振幅平衡条件和相位平衡条件, 才能实现稳幅振荡。

### (2) 振荡的起振条件

上面所说的振荡的平衡条件, 是指振荡电路进入稳定振荡后而言。而在实际应用中, 不可能另外提供信号源使电路进入稳定后再断开, 而是利用接通直流电源后产生的微弱的电扰动, 从中包含的谐波成分中取出与选频网络对应的特定频率经过一系列的放大、反馈后达到一定幅度的振荡。所以在起振的时候要求反馈电压的幅度大于当时的输入信号, 而且要同相位。因此, 振荡的起振条件也包含了相位条件和振幅条件两个方面。

①起振的振幅条件:

$$\left| \dot{A}_u \dot{F}_u \right| > 1 \quad (5-50)$$

②起振的相位条件:

$$\varphi_a + \varphi_f = 2n\pi \quad (n = 0, 1, 2, \dots) \quad (5-51)$$

### (3) 正弦波振荡器的基本组成

正弦波振荡器由放大电路和反馈网络组成。此外在电路中还应包含有选频网络和稳幅环节, 使电路能获得单一频率的稳定幅度的正弦波振荡信号。

正弦波振荡器的选频网络根据组成元件的不同可分为不同的正弦波振荡电路。选频网络由 R、C 元件组成的称为 RC 正弦波振荡电路; 由 L、C 元件组成的称为 LC 振荡电路。

## 2. 电感三点式 LC 正弦波振荡电路

电感三点式振荡电路如图 5.82 所示。L 线圈由  $L_1$  及  $L_2$  组成, 线圈的两端及中心抽头组成电感三点式。该电路中放大环节为晶体管分压式反相放大器, 反馈环节由 LC 串并联电路实现, 反馈类型可分析为并联、电压、交流及正反馈, 选频环节为 LC 并联谐振选频电路, 其振荡频率为

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{L'C}} = \frac{1}{2\pi\sqrt{(L_1 + L_2 + 2M)C}} \quad (5-52)$$

## 3. 电容三点式振荡电路

电容三点式振荡电路如图 5.83 所示。图中, 电容  $C_1$ 、 $C_2$  的两端及中心抽头组成电容三点式。该电路中, 放大环节同样为晶体管分压式反相放大器, 反馈环节的类型同样可分析为并联、电压、交流及正反馈, 选频环节也是 LC 并联谐振电路, 其振荡频率为

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC'}} = \frac{1}{2\pi\sqrt{L\frac{C_1C_2}{C_1+C_2}}} \quad (5-53)$$

式中,  $C'$  是振荡电路的等效电容。

由于电容三点式振荡电路的反馈电压取自于电容, 它对高次谐波的阻抗小, 有

滤波作用，因而反馈电压中谐波分量少，输出波形较好。

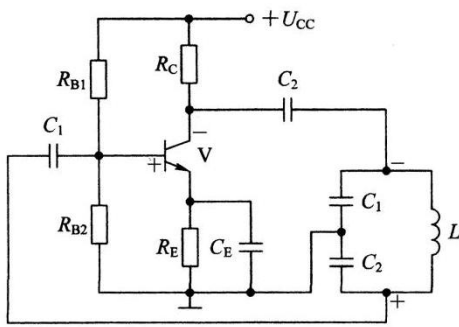


图 5.83 电容三点式振荡电路

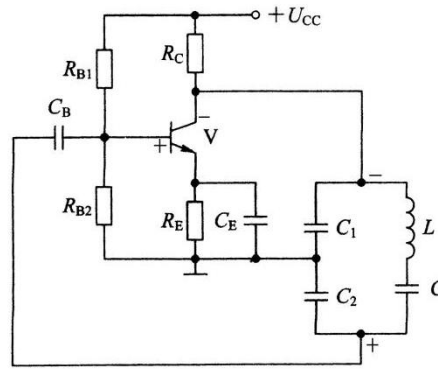


图 5.84 电容三点式改进型正弦波振荡电路

如果电路要求的振荡频率比较高，而电容  $C_1$ 、 $C_2$  小到可与三极管的极间电容相比，则管子的极间电容是不容忽略的。管子的极间电容随温度等因素的变化而变化，会对振荡频率造成显著影响，使振荡频率不稳定。为了克服这一缺点，可在电感  $L$  支路上串接一个电容  $C$ ，使振荡频率取决于  $L$  和  $C$ ， $C_1$ 、 $C_2$  只起分压作用。改进后的电路见图 5.84。

## 二、正弦波振荡器在汽车中的应用

图 5.85 为振荡式无触点电子点火控制器电路。

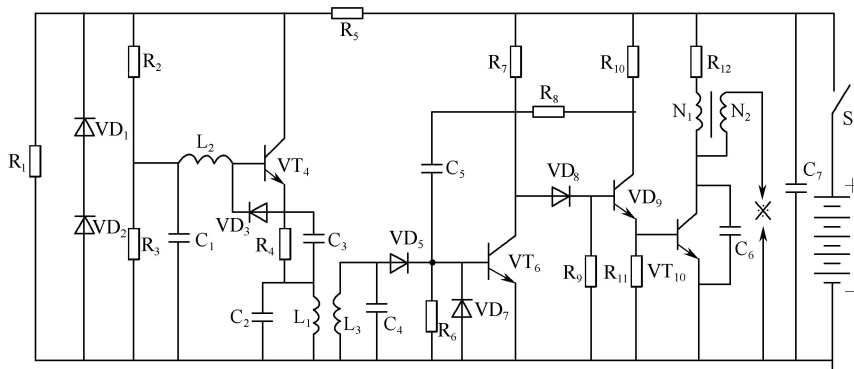



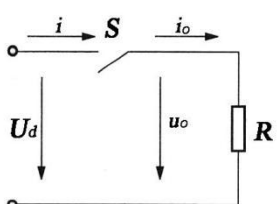
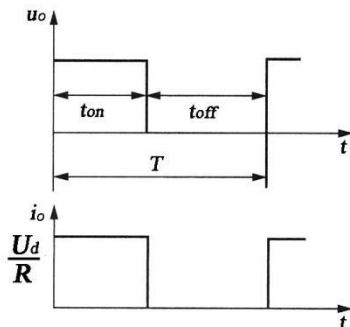


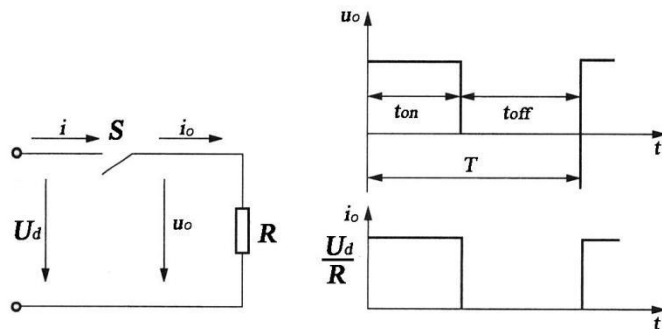
图 5.85 振荡式无触点电子点火控制电路

<p><b>课堂总结</b> 10min</p>	<p>1. 正弦波振荡电路的振荡条件及电路组成。 2. 正弦波振荡器的应用。</p>	<p>归纳总结本节课的知识点。</p>
<p> <b>布置作业</b> <b>教学反思</b></p>		

——《任务六 电源变换》

 <b>课 题</b>	<h2 style="color: #00AEEF;">电源变换</h2>		 <b>课型</b>	新课
<b>授课班级</b>			<b>授课时数</b>	2
<b>教学目标</b>	1. 掌握 PWM 开关型调压稳压电源的工作原理； 2. 掌握单相逆变电路和三相逆变电路的工作原理； 3. 交流调压电路的工作原理。			
<b>教学重点</b>	单相逆变电路和三相逆变电路的工作原理			
<b>教学难点</b>	交流调压电路的工作原理。			
<b>教学方法</b>	任务驱动法、分析法、演示法、练习法。			
<b>时间分配</b>	<b>教学内容</b>			<b>教学 方法</b>
<b>导入新课</b> 5min	 			通过让学生观察 DC—DC 变换电路引发其思考。
<b>讲授新课</b> 75min	<p><b>一、直流—直流变换(DC—DC)</b></p> <p>直流变换是将一固定直流电压变为另一固定直流电压或可调直流电压，简称 DC—DC 变换。DC—DC 变换器具有效率高、体积小、重量轻、成本低等优点，广泛应用于开关型稳压电源上和电力车辆上，如电力机车、地铁、公交车、汽车电力驱动等。</p> <p><b>1. 直流—直流变换原理</b></p> <p>直流直流变换方法有两种：一种是用斩波的方法；另一种是用专用电路将直流先变为交流，整流变为另一电压的直流，下面主要讲用斩波的方法实现气变换的原理。</p> <p>早期的直流—直流变换电路是用高频机械开关的通断来实现，形象地用“斩”来描述，因此称为斩波电路，现在已用电子开关代替机械开关，称为开关型 DC—DC 变换电路。斩波或开关型 DC—DC 变换电路如图 5.88 (a) 所示，<math>U_d</math> 为直流电源电压，<math>Q</math> 为斩波控制开关，<math>R</math> 为负载，其变换原理如下。</p> <p>当开关 <math>S</math> 合上时，直流电压加到 <math>R</math> 上并持续 <math>t_{on}</math> 时间；当开关断开时，负载上电压为零并持续 <math>t_{off}</math> 时关的工作周期 <math>T=t_{on}+t_{off}</math> 开关 <math>S</math> 的连续通断，就可获得如图 5.88 (b) 所示的斩波电路输出电压和电流波形，可以看出波形为直流方波（以下简称方波）。为了描述通断的方波脉宽对输出平均电压的方波占空比的概念，方波占空比 <math>k</math> 为方波导通时间 <math>t_{on}</math> 与方波周期 <math>T</math> 的比值，即</p> $k = \frac{t_{on}}{T} \quad (5-54)$			运用实验演示进行教学。





(a) DC—DC 变换电路 (b) 斩波电路输出电压和电流波形

5.88 基本斩波电路输出电压波形图

若所有元件都是无损耗的，方波输出直流电压平均值为

$$U_O = \frac{t_{on}}{T} U_d = k U_d$$

(5-55)

输出电流平均值为

$$I_O = \frac{U_O}{R} = k \frac{U_d}{R}$$

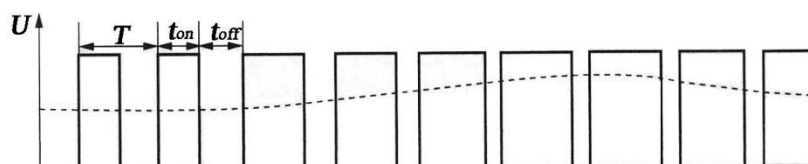
可知，只要改变电子开关  $S$  通断的时间，即改变占空比  $k$ ，就可以改变输出电压和电流的大小，从而达到斩波电路对直流调压的要求。

根据对输出电压平均值进行调制的方式不同，斩波电路有三种控制方式。

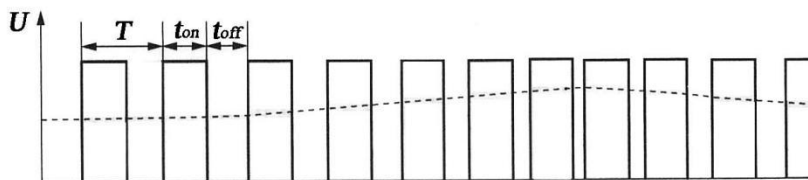
①开关周期  $T$  不变，调节开关导通时间  $t_{on}$ ，称为脉冲宽度调制，简称 PWM。图 5.89 (a) 是波形图，随着脉宽的增加或减小，输出电压  $U_O$  也随之改变。

②开关导通时间  $t_{on}$  不变，改变开关周期  $T$ ，称为频率调制或调频型，简称 PFM。图 5.89 (b) 是 PFM 调压波形图，随着频率的增加或减小，输出电压  $U_O$  也随之改变。

③  $t_{on}$  和  $T$  都可调，使占空比和频率都可改变，称为调宽调频控制。



(a) 脉宽调制式调压 (PWM)



(b) 频率调制式调压 (PFM)

图 5.89 PWM 和 PEM 调压波形图

直流方波还不能满足负载对直流电性能的需要，可以使用滤波电路，也可以使用效果更好的换能续电路，使其变为比较平稳的直流电。

## 2. 换能续流电路

换能续流电路也称储能续流电路，图 5.90 (a) 所示为开关型 DC—DC 变换稳压或调压电路，VT 开关管。电感  $L$ 、电容  $C$  和二极管  $VD$  组成储能续流电路。

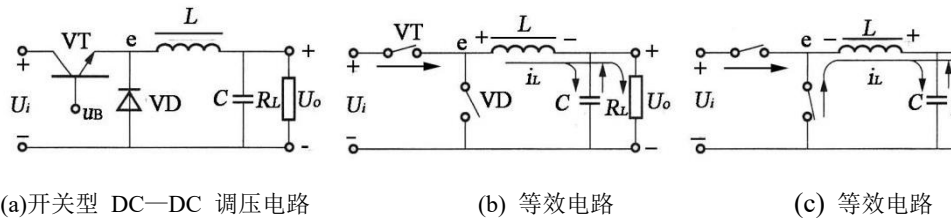


图 5.90 换能续流电路的基本原理图及其等效电路

### 3. PWM 型调压稳压电路

由功率开关管 VT 和集成电路组成的 PWM 型调压稳压电路的结构框图如图 5.91 所示。它由开关整管 VT 及其开关驱动电路（电压比较器 A<sub>2</sub>）、取样电路（电阻 R<sub>1</sub> 和 R<sub>2</sub>）、三角波发生电路、基准电压电路、比较放大电路 A<sub>1</sub>、换能续流电路等几部分构成。

当输入电压  $U_i$  增加致使输出电压  $U_o$  升高时，取样电压  $u_{N1}$  会同时增大，并作用于比较放大器 A<sub>1</sub> 反相输入端，与同相输入端的基准电压比较放大，使放大电路的输出电压  $u_{p2}$  减小，经电压比较器 A<sub>2</sub> 输出的脉冲间隔  $t_{off}$  增大，即  $u_B$  的占空比  $k$  减小，使输出电压  $U_o$  下降到预定的稳压值。其变化过程为：

$$U_i \uparrow \rightarrow U_o \uparrow \rightarrow u_{N1} \uparrow \rightarrow u_{p2} \downarrow \rightarrow t_{off} \uparrow \rightarrow k \downarrow \rightarrow U_o \downarrow$$

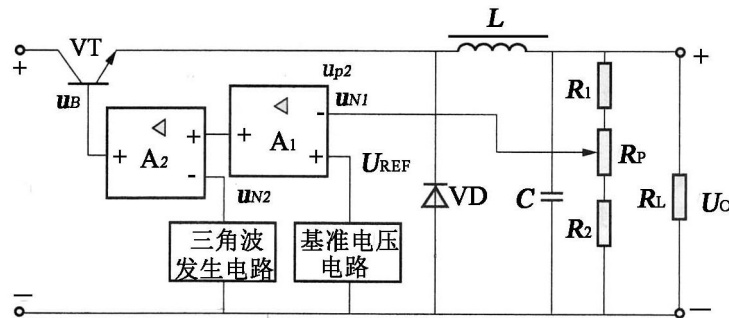


图 5.91 PWM 型调压稳压电路的结构框图

同理，当  $U_i$  下降时，与上述的变化相反，输出电压  $U_o$  上升到预定值，即

$$U_i \downarrow \rightarrow U_o \downarrow \rightarrow u_{N1} \downarrow \rightarrow u_{p2} \uparrow \rightarrow t_{off} \downarrow \rightarrow k \uparrow \rightarrow U_o \uparrow$$

所以  $U_i$  或 R 变化使  $U_o$  变化时，可自动调节脉冲波形的占空比  $k$  使输出电压  $U_o$  维持恒定。

图 5.92 所示为三角波  $u_{N2}$  和  $u_B$  的波形，可以进一步理解开关型调压稳压电路的工作原理。

当取样电压  $u_{N1} = U_{REF}$  时，比较放大器 A<sub>1</sub> 输出电压  $u_{p2} = 0$ ，三角波输入电压比较器 A<sub>2</sub> 的反相端，使 A<sub>2</sub> 输出的脉冲电压  $u_B$  的占空比  $k$  等于 50%。

图 5.94 是一种直流变换型稳压电源原理图，为了满足多种直流电压值的需求，采用了软铁氧体作铁芯的高频脉冲变压器，变压器有多个二次绕组，可产生多种电压值，有降压，有升压。由于是高频脉冲，采用半波整流和电容滤波就可获得很平稳的直流电。为了保证电网电源与变压器二次侧电路的绝缘隔离要求，二次侧的取样电压  $U_F$  经光电耦合器反馈给一次侧的 PWM 电路，实现完全的电路隔离，给直流负载的供电、使用、安全和维护带来很大方便。

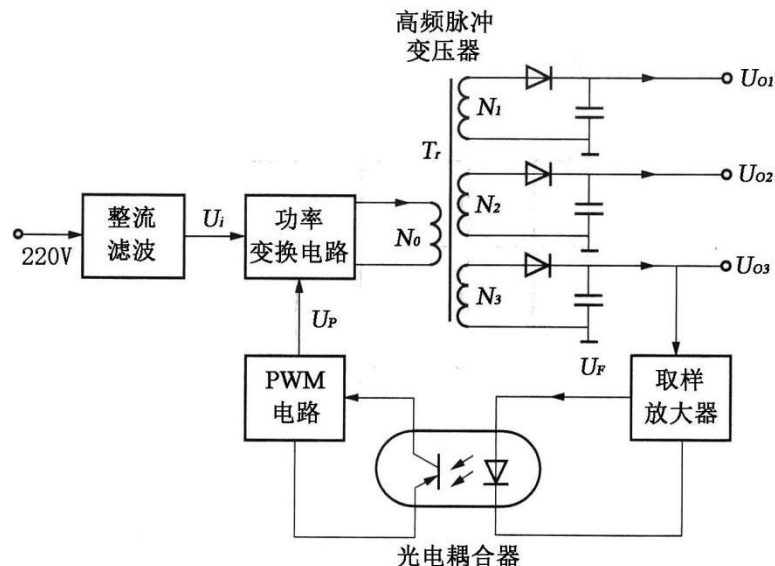


图 5.94 直流变换型稳压电源原理图

## 二、直流—交流变换 (DC—AC)

把直流电转变为交流电称为逆变，逆变电路应用非常广泛。在常用的各种电源中，蓄电池、太阳能电池等都是直流电源，当需要这些电源向交流负载供电时，就需要逆变电路。

在汽车电力驱动技术中，因三相交流电动机比直流电动机有更好的驱动特性，所以三相交流电动机在汽车电力驱动中应用越来越多，将车载蓄电池的直流电转换为三相交流电，需要三相逆变电路，这种完成逆变，还可以变频调压，以实现三相交流电动机调速操作，达到控制汽车变速的目的。

在汽车车载电源中，有一种电源逆变器，能够将蓄电池 12V 的直流电转换为和市电相同的 220V、50Hz 交流电，供 220V 交流用电器使用。

### 1. 逆变电路的工作原理

图 5.95 所示为单相桥式逆变电路， $S_1 \sim S_4$  是桥式开关的四个臂，它们由电力电子器件及其辅助电路组成，逆变器负载是电阻  $R$ ，当将开关  $S_1$ 、 $S_4$  闭合， $S_2$ 、 $S_3$  断开时，电阻  $R$  上得到左正右负的电压；间隔一段时间后将开关  $S_1$ 、 $S_4$  打开， $S_2$ 、 $S_3$  闭合，电阻  $R$  上得到右正左负的电压。若以频率  $f$  交替切换  $S_1$ 、 $S_4$  和  $S_2$ 、 $S_3$ ，在电阻  $R$  上就可以得到如图所示的电压波形。在逆变电路的工作过程中，电流从另一个支路转移的过程称为换流，换流也常称为换相。在换相的过程中，有的支路要从通态转移到断态，有的支路要从断态转移到通态。

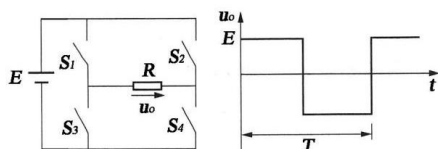


图 5.95 逆变电路工作原理图

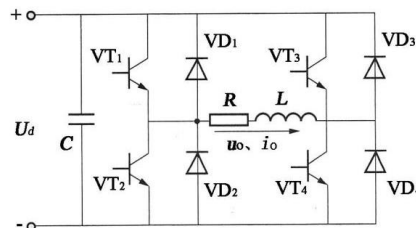


图 5.96 桥逆变电路

改变电路的交替切换或通断频率可以实现变频，达到对交流电动机变频调速的目的，因此，逆变电路有固定频率逆变和变频逆变之分，由于现在的逆变电路常具有变频功能，所以也常称这样的逆变电路称为变频电路。

由电子开关器件组成全桥逆变电路如图 5.96 所示，它有四个桥臂。把桥臂  $VT_1$  和  $VT_4$  与桥臂  $VT_2$  和  $VT_3$  作为一对，成对的两个桥臂同时导通，两对交替各导

通  $180^\circ$ 。其输出电压的也是交变矩形波。二极管  $VD_1 \sim VD_4$  起续流作用，可以改善输出电压波形。各电子开关器件的通断信号由相应的脉宽调制信号电路产生。

## 2. 正弦脉宽调制型单相变频电路

等脉宽的逆变电路不能产生近似正弦波的交流电，正弦脉宽调制型（SPWM）逆变电路能产生近似正弦波的交流电，其基本工作原理是对逆变电路中开关器件的通断进行有规律的控制，使输出端得到等幅不等宽的脉冲序列，用这些脉冲列来代替正弦波。这样，按要求的规则对脉冲序列的各脉冲宽度进行调制，即可改变逆变电路输出电压的大小，又可以改变输出电压的频率。如图 5.97 所示，一个正弦波的正半周完全可以用等幅不等宽的脉冲序列来等效，但必须做到正弦半波所等分的  $N$  块阴影面积与相对应的  $N$  个脉冲列的阴影面积相等，其作用的效果就基本相同。正弦波的负半周也可用相同的方法来等效。完整的正弦波形用等效的 PWM 波形表示称为正弦波脉宽调制，简称 SPWM。

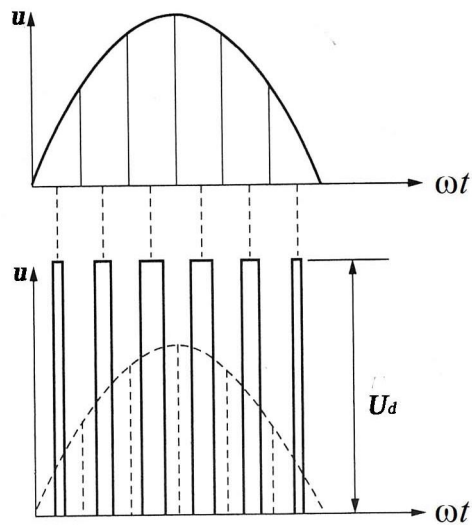


图 5.97 SPWM 型调制原理示意图

图 5.98 所示为 SPWM 型单相桥式逆变电路，负载为电感性。主电路由电力电子器件  $VT_1 \sim VT_4$  成单相桥式逆变电路，二极管  $VD_1 \sim VD_4$  起续流作用；正弦脉宽调制信号由正弦波发生器、三角波发生器、电压比较器和控制电路组成。

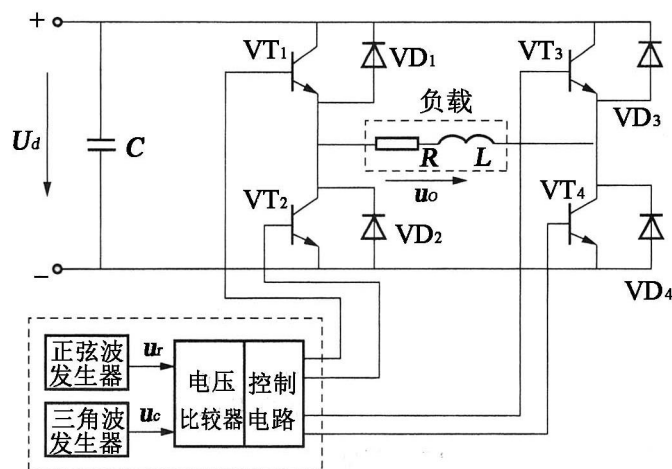


图 5.98 SPWM 型单相桥式逆变电路

## 3. 正弦脉宽调制型三相变频电路

(1) 正弦脉宽调制型三相变频电路工作原理

正弦脉宽调制型（SPWM）三相变频电路广泛应用于三相交流电动机和直流无刷电动机的变频调速。图 5.101 所示为正弦脉宽调制型（SPWM）三相变频电路，主电路由  $VT_1 \sim VT_6$  组成三相桥式逆变电路，二极管  $VD_1 \sim VD_6$  起续流作用；三相正弦脉宽调制信号由三相正弦波发生器、三角波发生器、电压比较器和控制电路组成。电路中的直流侧通常只有一个电容，为了分析问题的方便，等效为串联的两个电容出了假定中性点  $N'$ 。

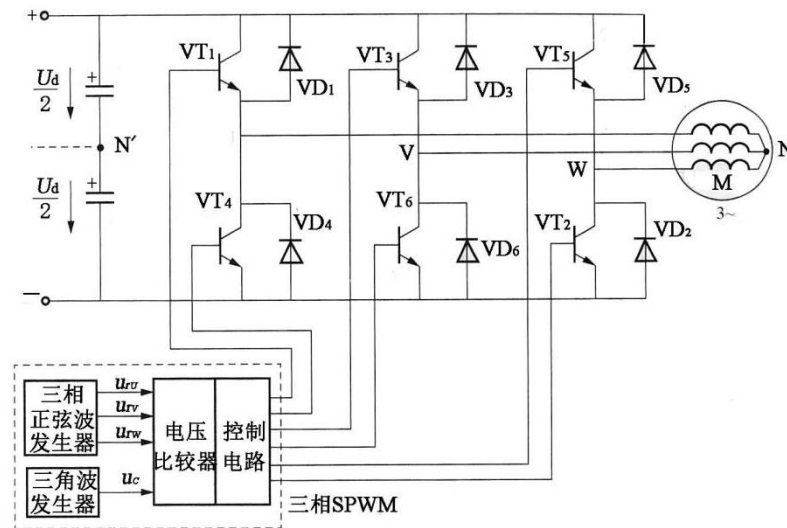


图 5.101 正弦脉宽调制型（SPWM）三相变频电路

与单极性控制方式不同，三相变频电路的调制采用双极性的控制方式，三角波发生器产生的三角波载波信号  $u_c$  是双极性的，如图 5.102 所示，三相正弦波发生器产生三相正弦调制信号从  $u_{rU}$ 、 $u_{rV}$ 、 $u_{rW}$ ，相差  $120^\circ$ ，共同调制一个公用的三角波载波信号  $u_c$ 。U、V、W 各相的电力开关器件的控制规律相同，现以 U 相为例说明如下。

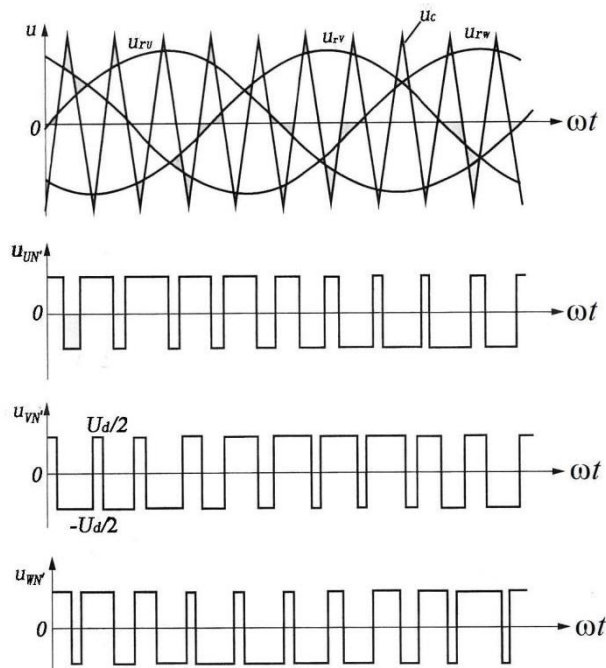


图 5.102 正弦脉宽调制型（SPWM）三相变频电路

当  $u_{rU} > u_c$  时，给  $VT_1$  导通信号，给  $VT_4$  关断信号，则 U 相相对直流电源假

想中心点  $N'$  的输出电压  $u_{UN'} = U_d/2$ 。当  $u_{rU} < u_c$  时，给  $VT_4$  导通信号，给  $VT_1$  关断信号，则  $U$  相相对直流电源假想中心点  $N'$  的输出电压  $u_{UN'} = -U_d/2$ ； $VT_1$  和  $VT_4$  的通断信号始终是互补的。

$V$  相和  $U$  相的控制方式与  $U$  相同，各相开始导电的角度依次相差  $120^\circ$ ， $u_{UN'}$ 、 $u_{VN'}$ 、 $u_{WN'}$ ，的波形如图 5.102 所示。由于是双极性控制，每相脉冲序列也是双极性的，宽脉冲与窄脉冲的方向相反，每半周内电压的平均值与宽脉冲的极性一致，并且是近正弦波形的。

由交流电的规律可知，上述三相变频电路的线电压为

$$u_{UV} = u_{UN'} - u_{VN'} \quad (5-56)$$

$$u_{VW} = u_{VN'} - u_{WN'}$$

$$u_{WV} = u_{WN'} - u_{UN'}$$

同样，同时改变三相正弦波调制信号  $u_{rU}$ 、 $u_{rV}$ 、 $u_{rW}$  的幅值，三相输出脉冲序列各脉冲宽度即可改变，输出的三相正弦电压  $u_{UV}$ 、 $u_{VW}$ 、 $u_{WV}$  就可改变。改变三相正弦波调制信号的频率就可改变输出三相正弦电压的频率。

### (2) 正弦脉宽调制型三相变频电路的应用

正弦脉宽调制型 (SPWM) 三相变频电路在工业、家用电器、电动自行车和电动汽车的变频调速上应用很多。在工业上和家电中，常用  $AC_1-DC-AC_2$  电路模式；在工业上，先将低压电网的 50Hz、380V 三相交流电 ( $AC_1$ ) 经三相整流电路变为直流电 (DC)，再将直流电 (DC) 经 SPWM 型三相变频可以变频、变压的三相正弦交流电  $AC$ ，去驱动三相交流电动机，实现变频、变压调速。

### 三、交流—交流变换 (AC—AC)

交流交流变换是把一种形式的交流变成另一种形式交流。只改变电压、电流或对电路的通断进行控制，而不改变频率的电路称为交流电力控制电路；改变频率的电路称为变频电路。

#### 1. 交流调压电路

交流调压电路是采用相位控制的电路，即在每半个周波内通过对晶闸管开通相位的控制，可以方便地调节电压的有效值。交流调压电路广泛用于灯光控制及异步电动机的软启动，也用于异步电动机调速。单相交流调压电路可由一只双向晶闸管组成，也可以用两只普通晶闸管反并联组成。由双向晶闸管组成的单相交流调压电路线路简单，成本低，故应用较多。

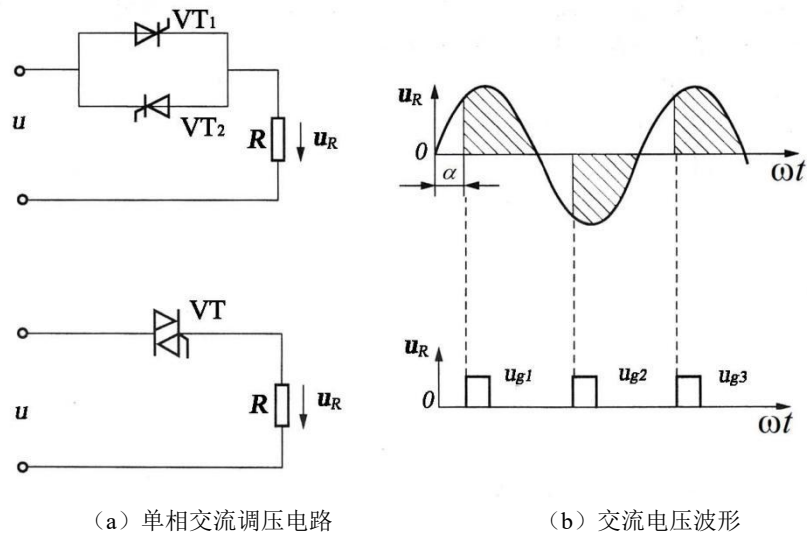


图 5.103 单相交流调压电路及波形图

图 5.103 (a) 所示为单相交流调压电路，电路可由两只普通晶闸管  $VT_1$  和  $VT_2$

反并联，或由一只双向晶闸管 VT 组成主电路，接电阻性负载  $R$ 。设  $\alpha$  为控制角，在普通晶闸管反并联电路中，当电源电压为正半波，在  $\omega t = \alpha$  时晶闸管  $VT_1$  被控制信号  $u_g$  触发导通，便有电流  $i$  流过负载电阻  $R$ ，负载上有电压  $u_R$ 。当  $\omega t = \pi$  时，电源电压过零， $i = 0$ ， $VT_1$  自行关断， $u_R = 0$ 。在电源的负半波  $\omega t = \pi + \alpha$  时，触发  $VT_2$  导通，负载电阻得到反向电流， $u_R$  变为负值。在  $\omega t = 2\pi$  时， $i = 0$ ， $VT_2$  自行关断， $u_R$  为零。下个周期重复上述过程，在负载电阻上就得到缺角的交流电压波形， $u_g$ 、 $u_R$  的波形如图 5.103 (b) 所示。通过改变控制信号  $u_g$  的控制角  $\alpha$  得到不同的输出电压的有效值，从而达到交流调压的目的。在双向晶闸管组成的电路中，只要在正负半周的对称的相应时刻 ( $\omega t = \pi$ ， $\omega t = 2\pi + \alpha$ ) 给触发脉冲，其工作情况与普通晶闸管反并联电路一样，在负载上可得到同样波形的可调交流电压。控制信号  $u_g$  由专门电路产生。

图 5.104 所示为三相交流调压电路，每一相的主电路组成与单相交流调压电路相同，实际上就是三个单相交流调压电路的组合，工作原理和波形分析与单相交流调压相同。当确定调压控制角后，各相正负半波均按此控制角  $\alpha$  触发导通。

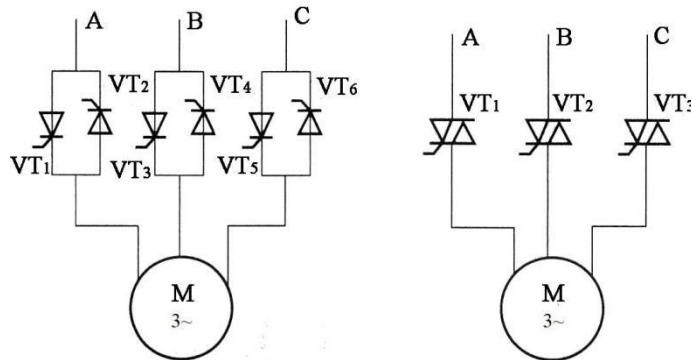


图 5.104 三相交流调压电路

## 2. 交流变频电路

### (1) 单相交—交变频器

#### ① 变频器的结构和工作状态

如图 5.105 所示为单相交—交变频器的原理图和输出电压波形示意图。电路由正组和反反并联的晶闸管整流器组成。正组工作时，负载电流  $i_o$  为正，反组工作时， $i_o$  为负。让两组整流器按一定的频率交替工作，负载就得到该频率的交流电。改变两组整流器的切换频率，可以改变输出频率  $f_o$ 。按照一定的规律改变整流器工作时的触发角  $\alpha$ ，就可以改变交流输电压。

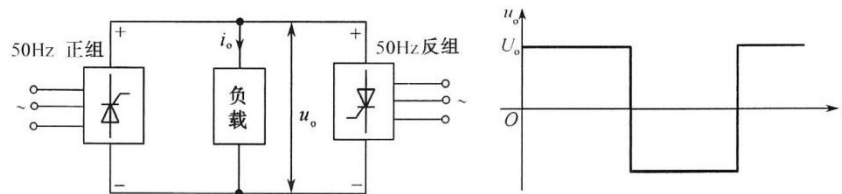


图 5.105 单相交-交变频器原理图及输出电压波形示意图

从负载端看，可以将图 5.105 的电路原理图等效成图 5.106 (a) 所示的原理图。图 5.106 (b) 给出了一个周期内负载电压  $u_o$ 、负载电流  $i_o$ ，正、反两组整流器的电压  $u_p$ 、 $u_N$  和电流  $i_p$ 、 $i_N$  波形，图 5.106 (c) 给出了正、反两组整流器的工作状态。



如图 5.106 (b) 所示, 在负载电流的正半周  $t_1 \sim t_3$  区间, 正组整流器导通, 反组整流器被封锁。在  $t_1 \sim t_2$  区间, 正组整流器导通后输出电压、电流均为正, 故正组整流器向外输出功率, 工作于整流状态; 在  $t_2 \sim t_3$  区间, 仍是正组整流器导通, 负载电流方向不变, 输出电压为负, 因此负载向正组整流器反馈功率, 正组整流器工作于逆变状态; 在  $t_3 \sim t_4$  区间, 负载电流反向, 反组整流器导通, 正组整流器被封锁, 负载电压, 电流均为负, 故反组整流器处于整流状态; 在  $t_4 \sim t_5$  区间, 电流为负, 仍为反组整流器导通, 但输出电压为正, 反组整流器工作在逆变状态。

②变频器类型和工作原理

根据触发角  $\alpha$  变化方式的不同, 有方波形交-交变频器和正弦波形交-交变频器之分。

a) 方波形交-交变频器

如果在正组或反组整流器工作期间, 对应触发角为  $\alpha$ , 则整流器输出电压  $u_o = U_{d0} \cos \alpha$ 。由于整流器具有电流单向流通的特点, 因此, 当负载电流为正时, 正组整流器工作, 反组整流器封锁; 当负载电流为负时, 反组整流器工作, 正组整流器封锁, 以实现无环流控制。

改变正、反组整流器的切换频率, 可以改变输出交流电的频率, 而改变触发角  $\alpha$  的大小即可调节方波的幅值, 从而调节输出交流电压  $u_o$  的大小。其输出波形为幅值是整流电压平均值的方波。

方波形交-交变频器的正、反两组整流器工作时保持晶闸管触发角恒定不变, 其控制简单, 但其输出波形为方波, 低次谐波大, 用于电动机调速系统时会增大电动机损耗, 降低运行效率。

b) 正弦波形交-交变频器

正弦波形交-交变频器的主电路与方波形的电路相同, 但正弦波形交-交变频器的输出电压平均值按正弦规律变化, 克服了方波形交-交变频器输出波形谐波大的缺点。

图 5.107 中 A 点处晶闸管的触发角  $\alpha_p = 0^\circ$ , 电压平均值  $U_d$  最大。随着  $\alpha_p$  的增大,  $U_d$  减小, 在 3 区和 4 区的交界处,  $\alpha_p = \pi/2$  时,  $U_d = 0$ 。在三相桥式相控整流器中,  $U_d = 2.34 U_2 \cos \alpha$ , 当  $\alpha$  从  $\pi/2 \rightarrow \alpha_0 \rightarrow \pi/2 \rightarrow \pi - \alpha_0 \rightarrow \pi/2$  线性变化时, 输出电压平均值为按  $0 \rightarrow 2.34 U_2 \cos \alpha_0 \rightarrow 0 \rightarrow$

$-2.34 U_2 \cos \alpha_0 \rightarrow 0$  正弦规律变化的交流电。输出电压平均值如图 5.107 所示, 为正弦波。图中 3 区负载电流为正, 电压也为正, 正组整流器工作在整流状态, 4 区负载电流为正, 电压为负, 正组整流器工作在逆变状态, 6 区负载电流为负, 电压也为负, 反组整流器工作在整流状态, 1 区负载电流为负, 电压为正, 反组整流器工作在逆变状态。

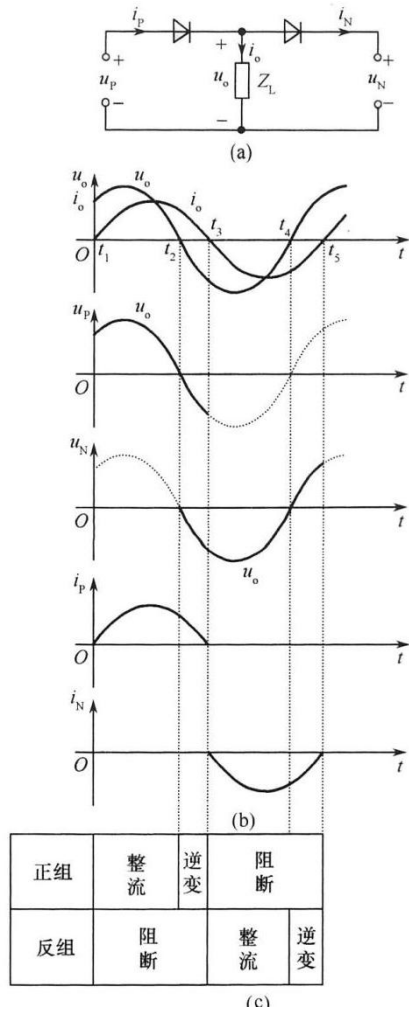


图 5.106 交-交变频器工作状态



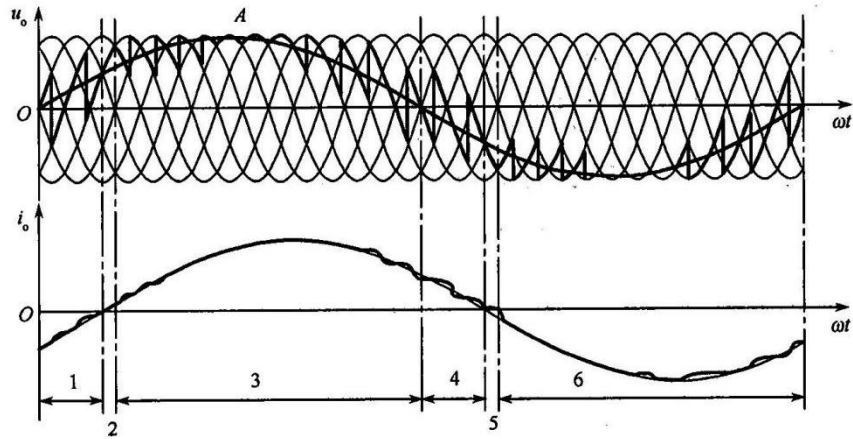
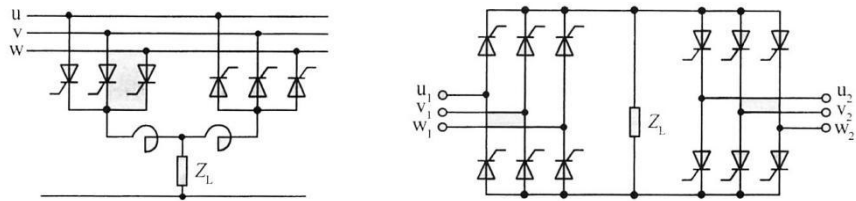


图 5.107 正弦波形交-交变频器的输出电压和电流波形

将两组三相可逆整流器反并联即可构成单相变频器。如图 5.108 (a) 所示为采用两组三相半波整流的线路, 图 5.108 (b) 为采用两组三相桥式整流的线路。



(a) 三相半波整流器组成的单相交-交变频器 (b) 三相桥式整流器组成的单相交-交变频器


图 5.108 单相交-交变频器的电路原理图

(2) 三相交-交变频器

交变频器主要应用于大功率交流电动机调速系统。三相交-交变频器是由 3 组输出电压相位各差  $120^\circ$  的单相交-交变频器组成的。因此, 单相交-交变频器的许多分析和结论对三相变频器也是适用的。



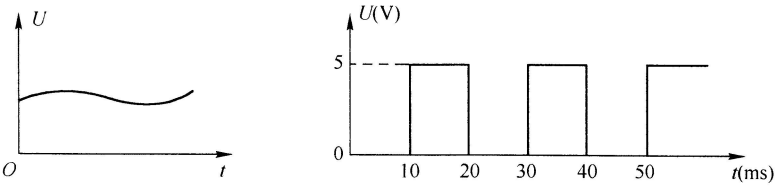
① 电路连接方式

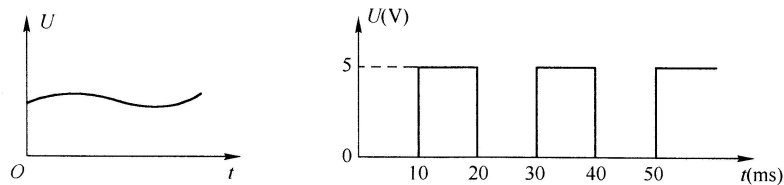
三相交-交变频器有两种接线方式, 即公共交流母线进线方式和输出星形连接方式。

<p><b>课堂总结</b> 10min</p>	<p>1. PWM 开关型调压稳压电源的工作原理。 2. 单相逆变电路和三相逆变电路的工作原理。 3. 交流调压电路的工作原理。</p>	<p>归纳总结本节课的知识点。</p>
<p> <b>布置作业</b></p>		
<p><b>教学反思</b></p>		

# 《项目六 汽车中数字电路的应用》单元教学设计

## ——《任务一 数制、编码及基本逻辑门电路》

 课 题	<h3>数制、编码及基本逻辑门电路</h3>	 课型	新课
授课班级		授课时数	4
教学目标	1.掌握数制间的相互转换方法; 2.掌握常见逻辑运算关系; 3.掌握逻辑函数表示法; 4.熟悉逻辑代数基本公式; 5.熟悉逻辑函数代数化简方法。		
教学重点	1. 十进制数、二进制数、八进制数、十六进制数之间的相互转换。 2.逻辑函数的表示和逻辑函数代数化简。		
教学难点	1.3 码、循环码和格雷码。 逻辑函数代数化简方法。		
教学方法	任务驱动法、分析法、演示法、练习法。		
时间分配	<b>教学内容</b>	<b>教学 方法</b>	
导入新课 5min		通过让学生观察波形引发其思考。	
讲授新课 75min	<h3>一、模拟信号和数字信号</h3> <p>电子电路中的信号可以分为两大类：模拟信号和数字信号。</p> <p>模拟信号——时间连续、数值也连续变化的信号，见图 6.1 (a) 所示。</p> <p>数字信号——时间上和数值上均是离散变化的信号，见图 6.1 (b) 所示。例如，电子表的秒信号、生产流水线上记录零件个数的计数信号等。这些信号的变化发生在一系列离散的瞬间，其值也是离散的。</p> <p>数字信号只有两个离散值，常用数字 0 和 1 来表示。注意，这里的 0 和 1 没有大小之分，只代表两种对立的状态，称为逻辑 0 和逻辑 1，也称为二值数字逻辑。</p> <p>数字信号在电路中往往表现为突变的电压或电流。该信号有两个特点：</p> <p>(1) 信号只有两个电压值。在图 6.1 (b) 所示中只有 5 V 和 0V，我们可以用 5 来表示逻辑 1，用 0V 来表示逻辑 0；当然也可以用 0V 来表示逻辑 1，用 5 V 来表示逻辑 0。这两个电压值又常被称为逻辑电平。5 V 为高电平，0V 为低电平。</p> <p>(2) 信号从高电平变为低电平，或者从低电平变为高电平是一个突然变化的过程，这种信号又称为脉冲信号。</p>		运用实验演示进行教学。



(a) 模拟信号

(b) 数字信号

图 6.1 典型的信号

如上所述，数字信号是一种二值信号，用两个电平（高电平和低电平）分别来表示两个逻辑值（逻辑 1 和逻辑 0）。数字电路中常有两种逻辑体制：（1）正逻辑规定：高电平为逻辑 1，低电平为逻辑 0，（2）负逻辑规定：低电平为逻辑 1，高电平为逻辑 0。本书采用的是正逻辑体制。

## 二、数制与码制

### 1. 数制

数制是指数的表示方法。常用的数制有十进制和二进制两种。

（1）十进制。在表示数值大小时，允许使用的数字符号的个数称为基数。十进制在表示数值大小时允许使用 0~9 十个数字符号，因此其基数是 10。以 10 为基数，进位规则是“逢十进一”的数制就称为十进制。

十进制数可用各位数值之和的形式表示。例如：

$$(1860)_{10} = 1 \times 10^3 + 8 \times 10^2 + 6 \times 10^1 + 0 \times 10^0$$

$$(555)_{10} = 5 \times 10^2 + 5 \times 10^1 + 5 \times 10^0$$

十进制数字在不同的数位上表示的数值不同，其中乘数  $10^2$ 、 $10^1$ 、 $10^0$  是根据数字所在的位置得到的，称为该位的“权”。十进制数的位权都是基数 10 的幂。

（2）二进制。二进制在表示数值大小时只能使用 0 和 1 两个数字符号，因此其基数是以 2 为基数，进位规则是“逢二进一”的数制就称为二进制。

与十进制数相同，二进制数也可用各位数值之和的形式表示。例如：

$$(1001)_2 = 1 \times 2^3 + 0 \times 2^2 + 0 \times 2^1 + 1 \times 2^0$$

其中， $2^3$ 、 $2^2$ 、 $2^1$ 、 $2^0$  分别为各数位的权，它们都是基数 2 的幂。

（3）二—十进制数的相互转换

①二进制数转换为十进制数。方法是将二进制数按位值展开后相加，就得到等值的十进制数。

如：  $(1001)_2 = 1 \times 2^3 + 0 \times 2^2 + 0 \times 2^1 + 1 \times 2^0 = (9)_{10}$

②十进制数转换为二进制数。方法是除 2 取余法。

例 6.1 将  $(23)_{10}$  转换为二进制数。

解：

$2 \overline{) 23}$	………	余 1	$b_0$	↑ 读取 次序
$2 \overline{) 11}$	………	余 1	$b_1$	
$2 \overline{) 5}$	………	余 1	$b_2$	
$2 \overline{) 2}$	………	余 0	$b_3$	
$2 \overline{) 1}$	………	余 1	$b_4$	
0				

所以  $(23)_{10} = (10111)_2$

## 2. 码制

由于数字系统是以二值数字逻辑为基础的，因此数字系统中的信息（包括数值、文字、控制命令等）都是用一定位数的二进制码表示的，这个二进制码称为代码。

二进制编码方式有多种，二一十进制码，又称 BCD 码，是其中一种常用的码，它用二进制代码来表示十进制的 0~9 十个数。

要用二进制代码来表示十进制的 0~9 十个数，至少要用 4 位二进制数。4 位二进制数有 16 种组合，可以从这 16 种组合中选择 10 种组合分别来表示十进制的 0~9 十个数。选哪 10 种组合，有多种方案，这就形成了不同的 BCD 码。具有一定规律的常用的 BCD 码见表 6.1。

注意，BCD 码用 4 位二进制码表示的只是十进制数的一位。如果是多位十进制数，应先将每一位用 BCD 码表示，然后组合起来。

表 6.1 几种常用的二一十进制码

十进制数	8421 码	2421 码	5421 码	余
0	0000	0000	0000	0
1	0001	0001	0001	0
2	0010	0010	0010	0
3	0011	0011	0011	0
4	0100	0100	0100	0
5	0101	1011	1000	1
6	0110	1100	1001	1
7	0111	1101	1010	1
8	1000	1110	1011	1
9	1001	1111	1100	1
位权	8 4 2 1 $b_3 b_2 b_1 b_0$	2 4 2 1 $b_3 b_2 b_1 b_0$	5 4 2 1 $b_3 b_2 b_1 b_0$	

## 三、逻辑代数及基本运算

逻辑代数也称布尔代数，它是分析和设计逻辑电路的一种数学工具，用来描述数字电路和数字系统的结构和特性。

逻辑代数有 1 和 0 两种逻辑值，它们并不表示数量的大小，而是表示两种对立的逻辑状态，例如电平的高低，晶体管的导通和截止，脉冲信号的有无，事物的是非等。所以，逻辑 1 和逻辑 0 与自然数中的 1 和 0 有本质的区别。

在逻辑代数中，输出逻辑变量和输入逻辑变量的关系，叫逻辑函数，可表示为

$$F = f(A, B, C \dots)$$

式中，A、B、C 为输入逻辑变量，F 为逻辑函数。下面介绍基本逻辑运算。

### 1. 逻辑“与”

逻辑与是描述与逻辑关系的，又称与运算。逻辑表达式为

$$F = A \cdot B$$

#### 6.2 与逻辑真值表

A	B	F	A	B
0	0	0	1	0
0	1	0	1	1

其意义是仅当决定事件发生的所有条件 A、B 中均具备时，事件 F 才能发生。

例如把两只开关和一盏电灯串联接到电源上，只有当两只开关均闭合时灯才能亮。两个开关中有一个不闭合就不能亮。若开关断开时，A 和 B 取 0，开关闭合时，取 1；灯亮时 F 取 1，灯灭时取 0，则 F 的逻辑状态列于表 6.2 称真值表。

### 2. 逻辑“或”

逻辑或是描述或逻辑关系的，又称或运算。逻辑表达式为

$$F = A + B$$

其意义是当决定事件发生的各种条件 A、B 中，只要有一个或一个以上的条件具备，事件 F 就发生。仍以上述的灯的情况为例，把两只开关并联与一盏电灯串联接到电源上，当两只开关中有一个或一个以上闭合时灯均能亮。只有两个开关全断开时灯才不亮。逻辑取值方法同上，F 的逻辑状态列于真值表 6.3。

6.3 或逻辑真值表

A	B	F	A	B
0	0	0	1	0
0	1	1	1	1

### 3. 逻辑“非”

逻辑非是对一个逻辑变量的否定，也称非运算。逻辑表达式为

$$F = \bar{A}$$

其意义是事件发生出现的结果必然和这种条件相反。仍以灯的情况为例，一只在面板上标有

“开”和“关”字样的开关与一盏电灯串联接到电源上，但由于安装这只开关的电工粗心，当开关打向“开”时灭，打向“关”时灯亮。当 A 取 0 或 1 时，F 的逻辑状态列于真值表 6.4。

6.4 非逻辑真值表

A	F
0	1
1	0

### 4. 逻辑代数基本定律

包括 9 个定律，见表 6.5 所示，其中有的定律与普通代数相似，有的定律与普通代数不同，使用时切勿混淆。

表 6.5 逻辑代数的基本公式

名称	公式 1	公式 2
0-1 律	$A \cdot 1 = A$ $A \cdot 0 = 0$	$A + 0 = A$ $A + 1 = 1$
互补律	$A \cdot \bar{A} = 0$	$A + \bar{A} = 1$
重叠律	$A \cdot A = A$	$A + A = A$
交换律	$AB = BA$	$A + B = B + A$
结合律	$A(BC) = (AB)C$	$A + (B + C) = (A + B) + C$
分配律	$A(B + C) = AB + AC$	$A + BC = (A + B)(A + C)$
反演律	$\overline{AB} = \bar{A} + \bar{B}$	$\overline{A + B} = \bar{A}\bar{B}$
吸收律	$A(A + B) = A$ $A(\bar{A} + B) = AB$ $(A + B)(\bar{A} + C)(B + C) = (A + B)(\bar{A} + C)$	$A + AB = A$ $A + \bar{A}B = A + B$ $AB + \bar{A}C + BC = AB + \bar{A}C$
对合律	$\overline{\bar{A}} = A$	

例 6.2 利用逻辑代数证明等式： $AB + \bar{A}C + \bar{B}C = AB + C$ 。

证明： $AB + \bar{A}C + \bar{B}C = AB + (\bar{A} + \bar{B})C = AB + \overline{AB}C = AB + C$

例 6.3 应用逻辑代数化简等式： $A+A\bar{B}\bar{C}+\bar{A}CD+(\bar{C}+\bar{D})E$ 。

解：原式可化为

$$A+A\bar{B}\bar{C}+\bar{A}CD+(\bar{C}+\bar{D})E=A+\bar{A}CD+\bar{C}DE$$

$$=A+CD+\bar{C}DE=A+CD+E$$

#### 四、基本门电路

能够实现基本逻辑关系的电路称为门电路。根据门电路的组成结构可分为分立元件门电路和集成门电路两种类型，下面分别给予说明。

##### 1. 基本门电路

现今集成技术得到了迅速发展和广泛运用，分立元件已经很少有人使用了。但无论集成电路结构多么复杂，都是以分立元件门电路为基础，经过改造演变过来的，了解分立元件门电路的工作原理，有助于学习和掌握集成门电路。分立元件门电路包括二极管门电路和三极管门电路两类。

##### (1) 二极管与门

二极管与门电路如图 6.2 (a) 所示。由图可知，在输入  $A$ 、 $B$  中有一个（或一个以上）为低电平，则与输入端相连的二极管必然获得正偏电压而导通，使输出端  $Z$  为低电平，只有输入  $A$ 、 $B$  同时为高电平，输出  $Z$  才是高电平。由此可知输入对输出呈与逻辑关系，即  $Z=A \cdot B$ ，其逻辑符号如图 6.2 (b) 所示，真值表如图 6.2 (c) 所示。输入端的个数当然可以多于两个，有几个输入端用几个二极管即可。

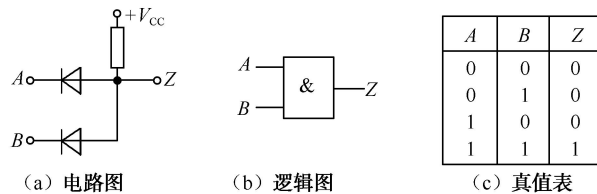


图 6.2 二极管与门电路及其逻辑图表

##### (2) 二极管或门

二极管或门电路如图 6.3 (a) 所示。由图可知，在输入  $A$ 、 $B$  中有一个（或一个以上）为高电平，则与之相连的二极管必然获得正偏电压而导通，使输出  $Z$  为高电平，只有输入  $A$ 、 $B$  同时为低电平时，输出  $Z$  才是低电平。由此可知，输入对输出呈或逻辑关系，即  $Z=A+B$ ，其逻辑符号如图 6.3 (b) 所示，其真值表见图 6.3 (c)。

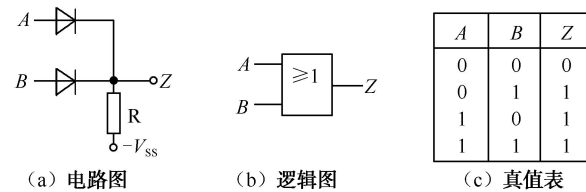


图 6.3 二极管或门电路及其逻辑图表

##### (3) 三极管非门

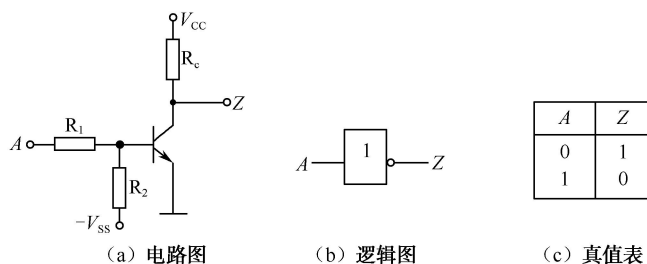


图 6.4 三极管非门电路及其逻辑图表

非门又称为反相器，是实现逻辑翻转的门电路。它对输入的逻辑电平取反，实现相反的逻辑功能输出。其电路如图 6.4 (a) 所示。只要电阻  $R_1$ 、 $R_2$  和负电源  $-V_{ss}$  参数配合适当，则当输入低电平信号时，三极管的基极为负电位，发射结反偏，三极管可靠截止，输出为高电平；而当输入为高电平时，三极管基极为正电位而饱和导通，输出为低电平，从而实现非运算。非运算的逻辑符号和真值表分别如图 6.4 (b)、(c) 所示。其逻辑式为  $Z = \overline{A}$ 。

#### (4) 三极管与非门

将二极管与门与三极管非门相连，即可构成与非门，如图 6.5 (a) 所示。通过与门和非门的分析可得与非门的真值表，其逻辑符号及真值表分别如图 6.5 (b)、图 6.5 (c) 所示。其逻辑表达式为  $Z = \overline{A \cdot B}$ 。

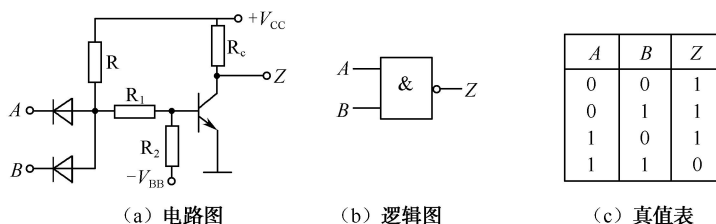


图 6.5 三极管与非门电路及其逻辑图表

#### (5) 三极管或非门

将二极管或门和三极管非门相连接，即构成或非门，如图 6.6 (a) 所示。类似分析不难得出或非门的真值表，其逻辑符号及真值表分别如图 6.6 (b)、图 6.6 (c) 所示。其逻辑表达式为  $Z = \overline{A + B}$ 。

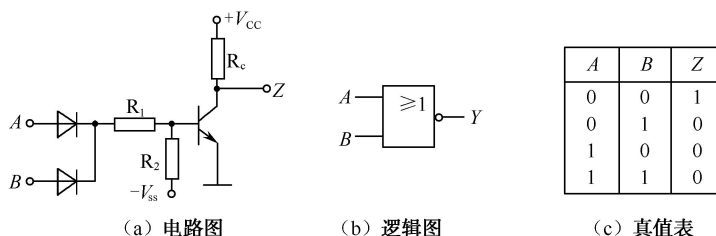


图 6.6 三极管或非门电路及其逻辑图表

## 2. 集成逻辑门电路

构成集成逻辑门电路包含三种数字集成电路技术，分别是 CMOS、TTL 和 ECL。其中 CMOS 和 TTL 应用最为广泛，下面分别介绍这两种类型。

### (1) TTL 门电路

TTL (Transistor-Transistor Logic) 代表晶体管-晶体管逻辑电路的意思。它的输

入端和输出端都是由双极型晶体管组成。TTL 是一种应用广泛的数字集成电路技术。TTL 较之 CMOS 的一个优点就是对静电效应不敏感。由于无须担心操作方面的问题,使 TTL 在实验室和原型机测试等实际应用场合得到了广泛的应用。TTL 门电路包含多种系列,均采用 5V 直流电源供电。各种系列的 TTL 门电路具有不同的性能特征,其标注是在 54 或 74 后面跟代表系列的字母及代表逻辑门类型的数字。基本 TTL 门电路的标注如下:

74——标准 TTL (后不跟字母)

74S——肖特基 TTL

74LS——低功耗肖特基 TTL

74AS——高级肖特基 TTL

74ALS——高级低功耗肖特基 TTL

74F——快速 TTL

现举例说明。如 74LS20 表示低功耗肖特基二-四输入 TTL 与非门。其中 20 表示 TTL 门电路的类型是四输入与非门,一块集成芯片上包含了两个这样的门电路,如图 6.7 (a) 所示。

为了便于认识及查阅,下面列举出常用的 74 系列 TTL 门电路,后面的数据代表了门电路的类型。

00: 四-二输入与非门

20: 二-四输入与非门

02: 四-二输入或非门

21: 二-四输入与门

04: 六反相器

27: 三-三输入或非门

08: 四-二输入与门

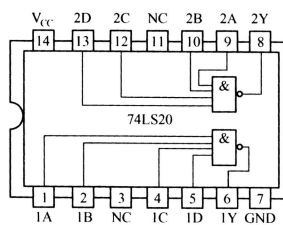
30: 一-八输入与非门

10: 三-三输入与非门

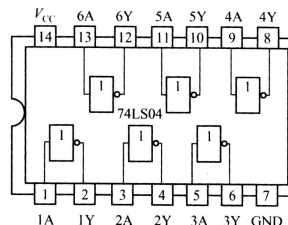
32: 四-二输入或门

11: 三-三输入与门

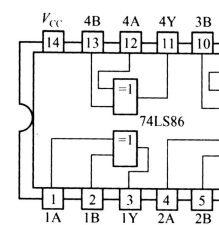
86: 四-二输入异或门



(a) 74LS20 的引脚排列图



(b) 74LS04 的引脚排列图



(c) 74LS86 的引脚排列图

列图

图 6.7 几种 TTL 集成电路

## (2) CMOS 门电路

MOS 集成电路是由金属-氧化物-半导体场效应管构成的单极型集成电路,可分为三类: NMOS、PMOS 和 CMOS 电路,其中尤其以 CMOS 发展最为迅速,应用最为广泛。

CMOS 集成电路的特点如下:

① 静态功耗低。在电源为 5V 时的静态功耗小于 100mW, 适宜于大规模集成。

② 电源电压范围宽。4000 系列 CMOS 电路的电压范围为 3~18V, 电源设计要求低。

③ 输入阻抗高。正常工作时直流输入阻抗大于 100MΩ。

④ 扇出能力强。在低频工作时, 一个输出端可以驱动 50 个以上 CMOS 器件的输入端。

⑤ 抗干扰能力强。



- ⑥ 逻辑摆幅大。
- ⑦ 温度稳定性好，具有较强的抗辐射能力。

### 五、门电路在汽车中的应用

现代轿车为了开关车门及发生异常情况时提醒驾驶员注意，专门设计了门锁控制系统。该系统由控制电路和执行机构组成，图 6.8 为门锁控制系统的控制电路部分，由图可见，控制电路由非门、与门、与非门和或门电路组成，输入信号由多个开关产生。以点火钥匙检测开关为例，当点火钥匙插入点火开关锁孔时，开关闭合，非门 a 输入接地，引入低电平信号；当点火钥匙拔出时，开关断开，非门 a 输入接十 12 V，引入高电平信号。其他开关也都具有相似的功能，这里不再详述。解锁和锁止信号为电路的输出信号，均为高电平信号。

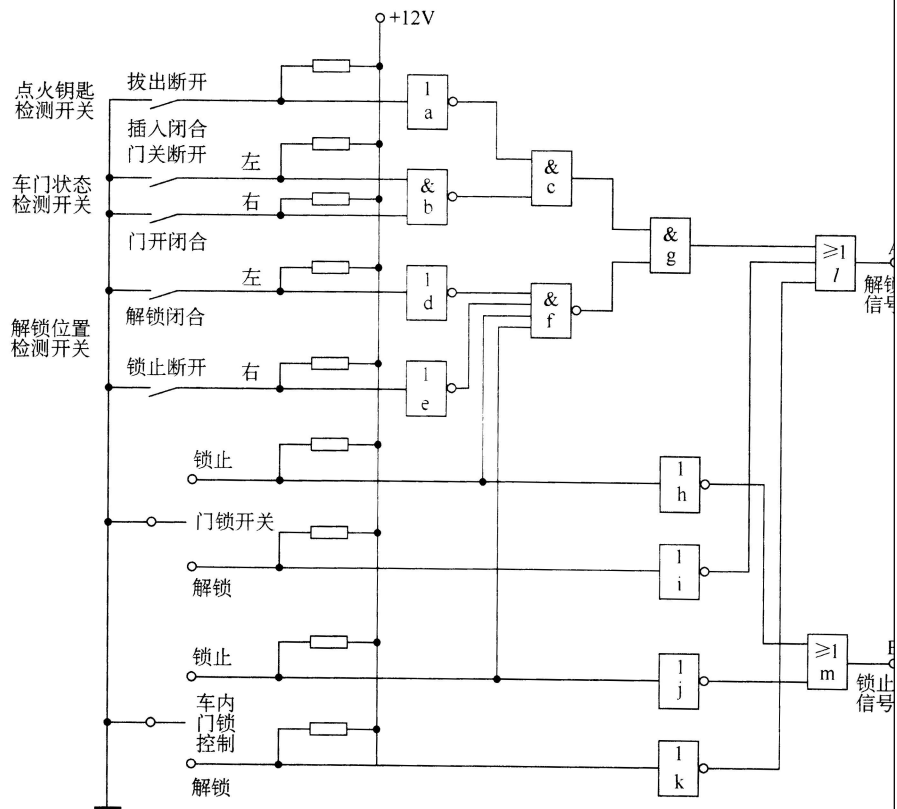


图 6.8 门锁控制系统的控制电路

课堂总结  
10min



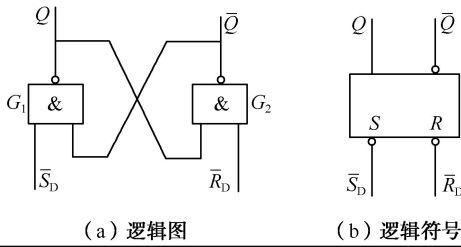
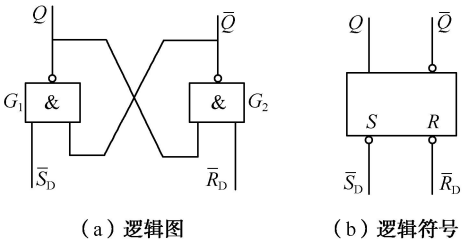
1. 二极管、三极管的构成及其工作原理；
2. 二极管的伏安特性和主要参数；
3. 二极管组成的电路。

归纳总结本节课的知识点。



布置作业  
教学反思

## ——《任务二 触发器》

 <b>课 题</b>	<b>触发器</b>	 <b>课型</b>	新课	
<b>授课班级</b>		<b>授课时数</b>	4	
<b>教学目标</b>	掌握 RS、JK、D 触发器的逻辑功能、符号和触发方式。			
<b>教学重点</b>	RS、JK、D 触发器的逻辑功能、符号和触发方式			
<b>教学难点</b>	RS、JK、D 触发器的逻辑功能、符号和触发方式			
<b>教学方法</b>	任务驱动法、分析法、演示法、练习法。			
<b>时间分配</b>	<b>教学内容</b>	<b>教学 方法</b>		
<b>导入新课</b> 5min	 <p style="text-align: center;">(a) 逻辑图                      (b) 逻辑符号</p>	通过让学生观察触发器引发其思考。		
<b>讲授新课</b> 75min	<p><b>一、RS 触发器</b></p> <p><b>1. 基本 RS 触发器</b></p> <p>基本 RS 触发器由两个与非门交叉连接而成，如图 6.14 (a)、(b) 分别为基本 RS 触发器逻辑图和逻辑符号。</p> <div style="text-align: center;">  <p style="text-align: center;">(a) 逻辑图                      (b) 逻辑符号</p> </div> <p style="text-align: center;">图 6.14 基本 RS 触发器逻辑电路及符号</p> <p><math>Q</math> 与 <math>\bar{Q}</math> 是基本 RS 触发器的输出端，两者的逻辑状态在正常条件下保持相反。这种触发器有两种稳定的状态：一种状态是 <math>Q</math> 为 1，<math>\bar{Q}</math> 为 0，称为置位状态（1 态）；另一种状态是 <math>Q</math> 为 0，而 <math>\bar{Q}</math> 为 1，称为复位状态（0 态）。相应的输入端分别称为直接置位端或直接置 1 端（<math>\bar{S}_D</math>）和直接复位端或直接置 0 端（<math>\bar{R}_D</math>），下面分四种情况分析其输出与输入的逻辑关系。</p> <p>(1) <math>\bar{S}_D=1</math>，<math>\bar{R}_D=0</math>：触发器置 0。因为 <math>\bar{R}_D=0</math>，<math>G_2</math> 输出 <math>\bar{Q}=1</math>，<math>G_1</math> 输入都为高电平 1，则 <math>G_1</math> 输出 <math>Q=0</math>。<math>\bar{R}_D</math> 为 0 时触发器处于 0 状态，所以 <math>\bar{R}_D</math> 称为置 0</p>			运用实验演示进行教学。

端或复位端。

(2)  $\overline{S_D} = 0, \overline{R_D} = 1$ : 触发器置 1。因为  $\overline{S_D} = 0$ ,  $G_1$  输出  $Q = 1$ ,  $G_2$  输入都为高电平 1, 则  $G_2$  输出  $Q = 0$ 。 $\overline{S_D}$  为 0 时触发器处于 1 状态, 所以  $\overline{S_D}$  称为置 1 端或置位端。

(3)  $\overline{S_D} = 1, \overline{R_D} = 1$ : 触发器保持原状态不变。如触发器处于  $Q = 0, \overline{Q} = 1$  的 0 状态时, 则  $Q = 0$  反馈到  $G_2$  的输入端, 使  $\overline{Q} = 1$ ,  $\overline{Q} = 1$  又反馈到  $G_1$  的输入端, 使  $G_1$  输入均为 1, 输出  $Q = 0$ , 电路保持 0 状态。

如果触发器原先处于  $Q = 1, \overline{Q} = 0$  的 1 状态时, 则电路同样能保持 1 状态不变。

(4)  $\overline{S_D} = \overline{R_D} = 0$ : 触发器输出状态不定。这时触发器的输出端  $Q = \overline{Q} = 1$ , 这时已不符合  $Q$  与  $\overline{Q}$  相反的逻辑状态, 触发器既不是 0 状态也不是 1 状态。此时当  $\overline{R_D}$ 、 $\overline{S_D}$  同时由 0 变为 1 时, 由于  $G_1$  和  $G_2$  在电气性能上的差异, 其输出无法预知, 可能是 0 状态, 也可能是 1 状态。实际上这种情况是不允许的。

从上述分析可知, 基本 RS 触发器有两个状态, 它可以直接置位或复位, 并具有存储和记忆的功能。在直接置位端加负脉冲 ( $\overline{S_D} = 0$ ) 即可置位, 在直接复位端加负脉冲 ( $\overline{R_D} = 0$ ) 即可复位。负脉冲除去以后, 直接置位端和复位端都处于高电平 (平时固定接高电平), 此时触发器保持相应负脉冲去掉前的状态, 实现存储或记忆功能。但要注意负脉冲不可同时加在直接置位端和直接复位端。在这里我们定义触发器在输入信号变化前的状态为现态 ( $Q^n$ ), 触发器在输入信号变化后的状态为次态 ( $Q^{n+1}$ ), 用以描述触发器次态与输入信号和电路原有状态 (现态) 之间关系的真值表称为特性表。基本 RS 触发器的特性表如表 6.11 所示。

表 6.11 基本 RS 触发器特性表

$\overline{R_D}$	$\overline{S_D}$	现 态	次 态	说 明
0	0	0	×	触发器状态不定
0	0	1	×	
0	1	0	0	触发器置 0
0	1	1	0	
1	0	0	1	触发器置 1
1	0	1	1	
1	1	0	0	触发器保持原状态不变
1	1	1	1	

基本 RS 触发器  $Q^{n+1}$ 、 $Q^n$  与  $R$ 、 $S$  的关系式即特性方程为

$$Q^{n+1} = S + \overline{R} Q^n \quad (6-1)$$

## 2. 同步 RS 触发器

上面介绍的基本 RS 触发器是各种双稳态触发器的共同部分。除此之外, 一般触发器还有导引线路 (或称控制电路), 通常由它把输入信号引导到基本 RS 触发器。图 6.15 (a) 是同步 RS 触发器的逻辑图, 图 6.15 (b) 是它的逻辑符号。

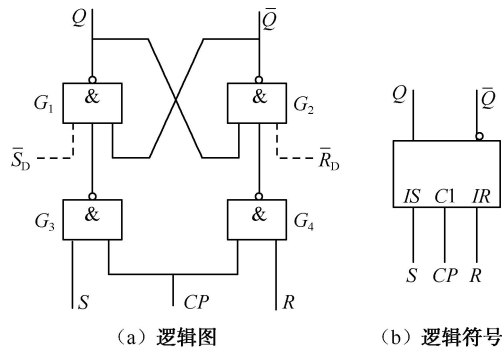


图 6.15 同步 RS 触发器逻辑电路及符号

图 6.15 (a) 中，与非门  $G_1$  和  $G_2$  构成基本 RS 触发器，与非门  $G_3$  和  $G_4$  构成引导电路， $\overline{S_D}$  为直接置位端， $\overline{R_D}$  为直接复位端， $R$  和  $S$  是置 0 和置 1 信号输入端。 $CP$  是时钟脉冲输入端，在脉冲数字电路中所使用的触发器往往用一种正脉冲来控制触发器的翻转时刻，这种正脉冲就称为时钟脉冲，它也是一种控制命令。通过引导电路来实现时钟脉冲对输入端  $R$  和  $S$  的同步控制，故称同步 RS 触发器。当时钟脉冲来到之前，即  $CP=0$  时，无论  $R$  和  $S$  端的电平如何变化， $G_3$  门和  $G_4$  门的输出均为 1，基本触发器保持原状态不变。只有当时钟脉冲来到之后，即  $CP=1$  时，触发器才按  $R$ 、 $S$  端的输入状态来决定其输出状态。时钟脉冲过去后输出状态保持脉冲为高电平时的状态不变。

$\overline{R_D}$  和  $\overline{S_D}$  是直接复位和直接置位端，就是不受时钟脉冲  $CP$  的控制，可以直接对基本 RS 触发器的输出端置 0 或置 1。主要用于在工作之初，预先使触发器处于某一给定状态，在工作过程中不用它们，让它们处于 1 态（高电平）。同步 RS 触发器的输出状态与  $R$ 、 $S$  输入状态的关系如表 6.12 所示。 $Q^n$  表示时钟到来之前触发器的输出状态， $Q^{n+1}$  表示时钟脉冲来之后的状态。

表 6.12 同步 RS 触发器特性表

$S$	$R$	$Q^{n+1}$
0	0	$Q^n$
0	1	0
1	0	1
1	1	不定

当  $CP=1$  时，由于经过了  $G_3$ 、 $G_4$  的反相作用，相对于基本 RS 触发器输入信号为低电平有效，同步 RS 触发器的输入信号为高电平有效。其工作过程分析与基本 RS 触发器相类似，读者可自行进行分析。

同步触发器的空翻现象：在时钟脉冲  $CP$  为高电平 1 期间，如果触发器的输入信号发生多次变化时，其输出状态也会相应发生多次变化，这种现象称为“空翻现象”。由于空翻现象的存在，使得同步 RS 触发器只能用于数据锁存，而不能用于计数器、移位寄存器和存储器当中。为了克服空翻现象，下面介绍只有在时钟脉冲  $CP$  的上升沿或下降沿时刻才接收输入信号的边沿触发器。

### 3. 集成 RS 触发器

常用的 TTL 集成基本 RS 触发器 74LS279 的引脚排列和逻辑图如图 6.16 (c)、(d) 所示，芯片内部集成了 4 个基本 RS 触发器，其中的 2 个基本 RS 触发器

有 2 个置位端，如图 6.16 (b) 所示，即  $\bar{S} = \bar{S}_1 \cdot \bar{S}_2$ 。

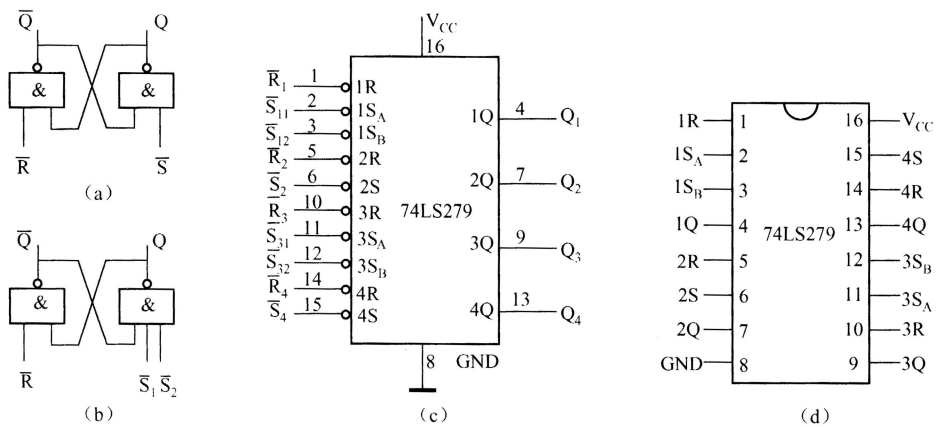


图 6.16 TTL 集成基本 RS 触发器 74LS279

## 二、JK 触发器

### 1. 边沿 JK 触发器

边沿 JK 触发器的逻辑符号如图 6.17 所示。逻辑符号中的“ $\wedge$ ”表示边沿触发方式。

JK 触发器的逻辑功能如下：

- (1)  $CP=0$  或 1 时，触发器的状态不变。
- (2)  $CP$  由 0 正跃变为 1 时，触发器的状态不变。
- (3)  $CP$  由 1 负跃变为 0 时，触发器的状态根据  $J$ 、 $K$  端的输入信号翻转。

在  $CP$  下降沿到来时，当  $J=K=0$  时， $Q^{n+1}$  状态保持  $Q^n$  状态不变；当  $J$  与  $K$  相反时， $Q^{n+1}$  的状态与  $J$  相同；当  $J=K=1$  时， $Q^{n+1}$  与原状态  $Q^n$  相反。

边沿 JK 触发器的真值表见表 6.13。其特性方程为

$$Q^{n+1} = J\bar{Q}^n + \bar{K}Q^n \quad (CP \text{ 下降沿到来时有效}) \quad (6-2)$$

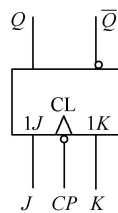


图 6.17 边沿 JK 触发器逻辑符号

表 6.13 边沿 JK 触发器特性表

$J$	$K$	$Q^{n+1}$
0	0	$Q^n$
0	1	0
1	0	1
1	1	$\bar{Q}^n$

### 2. 集成 JK 触发器

常用的集成 JK 触发器 74LS112 的引脚排列如图 6.18 所示，它是双 JK 边沿触发器。74LS112 的状态转换真值表如表 6.14 所示。

表 6.14 边沿 JK 触发器状态转换真值表

$\overline{R}_D$	$\overline{S}_D$	$CP$	$J$	$K$	$Q^{n+1}$
0	0	×	×	×	不用
0	1	×	×	×	0
1	0	×	×	×	1
1	1	↓	0	0	$Q^n$
1	1	↓	0	1	0
1	1	↓	1	0	1
1	1	↓	1	1	$\overline{Q^n}$

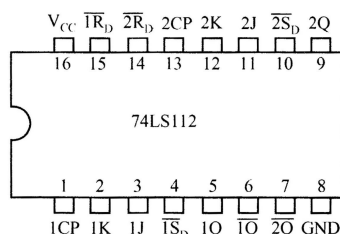


图 6.18 74LS112 引脚排列图

### 三、D 触发器

#### 1. 维持阻塞 D 触发器

维持阻塞 D 触发器的逻辑符号如图 6.19 所示。输入/输出关系的真值表见表 6.15。

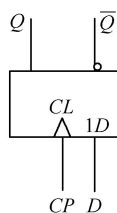


表 6.15 维持阻塞 D 触发器特性表

$D$	$Q^{n+1}$
0	0
1	1

图 6.19 维持阻塞 D 触发器逻辑符号

维持阻塞 D 触发器的逻辑功能是当 CP 上升沿到来时，触发器的输出状态变为与 CP 上升沿到来前 D 端的输入状态相同。即

$$Q^{n+1} = D \quad (CP \text{ 上升沿到来时有效}) \quad (6-3)$$

只要把 D 触发器的 D 输入端与  $\overline{Q}$  输出端连接在一起，就可构成计数器，如图 6.20 所示。其输入/输出波形如图 6.21 所示。

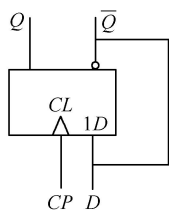


图 6.20 用 D 触发器构成计数器

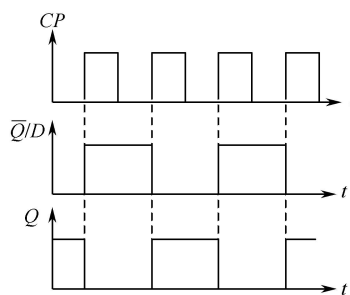


图 6.21 波形图

#### 2. 集成 D 触发器

集成 D 触发器 74LS74 的引脚排列图如图 6.22 所示。74LS74 的状态转换真值表如表所示。从状态转换真值表 6.16 可以看出 74LS74 是 CP 上升沿触发的边沿触

发器， $\overline{R}_D = 0$ ， $\overline{S}_D = 1$ 时置 0； $\overline{R}_D = 1$ ， $\overline{S}_D = 0$ 时置 1。

表 6.16 74LS74 的状态转换真值表

$\overline{R}_D$	$\overline{S}_D$	$CP$	$D$	$Q^{n+1}$	功能说明
0	0	×	×	不用	不允许
0	1	×	×	0	异步置 0
1	0	×	×	1	异步置 1
1	1	↑	0	0	置 0
1	1	↑	1	1	置 1

图 6.23 所示是利用 74LS74 构成的单按钮电子转换开关，该电路只利用一个按钮即可实现电路的接通和断开。电路中，74LS74 的 D 端和  $\overline{Q}$  端连接，这样有  $Q^{n+1} = \overline{Q}^n$ ，则每按一次按钮 SB，相当于为触发器提供一个时钟脉冲，触发器状态翻转一次。Q 端经三极管 VT 驱动继电器 KA，利用 KA 的触点转换即可通断其他电路。

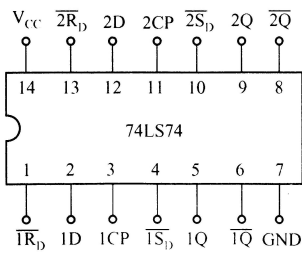


图 6.22 74LS74 引脚排列图

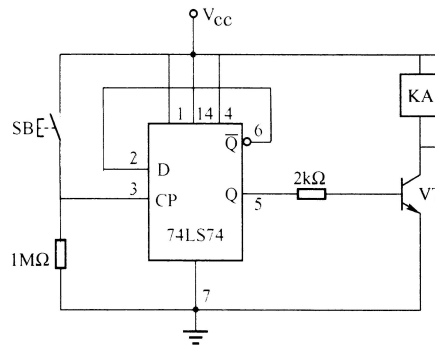


图 6.23 D 触发器构成的电子开关转换器

课堂总结  
10min



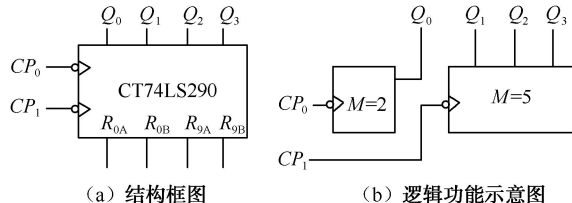
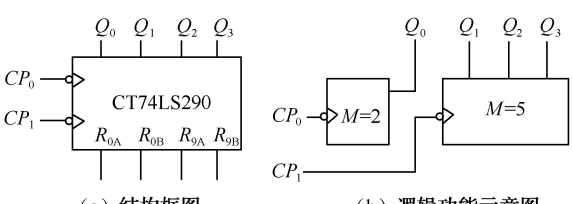
RS、JK、D 触发器的逻辑功能、符号和触发方式。

归纳总结本节课的知识点。



布置作业  
教学反思

## ——《任务三 时序逻辑电路》

 <b>课 题</b>	<h3 style="margin: 0;">时序逻辑电路</h3>	 <b>课型</b>	新课																							
<b>授课班级</b>		<b>授课时数</b>	4																							
<b>教学目标</b>	1.熟悉编码器、译码器与数据选择器的基本原理； 2.熟悉集成编码器、译码器与数据选择器的引脚排列及其逻辑功能； 3.掌握集成译码器的使用技能。																									
<b>教学重点</b>	编码器、译码基本原理以及集成编、译码器逻辑功能分析。																									
<b>教学难点</b>	用译码器设计组合逻辑电路。																									
<b>教学方法</b>	任务驱动法、分析法、演示法、练习法。																									
<b>时间分配</b>	教学内容	教学方法																								
<b>导入新课</b> 5min	 <p style="text-align: center;">(a) 结构框图                      (b) 逻辑功能示意图</p>		通过让学生观察计数器引发其思考。																							
<b>讲授新课</b> 75min	<h3 style="margin: 0;">一、计数器</h3> <p style="margin: 0;">用来统计输入计数脉冲个数的电路称为计数器。它的用途广泛，除了计数功能外还可以进行定时、分频、产生节拍脉冲及数字运算等。计数器的种类繁多，从不同的角度出发有不同的分类方法：</p> <p style="margin: 0;">(1) 按计数进制可分为二进制计数器、十进制计数器、任意进制计数器。</p> <p style="margin: 0;">(2) 按计数增减可分为加法计数器、减法计数器。</p> <p style="margin: 0;">(3) 按计数器中触发器翻转是否同步可分同步计数器、异步计数器。</p> <p style="margin: 0;">在实际应用过程中一般将计数器做成集成电路的形式。下面介绍异步集成二-五-十进制计数器 CT74LS290，其电路结构框图如图 6.27 (a) 所示，图 6.27 (b) 为其逻辑功能示意图。表 6.12 为其逻辑功能表。</p>  <p style="text-align: center;">(a) 结构框图                      (b) 逻辑功能示意图</p> <p style="text-align: center;">图 6.27 CT74LS290 结构框图及逻辑功能示意图</p> <p style="text-align: center;">表 6.20 CT74LS290 的逻辑功能表</p> <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse; margin: 10px 0;"> <thead> <tr> <th colspan="3" style="text-align: center;">输 入</th> <th colspan="4" style="text-align: center;">输 出</th> <th rowspan="2" style="text-align: center;">说 明</th> </tr> <tr> <th style="text-align: center;"><math>R_{0A} \cdot R_{0B}</math></th> <th style="text-align: center;"><math>S_{9A} \cdot S_{9B}</math></th> <th style="text-align: center;">CP</th> <th style="text-align: center;"><math>Q_3</math></th> <th style="text-align: center;"><math>Q_2</math></th> <th style="text-align: center;"><math>Q_1</math></th> <th style="text-align: center;"><math>Q_0</math></th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td style="text-align: center;">1</td> <td style="text-align: center;">0</td> <td style="text-align: center;">×</td> <td style="text-align: center;">0</td> <td style="text-align: center;">0</td> <td style="text-align: center;">0</td> <td style="text-align: center;">0</td> <td style="text-align: center;">置 0</td> </tr> </tbody> </table>		输 入			输 出				说 明	$R_{0A} \cdot R_{0B}$	$S_{9A} \cdot S_{9B}$	CP	$Q_3$	$Q_2$	$Q_1$	$Q_0$	1	0	×	0	0	0	0	置 0	运用实验演示进行教学。
输 入			输 出				说 明																			
$R_{0A} \cdot R_{0B}$	$S_{9A} \cdot S_{9B}$	CP	$Q_3$	$Q_2$	$Q_1$	$Q_0$																				
1	0	×	0	0	0	0	置 0																			



0	1	×	1	0	0	1	置9
0	0	↓	计数				

由表 6.20 可知, CT74LS290 主要有如下功能。

(1) 异步置 0 功能。当  $R_{0A} \cdot R_{0B}=1$ 、 $S_{9A} \cdot S_{9B}=0$  时, 计数器置 0, 即  $Q_3Q_2Q_1Q_0=0000$ 。与时钟脉冲 CP 没有关系。因此, 此时为异步置 0 功能。

(2) 异步置 9 功能。当  $R_{0A} \cdot R_{0B}=0$ 、 $S_{9A} \cdot S_{9B}=1$  时, 计数器置 9, 即  $Q_3Q_2Q_1Q_0=1001$ 。与时钟脉冲 CP 没有关系。实现异步置 9 功能。

(3) 计数功能。当  $R_{0A} \cdot R_{0B}=0$ 、 $S_{9A} \cdot S_{9B}=0$  时, CT74LS290 处于计数工作状态, 有下面四种情况:

- ① 计数脉冲由  $CP_0$  输入, 从  $Q_0$  输出时, 则构成一位二进制计数器。
- ② 计数脉冲由  $CP_1$  端输入, 输出为  $Q_3Q_2Q_1$  时, 则构成异步五进制计数器。
- ③ 如将  $Q_0$  和  $CP_1$  相连, 计数脉冲由  $CP_0$  输入, 输出为  $Q_3Q_2Q_1Q_0$  时, 则构成 8421BCD 码异步十进制计数器。
- ④ 如将  $Q_3$  与  $CP_0$  相连, 计数脉冲由  $CP_1$  端输入, 从高位到低位的输出为  $Q_0Q_3Q_2Q_1$  时, 则构成 5421BCD 码异步十进制加法计数器。

在实际应用过程中除了常见的十进制计数器之外, 往往还会用到其他进制的计数器, 但不可能为了每一种进制专门设计集成芯片, 解决的方法是利用现有的集成计数器通过一定的方法构成其他进制的计数器。下面介绍利用一种反馈归零法获得  $N$  (任意正整数) 进制计数器的方法。

利用计数器的置 0 功能可获得  $N$  进制计数器, 集成计数器的置 0 方式有异步和同步两种。异步置 0 与时钟脉冲 CP 没有任何关系, 只要异步置 0 输入端出现置 0 信号, 计数器便立刻被置 0。因此, 利用异步置 0 输入端获得  $N$  进制计数器时, 应在输入第  $N$  个计数脉冲 CP 后, 通过控制电路产生一个置 0 信号加到异步置 0 输入端上, 使计数器置 0, 即实现了  $N$  进制计数。

和异步置 0 不同, 同步置 0 输入端获得置 0 信号后, 计数器并不能立刻被置 0, 只是为置 0 创造了条件, 还需要再输入一个计数脉冲 CP, 计数器才被置 0。因此, 利用同步置 0 端获得  $N$  进制计数器时, 应在输入第  $N-1$  个计数脉冲 CP 时, 同步置 0 输入端获得置 0 信号, 这样, 在输入第  $N$  个计数脉冲 CP 时, 计数器才被置 0, 回到初始的零状态, 从而实现  $N$  进制计数。利用反馈归零法获得  $N$  进制计数器的方法如下:

用  $S_1, S_2, \dots, S_N$  表示输入 1, 2,  $\dots, N$  个计数脉冲 CP 时计数器的状态。

(1) 写出计数器状态的二进制代码。下面以构成十二进制计数器为例进行说明。当利用异步置 0 端获得十二进制计数器时,  $S_N=S_{12}=1100$ ; 当利用同步置 0 端获得十二进制计数器时,  $S_{N-1}=S_{11}=1011$ 。

(2) 写出反馈归零函数。这实际上是根据  $S_N$  或  $S_{N-1}$  写置 0 端的逻辑表达式。

(3) 画连线图。根据反馈归零函数画连线图。

## 二、寄存器和移位寄存器

寄存器是存放数码、运算结果或指令的电路, 移位寄存器不但可存放数码, 而且在移位脉冲作用下, 寄存器中的数码可根据需要向左或向右移位。寄存器和移位寄存器是数字系统和计算机中常用的基本逻辑部件, 应用很广。

一个触发器可存储一位二进制代码,  $n$  个触发器可存储  $n$  位二进制代码。因此, 触发器是寄存器和移位寄存器的重要组成部分。下面分别介绍它们的工作原理及应用。

### 1. 寄存器

用以存放二进制代码的电路称为寄存器。

如图 6.28 所示为由维持阻塞 D 触发器组成的 4 位数码寄存器逻辑电路。图中  $\overline{CR}$  是置 0 输入端， $D_0 \sim D_3$  为并行数码输入端， $CP$  为时钟脉冲端， $Q_0 \sim Q_3$  为并行数码输出端。

当置 0 端  $\overline{CR}=0$  时，触发器  $FF_0 \sim FF_3$  同时被置 0。寄存器工作时， $\overline{CR}$  为高电平 1。

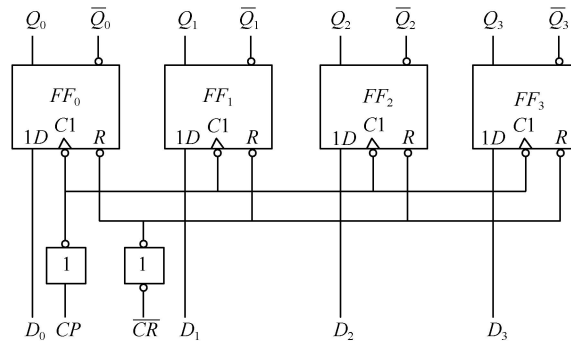


图 6.28 四位数码寄存器的逻辑电路图

由图 6.28 可知  $D_0 \sim D_3$  分别为  $FF_0 \sim FF_3$  4 个 D 触发器的 D 端输入数码，因此，当时钟脉冲  $CP$  上升沿到达时， $D_0 \sim D_3$  被并行置入到 4 个触发器中，这时  $Q_3Q_2Q_1Q_0=D_3D_2D_1D_0$ 。

在  $\overline{CR}=1$ 、 $CP=0$  时，寄存器中寄存的数码保持不变，即  $FF_0 \sim FF_3$  的状态保持不变。

## 2. 移位寄存器

具有存放数码和使数码逐位右移或左移的电路称为移位寄存器。移位寄存器又分为单向移位寄存器和双向移位寄存器。

如图 6.29 (a) 所示为由 4 个维持阻塞 D 触发器组成的 4 位右移移位寄存器。这 4 个 D 触发器共用一个时钟脉冲信号，因此为同步时序逻辑电路。数码由  $FF_0$  的 D 端串行输入，其工作原理如下：

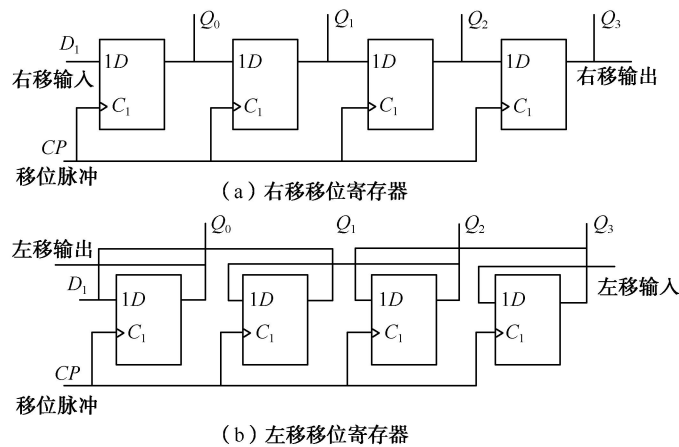


图 6.29 D 触发器组成的单向移位寄存器逻辑电路图

设串行输入数码为 1011，按高位到低位顺序传送。同时  $FF_0 \sim FF_3$  初始都为 0 状态。当输入第一位数码 1 时，这时  $D_0=1$ 、 $D_1=Q_0=0$ 、 $D_2=Q_1=0$ 、 $D_3=Q_2=0$ ，则在

第一个移位脉冲  $CP$  的上升沿作用下,  $FF_0$  由 0 状态翻转到 1 状态, 第一位数码 1 存入  $FF_0$  中, 其原来的状态  $Q_0=0$  移入  $FF_1$  中, 数码向右移了一位, 同理  $FF_1$ 、 $FF_2$  和  $FF_3$  中的数码也都依次向右移了一位, 这时寄存器的状态为  $Q_3Q_2Q_1Q_0=0001$ 。当输入第二个数码 0 时, 则在第二个移位脉冲  $CP$  上升沿的作用下, 第二个数码 0 存入  $FF_0$  中, 这时,  $Q_0=0$ ,  $FF_0$  中原来的数码 1 移入  $FF_1$  中,  $Q_1=1$ , 同理  $Q_2=Q_3=0$ , 移位寄存器中的数码又依次向右移了一位。这样, 在 4 个移位脉冲作用下, 输入的 4 位串行数码 1011 全部存入到寄存器中。移位情况如表 6.21 所示。

表 6.21 4 位右移寄存器状态表

移位脉冲	输入数据	$Q_0$	$Q_1$	$Q_2$	$Q_3$
0		0	0	0	0
1	1	1	0	0	0
2	0	0	1	0	0
3	1	1	0	1	0
4	1	1	1	0	1

移位寄存器中的数码可由  $Q_3$ 、 $Q_2$ 、 $Q_1$  和  $Q_0$  并行输出, 也可从  $Q_3$  串行输出, 但这时需要继续输入 4 个移位脉冲才能从寄存器中取出存放的 4 位数码 1011。

如图 6.29 (b) 所示为由 4 个维持阻塞 D 触发器组成的 4 位左移移位寄存器逻辑电路。其工作原理和右移移位寄存器相同, 这里不再重复了。

### 三、编码器

一般地说, 用文字、符号或者数码表示特定信息的过程称为编码, 能够实现编码功能的电路称为编码器。在数字系统中, 是采用若干个二进制码 0 和 1 来进行编码的, 要表示的信息越多, 二进制代码的位数就越多。 $n$  位二进制代码有  $2^n$  个状态, 可以表示  $2^n$  个信息。对  $N$  个信号进行编码时, 应按公式  $2^n \geq N$  来确定需要使用的二进制代码的位数  $n$ 。

常用的编码器有二进制编码器、二-十进制编码器、优先编码器等。下面介绍 74LS148 编码器。

74LS148 是一种常用的 8 线-3 线优先编码器, 其外围引脚分配图及逻辑符号见图 6.30 所示。

其功能如表 6.22 所示, 其中  $\bar{I}_0 \sim \bar{I}_7$  为编码输入端, 低电平有效。 $\bar{Y}_0 \sim \bar{Y}_7$  为编码输出端, 也为低电平有效, 即反码输出。其他功能如下:

- (1)  $\bar{S}$  为选通输入端, 低电平有效。
- (2) 优先顺序为  $\bar{I}_7 \sim \bar{I}_0$ , 即  $\bar{I}_7$  的优先级最高, 然后是  $\bar{I}_6$ 、 $\bar{I}_5$ 、 $\dots$ 、 $\bar{I}_0$ 。
- (3)  $\bar{Y}_{EX}$  为编码器的扩展输出端, 低电平有效。
- (4)  $Y_S$  为选通输出端, 高电平有效。

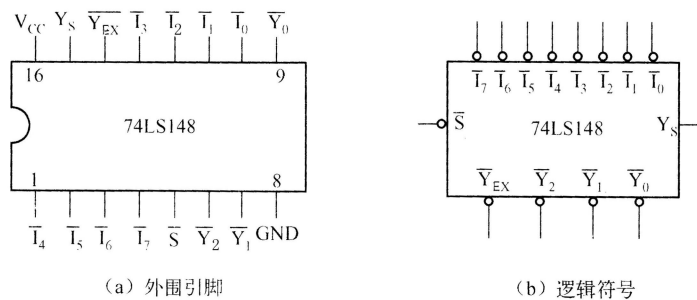


图 6.30 74LS148 外围引脚图及逻辑符号

#### 四、译码器

译码是编码的反过程，是将给定的二进制代码翻译成编码时赋予的原意，完成这种功能的电路称为译码器。译码器的输入为二进制代码，输出为输入代码对应的特定信息。

##### 1. 七段显示译码器

在数字系统中，通常需要将数字量直观地显示出来，一方面供人们直接读取处理结果，另一方面用以监视数字系统的工作情况。在 74 系列和 CMOS4000 系列电路中，七段显示译码器品种很多，功能各有差异，现以 74LS48 为例说明其功能。

74LS48 外围引脚图如图 6.31 所示。74LS48 输出高电平有效，用以驱动共阴极显示器。其芯片功能如表 6.23 所示。74LS47 输出低电平有效，用以驱动共阳极显示器。

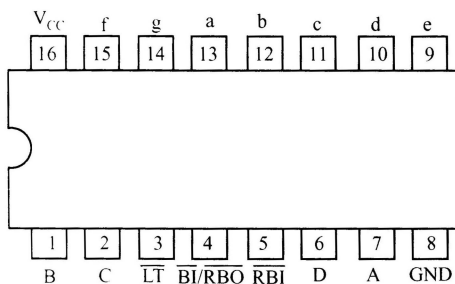


图 6.31 74LS48 外围引脚图

控制端功能如下：

$\overline{LT}$ ：灯测试，低电平有效。 $\overline{LT}=0$ ，笔段输出全 1，显示字形“8”。该输入端常用于检查 74LS48 本身及显示器的好坏。

$\overline{RBI}$ ：动态灭零输入控制。当  $\overline{LT}=1$ ， $\overline{RBI}=0$ ，且输入代码 DCBA=0000 时，输出 a~g 均为低电平，即字形“0”不显示，称之为“灭零”。

$\overline{BI}/\overline{RBO}$ ：灭灯输入控制/动态灭零输出，具有双重功能。当此端子作为输入控制使用时， $\overline{BI}$  功能有效。当  $\overline{BI}=0$  时，无论其他输入端为什么电平，所有输出 a~g 均为 0，字形熄灭。当此端子作为输出使用时， $\overline{RBO}$  功能有效，此时该端子在

$\overline{LT}=1$ ,  $\overline{RBI}=0$ , 且输入代码  $DCBA=0000$  时,  $\overline{RBO}=0$ , 其他情况下  $\overline{RBO}=1$ 。  
该端子主要用于显示多位数字时使用, 可使整数高位无用 0 和小数低位无用 0 不显示。

## 2. 七段半导体数码管

七段半导体数码管如图 6.32 (a) 所示为七段发光二极管组成的数码显示器的外形结构, 利用字段的不同组合可以显示出 0~9 十个不同的数字, 如图 6.32 (b) 所示。

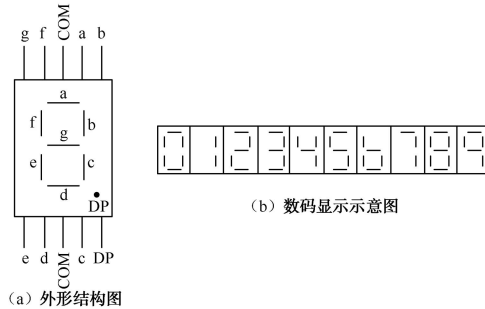


图 6.32 七段数码管显示器及数字显示示意图

数码显示器内部发光二极管的接法有两种, 即共阳极接法和共阴极接法, 分别如图 6.33 (a)、图 6.33 (b) 所示。当译码器输出为高电平有效时应选用共阴极数码管。若译码器输出为低电平有效时应选用共阳极数码管。

半导体数码显示器的优点是工作电压较低、体积小、寿命长、工作可靠性高、响应速度快、亮度高。而它的缺点是工作电流大, 每个字段的工作电流为 10mA 左右。

相对于半导体数码显示器, 还有一种为液晶显示器。

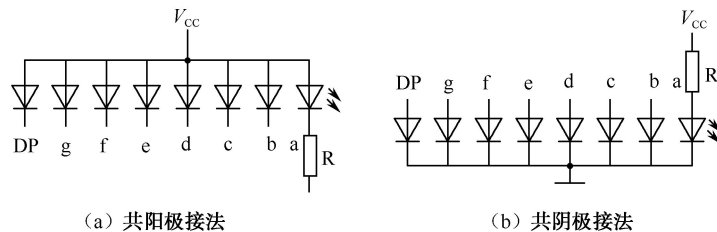



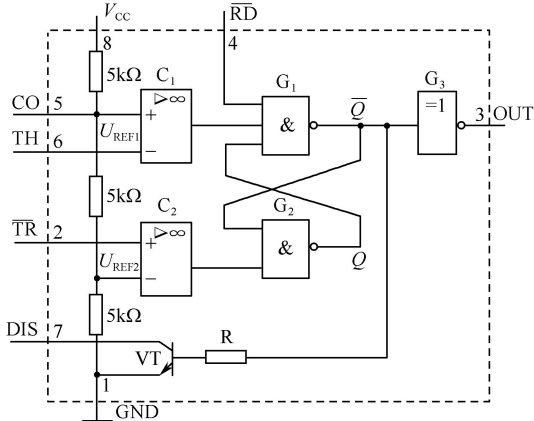


图 6.33 数码显示器内部发光二极管连接图

由于七段数码管显示数需要对应七段发光二极管输入特定的高低电平来实现, 而一般数字电路输出代码为 BCD 码形式, 这样中间的转换通过七段显示译码器来实现。

<p><b>课堂总结</b> 10min</p>	<p>1. 编码器、译码器与数据选择器的基本原理; 2. 集成编码器、译码器与数据选择器的引脚排列及其逻辑功能; 3. 集成译码器的使用技能。</p>	<p>归纳总结本节课的知识点。</p>
<p> <b>布置作业</b></p>		
<p><b>教学反思</b></p>		

——《任务任务四 555 定时器及其在汽车上的应用》

 <b>课 题</b>	<h2 style="color: #00AEEF;">555 定时器及其在汽车上的应用</h2>	 <b>课型</b>	新课
<b>授课班级</b>		<b>授课时数</b>	4
<b>教学目标</b>	555 定时器工作原理。		
<b>教学重点</b>	能识读 555 定时器的引脚排列图。		
<b>教学难点</b>	555 定时器及其在汽车上的应用。		
<b>教学方法</b>	任务驱动法、分析法、演示法、练习法。		
<b>时间分配</b>	<b>教学内容</b>	<b>教学 方法</b>	
<b>导入新课</b> 5min		通过让学生观察 555 定时器引发其思考。	
<b>讲授新课</b> 75min	<p><b>一、555 定时器的结构及工作原理</b></p> <p><b>1. 555 定时器的结构</b></p> <p>双极型 555 定时器的内部逻辑电路图如图 6.38 所示。它的内部由两个高精度的电压比较器、一个基本 RS 触发器、一个晶体三极管和几个电阻组成。内部有三个均为 5kΩ 的精密电阻串联构成基准电压分压电路，分别为两个电压比较器提供基准电压，在 5 脚悬空时比较器的基准电压分别为 <math>U_{REF1} = \frac{2}{3} V_{CC}</math> 和 <math>U_{REF2} = \frac{1}{3} V_{CC}</math>。低电平触发的基本 RS 触发器的 <math>\bar{Q}</math> 端分为两路：一路接到三极管 VT 的基极，另一路经反相器（驱动器）缓冲输出。增加驱动器的目的是使 555 电路的最大输出驱动电流达 200mA，以便直接驱动继电器、小电动机、指示灯、扬声器等负载。555 电路的各引脚及功能如下：</p>		运用实验演示进行教学。

- ① 接地端 (GND)。
- ② 置位端 ( $\overline{\text{TR}}$ )。当  $U_{\text{TR}} < U_{\text{REF2}}$  时, 引起触发使输出置 1。
- ③ 输出端 (OUT)。
- ④ 直接复位端 ( $\overline{\text{RD}}$ )。在该端加负电平可以使 555 电路复位 ( $Q=0, \overline{Q}=1$ ), 输出为低电平。
- ⑤ 电压控制端 (CO)。当 CO 悬空时, 参考电压  $U_{\text{REF1}} = \frac{2}{3} V_{\text{CC}}, U_{\text{REF2}} = \frac{1}{3} V_{\text{CC}}$ ;  
当 CO 端接某一固定电压  $U_{\text{CO}}$  时, 则  $U_{\text{REF1}} = U_{\text{CO}}, U_{\text{REF2}} = U_{\text{CO}}/2$ , 可见  $U_{\text{CO}}$  的值可以改变上下触发电平。当此端不用时, 为了提高电路的稳定性, 通常在它与地之间接一只  $0.1\mu\text{F}$  的电容。
- ⑥ 复位端 (TH), 当  $U_{\text{TH}} > U_{\text{REF2}}$  时引起触发。
- ⑦ 放电端 (DIS), 也可以作为集电极开路三极管的输出端使用。
- ⑧ 正电源端 ( $V_{\text{CC}}$ )。

下面分析 555 的逻辑功能。设 TH 和  $\overline{\text{TR}}$  的输入电压分别为  $u_{i1}$  和  $u_{i2}$ 。

当  $u_{i1} > U_{\text{REF1}}, u_{i2} > U_{\text{REF2}}$  时, 比较器  $C_1, C_2$  的输出  $u_{C1}=0, u_{C2}=1$ , 基本 RS 触发器被置 0。  $Q=0, \overline{Q}=1$ , 输出  $u_o=0$ , 同时 VT 导通。

当  $u_{i1} < U_{\text{REF1}}, u_{i2} < U_{\text{REF2}}$  时, 比较器  $C_1, C_2$  的输出  $u_{C1}=1, u_{C2}=0$ , 基本 RS 触发器被置 1。  $Q=1, \overline{Q}=0$ , 输出  $u_o=1$ , 同时 VT 截止。

当  $u_{i1} < U_{\text{REF1}}, u_{i2} > U_{\text{REF2}}$  时, 比较器  $C_1, C_2$  的输出  $u_{C1}=1, u_{C2}=1$ , 基本 RS 触发器保持原状态不变。

综上所述, 555 定时器逻辑功能如表 6.26 所示。

表 6.26 555 定时器的逻辑功能表

输 入			输 出	
$u_{i1}$	$u_{i2}$	$\overline{R_D}$	$u_o$	VT 状态
×	×	0	0	导通
$> \frac{2}{3} V_{\text{CC}}$	$> \frac{1}{3} V_{\text{CC}}$	1	0	导通
$< \frac{2}{3} V_{\text{CC}}$	$< \frac{1}{3} V_{\text{CC}}$	1	1	截止
$< \frac{2}{3} V_{\text{CC}}$	$> \frac{1}{3} V_{\text{CC}}$	1	不变	不变

## 2. 用 555 定时器构成施密特触发器

如图 6.39 所示为用 555 定时器组成施密特触发器的逻辑电路。将 555 定时器的 TH 端与  $\overline{\text{TR}}$  端连在一起, 作为触发信号  $u_i$  的输入端, 并从 OUT 端输出信号  $u_o$ 。为了提高基准电压  $U_{\text{REF1}}$  和  $U_{\text{REF2}}$  的稳定性, 在控制端 CO 对地接一只  $0.01\mu\text{F}$  的滤波电容, 此时  $U_{\text{REF1}} = \frac{2}{3} V_{\text{CC}}, U_{\text{REF2}} = \frac{1}{3} V_{\text{CC}}$ 。对照图 6.40 所示输入输出波形分析电路工作原理。

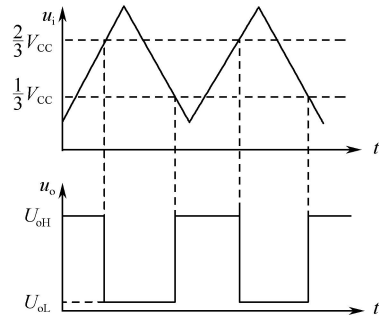
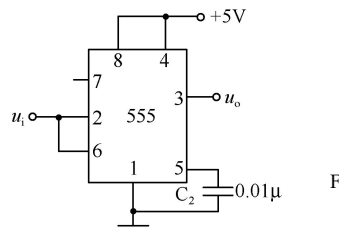


图 6.39 用 555 定时器组成施密特触发器的逻辑电路 图 6.40 施密特触发器输入输出波形图

当输入电压  $u_i < \frac{1}{3} V_{CC}$  时,  $Q=1$ ,  $\bar{Q}=0$  时, 输出  $u_o=1$ 。

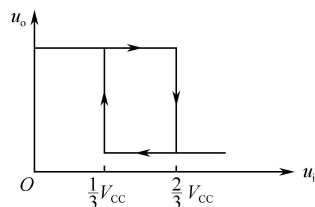
当输入电压为  $\frac{1}{3} V_{CC} < u_i < \frac{2}{3} V_{CC}$  时, 输出  $u_o=1$ 。

当输入电压  $u_i > \frac{2}{3} V_{CC}$  时, 输出  $u_o=0$ 。

在输入电压上升到  $\frac{2}{3} V_{CC}$  时, 电路的输出状态发生跃变。因此施密特触发器的正向阈值电压  $U_{T+} = \frac{2}{3} V_{CC}$ 。此时  $u_i$  继续增大, 输出状态不变。

当输入电压由高电平逐渐下降, 且  $\frac{1}{3} V_{CC} < u_i < \frac{2}{3} V_{CC}$  时, 输出  $u_o=0$ 。

当输入电压  $u_i < \frac{1}{3} V_{CC}$  时, 输出  $u_o=1$ 。可见当  $u_i$  下降到  $\frac{1}{3} V_{CC}$  时, 电路的输出状



态又一次发生跃变, 所以电路的负向阈值电压

$$U_{T-} = \frac{1}{3} V_{CC}。$$

该施密特触发器的回差电压为

$$\Delta U_T = U_{T+} - U_{T-} = \frac{1}{3} V_{CC} \quad (6-4)$$

图 6.41 施密特触发器电压传输特性

由上分析可得该电路的电压传输特性如图

6.41 所示。

### 3. 555 定时器构成单稳态触发器

单稳态触发器广泛应用于数字电路, 可以用于整形、延迟和定时。单稳态触发器有如下特点。

- ① 电路只有一个稳定状态和一个暂稳状态。
- ② 在外加触发脉冲信号的作用下, 电路能从稳态翻转到暂稳态。
- ③ 暂稳态维持一段时间后又自动返回到稳态。
- ④ 暂稳态维持的时间仅取决于电路本身的参数, 与触发脉冲无关。

单稳态触发器的暂稳态通常是靠 RC 电路的充、放电过程来维持的。RC 电路可以接成微分电路形式, 也可以接成积分电路形式, 所以, 单稳态触发器分为微分型和积分型两种。单稳态触发器可以用分立元件或单个的门电路构成, 也可以用施密特触发器构成。下面介绍用 555 电路构成的积分型单稳态触发器。



如图 6.42 所示为用 555 定时器组成的单稳态触发器逻辑电路， $\overline{\text{TR}}$  作为触发信号  $u_i$  的输入端，VT 的集电极通过电阻  $R_1$  接  $V_{CC}$ ，组成一反相器，并通过电容  $C$  接地。该电路中  $R$ 、 $C$  作为定时器件。

下面参照图 6.43 所示的波形图分析单稳态触发器的工作原理。

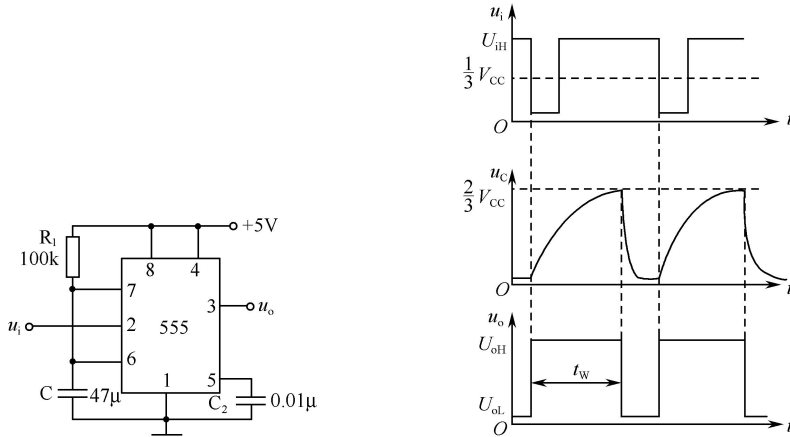


图 6.42 用 555 定时器构成单稳态触发器的逻辑电路 图 6.43 单稳态触发器输入输出波形图

① 稳定状态。接通电源后， $V_{CC}$  经过电阻  $R$  对电容  $C$  充电，当电容  $C$  上的电压  $\geq \frac{2}{3} V_{CC}$  时，输出  $u_o=0$ 。与此同时，三极管 VT 导通，电容  $C$  经过内部放电管快速放电完， $u_c \approx 0$ ，内部电压比较器  $C_1$  输出  $u_{c1}=1$ ，基本 RS 触发器的两个输入信号都为高电平 1，保持原状态不变。所以，在稳定状态时， $u_c=u_o=0$ 。

② 触发器进入暂稳态。当输入  $u_i$  由高电平  $U_{IH}$  跃到小于  $\frac{1}{3} V_{CC}$  的低电平时，输出  $u_o$  由低电平跃到高电平  $U_{OH}$ 。同时 VT 截止，电源  $V_{CC}$  通过  $R$  对  $C$  充电，电路进入暂稳态，在暂稳态期间输入电压  $u_i$  回到了高电平。

③ 自动返回稳定状态。随着  $C$  的充电，电容  $C$  上的电压逐渐增大，当  $u_c$  上升到  $u_c \geq \frac{2}{3} V_{CC}$  时，输出  $u_o$  由高电平  $U_{OH}$  跃变到低电平  $U_{OL}$ 。同时三极管 VT 导通， $C$  经 VT 迅速放电完， $u_c=0$ ，电路返回稳定状态。

单稳态触发器输出脉冲的宽度为暂稳态持续的时间，即电容  $C$  的电压由 0 充到  $\frac{2}{3} V_{CC}$  所需的时间，估算式为

$$T = RC \ln 3 \approx 1.1RC \quad (6-5)$$

#### 4. 555 定时器构成多谐振荡器

多谐振荡器是用来产生矩形波的自激振荡器，由于矩形波包含了基波和较多的高次谐波成分，因此称为多谐振荡器。另外，这种电路不存在稳定的状态，所以又称为无稳态振荡器。如图 6.44 所示为用 555 定时器组成多谐振荡器的逻辑电路。放电管 V 集电极通过电阻  $R_1$  接  $V_{CC}$ ，同时通过  $R_2$ 、 $C$  接地， $\text{TH}$ 、 $\overline{\text{TR}}$  端连接在一起接在  $R_2$ 、 $C$  之间。

对照图 6.45 所示输入输出波形讨论多谐振荡器的工作原理。

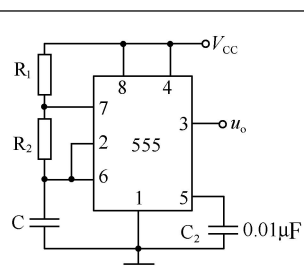


图 6.44 用 555 定时器构成多谐振荡器的逻辑电路

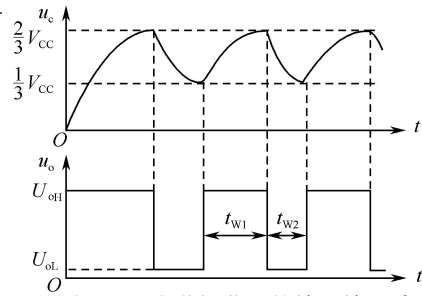


图 6.45 多谐振荡器的输入输出波形图

接通电源后， $V_{CC}$  通过  $R_1$ 、 $R_2$  对  $C$  充电，当  $u_C$  增大到  $\frac{2}{3} V_{CC}$  时，输出跃至低电平，与此同时，放电管  $V$  导通，电容  $C$  经电阻  $R_2$  和放电管放电，电路进入暂稳态。

随着电容  $C$  的放电， $u_C$  随之下落。当  $u_C$  下降到  $\frac{1}{3} V_{CC}$  时，输出转为高电平，与此同时，放电管截止，电源  $V_{CC}$  经电阻  $R_1$ 、 $R_2$  对电容  $C$  进行充电，电路返回到前一个暂稳态。因此，电容  $C$  上的电压  $u_C$  在  $\frac{1}{3} V_{CC}$  和  $\frac{2}{3} V_{CC}$  之间来回充电和放电，从而使电路产生了振荡，输出矩形脉冲。

根据振荡原理分析，该电路输出矩形波的周期取决于电容充、放电的时间常数，其充电和放电时间常数分别为  $(R_1+R_2)C$  和  $R_2C$ ，输出波形周期的估算值为

$$T = t_{w1} + t_{w2} = 0.7(R_1 + R_2)C + 0.7R_2C = 0.7(R_1 + 2R_2)C \quad (6-6)$$

通过改变充、放电时间常数就可以改变矩形波的周期和脉冲宽度。

## 二、555 定时器的汽车应用

### 1. 电子式发动机转速表电路

图 6.46 是电子式发动机转速表，它由 555 定时器及相应电阻和电容组成的单稳态触发器、电阻  $R_1$  和  $VS_1$  组成的限幅电路、耦合电容  $C_1$  等组成。转速信号取自点火线圈初级线圈  $W_{IG}$ （或低压接线柱），当发动机转动时，断电器触点  $P_0$  断开产生触发脉冲，经  $R_1$  和  $VW_1$  组成的限幅电路限幅后，再经  $C_1$  耦合去触发单稳态电路。该电路被触发后，输出端 3 产生一个正脉冲（高电平）， $VD$  截止，由  $R_3$  和  $RP$  供给转速表  $A$  电流。发动机转速升高时，断电器触点产生的触发脉冲频率增加，相应地单稳态电路的输出脉冲的频率也增加，转速表的电流值也随之增大，因此通过转速表的示值就可知道发动机的实际转速。

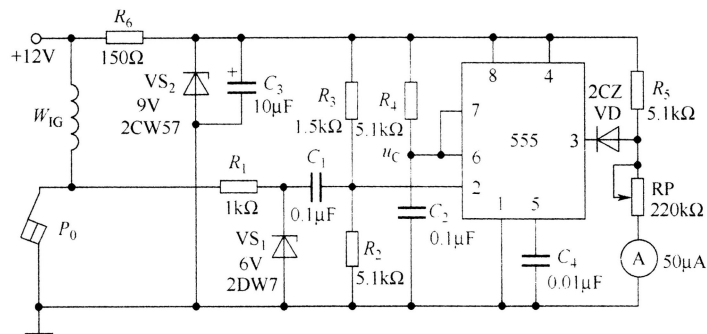


图 6.46 电子式发动机转速表

### 2. 汽车前大灯自动控制电路

汽车前大灯自动控制电路图如图 6.47 所示。该控制器有单稳态延时电路 ( $U_1$ 、

$R_1$ 、 $R_2$ 、 $R_3$ 、 $R_4$ 、 $C_1$ ), 多谐振荡电路 ( $U_2$ 、 $R_5$ 、 $R_6$ 、 $C_3$ ), NMOS 功率驱动管  $Q_2$ 、 $Q_3$  组成。该电路的+12V 直流电源由汽车的蓄电池提供。

当前方无相向行驶的车辆时, 光敏电阻  $R_3$ 、 $R_4$  因没有受到光照而呈高电阻, 相应  $U_1$  的 2 脚为高电平使 555 复位, 3 脚输出低电平, 该低电平又使  $U_2$  的 4 脚为低电平而使其处于复位状态, 3 脚输出的低电平使  $Q_1$  截止,  $Q_2$ 、 $Q_3$  导通, 两前大灯一直点亮。

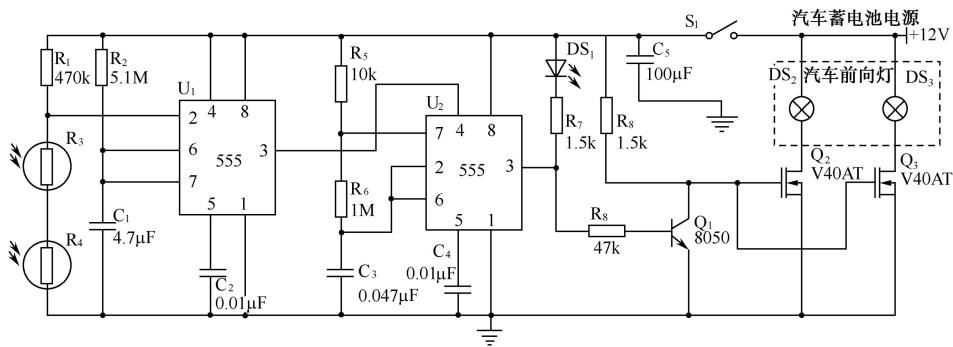


图 6.47 汽车前大灯自动控制电路图

当前方有相向行驶的车辆时, 光敏电阻  $R_3$ 、 $R_4$  因受到光照而呈低电阻, 相应  $U_1$  的 2 脚为低电平 ( $1/3V_{CC}$ ) 使 555 置位, 3 脚输出高电平, 该电平使  $U_2$  的 4 脚为高电平而使其开始振荡, 其输出的振荡频率为  $f=1.44/[(R_5+2R_6)C_3]$  的方波信号。此时,  $Q_1$  随方波信号的高低电平变化而交替导通、截止, 相应的  $Q_2$ 、 $Q_3$  也随之交替截止、导通, 从而使前大灯一明一暗地闪动。若光照消失, 则  $C_1$  通过  $R_2$  充电, 当  $C_1$  的电压充到  $2/3V_{CC}$  时,  $U_1$  复位,  $C_1$  的充电时间即为大灯延时闪烁的时间  $t=1.1R_2C_1$ 。若延时时间到,  $R_3$ 、 $R_4$  仍没有受到光照, 则  $U_1$  输出低电平稳态, 该低电平使  $U_2$  复位, 两大灯又点亮。

### 3. 雨刷控制电路

雨刷控制电路图如图 6.48 所示, 该电路由一个振荡器和控制电路组成, 控制雨刷摆动 5s 后, 再间停 0~30s, 间停的时间视车外雨的大小适时进行调节。

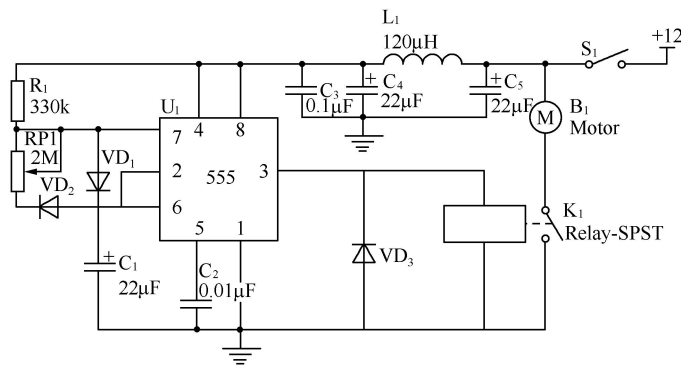


图 6.48 雨刷控制电路图

555 和  $R_1$ 、 $RP_1$ 、 $C_1$  及  $VD_1$ 、 $VD_2$  组成无稳态多谐振荡器。振荡频率由 555 电路的充放电时间常数决定。充电时间  $t_{充}=0.693R_1C_1$ , 放电时间  $t_{放}=0.693RP_1C_1$ 。图示参数对应的充电时间约为 5 秒, 放电时间可由电位器  $RP_1$  进行调节, 可在 0~30 秒时间自行调节。多谐振荡的周期为  $T=t_{充}+t_{放}=0.693(R_1+RP_1)C_1$ , 可见其周期和占空比都可以进行调节。

刚通电时, 555 的 2 脚为低电平, 使 555 置位, 3 脚输出高电平, 继电器吸合, 电动机得电运转, 带动雨刷摆动。随着  $C_1$  通过  $R_1$ 、 $VD_1$  充电, 当  $C_1$  上的点位

高于  $2/3V_{CC}$  时, 555 复位, 3 脚输出低电平, 继电器释放, 电动机停转, 雨刷停摆。由此可知,  $C_1$  充电到  $2/3V_{CC}$  的时间为工作时间,  $C_1$  放电到  $1/3V_{CC}$  的时间为间停时间。

#### 4. 汽车防盗报警器

汽车防盗报警器是为了防止车辆被盗而设计的报警装置。如下基本功能:

①驾驶员用车门遥控器或车门钥匙锁好车门后, 报警器处于警戒状态。

②如果有人以非正常方式打开车门, 则报警器报警。

③有人打开车门后即使重新关闭车门, 报警声仍持续一段时间。图 6.49 所示的汽车防盗报警器就是具有这些功能的报警装置, 防盗报警电路由磁控开关  $S_{2c}$  开关管  $VT_1$ 、充放电元件  $C_1$  和  $R_3$ 、 $VT_2$  和  $VT_3$  组成的复合管、开关管  $VT_4$ 、555 定时器组成的多谐振荡器、晶闸管  $VT(H)$ 、电喇叭按钮  $S_2$ 、12V 电源开关  $S_1$  等组成。

驾驶员用车门遥控器或车门钥匙锁车门之前, 接通 12V 电源开关  $S_1$ , 锁门之后, 磁控开关  $S_{2c}$  处于闭合状态, 开关管  $VT_1$  的 B、E 极因短路而截止, 致使后续电路均不工作, 报警器处于警戒状态。

当车门被非正常打开时, 磁控开关  $S_{2c}$  失去磁力的吸引而断开,  $VT_1$  导通, 复合管  $VT_2$ 、 $VT_3$  因获得偏流而导通, 并向  $VT_4$  提供偏流。 $VT_4$  导通, 使多谐振荡器对地接通而工作, 3 脚输出频率为 1 Hz 的脉冲电流, 经  $R_7$  触发晶闸管  $VT(H)$  导通, 汽车电喇叭便发出较响亮的报警声。

即使重新关上车门, 响声仍会继续, 因为在  $VT_1$  导通时  $C_1$  充电, 车门关后,  $VT_1$  截止, 但  $C_1$  仍然通过电阻  $R_3$  放电, 继续维持  $VT_2$ 、 $VT_3$  和  $VT_4$  等电子开关的导通, 直到  $C_1$  放电完毕。所以改变  $C_1$ 、 $R_3$  的值, 可以延长或缩短报警时间; 改变  $R_5$ 、 $R_6$ 、 $C_2$  的值, 可调报警声的长短和间歇时间。

如想控制双门, 可按图 6.49 将  $S_{2a}$ 、 $S_{2b}$  两只磁控开关串联, 工作原理与上述单门控制相似, 这里不详述。

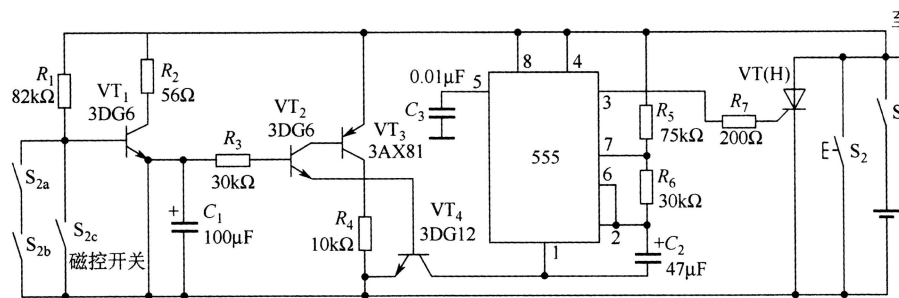



图 6.49 汽车防盗报警器电路图

<p>课堂总结 10min</p>	<p>1.编码器、译码器与数据选择器的基本原理; 2..集成编码器、译码器与数据选择器的引脚排列及其逻辑功能; 3..集成译码器的使用技能。</p>	<p>归纳总结本节课的知识点。</p>
<p> 布置作业</p>		
<p>教学反思</p>		