

高职高专“十一五”规划教材

# 电工与电子学

钟绍实 主 编

周 妍 副主编

王飞雪 王秀乾 参 编



化学工业出版社

· 北 京 ·

本书是根据高职高专教学大纲要求编写的教科书，涉及电路基础、模拟电子技术和数字电子技术三方面内容。本书系统地介绍了电路的基本分析方法、正弦交流电路、瞬态分析、半导体器件、放大电路、运算放大器、稳压电路、门电路、触发器、组合逻辑电路和时序逻辑电路。在本书编写过程中，本着面向应用、面向发展的原则，着重培养学生在实践工作中观察问题和独立分析、解决问题的综合能力，注意拓宽学生的知识面，同时考虑到高职学生的特点，尽量减少数学推导，降低理论深度，力求讲清基本概念，做到深入浅出，通俗易懂。

本书可作为高职高专、成人教育非电类各专业电工电子课程教材，还可供工程技术人员学习参考。

#### 图书在版编目 (CIP) 数据

电工与电子学/钟绍实主编. —北京: 化学工业出版社, 2009.4  
高职高专“十一五”规划教材  
ISBN 978-7-122-04926-1

I. 电… II. 钟… III. ①电工学-高等学校: 技术学校-教材②电子学-高等学校: 技术学校-教材 IV. TM1  
TN01

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2009) 第 025459 号

责任编辑: 王听讲 于 卉  
责任校对: 凌亚男

装帧设计: 周 遥

出版发行: 化学工业出版社 (北京市东城区青年湖南街 13 号 邮政编码 100011)  
印 装: 大厂聚鑫印刷有限责任公司  
787mm×1092mm 1/16 印张 12 字数 296 千字 2009 年 4 月北京第 1 版第 1 次印刷

购书咨询: 010-64518888 (传真: 010-64519686) 售后服务: 010-64518899  
网 址: <http://www.cip.com.cn>  
凡购买本书, 如有缺损质量问题, 本社销售中心负责调换。

定 价: 24.00 元

版权所有 违者必究

# 前 言

本书是根据教育部最新制订的“高职高专教育电工与电子学课程教学基本要求”而编写的，可供高等职业院校非电类各专业使用。教材与理论专著和论文不一样，教材是学生上课和学习的依据，其目的是更快更好地将知识传授给学生，使其易于理解，因此，应立足于学生角度而非教师角度编写教材，要让学生“易于学”，而不是教师“易于教”。本教材中的许多内容都是各位教师在平时教学中所积累的资料，在内容的表述上尽可能避免使用生硬的论述，而是力争做到深入浅出，通俗易懂。

本书在编写过程中，编者根据多年的教学经验，结合高职教育的特点和要求，本着面向应用、面向发展的原则，培养学生在实践工作中观察问题和独立分析、解决问题的综合能力，注意拓宽学生的知识面，同时尽量减少数学推导，降低理论深度，力求讲清基本概念。

本书始终贯彻“以服务为宗旨，以应用为目的，以实用为主，理论够用为度”的教学原则，以培养学生的应用能力为主线，通过实训环节加强实际应用能力的训练，在编写体系上也有所创新，重点训练学生的基本技能。

本书重点在于各知识点的应用，由于是面向高职院校非电专业的学生，根据高职人才需求的特点，弱化理论推导，强化知识的应用，结合实验实训，重点介绍电工电子技术的各相关知识及其应用。从本书的结构上看，采用了归类法，如第五章，将直流稳压电路直接置于二极管之后，这样就可以使整个知识点贯穿成一体，在实际教学的过程中会使教学双方都容易接受。

本书由辽宁信息职业技术学院钟绍实担任主编，辽阳职业技术学院周妍担任副主编，锦州机电工程学校王飞雪与辽宁信息职业技术学院王秀乾参编。全书共分9章，第1~4章由钟绍实编写；第5~6章由周妍编写；第7~8章由王飞雪编写；第9章由王秀乾编写。

本书的编写工作得到了化学工业出版社等有关单位和人员的大力支持，在此对所有关心和帮助过我们的同志一并致以衷心感谢！

由于编者水平有限，书中如有不妥之处，恳请广大读者批评指正。

编 者  
2009年1月

# 目 录

## 第 1 章 电路的基本概念与直流电路的

### 分析 ..... 1

1.1 电路的基本概念 .....	1
1.1.1 电路的基本物理量 .....	1
1.1.2 电路 .....	2
1.1.3 参考方向 .....	2
1.2 电阻、欧姆定律及电路的连接 .....	3
1.2.1 电阻 .....	3
1.2.2 欧姆定律 .....	3
1.2.3 电路的连接 .....	3
1.3 电气设备的额定值、电路的几种状态 ...	5
1.3.1 电气设备的额定值 .....	5
1.3.2 电路的几种状态 .....	5
1.4 电压源、电流源及其等效变换 .....	6
1.4.1 电压源 .....	6
1.4.2 电流源 .....	7
1.4.3 电压源与电流源的等效变换 .....	8
1.5 基尔霍夫定律及其应用 .....	9
1.5.1 基本概念 .....	9
1.5.2 基尔霍夫电流定律 (KCL) .....	9
1.5.3 基尔霍夫电压定律 (KVL) .....	9
1.5.4 基尔霍夫定律的应用——支路电 流法 .....	10
1.6 电路中电位的计算 .....	10
1.7 戴维南定律 .....	12
本章小结 .....	12
练习题 .....	12

## 第 2 章 正弦交流电路 ..... 16

2.1 正弦交流电的基本概念 .....	16
2.1.1 交流电的产生 .....	16
2.1.2 正弦交流电的三要素 .....	16
2.2 同频率正弦量的相加和相减 .....	19
2.2.1 正弦量的旋转矢量表示法 .....	19
2.2.2 同频率正弦量的加、减法 .....	19
2.3 交流电路中的电阻、电容与电感 .....	20
2.3.1 纯电阻电路 .....	21
2.3.2 纯电感电路 .....	22
2.3.3 纯电容电路 .....	23

2.3.4 电阻、电感的串联电路 .....	24
2.4 电阻、电感、电容串联电路及串联 谐振 .....	27
2.4.1 电路组成与分析 .....	27
2.4.2 串联谐振 .....	28
2.5 感性负载和电容器的并联电路—— 功率因数的补偿 .....	28
2.5.1 电路的功率因数 .....	28
2.5.2 感性负载和电容器的并联电路 .....	29
2.6 三相交流电路 .....	31
2.6.1 三相交流电动势的产生 .....	31
2.6.2 三相电源的联结 .....	32
2.7 三相负载的连接 .....	33
2.7.1 单相负载和三相负载 .....	33
2.7.2 三相对称负载的星形联结 .....	33
2.7.3 三相对称负载的三角形联结 .....	34
2.7.4 三相电功率 .....	34
本章小结 .....	35
练习题 .....	35

## 第 3 章 磁路及应用 ..... 37

3.1 磁路的基本物理量 .....	37
3.2 铁磁材料的磁性能 .....	39
3.2.1 磁化曲线和磁滞回线 .....	39
3.2.2 铁磁材料的磁性能 .....	40
3.2.3 铁磁材料 .....	41
3.3 磁路和磁路欧姆定律 .....	41
3.3.1 磁路基本物理量 .....	41
3.3.2 磁路欧姆定律、磁阻 .....	41
3.3.3 均匀磁路和不均匀磁路 .....	42
3.3.4 涡流 .....	42
3.4 变压器 .....	43
3.4.1 变压器的基本结构 .....	43
3.4.2 变压器的工作原理 .....	43
3.4.3 其他变压器 .....	46
3.5 三相异步电动机 .....	48
3.5.1 三相异步电动机的构造 .....	49
3.5.2 三相异步电动机的基本原理 .....	51
3.5.3 三相异步电动机的起动、反转、	

调速和制动 .....	54	5.2 PN 结及其特性 .....	92
3.5.4 三相异步电动机的铭牌和选择 .....	56	5.2.1 PN 结的形成 .....	92
3.5.5 三相异步电动机的选择 .....	58	5.2.2 PN 结的特性 .....	93
本章小结 .....	59	5.3 半导体二极管 .....	93
练习题 .....	59	5.3.1 二极管的结构 .....	93
		5.3.2 二极管的伏安特性 .....	94
		5.3.3 二极管的主要参数 .....	95
		5.3.4 二极管的应用举例 .....	95
<b>第 4 章 继电-接触器控制与可编程</b>		5.4 特殊二极管 .....	96
控制 .....	60	5.4.1 稳压二极管 .....	96
4.1 常用低压电器 .....	60	5.4.2 光电二极管 .....	97
4.1.1 刀开关 .....	60	5.4.3 发光二极管 .....	98
4.1.2 熔断器 .....	61	5.5 直流稳压电源 .....	98
4.1.3 按钮 .....	62	5.5.1 整流电路 .....	98
4.1.4 接触器 .....	63	5.5.2 滤波电路 .....	101
4.1.5 继电器 .....	63	5.5.3 硅稳压管稳压电路 .....	103
4.1.6 行程开关 .....	64	本章小结 .....	104
4.1.7 自动开关 .....	64	练习题 .....	105
4.2 绘制、识读电气原理图的原则 .....	65		
4.2.1 基本电气识图 .....	65	<b>第 6 章 半导体三极管及基本放大</b>	
4.2.2 电气原理图的原则 .....	65	电路 .....	106
4.3 三相笼型异步电动机直接起动控制		6.1 半导体三极管 .....	106
电路 .....	67	6.1.1 三极管的结构 .....	106
4.3.1 单向控制电路 .....	67	6.1.2 三极管的电流放大作用 .....	107
4.3.2 点动控制电路 .....	68	6.1.3 三极管的特性曲线 .....	108
4.3.3 正反转控制电路 .....	68	6.1.4 三极管的工作状态 .....	109
4.3.4 顺序控制电路 .....	71	6.1.5 三极管主要参数 .....	110
4.3.5 时间控制电路 .....	72	6.2 放大电路的组成和基本工作原理 .....	110
4.4 三相笼型异步电动机的降压起动和		6.2.1 放大电路各元件的作用 .....	110
制动控制 .....	73	6.2.2 放大电路中的电流波形 .....	111
4.4.1 降压起动控制 .....	73	6.2.3 放大电路的工作状态 .....	112
4.4.2 制动控制电路 .....	73	6.2.4 电路中的直流通道和交流通道 .....	112
4.5 普通车床的控制电路 .....	75	6.3 放大电路的基本分析方法 (一) ——	
4.6 可编程控制器 .....	76	工程估算法 .....	113
4.6.1 可编程控制器概述 .....	76	6.3.1 静态工作点的估算 .....	113
4.6.2 可编程序控制器的特点 .....	78	6.3.2 动态交流指标的估算 .....	114
4.6.3 可编程序控制器的指令系统 .....	78	6.4 放大电路的基本分析方法 (二) ——	
4.6.4 可编程序控制器的编程方法和		图解法 .....	116
举例 .....	84	6.4.1 放大电路无信号输入的情况 .....	116
本章小结 .....	86	6.4.2 放大电路有信号输入后的情况 .....	116
练习题 .....	86	6.4.3 路参数对放大器工作的影响 .....	118
		6.5 工作点稳定的放大电路 .....	119
<b>第 5 章 二极管及直流稳压电源</b> .....	89	6.5.1 工作点稳定的放大电路 .....	120
5.1 二极管 .....	89	6.5.2 电路的静态工作点 .....	121
5.1.1 半导体的特性 .....	89	6.5.3 电压放大倍数的计算 .....	121
5.1.2 价电子与半导体的共价键结构 .....	89	6.6 射极输出器 .....	121
5.1.3 本征半导体 .....	90		
5.1.4 掺杂半导体 .....	91		

6.6.1 电路结构 .....	121	8.3 晶闸管的触发电路 .....	152
6.6.2 射极输出器的特点 .....	122	8.3.1 单结晶体管 .....	152
6.6.3 射极输出器的应用 .....	122	8.3.2 单结晶体管触发电路 .....	154
6.7 多级放大电路 .....	123	8.3.3 单结晶体管同步触发电路 .....	155
6.7.1 级间耦合方式 .....	123	8.4 晶闸管的保护 .....	156
6.7.2 多级放大电路的电压放大倍数 .....	123	8.4.1 过电流保护 .....	156
6.8 功率放大器 .....	123	8.4.2 过电压保护 .....	157
6.8.1 对功率放大电路的一般要求 .....	124	8.5 双向晶闸管简介 .....	157
6.8.2 OCL 互补对称式功率放大电 路 OCL 电路 .....	124	8.6 晶闸管的应用实例 .....	158
6.8.3 OTL 互补对称式功放电路 .....	126	本章小结 .....	158
6.8.4 功率放大电路的集成器件 .....	126	练习题 .....	159
本章小结 .....	127		
练习题 .....	127	第 9 章 数字电路基础 .....	160
第 7 章 集成运算放大器 .....	130	9.1 数制与编码 .....	160
7.1 直接耦合放大电路 .....	130	9.1.1 数制 .....	160
7.1.1 零点漂移 .....	130	9.1.2 编码 .....	161
7.1.2 差动放大电路 .....	130	9.2 基本逻辑门电路 .....	161
7.2 集成运算放大器 .....	131	9.2.1 与逻辑及与门电路 .....	161
7.2.1 集成运算放大器的基本组成 .....	131	9.2.2 或逻辑及或门电路 .....	162
7.2.2 集成运算放大器的主要参数 .....	132	9.2.3 非逻辑及非门电路 .....	163
7.2.3 放大电路中的负反馈 .....	133	9.2.4 复合门电路 .....	164
7.3 理想集成运算放大器的分析方法 .....	136	9.3 基本逻辑及应用 .....	164
7.3.1 理想集成运算放大器 .....	136	9.3.1 基本逻辑关系 .....	165
7.3.2 反相输入运算电路的分析方法 .....	138	9.3.2 逻辑代数的运算法则的基本 规律 .....	165
7.3.3 同相输入运算电路的分析方法 .....	140	9.3.3 逻辑函数的卡诺图法化简 .....	165
7.3.4 信号转换电路 .....	143	9.4 触发器 .....	170
7.3.5 集成运放的非线性应用——电压 比较器 .....	144	9.4.1 基本 RS 触发器 .....	170
本章小结 .....	145	9.4.2 同步 RS 触发器 .....	172
练习题 .....	145	9.4.3 JK 触发器 .....	173
		9.4.4 D 触发器 .....	174
第 8 章 晶闸管及可控整流 .....	147	9.5 计数器 .....	175
8.1 晶闸管 .....	147	本章小结 .....	177
8.1.1 晶闸管的结构 .....	147	练习题 .....	177
8.1.2 工作原理 .....	148		
8.1.3 晶闸管的主要参数 .....	149	附录 .....	179
8.2 单相可控整流电路 .....	150	附录 A 半导体器件命名方法 .....	179
8.2.1 单相半波可控整流电路 .....	150	附录 B 常用半导体器件的参数 .....	180
8.2.2 单相半控桥式整流电路 .....	151	附录 C 用电安全措施 .....	183
		参考文献 .....	185

# 第 1 章 电路的基本概念与直流电路的分析

【内容提要】本章主要讨论电路的基本物理量、电路的基本元件。引入了电流、电压的参考方向的概念。应用欧姆定律、基尔霍夫定律等电路的基本定律对直流电路进行分析、计算。

## 1.1 电路的基本概念

### 1.1.1 电路的基本物理量

#### 1. 电流

通过施加适当的外力，使电子从带负电的原子向带正电的原子运动，电子的这种运动就称为电流。其大小和方向均不随时间变化的电流称为恒定电流，简称直流，用  $I$  来表示。

电流的强弱用电流强度来表示，对于恒定直流，电流强度  $I$  用单位时间内通过导体截面的电量  $Q$  来表示，即电流的单位为 A（安 [培]）<sup>①</sup>，即

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

计算微小电流时，电流的单位为 mA（毫安）、 $\mu\text{A}$ （微安）或 nA（纳安）

$1\text{mA} = 10^{-3}\text{A}$ ,  $1\mu\text{A} = 10^{-6}\text{A}$ ,  $1\text{nA} = 10^{-9}\text{A}$

#### 2. 电压

当导体的一端有多余的电子（带负电荷），而另一端缺少电子（带正电荷）时，在这两端之间就会产生电流。只要导体两端的这种状态存在，电流就会持续在导体中流动。而导致这种现象存在的源就是电动势，电动势表示电力做功的能力。

电力做功是导体的两端存在电势差（电位差）的结果，这种电位差即为电压。

电压的单位为 V（伏 [特]）<sup>②</sup>。如果电场力把 1C 电量从点 A 移到点 B 所做的功是 1J（[焦耳]）<sup>③</sup>，则 A 与 B 两点间的电压就是 1V。

计算较大的电压时用 kV（千伏），计算较小的电压时用 mV（毫伏）。其换算关系为

$1\text{kV} = 10^3\text{V}$ ,  $1\text{mV} = 10^{-3}\text{V}$

#### 3. 电功率

在直流电路中，根据电压的定义，电场力所做的功是  $W = QU$ 。把单位时间内电场力所做的功称为电功率，则有

$$P = \frac{QU}{t} = UI \quad (1-2)$$

① 安培（Andre-Marie Ampere）（1775—1836）法国物理学家，他最伟大的贡献是对电磁学的研究。

② 康特·阿莱桑德罗·伏特（1745—1827）意大利物理学家，他最伟大的贡献是在 1800 年发明了电堆（电池）。

③ 焦耳（James Prescott Joule）（1818—1889）英国物理学家，他最伟大的贡献是在 1847 年对热功当量的测定。

## 2 | 电工与电子学

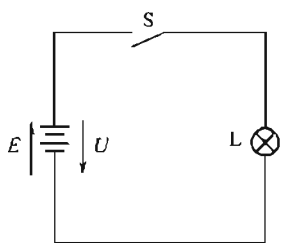


图 1-1 最简单的电路

功率的单位是 W（瓦 [特]）<sup>❶</sup>。对于大功率，采用 kW（千瓦）或 MW（兆瓦）作单位，对于小功率则用 mw（毫瓦）或  $\mu$ W（微瓦）作单位。

### 1.1.2 电路

电路是由各种电气器件按一定方式用导线连接组成的总体，提供了电流通过的闭合路径。这些电气器件包括电源、开关和负载等。最简单的电路如图 1-1 所示。

电源是电路中能量的提供装置（E），如发电机将机械能转换为电能。负载是取用电能的装置（L），把电能转换为其他形式的能，如电灯将电能转换为光能。导线和开关（S）用来连接电源和负载，为电流提供通路，把电能供给负载，并根据需要接通或断开电路。

### 1.1.3 参考方向

在电路中电流的方向与水在水管中流动很相似，顺着管路不是向前就是向后，所以在复杂电路中，为了方便分析电路，引入了参考方向的概念。

#### 1. 电流的参考方向

在进行电路分析时，先任意选定某一方向作为待求电流的正方向，并根据此正方向进行计算，若计算得到结果为正值，说明了电流的实际方向与选定的正方向相同；若计算得到结果为负值，说明电流的实际方向与选定的正方向相反。如图 1-2 所示为电流的参考正方向（图中实线所示）与实际方向（图中虚线所示）之间的关系。

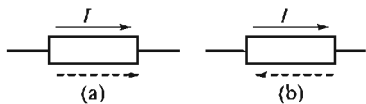


图 1-2 电流的参考方向

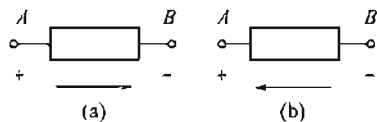


图 1-3 电压的正负与实际方向

#### 2. 电压的参考极性

电压的实际极性规定为从高电位点指向低电位点，即由“+”极指向“-”极，因此在电压的方向上电位是逐渐降低的。

电压总是相对两点之间的电位而言的，所以用双下标表示，一个下标（如 A）代表起点，后一个下标（如 B）代表终点。电压的方向则由起点指向终点，有时用箭头在图上标明。当标定的参考方向与电压的实际方向相同时 [见图 1-3(a)]，电压为正值；当标定的参考方向与实际电压方向相反时 [见图 1-3(b)]，电压为负值。

#### 3. 功率的正负

在电源内部，外力做功，正电荷由低电位移向高电位，电流逆着电场方向流动，将其能量转变为电能，其电功率为  $P=EI$ 。若计算结果  $P>0$ ，说明该元件是耗能元件；若计算结果  $P<0$ ，则该元件为供能元件。

当已知设备的功率为  $P$  时，在  $t$  时间内消耗的电能为  $W=Pt$ ，电能就等于电场力所做的功，单位是 J（焦 [耳]）。在电工技术中，往往直接用 Ws（瓦特秒）作单位，实际上则

❶ 瓦特（1736—1819）英国物理学家，他最伟大的贡献是在 1769 年发明了蒸汽机。



用  $\text{kW} \cdot \text{h}$  (千瓦小时) 作单位, 俗称 1 度电。  $1\text{kW} \times \text{h} = 3.6 \times 10^6 \text{Ws}$ 。

## 1.2 电阻、欧姆定律及电路的连接

### 1.2.1 电阻

当自由电子在电路中运动时, 会遇到不太容易放弃电子的原子。这种对电子流动 (电流) 产生阻碍作用的阻力就称为电阻 ( $R$ )。电阻的单位是  $\Omega$  (欧 [姆])<sup>●</sup>, 计量大电阻时用  $\text{k}\Omega$  (千欧) 或  $\text{M}\Omega$  (兆欧)。其换算关系为  $1\text{k}\Omega = 10^3\Omega$ ,  $1\text{M}\Omega = 10^6\Omega$ 。电阻的倒数  $G$ , 称为电导, 单位为  $\text{S}$  (西 [门子])<sup>●</sup>。

所有材料对电流都会有某种程度的阻力或抵制作用, 电阻比较低的材料称为导体 (如金属等), 导体的自由电子很多, 对电流产生的阻力较小。电阻较高的材料称为绝缘体 (如橡胶等), 其自由电子很少, 对电流产生的阻力较大。电阻的大小取决于材料的尺寸、形状及温度。即

$$R = \rho \frac{L}{S} \quad (1-3)$$

式中  $\rho$ ——电阻率, 反映了该材料的导电能力 ( $\Omega\text{m}$ );

$L$ ——该材料的长度 ( $\text{m}$ );

$S$ ——该材料的横截面积 ( $\text{m}^2$ )。

### 1.2.2 欧姆定律

欧姆定律: 导体中的电流  $I$  与加在导体两端的电压  $U$  成正比, 与导体的电阻  $R$  成反比。即

$$I = \frac{U}{R} \quad (1-4)$$

### 1.2.3 电路的连接

由于工作的需要, 常将许多电路按不同的方式连接起来, 组成一个电路网络。

#### 1. 电阻的串联

若干个电阻顺序地连接成一条无分支的电路, 称为串联电路。如图 1-4 所示电路, 是由三个电阻串联组成的。

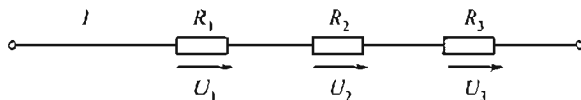


图 1-4 电阻的串联

串联电路有以下几个特点:

● 乔治·西蒙·欧姆 (1787—1854) 德国物理学家, 他最伟大的贡献是在 1826 年发现了欧姆定律。

● 恩斯特·韦尔纳·冯·西门子 (1816—1892), 德国科学家, 西门子公司创始人。1847 发明了电报机, 1866 年发明了发电机。

#### 4 | 电工与电子学

- ① 流过串联各元件的电流相等，即  $I = I_1 = I_2 = I_3$ ；
- ② 等效电阻  $R = R_1 + R_2 + R_3$ ；
- ③ 总电压  $U = U_1 + U_2 + U_3$ ；
- ④ 总功率  $P = P_1 + P_2 + P_3$ ；
- ⑤ 电阻串联具有分压作用，即

$$U_1 = \frac{R_1}{R}U, \quad U_2 = \frac{R_2}{R}U, \quad U_3 = \frac{R_3}{R}U \quad (1-5)$$

在实际中，利用串联分压的原理，可以扩大电压表的量程，还可以制成电阻分压器。

【例 1-1】 现有一表头，满刻度电流  $I_Q = 50\mu\text{A}$ ，表头的电阻  $R_C = 3\text{k}\Omega$ ，若要改装成量程为  $10\text{V}$  的电压表，如图 1-5 所示，试问应串联一个多大的电阻？

解：当表头满刻度时，其端电压为  $U_C = 50 \times 10^{-6} \times 3 \times 10^3 \text{V} = 0.15\text{V}$ 。设量程扩大到  $10\text{V}$  时所需串联的电阻为  $R$ ，则  $R$  上分得的电压为  $U_R = 10\text{V} - 0.15\text{V} = 9.85\text{V}$ 。故，应串联  $197\text{k}\Omega$  的电阻，方能将表头改装成量程为  $10\text{V}$  的电压表。

$$R = \frac{U_R R_g}{U_g} = \frac{9.85 \times 3 \times 10^3}{0.15} \Omega = 197\text{k}\Omega$$

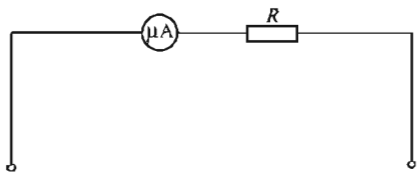


图 1-5 例 1-1 图

图 1-6 电阻的并联

### 2. 电阻的并联

将几个电阻元件都接在两个共同端点之间的连接方式称之为并联。如图 1-6 所示的电路是由三个电阻并联组成的。并联电路有以下几个特点：

- (1) 并联电阻承受同一电压，即  $U = U_1 = U_2 = U_3$ ；
- (2) 总电流  $I = I_1 + I_2 + I_3$ ；
- (3) 总电阻的倒数  $\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3}$

即总电导  $G = G_1 + G_2 + G_3$ ；

若只有两个电阻并联，其等效电阻  $R$  可用下式计算。

$$R = R_1 // R_2 = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} \quad (1-6)$$

式中  $//$ ——电阻并联。

- (4) 总功率  $P = P_1 + P_2 + P_3$ ；
- (5) 分流作用

$$I_1 = \frac{R}{R_1}I, \quad I_2 = \frac{R}{R_2}I, \quad I_3 = \frac{R}{R_3}I \quad (1-7)$$

利用电阻并联的分流作用，可扩大电流表的量程。在实际应用中，用电器在电路中通常都是并联运行的，属于相同电压等级的用电器必须并联在同一电路中，这样，才能保证它们

都在规定的电压下正常工作。

【例 1-2】有三盏电灯接在 110V 电源上，其额定值分别为 110V，100W；110V，60W；110V，40W，求总功率  $P$ ，总电流  $I$  以及通过各灯泡的电流及等效电阻。

解：(1) 因外接电源符合各灯泡额定值，各灯泡正常发光，故总功率为

$$P = P_1 + P_2 + P_3 = (100 + 60 + 40) \text{ W} = 200 \text{ W}$$

(2) 总电流与各灯泡电流为

$$I = \frac{P}{U} = \frac{200}{110} \text{ A} = 1.82 \text{ A}$$

$$I_1 = \frac{P_1}{U_1} = \frac{100}{110} \text{ A} \approx 0.909 \text{ A} \quad I_2 = \frac{P_2}{U_2} = \frac{60}{110} \text{ A} \approx 0.545 \text{ A}$$

$$I_3 = \frac{P_3}{U_3} = \frac{40}{110} \text{ A} \approx 0.364 \text{ A} \quad R = \frac{U}{I} = \frac{110}{1.82} \Omega \approx 60.4 \Omega$$

## 1.3 电气设备的额定值、电路的几种状态

### 1.3.1 电气设备的额定值

(1) 额定电流 ( $I_N$ )：电气设备长时间运行以致稳定温度达到最高允许温度时的电流，称为额定电流。

(2) 额定电压 ( $U_N$ )：为了限制电气设备的电流并考虑绝缘材料的绝缘性能等因素，允许加在电气化设备上的电压限值，称为额定电压。

(3) 额定功率 ( $P_N$ )：在直流电路中，额定电压与额定电流的乘积就是额定功率，即

$$P_N = U_N I_N \quad (1-8)$$

电气设备的额定值都标在铭牌上，使用时必须遵守。例如，一盏荧光灯，标有“220V 60W”的字样，表示该灯在 220V 电压下使用，消耗功率为 60W，若将该灯泡接在 380V 的电源上，则会因电流过大将灯烧毁；反之，若电源电压低于额定值，虽能发光，但灯光暗淡。

### 1.3.2 电路的几种状态

电路在工作时有三种工作状态，分别是通路、短路、断路。

#### 1. 通路（有载工作状态）

如图 1-7 所示，当开关 S 闭合，使电源与负载接成闭合回路，电路便处于通路状态。在实际电路中，负载都是并联的，用  $R_L$  代表等效负载电阻。电路中的用电器数量可由用户控制。当并联的用电器增多时，等效电阻  $R_L$  就会减小，而电源电动势  $E$  通常为一恒定值，且内阻  $R_0$  很小，电源端电压  $U$  变化很小，则电源输出的电流和功率将随之增大，这时称为电路的负载增大。当并联的用电器减少时，等效负载电阻  $R_L$  增大，电源输出的电流和功率将随之减小，这种情况称为负载减小。

可见，所谓负载增大或负载减小，是指增大或减小负载电流，而不是增大或减小电阻值。电路中的负载是变动的，所以，电源端电压的大、小也会随之改变。电源端电压  $U$  随电源输出电流  $I$  的变化关系，即  $U = f(I)$  称为电源的外特性，外特性曲线如图 1-8 所示。根据负载大小，电路在通路时又分为三种工作状态：当电气设备的电流等于额定电流时称为满载工作状态；当电气设备的电流小于额定电流时，称为轻载工作状态；当电气设备的电流

## 6 | 电工与电子学

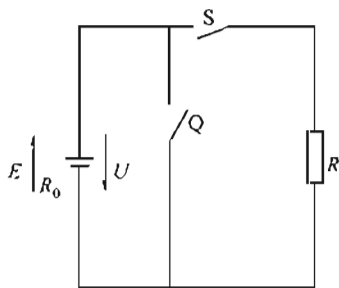


图 1-7 通路示意图

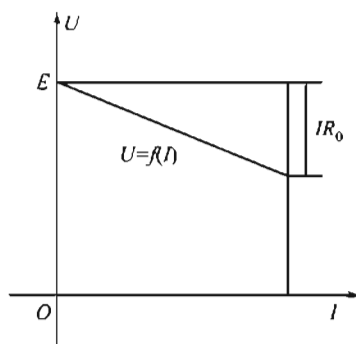


图 1-8 电源的外特性

大于额定电流时，称为过载工作状态。

## 2. 断路

所谓断路，就是电源与负载没有构成闭合回路。在如图 1-7 所示的电路中，当开关 S、Q 断开时，电路即处于断路状态。断路状态的特征是  $R=\infty$ ， $I=0$

电源内阻消耗功率： $P_E=0$

负载消耗功率： $P_L=0$

路端电压： $U_0=E$

此种情况，也称为电源的空载  $R=\infty$ ， $I=0$

电源内阻消耗功率： $P_E=0$

负载消耗功率： $P_L=0$

路端电压： $U_0=E$

此种情况，也称为电源的空载。

## 3. 短路

所谓短路，就是电源未经负载而直接由导线接通成闭合回路，如图 1-7 所示，开关 Q 闭合。短路的特征是： $R=0$ ， $U=0$ ，

$$I_s = \frac{E}{R_0} \text{ (短路电流), } P_L = 0$$



图 1-9 熔断器的符号

电源内阻消耗功率  $P_E = I_s^2 R_0$

因为电源内阻  $R_0$  一般都很小，所以短路电流  $I_s$  总是很大。如果电源短路事故未迅速排除，很大的短路电流将会烧毁电源、导线及电气设备，所以，电源短路是一种严重事故。为了防止发生短路事故，以免损坏电源，常在电路中串接熔断器。熔断器中装有熔丝。熔丝是由低熔点的铅锡合金丝或铅锡合金片做成的。一旦短路，串联在电路中的熔丝将因发热而熔断，从而保护电源免于烧坏。熔断器的符号如图 1-9 所示。

# 1.4 电压源、电流源及其等效变换

## 1.4.1 电压源

铅蓄电池及一般直流发电机等都是电源，这些电源具有不变的电动势和较低内阻的电源，一般称其为电压源，如图 1-10(a) 所示。

如果电源的内阻  $R_0 \approx 0$ ，当电源与外电路接通时，其端电压  $U = E$ ，端电压不随电流而变化，电源外特性曲线是一条水平线。这是一种理想情况，把具有不变电动势且内阻为零的电源称为理想电压源或恒压源，如图 1-10(b) 所示。

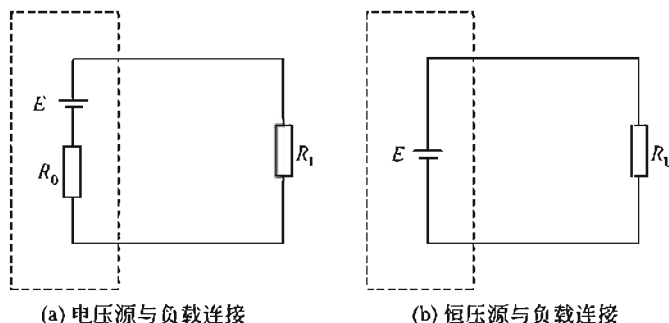


图 1-10 电压源

理想电压源是实际电源的一种理想模型。例如，在电力供电网中，对于任何一个用电器而言，整个电力网除了该用电器以外的部分，就可以近似地看成是一个理想电压源。

当电源电压稳定在其工作范围内，该电源就可认为是一个恒压源。如果电源的内阻远小于负载电阻  $R_L$ ，那么随着外电路负载电流的变化，电源的端电压可基本保持不变，这种电源就接近于一个恒压源。

#### 1.4.2 电流源

电流源对实际电源可以建立另一种理想模型，称为电流源。如果电源输出恒定的电流，即电流的大小与端电压无关，这种电源被称为理想电流源。

对于直流电路来说，理想电流源输出恒定不变的电流  $I_S$ ，与外电路负载大小无关，其端电压由负载决定。理想电流源简称电流源或恒流源，如图 1-11 所示。恒流源的伏安特性如图 1-12 所示。

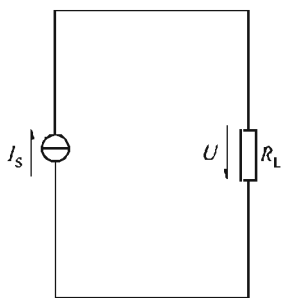


图 1-11 恒流源与负载连接

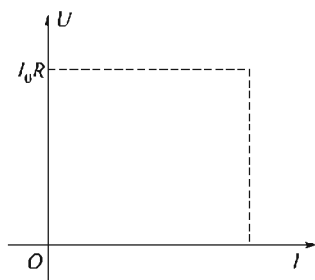


图 1-12 恒流源的伏安特性

当电流源与外电路接通时，回路电流是恒定的。实际的电流源即使没有与外电路接通，其内部也有电流流动；与负载接通后，电流源内部仍有一部分电流流动，另一部分电流则通过负载，因此，实际电流源可以用理想电流源  $I_S$  与一个电阻  $R_i$  并联表示，如图 1-13 所示。

空载时，开关 S 断开，通过  $R_i$  的电流  $I_i$  等于  $I_S$ ，端电压为  $I_S R_i$ ，外电路电流  $I = 0$ ，外电路短路时，端电压等于 0， $I = I_S$ ， $I_i = 0$ ；有负载时， $U = I_i R_i = I R_L$ ， $I_i + I = I_S$ ，即

$$I = I_S - \frac{U}{R_i} \quad I = I_S R_i - I R_i \quad (1-9)$$

由式(1-9)可知：①负载电流  $I$  总是小于恒流源输出电流  $I_S$ ；②负载电流增大，端电压

## 8 | 电工与电子学

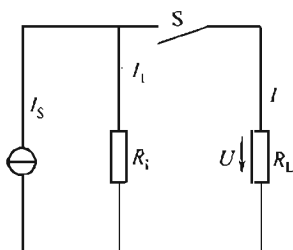


图 1-13 实际的电流源与负载连接

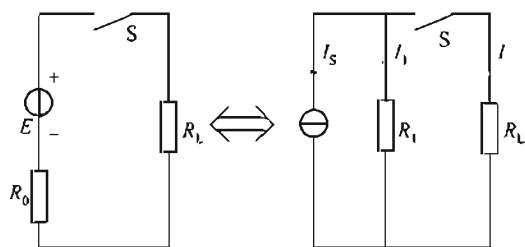


图 1-14 电压源与电流源的等效变换

减少；③负载电流愈小，内阻上的电流就愈大，内部损耗也就愈大，所以，电流源不能处于空载状态。

### 1.4.3 电压源与电流源的等效变换

一个实际的电源，既可以用理想电压源与内阻串联表示，也可以用一个理想电流源与内阻并联来表示。对于外电路而言，如果电源的外特性相同，无论采用哪种模型计算外电路电阻  $R_L$  上的电流、电压，结果都会相同。

对外电路而言，两种模型是可以等效变换的。试作对比如下。

由以上比较可知，当满足下列关系时，两者可以互换。

$$R_i = R_0, E = I_S R_i$$

电压源与电流源的等效变换电路如图 1-14 所示。关于两者的等效变换，有如下的结论。

- (1) 电压源与电流源的等效变换只能对外电路等效，对内电路则不等效。
- (2) 把电压源变换为电流源时，电流源中的  $I_S$  等于电压源输出端短路电流  $I_S$ ， $I_S$  方向与电压源对外电路输出电流方向相同，电流源中的并联电阻  $R_i$  与电压源的内阻  $R_0$  相等。
- (3) 把电流源变换成为电压源时，电压源中的电动势  $E$  等于电流源输出端断路时的端电压， $E$  的方向与电流源对外输出电流的方向相同，电压源中的内阻  $R_0$  与电流源的并联电阻  $R_i$  相等。
- (4) 理想电压源与理想电流源之间不能进行等效变换。

**【例 1-3】** 已知两个电压源， $E_1 = 24\text{V}$ ， $R_{01} = 4\Omega$ ； $E_2 = 30\text{V}$ ， $R_{02} = 6\Omega$ ，将它们同极性相并联，试求其等效电压源的电动势和内电阻  $R_0$ 。

解：如图 1-15 所示，先将两个电压源分别等效变换为电流源：

$$I_{S1} = \frac{E_1}{R_{01}} = \frac{24}{4}\text{A} = 6\text{A}$$

$$I_{S2} = \frac{E_2}{R_{02}} = \frac{30}{6}\text{A} = 5\text{A}$$

将两个电流源合并为一个等效电流源。

$$I_S = I_{S1} + I_{S2} = 6\text{A} + 5\text{A} = 11\text{A}$$

$$R_0 = R_{01} // R_{02} = \frac{R_{01} R_{02}}{R_{01} + R_{02}} = 2.4\Omega$$

然后，将这个等效电流源变换成等效电压源。

$$E = R_0 I_S = 2.4 \times 11\text{V} = 26.4\text{V}$$

$$R_0 = 2.4\Omega$$

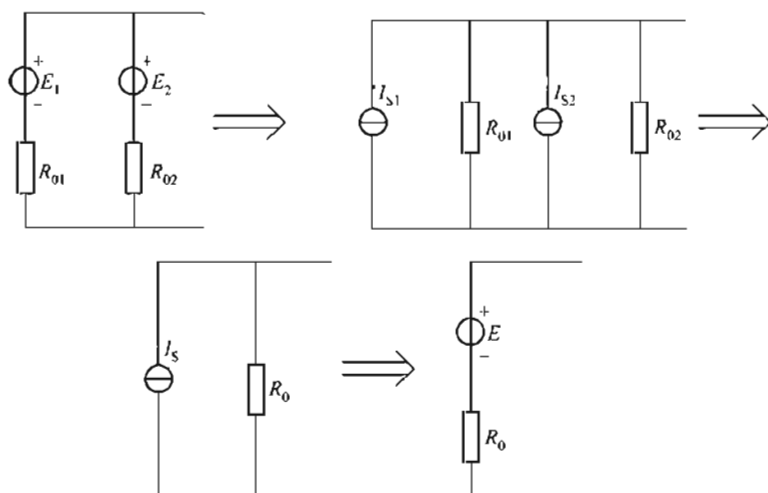


图 1-15 例 1-3 图

## 1.5 基尔霍夫定律及其应用

### 1.5.1 基本概念

- (1) 电路中每一段不分支的电路，称为支路，如图 1-16 所示的  $BAF$ ， $BCD$ ， $BE$  支路。
- (2) 电路中三条或三条以上支路相交的点，称为节点，如图 1-16 所示的  $B$ ， $E$  节点。
- (3) 电路中任一闭合路径，称为回路，如图 1-16 所示的  $ABEFA$ 、 $BCDEB$ 、 $ABCDEFA$  等都是回路。

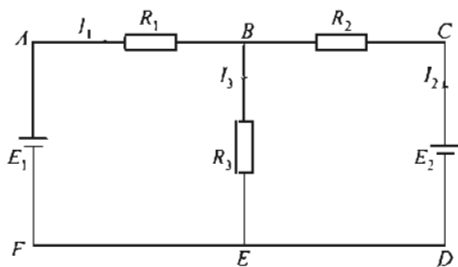


图 1-16 复杂电路

### 1.5.2 基尔霍夫电流定律 (KCL)

在电路中，任何时刻对于任一节点而言，流入节点电流之和等于流出节点电流之和。

$$\sum I_i = \sum I_o \quad (1-10)$$

如图 1-16 所示，对节点  $B$  有

$$I_1 + I_2 = I_3$$

### 1.5.3 基尔霍夫电压定律 (KVL)

沿任一回路绕行一周，回路中所有电动势的代数和等于所有电阻上电压降的代数和，即

$$\sum E = \sum IR \quad (1-11)$$

## 10 | 电工与电子学

如图 1-16 所示, 沿  $ABCDEF$  回路, 有

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

应用 KVL 定律时, 先假定绕行方向, 当电动势的方向与绕行方向一致时, 则此电动势取正号, 反之取负号; 当电阻上的电流方向与回路绕行方向一致时, 取此电阻上的电压降为正号, 反之, 取负号。

#### 1.5.4 基尔霍夫定律的应用——支路电流法

分析、计算复杂电路的方法很多, 本节介绍一种最基本的方法——支路电流法。支路电流法是以支路电流为未知量, 应用基尔霍夫定律列出与支路电流数目相等的独立方程式, 再联立求解。应用支路电流法解题的方法步骤 (假定某电路有  $m$  条支路,  $n$  个节点) 如下:

(1) 首先标定各待求支路的电流参考正方向及回路绕行方向;

(2) 应用基尔霍夫电流定律列出  $(n-1)$  个节点方程;

(3) 应用基尔霍夫电压定律列出  $[m-(n-1)]$  个独立的回路电压方程式;

(4) 由联立方程组求解各支路电流。

【例 1-4】如图 1-17 所示电路,  $E_1 = 10\text{V}$ ,  $R_1 = 6$ ,  $E_2 = 26\text{V}$ ,  $R_2 = 2\Omega$ ,  $R_3 = 4\Omega$ , 求各支路电流。

解: 假定各支路电流方向如图所示, 根据基尔霍夫定律 (KCL), 对节点  $A$  有  $I_1 + I_2 = I_3$ 。

设闭合回路的绕行方向为顺时针方向, 对回路 I, 有

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

对回路 II, 有  $E_2 = I_2 R_2 + I_3 R_3$

联立方程组:

$$\begin{cases} I_1 + I_2 = I_3 \\ 10 - 26 = 6I_1 - 2I_2 \\ 26 = 2I_2 + 4I_3 \end{cases}$$

解方程组, 得

$$I_1 = -1\text{A}, I_2 = 5\text{A}, I_3 = 4\text{A}$$

这里解得  $I_1$  为负值, 说明实际方向与假定方向相反, 同时说明  $E_1$  此时相当于负载。

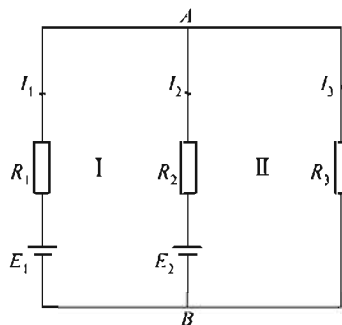


图 1-17 例 1-4 图

## 1.6 电路中电位的计算

在电路中要求得某点的电位值, 必须在电路中选择—个参考点, 这个参考点称为零电位点。零电位点可以任意选择。在电工技术中, 为了工作安全, 通常把电路的某一点与大地连接, 称为接地。这时, 电路的接地点就是电位等于零的参考点。它是分析电路中其余各点电位高低的比较标准, 用符号 “ $\perp$ ” 表示。

电路中某点的电位, 就是从该点出发, 沿任选的一条路径到参考点所经过的全部电压升、降的代数总和。



计算电位的方法和步骤如下：

(1) 选择一个零电位点，即参考点。

(2) 标出电源和负载的极性：按  $E$  的方向是由负极指向正极的原则，标出电源的正负极性，设电流方向，将电流流入端标为正极，流出端为负。

(3) 求点  $A$  的电位时，选定一条从点  $A$  到零电位点的路径，从点  $A$  出发沿此路径到零电位点，不论经过的是电源，还是负载，只要是从正极到负极，即取为电压降（为正），反之就为电压升（为负），然后，求代数和。

以如图 1-18 所示电路为例，点  $D$  是参考点，各电源的极性和  $I$  的方向如图所示，求点  $A$  的电位时有三条路径。即

沿  $A R_1 E_1 D$  路径为  $\phi_A = -I_1 R_1 + E_1$

沿  $A B R_3 E_3 D$  路径为  $\phi_A = -I_3 R_3 + E_3$

沿  $A B C R_2 E_2 D$  路径为  $\phi_A = -I_2 R_2 + E_2$

三种计算方法的结果是完全相同。

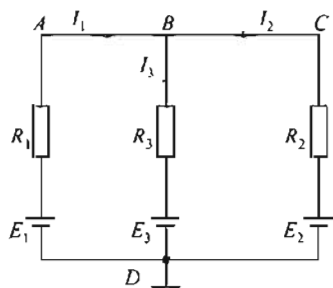


图 1-18 电位的计算

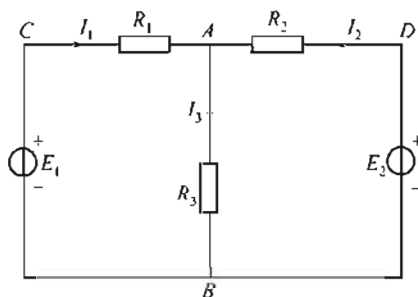


图 1-19 例 1-5 图

【例 1-5】如图 1-19 所示， $R_1 = 5\Omega$ ， $R_2 = 10\Omega$ ， $R_3 = 15\Omega$ ， $E_1 = 180\text{V}$ ， $E_2 = 80\text{V}$ ，若以点  $B$  为参考点，试求  $A$ 、 $B$ 、 $C$ 、 $D$  四点的电位  $\phi_A$ 、 $\phi_B$ 、 $\phi_C$ 、 $\phi_D$ ，同时求出  $C$ 、 $D$  之间电压  $U_{CD}$ ，若改用点  $D$  作为参考点再求  $\phi_A$ 、 $\phi_B$ 、 $\phi_C$ 、 $\phi_D$  和  $U_{CD}$ 。

解：①根据基尔霍夫定律列方程：

$$I_1 + I_2 = I_3$$

$$I_1 R_1 + I_3 R_3 = E_1 \quad (\text{回路 } CABC)$$

$$I_2 R_2 + I_3 R_3 = E_2 \quad (\text{回路 } DABD)$$

解方程组得： $I_1 = 12\text{A}$ ， $I_2 = -4\text{A}$ ， $I_3 = 8\text{A}$

②若以点  $B$  为参考点，则

$$\phi_B = 0$$

$$\phi_A = I_3 R_3 = 8 \times 15\text{V} = 120\text{V}$$

$$\phi_C = E_1 = 180\text{V}$$

$$\phi_D = E_2 = 80\text{V}$$

$$U_{CD} = U_C - U_D = (180 - 80)\text{V} = 100\text{V}$$

③若以点  $D$  为参考点，则

$$U_D = 0$$

$$U_A = -I_2 R_2 = -(-4) \times 10\text{V} = 40\text{V}$$

$$U_B = -E_2 = -80\text{V}$$

$$U_C = I_1 R_1 - I_2 R_2 = [12 \times 5 - (-4) \times 10]\text{V} = 100\text{V}$$

$$U_{CD} = U_C - U_D = (100 - 0) \text{V} = 100 \text{V}$$

## 1.7 戴维南定律

在复杂电路的计算中,若只需要计算出某一支路的电流,可把电路划分为两部分,其一为待求支路,其二为一个有源两端网络(具有两个端的网络称为两端网络)。假如有源两端网络能够化简为一个等效电压源,则复杂电路就变成一个等效电压源和待求支路相串联的简单电路,如图 1-20 所示, $R$  中的电流就可以由下式求出。

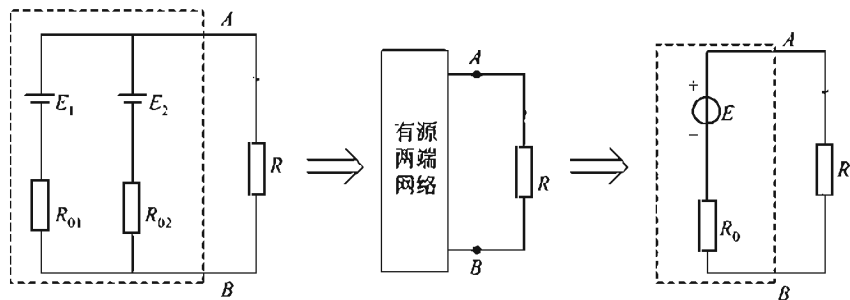


图 1-20 有源电路的等效变换

戴维南定理指出,任何一个有源两端线性网络都可以用一个等效的电压源来代替,这个等效电压源的电动势  $E$  就是有源两端网络开路电压  $U_0$ ,其内阻  $R_0$  等于从有源两端网络看进去的电阻(网络电压源的电动势短路,电流源断路)。

如图 1-20 所示,从  $AB$  两端看进去,各电动势短路为零, $A$ 、 $B$  两点之间的等效电阻为  $R_0$ ,则

$$R_0 = R_{01} // R_{02} = \frac{R_{01} R_{02}}{R_{01} + R_{02}}$$

## 本章小结

1. 电压、电流的参考方向是假定的一个方向,在电路的分析中,引入参考方向后,电压、电流是个代数量。电压、电流为正,表示电压、电流参考方向与实际方向一致;当电压、电流为负,表示电压、电流的参考方向与实际方向相反。

2. 电阻串联时,流经每个电阻的电流相同;电阻并联时,并联电阻两端电压相同。在两个电阻串联及并联时,分压公式和分流公式见式(1-5)和式(1-7)。

3. 基尔霍夫两大定律及其应用——支路电流法。

## 练习题

- 1.1 写出图 1-21 中有源支路的电压、电流关系式。
- 1.2 在图 1-22 中已知  $U_2 = 2 \text{V}$  (1) 求  $I$ ,  $U_1$ ,  $U_3$ ,  $U_4$ ,  $U_{ab}$ 。(2) 比较  $a$ ,  $b$ ,  $c$ ,  $d$ ,  $e$  各点电位的高低。
- 1.3 求图 1-23 所示电路中  $U_{ab}$ 。
- 1.4 如图 1-24 所示,已知多量程直流电流表表头等效电阻  $R_A = 1.5 \text{k}\Omega$ ,各分流电阻  $R_1 = 100 \Omega$ ,  $R_2 = 400 \Omega$ ,  $R_3 = 500 \Omega$ 。求各挡间的等效电阻。

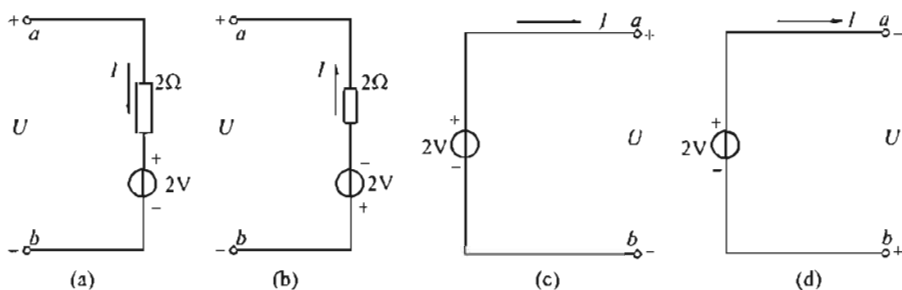


图 1-21 题 1.1 图

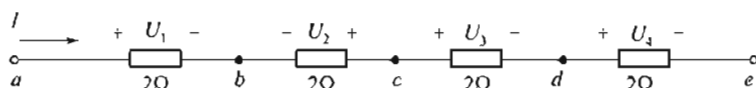


图 1-22 题 1.2 图

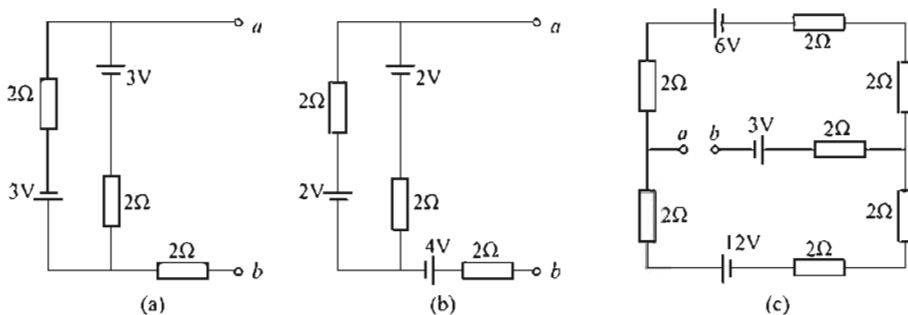


图 1-23 题 1.3 图

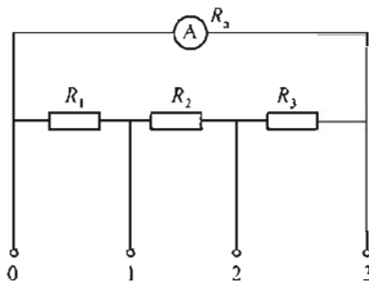


图 1-24 题 1.4 图

- 1.5 两个额定值为  $110\text{V}$ ,  $40\text{W}$  的灯能否串联接到  $220\text{V}$  的电源上? 如果把其中一个的功率换为  $100\text{W}$ , 能否将其串联接到  $220\text{V}$  的电源上? 为什么?
- 1.6 在图 1-25 中, 如果 (1)  $U=10\text{V}$ ,  $I=2\text{A}$ , (2)  $U=10\text{V}$ ,  $I=-2\text{A}$ 。试问哪个元件是吸收功率? 哪个元件是输出功率? 为什么?

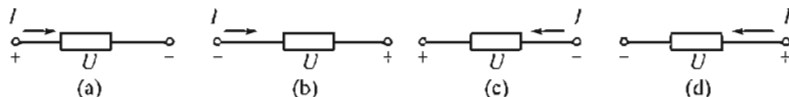


图 1-25 题 1.6 图

- 1.7 求图 1-26 所示各电路的等效电阻。
- 1.8 求图 1-27 中各电路的电压  $U$  和电流  $I$ 。
- 1.9 求图 1-28 电路中的  $U_1$  和  $U_2$ 。
- 1.10 完成图 1-29 电路的电源等效互换。
- 1.11 求图 1-30 所示电路的电流  $I$  和电压  $U$ 。

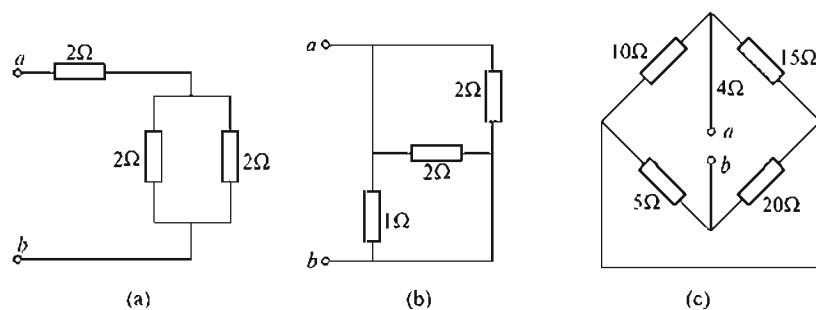


图 1-26 题 1.7 图

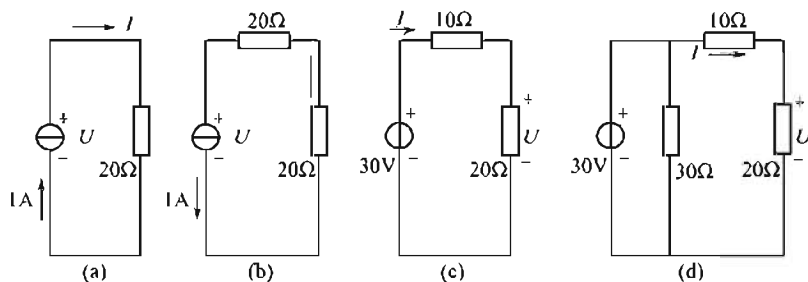


图 1-27 题 1.8 图

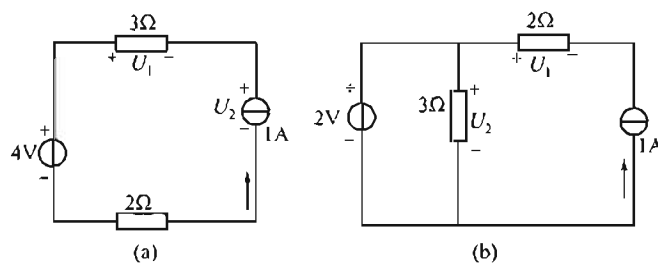


图 1-28 题 1.9 图

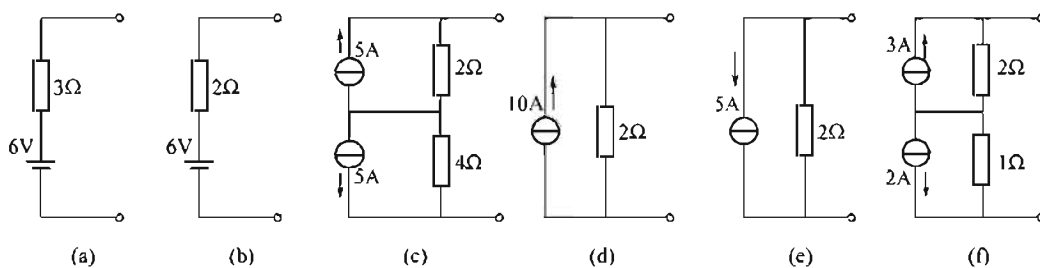


图 1-29 题 1.10 图

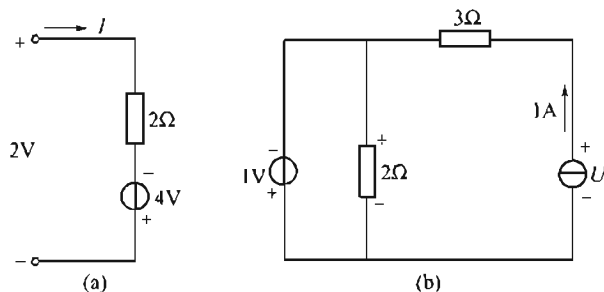


图 1-30 题 1.11 图

- 1.12 求图 1-31 中各电源输出的功率。  
 1.13 求图 1-32 电路中的电压  $U$  或电流  $I$ 。  
 1.14 求图 1-33 电路中的电压  $U$ 。  
 1.15 用戴维南定理求图 1-34 电路中的电流  $I$ 。  
 1.16 用支路电流法求图 1-35 电路中的电压  $U$  或电流  $I$ 。

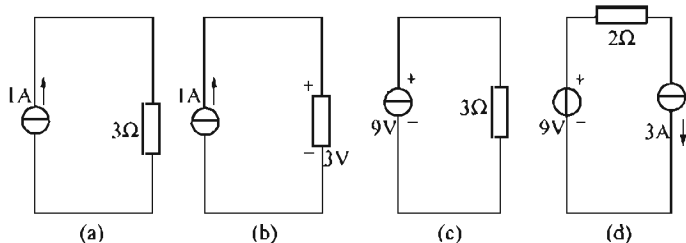


图 1-31 题 1.12 图

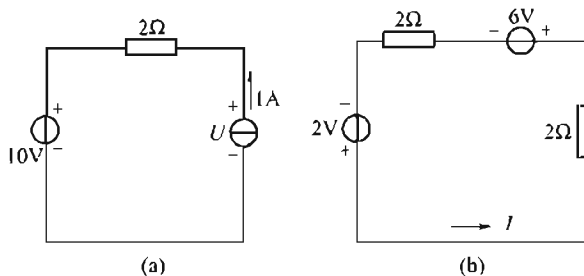


图 1-32 题 1.13 图

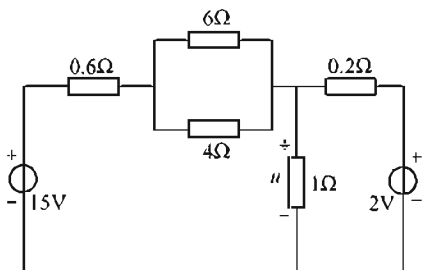


图 1-33 题 1.14 图

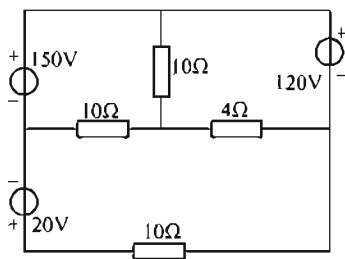


图 1-34 题 1.15 图

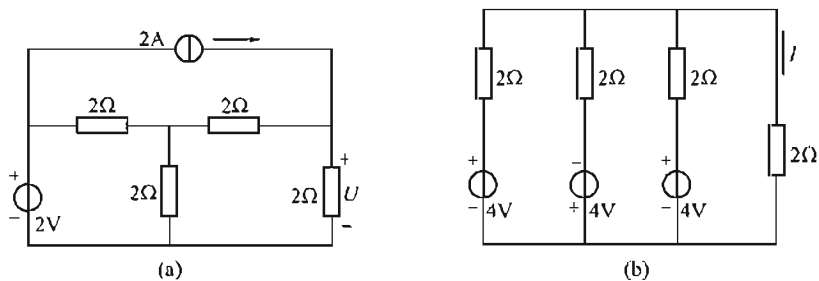


图 1-35 题 1.16 图

## 第 2 章 正弦交流电路

【内容提要】本章主要讨论和分析正弦交流电路的基本概念、基本规律，引入矢量对正弦交流电路进行分析计算；感性负载电路的分析及功率因数的提高；简要介绍三相交流电路。

### 2.1 正弦交流电的基本概念

其大小和方向都随时间作周期性变化的电动势、电压和电流统称为交流电。在交流电作用下的电路称为交流电路。在电力系统中，考虑到传输、分配和应用电能方面的便利性、经济性，大都采用交流电。工程上应用的交流电，一般是随时间按正弦规律变化的，称为正弦交流电，简称交流电。

#### 2.1.1 交流电的产生

获得交流电的方法有多种，但大多数交流电是由交流发电机产生的。

如图 2-1(a) 所示为一最简单的交流发电机，标有 N, S 的为两个静止磁极。磁极间放置一个可以绕轴旋转的铁心，铁心上绕有线圈  $a$ 、 $b$ 、 $b'$ 、 $a'$ ，线圈两端分别与两个铜质滑环相连。滑环经过电刷与外电路相连。为了获得正弦交变电动势，适当设计磁极形状，使得空气隙中的磁感应强度  $B$  在  $O-O'$  平面（即磁极的分界面，称中性面）处为零，在磁极中心处最大（ $B=B_m$ ），沿着铁心的表面按正弦规律分布 [见图 2-1(b)]。若用  $\alpha$  表示气隙中某点和轴线构成的平面与中性面的夹角，则该点的磁感应强度为  $B=B_m \sin \alpha$  电动势最大，为  $E_m$ ；线圈再转  $180^\circ$ ， $ab$  边对准 S 极中心时，绕组中感应电动势为  $-E_m$ 。

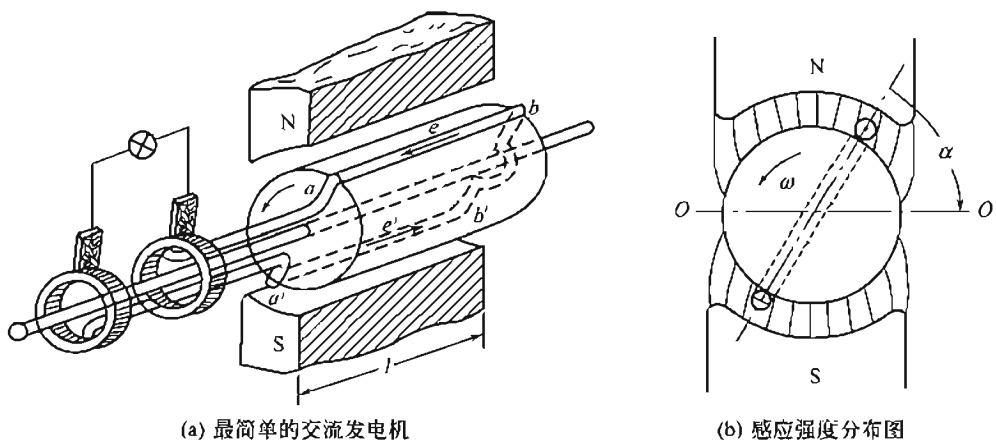


图 2-1 交流发电机的工作原理

#### 2.1.2 正弦交流电的三要素

1. 幅值——用来描述正弦交流电变化的最大范围

瞬时值：用来描述交流电在变化过程中任一时刻的值。瞬时值是时间的函数，瞬时值规

定用小写字母表示。如图 2-3 所示的电动势，其瞬时值为

$$e = E_m \sin(\omega t + \varphi) \quad (2-1)$$

**幅值：**用来描述正弦交流电变化的最大范围，图 2-3 中的最大值便是交流电的幅值。它表示在一周内，数值最大的瞬时值。幅值规定用大写字母加脚标 m 表示，例如  $I_m$ ， $E_m$ ， $U_m$  等。

**有效值：**交变电流的有效值是指在热效应方面与其相当的直流电的数值。即在相同的电阻中，分别通入直流电和交流电，在经过一个交流周期时间内，如果它们在电阻上产生的热量相等，则用此直流电的数值表示交流电的有效值（见图 2-4）。有效值规定用大写字母表示，例如  $E$ 、 $I$ 、 $U$ 。

交流电表的指示值和交流电器上标示的电流，电压数值一般都是有效值。

正弦交流电的有效值是最大值的  $\frac{1}{\sqrt{2}}$  倍。对正弦交流电动势和电压亦有同样的关系。

$$\begin{aligned} E_m &= \sqrt{2} E \\ U_m &= \sqrt{2} U \end{aligned} \quad (2-2)$$

## 2. 频率——用来描述正弦交流电变化的快慢

**周期：**当发电机转子转一周时，转子绕组中的正弦交变电动势也就变化一周。把正弦交流电变化一周所需的时间称为周期，用  $T$  表示。周期的单位是 s（秒）。

**频率：**1s 内交流电变化的周数，称为交流电的频率，用  $f$  表示，如图 2-2 所示，正弦交流波形图频率的单位是 Hz [赫（兹）]。1 Hz = 1 s<sup>-1</sup>。

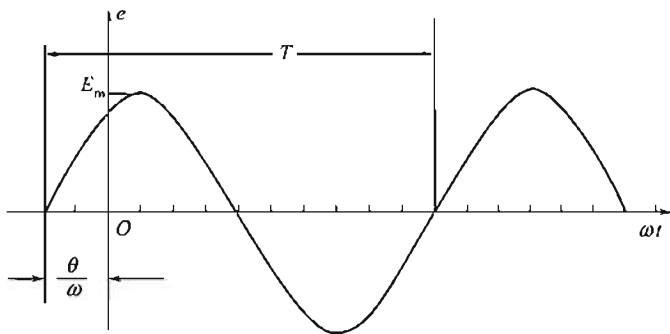


图 2-2 正弦交流电波形图

**角频率：**即每秒钟所转过的电角度，用  $\omega$  表示。角频率与频率、周期之间，显然有如下的关系：

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

## 3. 初相位——用来描述正弦交流电起始时刻所处的位置

### (1) 相位

正弦交变电动势  $e = E_m \sin(\omega t + \varphi_0)$ ，它的瞬时值随着电角度  $(\omega t + \varphi_0)$  而变化。电角度  $(\omega t + \varphi_0)$  称为正弦交流电的相位。如图 2-3(a) 所示的发电机，若在发电机铁心上放置两个夹角为  $\varphi_0$ 、匝数相同的线圈 AX 和 BY，当转子如图示方向转动时，这两个线圈中的感生电动势分别是：

$$e_A = E_m \sin \omega t$$

$$e_B = E_m \sin(\omega t + \psi_0)$$

这两个正弦交变电动势的最大值相同，频率相同，但相位不同，如图 2-3(b) 所示。

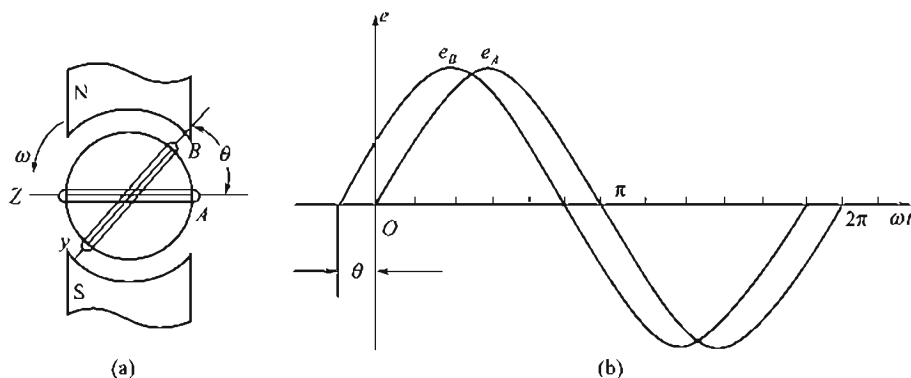


图 2-3 不同相的两电势

## (2) 初相

当  $t=0$  时的相位称为初相。上述  $e_A$  的初相是 0， $e_B$  的初相是  $\psi_0$ 。

## (3) 相位差

两个同频率的正弦交流电的相位之差称为相位差。相位差表示两正弦量到达最大值的先后差距。

例如，已知

$$i_1 = I_{1m} \sin(\omega t + \psi_1), i_2 = I_{2m} \sin(\omega t + \psi_2)$$

则  $i_1$  和  $i_2$  的相位差为

$$\psi = (\omega t + \psi_1) - (\omega t + \psi_2) = \psi_1 - \psi_2 \quad (2-4)$$

这表明两个同频率的正弦交流电的相位差等于初相之差。

若两个同频率的正弦交流电的相位差中  $\psi_1 - \psi_2 > 0$ ，称  $i_1$  超前于  $i_2$ ；若  $\psi_1 - \psi_2 < 0$ ，称  $i_1$  滞后于  $i_2$ ；若  $\psi_1 - \psi_2 = 0$ ，称  $i_1$  和  $i_2$  同相位；若相位差  $\psi_1 - \psi_2 = \pm 180^\circ$ ，则称  $i_1$  和  $i_2$  反相位。必须指出的是，在比较两个正弦交流电之间的相位时，两正弦量一定要同频率才有意义。否则随时间不同，两正弦量之间的相位差是一个变量，这就没有意义了。

综上所述，正弦交流电的最大值、频率和初相称为正弦交流电的三要素。三要素描述了正弦交流电的大小、变化快慢和起始状态。当三要素决定后，就可以唯一地确定一个正弦交流电了。

【例 2-1】如图 2-4 所示的正弦交流电，写出它们的瞬时值表达式。

解： $i_1$ 、 $i_2$ 、 $i_3$  瞬时值为

$$\begin{cases} i_1 = 5 \sin \omega t \text{ A} \\ i_2 = 8 \sin(\omega t + \frac{\pi}{6}) \text{ A} \\ i_3 = 8 \sin(\omega t - \frac{\pi}{2}) \text{ A} \end{cases}$$

【例 2-2】已知正弦交流电：

$$\begin{cases} i_1 = 5 \sin \omega t \text{ A} \\ i_2 = 10 \sin(\omega t + 45^\circ) \text{ A} \\ i_3 = 50 \sin(2\omega t - 45^\circ) \text{ A} \end{cases}$$



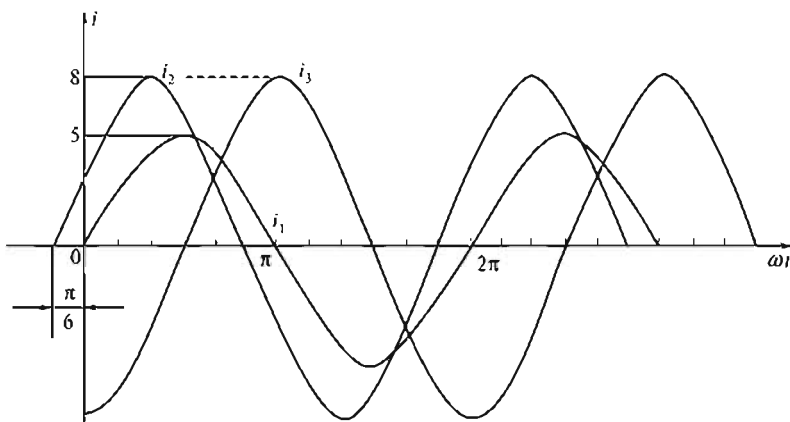


图 2-4 例 2-1 图正弦交流电波形图

求： $i_1$  和  $i_2$  相位差， $i_2$  和  $i_3$  相位差。

解： $i_2$ ， $i_3$  频率不同，相位差无意义。 $i_1$  和  $i_2$  相位差为

$$\varphi_{1,2} = \omega t - (\omega t + 45^\circ) = -45^\circ$$

表明  $i_1$  滞后于  $i_2$   $45^\circ$ 。

## 2.2 同频率正弦量的相加和相减

同频率正弦量相加、减，可以用解析式的方法，还可以用波形图逐点描绘的方法，但这两种方法都不简便。所以，要计算几个同频率的正弦量的相加、相减，常用旋转矢量的方法。

### 2.2.1 正弦量的旋转矢量表示法

用旋转矢量表示正弦交流电的方法是：在直角坐标系中画一个旋转矢量，规定用该矢量的长度表示正弦交流电的最大值，该矢量与横轴的正向的夹角表示正弦交流电的初相，矢量以角速度  $\omega$  按逆时针旋转，旋转的角速度也就表示正弦交流电的角频率。

【例 2-3】 已知： $i_1 = 7.5 \sin(\omega t + 30^\circ) \text{ A}$ ； $i_2 = 5 \sin(\omega t + 90^\circ) \text{ A}$ ； $i_3 = 5 \sin \omega t \text{ A}$ ； $i_4 = 10 \sin(\omega t - 120^\circ) \text{ A}$ ，画出表示以上正弦交流电的旋转矢量。

解：如图 2-5 所示，用旋转矢量  $I_{1m}$ 、 $I_{2m}$ 、 $I_{3m}$ 、 $I_{4m}$  分别表示正弦交流电  $i_1$ 、 $i_2$ 、 $i_3$  和  $i_4$ ，其中， $I_{1m} = 7.5 \text{ A}$ ， $I_{2m} = 5 \text{ A}$ ， $I_{3m} = 5 \text{ A}$ ， $I_{4m} = 10 \text{ A}$ 。

应当注意：只有当正弦交流电的频率相同时，表示这些正弦量的旋转矢量才能画在同一坐标系中。

### 2.2.2 同频率正弦量的加、减法

#### 1. 同频率正弦量的加、减法的一般步骤

(1) 在直角坐标系中画出代表这些正弦量的旋转矢量；

(2) 分别求出这几个旋转矢量在横轴上投影之和及在纵轴上投影之和；

(3) 求合成矢量；

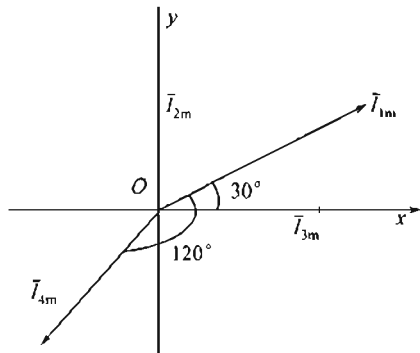


图 2-5 用旋转矢量表示正弦交流电

## 20 | 电工与电子学

(4) 根据合成矢量写出计算结果。

## 2. 正弦量加、减的简便方法

可以证明,几个同频率的正弦量相加减,其结果还是一个相同频率的正弦量。所以在画旋转矢量图时,可以略去直角坐标系及旋转角频率,只要选其中一个正弦量为参考量,将其矢量图画在任意方向上(一般画在水平位置上),其他正弦量仅按它们的参考量的相位关系画出,便可以按矢量计算法进行。

另外,由于交流电路中通常只计算有效值,而不计算瞬时值,因而计算过程更简单。

【例 2-4】 已知  $i_1 = 2\sin(\omega t + 30^\circ)\text{A}$ ,  $i_2 = 4\sin(\omega t - 45^\circ)\text{A}$ , 求  $i = i_1 + i_2$  的最大值。

解: 相位差  $\varphi_{1,2} = 30^\circ - (-45^\circ) = 75^\circ$ , 且超前于  $i_2$   $75^\circ$ 。以  $i_1$  为参考量, 画出矢量图(见图 2-6)。根据矢量图求  $I_m = I_{m1} + I_{m2}$ 。用余弦定理得

$$\begin{aligned} I_m^2 &= I_{m1}^2 + I_{m2}^2 - 2I_{m1}I_{m2}\cos 105^\circ \\ &= 2^2 + 4^2 - 2 \times 2 \times 4 \cos 105^\circ \\ &\approx 24.14 \end{aligned}$$

所以  $I_m \approx 4.91\text{A}$

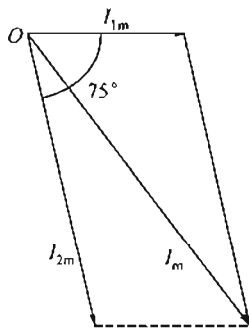


图 2-6 正弦电流相加

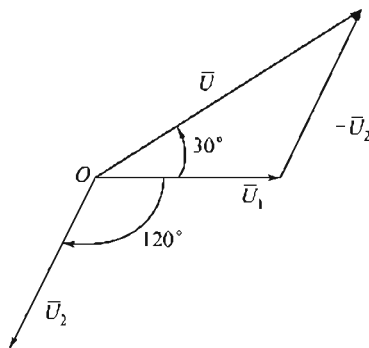


图 2-7 正弦电压相减

【例 2-5】 已知  $u_1 = 220\sqrt{2}\sin(\omega t + 90^\circ)\text{V}$ ,  $u_2 = 220\sqrt{2}\sin(\omega t - 30^\circ)\text{V}$ , 求  $u = u_1 + u_2$  的有效值。

解: 设参考量为  $u_1 = 220\sqrt{2}\sin(\omega t + 90^\circ)$ , 矢量式为  $U = U_1 + (-U_2)$ , 画出有效值矢量图(见图 2-7)。根据余弦定理, 从矢量图得

$$\begin{aligned} U^2 &= U_1^2 + U_2^2 - 2U_1U_2\cos 120^\circ \\ &= (220^2 + 220^2 - 2 \times 220 \times 220 \cos 120^\circ)\text{V}^2 \\ &\approx 145200\text{V}^2 \end{aligned}$$

所以  $U \approx 381\text{V}$

由矢量图还可得出,  $U$  和  $U_1$  的夹角为  $30^\circ$ , 表明  $u$  超前于  $u_1$   $30^\circ$ , 考虑  $u_1$  的初相是  $90^\circ$ , 故可得  $u = 381\sqrt{2}\sin(\omega t + 120^\circ)\text{V}$ 。

## 2.3 交流电路中的电阻、电容与电感

直流电流的大小与方向不随时间变化, 而交流电流的大小和方向则随时间不断变化。因此, 在交流电路中出现的一些现象, 与直流电路中的现象不完全相同。电容器接入直流电路时, 电容器被充电, 充电结束后, 电路处在断路状态。但在交流电路中, 由于电压是交变

的, 因而电容器时而充电时而放电, 电路中出现了交变电流, 使电路处在导通状态。

电感线圈在直流电路中相当于导线。但在交流电路中由于电流是交变的, 所以线圈中会产生自感电动势。电阻在直流电路与交流电路中作用相同起着限制电流的作用, 并把电能转换成热能。

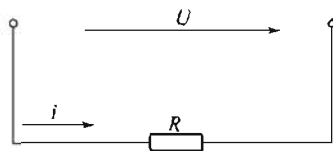


图 2-8 纯电阻电路

由于交流电路中电流、电压、电动势的大小和方向随时间变化, 因而分析和计算交流电路时, 必须在电路中给电流、电压、电动势标定一个正方向。同一电路中电压和电流的正方向应标定一致 (见图 2-8)。若在某一瞬时电流为正值, 则表示此时电流的实际方向与标定方向一致; 反之, 当电流为负值时, 则表示此时电流的实际方向与标定方向相反。

### 2.3.1 纯电阻电路

#### 1. 电阻电路中的电流

将电阻  $R$  接入如图 2-8 所示的交流电路, 设交流电压为  $u = U_m \sin \omega t$ , 则  $R$  中电流的瞬时值为

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

这表明, 在正弦电压作用下, 电阻中通过的电流是一个相同频率的正弦电流, 而且与电阻两端电压同相位。画出矢量图如图 2-9(a) 所示。

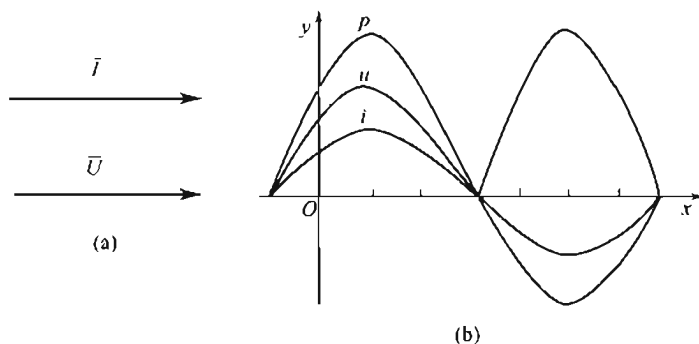


图 2-9 纯电阻电路矢量图及波形图

电流最大值为

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

电流有效值为

$$I = \frac{U_m}{\sqrt{2}R} = \frac{U}{R} \quad (2-5)$$

#### 2. 电阻电路的功率

(1) 瞬时功率: 电阻在任一瞬时取用的功率, 称为瞬功率, 按下式计算。

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

$p > 0$ , 表明电阻任一时刻都在向电源取用功率, 起负载作用。 $i$ ,  $u$ ,  $p$  的波形图如图 2-9(b) 所示。

(2) 平均功率 (有功功率): 由于瞬时功率是随时间变化的, 为便于计算, 常用平均功

## 22 | 电工与电子学

率来计算交流电路中的功率。平均功率为：

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

$$\text{或} \quad P = \frac{U_m I_m}{2} = UI = I^2 R \quad (2-6)$$

这表明，平均功率等于电压、电流有效值的乘积。平均功率的单位是 W（瓦 [特]）。通常，白炽灯、电炉等电器所组成的交流电路，可以认为是纯电阻电路。

【例 2-6】 已知：电阻  $R=440\Omega$ ，将其接在电压  $U=220\text{V}$  的交流电路上，试求电流  $I$  和功率  $P$ 。

解：电流为 
$$I = \frac{U}{R} = \frac{220}{440} \text{A} = 0.5 \text{A}$$

功率为 
$$P = UI = 220 \times 0.5 \text{W} = 110 \text{W}$$

## 2.3.2 纯电感电路

一个线圈，当其电阻小到可以忽略不计时，就可以看成是一个纯电感。纯电感电路如图 2-10(a) 所示， $L$  为线圈的电感。

## 1. 电感的电压

设  $L$  中流过的电流为  $i = I_m \sin \omega t$ ， $L$  上自感电动势  $e_L = -L di/dt$ ，由图 2-10(a) 所示标定的方向，电压瞬时值为

$$u_L = -e_L = L \frac{di}{dt} = \omega L I_m \cos \omega t = \omega L I_m \sin \left( \omega t + \frac{\pi}{2} \right)$$

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

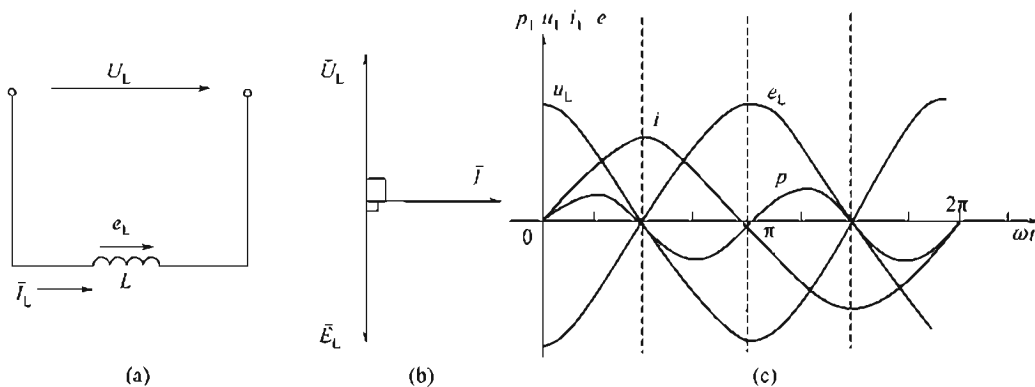


图 2-10 纯电感电路

这表明，纯电感电路中通过正弦电流时，电感两端电压也以同频率的正弦规律变化，而且在相位上超前于电流  $\pi/2$ 。纯电感电路的矢量图如图 2-10(b) 所示。

电压最大值为  $U_{Lm} = \omega L I_m$

电压有效值为 
$$U_L = \omega L I \quad (2-7)$$

## 2. 电感的感抗

由式(2-7)得

$$X_L = \frac{U_L}{I} = \omega L = 2\pi f L \quad (2-8)$$

$X_L$  称感抗, 单位是  $\Omega$ 。与电阻相似, 感抗在交流电路中也起阻碍电流的作用。这种阻碍作用与频率有关。当  $L$  一定时, 频率越高, 感抗越大。在直流电路中, 因频率等于 0, 其感抗也等于零。

### 3. 电感电路的功率

#### (1) 纯电感电路的瞬时功率为

$$P = ui = U_m \sin(\omega t + \frac{\pi}{2}) \cdot I_m \sin \omega t = U_m I_m \cos \omega t \cdot \sin \omega t = UI \sin 2\omega t$$

纯电感电路的瞬时功率  $P$ 、电压  $u$ 、电流  $i$  的波形图如图 2-10(c) 所示。从波形图可以看出, 第 1、3 个  $T/4$  期间,  $P > 0$ , 表示线圈从电源处吸收能量; 在第 2、4 个  $T/4$  期间,  $P \leq 0$ , 表示线圈向电路释放能量。

(2) 平均功率 (有功功率)  $P$ 。瞬时功率表明, 在电流的一个周期内, 电感与电源进行两次能量交换, 交换功率的平均值为零, 即纯电感电路的平均功率为零。

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T p dt = 0$$

式(2-16)说明, 纯电感线圈在电路中不消耗有功功率, 它是一种储存电能的元件。

(3) 无功功率  $Q$ 。纯电感线圈和电源之间进行能量交换的最大速率, 称为纯电感电路的无功功率。用  $Q$  表示。

$$Q_L = U_L I = I^2 X_L \quad (2-9)$$

无功功率的单位是乏耳 (var)。

【例 2-7】一个线圈电阻很小, 可略去不计。电感  $L = 35\text{mH}$ 。求该线圈在 50Hz 和 1000Hz 的交流电路中的感抗各为多少。若接在  $U = 220\text{V}$ ,  $f = 50\text{Hz}$  的交流电路中, 电流  $I$ , 有功功率  $P$ , 无功功率  $Q$  又是多少?

解: (1)  $f = 50\text{Hz}$  时,

$$X_L = 2\pi fL = 2\pi \times 50 \times 35 \times 10^{-3} \Omega \approx 11\Omega$$

$f = 1000\text{Hz}$  时,

$$X_L = 2\pi fL = 2\pi \times 1000 \times 35 \times 10^{-3} \Omega \approx 220\Omega$$

(2) 当  $U = 220\text{V}$ ,  $f = 50\text{Hz}$

电流  $I = U/X_L = (220/11)\text{A} = 20\text{A}$

有功功率  $P = 0$

无功功率  $Q = UI = 220 \times 20\text{var} = 4400\text{var}$

### 2.3.3 纯电容电路

如图 2-11(a) 所示的纯电容交流电路, 称为纯电容电路。

设电容器  $C$  两端加上电压  $u = U_m \sin \omega t$ 。由于电压的大小和方向随时间变化, 使电容器极板上的电荷量也随之变化, 电容器的充、放电过程也不断进行, 形成了纯电容电路中的电流。

#### 1. 电路中的电流

##### (1) 瞬时值:

$$i = \frac{dq}{dt} = C \frac{du_c}{dt} = \omega C U_m \cos \omega t = \omega C U_m \sin \left( \omega t + \frac{\pi}{2} \right) = I_m \sin \left( \omega t + \frac{\pi}{2} \right)$$

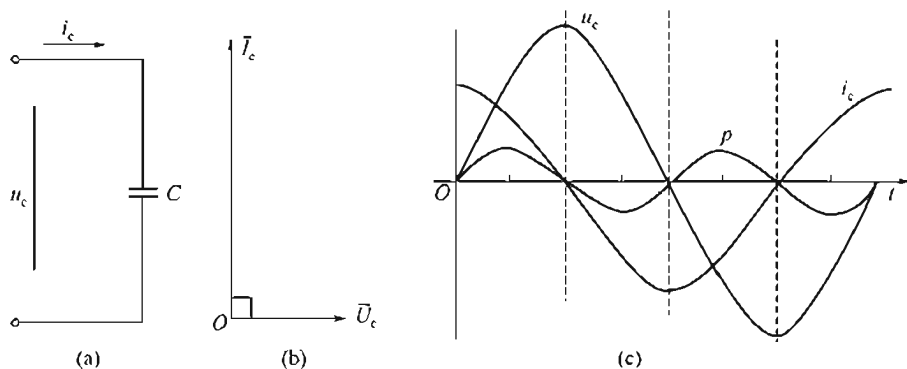


图 2-11 纯电容电路

这表明，纯电容电路中通过的正弦电流比加在它两端的正弦电压超前  $\frac{\pi}{2}$ 。如图 2-11(b) 所示，纯电容电路电压、电流波形图如图 2-11(c) 所示。

(2) 最大值

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

(3) 有效值

$$I = \omega C U = \frac{U}{\frac{1}{\omega C}} = \frac{U}{X_c} \quad (2-10)$$

2. 容抗

$$X_c = \frac{1}{\omega C} = \frac{1}{2\pi f C} \quad (2-11)$$

式中  $X_c$ ——容抗，单位是  $\Omega$ 。

3. 功率

(1) 瞬时功率

$$p = ui = U_m I_m \sin \omega t \cos \omega t = UI \sin 2\omega t$$

这表明，纯电容电路瞬时功率波形与电感电路的相似，以电路频率的 2 倍按正弦规律变化。电容器也是储能元件，当电容器充电时，它从电源吸收能量；当电容器放电时则将能量送回电源 [见图 2-14(c)]。

(2) 平均功率

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T p dt = 0$$

(3) 无功功率

$$Q_c = U_c I = I^2 X_c \quad (2-12)$$

### 2.3.4 电阻、电感的串联电路

前面介绍的纯电感电路实际上是不存在的，因为实际所用的线圈，不但有电感，还具有一定的电阻。在分析电路时，实际线圈可用一个纯电阻  $R$  与纯电感  $L$  串联的等效电路（见图 2-12）来代替。

1. 电路组成及矢量图

在如图 2-12 所示的  $R$ - $L$  串联电路中，设流过电流  $i = I_m \sin \omega t$ ，则电阻  $R$  上的电压瞬值为

$$u_R = I_m R \sin \omega t = U_{Rm} \sin \omega t$$

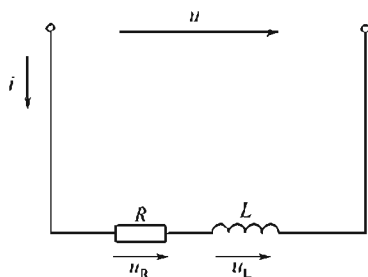


图 2-12 R-L 串联电路

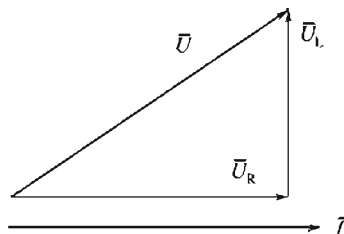


图 2-13 R-L 串联电路的电流和电压矢量图

根据式(2-12)可知电感  $L$  上的电压瞬时值为

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

总电压  $u$  的瞬时值为  $u = u_R + u_L$ 。画出该电路电流和各段电压的矢量图如图 2-13 所示。

因为通过串联电路各元件的电流是相等的，所以在画矢量图时通常把电流矢量画在水平方向上，作为参考矢量。电阻上的电压与电流同相位，故矢量  $U_R$  与  $I$  同方向；感抗两端电压超前于电流  $\pi/2$ ，故  $U_L$  矢量与  $I$  矢量垂直。 $U_L$  与  $U_R$  的合成矢量便是总电压  $U$  的矢量。

## 2. 电压有效值、电压三角形

从电压矢量图可以看出， $U_R$  矢量、 $U_L$  矢量与总电压  $U$  的矢量，恰好组成一个直角三角形，此直角三角形称为电压三角形 [见图 2-14(a)]。从电压三角形可求出总电压有效值为

$$U = \sqrt{U_R^2 + U_L^2} = \sqrt{(IR)^2 + (IX_L)^2} = I \sqrt{R^2 + X_L^2} \quad (2-13)$$

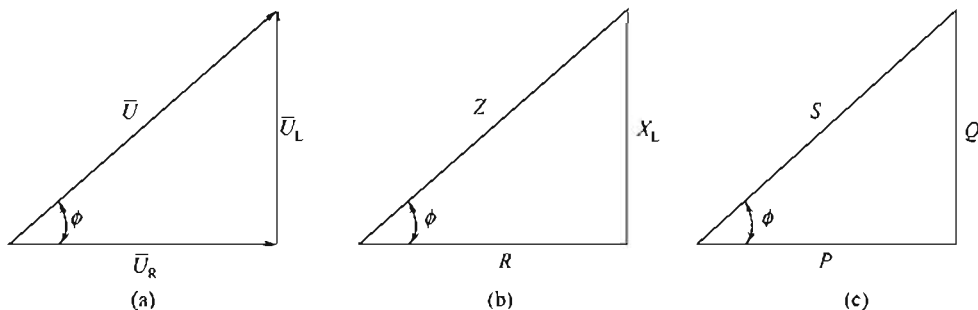


图 2-14 电压、阻抗、功率三角形

## 3. 阻抗、阻抗三角形

和欧姆定律对比，式(2-10)可写成

$$I = \frac{U}{\sqrt{R^2 + X_L^2}} = \frac{U}{Z} \quad (2-14)$$

$$\text{式中 } Z = \sqrt{R^2 + X_L^2} \quad (2-15)$$

我们把  $Z$  称为电路的阻抗，它表示  $R$ - $L$  串联电路对电流的总阻力。阻抗的单位是  $\Omega$ 。

电阻、感抗、阻抗三者之间也符合一个直角三角形三边之间的关系，如图 2-14(b) 所示，该三角形称阻抗三角形。注意这个三角形不能用矢量表示。电流与总电压之间的相位差可用式(2-16)求得。

$$\phi = \arctan \frac{U_L}{U_R} = \arctan \frac{X_L}{R} \quad (2-16)$$

$$\phi = \arccos \frac{U_R}{U} = \arccos \frac{R}{Z}$$

式(2-16)说明,  $\phi$  的大小取决于电路的电阻  $R$  和感抗  $X_L$  的大小, 而与电流电压的量值无关。

#### 4. 功率

##### (1) 有功功率 $P$

在交流电路中, 电阻消耗的功率称为有功功率。

$$P = I^2 R = U_R I = UI \cos \phi \quad (2-17)$$

式中  $\cos \phi$ ——电路功率因数, 是交流电路运行状态的重要数据之一。电路功率因数的大小由负载性质决定。

##### (2) 无功功率 $Q$

$$Q = I^2 X_L = U_L I = UI \sin \phi \quad (2-18)$$

##### (3) 视在功率 $S$

总电压  $U$  和电流  $I$  的乘积称为电路的视在功率。

$$S = UI = I^2 Z \quad (2-19)$$

视在功率的单位是 VA (伏安), 或 kVA (千伏安)。视在功率表示电器设备 (如发电机、变压器等) 的容量。

可见,  $S$ ,  $P$ ,  $Q$  之间的关系也符合一个直角三角形三边的关系, 即

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2} \quad (2-20)$$

由  $S$ ,  $P$ ,  $Q$  组成的这个三角形称为功率三角形 [见图 2-14(c)], 该三角形可看成是电压三角形各边同乘以电流  $I$  得到。与阻抗三角形一样, 功率三角形也不应画成矢量, 因此  $S$ ,  $P$ ,  $Q$  都不是正弦量。

**【例 2-8】** 把电阻  $R = 60 \Omega$ , 电感  $L = 255 \text{ mH}$  的线圈, 接入频率  $f = 50 \text{ Hz}$ , 电压  $U = 110 \text{ V}$  的交流电路中, 分别求出  $X_L$ ,  $I$ ,  $U_L$ ,  $U_R$ ,  $\cos \phi$ ,  $P$ ,  $S$ 。

解: 分别求得

$$\text{感抗 } X_L = 2\pi fL = 2\pi \times 50 \times 255 \times 10^{-3} \Omega \approx 80 \Omega$$

$$\text{阻抗 } Z = \sqrt{R^2 + X_L^2} = \sqrt{60^2 + 80^2} \Omega = 100 \Omega$$

$$\text{电流 } I = \sqrt{\frac{U}{Z}} = \frac{110}{100} \text{ A} = 1.1 \text{ A}$$

$$\text{电阻两端电压 } U_R = IR = 1.1 \times 60 \text{ V} = 66 \text{ V}$$

$$\text{电感两端电压 } U_L = IX_L = 1.1 \times 80 \text{ V} = 88 \text{ V}$$

$$\text{回路功率因数 } \cos \phi = \frac{R}{Z} = \frac{60}{100} = 0.6$$

$$\text{有功功率 } P = UI \cos \phi = 110 \times 1.1 \times 0.6 \text{ W} = 72.6 \text{ W}$$

$$\text{视在功率 } S = UI = 110 \times 1.1 \text{ VA} = 121 \text{ VA}$$

**【例 2-9】** 如图 2-15 所示电路, 已知  $U = 220 \text{ V}$ ,  $I = 2 \text{ A}$ ,  $R_1 = 50 \Omega$ , 电路的有功功率  $P = 400 \text{ W}$ , 求  $R_2$ ,  $X_L$ ,  $U_2$ ,  $\cos \phi_{BC}$ ,  $\cos \phi_{\text{总}}$ , 并绘出电路电流、电压矢量图。

解: 因为  $P = I^2 (R_1 + R_2)$

$$\text{所以 } R_2 = \frac{P}{I^2} - R_1 = \frac{400}{4} - 50 \Omega = 50 \Omega$$



$$\text{电路总阻抗 } Z = \frac{U}{I} = \frac{220}{2} \Omega = 110 \Omega$$

$$\text{感抗 } X_L = \sqrt{Z^2 - (R_1 + R_2)^2} = \sqrt{110^2 - 100^2} \Omega \approx 45.8 \Omega$$

$$\text{电路总功率因数 } \cos \phi_{\Sigma} = \frac{R_1 + R_2}{Z} = \frac{100}{110} \approx 0.91$$

$$\text{BC 段阻抗 } Z_2 = \sqrt{R_2^2 + X_L^2} = \sqrt{50^2 + 45.8^2} \Omega \approx 67.8 \Omega$$

$$\text{BC 段电压 } U_2 = IZ_2 = 2 \times 67.8 \text{ V} \approx 135 \text{ V}$$

$$\text{BC 段功率因数 } \cos \phi_{BC} = \frac{R_2}{Z_2} = \frac{50}{67.8} \approx 0.737$$

电流和电压的矢量如图 2-16 所示。

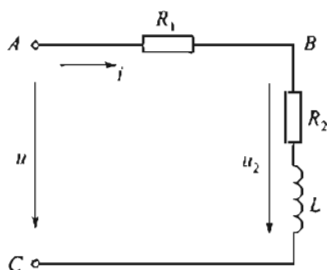


图 2-15 例 2-9 图

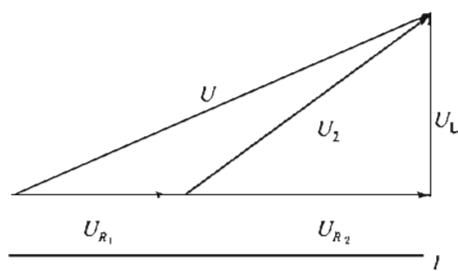


图 2-16 电流、电压矢量图

## 2.4 电阻、电感、电容串联电路及串联谐振

### 2.4.1 电路组成与分析

$R$ 、 $L$ 、 $C$  三种元件组成的串联电路如图 2-17 所示，若电路中流过正弦电流  $i = \sqrt{2} I \sin \omega t$  则各元件上对应的电压有效值为  $U_R = IR$ ， $U_L = IX_L$ ， $U_C = IX_C$

总电压的有效值矢量应为各段电压有效值矢量之和： $U = U_R + U_L + U_C$  且  $\bar{U}_L$  与电流  $\bar{I}$  同相， $\bar{U}_C$  超前于  $\bar{I} 90^\circ$ ，电压、电流矢量图如图 2-18 所示。

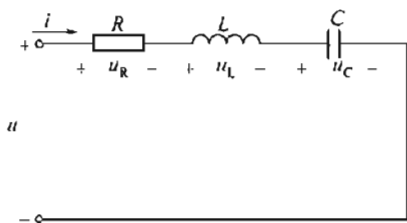


图 2-17  $R$ 、 $L$ 、 $C$  串联电路

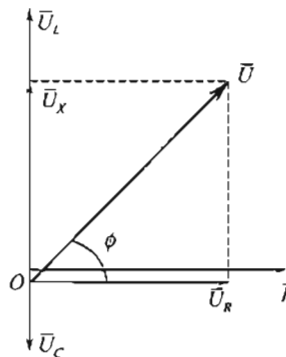


图 2-18 电压、电流矢量图

从矢量图可得总电压有效值为

$$U = \sqrt{U_R^2 + (U_L - U_C)^2} = I \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2} = IZ \quad (2-21)$$

式中  $Z = \sqrt{R^2 + (X_L + X_C)^2} = \sqrt{R^2 + X^2}$  称为电路阻抗 ( $\Omega$ );

$X = X_L - X_C$  称为电路的电抗 ( $\Omega$ )。

电路中总电压和电流的相位差为

$$\phi = \arctan \frac{U_L - U_C}{U_R} = \arctan \frac{X_L - X_C}{R} \quad (2-22)$$

从式(2-21)中可得:

当  $X_L > X_C$  时,  $\phi > 0$ , 总电压超前于电流, 电路呈感性;

当  $X_L < X_C$  时,  $\phi < 0$ , 总电压滞后于电流, 电路呈容性;

当  $X_L = X_C$  时,  $\phi = 0$ , 总电压与电流同相, 电路呈阻性, 此时称电路发生谐振。

## 2.4.2 串联谐振

### 1. 谐振条件和谐振频率

如上所述, 在  $R$ 、 $L$ 、 $C$  串联电路中, 当  $X_L = X_C$  时, 电路中总电压和电流同相位, 这时电路中产生谐振现象, 所以  $X_L = X_C$  就是谐振条件。

得谐振频率 
$$f_0 = \frac{1}{2\pi \sqrt{LC}} \quad (2-23)$$

### 2. 串联谐振时的电路特点

(1) 总电压和电流同相位, 电路呈电阻性。

(2) 串联谐振时电路阻抗为

$$Z = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2} = R \quad (2-24)$$

串联谐振时的电流为 
$$I_0 = \frac{U}{Z_0} = \frac{U}{R}$$

(3) 串联谐振时, 电感及电容两端电压等于总电压的  $Q$  倍。

$$Q = \frac{X_L}{R} = \frac{X_C}{R} = \frac{\omega_0 L}{R} = \frac{1}{\omega_0 CR} \quad (2-25)$$

$Q$  称作品质因数, 其值约为  $50 \sim 200$ , 在电子技术中常常用到串联谐振; 在电力系统中则应防止发生谐振, 以避免高压。

## 2.5 感性负载和电容器的并联电路——功率因数的补偿

### 2.5.1 电路的功率因数

功率因数是用电设备的一个重要技术指标。电路的功率因数由负载中包含的电阻与电抗的相对大小决定。纯电阻负载  $\cos\phi = 1$ ; 纯电抗负载  $\cos\phi = 0$ ; 一般负载的  $\cos\phi$  为  $0 \sim 1$ , 而且多为感性负载。例如常用的交流电动机便是一个感性负载, 满载时功率因数为  $0.7 \sim 0.9$ , 而空载或轻载时功率因数较低。

功率因数过低, 会使供电设备的利用率降低, 输电线路上的功率损失与电压损失增加。下面通过实例来说明这个问题。

**【例 2-10】** 某供电变压器额定电压  $U = 220V$ , 额定电流  $I = 100A$ , 视在功率  $S = 22kVA$ 。现变压器对一批功率为  $P = 4kW$ ,  $\cos\phi = 0.6$  的电动机供电, 问变压器能对几台电

动机供电？若  $\cos\phi$  提高到 0.9，问变压器又能对几台电动机供电？

解：当  $\cos\phi=0.6$  时，每台电动机取用的电流为

$$I = \frac{P}{U\cos\phi} = \frac{500 \times 10^3}{220 \times 0.6} \text{A} \approx 30 \text{A}$$

因而可供电动机的台数为  $I_e/I=100/30 \approx 3.3$ ，即可给 3 台电动机供电。

若  $\cos\phi=0.9$  每台电动机取用的电流为

$$I' = \frac{P}{U\cos\phi} = \frac{4 \times 10^3}{220 \times 0.9} \text{A} \approx 20 \text{A}$$

则可供电动机的台数为  $I_e/I=100/20=5$  台。

可见，当功率因数提高后，每台电动机取用的电流变小，变压器可供电的电机台数增加，使变压器的容量得到充分的利用。

【例 2-11】某厂供电变压器至发电厂之间输电线的电阻是  $50\Omega$ ，发电厂以  $10^4\text{V}$  的电压输送  $500\text{kW}$  的功率。当  $\cos\phi=0.6$  时，问输电线上的功率损失是多大？若将功率因数提高到 0.9，每年可节约多少电？

解：当  $\cos\phi=0.6$  时，输电线上的电流为

$$I = \frac{P}{U\cos\phi} = \frac{500 \times 10^3}{10^4 \times 0.6} \text{A} \approx 83 \text{A}$$

输电线上的功率损失为  $P'_{\text{损}} = I^2 r = 83^2 \times 5 \text{kW} \approx 34.5 \text{kW}$

当  $\cos\phi=0.9$  时，输电线上的电流为

$$I' = \frac{P}{U\cos\phi} = \frac{500 \times 10^3}{10^4 \times 0.9} \text{A} \approx 55.6 \text{A}$$

输电线上的功率损失为  $P_{\text{损}} = I'^2 r = 55.6^2 \times 5 \text{kW} \approx 15.5 \text{kW}$

一年共有  $365 \times 24 = 8760\text{h}$ ，当  $\cos\phi$  中从 0.6 提高到 0.9 后，节约的电能为

$$W = (P_{\text{损}} - P'_{\text{损}}) \times 8760 = (34.5 - 15.5) \times 8760 \text{kW} \cdot \text{h} \approx 166440 \text{kW} \cdot \text{h}$$

即每年可节约用电 16.6 万  $\text{kW} \cdot \text{h}$ 。

从以上两例可见，提高功率因数，可以充分利用供电设备的容量，而且可以减少输电线路上的损失。下面介绍提高功率因数的方法。

## 2.5.2 感性负载和电容器的并联电路

常用的提高功率因数的方法，是在感性负载两端并联合适的电容器。这种方法不会改变负载原有的工作状态，但负载的无功功率从电容支路得到了补偿，从而提高了功率因数。感性负载和电容器的并联电路如图 2-19 所示

由图 2-19 可知

$$Z_1 = \sqrt{R^2 + X^2}$$

$Z_1$  支路电流为

$$I_1 = \frac{U}{Z_1} = \frac{U}{\sqrt{R^2 + X_L^2}}$$

$i_1$  滞后于总电压  $u$  的电角为

$$\phi = \arccos \frac{R}{Z_1},$$

电容  $C$  支路的电流为

$$I_C = \frac{U}{X_C},$$

电路总电流为

$$I = I_1 + I_C.$$

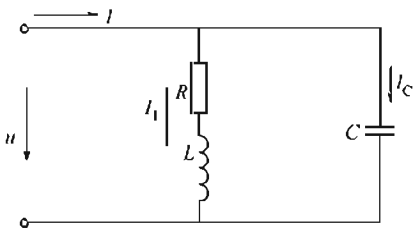


图 2-19 感性负载和电容器的并联电路

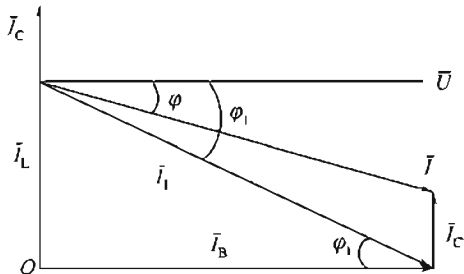


图 2-20 矢量图

值得注意的是：由于相位不同，故总电流  $I$  的有效值应从  $I_1$  和  $I_C$  的矢量和求得。根据电流矢量式画出该电路电流、电压矢量图如图 2-20 所示，并联电路取总电压为参考矢量。图 2-20 电流、电压矢量图感性负载中的电流  $I_1$  可以分解成两个分量，其中与电压同相的  $I_R$  称为有功分量。另一个滞后于电压  $\pi/2$  的  $I_L$  称为无功分量，其大小分别为

$$I_R = I_1 \cos \phi_1, \quad I_L = I_1 \sin \phi_1$$

从矢量图求出总电流的有效值为

$$I = \sqrt{I_R^2 + (I_L - I_C)^2}$$

总电流与电压的相位差为

$$\phi = \arctan \frac{I_L - I_C}{I_R}$$

根据矢量图，讨论以下几种情况。

- (1) 当  $I_L > I_C$  时，电路的总电流滞后于电压，此时电路呈感性。
- (2) 当  $I_L < I_C$  时，电路的总电流超前于电压，此时电路呈容性。
- (3) 当  $I_L = I_C$  时，电路的总电流与电压同相位， $\phi = 0$ ，此时电路呈电阻性。这种情况称为并联谐振（或电流谐振）。并联谐振时，电路的阻抗最大，总电流最小。

【例 2-12】如图 2-21 所示，已知电压  $U = 220\text{V}$ ，电路频率  $f = 50\text{Hz}$ ，电动机取用功率  $P = 4\text{kW}$ ，其功率因数  $\cos \phi_1 = 0.6$ ，并入电容  $C = 220\mu\text{F}$  后，求总电流  $I$  和电路功率因数  $\cos \phi$ 。

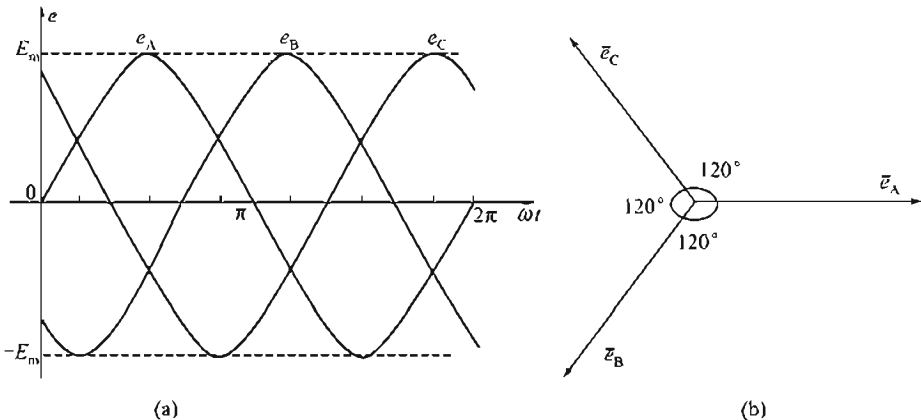


图 2-21 三相对称电动势的波形图、矢量图

解：电动机支路的电流  $I = \frac{P}{U \cos \phi_1} = \frac{4000}{220 \times 0.6} \text{ A} \approx 30.3 \text{ A}$

$$\cos \phi_1 = 0.6 \quad \phi_1 \approx 53^\circ \quad \sin \phi_1 \approx 0.8$$

电容支路电流

$$I_C = \frac{U}{X_C} = \frac{U}{\frac{1}{2\pi f C}} = 220 \times 2\pi \times 50 \times 200 \times 10^{-6} \text{ A} \approx 13.8 \text{ A}$$

由图 2-23 的矢量图，总电流为

$$I = \sqrt{(I_1 \cos \phi_1)^2 + (I_1 \sin \phi_1 - I_C)^2} = \sqrt{18.2^2 + (24.2 - 13.8)^2} \text{ A} \approx 21 \text{ A}$$

电路功率因数

$$\cos \phi_{\text{总}} = \frac{I_1 \cos \phi_1}{I} = \frac{30.3 \times 0.6}{21} \approx 0.866$$

## 2.6 三相交流电路

目前，电能的生产、输送和分配，基本都采用三相交流电路。三相交流电路就是由三个频率相同，最大值相等，相位上互差  $120^\circ$  的正弦电动势组成的电路。这样的三个电动势称为三相对称电动势。

广泛应用三相交流电路的原因，是因为它具有以下优点：

- (1) 在相同体积下，三相发电机输出功率比单相发电机的输出功率大；
- (2) 在输送功率相等、电压相同、输电距离和线路损耗都相同的情况下，三相制输电比单相输电节省输电线材料，输电成本低；
- (3) 与单相电动机相比，三相电动机结构简单，价格低廉，性能良好，维护使用方便。

### 2.6.1 三相交流电动势的产生

如图 2-22 所示，在三相交流发电机中，定子上嵌有三个具有相同匝数和尺寸的绕组 AX, BY, CZ。其中 A, B, C 分别为三个绕组的首端，X, Y, Z 分别为绕组的末端。绕组在空间的位置彼此相差  $120^\circ$ （两极发电机）。

当转子磁场在空间按正弦规律分布、转子恒速旋转时，三相绕组中将感应出三相正弦电动势  $e_A$ 、 $e_B$ 、 $e_C$ ，分别称作 A 相电动势、B 相电动势和 C 相电动势。其频率相同，振幅相等，相位互差  $120^\circ$ 。

规定三相电动势的正方向是从绕组的末端指向首端。三相电动势的瞬时值为

$$\begin{cases} e_A = E_m \sin \omega t \\ e_B = E_m \sin(\omega t - 120^\circ) \\ e_C = E_m \sin(\omega t - 240^\circ) = E_m \sin(\omega t + 120^\circ) \end{cases}$$

波形图、矢量图分别如图 2-21(a)，(b) 所示。任一瞬时，三相对称电动势之和为零，即

$$e_A + e_B + e_C = 0$$

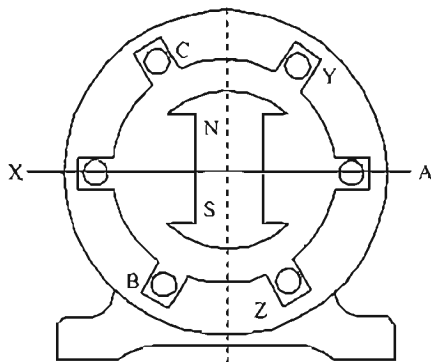


图 2-22 三相发电机原理

### 2.6.2 三相电源的联结

三相发电机三个绕组的联结方式有两种，一种为星形（Y）联结，另一种为三角形（ $\Delta$ ）联结。

#### 1. 星形（Y）联结

若将电源的三个绕组末端 X、Y、Z 连在一点 O，而将三个首端作为输出端，如图 2-23 所示，则这种联结方式称为星形联结。

在星形联结中，末端的联结点称作中点，中点的引出线称为中线（或零线），三绕组首端的引出线称作端线或相线（俗称火线）。这种从电源引出四根线的供电方式称为三相四线制。

在三相四线制中，端线与中线之间的电压  $\bar{U}_A$ ,  $\bar{U}_B$ ,  $\bar{U}_C$  称为相电压，其有效值用  $U_A$ ,  $U_B$ ,  $U_C$  或  $U_P$  表示。当忽略电源内阻抗时， $U_A = e_A$ ,  $U_B = e_B$ ,  $U_C = e_C$ ，且相位上互差  $120^\circ$ ，所以三相相电压是对称的。规定  $U$  相的正方向是从端线指向中线。

在三相四线制中，任意两根相线之间的电压  $\bar{U}_{AB}$ ,  $\bar{U}_{BC}$ ,  $\bar{U}_{CA}$  作线电压，其有效值用  $U_{AB}$ ,  $U_{BC}$ ,  $U_{CA}$  或  $U_L$  表示，规定正方向由脚标字母的先后顺序标明。例如，线电压  $\vec{U}_{AB}$  的正方向是由 A 指向 B，写时顺序不能颠倒，否则相位上相差  $180^\circ$ 。从接线图（见图 2-23）中可得出线电压和相电压之间的关系，其对应的矢量式为

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

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

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

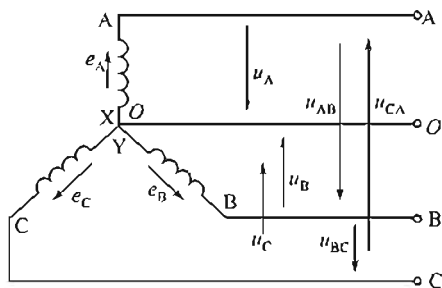


图 2-23 三相电源的星形联结

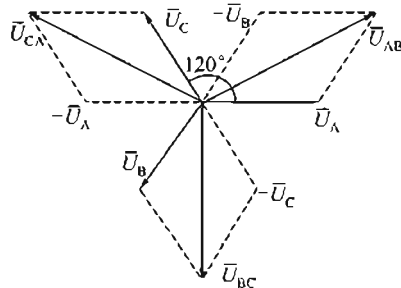


图 2-24 三相电源星形联结时电压矢量图

如图 2-24 所示，从矢量图中可以看出，三个线电压在相位上互差  $120^\circ$ ，故线电压也是对称的。

星形联结的三相电源，有时只引出三根端线，不引出中线。这种供电方式称作三相三线制。它只提供线电压，主要在高压输电时采用。

**【例 2-13】** 已知三相交流电源相电压  $U_P = 220\text{V}$ ，求线电压  $U_L$ 。

解：  $U_L = \sqrt{3}U_P = \sqrt{3} \times 220\text{V} = 380\text{V}$

由此可见，日常用的  $220\text{V}$  电压是指相电压，即火线和中线之间的电压， $380\text{V}$  电压是指火线和火线之间的电压，即线电压。所以三相四线制供电方式可提供两种电压。

#### 2. 三相电源的三角形联结

除了星形联结以外，电源的三个绕组还可以连接成三角形。即把一相绕组的首端与另一

相绕组的末端依次连接，再从三个接点处分别引出端线，如图 2-25(a) 所示。按这种接法，在三相绕组闭合回路中，有  $e_A + e_B + e_C = 0$ 。

所以回路中无环路电流。若有一相绕组首末接错，则在三相绕组中将产生很大环流，致使发电机烧毁。

发电机绕组很少用三角形接法，但作为三相电源用的三相变压器绕组，星形和三角形两种联结都会用到。

三角形联结的矢量图如图 2-25(b) 所示。

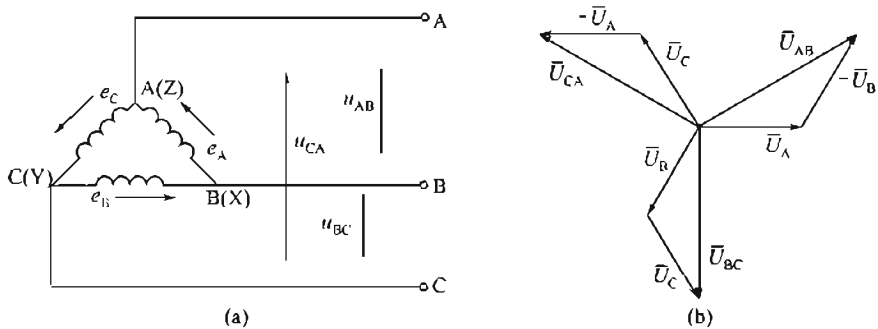


图 2-25 三相电源的三角形连接及矢量图

## 2.7 三相负载的连接

### 2.7.1 单相负载和三相负载

用电器按其供电电源的要求，可分为单相负载和三相负载。工作时只需单相电源供电的用电器称为单相负载，例如照明灯、电视机和电冰箱等。

需要三相电源供电才能正常工作的电器称为三相负载，例如三相异步电动机等。

若每相负载的电阻相等，电抗相等而且性质相同的负载称为三相对称负载，即  $Z_A = Z_B = Z_C$ ,  $R_A = R_B = R_C$ ,  $X_A = X_B = X_C$ 。否则称为三相不对称负载。三相负载的连接方式也有两种，即星形联结和三角形联结。

### 2.7.2 三相对称负载的星形联结

三相负载的星形联结如图 2-26 所示，每相负载的末端 X、Y、Z 接在一点  $O'$ ，并与电源

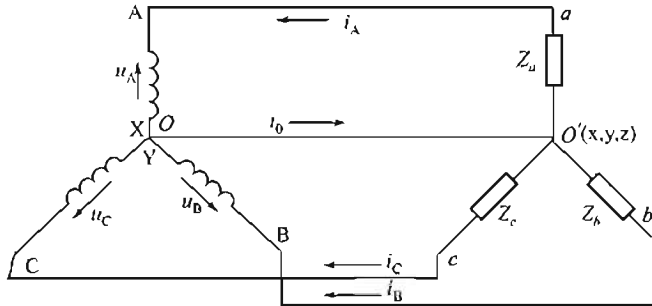


图 2-26 三相负载的星形联结

## 34 | 电工与电子学

中线相连；负载的另外三个端点  $a, b, c$  分别和三根相线 A, B, C 相连。

在星形联结的三相四线制中，把每相负载中的电流称为相电流  $I_P$ ，每根相线（火线）上的电流称为线电流  $I_L$ 。三相负载星形联结时的特点是：①各相负载承受的电压为对称电源的相电压；②线电流  $I_L$  等于负载相电流  $I_P$ 。下面讨论各相负载中电流、功率的计算。

### 2.7.3 三相对称负载的三角形联结

三相对称负载也可以接成如图 2-27(a) 所示的三角形联结。这时，加在每相负载上的电压是对称电源的线电压。因为各相负载对称，故各相电流也对称，相电流为

$$I_{ab} = I_{bc} = I_{ca}$$

$$\Phi_a = \Phi_b = \Phi_c$$

$$I_A = I_{ab} - I_{ca}$$

$$I_B = I_{bc} - I_{ab}$$

$$I_C = I_{ca} - I_{bc}$$

作出线电流、相电流的矢量图如图 2-27(b) 所示，从矢量图得

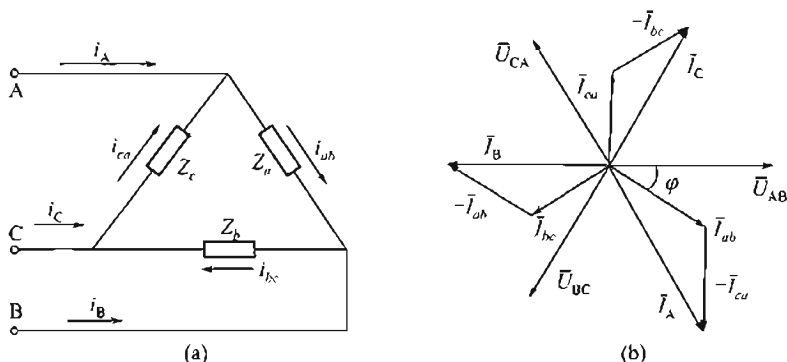


图 2-27 三相对称负载的三角形联结及矢量图

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

### 2.7.4 三相电功率

三相负载的功率，就等于三个单相负载的功率之和，即

$$P = P_a + P_b + P_c$$

$$= U_A I_a \cos \Phi_a + U_B I_b \cos \Phi_b + U_C I_c \cos \Phi_c$$

三相对称负载的三相总功率

$$P = 3U_P I_P \cos \Phi_P$$

在三相对称负载的星形联结中

$$I_L = I_P, U_L = \sqrt{3} U_P \quad (2-26)$$

在三相对称负载的三角形联结中，

$$U_L = U_P, I_L = \sqrt{3} I_P \quad (2-27)$$

所以三相负载的三相总功率还可写成：

$$P = 3U_L I_L \cos \Phi_P \quad (2-28)$$

式中  $U_L$ ——线电压；



$I_L$ ——线电流；  
 $\cos\Phi_P$ ——每相负载的功率因数。

## 本章小结

1. 随时间按正弦规律变化的电动势、电压、电流统称为正弦交流电，简称交流电。其三要素为幅值、频率和初相位。
2. 只有频率相同的正弦量才可以进行相位比较。
3. 正弦量的幅值是有效值的 $\sqrt{2}$ 倍。
4. 电阻、电感和电容在交流电路中的作用各不相同，注意电流与电压在相位上的关系。
5. 功率因数在电力系统中是一个重要的参数。提高功率因数的方法是并联补偿电容。
6. 三相交流电路的基本连接方式有星形联结与三角形联结，注意不同的联结中线、相电压及线相电流的关系。
7. 三相对称负载的总功率与三个单相负载功率的关系。

## 练习题

- 2.1 电流  $i=10\sin(100\pi t-\pi/3)\text{A}$ ，问其三要素各为多少？作出波形图和矢量图。
- 2.2 两个同频率的正弦电流，其有效值是： $I_1=8\text{A}$ ， $I_2=6\text{A}$ ，求下面各种情况下合成电流的有效值。(1)  $i_1$  与  $i_2$  同相；(2)  $i_1$  与  $i_2$  反相；(3)  $i_1$  超前于  $i_2\pi/2$ ；(4)  $i_1$  滞后于  $i_2\pi/3$ 。
- 2.3 220V、100W 的电烙铁接在 220V、50Hz 的电源上，求：
  - (1) 电流的有效值；
  - (2) 电烙铁所消耗的功率；
  - (3) 画出电流与电压的矢量图。
- 2.4 把  $C=140\mu\text{F}$  的电容器接在 220V、50Hz 的交流电路中，求：
  - (1) 计算  $X_C$  和  $I$ ；
  - (2) 画出电流与电压的矢量图。
- 2.5 把  $L=51\text{mH}$  的线圈（阻值略）接在 220V、50Hz 的交流电路中，求：
  - (1) 计算  $X_L$  和  $I$ ；
  - (2) 画出电流与电压的矢量图。
- 2.6 有一个线圈，接在电压为 48V 的直流电源上，测得其电流为 8A；然后再将这个线圈改接到 120V、50Hz 的交流电源上，测得电流为 12A。试问线圈的电阻及电感各是多少？
- 2.7 如图 2-28 所示电路，已知输入电压  $u_i=\sqrt{2}\sin\omega t$ ，频率为 1200Hz， $C=0.01\mu\text{F}$ ， $R=5.1\text{k}\Omega$ ，求：
  - (1) 输出电压；
  - (2) 输出电压和输入电压的相位差。
  - (3) 画出电流与电压的矢量图。
- 2.8 接在 220V、50Hz 的交流电路上的三个元件，如图 2-29 所示。已知  $R=X_L=X_C=110\Omega$ ，求图中各电流表的读数，并画出矢量图。
- 2.9 如图 2-30 所示电路，已知  $R_1=9\Omega$ ， $X_L=12\Omega$ ， $R_2=15\Omega$ ， $X_C=20\Omega$ ，电源电压  $U=120\text{V}$ ，求：
  - (1) 各支路电流及功率；
  - (2) 总电流及总功率；
  - (3) 画出电路中电压和电流的矢量图。
- 2.10 如图 2-31 所示电路，已知线电压为 380V，其中  $R_1=X_{L1}=X_{C1}=220\Omega$ ， $R_2=X_{L2}=X_{C2}=380\Omega$ ，求

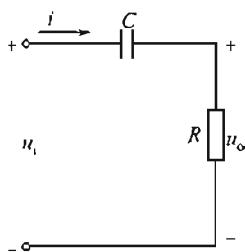


图 2-28 题 2.7 图

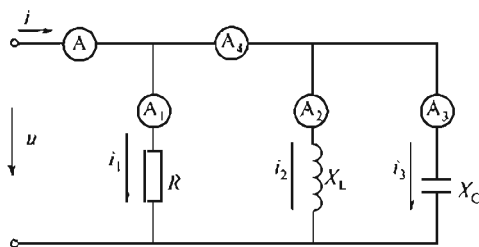


图 2-29 题 2.8 图

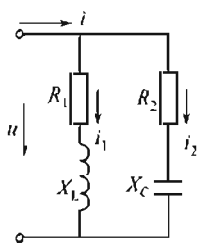


图 2-30 题 2.9 图

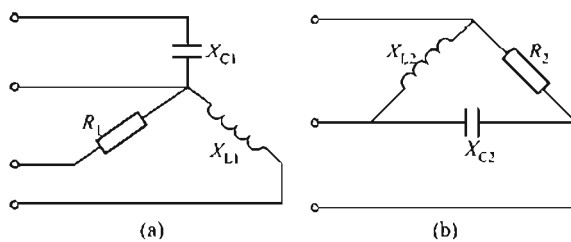


图 2-31 题 2.10 图

线电流、中线电流及相电流，并画出矢量图。

- 2.11 如图 2-32 所示三相对称负载，每相阻抗  $Z=380\Omega$ ，接入线电压为  $380V$ ，求电路中各电流表和电压表的读数。

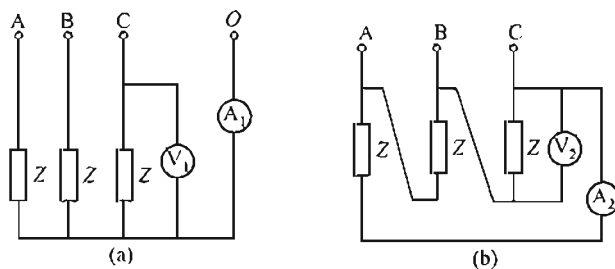


图 2-32 题 2.11 图

## 第3章 磁路及应用

【内容提要】在电工电子技术领域,为了实现能量和信号的传输、分配、控制、检测、转换和存储等,经常应用的发电机、变压器、电动机、继电器、互感器、话筒和软盘等电磁设备都是凭借磁场磁路完成工作的。本章介绍磁路的基本知识及其应用——变压器和电动机。

### 3.1 磁路的基本物理量

#### 1. 磁通 $\Phi$

磁通就是指垂直于磁场的某一面积  $A$  上所穿过的磁力线的数目,如图 3-1 所示。

磁能用  $\Phi$  表示,单位是 Wb (韦 [伯])<sup>①</sup>。实用中还用麦克斯韦 (简称麦 Mx)<sup>②</sup> 作为磁通的单位 ( $1\text{Mx}=10^{-8}\text{Wb}$ )。

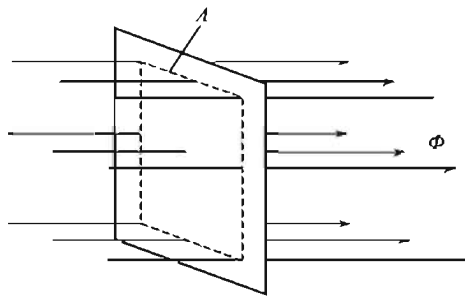


图 3-1 磁通

#### 2. 磁感应强度 $B$

磁感应强度  $B$  是一个表示磁场中各点的磁场强弱和方向的物理量。在均匀磁场中,磁感应强度等于垂直穿过单位面积的磁力线数目,即

$$B = \frac{\Phi}{A} \quad (3-1)$$

$\Phi$  的单位是 Wb (韦 [伯]),  $A$  的单位是  $\text{m}^2$ , 磁感应强度  $B$  的单位是 T (特 [斯拉])<sup>③</sup>, 即

$$1\text{T} = 1\text{Wb}/\text{m}^2$$

工程中常用到一个较小的单位 Gs (高斯)<sup>④</sup> 来表示磁感强度 ( $1\text{Gs}=10^{-4}\text{T}$ )。

磁感应强度又称为磁通密度。

#### 3. 磁导率 $\mu$

实验证明,在通电线圈中放入铁、钴、镍等物质后,通电线圈周围的磁场将增强,磁感应强度  $B$  增大;若放入铜、铝、木材等物质通电线圈周围的磁场几乎没有什么变化。这个现象表明,磁感应强度  $B$  与磁场中的介质的导磁性质有关。

一般用磁导率  $\mu$  来表示物质的导磁性能。 $\mu$  的单位是 H/m (亨/米)。

磁导率值大的材料,导磁性能好,所谓导磁性能好,指的是这类材料被磁化后能产生很

① 威廉·爱德华·韦伯 (1804—1891) 德国物理学家,韦伯建立电学单位的绝对测量方法。

② 詹姆斯·克拉克·麦克斯韦 (1831—1879) 英国物理学家,麦克斯韦最伟大的贡献是创立了有关电学和磁学的基本定律的方程组。

③ 特斯拉 (Nikola Tesla) (1856—1943) 美国物理学家,特斯拉最伟大的贡献是发明了交流发电机及高压输电。

④ 高斯 (Carl Friedrich Gauss) (1777—1855) 德国数学家、天文学家和物理学家,高斯是近代数学的奠基者之一。

大的附加磁场。这类物质有铁、钴、镍及其合金。通常把这类物质称为铁磁性物质或磁性物质。

#### 4. 相对磁导率

实验测得真空中的磁导率为  $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ H/m}$

空气、木材、纸以及铝等非磁性材料的磁导率与真空磁导率近似相等，即  $\mu \approx \mu_0$ 。

某物质的磁导率  $\mu$  与真空磁导率  $\mu_0$  的比值称作该物质的相对磁导率，用表示  $\mu_r$ ，即  $\mu_r \approx \mu/\mu_0$ ，由此可知，非磁性材料的  $\mu_r \approx 1$ 。

#### 5. 磁场强度 $H$

当对通电导体周围的磁场进行磁感应强度  $B$  的计算时，磁感应强度  $B$  的大小与磁场周围介质的磁导率  $\mu$  有关。例如通电的环形线圈，在线圈半径为  $R$  的闭合回线上（见图 3-2）各点的磁感应强度为

$$B = \mu \frac{NI}{2\pi R} = \mu \frac{NI}{L} \quad (3-2)$$

式中  $N$ ——线圈的匝数；

$I$ ——线圈中的电流；

$L$ ——闭合回线长度， $L = 2\pi R$ ；

$\mu$ ——线圈芯子材料的磁导率。

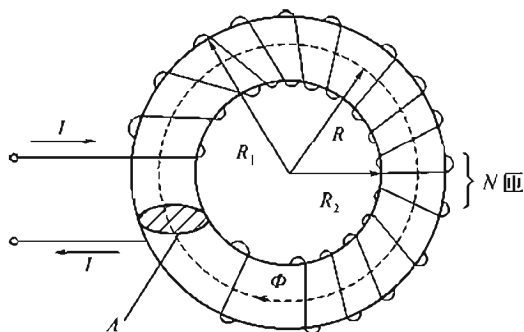


图 3-2 通电的环形线圈

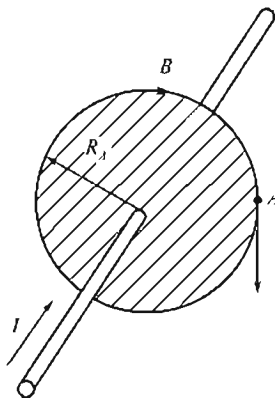


图 3-3 通电的长直导线

又例如，在离通电长直导线的距离为  $R_A$  的点  $A$ （见图 3-3）的磁感应强度  $B$  为

$$B = \mu \frac{I}{2\pi R_A} \quad (3-3)$$

式(3-3)中各物理量与式(3-2)的相同。

式(3-2)和式(3-3)说明，磁场中某点的磁感应强度不仅和电流导体的几何形状以及位置等有关，而且还和物质的导磁性能有关。这就使磁场的计算变得比较复杂。

为了便于计算，引入了一个计算磁场的物理量，称为磁场强度，用  $H$  表示。磁场强度与磁感应强度的关系是

$$B = \mu H \quad \text{或} \quad H = \frac{B}{\mu} \quad (3-4)$$

这样一来，式(3-2)和式(3-3)就变为如下形式。

环形线圈半径为  $R$  的闭合回线上各点的磁场强度  $H$  为

$$H = \frac{B}{\mu} = \frac{NI}{2\pi R} = \frac{NI}{L} \quad (3-5)$$

通电长直导线周围点  $A$  的磁场强度  $H$  为

$$H = \frac{I}{2\pi R_A} \quad (3-6)$$

式(3-5)和式(3-6)表明, 磁场强度的大小只决定于励磁电流、导线的几何形状、匝数及位置, 而与磁介质的性质无关。

磁场强度  $H$  是矢量, 单位是  $A/m$  (安/米)。

## 3.2 铁磁材料的磁性能

具有铁心的线圈, 其磁场远比非铁心线圈的磁场强。所以电机、电器等设备都要采用铁心。这样既可以用较小的电流来产生较强的磁场, 也可以使线圈的体积、质量都大为减小。因此, 铁磁材料在电工技术中获得了极其广泛的应用。

铁磁材料的磁性能通常用磁化曲线来表示。

### 3.2.1 磁化曲线和磁滞回线

#### 1. 磁化曲线

研究铁磁材料磁化情况的装置如图 3-4 所示。把待测的铁磁材料作为铁心, 铁心内部的磁感应强度  $B=0$ 。当电流 (通常称为励磁电流) 从零开始逐渐增大, 则铁磁材料中的磁场强度  $H$  也从零增大, 磁性材料中的磁感应强度  $B$  随之从零增大。在各个  $H$  值的磁化下, 必有一相应的  $B$  值。如此便可得出如图 3-5 所示的  $B$  与  $H$  的关系曲线。该曲线称为磁化曲线。由图 3-5 可见, 磁化曲线具有如下特点。

$Oa$  段: 随  $H$  增大,  $B$  几乎是直线上升。

$ab$  段:  $H$  增大,  $B$  的增长变慢。

$bc$  段:  $H$  增大,  $B$  增长极慢, 铁磁材料内部的磁场达到了饱和值  $B_m$ 。

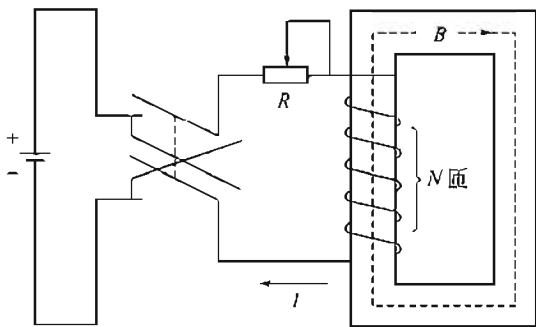


图 3-4 研究铁磁材料磁化情况的装置

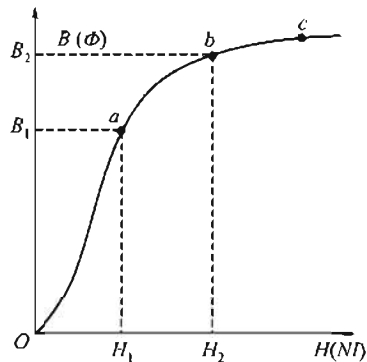


图 3-5 磁化曲线

#### 2. 磁滞回线

铁磁材料在磁化过程中,  $H$  从零到大。当磁感应强度  $B$  随  $H$  的增大由零达到饱和值  $B_m$ , 如磁化曲线  $Oa$  段 (见图 3-6), 此时若减小励磁电流  $I$ ,  $H$  也随之减小,  $B$  不是沿原来的曲线  $Oa$  下降, 而是沿曲线  $ab$  下降; 当磁场强度为零 (即  $I=0$ ) 时, 材料仍然保留磁性

( $B=B_r \neq 0$ )，如图 3-6 所示的点  $b$ 。 $B_r$  称作剩磁。

要使剩磁去掉，就必须使线圈中的电流反向，产生反向磁场，使材料退磁。图 3-6 中  $be$  段就是退磁过程。直到  $H=-H_c$  时，剩磁完全消除。克服剩磁所加的磁场强度  $H_c$  称作矫顽力。

如果  $H$  继续反向增大，则  $B$  也改变方向，铁磁材料反方向被磁化。当反方向  $H$  不断增大。 $B$  也随之增大达反方向饱和值  $-B_m$ 。若再改变电流， $B$  值沿  $defa$  变化，形成一个闭合回线（见图 3-6）。闭合回线  $abcdefa$  称为磁滞回线。

从图 3-6 中可以看出，铁磁材料在反复磁化过程中， $B$  的变化始终落后于  $H$  的变化，这种现象称为磁滞现象。

磁滞现象可以用磁畴来解释。所谓磁畴，指的是在铁磁物质内部存在着一些体积约为  $10^{-9} \text{cm}^3$  的自然磁化区域。每个磁畴就像一个很小的永久磁体（见图 3-7）。在无外磁场作用时，这些磁畴排列杂乱无章，磁性相互抵消，对外不显磁性。在外磁场的作用下，磁畴趋向外磁场的方向，产生一个很大的附加磁场和外磁场相加。

所以， $Oa$  起始段磁感应强度  $B$  上升很快；随着  $H$  增加，大部分磁畴已取向外磁场方向排列， $B$  增长很慢，出现了饱和现象。

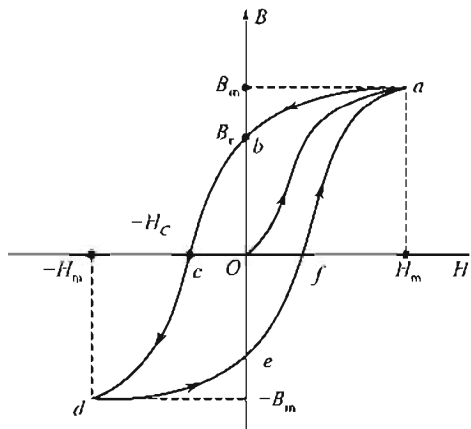


图 3-6 磁滞回线

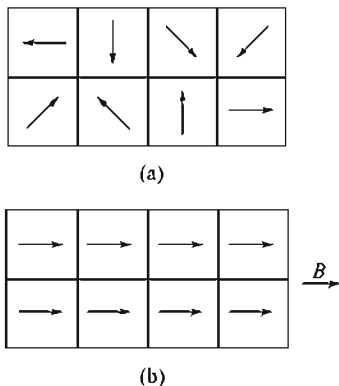


图 3-7 铁磁物质内部的磁畴

在磁化过程中，磁畴受外加磁场作用，迫使其转向。但  $H$  为零时，一部分磁畴不可能恢复到原先的排列状态，还保留一部分磁性，这就是剩磁。

为了去掉剩磁，必须加一个反向的磁场强度  $-H_c$ ，这就是矫顽力。

### 3.2.2 铁磁材料的磁性能

由上述分析可知，铁磁材料具有以下磁性能。

(1) 高导磁性。铁磁材料的磁导率远大于非磁性材料的磁导率。且铁磁材料的磁导率产值不是常数，随  $H$  的大小而改变。

(2) 磁饱和性。铁磁材料的磁感应强度  $B$  有一个饱和值  $B_m$ 。

(3) 磁滞性。在铁磁材料的反复磁化过程中， $B$  的变化总是落后于  $H$  的变化，这就是铁磁材料的磁滞性。剩磁现象就是铁磁材料磁滞性的表现。

(4) 磁滞损耗。铁磁材料在反复磁化过程中，磁畴来回翻转，必然克服阻力做功，使铁心发热。这种在反复磁化过程中的能量损失称为磁滞损耗。

### 3.2.3 铁磁材料

根据磁滞回线的不同形状，铁磁材料基本上分为软磁材料和硬磁材料两大类。

软磁材料的特点是矫顽磁力和剩磁都比较小，且撤去外磁场后，磁性大部分消失。这种材料磁滞回线所包围面积小，磁滞回线狭长。在交变磁场作用下，磁滞损耗小，所以适用于交变磁场下工作的电器。例如一些电子设备中的电感元件，或变压器、电动机、发电机的铁心都必须用软磁材料制造，交流电磁铁、继电器以及接触器等也必须用软磁材料，以使在切断电流后没有剩磁。

硬磁材料的特点是矫顽磁力大，剩磁也大，磁滞回线较宽。必须用较强的外加磁场，才能使其磁化。而且一经磁化，磁性不易消失。这类材料适用于制造永久磁铁。

此外，还有一种矩磁材料，其磁滞回线近似于一个矩形，用于计算机存储器的磁心。

## 3.3 磁路和磁路欧姆定律

### 3.3.1 磁路基本物理量

#### 1. 磁路

在电气设备中，为了增强磁场，常把线圈绕在铁心上，当线圈通电后产生很强的磁场，并且大部分磁通（磁力线）集中在铁心中形成闭合回路。这个闭合回路称作磁路。如图3-8所示的磁路，便是由铁心、空气隙组成。

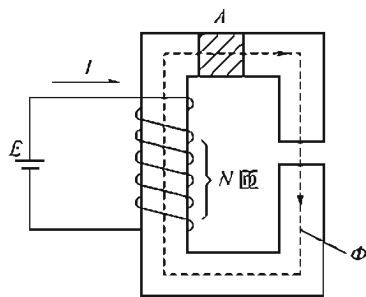


图 3-8 磁路

#### 2. 磁动势

要使磁路中建立一定大小的磁通中，就必须在具有一定匝数  $N$  的线圈中，通入一定大小的电流  $I$ 。实验证明，增大电流  $I$  或增大线圈匝数  $N$ ，都可以同样达到增大磁通  $\Phi$  的目的。可见， $NI$  乃是建立磁通的根源。所以把乘积  $NI$  称作磁路的磁动势，简称磁势。磁势的单位是安（A）。

### 3.3.2 磁路欧姆定律、磁阻

#### 1. 磁路欧姆定律

如果把相同的磁动势加到不同的磁路中去，获得的磁通也不相同。这说明磁通除了与磁动势有关外，还与组成磁路的物质及尺寸有关。这里引出磁阻的概念，磁阻表示磁路对磁动势建立磁通所呈现的阻力，用  $R_M$  表示。

磁动势、磁通、磁阻间的关系，可通过下式进行计算：

$$\Phi = \frac{NI}{R_M} \quad (3-7)$$

式(3-7)就是磁路欧姆定律的表示式。表明，在磁路中，磁通  $\Phi$  与磁动势  $NI$  成正比，与磁阻  $R_M$  成反比。

#### 2. 磁阻

磁路的磁阻大小与构成磁路的材料性质及几何尺寸有关，这个关系是

$$R_M = \frac{L}{\mu A} \quad (3-8)$$

式中  $L$ ——磁路的长度 (m);

$A$ ——磁路的截面积 ( $\text{m}^2$ );

$\mu$ ——磁路材料的磁导率。

磁阻的单位是  $1/\text{H}$  ( $\text{亨}^{-1}$ )。

式(3-8)表明, 用磁导率较大的材料构成的磁路具有较小的磁阻, 在同样大的磁动势作用下, 就能产生较大的磁通。

### 3.3.3 均匀磁路和不均匀磁路

如图 3-9 所示为单相变压器的一种磁路。该磁路由同一种材料组成, 且各段铁心的横截面积相等, 这种磁路称为均匀磁路。计算这种磁路时,  $\Phi = NI/R_M$ , 其中  $R_M$  为均匀磁路的磁阻。如图 3-10 所示, 假若磁路中有一很短的空气隙  $L_0$ , 于是磁路就由铁心和空气隙两种物质组成这种磁路称为不均匀磁路。计算不均匀磁路时, 先将磁路分段: 铁心部分和空气隙部分各成为一段磁路, 这两段磁路的磁阻分别是  $R_{M\text{铁}}$ 、 $R_{M\text{气}}$ 。若用磁路欧姆定律表示这种不均匀磁路的磁通, 则有  $\Phi = NI/(R_{M\text{铁}} + R_{M\text{气}})$ ,  $R_{M\text{气}}$  为气隙磁阻, 气隙磁阻比铁心磁阻大很多倍。显然, 要在图 3-10 磁路中产生和图 3-9 磁路中相同的磁通, 则需要很大的磁动势。

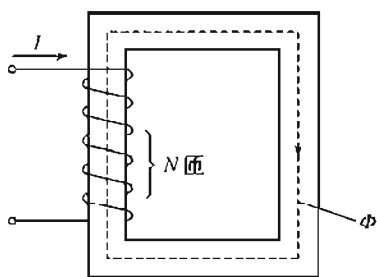


图 3-9 均匀磁路

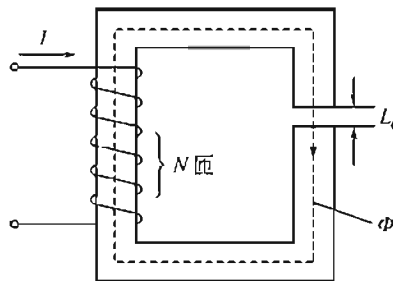


图 3-10 不均匀磁路

### 3.3.4 涡流

当线圈中通过变化的电流  $i$  时, 在铁心中穿过的磁通也是变化的。由于构成磁路的铁心是导体, 于是在铁心中将产生感应电流, 如图 3-11(a) 所示的虚线。由于这种感应电流是一种自成闭合回路的环流, 故称为涡流。

在电机和电器铁心中的涡流是有害的。因为涡流不仅消耗电能, 使电气设备效率降低,

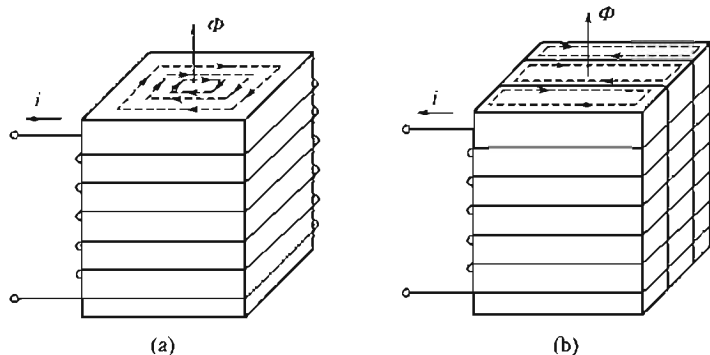


图 3-11 涡流



而且涡流损耗转变为热量。使设备温度升高,严重时将影响设备正常运行在这种情况下,要尽量减小涡流。

减小涡流的方法是采用表面彼此相互绝缘的硅钢片叠合,做成电器设备的铁心,如图3-11(b)所示。这样,一方面把产生涡流的区域减小,另一方面增加涡流的路径总长度,相当于增大涡流路径的电阻,因而可以减小涡流。

涡流虽然在很多电器中会引起不良后果,但在另一些场合下,人们却利用涡流为生产、生活服务。例如工业上利用涡流产生热量来熔化金属,日常生活中的电磁灶也是利用涡流的原理制成的,电磁灶给人们的生活带来很大的便利。

## 3.4 变 压 器

变压器是一种常见的电气设备,可用来把某种数值的交变电压变换为同频率的另一数值的交变电压。

目前,我国交流输电的电压最高已达500kV,这样高的电压,无论从发电机的安全运行方面或是从制造成本方面考虑,都不允许由发电机直接主产。

发电机的输出电压一般有3.15kV、6.3kV、10.5kV以及15.75kV等几种,因此必须用升压变压器将电压升高才能远距离输送。

电能输送到用电区域后,为了适应用电设备的电压要求,还需通过各级变电站(所)利用变压器将电压降低为各类电器所需要的电压值。

在用电方面、多数用电器所需的电压是380V、220V或36V,少数电动机也采用3kV或6kV的电压。

变压器种类很多,按其用途不同可分为有电源变压器、控制变压器、电焊变压器、自耦变压器以及仪用互感器等。变压器种类虽多,但基本原理和结构是一样的。

### 3.4.1 变压器的基本结构

变压器由套在一个闭合铁心上的两个或多个线圈(绕组)构成,如图3-12所示。铁心和线圈是变压器的基本组成部分。为了减少磁通变化时所引起的涡流损失,变压器的铁心要用厚度为0.35~0.5mm的硅钢片叠成。片间用绝缘漆隔开。变压器和电源相连的线圈称为原绕组(或原边,或初级绕组),和负载相连的线圈称为副绕组(或副边,或次级绕组)。绕组及绕组与铁心之间都是互相绝缘的。

### 3.4.2 变压器的工作原理

为了叙述方便,下面分两种情况分析变压器的运行状态。

#### 1. 变压器的空载运行

变压器原线圈接上额定的交变电压,副线圈开路不接负载,称为空载运行,如图3-13所示。

##### (1) 空载电流 $I_0$

在外加正弦电压  $u_1$  的作用下,线圈内有交变电流  $i_0$  流过。这时原线圈内的电流,称为变压器的空载电流,又称励磁电流。磁与原线圈匝数  $N_1$  的乘积  $i_0 N_1$  称为励磁磁势。

由于铁心的磁导率远大于空气的磁导率,所以励磁磁通势产生的磁通绝大部分集中在铁

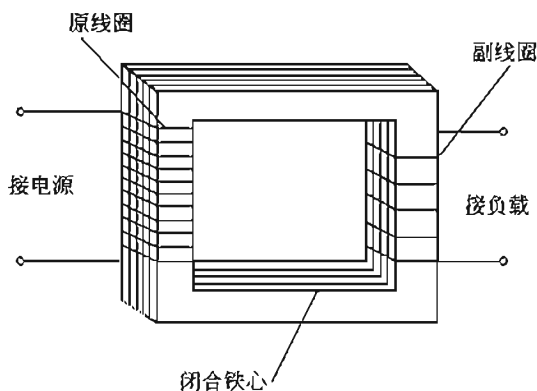


图 3-12 变压器结构示意图

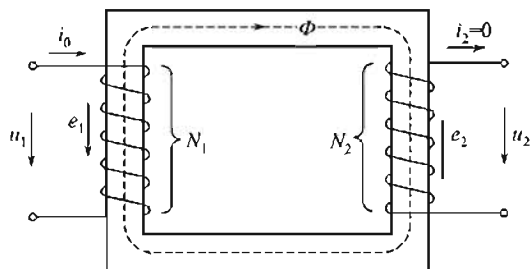


图 3-13 空载时的变压器

心里，沿铁心而闭合。该磁通称作主磁通（或工作磁通），用  $\Phi$  表示。

空载电流（励磁电流）的有效值  $I_0$  一般都很小，约为额定电流的 3%~8%。

(2) 原、副绕组中的感应电动势

设主磁通按正弦规律变化，即  $\Phi = \Phi_m \sin \omega t$

则原线圈中的感应电动势为

$$e_1 = -N_1 \frac{d\Phi}{dt} = -N_1 \omega \Phi_m \cos \omega t = N_1 \omega \Phi_m \sin \left( \omega t - \frac{\pi}{2} \right)$$

上式表明， $e_1$  按正弦规律变化，且在相位上滞后于主磁通  $\pi/2$ 。

感应电动势最大值

$$E_{1m} = N_1 \omega \Phi_m = 2\pi f N_1 \Phi_m$$

感应电动势有效值

$$E_1 = \frac{E_{1m}}{\sqrt{2}} \approx 4.44 f N_1 \Phi_m \quad (3-9)$$

同理，副线圈中感应电动势的有效值为

$$E_2 \approx 4.44 f N_2 \Phi_m \quad (3-10)$$

式中  $N_2$  ——副线圈匝数。

由式(3-9)和式(3-10)可得

$$\frac{E_1}{E_2} = \frac{N_1}{N_2}$$

(3) 电压平衡方程、电压比

空载时变压器的原绕组电路是一个含有铁心线圈的交流电路，在工程计算中常忽略原绕组中的阻抗不计。所以原绕组一侧的电压平衡方程可简化为

$$u_1 \approx -e_1 \quad (3-11)$$

这说明，在变压器原线圈中，自感电动势和电源电压几乎相等，但相位相反。由此可得  $u_1$  的有效值为

$$U_1 \approx E_1 = 4.44 f N_1 \Phi_m \quad (3-12)$$

式(3-12)表明，当电源频率和原线圈匝数一定时，铁心中主磁通的大小基本上由电源电压决定。当电源电压不变时，变压器铁心中的主磁通基本上是个常数。

由于空载时变压器副线圈是开路的， $i_2 = 0$ ，副线圈的端电压为  $u_2 = e_2$ ，有效值为

$$U_2 \approx E_2 = 4.44 f N_2 \Phi_m \quad (3-13)$$

从式(3-12)和式(3-13)可以得到

$$\frac{U_1}{U_2} \approx \frac{E_1}{E_2} = \frac{N_1}{N_2} = K_u \quad (3-14)$$

式中  $K_u$  称为变压器的变压比, 简称变比, 表明变压器空载时, 原、副边端电压之比等于原、副线圈的匝数之比。匝数多的一边电压高, 匝数少的一边电压低。

$K_u > 1$ , 是降压变压器;  $K_u < 1$ , 是升压变压器。

## 2. 变压器的负载运行

变压器二次接上负载阻抗  $Z$  后。副线圈中通过电流  $i_2$ , 如图 3-14 所示。

前已指出, 当电源电压  $U$  不变时, 铁心中主磁通  $\Phi$  也基本不变。因此, 当变压器带上负载后。一次磁动势  $i_1 N_1$  和二次磁动势  $i_2 N_2$  共同产生的磁通, 与变压器空载时的励磁磁势  $i_0 N_1$  所产生的磁通也应基本相等, 用数学式表示为

$$i_1 N_1 + i_2 N_2 = i_0 N_1 \quad (3-15)$$

矢量式为

$$I_1 N_1 + I_2 N_2 = I_0 N_1 \quad (3-16)$$

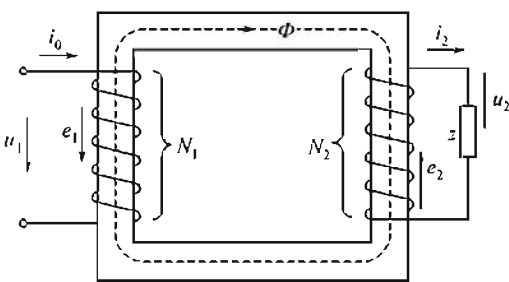


图 3-14 有载时的变压器

式(3-16)称为变压器负载运行时的磁动势平衡方程式。该式说明, 变压器有载时, 一次与二次磁动势的矢量和。与空载时的磁动势相等。

因为  $I_0$  很小, 当变压器在满载(额定负载)或接近于满载的情况下运行时, 励磁磁动势  $I_0 N_1$  比一次磁动势  $I_1 N_1$  或二次磁动势  $I_2 N_2$  小得多, 可以忽略不计。故式(3-16)可简化为

$$I_1 N_1 + I_2 N_2 \approx 0$$

或者

$$I_1 N_1 \approx -I_2 N_2 \quad (3-17)$$

式(3-17)中的负号表明, 变压器负载运行时, 二次磁动势与一次磁动势相位相反, 二次磁动势对一次磁动势起去磁作用, 一次电流和二次电流在相位上几乎相差  $180^\circ$ 。

当二次电流  $i_2$  增大时, 二次磁动势  $i_2 N_2$  也增大。这时, 一次电流  $i_1$  和一次磁动势  $i_1 N_1$  也随之增大, 以抵消  $i_2 N_2$  的去磁作用, 保证  $i_0 N_1$  基本不变, 即铁心中的主磁通不变。这就表明, 变压器负载后, 一次电流是由二次电流决定的。

若只考虑其量值, 从式(3-17)可得

$$I_1 N_1 \approx I_2 N_2$$

$$\frac{I_1}{I_2} \approx \frac{N_2}{N_1} = \frac{1}{K_u} = K_i \quad (3-18)$$

$K_i$  称为变压器的变流比, 表示原、副绕组内的电流大小与线圈匝数成反比。

结合式(3-14)还可得出

$$\frac{U_1}{U_2} \approx \frac{I_1}{I_2} \text{ 或 } U_1 I_1 \approx U_2 I_2 \quad (3-19)$$

式(3-19)表明, 在不考虑变压器本身损耗的情况下(理想状态), 变压器一次绕组输入的功率等于二次绕组输出的功率。这也说明变压器是一种把电能转换为“高压小电流”或“低压大电流”的电器设备, 起着传递能量的作用。

## 3. 变压器的阻抗变换作用

若在变压器二次边接一电阻  $R$ , 如图 3-15 所示。那么从原边两端来看, 等效电阻为

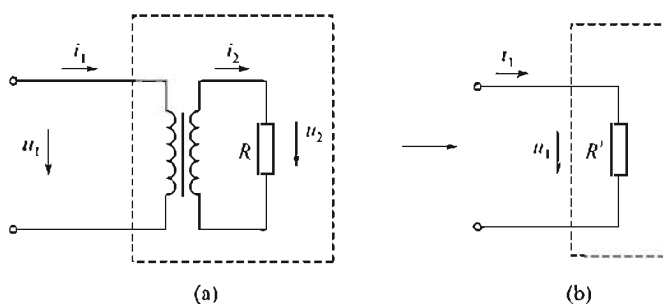


图 3-15 变压器的阻抗变换

$$R' = \frac{U_1}{I_1} = \frac{N_1 U_2 / N_2}{N_2 I_2 / N_1} = \left( \frac{N_1}{N_2} \right)^2 \frac{U_2}{I_2} = K_u^2 R \quad (3-20)$$

$R'$ 称为折算电阻。式(3-20)表明折算电阻是原电阻  $R$  的  $K_u^2$  倍,说明变压器起到了阻抗变换作用。

#### 4. 变压器的额定值、损耗和效率

变压器负载运行时,一次线圈的有功功率  $P_1 = U_1 I_1 \cos \phi_1$ ,二次线圈给负载输出的有功功率为  $P_2 = U_2 I_2 \cos \phi_2$ ,这里  $\cos \phi_2$  为负载的功率因数。

变压器的额定容量为二次额定电压和二次额定电流的乘积  $S_e = U_{2e} I_{2e}$ 。额定容量的单位为 VA 或 kVA (伏安或千伏安)。

变压器的额定电压,是指变压器在额定情况下运行时,一次线圈应加的电压及原线圈加上额定电压时二次的空载电压。

输入的有功功率和输出的有功功率之差,就是变压器的损耗。

变压器的效率为

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} \times 100\%$$

在接近满载时效率最高。小型变压器的效率为 80%~90%,大型变压器的效率可达 98% 左右。

### 3.4.3 其他变压器

#### 1. 三相变压器

电力工业中,输配电都采用三相制。变换三相交流电电压,则用三相变压器。可以设想,把三个单相变压器 [见图 3-16(a)] 拼合在一起,便组成了一个三相变压器 [见图 3-16(b)]。各相磁通都经过中间铁心。

由于三相磁通对称(各相磁通幅值相等,相位互差  $120^\circ$ ),所以通过中间铁心的总磁通为零,故中间的铁心柱可以取消。这样,实际制作时,通常把三个铁心柱排列在同一平面(见图 3-17)。这种三相变压器比三个单相变压器组合的效率、成本低、体积小,因此应用广泛。

三相变压器的额定容量为

$$S_e = \sqrt{3} U_{2e} I_{2e}$$

式中  $U_{2e}$ 、 $I_{2e}$ ——分别为二次额定线电压、额定线电流。

#### 2. 自耦变压器

自耦变压器的一次电路与二次电路共用一部分线圈,如图 3-18 所示。一次、二次电路

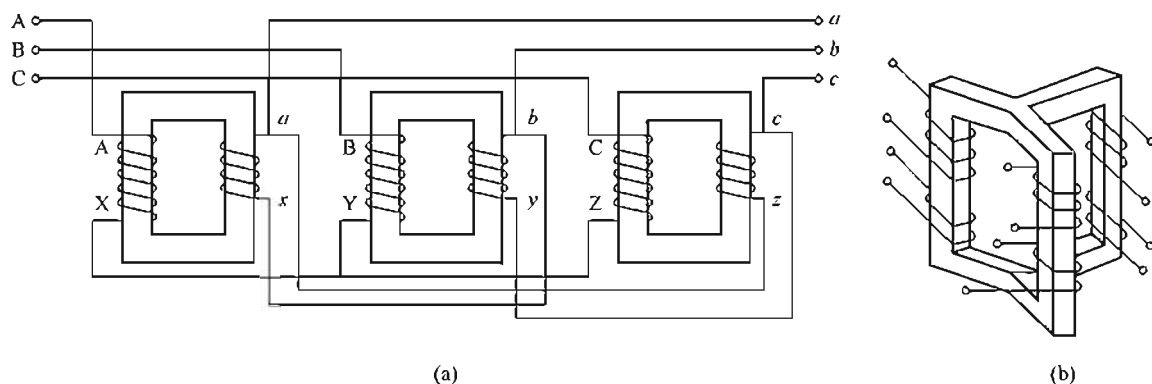


图 3-16 三相变压器

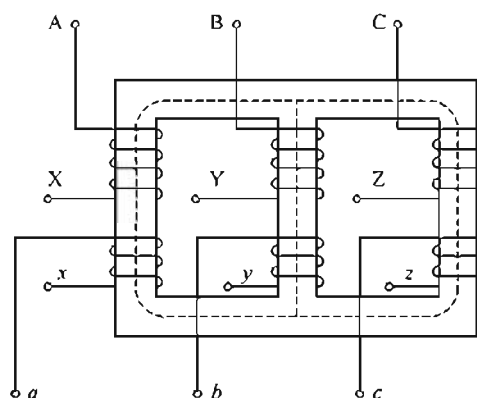


图 3-17 三相变压器

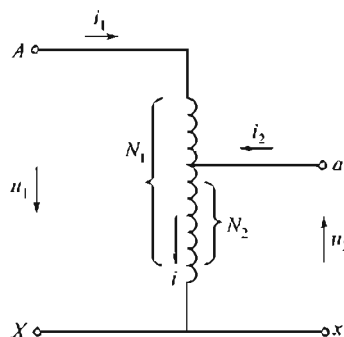


图 3-18 自耦变压器

之间除了有磁的联系外，还有直接的电的联系。这是自耦变压器区别于一般变压器的特点。

从图 3-18 中看出，当原边加上额定电压后，若不考虑电阻的压降和漏感电势，则

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

式中  $K$ ——自耦变压器的变压比。

当自耦变压器接上负载，二次有电流  $i_2$  输出时，有

$$i_1 = -\frac{N_2}{N_1} i_2 = -\frac{1}{K} i_2$$

上式表明，自耦变压器中一、二次电流的大小与线圈匝数成反比，且在相位上相差  $180^\circ$ 。因此，自耦变压器中，一、二次共同部分的电流为

$$i = i_1 + i_2$$

考虑到， $i_1$  与  $i_2$  相位相反，故  $I = I_2 - I_1$ 。

当变比  $K$  接近 1 时，由于  $i_1$  与  $i_2$  数值相差不大，所以线圈公共部分的电流  $I$  很小。因此，这部分线圈可用截面较小的导线，以节省材料。

自耦变压器的优点是：结构简单，节省材料，效率高。但这些优点只有在变压器变比不大的情况下才有意义。其缺点是二次线圈和一次线圈有电的联系，不能用于变比较大的场合（一般不大于 2）。这是因为当二次线圈断开时，高电压就串入低压网络，容易发生事故。

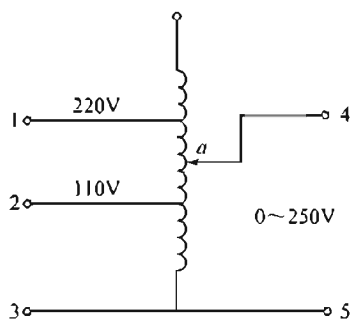


图 3-19 调压变压器原理图

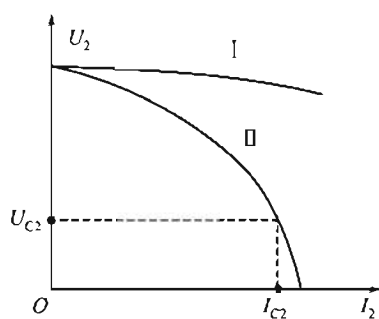


图 3-20 普通变压器和电焊变压器外特性

实验室常用的调压器，就是一种二次线圈匝数可变的自耦变压器，如图 3-19 所示。

这种调压器端点可以滑动，所以能均匀地调节电压。该调压器还可以做成三相的，容量一般为几千伏安，电压为几百伏。

### 3. 电焊变压器

普通变压器漏磁小，负载电流变化时，二次电压变化不大。如图 3-20 中的曲线 I 所示。电焊变压器是一种特殊变压器，在其空载时，要有足够的引弧电压（约 60~80V），而电弧形成后，输出电压应迅速降低。二次即使短路（焊条碰在工件上），二次电流也不应过大，即电焊变压器应具有陡峭的外特性，如图 3-20 中曲线 II 所示。这样，当电弧电压变化时，焊接电流变化并不显著，电焊比较稳定。为了得到这种外特性，就要人为地增加漏磁通。因此，电焊变压器的一、二次不是同心地套在一起，而是分装在两个铁心柱上。有的在二次电路中串联一个铁心电抗器，如图 3-21 所示。改变电抗器的感抗（调节电抗器的空隙长度或其线圈匝数）。即可得到不同的焊接电流。

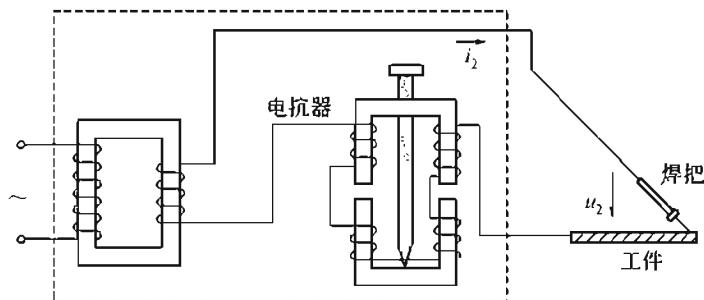


图 3-21 电焊变压器原理示意图

## 3.5 三相异步电动机

根据电磁感应原理进行机械能与电能互换的机械称为电机。其中将机械能转换为电能的电机称为发电机，将电能转换为机械能的电机称为电动机。由于生产过程的机械化，电动机作为拖动生产机械的原动机，在现代生产中有着广泛的应用。

电动机可分为交流电动机和直流电动机两大类。交流电动机又可分为异步电动机（或称感应电动机）和同步电动机。异步电动机有单相和三相两种。单相电动机一般为 1kW 以下的小容量电机，在实验室和日常生活中应用较多。三相异步电动机因为具有构造简单、价格低廉、工作可靠、易于控制及使用维护方便等突出优点，在生产领域中应用很广。

3.5.1 三相异步电动机的构造

异步电动机由定子和转子两个基本部分组成。定子是固定部分，转子是转动部分。为了使转子能够在定子中自由转动，定子、转子之间有 0.2~2mm 的空气隙。图 3-22 是笼型异步电动机拆开后各个部件的形状。

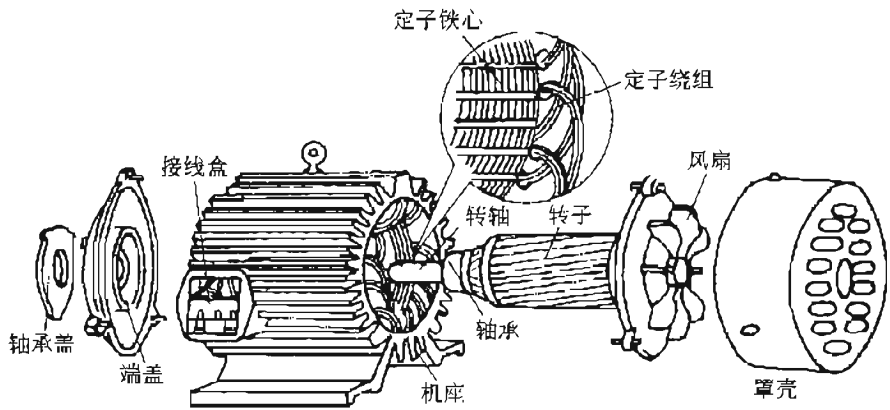


图 3-22 笼型异步电动机的各个部件

1. 定子

定子主要用来产生旋转磁场，它由定子铁心、定子绕组、机壳等组成。

(1) 定子铁心

定子铁心是磁路的一部分，为了降低铁心损耗，一般采用 0.5mm 厚的硅钢片（见图 3-23）叠压而成，硅钢片间彼此绝缘。铁心内圆周上分布有若干均匀的平行槽，用来嵌放定子绕组。

(2) 机壳

机壳包括端盖和机座，其作用是支承定子铁心和固定整个电动机。中小型电动机机座一般采用铸铁铸造，大型电动机机座用钢板焊接而成。端盖多用铸铁铸成，用螺栓固定在机座两端。

(3) 定子绕组

定子绕组是电动机定子的电路部分，由绝缘铜线或铝线绕制而成。三相绕组对称地嵌放在定子槽内。三相异步电动机定子绕组的三个首端  $U_1$ 、 $V_1$ 、 $W_1$  和三个末端  $U_2$ 、 $V_2$ 、 $W_2$ ，都从机座上的接线盒中引出，如图 3-24 所示。图 3-24(a) 为定子绕组的星形联结；图 3-24(b) 为定子绕组的三角形联结。

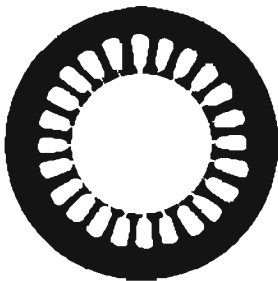


图 3-23 定子的硅钢片

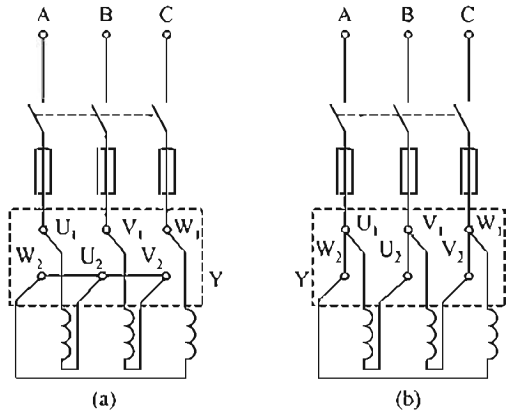


图 3-24 三相定子绕组的接法

三相绕组具体应该采用何种联结方法,应视电力网的线电压和各相绕组的工作电压而定。目前我国生产的三相异步电动机,功率在4kW以下者一般采用星形联结;在4kW以上者采用三角形联结。

## 2. 转子

转子主要用来产生旋转力矩,拖动生产机械旋转。转子由转轴、转子铁心、转子绕组构成。

### (1) 转轴

转轴用来固定转子铁心和传递功率,一般用中碳钢制成。

### (2) 转子铁心

转子铁心也属于磁路的一部分,也用0.5mm的硅钢片叠压而成(见图3-25)。转子铁心固定在转轴上,其外圆均匀分布的槽是用来放置转子绕组的。

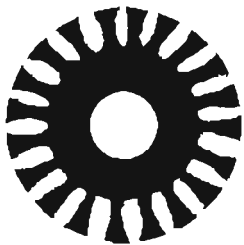


图 3-25 转子的硅钢片

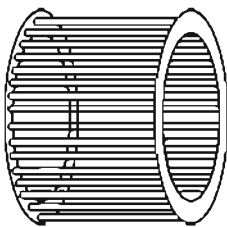


图 3-26 笼型绕组

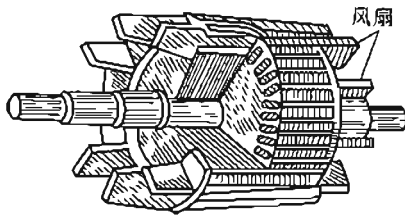


图 3-27 铸铝转子

### (3) 转子绕组

三相异步电动机的转子绕组分为笼型和绕线两种。

① 笼型转子是由安放在转子铁心槽内的裸导体和两端的短路环连接而成的转子绕组就像一个笼(见图3-26),故称其为笼型转子。

目前,100kW以下的笼型电动机,一般采用铸铝绕组,这种转子是将液态铝直接浇注在转子槽内。并连同两端的短路环和风扇浇注在一起,该笼型转子也称为铸铝转子,如图3-27所示。

② 绕线转子绕组与定子绕组相似,也为三相对称绕组,嵌放在转子槽内。三相转子绕组

通常连接成星形,即三个末端连在一起,三个首端分别与转轴上的三个滑环(滑环与轴绝缘且滑环间相互绝缘)相连,通过滑环和电刷接到外部的变阻器上(见图3-28),以便改善电动机的起动和调速性能。

具有绕线转子的电动机称为绕线电动机。绕线电动机起动时,为改善起动性能,使转子绕组与外部变阻器相连;而在正常运转时,将外部变阻器调到零位或直接使三首端短接。

绕线电动机由于结构复杂、价格较贵,仅适用于要求有较大起动转矩及有调速要求的场合。而笼型电动机由于结构简单、价格低廉、性能可靠及使用维护方便,在生产实际中应用得很广泛。

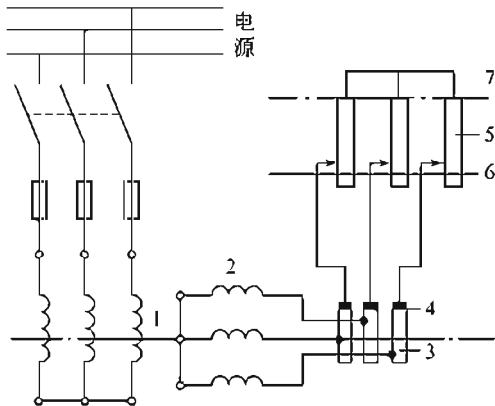


图 3-28 绕线转子绕组与外接变阻器连接  
1—定子绕组; 2—转子绕组; 3—滑环; 4—电刷;  
5—可变电阻; 6—起动位置; 7—运行位置



### 3.5.2 三相异步电动机的基本原理

三相异步电动机是根据磁场与载流导体相互作用产生电磁力的原理而制成的。要了解其作用原理，必须首先理解旋转磁场的产生及其性质。

#### 1. 旋转磁场

##### (1) 旋转磁场的产生

如图 3-29 所示为最简单的三相异步电动机的定子，三相定子绕组对称放置在定子槽中，即三相绕组的首端  $U_1$ 、 $V_1$ 、 $W_1$ （或末端  $U_2$ 、 $V_2$ 、 $W_2$ ）的空间位置互差  $120^\circ$ 。若三相绕组连接成星形，末端  $U_2$ 、 $V_2$ 、 $W_2$  相连，首端  $U_1$ 、 $V_1$ 、 $W_1$  接到三相对称电源上，则在定子绕组中通过三相对称的电流  $i_U$ 、 $i_V$ 、 $i_W$ （习惯规定电流参考方向由首端指向末端），其波形图如图 3-30 所示。

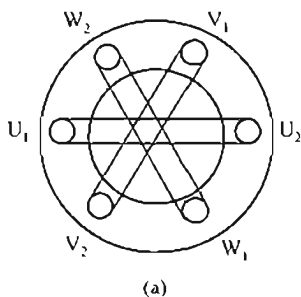
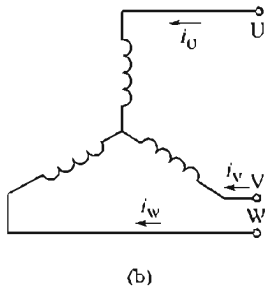


图 3-29 三相定子绕组的星形联结



(b)

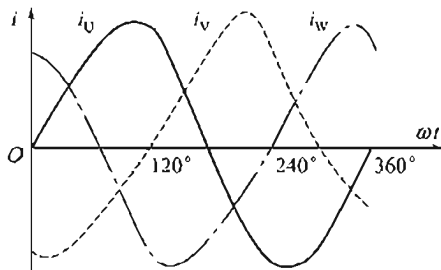


图 3-30 三相电流的波形

$$\begin{aligned} i_U &= I_m \sin \omega t \\ i_V &= I_m \sin(\omega t - 120^\circ) \\ i_W &= I_m \sin(\omega t + 120^\circ) \end{aligned} \quad (3-21)$$

当三相电流流入定子绕组时，各相电流的磁场为交变、脉动的磁场，而三相电流的合成磁场则是一旋转磁场。为了说明问题，在图 3-30 中选择几个不同瞬间，来分析旋转磁场的形成。

①  $t=0$  瞬间 ( $i_U=0$ ； $i_V$  为负值； $i_W$  为正值)：此时，U 相绕组 ( $U_1U_2$  绕组) 内没有电流；V 相绕组 ( $V_1V_2$  绕组) 电流为负值，说明电流由  $V_2$  流进，由  $V_1$  流出；而 W 相绕组 ( $W_1W_2$  绕组) 电流为正值，说明电流由  $W_1$  流进，由  $W_2$  流出。运用右手螺旋定则，可以确定这一瞬间的合成磁场如图 3-31(a) 所示，为一对极（两极）磁场。

②  $t=T/6$  瞬间 ( $i_U$  为正值； $i_V$  为负值； $i_W=0$ )：U 相绕组电流为正，电流由  $U_1$  流

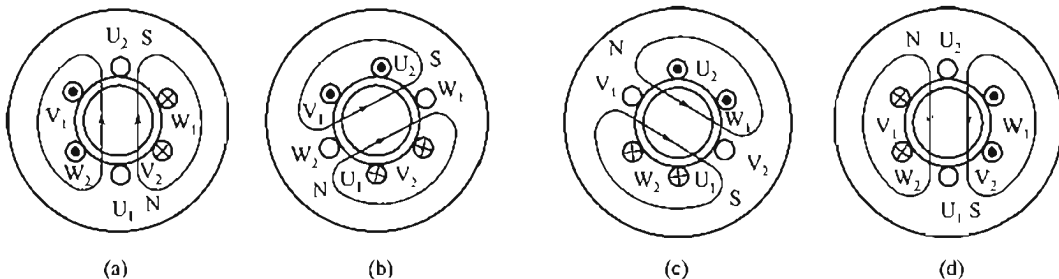


图 3-31 两极旋转磁场

进, 由  $U_2$  流出; V 相绕组电流未变; W 相绕组内没有电流。合成磁场如图 3-31(b) 所示, 同  $t=0$  瞬间相比, 合成磁场沿顺时针方向旋转了  $60^\circ$ 。

③  $t=T/3$  瞬间 ( $i_U$  为正值;  $i_V=0$ ;  $i_W$  为负值): 合成磁场沿顺时针方向又旋转了  $60^\circ$ , 如图 3-31(c) 所示。

④  $t=T/2$  瞬间 ( $i_U=0$ ;  $i_V$  为正值;  $i_W$  为负值): 与  $t=0$  瞬间相比, 合成磁场共旋转了  $180^\circ$ 。

由此可见, 随着定子绕组中三相对称电流的不断变化, 所产生的合成磁场也在空间不断地旋转。由上述两极旋转磁场可以看出, 电流变化一周, 合成磁场在空间旋转  $360^\circ$  (一转), 且旋转方向与线圈中电流的相序一致。

以上分析的是每相绕组只有一个线圈的情况, 产生的旋转磁场具有一对磁极。旋转磁场的极数与定子绕组的排列有关。如果每相定子绕组分别由两个线圈串联而成, 当三相对称电流通过这些线圈时, 便能产生两对极旋转磁场 (四极)。

## (2) 旋转磁场的转速

由以上分析可以看出。旋转磁场的转速与磁极对数、定子电流的频率之间存在着一定的关系。一对极的旋转磁场, 电流变化一周时, 磁场在空间转过  $360^\circ$  (一转); 两对极的旋转磁场, 电流变化一周时, 磁场在空间转过  $180^\circ$  ( $1/2$  转); 由此类推, 当旋转磁场具有  $p$  对磁极时, 电流变化一周, 其旋转磁场就在空间转过  $1/p$  转。

通常转速是以每分钟的转数来表示的, 所以旋转磁场转速的计算公式为

$$n_1 = \frac{60 f_1}{p} \quad (3-22)$$

式中  $n_1$ ——旋转磁场的转速, 又称同步转速, 单位为  $r/min$ ;

$f_1$ ——定子电流的频率, 单位为  $Hz$ ;

$p$ ——旋转磁场的极对数。

国产的异步电动机, 定子绕组的电流频率为  $50Hz$ , 所以不同极对数的异步电动机所对应的旋转磁场的转速也就不同。

旋转磁场的转向与电流的相序一致, 因此, 如果将三根电源线中的任意两根 (如 U 和 V) 对调, 旋转磁场的转向也变为逆时针了。

## 2. 三相异步电动机的工作原理

当电动机的定子绕组通以三相交流电时, 便在气隙中产生旋转磁场。设旋转磁场以  $n_1$  的速度顺时针旋转, 则静止的转子绕组同旋转磁场就有了相对运动。从而在转子导体中产生

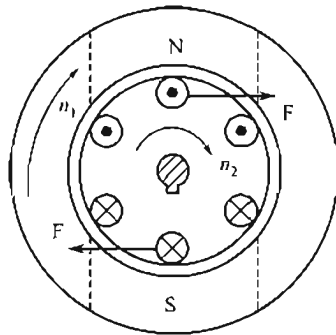


图 3-32 异步电动机的工作原理

了感应电动势, 其方向可根据右手定则判断 (假定磁场不动, 导体以相反的方向切割磁力线)。如图 3-32 所示, 可以确定出上半部导体的感应电动势垂直纸面向外, 下半部导体的感应电动势垂直于纸面向里。由于转子电路为闭合电路, 在感应电动势的作用下, 产生了感应电流。

由于载流导体在磁场中要受到力的作用, 因此, 可以用左手定则确定转子导体所受电磁力的方向。如图 3-32 所示, 这些电磁力对转轴形成一电磁转矩, 其作用方向同旋转磁场的旋转方向一致。这样, 转子便以一定的速度沿旋转磁场的旋转方向转动起来。

从上面的分析可以知道,异步电动机电磁转矩的产生必须具备下列条件:①气隙中有旋转磁场;②转子导体中有感应电流。在三相对称的定子绕组中通以三相对称的电流就能产生旋转磁场,而闭合的转子绕组在感应电动势的作用下能够形成感应电流,从而产生相应的电磁力矩。

如果旋转磁场反转,则转子的旋转方向也随之改变。

异步电动机转子的旋转方向虽然和磁场的旋转方向一致,但其转速  $n$  始终小于同步转速  $n_1$ 。这是由异步电动机的工作原理决定的。如果  $n=n_1$ ,则转子与磁场之间无相对运动,转子导体将不再切割磁力线,因而其感应电动势、感应电流及电磁转矩均为零。所以这种电动机的转速不可能等于同步转速,只能以  $n<n_1$  的转速旋转。正因为如此,此类电动机才称为异步电动机。由于该类电动机的转子电流是由电磁感应而产生的,所以又称为感应电动机。

当转子获得的电磁转矩  $T$  与其他机械作用在轴上的负载转矩  $T_c$  相等时,电动机就以某一转速稳定运转;若负载发生变化,当  $T>T_c$  时,则电动机加速;当  $T<T_c$  时,电动机减速。

电动机不带机械负载的状态称为空载。这时负载转矩是由轴与轴承之间的摩擦力及风阻力等造成的,称为空载转矩,其值很小。这时电动机的电磁转矩也很小,但其转速  $n_0$  (称空载转速)很高,接近于同步转速。

异步电动机的工作原理与变压器有许多相似之处,如二者都是依靠工作磁通为媒介来传递能量;异步电动机每相定子绕组的感应电动势  $E_1$  也近似与外加电源电压  $U_1$  平衡,即

$$U_1 \approx E_1 = 4.44 f_1 N_1 \Phi k_1 \quad (3-23)$$

式(3-23)中,  $k_1$  为定子绕组系数,与电动机的结构有关;  $\Phi$  为旋转磁场的每极平均磁通。同样,异步电动机定子电路与转子电路的电流也满足磁通势平衡关系,即

$$i_1 N_1 + i_2 N_2 = i_0 N_1 \quad (3-24)$$

由式(3-24)可知,当异步电动机的负载增大时,转子电流增大,在外加电压不变时,定子绕组电流也增大,从而抵消转子磁通势对旋转磁通的影响。可见,同变压器类似,定子绕组电流是由转子电流来决定的。

异步电动机与变压器也有许多不同之处。如变压器是静止的,而异步电动机是旋转的;异步电动机的负载是机械负载,输出为机械功率,而变压器的负载为电负载,输出的是电功率;此外异步电动机的定子与转子之间有空气隙,所以其空载电流较大(约为额定电流的20%~40%);异步电动机的定子电流频率与转子电流频率一般是不同的。

### 3. 转差率

异步电动机的转子转速  $n$  低于同步转速  $n_1$ ,两者的差值 ( $n_1 - n$ ) 称为转差。就是转子与旋转磁场之间的相对转速。

转差率就是相对转速(即转差)与同步转速之比,用  $s$  表示,即

$$s = (n_1 - n) / n_1 \quad (3-25)$$

转差率是分析异步电动机运转特性的一个重要参数。在电动机起动瞬间,  $n=0$ ,  $s=1$ ;当电动机转速达到同步转速(为理想空载转速,电动机在实际运行中不可能达到)时,  $n=n_1$ ,  $s=0$ 。由此可见,异步电动机在运行状态下,转差率的范围为  $0 < s < 1$ ;在额定状态下运行时,  $s$  为  $0.02 \sim 0.06$ 。

由式(3-22)和式(3-25)可得

$$n = (1 - s) n_1 = (1 - s) 60 f_1 / p \quad (3-26)$$

【例 3-1】 一台三相四极 50Hz 异步电动机，已知额定转速为 1440r/min 求额定转差  $s_N$ 。

解：该电动机的同步转速为

$$n_1 = 60 f_1 / p = (60 \times 50 / 2) \text{r/min} = 1500 \text{r/min}$$

因而电动机的额定转差率为

$$s_N = (n_1 - n) / n_1 = (1500 - 1440) / 1500 = 0.04$$

### 3.5.3 三相异步电动机的起动、反转、调速和制动

对异步电动机的工作特性一般有很多要求，如要求起动转矩足够大，起动电流不能太大，同时要有一定的调速范围等。

#### 1. 三相异步电动机的起动

从异步电动机接入电源，转子开始转动到稳定运转的过程，称为起动。在起动开始的瞬间 ( $n=0$ ,  $s=1$ )，转子和定子绕组中都有很大的起动电流。一般中、小型笼型电动机的定子起动电流、线电流大约是额定电流的 4~7 倍。过大的起动电流会造成输电线路的电压降增大，容易对处在同一电网中的其他电器设备的工作造成危害，例如，使照明灯的亮度减弱，使邻近异步电动机的转矩减小等。另外，虽然转子电流较大，但由于转子电路的功率因数  $\cos\phi_2$  很低，起动转矩并不是很大。

为了改善电动机的起动过程，要求电动机在起动时既要把起动电流限制在一定数值内。同时要有足够大的起动转矩，以便缩短起动过程，提高生产率。

笼型电动机的起动方法有直接起动和降压起动两种。

##### (1) 直接起动

直接起动就是利用闸刀开关将电动机直接接入电网使其在额定电压下起动，如图 3-33 所示。这种方法最简单，设备少、投资小、起动时间短，但起动电流大，起动转矩小，一般只适用于小容量电动机 (7.5kW 以下) 的起动。

较大容量的电动机，在电源容量也较大的情况下，可参考以下经验公式确定能否直接起动。

$$\frac{I_{st}}{I_N} \leq \frac{3}{4} + \frac{\text{供电变压器容量(kVA)}}{4 \times \text{电动机容量(kW)}} \quad (3-27)$$

式(3-27) 的左边为电动机的起动电流倍数，右边为电源允许的起动电流倍数。只有满足该条件，方可采用直接起动。

##### (2) 降压起动

降压起动的主要目的是为了限制起动电流，但同时也限制了起动转矩，因此，这种方法只适用于轻载或空载情况下起动。常用的降压起动方法有下列几种。

① 定子电路中串电抗器起动。这种起动方法是在电动机定子绕组的电路中串入一个三相电抗器，其线路图如图 3-34 所示。

起动时，先合上电源开关  $QS_1$ ，此时利用电抗器的分压，使加到电动机两端的电压降低，从而降低了起动电流；待电动机的转速升高而接近额定转速时，再将开关  $QS_2$  闭合，电抗器被短接，电动机便在额定电压下正常运转。

② Y-△起动。这种方法只适用于正常运转时定子绕组作三角形联结的电动机。起动时，先将定子绕组改接成星形，使加在每相绕组上的电压降低到额定电压的  $1/\sqrt{3}$ ，从而降低了起动电流；待电动机转速升高后，再将绕组接成三角形，使其在额定电压下运行。Y-△起

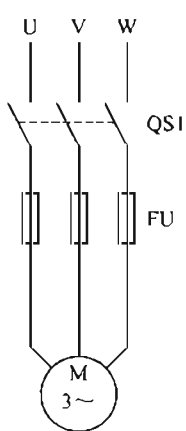


图 3-33 直接起动线路

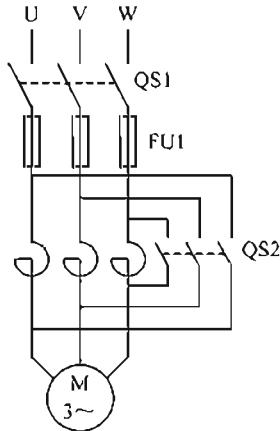


图 3-34 串电抗器起动

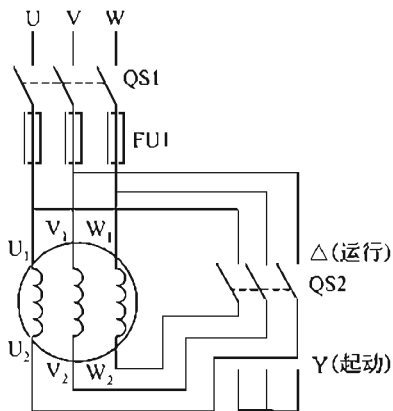


图 3-35 Y-Δ起动线路图

动线路图如图 3-35 所示。

可以证明，星形联结的电动机起动时的起动电流（线电流）仅为三角形直接起动时电流（线电流）的  $1/3$ ，其起动转矩也为后者的  $1/3$ 。

Y-Δ起动的优点是起动设备简单，成本低，能量损失小。目前， $4\sim 100\text{kW}$  的电动机均设计成  $380\text{V}$  三角形联结，所以，这种方法有很广泛的应用意义。

③ 自耦变压器起动。对容量较大或正常运行时作星形联结的电动机，可应用自耦变压器降压起动。此自耦变压器称为起动补偿器自耦变压器一次绕组接电源。起动时，将开关接到“起动”位置，则低压侧接电动机的定子绕组，使电动机在低电压下起动；待电动机转速升高到一定值，将开关切换到“运行”位置，电动机便在额定电压下运行。

## 2. 三相异步电动机的反转

根据电动机的转动原理，如果旋转磁场反转，则转子的转向也随之改变。改变三相电源的相序（即把任意两相线对调），就可改变旋转磁场的方向。

## 3. 三相异步电动机的调速

为了满足生产过程的需要，提高生产率，许多生产机械都有调速要求。所谓调速，就是在同一负载下使电动机以不同的转速运转。生产机械采用电气调速，可以大大简化机械变速机构。

由式(3-26)可知，改变电动机的转速可有三种方式，即改变电源频率  $f_1$ 、极对数  $p$  和转差率  $s$ 。

### (1) 变频调速

近年来，交流变频调速在国内外发展非常迅速。由于晶闸管变流技术的日趋成熟和可靠，变频调速在生产实际中应用得非常普遍，打破了直流拖动在调速领域中的统治地位。交流变频调速需要有一套专门的变频设备，所以价格较高。但由于其调速范围大，平滑性好，适应面广，能做到无级调速，因此其应用范围将日益广泛。

### (2) 变极调速

改变磁极对数，可有级地改变电动机的转速。增加磁极对数，可以降低电动机的转速，但磁极对数只能成整数倍地变化，因此，该调速方法无法做到平滑调速。

变极调速的实质是改变电动机旋转磁场的转速。在生产实际中，极对数可以改变的电动机称为多速电动机。如双速、三速、四速电动机等。双速电动机定子每相绕组由两个相同的

部分组成，这两部分若串联连接，则获得的磁极对数为两部分并联时的两倍。因为变极调速经济、简便，因而在金属切削机床中经常应用。

### (3) 变转差率调速

在绕线式电动机的转子电路中，接入调速变阻器，改变转子回路电阻，即可实现调速。这种调速方法也能平滑地调节电动机的转速，但能耗较大，效率低，目前。主要应用在起重设备中。

## 4. 三相异步电动机的制动

由于电动机转动部分有惯性，所以电动机断电后，还会继续转动一段时间才能停车。为提高生产率，保障安全，某些生产机械要求电动机能迅速停车，这就需要对电动机进行制动。制动的方法较多，如机械制动、电气制动等。以下仅对常见的电气制动做简要地介绍。

### (1) 能耗制动

这种制动方法是在电动机脱离三相电源的同时，将定子绕组接入直流电源，从而在电动机中产生一个不旋转的直流磁场，如图 3-36 所示。此时，转子由于惯性而继续旋转，根据右手定则和左手定则可知，转子感应电流和直流磁场相互作用所产生的电磁转矩与转子转动方向相反，产生制动转矩，电动机在制动转矩的作用下就很快停车。由于该制动方法是把电动机的旋转动能转变为电能消耗在转子电阻上，故称能耗制动。

能耗制动的能量消耗小，制动平稳，无冲击，但需要直流电源，主要应用于要求平稳准确停车的场合。

### (2) 反接制动

在电动机停车时，可将三相电源中的任意两相电源接线对调，此时旋转磁场便反向旋转，转子绕组中的感应电流及电磁转矩方向改变，与转子转动方向相反，因而成为制动转矩。在制动转矩的作用下，电动机的转速很快下降到零。应当注意，当电动机的转速接近于零时，应及时切断电源，以防电动机反转。反接制动的电路原理如图 3-37 所示。

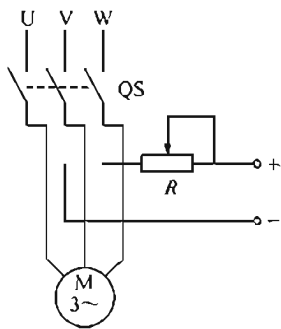


图 3-36 能耗制动

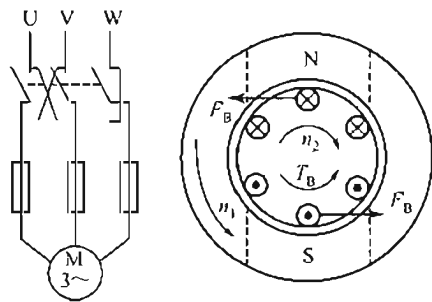


图 3-37 反接制动

反接制动的线路简单，制动力大，制动效果好，但由于制动过程中冲击大、制动电流大，不宜在频繁制动的场合下使用。

## 3.5.4 三相异步电动机的铭牌和选择

### 1. 三相异步电动机的铭牌

在异步电动机的机座上都装有铭牌，上面标有电动机的型号、额定值和有关技术数据。

要正确地使用电动机，必须了解铭牌上各项数据的意义如某三相异步电动机铭牌如下，现对铭牌的各项数据作些简要介绍。

(1) 型号

型号用来表示电动机的种类和形式，由拼音字母、国际通用符号和阿拉伯数字组成。

如 Y160M—6 中：

Y——产品代号，三相异步电动机；

三相异步电动机		
型号 Y160M—6	功率 7.5kW	频率 50Hz
电压 380V	电流 17A	接法 △
转速 970r/min	绝缘等级 B	工作方式 连续
年 月	编号	××电机厂

160——机座中心高 160mm；

M——机座长度代号（M 表示中机座，S 表示短机座，L 表示长机座）；

6——磁极数。

各类常见电动机的产品名称代号及其意义如下：

YR——绕线型三相异步电动机；

YB——防爆型异步电动机；

YZ——起重、冶金用异步电动机；

YQ——高起动转矩异步电动机；

YD——多速三相异步电动机。

(2) 额定功率

额定功率为电动机在额定状态下运行时，转子轴上输出的机械功率，单位为 kW。

(3) 额定电压和接法

额定电压指定子绕组按铭牌上规定的接法连接时应加的线电压值。Y 系列电动机功率在 4kW 以上均采用三角形联结，以便采用 Y-△接法。

(4) 额定电流

额定电流指电动机在额定运行情况下，定子绕组取用的线电流值。

(5) 额定转速

额定转速为电动机在额定运行状态时的转速，单位为 r/min。

(6) 额定频率

额定频率指额定电压的频率，国产电动机的频率单位均为 50Hz。

(7) 温升及绝缘等级

绝缘等级是电动机定子绕组所用的绝缘材料的等级。温升是电动机运行时绕组温度允许高出周围环境温度的数值。绝缘等级及极限工作温度见表 3-1。表中极限工作温度是指电动机运行时绝缘材料的最高允许温度。

表 3-1 绝缘等级及极限工作温度

绝缘等级	A	E	B	F	H	C
极限工作温度/(℃)	105	120	130	155	180	>180

### (8) 工作方式

工作方式即电动机的运行方式。按负载持续时间的不同,国家标准把电动机分成三种工作方式:连续工作制、短时工作制和断续周期工作制。

除了铭牌数据外,还可以根据有关产品目录或电工手册查出电动机的其他一些技术数据。

## 3.5.5 三相异步电动机的选择

合理地选用作为主要动力机械的电动机,直接关系到生产机械的安全运行及投资效益。选择电动机就是要根据生产机械的要求,最合理、最经济地确定电动机的类型、功率、转速及其他各项性能指标。在此,简要地介绍选择电动机的一些基本原则。

### 1. 功率选择

功率选择的原则是根据拖动的负载,最经济、合理地确定电动机的功率。要防止选择的电动机的功率过大,避免出现“大马拉小车”的现象,既浪费能源,又增加了投资;同时也应当防止选择的电动机的功率过小,电动机可能在过载状态下工作,很容易烧坏定子绕组。电动机的功率选择,一般按电动机的工作方式通过计算确定。详细的计算方法可参阅有关电工手册。

实践证明,电动机在接近额定状态下工作时,定子电路的功率因数最高。

### 2. 类型的选择

电动机的类型选择,应根据生产机械的要求,从技术和经济方面全面考虑,进行选择。

生产机械不带负载起动的,通常采用笼型异步电动机,如一般的机床、水泵等;若要带一定大小的负载起动,可采用高起动转矩电动机;若起动、制动频繁,且要求起动转矩大,可选用绕线异步电动机,如起重机、轧钢机等。

### 3. 结构形式的选择

为使电动机在不同的环境中安全可靠地工作,防止电动机可能对环境造成灾害,必须根据不同的环境要求选用适当的防护型式。常见的防护型式有开启式、防护式、封闭式和防爆式四种。具体选择时可参阅有关电工手册。

### 4. 转速选择

电动机的额定转速应根据生产机械的要求选定。转速高的电动机,体积小、价格便宜;而转速低的电动机,体积大、价格贵。应当本着经济的目的,结合生产机械传动机构的成本选择转速合适的电动机。

### 5. 电压的选择

电压选择主要依据电动机运行场所供电网的电压等级,同时还应兼顾电动机的类型和功率。小容量的电动机额定电压均为380V,大容量的电动机有时采用3kV和6kV的高压电动机。

**【例 3-2】** 一台三相异步电动机的额定功率为8kW,额定电压为380V,额定效率为83%,额定功率因数为0.89。试比较 $P_N$ 和 $I_N$ 。

解: 由于

$$P_N = \sqrt{3} U_N I_N \eta \cos \phi$$

$$I_N = \frac{P_N}{\sqrt{3} U_N \eta \cos \phi} = \frac{8 \times 10^3}{\sqrt{3} \times 380 \times 0.83 \times 0.89} \text{A} \approx 16 \text{A}$$



## 本章小结

1. 磁路中的基本物理量有磁通  $\Phi$ 、磁感应强度  $B$ 、磁导率  $\mu$  和磁场强度  $H$ 。
2. 铁磁性材料的磁性能包括高导磁率、磁饱和性和磁滞性。
3. 变压器是磁路的基本应用之一，变压器的三大基本作用是：变电压、变电流及阻抗变换。
4. 电动机是磁路的另一个重要的应用，三相异步电动机基本知识包括起动、反转、调速和制动及电动机的铭牌及电动机的选择。

## 练习题

- 3.1 为什么变压器的铁心要用硅钢片叠压而成？能否用整块的铁心？
- 3.2 变压器能否变换直流？为什么？
- 3.3 要制作一台 220V/110V 的单相变压器，能否在一次绕组绕两匝在二次绕组只绕一匝？为什么？
- 3.4 已知一台变压器一次电压为 36KV，二次电压为 400V，二次匝数为 30，求变压比及一次匝数。
- 3.5 已知一台单相变压器的电压是 220V/110V，若二次电流是 10A，求一次电流。
- 3.6 三相异步电动机只接两根电源线能否产生旋转磁场？
- 3.7 如何根据转差率的大小来判别电动机的运行情况？
- 3.8 当取出异步电动机的转子时，如果在定子绕组上误加额定电压，会产生什么后果？为什么？
- 3.9 有一台三相异步电动机，铭牌标明 380/220V，Y/ $\Delta$ 。当电源电压为 380V 时，能否采用 Y- $\Delta$  起动？
- 3.10 异步电动机在什么情况下作星形联结或三角形联结？
- 3.11 有一台三相异步电动机， $f=50\text{Hz}$ ， $n=960\text{r/min}$ ，试确定该电动机的磁极对数、额定转差率。

## 第 4 章 继电-接触器控制与可编程控制

【内容提要】为实现电动机的起停、正反转、调速及制动，普遍采用继电器-接触器控制系统，本章着重阐述三相笼型异步电动机的一些典型控制电路。主要内容有常用控制电器、三相笼型异步电动机的基本控制电路和基本电气识图。

在工业、农业、交通运输中，大量使用着各种各样的生产机械。这些生产机械的运转，必须要有电动机来进行拖动。采用各种控制电器（如接触器、继电器等）实现对电动机的控制，称为继电器-接触器控制。

### 4.1 常用低压电器

根据其在电路中所起作用的不同，电器可分为控制电器和保护电器。控制电器主要控制电路的接通或断开，如刀开关、接触器等。保护电器的主要作用是保护电源不工作在短路状态，保护电动机不工作在过载状态，如热继电器、熔断器都属于保护电器。

#### 4.1.1 刀开关

刀开关是一种手动电器，用来接通和断开电路。刀开关可分为开启式负荷开关、封闭式负荷开关、组合开关以及熔断器式刀开关等。

##### 1. 开启式负荷开关

开启式负荷开关又称闸刀开关。其外形如图 4-1 所示。闸刀开关设灭弧装置，仅以上、下胶盖为遮护以防止电弧伤人。通常作为隔离开关，也用于不频繁地接通或断开的电路中。闸刀开关的型号有 HK1、HK2 等系列。

##### 2. 封闭式负荷开关

封闭式负荷开关又称铁壳开关。其外形如图 4-2 所示。它与闸刀开关基本相同，但在铁壳开关内装有速断弹簧，速断弹簧的作用是使闸刀快速接通和断开，以消除电弧。另外，在铁壳开关内还设有联锁装置，即在闸刀闭合状态时，开关盖不能开启，以保证安全。铁壳开关的型号有 HH10、JJ11 等系列。

##### 3. 组合开关

组合开关又称为转换开关。组合开关的外形如图 4-3 所示。动触片是转动的，能组成各种不同的线路。动触片装在有手柄的绝缘方轴上，方轴可 90° 旋转，动触片随方轴的旋转使其与静触片接通或断开。组合开关的型号有 HZ5、HZ10 和 HZ15 等系列。

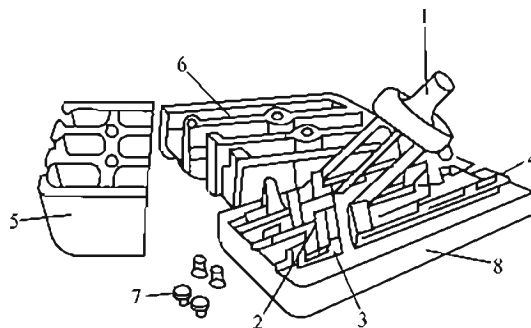


图 4-1 开启式负荷开关

1—瓷质手柄，2—进线座，3—静夹座，  
4—出线座，5—上胶盖，6—下胶盖，  
7—胶盖固定螺母，8—瓷底座

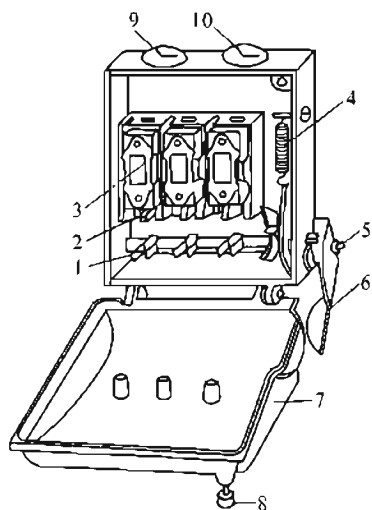


图 4-2 封闭式负荷开关

1—U形动触刀；2—静夹座；3—瓷插式熔断器；4—速断弹簧；5—转轴；6—操作手柄；7—开关盖；8—开关盖锁紧螺栓；9—进线孔；10—出线孔

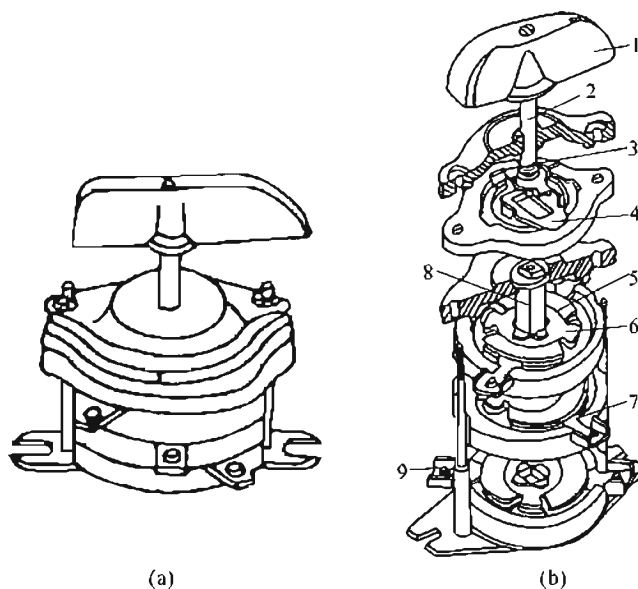


图 4-3 组合开关

1—手柄；2—转轴；3—弹簧；4—凸轮；5—绝缘垫板；6—动触点；7—静触点；8—绝缘方轴；9—接线柱

### 4.1.2 熔断器

熔断器俗称保险丝，主要由熔断体和放置熔断体的绝缘管或绝缘座组成，熔断体（熔丝）是熔断器的核心部分。熔断器应与电路串联，其主要作用是作短路或严重过载保护。熔断器可分为磁插式熔断器、螺旋式熔断器以及管式熔断器。

#### 1. 磁插式熔断器

磁插式熔断器的外形如图 4-4 所示。因为磁插式熔断器具有结构简单、价廉、外形小、更换熔丝方便等优点，所以被广泛地用于中、小容量的控制系统中。磁插式熔断器的型号为 RC1A 系列。

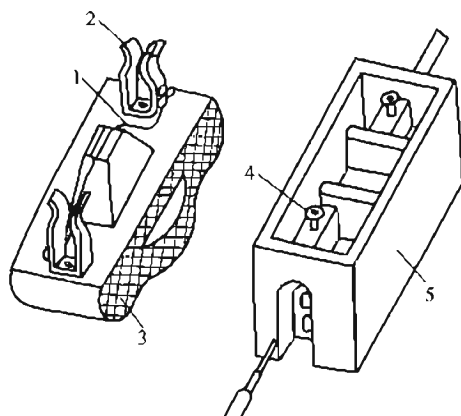


图 4-4 磁插式熔断器

1—熔丝；2—动触点；3—瓷盖；4—静触点；5—瓷体

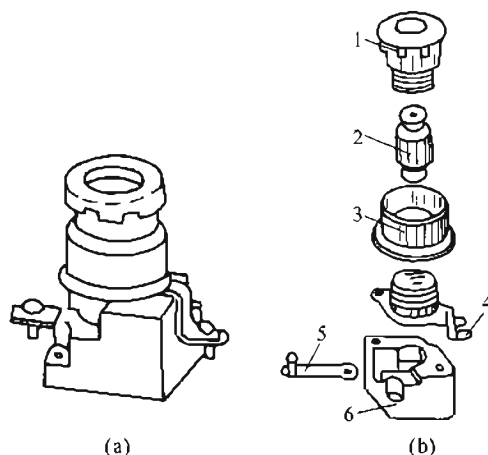


图 4-5 螺旋式熔断器

1—瓷帽；2—熔断管；3—瓷套；4—上接线盒；5—下接线盒；6—瓷座

## 2. 螺旋式熔断器

螺旋式熔断器的外形和结构如图 4-5 所示。在熔断管内装有熔丝，并填充石英砂，作熄灭电弧之用。熔断管口有色标，以显示熔断信号。当熔断器熔断的时候，色标被反作用弹簧弹出后自动脱落，通过瓷帽上的玻璃窗口可看见。螺旋式熔断器的型号有 RL1、RL7 等系列。

## 3. 管式熔断器

管式熔断器分为有填料式和无填料式两类。有填料管式熔断器的结构如图 4-6 所示。有填料管式熔断器是一种分断能力较大的熔断器，主要用于要求分断较大电流的场合。管式熔断器的型号有 RT12、RT14、RT15 以及 RT17 等系列。

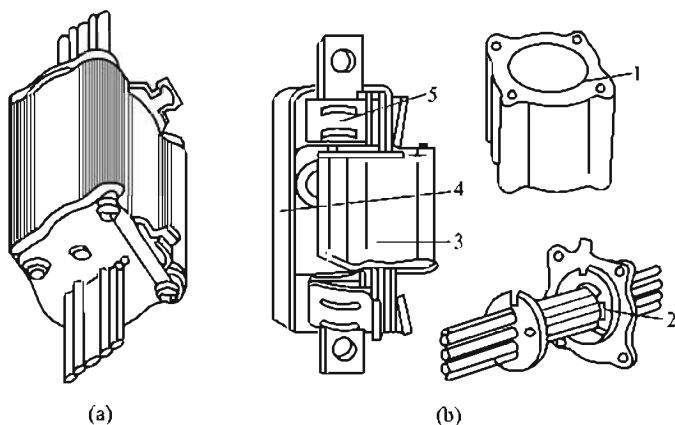


图 4-6 有填料管式熔断器

1—管体；2—熔体；3—熔断体；4—瓷底座；5—弹簧夹

## 4.1.3 按钮

按钮是一种手动操作接通或断开控制电路的主令电器，主要控制接触器和继电器，也可作为电路中的电气联锁。按钮的结构如图 4-7 所示。常态（未受外力）时，静触点 1、2 通过桥式动触点 5 闭合，所以称 1、2 为常闭（动断）触点。静触点 3、4 分断，所以称之为常开（动合）触点。当按下按钮帽 6 时，桥式动触点在外力的作用下向下运动，使 1、2 分断，3、4 闭合。此时，复位弹簧 7 为受压状态。当外力撤消后，动触点在复位弹簧的作用下回到原位，静触点 1、2 和 3、4 也随之恢复到原位，此过程称为复位。

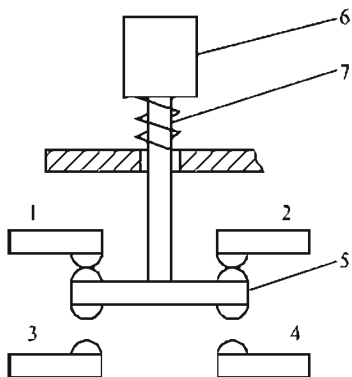


图 4-7 按钮的结构

1、2、3、4—静触点；5—桥式动触点；  
6—按钮帽；7—复位弹簧

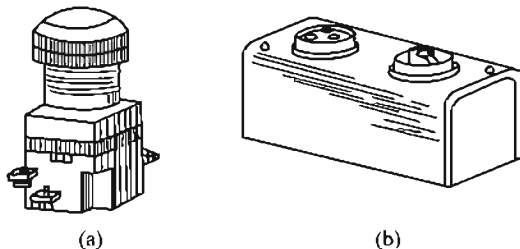


图 4-8 按钮的外形

按钮的种类较多。按钮接触头的分合状况，可分为常开按钮（或起动按钮）、常闭按钮（或停止按钮）和复合按钮。按钮可以做成单个的（称单联按钮）、两个的（称双联按钮）和多个的。按钮的外形如图 4-8 所示。按钮的型号有 LA10、LA20 以及 LA25 等系列。

#### 4.1.4 接触器

接触器是用来频繁接通和断开电路的自动切换电器，具有手动切换电器所不能实现的遥控功能，同时还具有欠电压、失电压保护的功能，但却不具备短路保护和过载保护功能。接触器的主要控制对象是电动机。

接触器触头按通断能力，分为主触头和辅助触头。主触头主要用于通断较大电流的电路（此电路称主电路），体积较大，一般由三对常开触头组成。辅助触头主要用于通断较小电流的电路（此电路称控制电路），体积较小，有常开触头和常闭触头之分。接触器按通入电流类型的不同可分为交流接触器和直流接触器。交流接触器的外形和结构如图 4-9 所示。当给交流接触器的电磁线圈 5 通入交流电时，在铁心 6 上会产生电磁吸力，克服缓冲弹簧 4 的反作用力，将衔铁 3 吸合，衔铁的动作带动动触桥 1 的运动，使动触桥 1 与静触点 2 闭合。当电磁线圈断电后，铁心上的电磁吸力消失，衔铁在弹簧的作用力下回到原位，各触点也随之回到原始状态交流接触器的型号有 CJO、CJ12 以及 CJ20 等系列。

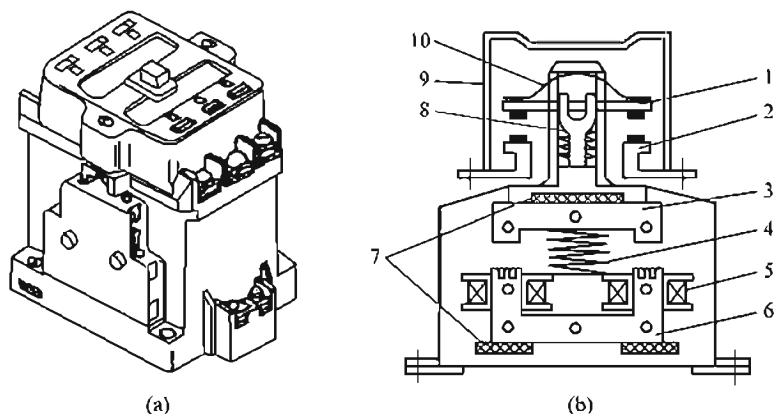


图 4-9 交流接触器

1—动触桥；2—静触点；3—衔铁；4—缓冲弹簧；5—电磁线圈；6—铁心；  
7—垫块；8—触头弹簧；9—灭弧罩；10—触点压力弹簧片

#### 4.1.5 继电器

继电器是一种根据外来电信号来接通或断开电路，以实现对电路的控制和保护作用的自动切换电器。继电器一般不直接控制主电路，而通常用来传递信号。继电器的种类很多，根据用途可分为控制继电器和保护继电器；根据反映的不同信号可分为电压继电器、电流继电器、中间继电器、时间继电器、热继电器、速度继电器、温度继电器和压力继电器等。现介绍其中的几种。

##### 1. 热继电器

热继电器是利用发热元件感受到的热量而动作的一种保护继电器。主要对电动机实现过载保护、断相保护以及电流不平衡运行保护等。

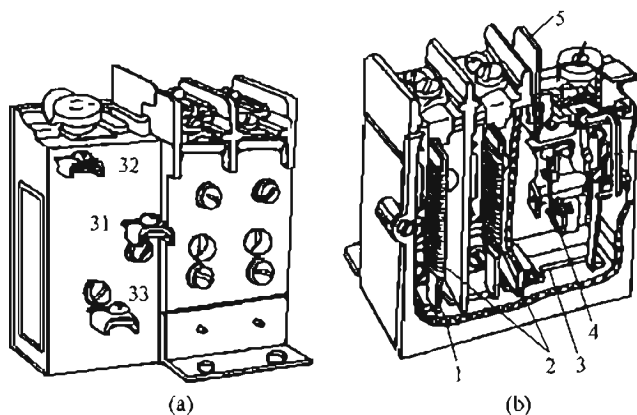


图 4-10 热继电器

1—双金属片；2—热元件；3—动作机构；4—常闭触点；5—复位按钮

热继电器的外形和结构如图 4-10 所示。热元件 2 绕在双金属片 1 上，当电动机过载时，过大的电流产生热量，使双金属片 1 弯曲，再通过动作机构 3 使常闭触点 4 断开，从而断开控制电路，达到保护的目的。热继电器的型号有 JRO、JR15 以及 JR20 等系列。

## 2. 时间继电器

时间继电器是在感受到外界信号后，其执行部分需要延迟一定时间才动作的一种继电器。

时间继电器按延时方式可分为通电延时和断电延时两种。时间继电器的型号为 JS23、JS11、JS18 以及 JS20 等系列。

## 3. 速度继电器

速度继电器也称转速继电器，是一种用来反映转速和转向变化的继电器。其工作方式是依靠电动机转速的快慢作为输入信号，通过触点的动作信号传递给接触器，再通过接触器实现对电动机的控制。速度继电器主要用于反接制动电路中。

### 4.1.6 行程开关

行程开关，又称限位开关，主要用于限制机械运动的位置，同时还能使机械实现自动停止、反向、变速或自动往复等运动。行程开关的动作原理与按钮相似，二者的区别在于：按钮是用手来操作的，而行程开关是靠机械的运动来实现其动作的。

行程开关可分为按钮式和旋转式，旋转式行程开关又可分为单轮旋转式和双轮旋转式两种，其外形分别如图 4-11(a)、(b)、(c) 所示。行程开关的型号有 JLXK、LX19 等系列。

### 4.1.7 自动开关

自动开关又称自动空气断路器，或称断路器。自动开关是刀开关、熔断器、热继电器和欠电压继电器的组合。在电路中能起到欠电压、失电压、过载、短路保护的作用。它既能自动控制，也能手动控制。

自动开关的结构如图 4-12 所示。欠电压脱扣器 11 上的线圈与电源电压并联。如果电源电压下降到额定数值以下时，电磁吸力小于弹簧 9 的拉力，而使衔铁 10 在弹簧的作用下撞击杠杆 7，使搭钩 4 被顶开，锁键 3 带动三相触点 2 在弹簧 1 的作用下向左运动，使电源与电动机分开，达到保护作用。电阻丝 13 与电路串联。当电动机过载时，电路中电流增加，

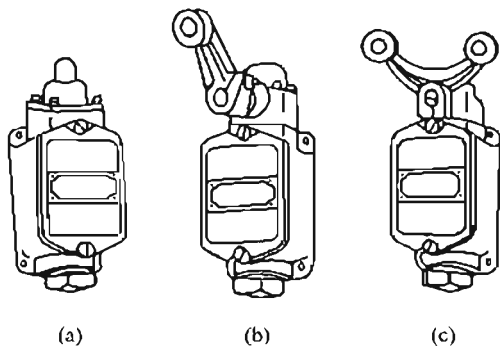


图 4-11 行程开关

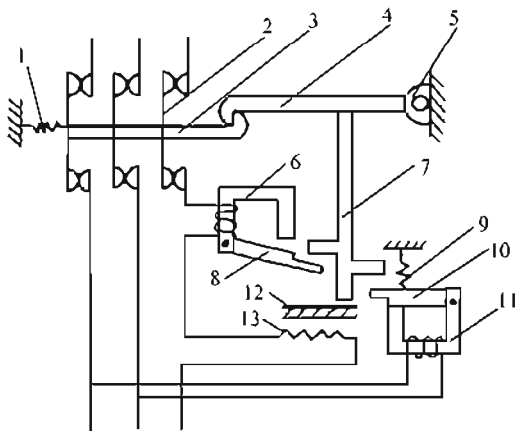


图 4-12 自动开关的结构

1—弹簧；2—三相触点；3—锁键；4—搭钩；5—转轴；  
6—过电流脱扣器；7—杠杆；8—衔铁；9—弹簧；10—  
衔铁；11—欠电压脱扣器；12—双金属片；13—电阻丝

电阻丝 13 发热，使双金属片弯曲，碰撞杠杆 7，使搭钩 4 被顶开，锁键带动三相触点向左运动，电动机断电。

电路短路时，电路中的电流急剧增加，过电流脱扣器 6 上线圈的电流增加，电磁吸力增加，克服衔铁 8 的自重力，使其向上运动，碰撞杠杆 7，把搭钩 4 顶开，三相触点把电源和负载断开。

## 4.2 绘制、识读电气原理图的原则

### 4.2.1 基本电气识图

电动机或其他电气设备的电气控制系统是由多种电器组成的，为了分析该系统各电器的工作情况和控制原理，需用电路按规定的图形和文字符号表示出来。这种图形称为电气图。

电气图的各种电气元件都用国家标准局规定的图形和文字符号表示<sup>①</sup>。见表 4-1。

继电—接触器控制电气图可分为：原理图、接线图和安装图。在原理图中的各种电器及部件都不是按实际位置绘制的，而是根据控制的基本原理和要求分别绘制在电路图中各个相应的位置，以表明各电器间的电路联系，便于分析控制线路原理。这里只介绍电气原理图。

电气原理图的整个电路分为主电路和控制电路两部分。主电路是从电源进线到电动机的大电流连接电路，如刀开关、接触器触点及电动机等；控制电路是对主电路中各电气部件的工作情况进行控制、保护、监测等的小电流电路，如接触器和继电器线圈及其辅助触点、按钮等相关控制电器。


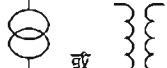



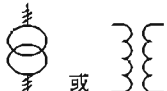




















### 4.2.2 电气原理图的原则

在绘制、识读电气原理图时应遵循下述原则：

① 应将主电路、控制电路、指示电路、照明电路分开绘制。

① 可参照 GB 4728—1985《电气图形符号》的规定。

表 4-1 常用电机电器图形符号 (GB 4728—1985) (部分)

电能的发生和转换			
名 称	图形符号	名 称	图形符号
交流电动机		双绕组变压器	
三相鼠笼式步电动机		星角联结的三相变压器	
电抗器扼流圈		电压互感器	
开关、控制和保护装置			
开关动合触点		热继电器动断触点	
动断触点		三极开关(单线表示)	
延时闭合的动合触点		三极开关(多线表示)	
延时断开的动合触点		接触器动合触点	
延时闭合的动断触点		接触器动断触点	
延时断开的动断触点		操作器件的一般符号	
按钮开关动合触点		交流继电器线圈	
按钮开关动断触点		热继电器的驱动器件	
行程开关动合触点		熔断器的一般符号	
行程开关动断触点		灯的一般符号	

② 电源电路应绘成水平线，而受电的动力装置及其保护电路应垂直绘出。控制电路中的耗能元件（如接触器和继电器的线圈、信号灯及照明灯等）应在电路的下方，而电器触点应放在耗能元件的上方。

③ 在电气原理图中，各电器的触点应是未通电的状态，机械开关应是循环开始前的



状态。

④ 电气原理图中从上到下，从左到右表示操作顺序。

⑤ 电气原理图应采用国家规定的国标符号。不同位置的同一电器元件应标有相同的文字符号。

⑥ 在电气原理图中，若有交叉导线连接点，要用小黑圆点表示，无直接联系的交叉导线则不画出小黑圆点。在电路图中，应尽量减少或避免导线的交叉。

### 4.3 三相笼型异步电动机直接起动控制电路

三相笼型异步电动机的结构简单，价格便宜，维修和维护都较为方便，所以在生产机械中应用较为广泛。对它的起动控制方式有直接起动和降压起动两种。在起动时，加在电动机定子绕组上的电压是额定电压的，都属于直接起动（或称全压起动）。直接起动的优点是电气设备少，电路简单、可靠、经济，维修和维护方便。但直接起动的起动电流一般为额定电流的5~7倍，会影响到同一电网中其他设备的工作。所以，直接起动电动机的容量受到一定的限制，可以根据电动机容量、电动机起动次数、电网容量等方面来考虑。一般额定功率在10kW以下的电动机，均可采用直接起动方式。

电器元件在电路中组成基本控制电路，对电动机实现单向控制、点动控制、正反转控制、行程控制、顺序控制以及时间控制等。下面分别介绍这几种基本电路。

#### 4.3.1 单向控制电路

单向控制是指对电动机实现一个旋转方向的控制。单向控制可用刀开关控制，也可用接触器控制。

##### 1. 刀开关控制的单向控制电路

刀开关控制的单向控制电路如图4-13所示。图中Q为刀开关，M为三相笼型异步电动机，FU为三相熔断器，L1、L2、L3为三相电源。当合上刀开关Q时，三相电源与电动机接通，电机开始旋转。当拉开刀开关Q时，三相电动机因断电而停止。

上述控制所用的电器元件较少，电路也比较简单，但在起动和停止时不方便、不安全，也不能实现失电压、欠电压和过载保护。所以，此电路只适用于不频繁起动的小容量电动机。在实际中，应用较多的是用接触器控制的电路。

##### 2. 接触器控制的单向控制电路

接触器控制的单向控制电路如图4-14所示。图中的KM为接触器，SBI为停止按钮，SB2为起动按钮，FR为热继电器，FU1、FU2为熔断器。

当合上刀开关Q，按下起动按钮SB2时，接触器KM的线圈通电，其三相主触点闭合，使电动机通入三相电源而旋转。同时，与起动按钮SB2并联的接触器KM常开辅助触点也闭合，此时，若放开SB2，KM线圈仍保持通电状态。这种依靠接触器自身的常开辅助触点使自身的线圈保持通电的电路，称为自锁电路。辅助常开触点称为自锁点。当电动机需要停止时，按下停止按钮SB1，KM线圈断电，使三相触点断开，电动机断电停车。同时，KM的常开辅助触点也断开。此时，放开停止按钮SBI，KM的线圈也不会通电，电动机不能自行起动。若使电动机再次起动，则需再次按下起动按钮SB2。

此电路具有短路保护、过载保护、失压和欠压保护的功能。

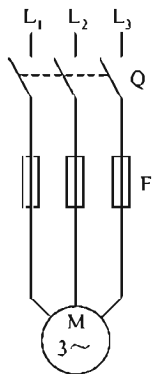


图 4-13 刀开关控制的单向控制电路

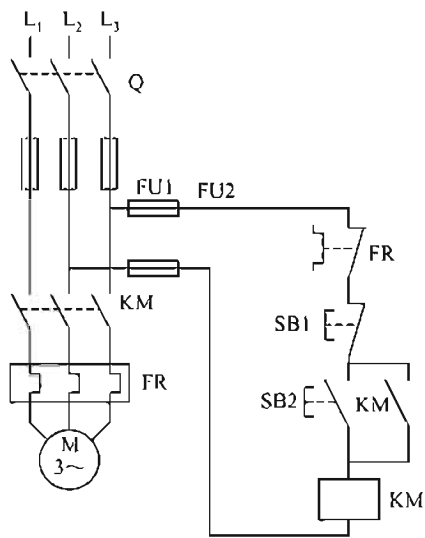


图 4-14 接触器控制的单向控制电路

### 4.3.2 点动控制电路

在某些生产机械中，除了要求电动机能正常连续运转外，有的还需要作点动控制。所谓点动控制，就是指按下按钮，电动机因通电而运转；松开按钮，电动机因断电而停车。点动控制电路如图 4-15 所示。合上刀开关  $Q$ ，按下点动按钮  $SB$ ，接触器  $KM$  的线圈通电，三相主触点闭合，电动机运行。当松开点动按钮  $SB$ ， $KM$  线圈断电，三相主触点断开，电动机断电，停止运转。

### 4.3.3 正反转控制电路

生产机械的运动部件往往需要做正、反两个方向的运动。如车床主轴的正转和反转，工作台的前进和后退等，这就要求对拖动生产机械的电动机进行正、反转控制。

若要实现电动机反向控制，只需将电源的三根相线任意对调两根（称换相）即可。对电动机正、反转的控制方式一般有倒顺开关控制和接触器控制两种。

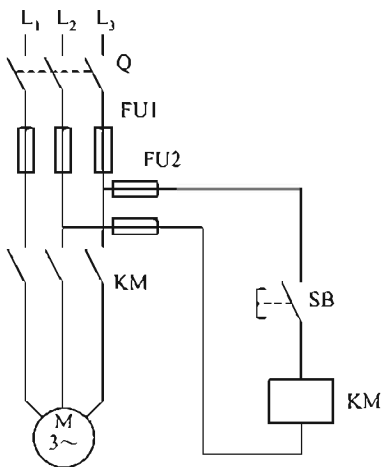


图 4-15 点动控制电路

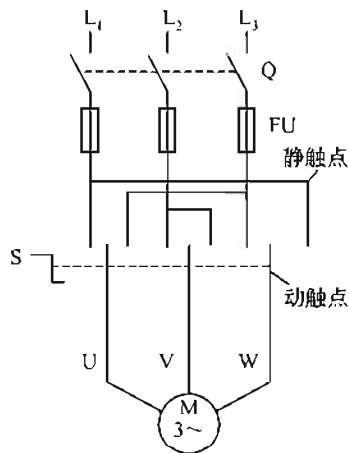


图 4-16 倒顺开关控制电路

### 1. 倒顺开关控制的正反转控制电路

倒顺开关也称可逆转换开关，如图 4-16 所示中的 S 就是倒顺开关。静触点有六个位置。当合上刀开关 Q 后，再扳动 S 的手柄使其在“顺”的位置，动触点就会向左转动，电路按 L<sub>1</sub>-U、L<sub>2</sub>-V、L<sub>3</sub>-W 的正向顺序接通电动机，此时，电动机为正转。当扳动 S，使手柄处在“倒”的位置时，动触点就会向右转动，电路按 L<sub>1</sub>-W、L<sub>2</sub>-V、L<sub>3</sub>-U 的反向顺序接通电动机，此时电动机为反转。

在使用倒顺开关时应注意：当电动机由正转到反转，或由反转到正转，必须将手柄扳到“停”的位置。这样可避免电动机定子绕组突然接入反向电而使电流过大，防止电动机定子绕组因过热而烧坏。

用倒顺开关控制的正、反转控制电路的优点是所用电器元件较少，电路简单。但其缺点是在频繁换向时，操作人员的劳动强度大，操作不安全。所以这种电路一般用于额定电流在 10A、功率在 3kW 以下的小容量电动机。在实际中应用较多的是用接触器控制电路。

### 2. 接触器控制的正、反转控制电路

#### (1) 无联锁的正、反转控制电路

用接触器控制的正反转控制电路如图 4-17 所示。电路中采用了两个接触器 KM1，KM2，分别控制电动机的正、反转。当合上刀开关 Q，按下正转按钮 SB2 时，KM1 线圈通电，KM1 三相主触点闭合，电动机旋转。同时，KM1 辅助常开触点闭合自锁。若要电动机反转时，按下反转按钮 SB3，KM2 线圈通电，KM2 的三相主触点闭合，电源 L1 和 L3 对调，实现换相，此时电动机为反转。

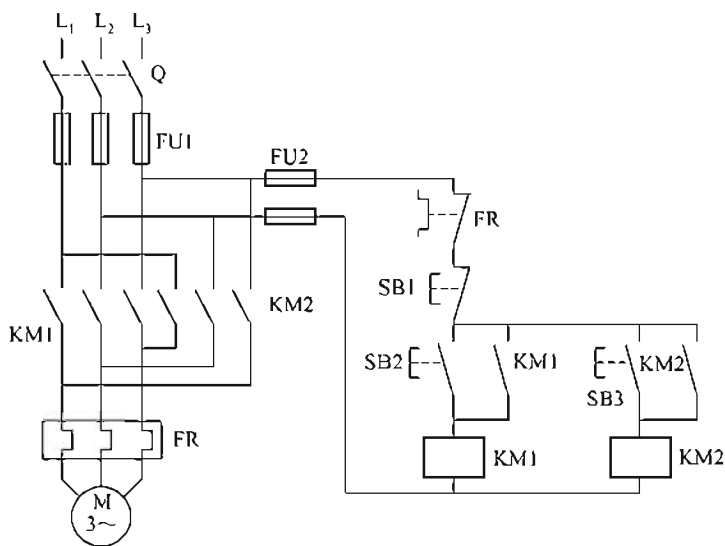


图 4-17 无联锁的正反转控制电路

此电路存在的问题是：当电动机正转，KM1 通电时，若再按下 SB3，KM2 也通电，在主电路中，会发生电源直接短路的故障。因此，该电路在实际中不能采用。

#### (2) 有联锁的正、反转控制电路

为了克服上述电路的缺点，常用具有联锁的控制电路。具有电气联锁的控制电路如图 4-18 所示。当按下 SB2，KM1 通电时，KM1 的辅助常闭触点断开，这时，如果按下 SB3，KM2 的线圈不会通电，这就保证了电路的安全。这种将一个接触器的辅助常闭触点串联在

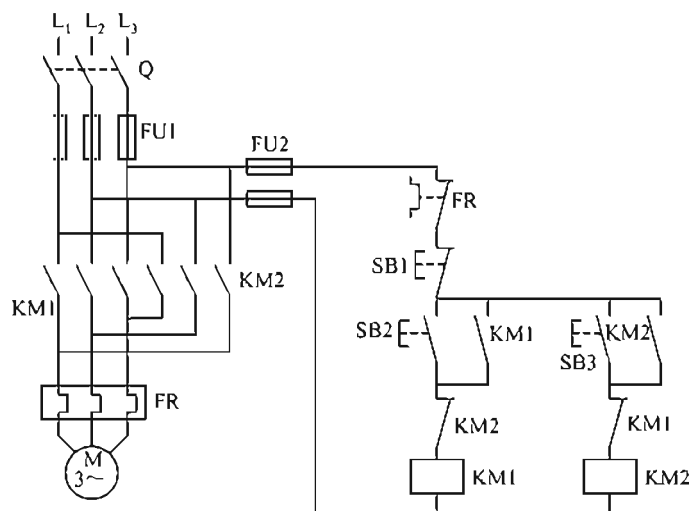


图 4-18 具有电气联锁的控路

另一个线圈的电路中，使两个接触器相互制约的控制，称为互锁控制或联锁控制。利用接触器（或继电器）的辅助常闭触点的联锁，称为电气联锁（或接触器联锁）。

在正、反转控制电路中，除采用电气联锁外，还可采用机械联锁，如图 4-19 所示。常闭按钮 SB2 和 SB3 串联在对方的常开触点电路中。这种利用按钮的常开、常闭触点，在电路中互相牵制的接法，称为机械联锁（或按钮联锁）。具有电气、机械双重联锁的控制电路是电路中常见的，也是最可靠的正、反转控制电路。它能实现电动机由正转直接到反转，或由反转直接到正转的控制。

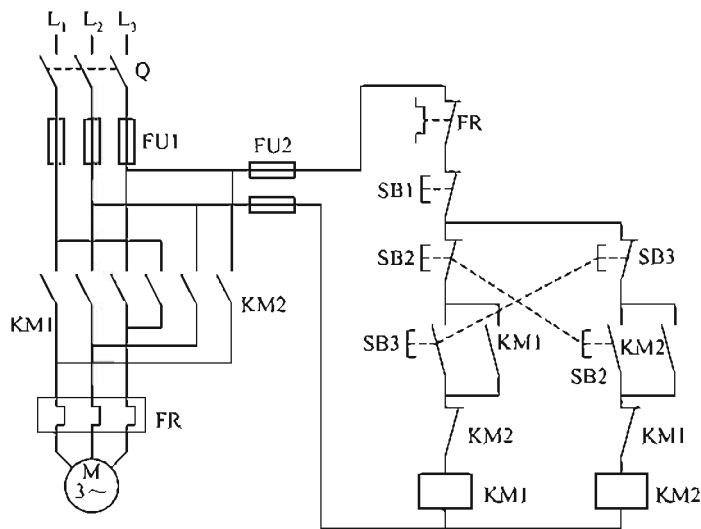


图 4-19 具有双重联锁的控制电路

### (3) 行程控制电路

在生产机械中，常需要控制某些生产机械的行程位置。例如，铣床的工作台到极限位置时，会自动停止；起重设备上升到一定高度也能自动停下来；等等。行程控制要用到行程开关。利用生产机械运动部件上的挡铁与行程开关碰撞，使其触点动作来接通或断开电路，以达到控制生产机械运动部件位置或行程的控制，称为行程控制（或位置控制，或限位控制）。行程控制是生产过程自动化中应用较为广泛的控制方法之一。

行程控制的电路如图 4-20 所示。该电路是在双重互锁正、反转控制电路的基础上，增加了两个行程开关 SQ1 和 SQ2。

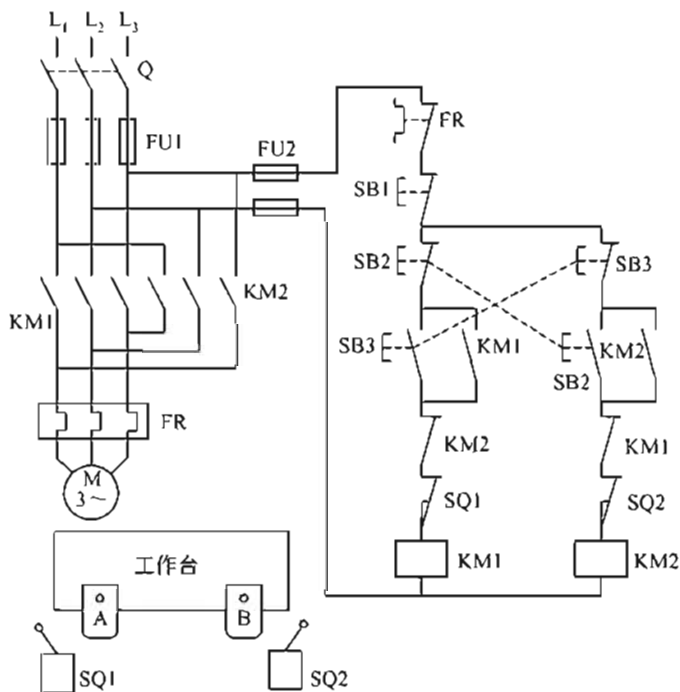


图 4-20 行程控制电路

按下正转按钮 SB3，接触器 KM1 通电，电动机正转，拖动工作台向左运行。当达到极限位置，挡铁 A 碰撞 SQ1 时，使 SQ1 的常闭触点断开，KM1 线圈断电，电动机因断电自动停车，达到保护的目的。同理，按下反转按钮 SB2，KM2 通电，电动机反转，拖动工作台向右运行。到达极限位置，挡铁 B 碰撞 SQ2 时，使 SQ2 的常闭触点断开，KM2 线圈断电，电动机因断电自动停车。

该电路除短路、过载、失电压、欠电压保护外，还具有行程保护功能。

#### 4.3.4 顺序控制电路

在生产机械中，往往有多台电动机参与工作。各台电动机的作用不同，需要按一定顺序动作，才能保证整个工作过程的合理性和可靠性。例如，X62W 型万能铣床上要求主轴电动机起动后，进给电动机才能起动；平面磨床中要求砂轮电动机起动后，冷却泵电动机才能起动；等等。这种只有当一台电动机起动后，另一台电动机才允许起动的控制方式，被称为电动机的顺序控制。

如图 4-21 所示，电路中有两台电动机 M1 和 M2，分别由接触器 KM1 和 KM2 控制。当按下起动按钮 SB2 时，KM1 通电，M1 运转。同时，KM1 的常开触点闭合，此时，再按下 SB3，KM2 线圈通电，M2 运行。如果先按 SB3，由于 KM1 线圈未通电，其常开触点未闭合，KM2 线圈不会通电。这样保证了必须 M1 起动后 M2 才能起动的控制要求。

在图 4-21 的电路中，采用熔断器和热继电器作短路保护和过载保护。其中，两个热继电器的常闭触点串联，保证了如果有一台电动机出现过载故障，两台电动机都会停车。

顺序控制电路有如下缺点：要起动两台电动机时需要按两次起动按钮，增加了劳动强度；同时，起动两台电动机的时间差由操作者控制，精度较差。

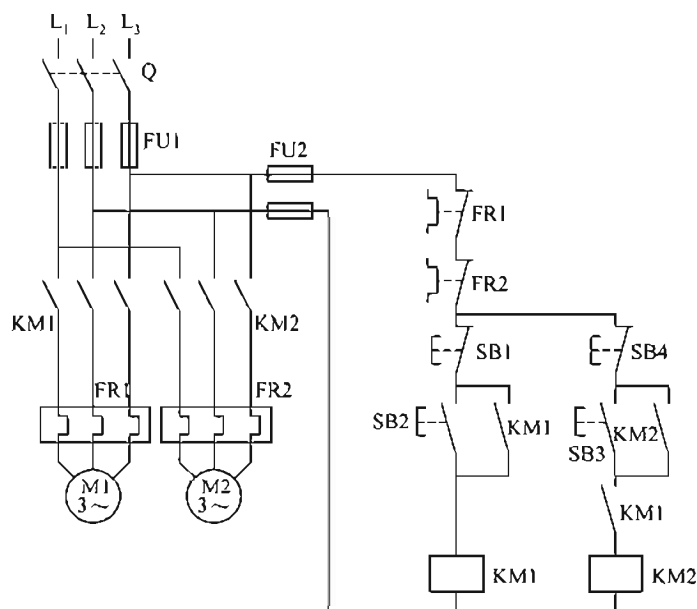


图 4-21 顺序控制电路

#### 4.3.5 时间控制电路

为了解决顺序控制的缺点，可采用时间控制。用时间继电器来控制两台或多台电动机的起动顺序，称为时间控制。

两台电动机的时间控制电路如图 4-22 所示，图中的 KT 为时间继电器。按下起动按钮 SB2，KM1 线圈通电，M1 运行。在 KM1 线圈通电的同时，时间继电器 KT 的线圈也通电，经过一段时间，时间继电器的延时常开触点闭合，使 KM2 线圈通电，KM2 的三相主触点闭合，电动机 M2 运行。实现了时间控制。当需要停止时，按下停止按钮 SB1，接触器线圈断电，两个接触器的三相触点全部断开，电动机因断电而停车。

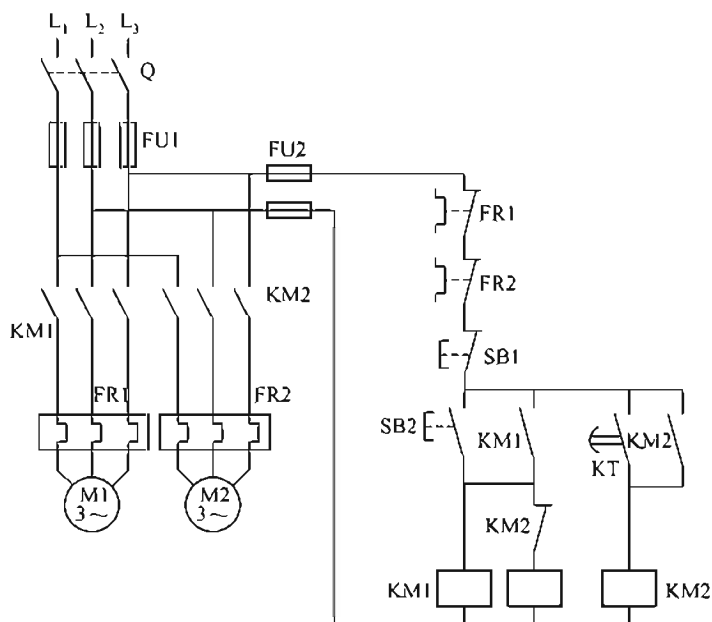


图 4-22 时间控制电路

当 KM2 线圈通电后, 时间继电器 KT 的作用已经完成, 所以, 用 KM2 的常闭触点断开 KT 线圈, 以减少 KT 线圈的能量损耗。

## 4.4 三相笼型异步电动机的降压起动和制动控制

### 4.4.1 降压起动控制

当电动机的功率在 10kW 以上的, 应采用降压起动。降压起动是指电动机在起动时, 加在电动机定子绕组上的电压小于其额定电压。但应注意, 在起动完成后, 电动机定子绕组上的电压应恢复到额定值, 否则, 会使电动机损坏。常见的降压起动方式有四种: 定子绕组串电阻降压起动、Y-△联结降压起动、自耦变压器降压起动以及延边三角形降压起动。

#### 1. 定子绕组串电阻降压起动。

三相笼型异步电动机定子绕组串电阻降压起动控制电路如图 4-23 所示。由手动控制起动, 加在电动机定子绕组上的电压小于其额定电压, 电动机进行降压起动。待转速上升到一定值时, 把开关 S 合上, 电阻 R 被短接, 此时, 电动机在额定电压下运行。

#### 2. Y-△联结降压起动

星形联结和三角形联结的原理如图 4-24 所示。电源线电压  $U_{\text{线}}$  (380V) 不变。图 4-24(a) 为星形联结, 电动机的相电压  $U_{\text{相}} = U_{\text{线}} / \sqrt{3}$ , 故相电压为 220V。图 4-24(b) 为三角形联结, 其相电压与线电压相等, 为 380V。所以, 起动时采用星形联结, 便可实现降压起动; 起动完成后, 再将电动机接成三角形, 又可使电动机正常运转。

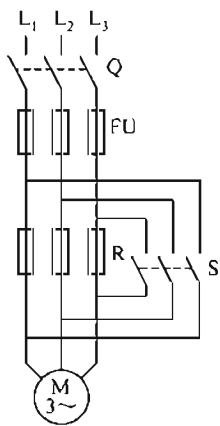


图 4-23 串电阻降压起动控制电路

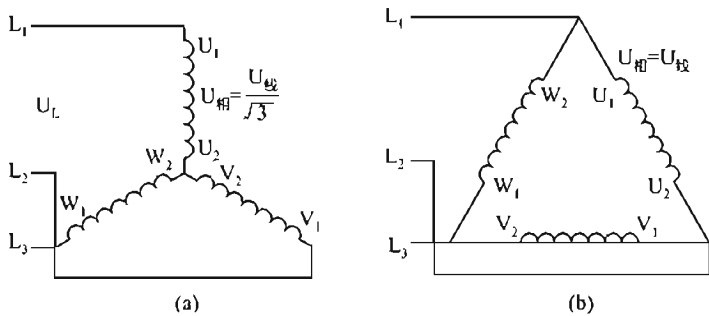


图 4-24 Y 联结和△联结的原理

Y-△联结降压起动控制电路如图 4-25 所示。合上刀开关 Q, 按下起动按钮 SB2, KM1 线圈通电, KM1 的自锁点闭合, 随即 KT 线圈通电, KM2 线圈通电并自锁, 电动机接成星形联结, 实现降压起动。由于 KT 线圈通电, 经过一段时间后, KT 的延时断开常闭触点断开, 延时闭合常开触点闭合, 使 KM1 断电, KM3 通电, 电动机接成三角形联结, 实现全压运行。停车时, 只需按下停止按钮 SB1 即可。

### 4.4.2 制动控制电路

制动就是给电动机一个与其旋转方向相反的转矩, 使其迅速停下来。制动的方法有机械

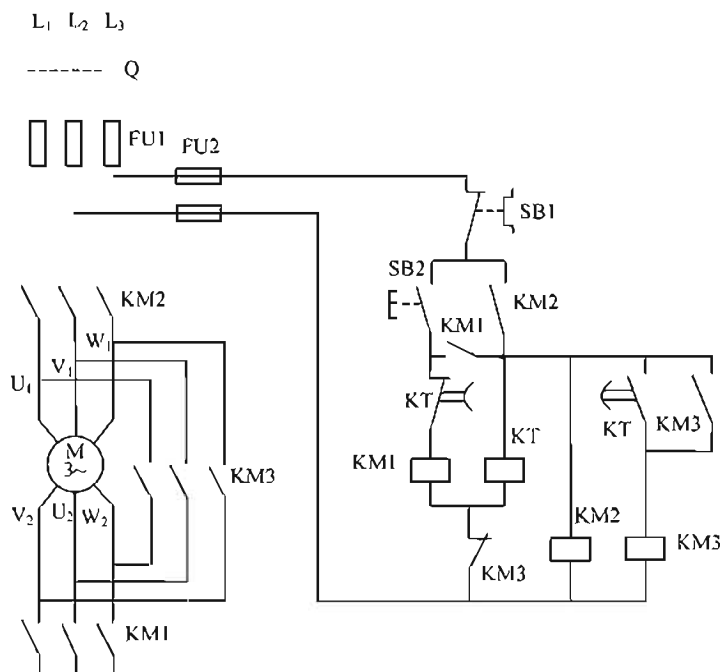


图 4-25 Y-Δ联结降压起动控制电路

制动和电气制动两种。其中，电气制动又包括反接制动、能耗制动和再生制动。这里只介绍反接电气制动。

#### 1. 反接制动控制电路

反接制动是改变电动机定子绕组上的电源相序来产生制动力矩，使电动机迅速停止的方法。

反接制动电路如图 4-26 所示。图中的 KV 为速度继电器，R 为反接制动电阻。当合上刀开关 Q，按下起动按钮 SB2 时，KM1 线圈通电，电动机开始旋转。当电动机的转速达到 120r/min 时，速度继电器 KV 常开触点闭合，为反接制动作准备。当需要停止时，

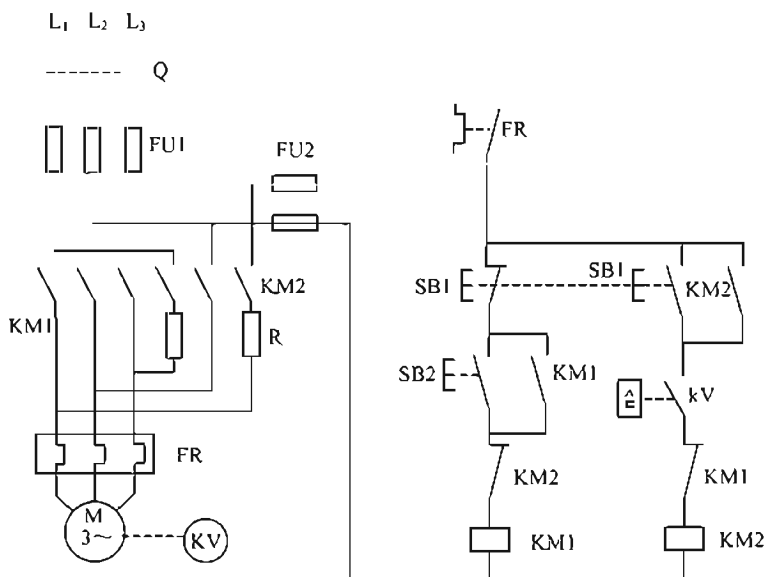


图 4-26 反接制动电路



按下停止按钮 SB1, SB1 的常闭触点把 KM1 线圈断电, SB1 的常开触点闭合, 把 KM2 线圈接通, 使电动机断开正向电, 接通反向电。此时, 电动机的转速下降。当电动机转速下降到 100r/min 时, KV 的常开触点断开, 使 KM2 线圈断电, 电动机断电后自然停车。

## 4.5 普通车床的控制电路

前面已经对常用的基本电路进行了分析，机床电路就是由这些基本控制电路所组成的。作为基本控制电路的一个综合应用实例，本节对普通车床的控制电路做一简单介绍。

C620-1 型普通车床电气控制电路如图 4-27 所示。对该电路的要求主要有以下几点。

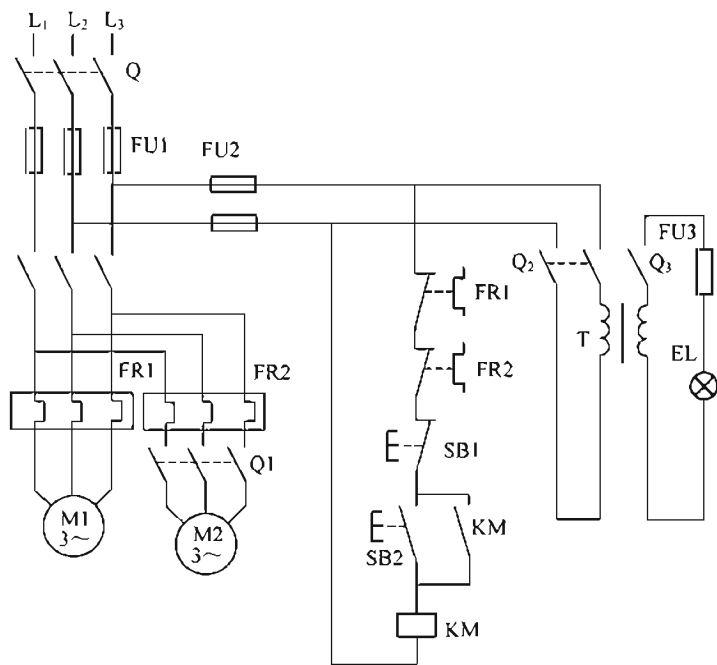


图 4-27 C620-1 型普通车床电器控制电路

① 主轴电动机 M1 要求正、反转控制，以便加工螺纹。C620-1 型普通车床的正、反转是由机械控制的。

② 主轴电动机的起动、停止实现自动控制。C620-1 型普通车床主轴电动机的容量较小, 所以采用直接起动, 停车时采用机械制动。

③ 在车削加工时, 由于温度高, 需要冷却, 为此, 设有一台冷却泵电动机 M2。冷却泵电动机只需要单方向运行, 且要求须在主轴电动机起动后方可起动; 当主轴电动机停车时, 要求冷却泵电动机也立即停车。

④ 电路应有保护电路和安全的局部照明电路。

C620-1 型普通车床控制电路的工作原理如下：合上刀开关 Q，按下起动按钮 SB2，接触器 KM 线圈通电，自锁触点闭合自锁，主轴电动机 M1 通电旋转。若要使用冷却泵，可合上 Q1，冷却泵电动机 M2 通电旋转。需要停止时，按下停止按钮 SB1，KM 线圈断电，电动机停止。电路中用熔断器 FU1，FU2，FU3 来实现短路保护；用 FR1，FR2 来实现过载保护。同时，接触器 KM 还具有失电压和欠电压保护的作用。照明变压器 T 给照明灯 EL 提供了一个安全电压，由开关 Q2，Q3 控制。

## 4.6 可编程控制器

### 4.6.1 可编程控制器概述

1969 年美国通用汽车公司自动装配线上使用了第一台可编程序控制器（简称 PLC），它是把继电器—接触器控制系统和计算机功能结合起来，用计算机程序来代替传统的继电器—接触器控制的硬线连接，所用计算机是一种面向工业生产过程控制的专用计算机。随着微电子技术的迅速发展，可编程序控制器不但具有逻辑运算、顺序控制、定时以及计数等功能，而且还具有体积小、成本低、可靠性高等优点。所以可编程序控制器在工厂自动化领域中的应用迅速发展起来，目前已成为自动化领域的三大支柱之一。

#### 1. 可编程序控制器的组成

继电器—接触器控制系统由三部分组成：输入部分、逻辑部分和输出部分，如图 4-28 所示。输入部分是各种开关信号；逻辑部分是由继电器、接触器的各触点组成的逻辑关系；输出部分是各种执行元件，如继电器线圈、接触器线圈、电磁铁、指示灯以及照明灯等。

可编程序控制器也是由这几部分组成的，如图 4-29 所示，它一般由微处理器、存储器、编程器、输入/输出组件以及电源等几部分组成。

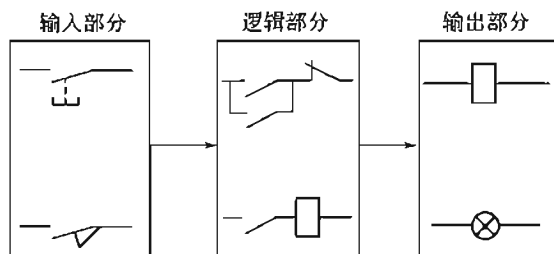


图 4-28 继电器—接触器控制系统

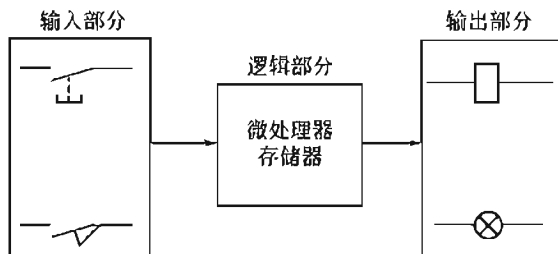


图 4-29 PLC 控制系统

#### (1) 微处理器

微处理器简称 CPU，是 PLC 的大脑，其主要作用是接收并存储从编程器输入的用户程序和数据，诊断编程过程中的错误，对输入信号做出正确判断并将结果输送给有关部分。

#### (2) 存储器

存储器是 PLC 的记忆装置，包括系统存储器和用户存储器。系统存储器用以存储系统工作程序（监控程序）、模块化应用功能子程序、命令解释、功能子程序的调用管理程序及按对应定义（I/O，内部继电器、定时器、计数器等）存储系统参数等。系统程序应永久保存在 PLC 内，不能因关机、停电或故障而改变其内容。因此这部分程序关系到 PLC 的性能，在出厂前已固化，用户不能改变。用户存储器用来存放编程器或磁带输入的用户控制程序。用户控制程序可以根据需要通过编程器进行修改。PLC 的用户存储器通常以“字节”（16 位/字）为单位来表示存储量。PLC 产品说明书中所指的存储器的型式或存储方式及容量是对用户程序存储器而言的。

#### (3) 编程器

编程器是用于用户控制程序的编制、编辑、调试和监视的。它可以监视 PLC 的工作情况，还可以通过键盘调用和显示 PLC 的一些内部状态和系统参数。

#### (4) 输入/输出组件

输入/输出组件是可编程序控制器与被控设备连接的部件，包括输入组件和输出组件。输入组件能接收被控设备的信号，如按钮、行程开关以及各种传感器的信号等，这些信号通过输入电路驱动内部电路接通或断开。输出组件把微处理器内部的电路信号转换成继电器的通断来控制外部负载（如线圈、电磁阀和指示灯等）电路。

#### (5) 电源部件

电源部件将外接的交流电源转换成 PLC 工作所需要的直流电源。电源的好坏直接影响着 PLC 的功能和可靠性。所用电源除外接交流电源外还采用电池作停电时的后备电源。

### 2. 可编程序控制器的基本工作过程

PLC 对用户控制程序的执行过程是通过微处理器的周期循环扫描来实现的，它采用集中采样、集中输出的工作方式，以减小外界的干扰。

PLC 的工作过程分为输入处理、程序处理以及输出处理三个阶段，如图 4-30 所示。

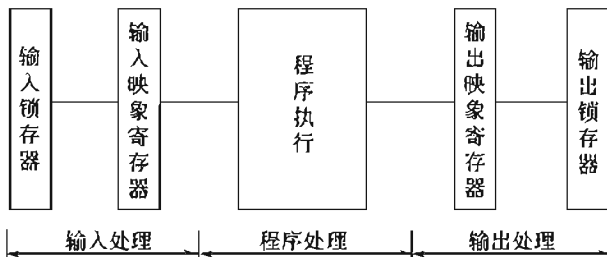


图 4-30 PLC 的工作过程

#### (1) 输入处理阶段

PLC 在此阶段扫描所有的输入端并将各输入信号存入输入状态映象寄存器中，然后进入程序处理阶段。应当注意，在程序执行阶段或输出阶段，无论输入信号如何变化，其内容将一直保持到下一个扫描周期的输入处理阶段。

#### (2) 程序处理阶段

根据 PLC 梯形图程序的扫描顺序（从左到右，从上到下）逐句扫描。最后将运算结果写入寄存器状态表中。

#### (3) 输出处理阶段

当所有指令都处理完成时，把输出映象寄存器中所有输出继电器以通（1）、断（0）的状态存放到输出锁存电路，来驱动继电器线圈控制负载的动作。微处理器返回到初始状态，准备进行下一次的循环扫描。从读入输入状态到发出输出信号的这段时间称扫描周期。

### 3. 可编程序控制器与继电器控制的异同

在 PLC 的编程语言中，梯形图是应用最广泛的一种语言。PLC 的梯形图和继电器控制的电路图在以下三个方面十分相似：元件符号相似（见图 4-31）；电路结构形式大致相同（见图 4-32）；信号输入及经过处理后的信息输出控制功能相同。

它们的不同之处在于：

① 组成的器件不同。继电器电路是由许多接触器、继电器组成的，其触点易磨损。梯形图则是由许多“软继电器”组成，每个“软继电器”都是存储器中的一位触发器，可以置“0”或“1”，无磨损现象。

② 触点数量不同。继电器的触点是有限的，而梯形图控制中“软继电器”的触点是无限

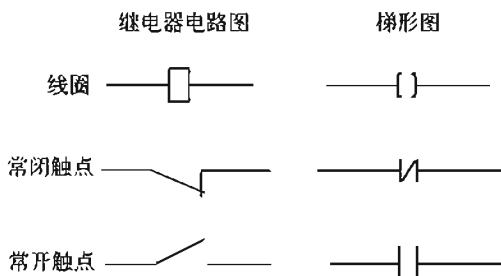


图 4-31 电路图和梯形图元件的符号

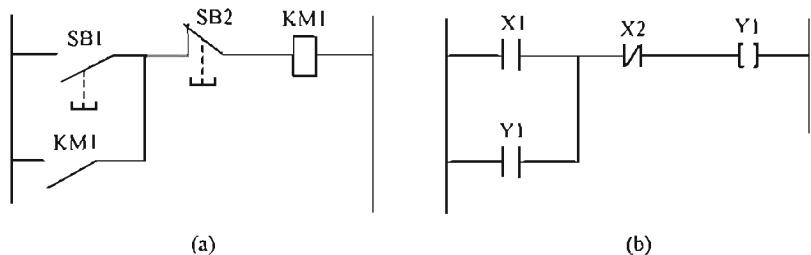


图 4-32 电路图和梯形图的结构

限的，因为在存储器中的触发器状态（电平）可以使用任意次。

③ 工作方式不同。在继电器控制电路中，电源接通时电路中各继电器、接触器都处于受约束状态（即接触器、继电器该吸合的吸合，不该吸合的不吸合）。而在 PLC 的梯形图控制中各种“软继电器”都处于周期循环扫描接通中，每个继电器受条件的制约。

#### 4.6.2 可编程序控制器的特点

PLC 是为了替代继电器—接触器控制电路而研制的。由于其控制功能是通过存储器中的程序来实现的，所以它在许多方面都已远远超过了继电器—接触器控制电路的范围。与继电器—接触器控制系统比较，PLC 具有以下特点：

① 可靠性高、抗干扰能力强。工业生产一般对控制设备的可靠性要求较高，应能在恶劣环境中可靠地工作。因此 PLC 尤在硬件上采用了屏蔽、滤波、隔离、电源调整与保护等硬件保护措施；在软件上采用了定期检测、信息保护和恢复等软件保护措施。另外，PLC 采用的模块式结构有助于在故障情况下短时修复，这就保证了 PLC 工作的可靠性和稳定性。

② 程序简单、灵活、可变。PLC 采用的梯形图和继电器电路图很相似，简单易学，便于推广。在生产设备更新的情况下，不需要改变 PLC 的硬件设备，只要改编程序就可达到所要求。

③ 通用性好、功能完善。根据工业控制特点，PLC 都制成模块式，可以灵活组合，以便用于各种工业控制系统中。PLC 的控制精度高，处理速度快，具有数字量和模拟量输入/输出、逻辑运算、定时、计数控制功能，同时还具有人机对话、通信、自检、记录及显示等功能。

④ 体积小、质量轻、适应环境能力强。PLC 能适应各种工业环境，能在温度高、振动大、粉尘多的场合工作，而且体积小、能耗低，是实现“机电一体化”的理想控制设备。

#### 4.6.3 可编程序控制器的指令系统

PLC 是以微处理器为核心的电子设备。使用时可将其看成是由继电器、定时器以及计

数器等器件构成的组合体。这些器件无论是实际器件还是“软继电器”，都必须用不同的编号加以区分，其状态存放在指定地址的内存单元中，供编程时调用。不同型号的 PLC 有不同的编号方式。

1. 可编程序控制器的软继电器及其编号

FP1 系列 PLC 编号范围及功能如下：

(1) 输入继电器

输入继电器用来接收外部开关发出的信号。它与 PLC 的输入端相连，并带有许多常开、常闭触点供编程时使用。输入继电器只能由外部信号来驱动，不能被程序内部指令来驱动。

输入继电器的字母代号为“X”，“X”后跟十六进制数（0～F），其编号范围为 X0～XF，共 16 点。

(2) 输出继电器

输出继电器是 PLC 用来传递信号的外部负载的器件。它通过输出接线端与被控电器（如接触器、电磁阀以及指示灯等）相连。输出继电器有一个外部输出的常开触点，它是按程序执行的结果而被驱动的。

输出继电器的字母代号为“Y”，其编号范围为 Y0～Y7，共 8 点。

(3) 内部继电器

内部继电器不能直接驱动外设备，它可由 PLC 中各种电器的触点驱动，内部继电器有许多常开、常闭触点供用户编程使用。

内部继电器的字母代号为“R”，其编号范围为 R0～R62F，共 1008 点。

(4) 定时器

定时器是延时定时继电器，其触点是定时指令的输出。如果定时器指令定时时间完毕，则与其同号的触点动作。其字母代号为“T”，其编号范围为 T0～T99，共 100 点。

(5) 计数器

计数器是减法继电器，其触点是计数指令的输出。如果计数器指令计数完毕，则与其同号的触点动作。其字母代号为“C”，其编号范围为 C100～C143，共 44 点。

(6) 通用“字”寄存器

每个通用“字”寄存器由相应的 16 个辅助继电器 R 构成。其字母代号为“WR”其编号范围为 WR0～WR62，共 63 点。

2. 可编程序控制器的指令系统

PLC 是按用户控制要求编写的程序来进行工作的。程序的编制就是用一定的编程语言、把一个控制过程描述出来。程序基本上是用梯形图和指令两种方式来描述的，梯形图和指令的表达方式如图 4-33 所示。

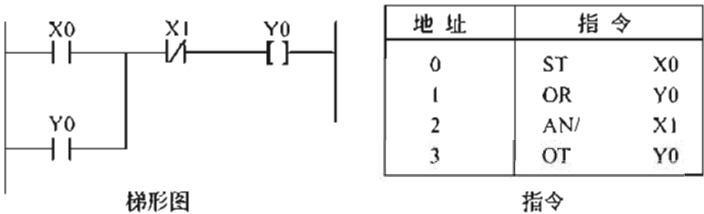


图 4-33 梯形图和指令

梯形图是一种图形语言，它与继电器电路很相似，形象直观，容易接受，是 PLC 首选的编程语言。指令就是采用功能名称的英文缩写字母来表达 PLC 各种功能的命令。

下面介绍指令的用法及说明。

(1) ST、ST/、OT、ED 指令

ST (Start)：常开触点与母线连接指令。

ST/(Start not)：常闭触点与母线连接指令。

OT (Out)：线圈驱动指令。

ED (End)：程序结束指令，是程序的最后一条指令。

这几条指令与梯形图配合应用的例子如图 4-34 所示。

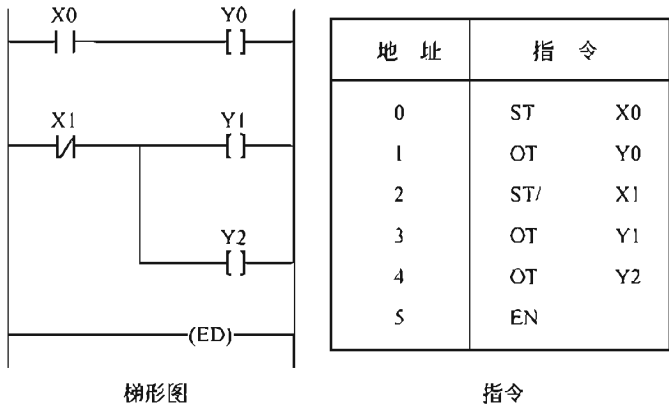


图 4-34 ST、ST/、OT、ED 的使用

使用说明：

① 在每一条逻辑行的开始总要使用 ST 或 ST/指令，当逻辑行的开始为常开触点时使用 ST 指令；当逻辑行的开始为常闭触点时，则使用 ST/指令。

② 内部继电器并联时可以连续使用 OT 指令。OT 指令不能用于输入继电器 X0。

③ ED 指令无使用元件。

(2) AN、AN/、OR、OR/指令

AN (And)：串联常开触点指令。

AN/(And not)：串联常闭触点指令。

OR (Or)：并联常开触点指令。

OR/(Or not)：并联常闭触点指令。

这几条指令与梯形图配合应用的举例如图 4-35 所示。

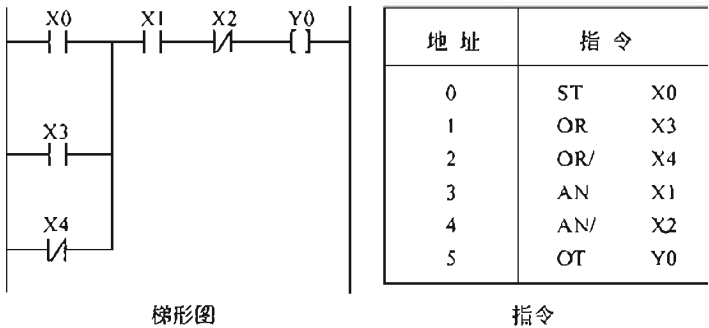


图 4-35 AN、AN/、OR、OR/的使用

使用说明：

- ① AN、AN/用于串联一个常开、常闭触点，串联触点的数量不限。
- ② OR、OR/用于并联一个常开、常闭触点，并联触点的数量不限。
- ③ 这几条指令使用的元件为 X、Y、R、T 和 C。

(3) ANS、ORS 指令

ANS (And stack)：把两个并联的触点组串联。

ORS (Or stack)：把两个串联的触点组并联。

这两条指令用于复杂电路的编程。梯形图和指令应用举例如图 4-36、图 4-37 所示。

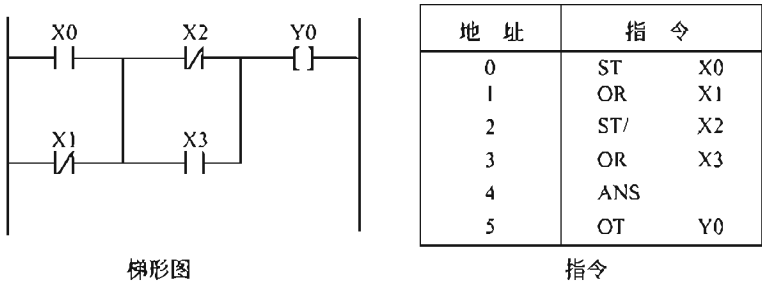


图 4-36 ANS 的使用

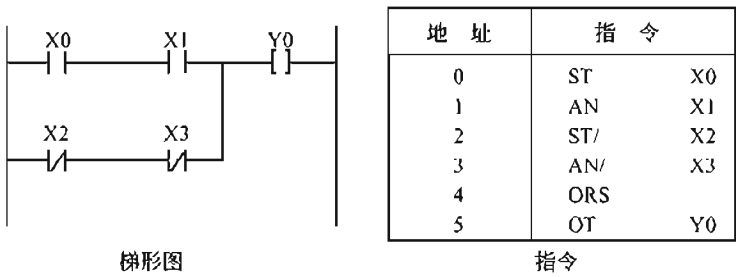


图 4-37 ORS 的使用

使用说明：

- ① 每个触点组的开头均使用 ST 或 ST/指令。
- ② 若有多个触点串联或并联，顺次以 ANS 或 ORS 指令与前面电路连接，连接组数不限。
- ③ ANS、ORS 指令均无使用元件。

(4) TM、CT 指令

当需要定时和计数时，应使用 TM 和 CT 指令。

TM (Timer)：实现导通延时操作的定时指令。定时指令分三种类型：①TMR 定时时间为 0.01s；②TMX 定时时间为 0.1s；③TMY 定时时间为 1s。

CT (Counter)：实现计数功能的指令。

梯形图和指令应用举例如图 4-38、图 4-39 所示。

图 4-38 中“2”为定时器编号，“100”为定时设置值。定时时间设置值等于定时单位与定时设置值的乘积，因此定时时间为  $0.1 \times 100 = 10s$ 。图 4-39 中“120”为计数器编号，“4”为计数设置值。它有两个输入端：计数脉冲端 (C 端)、复位端 (R 端)。

使用说明：

- ① 定时设置值可为 K0~K32767 内的任意一个十进制常数。定时器为减 1 计数，即每

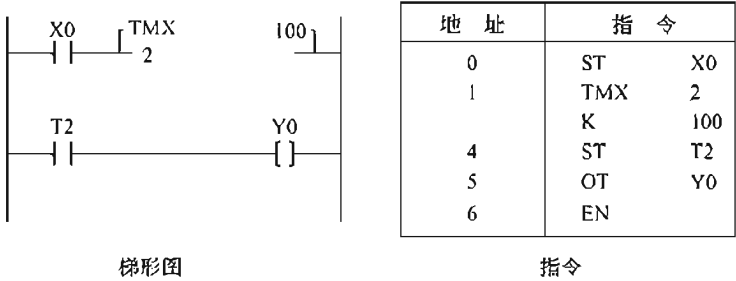


图 4-38 TM 的使用

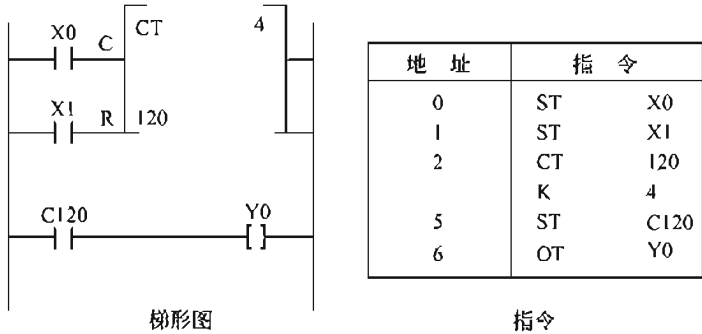


图 4-39 CT 的使用

来一个时钟脉冲则定时设置值逐次减 1，直至为零时，定时器才产生输出。输入端断开时，定时器立即复位，其数据返回到设置值。

② 计数设置值为 K0~K32767 内的任意一个十进制常数。计数器为减 1 计数，即每来一个时钟脉冲则计数设置值逐次减 1，直至为零时，计数器才产生输出。当 R 端接通时计数器复位。

③ 每条 TMR、TMX 和 CT 各占三个地址号，TMY 占四个地址号。

(5) PSHS、RDS、POPS 指令

PSHS、RDS、POPS 指令为堆栈指令，是用来对具有分支的梯形图进行编程的一组指令。PSHS (Push stack) 为推入堆栈指令，即将在该指令以前的运算结果存储起来。

RDS (Read stack) 为读出堆栈指令，读出由 PSHS 指令存储的运算结果。POPS (Pop stack) 为弹出堆栈指令，读出并清除由 PSHS 指令存储的结果。

梯形图和指令应用举例如图 4-40 所示。

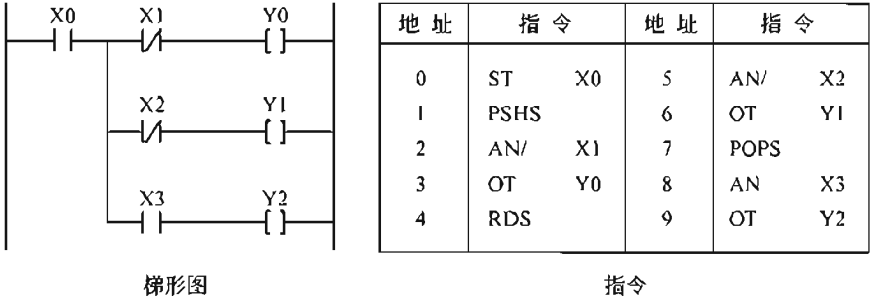


图 4-40 PSHS、RDS、POPS 的使用

使用说明：

① 堆栈指令是一种组合指令，不能单独使用。



- ② PSHS 和 POPS 分别用于分支的开始和最后，只能各用一次。
- ③ RDS 用于 PSHS 和 POPS 之间，可以多次使用。
- ④ 堆栈指令无使用元件。

(6) DF、DF/指令

DF、DF/是微分指令，是把一个长信号变为脉冲式的断信号。

DF：当脉冲信号的上升沿来到时，线圈接通一个扫描周期。

DF/：当脉冲信号的下降沿来到时，线圈接通一个扫描周期。功能图、梯形图和指令应用举例如图 4-41 所示。

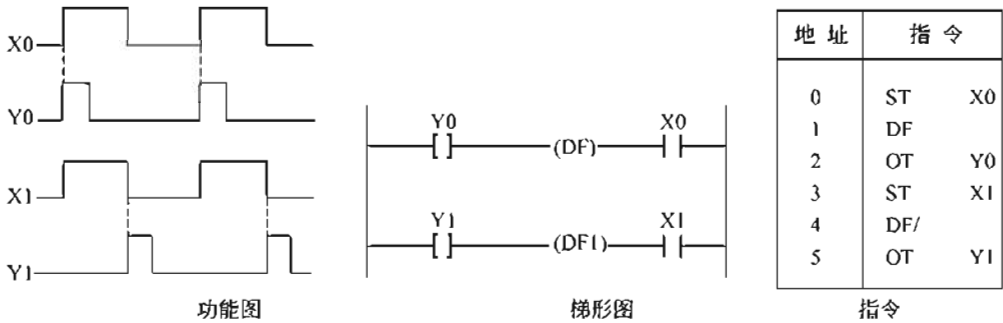


图 4-41 DF、DF/的使用

使用说明：

- ① 这两条指令没有使用次数的限制。
- ② 这两条指令均无使用元件。
- ③ 所产生的输出脉冲的宽度为一个扫描周期。

(7) KP 指令

KP (Keep) 为保持指令，其功能是把一个短信号变成长信号。功能图、梯形图和指令应用举例如图 4-42 所示。

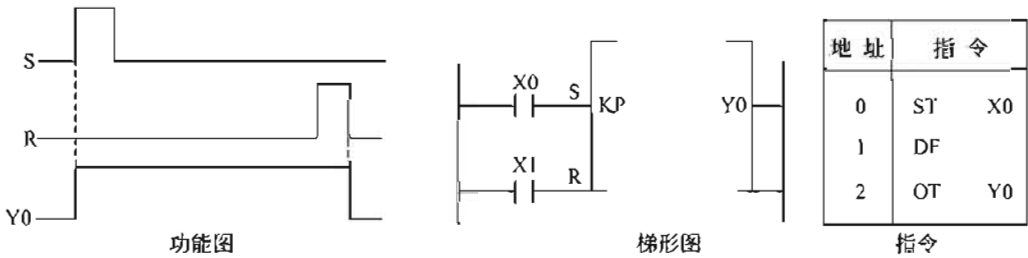


图 4-42 KP 的使用

使用说明：

- ① R 端为复位端。当 R 端和 S 端同时接通时，R 端优先。
- ② 本指令使用的元件为 T 和 R。

(8) SR 指令

SR (Shift register) 为移位指令，其功能是实现内部移位寄存器 WR 中的数据移位。梯形图和指令应用举例如图 4-43 所示。

使用说明：

- ① SR 的输入端有三个输入端，按数据输入 (IN) 端、位移脉冲输入 (C) 端和复位输

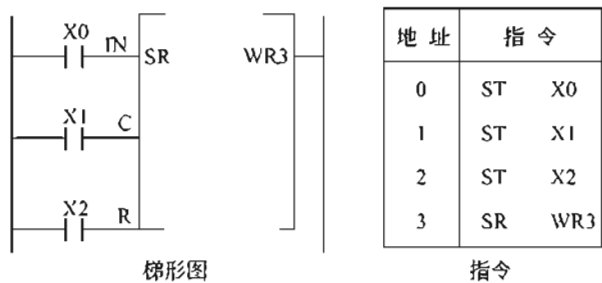


图 4-43 SR 的使用

入 (R) 端的次序排列, 以复位输入优先。

② SR 指令的使用元件为 WR。

4.6.4 可编程序控制器的编程方法和举例

学了指令系统后, 便可根据系统的控制要求来编制程序。下面先介绍编程的基本原则和技巧。

1. 编程的基本原则

- ① 梯形图每一逻辑行的触点应画在线圈左边, 线圈右边不能有触点。
- ② 线圈不能直接与左侧的母线相连。如果需要连接时, 可以通过一个没有使用的内部继电器的常闭触点来连接。
- ③ 梯形图必须按顺序执行, 即从左到右, 从上到下执行。
- ④ 在梯形图中串联触点和并联触点的数目无限, 可以多次使用。

2. 编程技巧

① 几个串联支路并联时, 串联触点多的支路要画在上面, 如图 4-44 所示, 图 4-44(a) 的结构比图 4-44(b) 的好。几个并联支路串联时, 并联触点多的电路要画在左边, 如图 4-45 所示。图 4-45(a) 的结构比图 4-45(b) 的要好。

② 并联线圈电路, 从分支点到线圈之间, 无触点的分支应放在上方, 如图 4-46 所示。

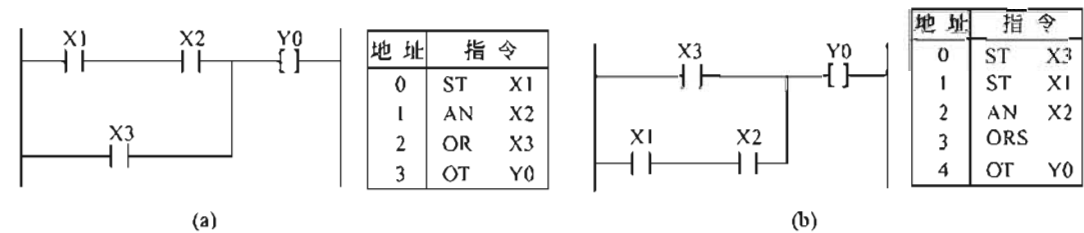


图 4-44 串联支路并联时的画法

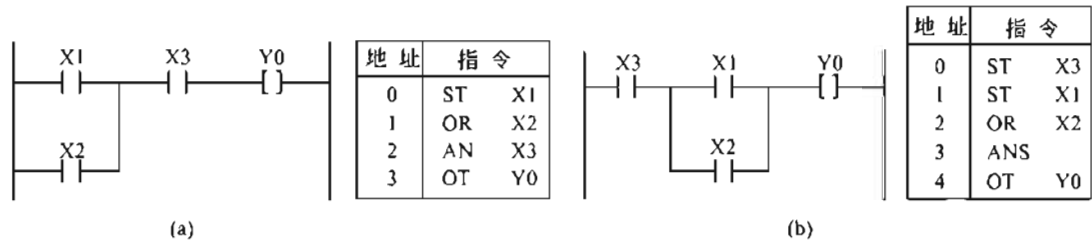


图 4-45 串联支路并联时的画法

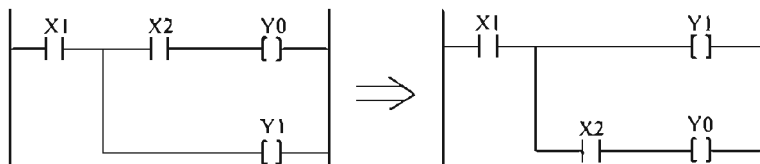


图 4-46 并联线圈电路

③ 对有电流交叉的电路编程时，梯形图中不允许出现电流交叉电路，如图 4-47(a) 所示，不能对它直接编程，必须重新绘制，如图 4-47(b) 所示。

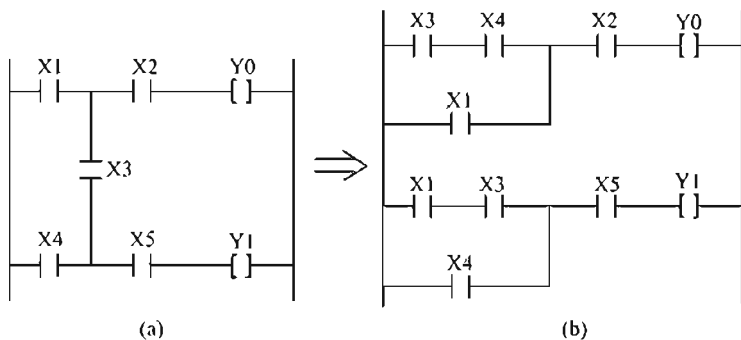


图 4-47 有电流交叉的电路编程

④ 复杂电路的处理。电路比较复杂不便于编程时，可重复使用一些触点，画出等效电路，然后再进行编程，如图 4-48 所示。

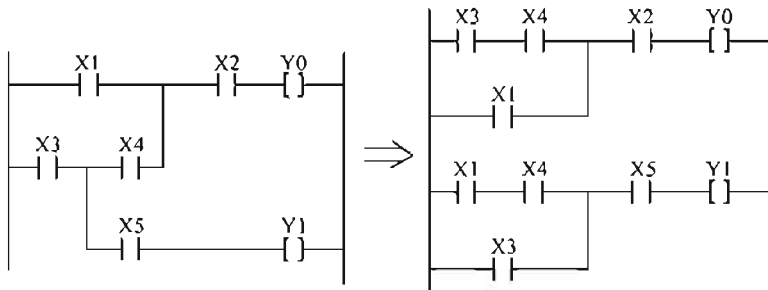


图 4-48 复杂电路的处理

### 3. 编程举例（电动机的控制）

如图 4-49 所示为一个控制三相笼型异步电动机的主电路。起动时使接触器 KM1，KM2 线圈通电，其常开触点闭合，电动机按 Y 联结；电动机起动后，通过时间继电器控制，使 KM1 线圈断电，KM3 线圈通电，电动机按 Δ 联结，达到 Y-Δ 降压起动的目的。

输入、输出元件与 PLC 数据对照关系见表 4-2。

设计的梯形图如图 4-50 所示。按下起动按钮 SB1，PLC 输入继电器 X1 常开触点闭合，输出继电器 Y1 接通。随之输出继电器 Y2 接通，Y1 的常闭触点断开，保证了输出继电器 Y3 不接通，Y2 的两个常开触点闭合，保证了输出继电器 Y2 继续通电。此时，接触器 KM1 和 KM2 通电，电动机按 Y 连接。同时定时器 TO 的线圈接通，开始计时。5s 后，TO 的常闭触点断开，输出继电器 Y1 断电，Y1 的常闭触点复位，使输出继电器 Y3 通电。此时接触器 KM1 和 KM3 通电，电动机按 Δ 联结。电动机进入正常运转状态。

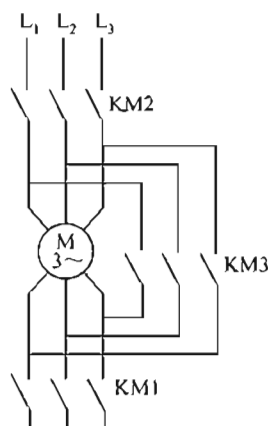


图 4-49 Y-Δ降压启动的主电路

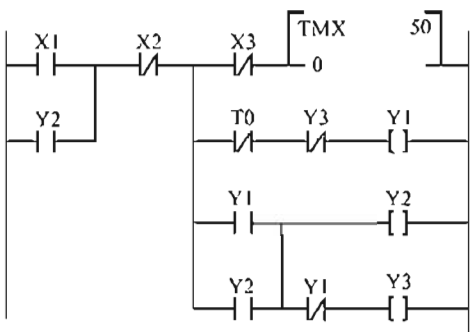


图 4-50 Y-Δ降压启动的梯形图

表 4-2 输入、输出元件与 PLC 数据对照

输 入		输 出	
按钮	PLC 数据	接触器	PLC 数据
SB1	X1	KM1	Y1
SB2	X2	KM2	Y2
		KM3	Y3

## 本章小结

本章介绍了常用低压电器的功能及在电路中的符号。在控制电路方面，着重介绍了单向控制电路、点动控制电路、时间控制电路、两地控制电路以及多地控制电路等；另外还介绍了 Y-Δ 降压启动电路；机械制动、反接制动电路；C620-1 型普通车床控制电路。可编程控制一节作为参考阅读内容。

## 练 习 题

- 熔断器是由哪几部分组成的？熔断器在电路中如何连接？
- 熔断器的作用是什么？热继电器的作用是什么？
- 接触器是如何工作的？
- 速度继电器触点的动作与电动机的转速有何关系？
- 自动开关是哪几种元件的组合？它在电路中具有哪些保护功能？
- 何谓点动控制？图 4-51 所示的判断图图中哪些能实现点动控制？若不能，电路会出现什么现象？
- 何谓自锁？图 4-52 所示的判断图图中各分图能否实现自锁控制？若不能，会出现什么现象？
- 指出图 4-53 所示正反转电路错误之处，并改正。
- 试绘出既有点动控制又有连续运转的控制电路。
- 有三台电动机，均为单向运行，对其运转要求是：第一台启动后，第二台才能启动；第二台启动后，第三台才能启动。电路应有过载和保护环节。试绘出这三台电动机的顺序启动的控制电路。
- 某机床的主轴和冷却泵分别由三相笼型异步电动机来拖动。主轴电动机要求正、反转运行，而冷却泵电动机只要求单向运行，且要求主轴电动机启动后，冷却泵电动机才可启动，电路应具有必要的保护环节。试绘出其控制电路图。

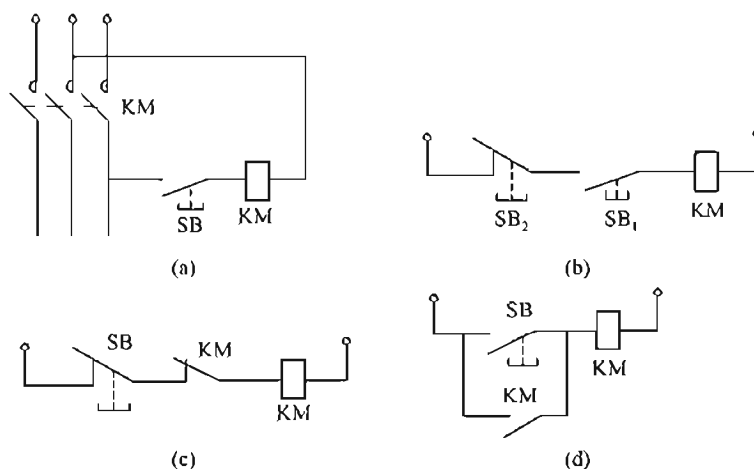


圖 4-51 題 4.6 圖

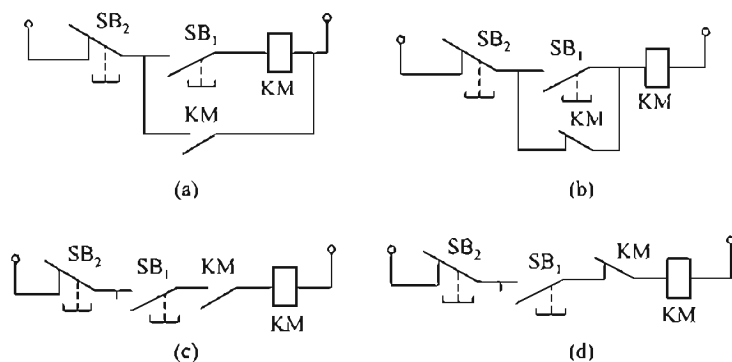


圖 4-52 題 4.7 圖

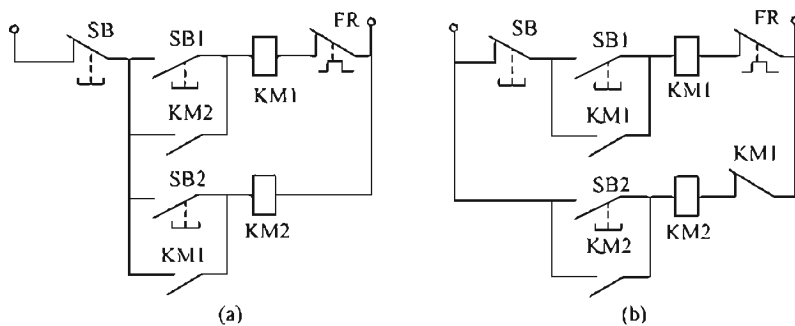


圖 4-53 題 4.8 圖

4.12 根据图 4-54 所示写出其控制指令。

4.13 有两台电动机 M1 和 M2。要求 M1 起动 5s 后 M2 才起动，两台电动机同时停止。试编制用 PLC 控制的梯形图。

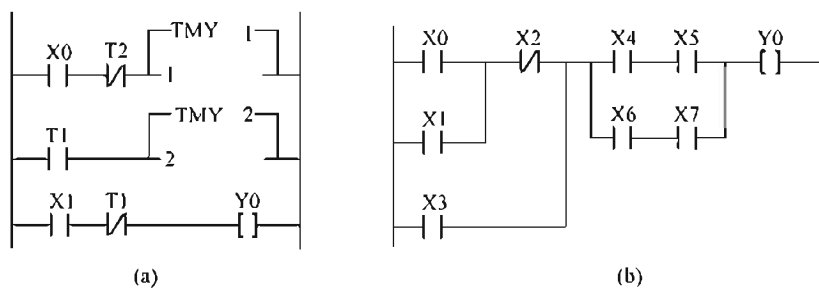


圖 4-54 題 4.12 圖

4.14 将表 4-3 所列控制指令转换成梯形图。

表 4-3 控制指令

地 址	指 令	地 址	指 令
0	ST X2	0	ST X2
1	AN/ X3	1	ST/ X3
2	AN X4	2	AN X4
3	ST X2	3	ST X5
4	AN X5	4	AN X6
5	AN/ X6	5	ST X7
6	AN X7	6	ST X8
7	ST X2	7	AN/ X9
8	AN X5	8	ORS
9	AN X6	9	ANS
10	AN X8	10	ORS
11	AN/ X9	11	ANS
12	ORS	12	OT Y0
13	ORS		
14	OT Y0		

- 4.15 一个十字路口交通信号灯的显示颜色要求如下，试用 PLC 设计其控制梯形图，要求：
- (1) 起动后，南北红灯亮，东西绿灯亮；
  - (2) 南北红灯亮 30s、东西绿灯亮 25s 后，绿灯每 1s 闪亮一次，闪亮三次之后熄灭，接着，黄灯亮 2s 后熄灭；
  - (3) 黄灯熄灭之后，东西改为红灯亮 30s、南北绿灯亮 25s 之后，绿灯每 1s 闪亮一次，闪亮三次之后熄灭，接着，黄灯亮 2s 后熄灭。
- 按上述过程不断循环。

## 第 5 章 二极管及直流稳压电源

【内容提要】本章主要介绍半导体二极管的单向导电特性及其主要参数；分析直流稳压电源的工作原理及其工作过程。

### 5.1 二 极 管

导电能力介于导体与绝缘体之间的物质称为半导体。自然界中不同的物质，由于其原子结构不同，因而其导电能力也各不相同。根据导电能力的强弱。可以把物质分成导体、半导体和绝缘体。半导体的导电能力介于导体和绝缘体之间，如硅、锗、砷化镓以及金属氧化物和硫化物等都是半导体。

半导体器件是组成电子设备的基本部件。较常用的有二极管（用于整流）、三极管（用于放大）和集成电路（用于开关和放大）。

#### 5.1.1 半导体的特性

##### 1. 热敏性

半导体对温度很敏感。例如纯锗，温度每升高  $10^{\circ}\text{C}$ ，其电阻率就会减小到原来的一半左右。由于半导体的电阻对温度变化的反应灵敏，而且大都具有负的电阻温度系数，所以人们就把它制成了各种自动控制装置中常用的热敏电阻传感器和能迅速测量物体温度变化的半导体点温计等。

##### 2. 光敏性

与金属不同，半导体对光和其他射线都很敏感。例如一种硫化镉半导体材料，在没有光照射时，电阻高达几十兆欧；受到光照射时，电阻可降到几十千欧，两者相差上千倍。利用半导体的这种光敏特性可以制成光敏电阻、光电二极管、光电三极管以及太阳能电池等。

##### 3. 掺杂性

半导体对杂质很敏感。在纯净半导体中掺进微量的某种杂质，对其导电性能影响极大。例如，在纯净硅中掺入百万分之一的硼，可使其导电能力增加几十万倍以上。

#### 5.1.2 价电子与半导体的共价键结构

##### 1. 价电子

自然界的一切物质都是由原子组成的，而原子又是由一个带正电的原子核与若干个带负电的电子所组成的。电子分层围绕原子核作不停地旋转运动，其中内层的电子受原子核的吸引力较大，外层电子受原子核的吸引力较小，外层电子的自由度较大。因此外层的电子如果获得外来的能量，就容易挣脱原子核的束缚而成为“自由电子”。我们把最外层的电子称为价电子。在电子器件中，用得最多的半导体材料是硅和锗，其原子结构如图 5-1 所示。硅和锗都是四价元素，其原子最外层轨道上都具有 4 个价电子。

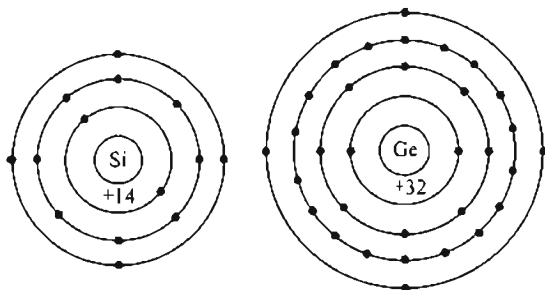


图 5-1 原子结构示意图

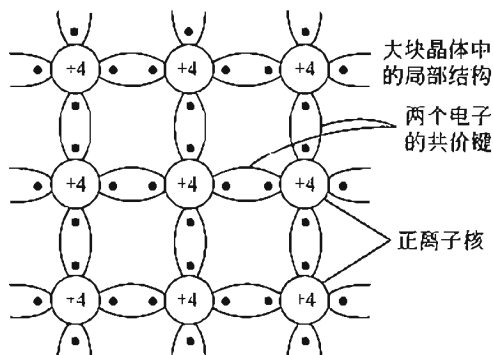


图 5-2 硅和锗的共价键结构

价电子的数目越接近 8 个，物质的化学结构也就越稳固。对于金属材料而言，其价电子一般少于 4 个，因此金属中的价电子很容易变成自由电子，所以，金属是良导体。对于单质绝缘体，其价电子数一般多于 4 个，因此绝缘体中的价电子均被原子核牢牢地吸引着，很难形成自由电子，所以不能导电。对于半导体来说，原子的价电子数为 4 个，其原子的外层电子既不像金属的那样容易挣脱出来，也不像绝缘体的那样被原子核紧紧束缚住，因此半导体的导电性能就比较特殊。

## 2. 半导体的共价键结构

半导体一般都是晶体结构，最常见的半导体材料是硅和锗。当硅或锗被制成单晶体时，其原子有序排列，每个原子最外层的 4 个价电子不仅受自身原子核的束缚，而且还与周围相邻的 4 个原子发生联系。这时，每两个相邻原子之间都共用一对电子，使相邻两原子紧密地连在一起，形成共价键结构，如图 5-2 所示。

### 5.1.3 本征半导体

完全纯净的、结构完整的半导体，称为本征半导体。

本征半导体在温度升高或受到光线照射时，其共价键中的价电子就从外界获得能量。由于半导体原子外层的电子不像绝缘体那样被原子核紧紧地束缚着，因此少量的价电子在获得足够能量后，会挣脱原子核的束缚而成为自由电子，同时在原来共价键上留下了相同数量的空位，这种现象称为本征激发。在本征半导体中，每激发出来一个自由电子，就必然在共价键上留下一空位，该空位称为空穴，由于空穴失去电子，因而带正电。可见自由电子和空穴总是成对出现的，我们称之为电子-空穴对，如图 5-3 所示。在产生电子-空穴对的同时，有的自由电子在杂乱的热运动中又会不断地与空穴相遇，重新结合，使电子-空穴对消失，

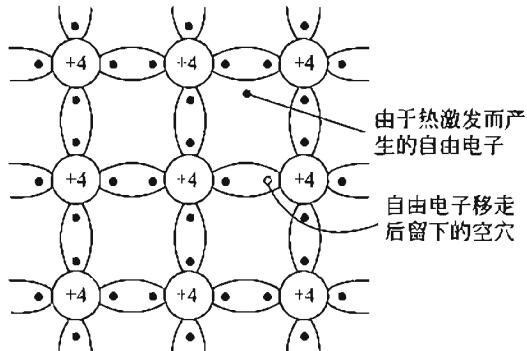


图 5-3 电子-空穴对

这称为复合。在一定温度下载流子的产生过程和复合过程是相对平衡的，即载流子的浓度是一定的。在常温下，本征半导体受热激发所产生的自由电子和空穴数量很少，同时本征半导体的导电能力远小于导体的导电能力，导电能力很差。温度越高，所产生的电子-空穴对越多，半导体的导电能力也就越强。

在外电场的作用下，一方面自由电子产生定向移动，形成电子电流；另一方面价电子也按一



定方向依次填补空穴，即空穴产生移动，形成空穴电流。由于电子和空穴所带电荷的极性相反，其运动方向也是相反的，因此形成的电流方向是一致的，流过外电路的电流等于两者之和。

综上所述，在半导体中不仅有自由电子一种载流子，而且还有另一种载流子—空穴。这是半导体导电的一个重要特性。在本征半导体内，自由电子和空穴总是成对出现的，也就是说，有一个自由电子就必定有一个空穴，因此在任何时候，本征半导体中的自由电子数和空穴数总是相等的。

#### 5.1.4 掺杂半导体

本征半导体中虽然存在两种载流子，但因本征半导体内载流子的浓度很低，所以导电能力很差。在本征半导体中，有目的地掺入某种微量杂质，即可大大改变其导电性能。按照掺入杂质的不同，可获得 N 型和 P 型两种掺杂半导体。

##### 1. P 型半导体

在本征半导体（硅或锗的晶体）中掺入三价元素杂质，如硼、镓、铟等，因杂质原子的最外层只有 3 个价电子，与周围硅（锗）原子组成共价键时，缺少一个电子，于是在晶体中便产生一个空穴。当相邻共价键上的电子受到热振动或在其他激发条件下获得能量时，就有可能填补这个空穴，使硼原子成为不能移动的负离子，而原来硅原子的共价键则因缺少一个电子，形成空穴，如图 5-4 所示。这样，掺入硼杂质的硅半导体中就具有数量相当的空穴，空穴浓度远大于电子浓度，这种半导体主要靠空穴导电，称为 P 型半导体。

掺入的三价杂质原子，因在硅晶体中接受电子，故称受主杂质。受主杂质都变成了负离子，它们被固定在晶格中不能移动，也不参与导电，如图 5-5 所示。此外，在 P 型半导体中由于热运动还产生少量的电子-空穴对。总之，在 P 型半导体中，不但有数量很多的空穴，而且还有少量的自由电子存在，空穴是多数载流子，电子是少数载流子。

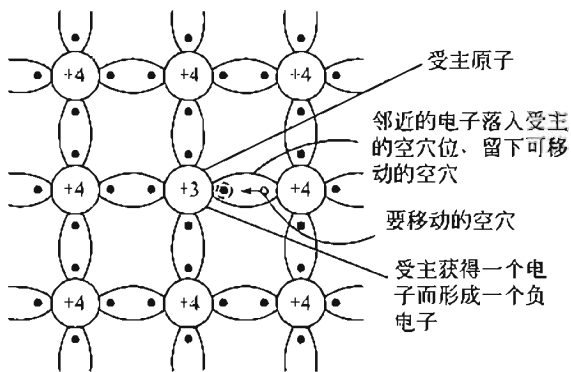


图 5-4 P 型半导体的共价键结构

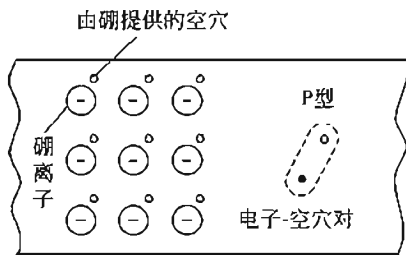


图 5-5 P 型半导体平面模型

##### 2. N 型半导体

在本征半导体中掺入五价元素杂质，如磷、锑、砷等。掺入的磷原子取代了某处硅原子的位置，它同相邻的 4 个硅原子组成共价键时，多出了一个电子，这个电子不受共价键的束缚，因此在常温下有足够的能量使其成为自由电子，如图 5-6 所示。这样，掺入杂质的硅半导体就具有相当数量的自由电子，且自由电子的浓度远大于空穴的浓度。显然，这种掺杂半导体主要靠电子导电，称为 N 型半导体。

由于掺入的五价杂质原子可提供自由电子，故称为施主杂质。每个施主原子给出一个自

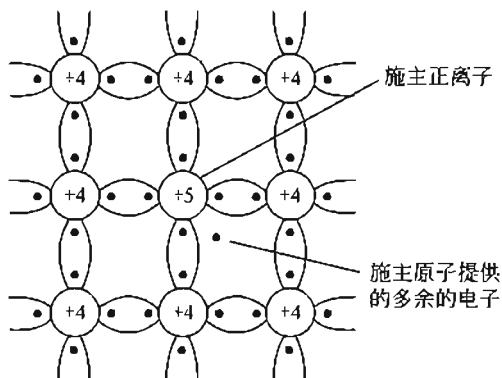


图 5-6 N 型半导体的共价键结构图

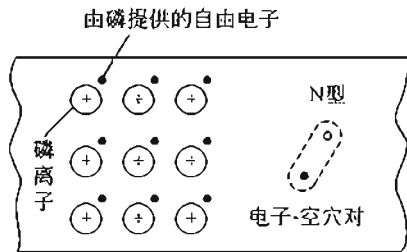


图 5-7 N 型半导体平面模型

由电子后都带上一个正电荷，因此杂质原子都变成正离子，它们被固定在晶格中不能移动，也不参与导电，如图 5-7 所示。此外，在 N 型半导体中热运动也会产生少量的电子-空穴对。总之，在 N 型半导体中，不但有数量很多的自由电子，而且也有少量的空穴存在，自由电子是多数载流子，空穴是少数载流子。必须指出，虽然 N 型半导体中有大量带负电的自由电子，P 型半导体中有大是带正电的空穴，但是由于带有相反极性电荷的杂质离子的平衡作用，无论 N 型半导体还是 P 型半导体，其对外表现都是电中性的。

## 5.2 PN 结及其特性

单纯的 P 型或 N 型半导体仅仅是导电能力增强了，但还不具备半导体器件所要求的各种特性。如果把一块 P 型半导体和一块 N 型半导体结合在一起，则在交界处就会形成 PN 结，这是构成各种半导体器件的基础。下面着重讨论 PN 结的形成及其特性。

### 5.2.1 PN 结的形成

当 P 型半导体和 N 型半导体通过一定的工艺结合在起时。由于 P 型半导体的空穴浓度高，自由电子浓度低，而 N 型半导体的自由电子浓度高，空穴浓度低，所以交界面附近两侧的载流子形成了浓度差。浓度差将引起载流子的扩散运动，如图 5-8(a) 所示。有些电子要从 N 区向 P 区扩散。并与 P 区的空穴复合，也有些空穴要从 P 区向 N 区扩散，并与 N 区的电子复合。由于电子和空穴都是带电的，因此扩散的结果就使 P 型半导体和 N 型半导体原来保持的电中性被破坏。P 区一边失去空穴，留下了带负电的杂质离子；N 区一边失去电子，留下了带正电的杂质离子。半导体中的离子虽然也带电，但由于物质结构的关系，它们

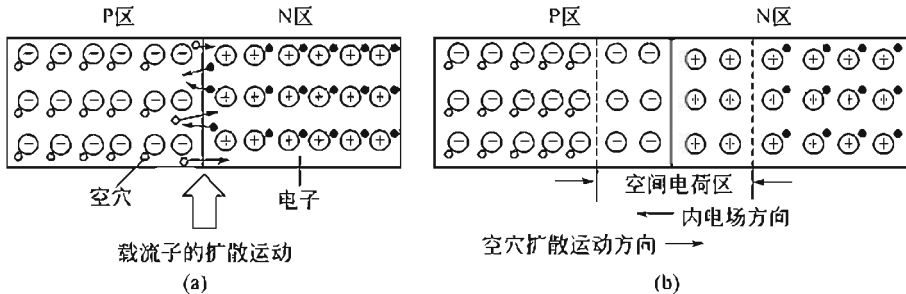


图 5-8 PN 结的形成

不能任意移动，因此并不参与导电。这些不能移动的带电粒子集中在 P 区和 N 区交界面附近，形成了一个很薄的空间电荷区，这就是 PN 结。PN 结具有阻碍载流子扩散的特性，因此又被称为阻挡层。PN 结的空间电荷区内的载流子浓度已减小到耗尽程度，因此又称为耗尽层。

空间电荷形成了一个由右侧指向左侧的内电场，如图 5-8(b) 所示。内电场的这种方向，将对载流子的运动带来两种影响：一是内电场阻碍两区多子的扩散运动；二是内电场在电场力的作用下使 P 区和 N 区的少子产生与扩散方向相反的漂移运动。

PN 结形成的最初阶段，载流子的扩散运动占优势，随着空间电荷区的建立，内电场逐渐增强，载流子的漂移运动也在加强，最终漂移运动将与扩散运动达到动态平衡。

### 5.2.2 PN 结的特性

如果在 PN 结上加正向电压（也称正向偏置），即 P 区接电源正极，N 区接电源负极，如图 5-9(a) 所示。这时电源产生的外电场与 PN 结的内电场方向相反，内电场被削弱，使阻挡层变薄，多子的扩散运动大于漂移运动，形成较大的扩散电流，即正向电流。这时 PN 结的正向电阻很低，处于正向导通状态。正向导通时，外部电源不断向半导体供给电荷。使电流得以维持。

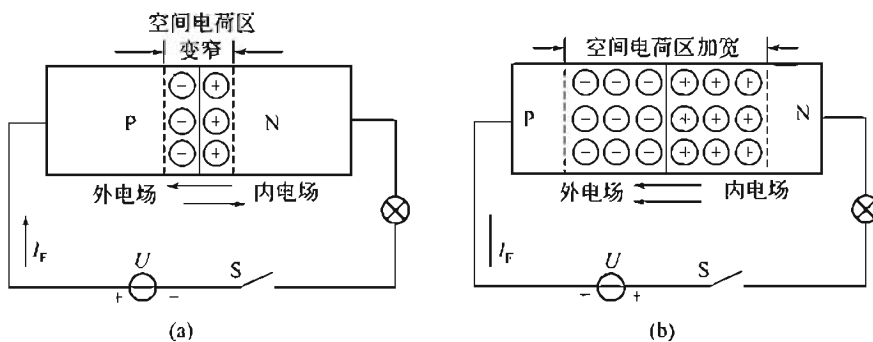


图 5-9 PN 结的单向导电性

如果给 PN 结加反向电压（也称反向偏置），即 N 区接电源正极，P 区接电源负极，如图 5-9(b) 所示，这时外电场与内电场方向一致，增强了内电场，使阻挡层变厚。这就削弱了多子的扩散运动，增强了少子的漂移运动，从而形成微小的漂移电流，即反向电流。这时 PN 结呈现的电阻很高，处于反向截止状态。反向电流由少子的漂移运动形成，少子的数量随温度升高而增多，所以温度对反向电流的影响很大，这正是半导体器件温度特性差的原因。在一定温度下，反向电流不仅很小，而且基本上不随外加反向电压变化，故称其为反向饱和电流。

由此可见，PN 结在正向电压作用下，电阻很小，PN 结导通，电流可顺利流过；而在反向电压作用下，电阻很大，PN 结截止，阻止电流通过。这种现象称作 PN 结的单向导电性。

## 5.3 半导体二极管

### 5.3.1 二极管的结构

半导体二极管是由一个 PN 结加上引出线和管壳构成的 P 型半导体一侧的引出线称为阳极或正极，N 型半导体一侧的引出线称为阴极或负极。

二极管按结构可分为点接触型和面接触型两种。点接触型二极管的结构如图 5-10(a) 所示。其特点是 PN 结的面积非常小, 因此不能通过较大电流; 但结面积小, 结电容也小, 高频性能好, 故适用于高频和小功率情况, 一般用于检波或脉冲电路, 也可用来作小电流的整流。

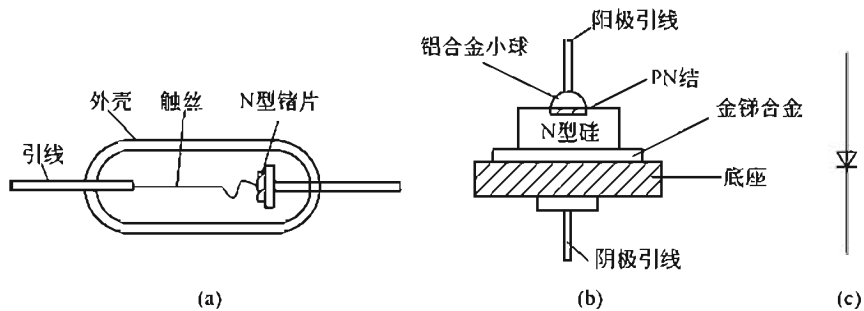


图 5-10 半导体二极管的结构和图形符号

面接触的二极管的结构如图 5-10(b) 所示, 其主要特点是 PN 结的结面积很大, 因而能通过较大的电流; 但结电容也大, 只能在较低的频率下使用, 一般用作整流。

二极管的图形符号如图 5-10(c) 所示。

### 5.3.2 二极管的伏安特性

二极管的伏安特性是表征二极管电压和电流关系的曲线。测量晶体二极管伏安特性的电路如图 5-11 所示。改变  $R_P$  的大小, 可以测出不同电压值时所对应的二极管中的电流。把所得的数据画在直角坐标系中, 就得到二极管的伏安特性曲线, 如图 5-12 所示。下面讨论二极管的伏安特性。

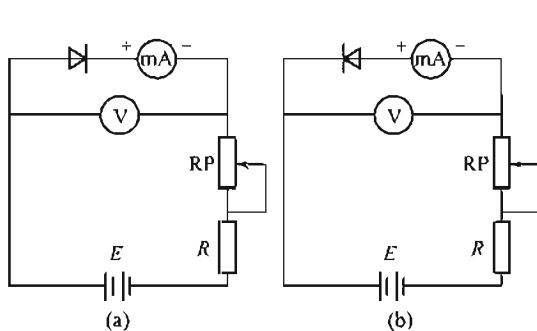


图 5-11 二极管伏安特性测试电路

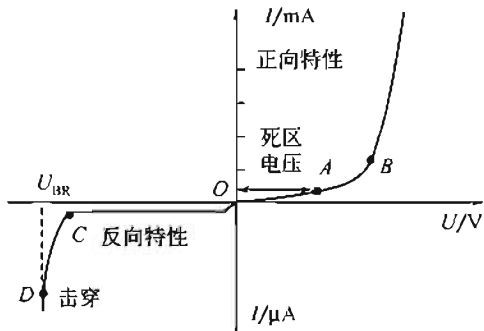


图 5-12 二极管的伏安特性

#### 1. 正向特性

##### (1) 起始段 (OA)

当二极管为正向接法时, 正向电压由 0 开始增大, 由于外加电压较小, 外电场还不足以克服 PN 结的内电场对载流子扩散运动的阻力, 所以二极管呈现很大的正向电阻, 正向电流很小, 几乎等于 0。当正向电压超过一定数值后, 内电场大为削弱, 电流迅速增长。这个一定数值的正向电压称为死区电压, 其大小与管子的材料及环境温度有关。一般硅管的死区电压为 0.5V, 锗管的死区电压为 0.2V。

##### (2) 导通段 (AB)

如图 5-12 所示, 在特性曲线 B 点以后。二极管在电路中相当于一个开关的导通状态。

在正常使用条件下，二极管的正向电流在相当大的范围内变化，而二极管两端电压的变化却不大。小功率管的导通电压降约为  $0.6\sim 0.7\text{V}$ ，锗管的导通电压降约为  $0.2\sim 0.3\text{V}$ 。

## 2. 反向特性

当二极管两端加反向电压时，反向电流很小，近乎于截止状态，且基本上不随外加压而变化，如图 5-12 的 OC 段所示。对二极管来说，反向电流越小，表明反向特性越好，反向电流越大，表明反向特性越差。一般硅管的反向电流要比锗管小得多。

## 3. 反向击穿特性

当反向电压增加到一定数值时（如图 5-12 所示的反向电压由点 C 继续增大到点 D 时），电流突然剧增，这种现象称为反向击穿。发生反向击穿所需的反向电压称为反向击穿电压。之所以产生击穿是因为加在 PN 结中很强的外电场可以把价电子直接从共价键中拉出来成为载流子，这称为齐纳击穿。此外，强电场使 PN 结中的少数载流子获得足够的动能，去撞击其他原子，把更多的价电子从共价键中拉出来。这些撞击出来的载流子，又去撞击更多的原子，如同雪崩一样，这称为雪崩击穿。上述两种击穿效应能产生大量的电子-空穴对，从而使反向电流剧增。

无论是齐纳击穿还是雪崩击穿，如果去掉反向电压，二极管仍能恢复工作，这就属于电击穿。如果去掉反向电压，二极管不能恢复工作，说明发生了热击穿，二极管已损坏。热击穿是应该避免的。

一般在二极管正常工作时，是不允许反向击穿的。而有一些特殊的二极管，如后面要学到的稳压管却常常工作在反向击穿状态。

温度对二极管的特性影响较大。当温度升高时，正反向电流都随着增大，特别是反电流急剧增大；而反向击穿电压则要下降，二极管的导通压降则要降低。

### 5.3.3 二极管的主要参数

二极管的参数规定了二极管的适用范围，是合理选用二极管的依据。二极管的主要参数有最大整流电流、最高反向工作电压和反向电流。

#### 1. 最大整流电流 $I_{\text{FM}}$

$I_{\text{FM}}$ 是指长期工作时，二极管能允许通过的最大正向平均电流值。在选用二极管时，工作电流不能超过其最大整流电流。

#### 2. 最高反向工作电压 $U_{\text{RM}}$

$U_{\text{RM}}$ 是指二极管工作时所能承受的反向电压峰值，也就是通常所说的耐压值。为了防止二极管因反向击穿而损坏，通常标定的最高反向工作电压要比反向击穿电压低一些。在选用二极管时，加在二极管两端的反向电压峰值不允许超过这一数值，以保证二极管能正常工作，不至于因反向击穿而损坏。

#### 3. 反向电流 $I_{\text{R}}$

$I_{\text{R}}$ 是指二极管未击穿时的反间电流值：此值越小，二极管的单向导电性越好。由于温度增加，反向电流会急剧增加，所以在使用二极管时要注意温度的影响。

### 5.3.4 二极管的应用举例

二极管的应用范围很广，利用二极管的单向导电特性，可组成整流、检波、钳位、限幅

以及开关等电路。利用二极管的其他特性,可使其应用在稳压、变容、温度补偿等方面。下面简单介绍一下限幅电路。

限幅器又称削波器,主要是限制输出电压的幅度。为讨论方便起见,假设二极管 VD 为理想二极管,即正偏导通时,忽略 VD 的正向压降,近似认为 VD 短路;反偏截止时,近似认为 VD 开路。

【例 5-1】 电路如图 5-13(a) 所示,输入电压  $u_i$  的波形如图 5-13(b) 所示。画出输出电压  $u_o$  的波形。

解: 当  $u_i > +5\text{V}$  时,  $u_o = +5\text{V}$  (VD 正偏短路);

当  $u_i \leq 5\text{V}$  时,  $u_o = u_i$  (VD 反偏开路)。故可画出输出电压  $u_o$  的波形,如图 5-13(b) 所示。

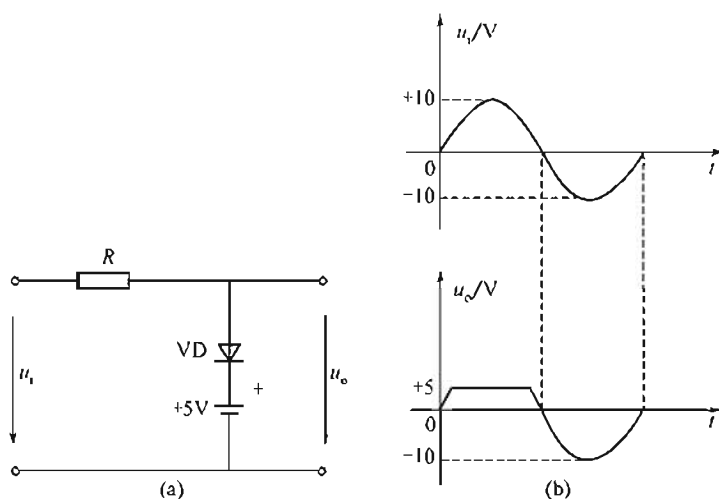


图 5-13 例 5-1 电路

## 5.4 特殊二极管

二极管的类型较多,除前面讨论的普通二极管外,还有若干种特殊二极管,如稳压二极管、光电二极管以及发光二极管等。

### 5.4.1 稳压二极管

#### 1. 结构原理

稳压二极管是一种用特殊工艺制造的面接触型半导体二极管,这种二极管的掺杂重,击穿电压值低,正向特性和普通二极管一样。当反向电压加到某一定值时,反向电流剧增,产生反向击穿,反向击穿特性很陡峭。击穿时通过二极管的电流在很大范围内变化,而二极管两端的电压却如图 5-14(b) 所示几乎不变,稳压二极管就是利用这一特性来实现稳压的。

可见,稳压二极管就是工作在反向击穿状态下的硅二极管。因此,在使用时,稳压二极管必须反向偏置(利用正向稳压的除外)。另外,稳压二极管可以串联使用,一般不能并联使用,因为并联有时会因电流分配不均而引起稳压二极管过载损坏。稳压二极管的图形符号如图 5-14(a) 所示。

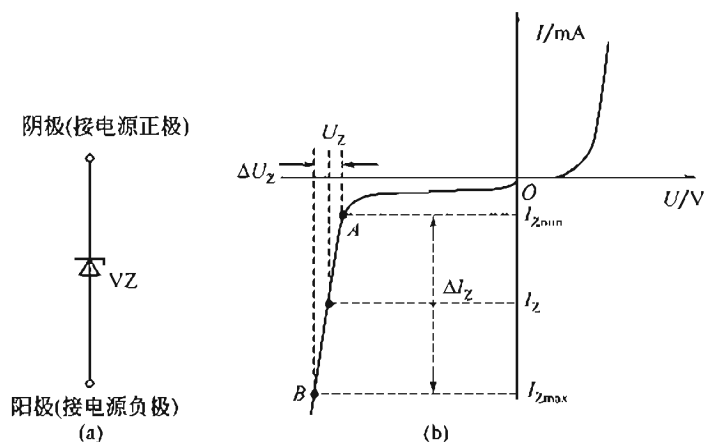


图 5-14 稳压管符号及伏安特性曲线

## 2. 主要参数

### (1) 稳定电压 $U_Z$

$U_Z$  就是稳压二极管的反向击穿电压。相当于图 5-14 中特性曲线  $AB$  段间的  $I_Z$  对应的电压值, 由于晶体管参数的分散性, 即使同一型号的稳压二极管, 其  $U_Z$  值也有不同。例如, 2CW75 管的  $U_Z$  值为  $10 \sim 11.8\text{V}$ , 是指该管的稳定电压是  $10 \sim 11.8\text{V}$  范围内的某一数值, 而不是指一个具体的 2CW75 管的稳定电压在  $10 \sim 11.8\text{V}$  之间变化。

### (2) 稳压电流 $I_Z$

$I_Z$  是指稳压二极管维持稳定电压的工作电流。电工手册中规定有最小测试电流  $I_{Z\min}$  ( $I_{Z1}$ ) 和正常测试电流  $I_Z$  ( $I_{Z2}$ ) 两项, 通常应用取  $I_Z$  值作为标称值。

### (3) 最大稳定电流 $I_{Z\max}$

最大电流是稳压二极管允许通过的最大反向电流。

稳压二极管工作时的电流应小于这个电流, 若超过这个值, 稳压二极管会因电流过大造成管子过热而损坏; 正常工作时  $I_{Z\min} < I < I_{Z\max}$ 。

### (4) 最大耗散功率 $P_{Z\max}$

$P_{Z\max}$  是指稳压二极管不致因过热而损坏的最大耗散功率。

$$P_{Z\max} = U_Z I_{Z\max}$$

### (5) 动态电阻 $r_Z$ :

$r_Z$  是反映稳压管稳压性能好坏的一个参数。它等于稳压二极管两端电压的变化量和对应的电流变化量之比, 即

$$r_Z = \frac{\Delta U_Z}{\Delta I_Z}$$

动态电阻越小, 说明曲线越陡, 稳压二极管的稳压性能越好。

## 5.4.2 光电二极管

光电二极管又称为光敏二极管。它的结构与普通二极管类似, 但在其 PN 结处, 能通过管壳上的一个玻璃窗口接收外部的光照。如图 5-15(a) 所示, 其 PN 结工作在反向偏置状态, 其反向电流随光照强度增加而上升。通过回路电阻  $R_L$  可获得电信号, 从而实现光电转换或光电控制。光电二极管的应用很广泛, 主要用于需要光电转换的自动探测、控制装置,

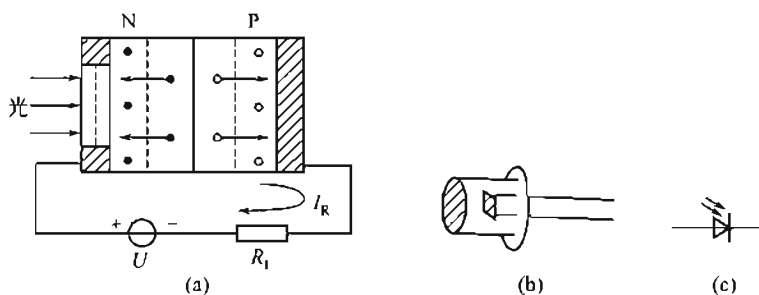


图 5-15 光电二极管结构、外形及图形符号

在光导纤维通信与系统中还可以作为接收器件等。其外形及图形符号如图 5-15(b)、(c) 所示。

### 5.4.3 发光二极管

发光二极管简称 LED，是一种固态 PN 器件，常用砷化镓、磷化镓等制成，其结构、外形和图形符号如图 5-16(a)、(b)、(c) 所示。

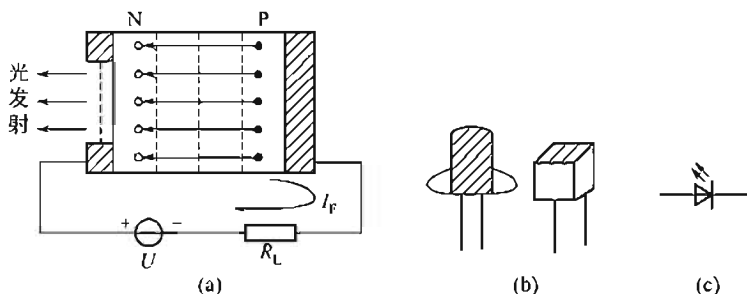


图 5-16 发光二极管的结构、外形及图形符号

半导体在外界能量（光、热）的激发下会产生电子-空穴对。相反，若自由电子和空穴相遇，两者复合时会释放出能量。发光二极管工作时，PN 结正向偏置。正向偏置的 PN 结，N 区的电子越过 PN 结进入 P 区和 P 区的空穴复合，P 区的空穴越过 PN 结进入 N 区，也会和 N 区的电子复合。发光二极管是用特殊的半导体材料（如砷化镓等）制成的，当载流子复合时，释放出的能量是一种光谱辐射能。砷化镓半导体辐射红光，磷化镓半导体辐射绿光或黄光等。

发光二极管常用做显示器件，除单个使用外，也常做成七段式或矩阵式器件，工作电流一般为几毫安至几十毫安之间。发光二极管的另一种重要用途是将电信号变为光信号，通过光缆线输入，然后再用光电二极管接收，再现电信号。

## 5.5 直流稳压电源

### 5.5.1 整流电路

整流就是把大小、方向都随时间变化的交流电变换成直流电。完成这一任务的电路称为整流电路。常见的整流电路有单相半波、全波、桥式和倍压整流电路。单相桥式整流电路应用得最为普遍。本节主要介绍单相桥式整流电路。



## 1. 工作原理

单相桥式整流电路如图 5-17(a) 所示, 图中 TC 为电源变压器, 它的作用是将交流电压  $u_1$  变成整流电路要求的交流电压  $u_2 = \sqrt{2}U_2 \sin \omega t$ ,  $R_L$  是要求直流供电的负载电阻, 4 只整流二极管  $V_1 \sim V_4$ 、接成电桥的形式, 故称为桥式整流电路。如图 5-17(b) 所示是另一种画法。如图 5-17(c) 所示是简化画法。

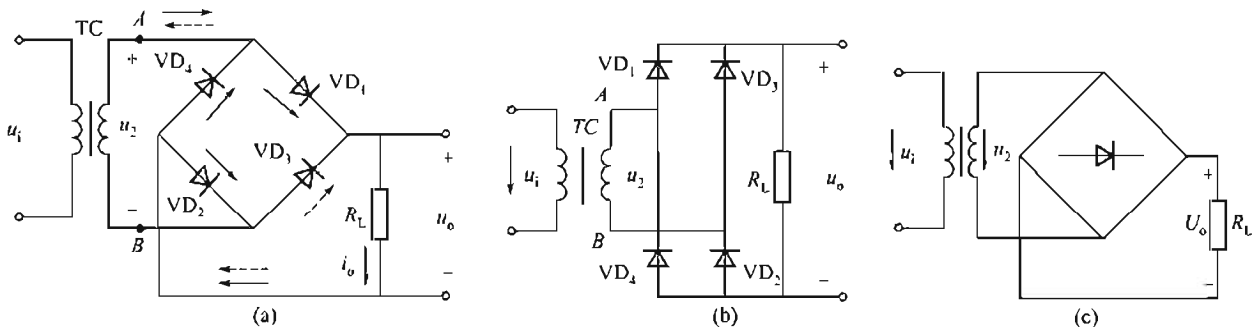


图 5-17 单相桥式整流电路

在  $u_2$  的正半周 ( $0 \leq \omega t < \pi$ ), 由于 A 端为正, B 端为负, 所以二极管  $VD_1$  和  $VD_2$ , 受到正向电压作用而导通。电流由次级绕组的 A 端, 依次通过  $VD_1$ 、 $R_L$ 、 $VD_2$  而回到绕组 B 端, 构成导电回路。二极管  $VD_3$  和  $VD_4$ , 因承受反向电压而截止, 如图 5-17(a) 所示的实线。

在  $u_2$  的负半周 ( $\pi \leq \omega t < 2\pi$ ), 变压器的 A 端为负, B 端为正, 所以  $VD_3$  和  $VD_4$  受到正向电压作用而导通, 电流由次级绕组的 B 端, 依次通过  $VD_3$ 、 $R_L$ 、 $VD_4$  而回到绕组 A 端, 构成导电回路。二极管  $VD_1$  和  $VD_2$  因承受反向电压而截止, 如图 5-17(a) 所示的虚线。

在以后各个半周期内, 将重复上述过程, 4 只二极管中两两轮流通、断。因此在整个周期, 负载电阻  $R_L$  上均有电流流过, 而且始终是一个方向, 即都是从负载的上端流向下端。负载  $R_L$  上电压、电流的波形如图 5-18 所示。变压器次级绕组在整个周期的正、负两个半周内都有电流通过, 提高了变压器的利用率。

2. 负载上的直流电压  $U_L$  和直流电流  $I_L$  的计算

整流后的电压、电流波形如图 5-18 所示。从图中可以看出, 变压器副边电压  $u_2$  按正弦规律变化。经过整流后, 负载电阻上电流的方向不变, 但其大小仍作周期性变化, 故称为脉动电压。脉动直流电压、电流一般用平均值来表示, 即一个周期内脉动电压的平均值。当变压器副边电压  $u_2 = U_2 \sin \omega t$  时,

电压平均值

$$\bar{U} = \frac{1}{\pi} \int_0^{\pi} \sqrt{2} U_2 \sin \omega t d(\omega t)$$

负载上的电压平均值

$$\bar{U}_L = \frac{2\sqrt{2}}{\pi} U_2 \approx 0.9 U_2 \quad (5-1)$$

电流平均值

$$\bar{I}_L = 0.9 U_2 / R_L \quad (5-2)$$

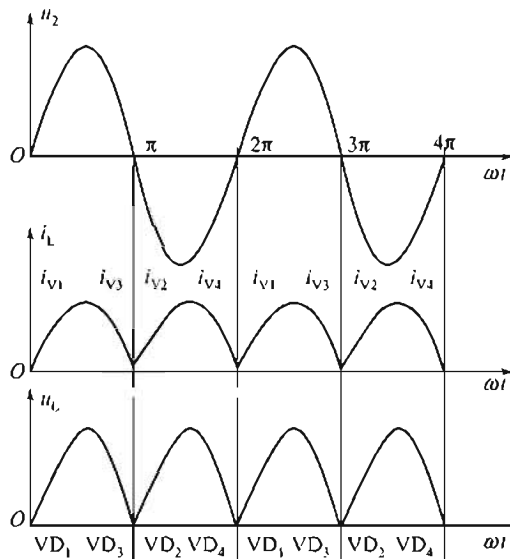


图 5-18 电压、电流波形图

## 100 | 电工与电子学

## 3. 整流元件参数的计算

## (1) 二极管的平均电流

在桥式整流电路中, 二极管  $VD_1$ 、 $VD_2$  和  $VD_3$ 、 $VD_4$  是两两轮流导通的, 所以流经每个二极管的平均电流为

$$\overline{I_V} = \frac{1}{2} \overline{I_L} = 0.45 U_2 / R_L \quad (5-3)$$

## (2) 最大反向电压

二极管在截止时两端的最大反向电压可以从图 5-18 中看出。在  $u_2$  的正半周,  $VD_1$ 、 $VD_2$  导通,  $VD_3$ 、 $VD_4$  截止。此时  $VD_3$ 、 $VD_4$  所承受到的最大反向电压均为  $u_2$  的最大值, 即  $U_{VM} = \sqrt{2} U_2$

同理, 在  $u_2$  的负半周,  $VD_1$ 、 $VD_2$  也承受同样大小的反向电压。

## 4. 整流二极管的选择

应按以下原则选择二极管:

① 二极管的最大整流电流应大于二极管的工作电流, 即

$$\overline{I_V} = \frac{1}{2} \overline{I_L} = \frac{0.45 U_2}{R_L}$$

② 二极管的最高反向工作电压  $U_{RM}$  应大于二极管承受的最大反向电压  $U_{VM}$ , 即

$$U_{VM} = \sqrt{2} U_2 \quad (5-4)$$

桥式整流电路的优点是输出的电压高, 纹波电压较小, 二极管所承受的最大反向电压较低, 同时因电源变压器在正、负半周内都有电流供给负载, 电源变压器得到了充分的利用, 因此, 这种电路在半导体整流电路中得到了颇为广泛的应用。该电路的缺点是二极管用得较多, 但目前市场上已有整流桥堆出售, 如 QL51A-G、QL62A-L 等, 其中 QL62A-L 的额定电流为 2A, 最大反向电压为 25~1000V。

**【例 5-2】** 一单相桥式整流电路接到 220V 正弦工频交流电源上, 负载电阻  $R_L = 50 \Omega$ 。负载电压平均值  $\overline{U} = 100V$ ,

(1) 根据电路要求选择整流二极管。

(2) 计算整流变压器的变比及容量。

解: 整流电流的平均值为

$$\overline{I} = \frac{\overline{U}}{R_L} = \frac{100}{50} A = 2 A$$

流过每个二极管的平均电流值为

$$\overline{I_V} = \frac{\overline{I}}{2} = \frac{2}{2} A = 1 A$$

变压器副边电压有效值为

$$U_2 = \frac{\overline{U}}{0.9} = \frac{100}{0.9} A = 111 A$$

考虑到变压器副绕组及二极管上的压降, 变压器副边电压一般应高出 5%~10%, 即

$$U_2 = 111 \times 1.1 \approx 122 V$$

每只二极管截止时承受的最高反向电压为

$$U_{VM} = \sqrt{2} U_2 = 122 \sqrt{2} V = 172 V$$

为使整流电路工作安全,在选择二极管时,二极管的最大整流电流  $I_{FM}$  应大于二极管中流过的电流平均值  $\bar{I}_F$ , 二极管的最高反向工作电压峰值  $U_{RM}$  应比二极管在电路中承受的最大反向电压  $\bar{U}_{VM}$  高出一倍左右。因此可以选用场 2CZ12D 二极管,其最大整流电流为 3A,反向工作电压峰值为 300V。

变压器的变比为

$$K = \frac{U_1}{U_2} = \frac{220}{122} = 1.8$$

变压器副绕组电流有效值为

$$I_2 = 1.11 \times \bar{I} = 1.11 \times 2A = 2.22A$$

变压器的容量为

$$S = U_2 \times I_2 = 122 \times 2.22V \cdot A = 270.84V \cdot A$$

### 5.5.2 滤波电路

为了减小整流后电压的脉动,常采用滤波电路把交流分量滤去,使负载两端得到脉动较小的直流电。

滤波电路一般由电容、电感、电阻等元件组成。滤波电路对直流和交流反映出不同的阻抗,电感  $L$  对直流阻抗为零(线圈电阻忽略不计),对于交流却呈现较大的阻抗( $X_L = \omega L$ )。若把电感  $L$  与负载  $R_L$  串联,则整流后的直流分量几乎无衰减地传到负载,交流分量却大部分降落在电感上。负载上的交流分量很小,因此负载上的电压接近于直流。电容器  $C$  对于直流相当于开路,对于交流却呈现较小的阻抗( $X_C = 1/\omega C$ )。若将电容  $C$  与负载电阻并联,则整流后的整流分量全部流过负载,而交流分量则被电容器旁路,因此在负载上只有直流电压,其波形平滑。

常用的滤波电路有电容滤波、电感滤波、复式滤波等。

#### 1. 电容滤波电路

如图 5-19 所示为单相桥式整流、电容滤波电路。在分析电容滤波电路时,要特别注意电容器两端的电压  $U_C$  对整流组件导电的影响,整流组件只有受正向电压作用时才导通,否则便截止。

##### (1) 工作原理

① 负载  $R_L$  未接入时的情况:设电容器两端初始电压为零,接入交流电源后,当  $u_2$  为正半周时, $u_2$  通过  $VD_1$ ,  $VD_2$  向电容器  $C$  充电; $u_2$  为负半周时,经  $VD_3$ ,  $VD_4$  向电容器  $C$  充电,充电时间常数为

$$\tau_C = R_n C$$

其中,  $R_n$  包括变压器副绕组的电阻和二极管  $V$  的正向电阻。由于  $R_{int}$  一般很小,电容器很快就充电到交流电压  $u_2$  的最大值  $\sqrt{2}U_2$ ,其极性如图 5-19 所示。由于电容器无放电回路,故输出电压(即电容器  $C$  两端的电压  $U_C$ )保持在  $\sqrt{2}U_2$ ,输出为一个恒定的直流。

##### ② 接入负载 $R_L$ 的情况

设变压器副边电压  $u_2$  从 0 开始上升(即正半周

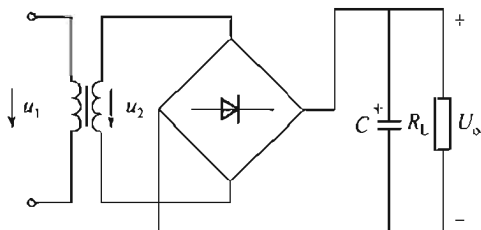


图 5-19 电容滤波电路

开始) 时接入负载  $R_L$ , 由于电容器中负载未接入前充了电, 故刚接入负载时  $u_2 < u_C$ , 二极管受反向电压作用而截止, 电容器  $C$  经  $R_L$  放电。

电容器放电过程的快慢, 取决于  $R_L$  与  $C$  的乘积, 即电路时间常数  $\tau_d$ 。 $\tau_d$  越大, 放电过程越慢, 输出电压越平稳。一般地

$$R_L C > (3-5) \frac{T}{2} \quad (5-5)$$

式中  $T$ ——电源交流电压周期。

整流二极管在短暂的导电时间内, 将流过一个很大的冲击电流, 易损坏整流二极管, 所以选择整流二极管时, 最大整流电流应留有充分的裕量。

工程上认为, 在整流电路的内阻不太大 (几欧姆) 和放电时间常数满足式 (5-5) 的关系时, 电容滤波电路负载电压平均值  $\bar{U}_L$  与  $U_2$  的关系为  $\bar{U}_L \approx (1.1-1.2) U_2$

$C$  值一定, 当  $R_L = \infty$ , 即空载时, 输出电压平均值为  $\bar{U}_L = \sqrt{2} U_2 \approx 1.4 U_2$

总之, 电容滤波电路简单, 负载直流电压  $U_L$  较高, 纹波也较小, 其缺点是输出特性较差, 故适用于负载电压较高、负载变动不大的场合。

## 2. 电感滤波电路

在桥式整流电路和负载电阻  $R_L$  之间串入一个电感  $L$ , 如图 5-20 所示, 就组成了一个电感滤波电路。利用电感的储能作用可以减小输出电压的纹波, 从而得到比较平滑的直流。当忽略电感  $L$  的电阻时, 负载上输出的电压平均值和纯电阻 (不加电感) 负载基本相同, 即  $\bar{U}_L \approx 0.9 U_2$ 。

电感滤波的特点是, 整流二极管的导电角较大 (电感  $L$  的反电势使整流管导电角增大), 峰值电流很小, 输出特性比较平坦。其缺点是体积大, 易引起电磁干扰。因此, 电感滤波一般只适用于低电压、大电流场合。

此外, 为了进一步减小负载电压中的纹波, 在电感  $L$  后再接一电容构成  $\Gamma$  形滤波电路或  $\Pi$  形  $RC$  滤波电路, 如图 5-21 所示。其性能和应用场合分别与电感滤波电路及电容滤波电路相似。

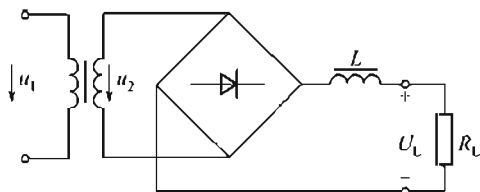


图 5-20 桥式整流电感滤波电路

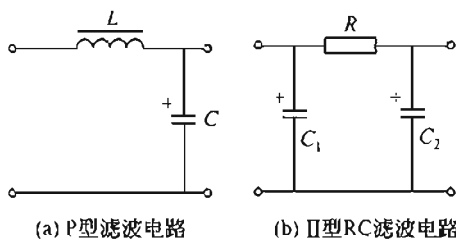


图 5-21 复式滤波电路

**【例 5-3】** 一个桥式整流电容滤波电路如图 5-22 所示。电源由 220V, 50Hz 的交流电压经变压器降压供电, 要求输出直流电压为 30V, 电流为 500mA, 试选择整流二极管的型号和滤波电容规格。

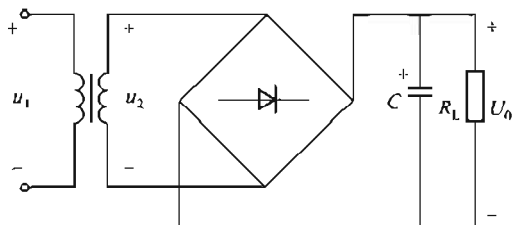


图 5-22 例 5-3 图

解: (1) 选择整流二极管。

$$\bar{I}_V = \frac{1}{2} I_L = \frac{1}{2} \times 500 \text{mA} = 250 \text{mA}$$

有负载时的直流输出电压为

$$\overline{U_L} = 1.2U_2$$

故变压器次级电压有效值为

$$U_2 = U_L / 1.2 = 30 / 1.2 \text{ V} = 25 \text{ V}$$

整流二极管承受的最大反向电压为

$$U_{RM} = \sqrt{2}U_2 = \sqrt{2} \times 25 \text{ V} \approx 35 \text{ V}$$

根据  $I_V$  和  $U_{RM}$  选择二极管, 查电工手册或本书附录 IV, 选取 2CZ54B 二极管 4 只, 其最大整流电流  $I_{FM} = 0.5 \text{ A}$ , 最高反向工作电压  $U_{RM} = 50 \text{ V}$ 。

(2) 选择滤波电容器

$$C \geq 5 \frac{T}{2R_L} = 5 \times \frac{0.02}{2 \times 30 / 0.5} \text{ F} \approx 830 \times 10^{-6} \text{ F} = 830 \mu\text{F}$$

取标称值  $1000 \mu\text{F}$ , 电容器耐压为  $(1.5 \sim 2) U_2 = (1.5 \sim 2) \times 25 = 37.5 \sim 50 \text{ V}$ 。最后确定选  $1000 \mu\text{F} / 50 \text{ V}$  的电解电容器 1 只。

### 5.5.3 硅稳压管稳压电路

交流电经整流滤波可得平滑的直流电压, 但由于电网电压波动和负载变化时输出电压也随之而变, 因此, 需要一种稳压电路, 使输出电压在电网波动或负载变化时基本稳定在某一数值。

#### 1. 稳压二极管稳压电路的工作原理

稳压管稳压是利用其反向击穿时的伏安特性, 从图 5-23(b) 中可看出, 在反向击穿区, 当流过的电流在一个较大的范围内变化时, 稳压二极管两端的电压变化量  $\Delta U$  很小, 所以将稳压管和负载并联, 就能在一定条件下稳定输出电压。

稳压二极管稳压电路如图 5-23(a) 所示, 由稳压二极管  $V_Z$  和限流电阻  $R$  组成, 稳压二极管在电路中应为反向连接, 它与负载电阻  $R_L$  并联后, 再与限流电阻串联, 属于并联型稳压电路。下面简单分析电路的工作原理。

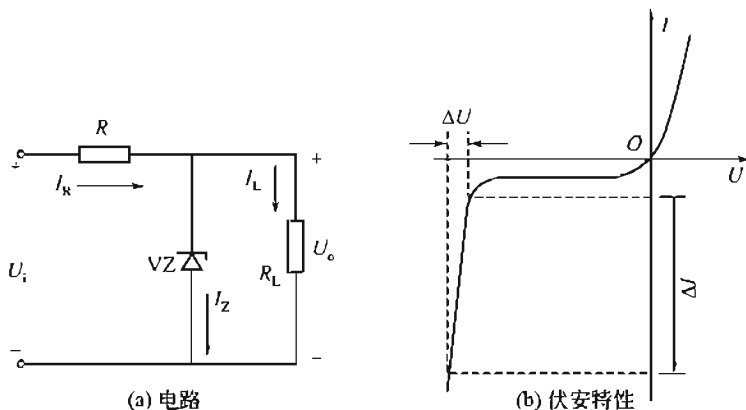


图 5-23 稳压管稳压电路

#### (1) 负载电阻 $R_L$ 不变

当负载电阻不变, 电网电压上升时, 将使  $U_i$  增加,  $U_o$  随之增加, 由稳压二极管的伏安特性可知, 稳压二极管中的电流  $I_Z$  就会显著增加, 结果使流过电阻  $R$  的电压增大, 从而使增大的负载电压  $U_o$  的数值有所减小, 即  $U_o = U_i - U_R$ 。如果电阻  $R$  的阻值选择适当, 最终可使  $U_o$  基本上保持不变。上述稳压过程可表示为

$$U_i \uparrow \rightarrow U_o \uparrow \rightarrow I_Z \uparrow \rightarrow I_R \uparrow \rightarrow U_R \uparrow \rightarrow U_o \downarrow$$

同理，如果交流电源电压降低使  $U_o$  减小时，电压  $U_i$  也减小，因此稳压二极管的电流  $I_Z$  显著减小，结果使通过限流电阻  $R$  的电流  $I_R$  减小，从而使  $R$  上的压降减小，结果使负载电压  $U_o$  近似不变。

## (2) 电源电压不变

假设电网电压保持不变，负载电阻  $R_L$  减小即  $I_L$  增大时，由于电流在  $R$  上的电压降升高，输出电压  $U_o$  将下降。由于稳压二极管并联在输出端，由伏安特性可知，当稳压二极管两端的电压有所下降时，电流  $I_Z$  将急剧减小，而  $I_R = I_L + I_Z$  所以  $I_R$  基本维持不变， $R$  上的电压也就维持不变，从而得到输出基本维持不变。上述稳压过程可表示为

$$R_L \downarrow \rightarrow I_L \uparrow \rightarrow I_R \uparrow \rightarrow U_o \downarrow \rightarrow I_Z \downarrow \rightarrow I_R \downarrow \rightarrow U_o \uparrow$$

当负载电阻增大时，稳压过程相反，分析（略）。

由以上分析可知，稳压二极管稳压电路是由稳压二极管的电流调节作用和限流电阻  $R$  的电压调节作用互相配合实现稳压的。值得注意的是，限流电阻  $R$  除了起电压调节作用外，还起限流作用。如果稳压二极管不经限流电阻  $R$  而直接并在滤波电路的输出端上，它不仅没有起到稳压作用，还可能使稳压二极管中电流过大而损坏，所以稳压二极管稳压电路中必须串接限流电阻。

## 2. 硅稳压二极管稳压电路限流电阻和稳压管的选择

① 稳压电路中的稳定电压应按负载电压选取，即  $U_Z = U_o$ 。如果一个管子的稳压值不够，可以用两个或多个稳压二极管串联。稳压二极管的最大稳定电流  $I_{Z\max}$  大致上应该比最大负载电流  $I_{L\max}$  大两倍以上，即  $I_{Z\max} \geq 2I_{L\max}$ 。

② 限流电阻  $R$  的大小应该满足两个条件（两种极端情况）。首先，当直流输入电压最低（ $U_{I\min}$ ）而负载电流最大时，流过稳压管的电流应该大于稳压管的稳定电流  $I_Z$ ，即

$$\frac{U_{I\min} - U_o}{R} - I_{L\max} \geq I_Z$$

由上式得出

$$R \leq \frac{U_{I\min} - U_o}{I_Z + i_{L\max}}$$

同时，当直流输入电压最高（ $U_{I\max}$ ）而负载电流最小时，流过稳压二极管的电流不应该超过稳压二极管的最大稳定电流  $I_{Z\max}$ ，即

$$\frac{U_{I\max} - U_o}{R} - I_{L\min} \leq I_{Z\max}$$

由上式可得

$$R \geq \frac{U_{I\max} - U_o}{I_{Z\max} + i_{L\min}}$$

即

$$\frac{U_{I\max} - U_o}{I_{Z\max} + i_{L\min}} \leq R \leq \frac{U_{I\min} - U_o}{I_Z + i_{L\max}}$$

## 本章小结

1. 半导体是导电性能介于导体和绝缘体之间的物质，具有热敏性、光敏性和掺杂性。通过掺杂把本征半导体变成 P 型和 N 型半导体，导电性能大为改善。这两种半导体是制造

多种半导体器件的基础材料。

2. 二极管是由一个 PN 结组成的，其基本特性就是单向导电性。
3. 二极管的主要用途就是作整流元件。
4. 稳压二极管、光电二极管和发光二极管都属于特殊二极管。稳压二极管工作在反向击穿状态，光电二极管工作在反偏状态，发光二极管工作在正偏状态。
5. 整流电路是利用二极管的单向导电性将交流电转变为脉动直流电的电路。最常用的整流电路是桥式整流电路。
6. 滤波是通过电抗元件等来滤掉整流后输出电压的交流成分，达到平滑输出电压的目的。常用的滤波有电容滤波、电感滤波和复式滤波。
7. 稳压二极管的稳压电路，因其结构简单，在输出电流不大、输出电压固定、稳压性要求不高的场合应用较多，属于并联式稳压电路。

## 练 习 题

- 5.1 半导体导电与金属导电相比较，有什么特点？
- 5.2 什么是本征半导体？什么是杂质半导体？各有什么特征？
- 5.3 什么是 PN 结的单向导电性？
- 5.4 通常小功率硅二极管的正向压降是多少伏？小功率锗二极管的正向压降是多少？
- 5.5 单相桥式整流电路中，若有一个二极管断路，电路会出现什么现象？若有一个二极管短路或反接，电路会出现什么现象？
- 5.6 电容滤波和电感滤波各有何特点？
- 5.7 在如图 5-24 所示的电路中，设输入  $u_i = 10\sin\omega t$ ，请画出输出  $u_o$  的波形（设 VD 为理想二极管）。

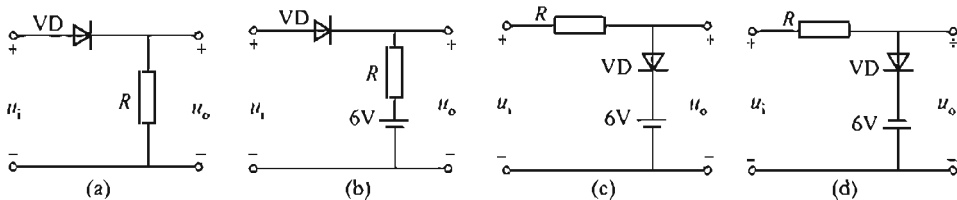


图 5-24 题 5.7 图

- 5.8 在如图 5-25 所示的电路中，当输入电压从 24V 变化到 28V 时，求通过稳压管的电流  $I_V$ 。
- 5.9 一电压为 110V，电阻为  $55\Omega$  的直流负载，采用单相桥式整流电路（不带滤波器）供电，求变压器副边绕组电压和电流的有效值，并选用二极管。
- 5.10 如图 5-26 示为一稳压电路，已知  $U_i = 12V$ ，调整电阻  $R = 10\Omega$ ，负载电阻  $R_L = 52\Omega$ ，稳压二极管 VZ 的稳定电压  $U_Z = 10V$ ，最大稳定电流  $I_{Zmax} = 20mA$ 。试计算稳压二极管的工作电流是否超过  $I_{Zmax}$ ，如果超过，怎么办？

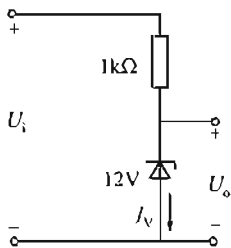


图 5-25 题 5.8 图

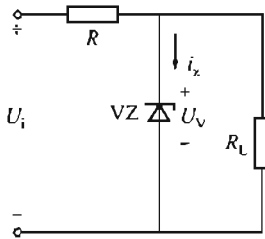


图 5-26 题 5.10 图

# 第 6 章 半导体三极管及基本放大电路

【内容提要】本章主要介绍晶体三极管的特性及其主要参数；分析基本放大电路的工作原理及工作过程；了解功率放大电路的工作原理；简介集成运算放大电路的应用。

## 6.1 半导体三极管

半导体三极管又叫晶体三极管，通常简称为三极管或晶体管。它是放大电路最基本的元件之一。下面介绍其基本结构、工作原理和特性参数。

### 6.1.1 三极管的结构

三极管的内部结构为两个 PN 结。这两个 PN 结是由三层半导体区形成的。根据三层半导体区排列的不同方式，可分为 NPN 型和 PNP 型两种类型，如图 6-1 所示。两种不同类型三极管的图形符号如图 6-2 所示。如图 6-1、图 6-2(a) 所示为 NPN 型；如图 6-1、图 6-2(b) 所示为 PNP 型。在三层半导体区中，位于中间的一层称为基区；其中一侧的半导体区专门用来发射载流子，称为发射区；另一侧专门用来收集载流子，称为集电区。发射区和基区之间的 PN 结叫发射结，集电区和基区之间的 PN 结叫集电结。

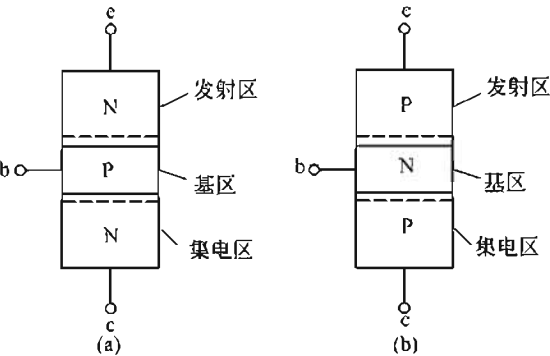


图 6-1 三极管的结构示意图

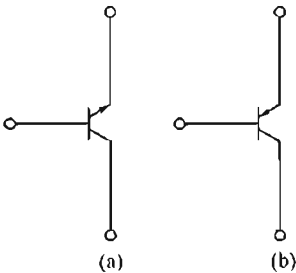


图 6-2 三极管的图形符号

从三层半导体区分别引出三个电极，相应称为基极、发射极和集电极，分别用字母 b、e、c 来表示三个极。三极管的外形如图 6-3 所示。为了保证三极管有电流放大作用，三极管在制造时有以下特点：

- ① 基区很薄，一般只有几微米到几十微米厚，且掺杂浓度低。
- ② 发射区掺杂浓度比基区和集电区高得多。
- ③ 集电结的面积比发射结大。

PNP 和 NPN 两种类型的三极管，按选用半导体材料的不同，又有硅管和锗管之分，如图 6-3 所示(a) 塑封管；(b) 超小型管；(c) 小功率管；(d) 大功率管。



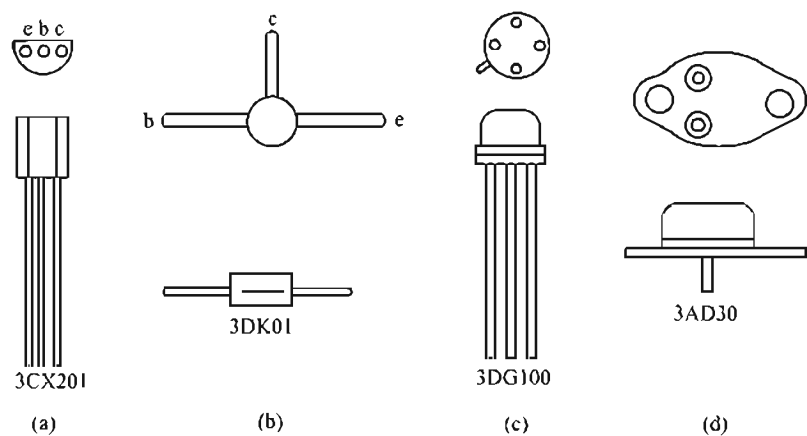


图 6-3 常见三极管的外形图

6.1.2 三极管的电流放大作用

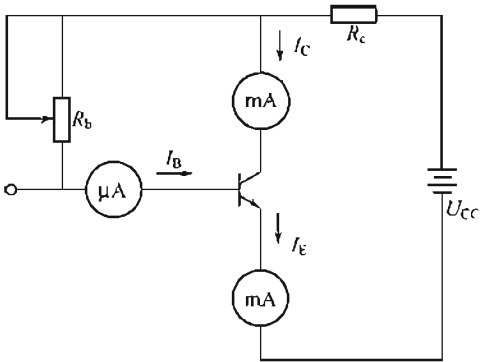
三极管在结构上的特点决定了三极管电流放大作用的内部条件。为了实现其电流放大的作用，还必须具备一定的外部条件，这就是要给三极管的发射结加正向电压，给三极管的集电结加反向电压。对 NPN 管来说，可接成如图 6-4 所示的电路。当改变电位器  $R_b$  的阻值时，就可以改变基极电流  $I_B$ ，集电极电流  $I_C$  和发射极电流  $I_E$  也将随着改变。其实验结果见表 6-1。

分析表 6-1 中的测量数据，可以得出以下结论：

① 基极电流  $I_B$  增大时，集电极电流  $I_C$  也随之增大。 $I_C$  与  $I_B$  的比值被称为三极管的直流电流放大系数，用  $\bar{\beta}$  表示，即

$$\bar{\beta} = \frac{I_C}{I_B} \text{ 或 } I_C = \bar{\beta} I_B$$

(6-1)



它体现了三极管的电流放大能力。

② 当  $I_B$  有微小变化时， $I_C$  即有较大的变化。例如，当  $I_B$  由  $10\mu A$  变到  $20\mu A$  时，集电极电流  $I_C$  则由  $1.04mA$  变为  $2.03mA$ 。这时基极电流  $I_B$  的变化量为

$$\Delta I_B = 0.02 - 0.01 = 0.01mA$$

表 6-1 三极管电流测量数据

$I_B/mA$	0	0.01	0.02	0.03	0.04	0.05
$I_C/mA$	0.01	1.04	2.03	3.07	4.03	5.21
$I_E/mA$	0.01	1.05	2.05	3.10	4.17	5.26

而集电极电流的变化量为

$$\Delta I_C = 2.03 - 1.04 = 0.99mA$$

③ 三极管各极之间的电流分配关系是

$$I_E = I_C + I_B$$

(6-2)

且  $I_C \gg I_B$ 。

这种用基极电流的微小变化来使集电极电流作较大变化的控制作用，就称为三极管的电流放大作用。集电极电流变化量  $\Delta I_C$  和基极电流变化量  $\Delta I_B$  的比值，称为三极管交流放大系数，用  $\beta$  表示，即  $\beta = \Delta I_C / \Delta I_B$ 。工程计算时可认为  $\bar{\beta} \approx \beta$ 。

### 6.1.3 三极管的特性曲线

为了正确地使用三极管，需要了解其伏安特性曲线。三极管常用的特性曲线为输入特性曲线和输出特性曲线。三极管的特性曲线可用晶体管特性图示仪直接显示，也可以用如图 6-5(a) 所示的实验电路测得数据，然后逐点描出。

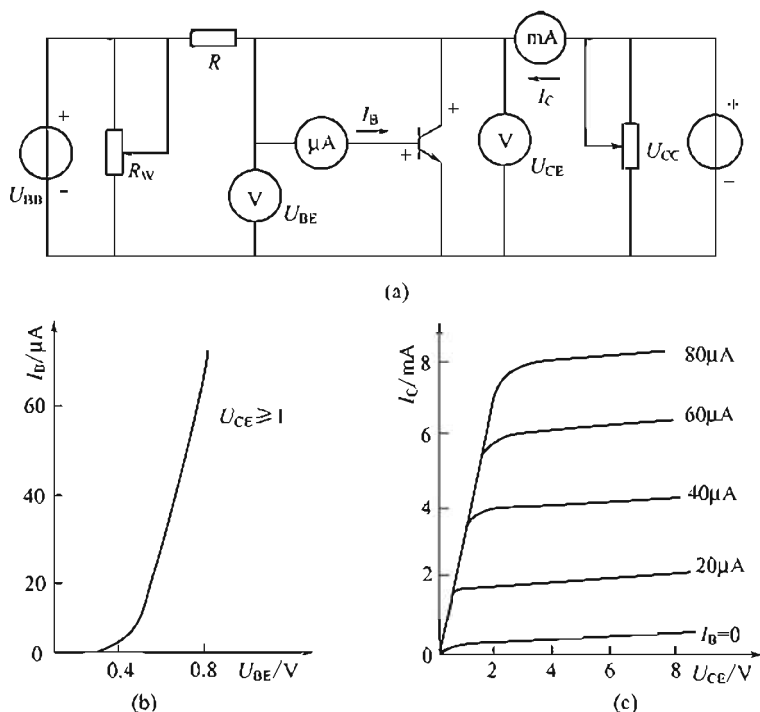


图 6-5 三极管特性的测试

#### 1. 输入特性曲线

当三极管集电极与发射极之间的电压以  $U_{CE}$  为某一定值时，基极电流  $I_B$  与基-射极之间的电压  $U_{BE}$  的关系，称为三极管的输入特性。这一关系可表示为

$$I_B = f(U_{BE}) / U_{CE} = \text{常数}$$

如图 6-5(b) 所示为实测的输入特性曲线。显然，这一曲线与二极管正向特性曲线相似。

#### 2. 输出特性曲线

当三极管基极电流  $I_B$  为定值时，集电极电流  $I_C$  与集-射极之间的电压  $U_{CE}$  的关系，称为三极管的输出特性。这一关系可表示为

$$I_C = f(U_{CE}) | I_B = \text{常数}$$

如图 6-5(c) 所示为实测的输出特性曲线。该曲线的测试过程如下：

调节  $R_W$  使  $I_B = 40 \mu A$ ，维持这一值不变，逐渐调大  $U_{CC}$ ，可测得图 6-5(c) 中  $I_B = 40 \mu A$  所示的曲线。当取不同的  $I_B$  值时，可得到如图 6-5(c) 所示的曲线族。

从输出特性曲线可看出：

① 曲线起始部分较陡。 $I_C=0$ ,  $U_{CE}=0$ ,  $U_{CE} \uparrow \rightarrow I_C \uparrow$ , 说明  $I_C$  与  $U_{CE}$  成正比。

② 当  $U_{CE}$  增加到大于 1V 时, 曲线变化逐渐趋于平稳。 $U_{CE}$  进一步增大, 曲线也不再产生显著变化, 而呈现一条基本与横轴平行的直线。

#### 6.1.4 三极管的工作状态

在三极管的输出特性曲线上, 可以把三极管的工作状态分为三个区域, 即截止区、放大区和饱和区, 如图 6-6 所示。

##### 1. 放大状态

三极管处于放大状态的条件是发射结正偏和集电结反偏。这就是输出特性曲线上  $I_B > 0$  和  $U_{CE} > 1V$  的区域。这个区域被称为放大区。

三极管在放大区的特征是:  $I_C$  由  $I_B$  决定, 而与  $U_{CE}$  的关系不大。即  $I_B$  固定时,  $I_C$  基本不变, 具有恒流的特性。改变  $I_B$ , 则可以改变  $I_C$ , 而且  $I_B$  远小于  $I_C$ , 表明  $I_C$  是受控制的受控电流源, 有电流放大作用。

##### 2. 截止状态

当三极管的基极开路或发射结处于反向偏置时, 三极管处于截止状态。从特性曲线上来看,  $I_B = 0$  的那条曲线以下的区域, 即为截止区, 如图 6-6 所示。在此区域内, 三极管没有放大作用。

当三极管截止时, c、e 之间的电压基本上等于  $U_{CC}$ , 而  $I_C \approx 0$ , 故三极管呈现出高电阻, c、e 之间相当于断路, 截止状态的三极管相当于一个断开的开关。

##### 3. 饱和状态

当发射结、集电结都处于正向偏置时, 三极管处于饱和状态。当集电极外接电阻  $R_C$  阻值很大, 或者基极电流  $I_B$  较大时就会出现这种情况。

在输出特性曲线上, 饱和区的确切范围不易明显地划出, 大致在曲线族的左侧,  $U_{CE}$  较小的区域 ( $U_{CE} < U_{BE}$ ), 如图 6-6 所示。

当三极管处于饱和状态时, 尽管增大基极电流  $I_B$  的值, 集电极电流  $I_C$  却基本保持不变, 此时三极管失去了放大作用。饱和时三极管 c 与 e 间的电压记作  $U_{CES}$ , 称为饱和电压降。一般规定小功率硅管的  $U_{CES} \approx 0.3V$ , 锗管  $U_{CES} \approx 0.1V$ 。

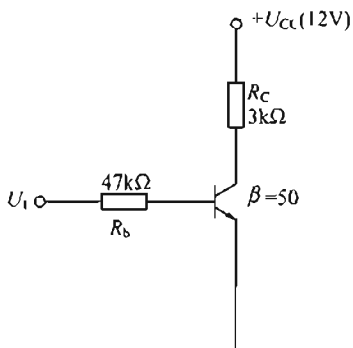


图 6-7 例 6-1 电路

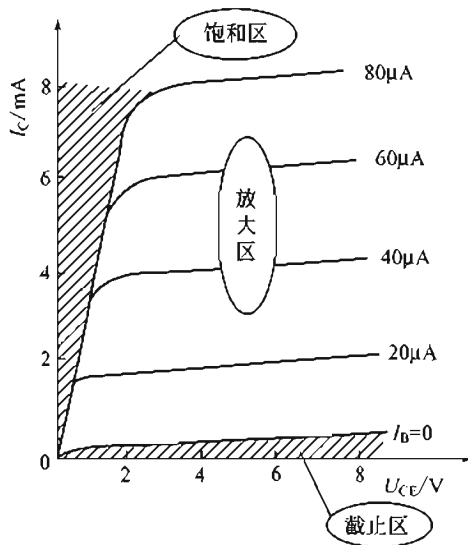


图 6-6 三极管的三个工作区

【例 6-1】在如图 6-7 所示的电路中, 当电路输入  $U_1$  分别为  $-2V$ ,  $2V$ ,  $6V$  时, 试判断三极管的工作状态。

分析: 该电路  $I_C$  的最大饱和电流是

$$I_{CS} = \frac{U_{CC}}{R_C} = \frac{12}{3} \text{mA} = 4 \text{mA}$$

产生此  $I_{CS}$  所需要的基极电流

$$I_{BS} = \frac{I_{CS}}{\beta} = \frac{4}{50} \text{mA} = 0.08 \text{mA}$$

若电路中  $I_B > I_{BS}$ , 三极管饱和;  $0 < I_B < I_{BS}$ , 三极管是

放大状态。

解：(1) 当  $U_1 = -2\text{V}$ ,  $I_B \leq 0$ , 三极管 V 是截止状态。

(2) 当  $U_1 = 2\text{V}$  时

$$I_B = \frac{U_1 - U_{BE}}{R_B} = \frac{2 - 0.7}{47} \text{mA} \approx 0.028 \text{mA}$$

$I_B < I_{BS}$ , 三极管 V 是放大状态。

(3) 当  $U_1 = 6\text{V}$  时,

$$I_B = \frac{U_1 - U_{BE}}{R_B} = \frac{6 - 0.7}{47} \text{mA} \approx 0.11 \text{mA}$$

$I_B > I_{BS}$ , 三极管 V 是饱和状态, 所以, 判断三极管饱和的条件为

$$I_B > I_{BS} = \frac{U_{CC}}{\beta R_C} = \frac{I_{CS}}{\beta}$$

### 6.1.5 三极管主要参数

三极管的参数用来表示三极管的性能, 是选用三极管的依据。其主要参数有下面几个。

#### 1. 电流放大倍数 $\bar{\beta}$ ( $h_{FE}$ )

电流放大系数是表示三极管的电流放大能力的参数。由于制造工艺的离散性, 即使同一型号的三极管, 其  $\bar{\beta}$  值也有很大差别。常用三极管的  $\bar{\beta}$  值一般在 20~200 之间。

若三极管的  $\bar{\beta}$  值小, 则电流放大效果差。但  $\bar{\beta}$  值太大的三极管, 性能并不稳定。一般在三极管管壳上点有红、黄、绿、蓝、灰、白等色点, 作为  $\bar{\beta}$  值的分档标记。

#### 2. 穿透电流 $I_{CEO}$

基极开路时, 集电极与发射极之间的反向电流称作穿透电流。性能良好的三极管的  $I_{CEO}$  比较小。 $I_{CEO}$  与周围温度有关。温度升高时,  $I_{CEO}$  急剧增大, 这对三极管的工作会产生很不利的影响。

#### 3. 集电极反向击穿电压 $U_{CE(BR)}$

基极开路时, 加在集电极与发射极之间的最大允许反向电压值称为集-射极反向击穿电压。三极管使用时, 若  $U_{CE} > U_{CE(BR)}$ , 将导致三极管击穿损坏。

#### 4. 集电极最大允许电流 $I_{CM}$

集电极电流  $I_C$  超过一定数值时, 三极管的  $\beta$  值将显著下降。 $\beta$  值下降到规定允许值 (额定值的 2/3) 时的集电极电流值称为集电极最大允许电流。

#### 5. 集电极最大允许功耗 $P_{CM}$

三极管工作时, 集电结处于反偏置, 电阻很大。 $I_C$  通过集电结时, 产生热量使结温升高。结温过高, 三极管将烧坏。集电结最大允许承受的功率称为集电极最大允许功耗。 $U_{CE} I_C < P_{CM}$ 。

## 6.2 放大电路的组成和基本工作原理

共发射极连接的单管交流放大电路是三极管放大电路的基本形式。下面以简单的共射电路为例, 介绍放大电路的组成。

### 6.2.1 放大电路各元件的作用

如图 6-8 所示为共射接法的基本放大电路。需要放大的交流信号从输入端 AB 送入, 放

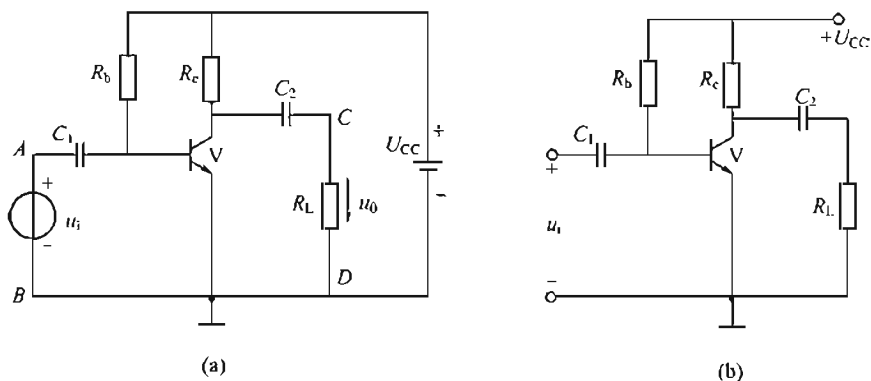


图 6-8 共射基本放大电路

大以后的信号从输出端  $CD$  输出。发射极是输入回路和输出同路的公共端，故该电路称为共射放大电路。

电路中各元件的作用如下：

$V$  为 NPN 型三极管，起放大作用，是整个放大电路的核心元件；

$U_{CC}$  为直流电源。作用有两个方面，一是为放大电路提供能量，二是保证三极管处于放大状态。

$R_b$  为基极偏置电阻。电源可通过  $R_b$  给三极管发射结加以正向偏置电压。另外，当  $U_{CC}$  一定时，通过改变  $R_b$  可给基极提供一个合适的基极电流  $I_B$ ，这个电流通常称为偏置电流（偏流）。只有具备合适的偏流，输出电压才不会失真。

$R_c$  为集电极电阻，将  $I_C$  的变化转换成集电极—发射极之间电压  $U_{CE}$  的变化，实现电压放大。

$C_1$ 、 $C_2$  为分别称为输入端和输出端的耦合电容。利用电容对直流阻抗无穷大、对交流阻抗很小的特点，通过  $C_1$  把交流信号耦合到三极管，同时隔断电路与信号源之间的直流通路；通过  $C_2$  从三极管集电极把交变输出信号送给负载，同时隔离集电极与负载之间的直流通路。所以， $C_1$ 、 $C_2$  的作用是隔离直流，通过交流。

对于如图 6-8(a) 所示电路，在实际应用中为了简化电路，在画图时往往省略电源符号，只画出电源电压的端点并标以  $U_{CC}$  这样就得到了如图 6-8(b) 所示的习惯画法。

### 6.2.2 放大电路中的电流波形

从以上元件介绍中，初步了解到在放大电路中既有直流又有交流。交流就是需要放大的变化信号，直流就是为放大建立条件。

当交流信号  $u_i$  作用于如图 6-9 所示的电路时，我们以基极电流为例，说明在电路中电流电压的波形及表示符号。

#### 1. 直流分量

如图 6-10(a) 所示的波形，是基极直流电流，用  $I_B$  表示。

#### 2. 交流分量

如图 6-10(b) 所示的波形，是基极交流电流，用  $\tilde{i}_b$  表示。

#### 3. 总变化量

如图 6-10(c) 所示的波形，是交流电流和直流电流叠加后形成的，用  $i_B$  表示基极总电流  $i_B = I_B + \tilde{i}_b$ 。

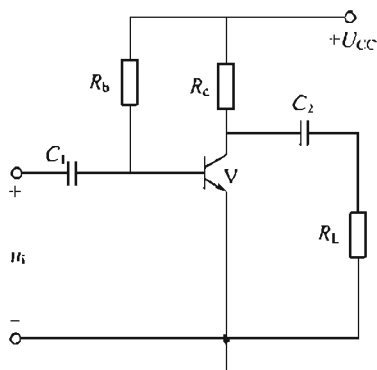


图 6-9 放大电路

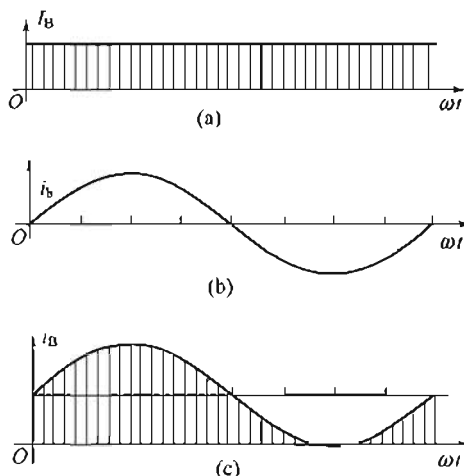


图 6-10 信号波形

### 6.2.3 放大电路的工作状态

通过对电路工作状态的分析，可以了解放大电路的工作原理。

#### 1. 放大电路没有信号输入的情况

放大电路无信号输入时，电路中各处只有直流电流和电压存在。这些直流电流和电压是  $I_B$ 、 $I_C$ 、 $I_E$ 、 $U_{BE}$ 、 $U_{CE}$ ，如图 6-11 所示。其直流电流、电压的波形和图 6-10(a) 所示的波形相同。

#### 2. 放大电路有输入信号的情况

当放大电路输入端有交流信号输入时，如图 6-12 所示。此时电路各处都有交流电流分量  $i_b$ 、 $i_c$ 、 $i_e$  通过。若输入信号电压为  $u_i = U_m \sin \omega t$  时，电路中各处的交流波形和图 6-10(b) 所示的相同。这些交流分量分量和没有信号输入时的直流分量电流叠加，即图 6-12 中的  $u_{be}$ 、 $i_B$ 、 $i_C$ 、 $u_{CE}$  等。这些合成后的实际电流波形和图 6-10(c) 中所示的相同，是单向脉动电流。

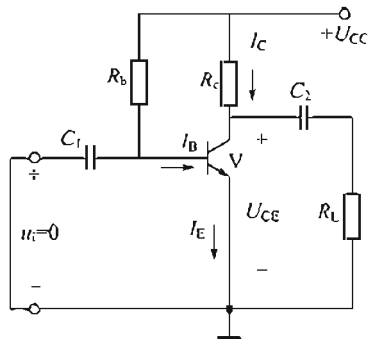


图 6-11 没有输入信号时的放大电路

### 6.2.4 电路中的直流通道和交流通道

如图 6-12 所示的放大电路中的电流是由直流分量和交流分量叠加而成的。但是，由于电路中有电容元件  $C_1$ 、 $C_2$ ，因而直流分量电流和交流分量电流通过的路径不同。直流分量电流通过的路径称为直流通路（通道），交流分量电流通过的路径称为交流通路（通道）。

直流通路如图 6-13 所示，电容  $C_1$ 、 $C_2$  对直流相当于开路。放大电路的交流通路如图 6-14(b) 所示，电容  $C_1$ 、 $C_2$  对交流信号可以看成短路。直流电源的内阻很小，对交流信号也可以看成短路。所以如图 6-14(a) 所示的放大电路中的交流通路可画成如图 6-14(b) 所示的通路。根据三极管的结构，按如图 6-14(b) 所示的交流通路中所示的电流、电压正方向， $u_i$ 、 $i_b$ 、 $i_c$  是同相位的。图中输出电压  $u_o$  的标定正方向和  $i_c$  标定正方向相反，所以  $u_o = -i_c R'_L$ ，负号表示  $u_o$  和  $i_c$  标定正方向相反，亦表明了输出电压  $u_o$  和输入电压  $u_i$  是反相位的。

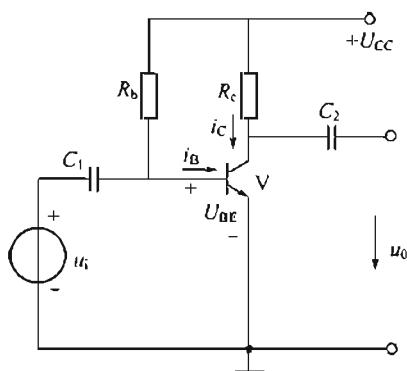


图 6-12 有输入信号时的放大电路

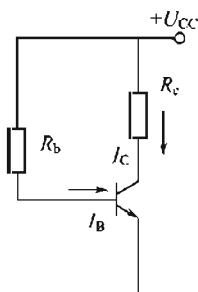
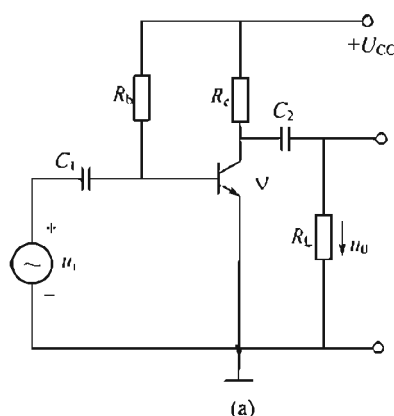
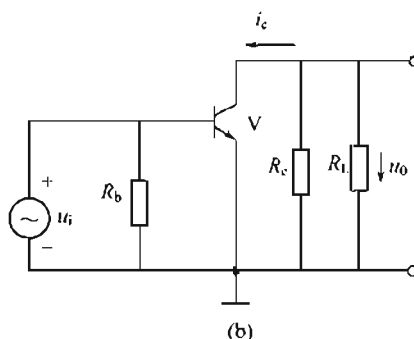


图 6-13 直流通路



(a)



(b)

图 6-14 放大电路的交流通路

综上所述，放大器在工作过程中，电路中同时并存着交流、直流两种分量的电流。直流分量  $I_B$ 、 $I_C$ 、 $U_{BE}$ 、 $U_{CE}$  为放大建立条件，而交流分量  $i_b$ 、 $i_c$ 、 $u_{be}$ 、 $u_{ce}$  则反映了交变信号的放大及传输过程。

## 6.3 放大电路的基本分析方法（一）——工程估算法

常用的分析放大电路的方法有两种：工程估算法和图解法。工程估算法就是从放大器的直流通路和交流通路分析放大器的工作情况。

### 6.3.1 静态工作点的估算

没有输入信号时，放大电路各处的直流电流、直流电压值称为放大器的静态工作点。

根据直流通路可以估算出放大器的静态工作点。如图 6-15 所示，先估算基极电流  $I_B$ ，再估算其他值。计算公式有：

$$I_B = \frac{U_{CC} - U_{BE}}{R_B} \quad (6-3)$$

$$I_C = \beta I_B \quad (6-4)$$

$$U_{CE} = U_{CC} - I_C R_c \quad (6-5)$$

式中  $U_{BE}$  的估算，对于硅管取 0.7V；对锗管取 0.3V。

在式(6-3)中，当  $U_{CC} \gg U_{BE}$  时， $U_{BE}$  可略。

【例 6-2】试估算如图 6-15 所示的放大电路的静态工作点。设  $U_{CC}=12\text{V}$ ,  $R_c=3\text{k}\Omega$ ,  $R_b=300\text{k}\Omega$ ,  $\beta=50$ 。

$$\text{解: } I_B = \frac{U_{CC} - U_{BE}}{R_b} = \frac{12 - 0.7}{300} \text{mA} \approx 0.04 \text{mA}$$

$$I_C = \beta I_B = 50 \times 0.04 \text{mA} = 2 \text{mA}$$

$$U_{CE} = U_{CC} - I_C R_c = 12 - 2 \times 3 \text{V} = 6 \text{V}$$

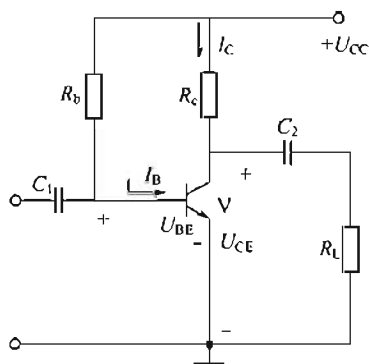


图 6-15 单管放大电路

### 6.3.2 动态交流指标的估算

采用工程估算法计算放大器的交流性能指标，例如放大电路的电压放大倍数等，需要有放大电路的交流等效电路。

交流等效电路首先要解决的是三极管的非线性问题。

当放大器中的交流信号变化范围很小时，三极管基本上可以看成是工作在线性范围内的。因此可以用一个等效的线性化电路模型来代替三极管。所谓等效，就是从线性化电路模型的三个引出端看进去，电压、电流的变化关系和原来的三极管一样，这样的线性化电路模型也称为三极管的微变等效电路。

用线性化电路模型来代替三极管之后，具有非线性元件的放大电路就转化成我们熟悉的线性电路了。

#### 1. 三极管的线性化电路模型

##### (1) 输入回路

当三极管输入回路仅有很小的输入信号时， $i_b$  只能在静态工作点附近作微量变化。三极管的输入特性曲线如图 6-16 所示，在  $Q$  点附近基本上是一段直线。此时三极管输入回路可用一等效电阻代替，如图 6-17 所示。

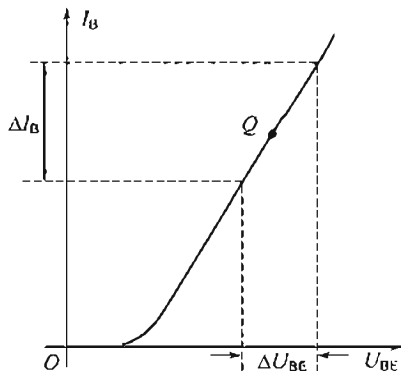


图 6-16 三极管的输入特性

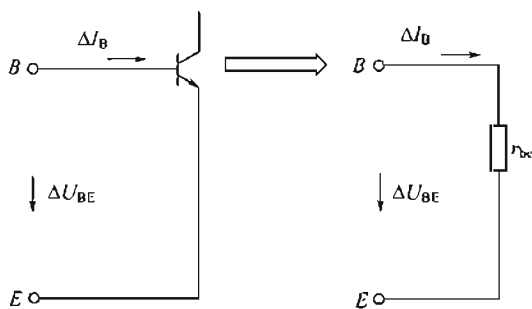


图 6-17 三极管输入回路模型

图 6-17 中的等效电阻  $r_{be}$  称为三极管的输入电阻，它的大小可用下面公式进行估算。

$$r_{be} = 300 + (1 + \beta) \frac{26(\text{mV})}{I_E(\text{mA})} = 300 + \frac{26}{I_B} \quad (6-6)$$

$I_E$  是发射极静态电流，单位是 mA。对于小功率三极管，当  $I_E = (1 \sim 2) \text{mA}$  时， $r_{be}$  为  $1\text{k}\Omega$ 。

##### (2) 输出回路

当三极管输入回路仅有微小的输入信号时，可以认为输出特性曲线是一组互相平行且间距相等的水平线。所谓平行且间距相等，是指变化相同的数值时，输出特性曲线平移相等的距离，如



图 6-18 所示。在这种情况下,三极管的  $\beta$  值是一常数。集电极电流变化量  $\Delta I_C$  与集-射极电压  $u_{ce}$  无关,仅由  $\Delta I_B$  大小决定。所以三极管输出回路相当于一个受控制的恒流源。

### (3) 三极管的线性化电路模型

综上所述,三极管的线性化电路模型如图 6-19 所示。

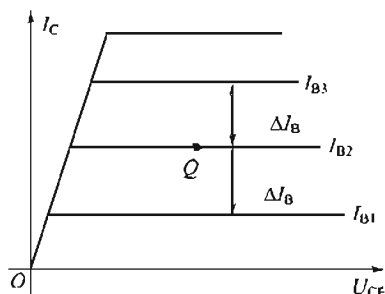


图 6-18 理想的输出特性

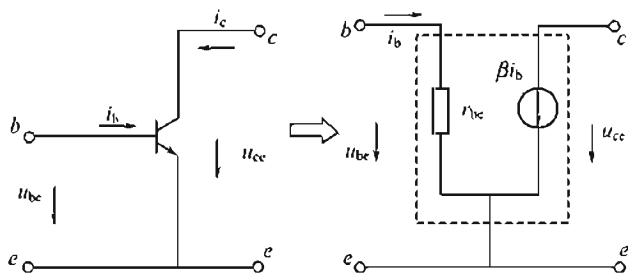


图 6-19 三极管的线性化电路模型

## 2. 共发射极放大器的小信号等效电路

将放大器的交流通路 [见图 6-14(b)] 中的三极管用三极管的线性化电路模型代替后,该电路便是共射放大电路的小信号等效电路,如图 6-20 所示。利用该等效电路,可以对共射放大器的交流指标进行估算。

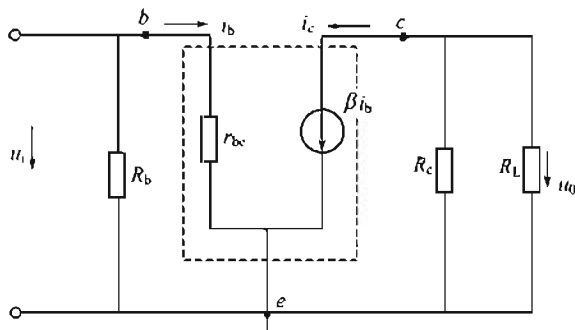


图 6-20 放大器的小信号等效电路

## 3. 交流指标的估算

### (1) 电压放大倍数

$$A_u = \frac{U_o}{U_i} = -\frac{\beta I_B R'_L}{I_B r_{be}} = -\beta \frac{R'_L}{r_{be}}$$

$$R'_L = R_L // R_c$$

不带负载时

$$A_u = -\beta \frac{R_c}{r_{be}} \quad (6-7)$$

### (2) 放大器的输入电阻 $r_i$

放大电路的输入端和信号源相连接。对信号源来说,放大电路相当于信号源的一个负载。该负载可用一等效电阻  $r_i$  来代替,这个等效电阻  $r_i$  称为放大器的输入电阻。从图 6-20 可见

$$r_i = R_b // r_{be} \approx r_{be} \quad (6-8)$$

### (3) 放大器的输出电阻

放大电路的输出端和负载相连。对负载来说,放大电路相当于一个有内阻的信号源。这

个信号源的内阻便是放大器的输出电阻。由图 6-20 可得放大电路的输出电阻：

$$r_o = R_c \quad (6-9)$$

需要注意的是， $r_i$  和  $r_o$  都是放大电路的交流动态电阻，它们是衡量放大电路性能的重要指标。一般情况下，要求输入电阻尽量大一些。以减小对信号源信号的衰减；输出电阻尽量小些，以提高放大电路的带载能力。

【例 6-3】在如图 6-14(a) 所示的电路中，三极管  $\beta = 50$ ， $r_{be} = 1\text{k}\Omega$ ， $R_b = 300\text{k}\Omega$ ， $R_c = 3\text{k}\Omega$ ， $R_L = 2\text{k}\Omega$ ，求：

- (1) 接入  $R_L$  前、后的电压放大倍数；
- (2) 放大器的输入电阻、输出电阻。

解：(1)  $R_L$  未接时

$$A_u = -\beta \frac{R_c}{r_{be}} = -50 \times \frac{3}{1} = -150$$

$R_L$  接入后

$$A'_u = -\beta \frac{R'_L}{r_{be}} = -50 \times \frac{3 \times 2}{5 \times 1} = -60$$

- (2)  $r_i \approx r_{be} \approx 1\text{k}\Omega$ ， $r_o = R_c = 2\text{k}\Omega$

该例题表明：接入负载  $R_L$  后，电压放大倍数下降。

## 6.4 放大电路的基本分析方法（二）——图解法

应用三极管的输入、输出特性，通过作图的方法来分析放大电路的工作性能，称为图解法。

### 6.4.1 放大电路无信号输入的情况

如图 6-21 所示的放大电路。当无信号输入时（相当于输入端短路），放大电路是直流通路。以  $AB$  为分界线，把该放大电路直流通道的输出回路分为两部分，如图 6-21(a) 所示：右侧是三极管。电压  $U_{CE}$  与电流  $I_C$  的关系是三极管的输出特性，如图 6-21(b) 所示；右侧是直流电源  $U_{CC}$  与电阻  $R_c$  组成的支路，电流电压关系是直线方程： $U_{CE} = U_{CC} - I_C R_c$ ；用两点法可画出该直线  $MN$ ，其中  $M(0, U_{CC}/R_c)$ ， $N(U_{CC}, 0)$ 。

因左、右侧两部分共同组成了一个整体电路，流过同一电流， $AB$  端又是同一电压，将图 6-21(b) 和图 6-21(c) 合在一起，构成图 6-21(d)。输出特性曲线坐标中的直线  $MN$  就称为放大器的直流负载线。

直流负载线斜率为

$$|\tan \alpha| = \frac{OM}{ON} = \frac{U_{CC}/R_c}{U_{CC}} = \frac{1}{R_c}$$

静态工作点的确定：直流负载线  $MN$  和  $I_B$  的交点  $Q$  便是静态工作点。

静态工作点  $Q$  的坐标，即  $Q(U_{CE}, I_C)$ ，反映了放大电路无信号输入时的直流。这与前面用估算法求出的结果接近。

### 6.4.2 放大电路有信号输入后的情况

#### 1. 输入回路

基极电流  $i_b$  可根据输入信号电压  $u_i$ ，从三极管的输入特性上求得。

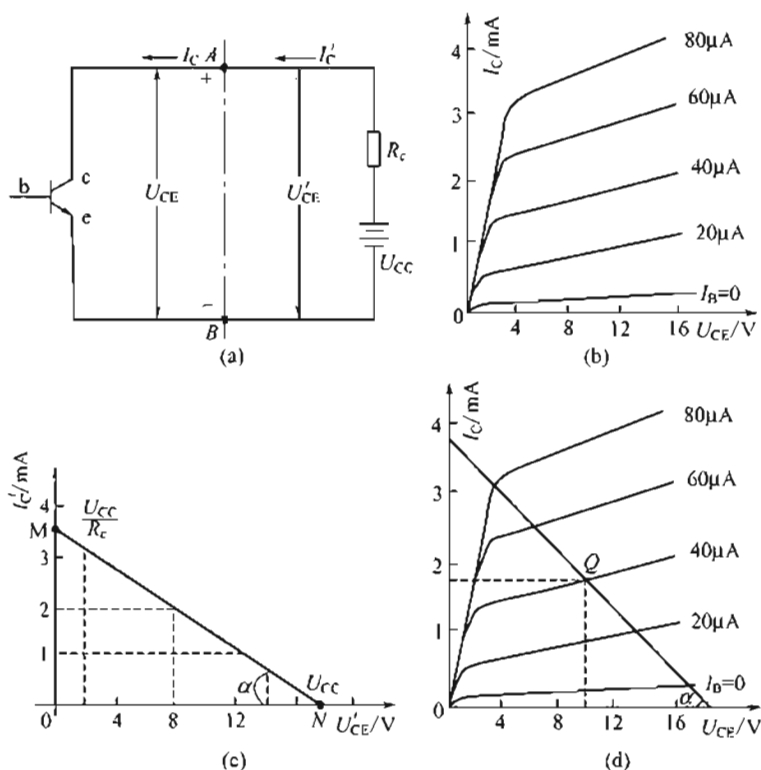


图 6-21 放大电路输出回路图解

设输入信号电压  $u_i = 20\sin\omega t \text{ mV}$ , 根据静态时  $I_B = 40\mu\text{A}$ , 当送入信号后, 加在 e, b 间的电压是一个在  $(700 \pm 20) \text{ mV}$  范围内变化的脉动电压。而基极电流  $i_b$  是一个在  $20 \sim 60\mu\text{A}$  范围内变化的脉动电流, 该脉动电流由两个分量组成, 即直流分量  $I_B$ 、和交流分量  $i_b$ 。交流分量的振幅是  $20\mu\text{A}$  (见图 6-22)。

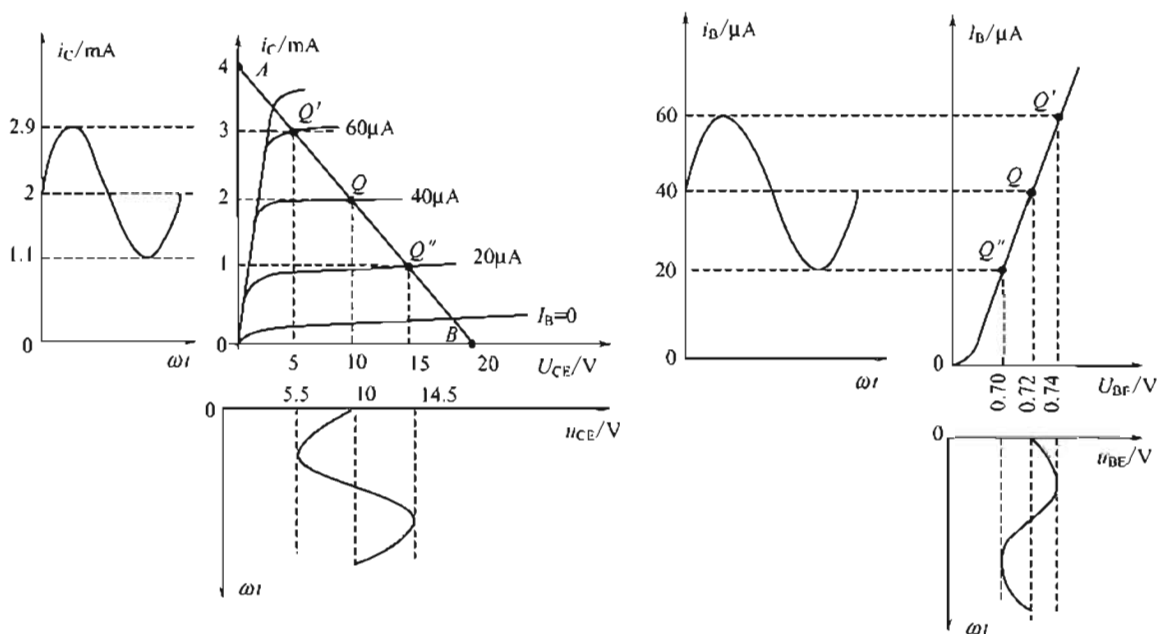


图 6-22 放大器的图解分析

### 2. 不接负载电阻 $R_L$ 时的电压放大倍数

由基极电流  $i_b$  的变化, 便可分析放大电路各量的变化规律, 如图 6-22 所示。当基极电流在  $20 \sim 60 \mu\text{A}$  范围内变化时, 放大器将在直流负载线上的  $AB$  段工作。这时  $i_C$  与  $u_{CE}$  的波形如图 6-22 所示,  $i_C$  与  $u_{CE}$  均包含直流分量  $I_C$ 、 $U_{CE}$ 。 $u_{CE}$  的振幅为  $4.5\text{V}$ ,  $i_C$  的振幅为  $0.9\text{mA}$ 。故放大器的电压放大倍数为  $A_u = U_{cem}/U_{im} = -4.5/0.02 = -225$ 。

### 3. 接入负载电阻 $R_L$ 时的电压放大倍数

从估算中可知, 接入负载电阻  $R_L$  后, 总负载电阻是  $R_c$  与  $R_L$  并联后的等效电阻  $R'_L$ , 这时应该确定新的负载线。新负载线与横轴反方向的夹角为

$$\alpha' = \arctan \frac{1}{R'_L}$$

新的负载线称为“交流负载线”。

因为当输入信号为零时, 放大电路工作在静态工作点  $Q$  上, 所以交流负载线必定要通过  $Q$  点。根据交流负载线的斜率和一个已知点  $Q$  的坐标, 我们便可以将交流负载线  $CD$  画出。如图 6-23 所示。从图中得  $u_{ce}$  的振幅为  $2.8\text{V}$ , 所以带负载后电压放大倍数为  $A'_u = \frac{2.8}{0.02} = -140$  比不带负载时的值小。

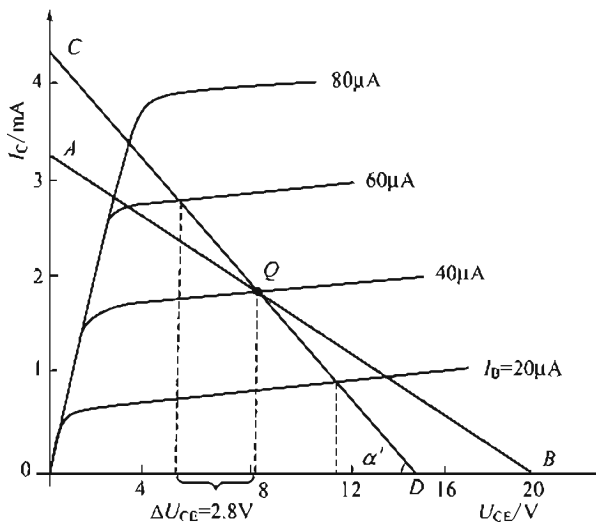


图 6-23 交流负载线

## 6.4.3 路参数对放大器工作的影响

以上分析的放大电路, 已假定有一个比较合适的静态工作点, 因此  $i_C$ 、 $u_{ce}$  的变化规律基本上和  $i_b$ 、 $u_{be}$  一致, 放大电路的输出信号几乎没有波形失真。若静态工作点设置不合适, 将会使输出信号产生严重失真。下面分别分析电路参数  $R_b$ 、 $R_c$ 、 $U_{CC}$ 、 $\beta$  对放大器电路 (见图 6-15) 工作的影响。

### 1. $R_b$ 的影响

在其他条件不变时, 如果  $R_c$ 、 $U_{CC}$  不变, 则直流负载线不变, 改变  $R_b$  时,  $I_B$  改变, 这就使静态工作点  $Q$  沿直流负载线上下移动。当点  $Q$  过高 (点  $Q'$ ) 或过低 (点  $Q''$ ) 时,  $i_c$  将产生饱和或截止失真。 $i_c$  失真,  $u_{ce}$  也对应失真, 如图 6-24 所示。

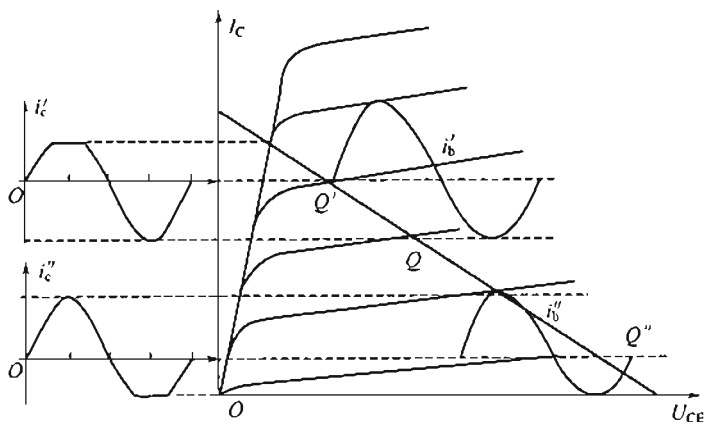


图 6-24 工作点选择不当引起的失真

### 2. $R_c$ 的影响

若  $R_b$ 、 $U_{CC}$  不变，改变  $R_c$  也可得到不同的静态工作点，如图 6-25(a) 所示。 $R_c$  增大，负载线斜率减小，工作点左移； $R_c$  减小，负载线斜率增大，工作点右移。当  $R_c$  增大较多时，点  $Q$  将移至点  $Q''$ ，放大器进入饱和区而失去放大作用。

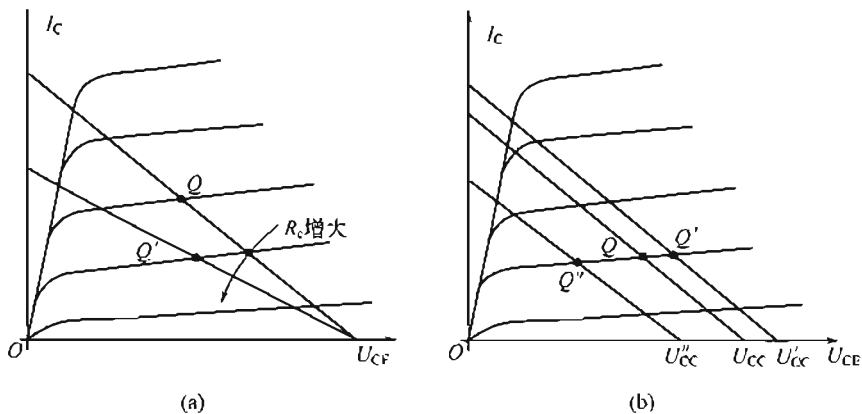


图 6-25  $R_c$ 、 $U_{CC}$  与静态工作点的失真

### 3. $U_{CC}$ 的影响

其他参数不变，升高电源电压  $U_{CC}$ ，直流负载线平行右移，点  $Q$  偏向右上方 [见图 6-25(b)]，使放大电路动态范围扩大，但同时三极管的静态功耗也增大。

### 4. $\beta$ 的影响

其他参数不变，当环境温度变化时， $I_C$  会随之相应变化，因此点  $Q$  也随之变动。

以上四个参数的变化中，通过改变  $R_b$  来调整点  $Q$  是最方便的。调整  $R_c$ 、 $U_{CC}$  也可以改变点  $Q$ ，只有  $\beta$  的影响是不可预见，下面介绍点  $Q$  的稳定电路。

## 6.5 工作点稳定的放大电路

为了使放大电路正常工作，必须选择恰当的静态工作点，也就是合理地选取  $R_b$ 、 $R_c$  和  $U_{CC}$  等参数。除了这些参数以外，当温度变化、电源电压波动时，放大电路的静态工作点也会受到影响而移动，致使放大器不能正常工作。要使放大电路正常工作，必须设法使静态工

作点  $Q$  稳定, 即稳定直流工作状态的  $I_C$ 、 $U_{CE}$  等值。

### 6.5.1 工作点稳定的放大电路

#### 1. 利用分压电阻 $R_{b1}$ 和 $R_{b2}$ 来固定基极电位 $U_B$

如图 6-26 所示, 当  $R_{b1}$  和  $R_{b2}$  中流过的电流分别是  $I_1$ 、 $I_2$ , 且  $I_1 = I_2 + I_B$  时, 若  $I_1 \gg I_B$ , 则  $I_1 \approx I_2$ , 所以基极电位是

$$U_B \approx \frac{R_{b2}}{R_{b1} + R_{b2}} U_{CC} \quad (6-10)$$

当  $R_{b1}$ 、 $R_{b2}$ 、 $U_{CC}$  选定后, 基极电位可认为固定不变, 与温度无关。

#### 2. 射极电阻 $R_e$ 的负反馈作用

$R_e$  的负反馈作用可以稳定静态工作点。

因为  $U_{BE} = U_B - I_E R_e$ , 所以, 当集电极电流  $I_C$  因温度升高而增大时, 该电路稳定工作点的过程如下:

$$T \uparrow \rightarrow \beta \uparrow \rightarrow I_C \uparrow \rightarrow I_E \uparrow \rightarrow U_{BE} \downarrow \rightarrow I_B \downarrow \rightarrow I_C \downarrow$$

在这一变化过程中, 温度升高的效果就相当于基极有一个增量  $\Delta I_B$ , 由  $\Delta I_B$  引起发射极电流增量  $\Delta I_E$ 。  $\Delta I_E$  在  $R_e$  上建立的电压反馈到输入端, 使  $\Delta I_B$  减小, 这种现象称为交流负反馈。

$R_e$  既然有抑制  $I_E$  变化的作用, 当有信号时, 对  $i_E$  的交流分量也同样起抑制作用, 使放大电路的放大倍数减小。为了克服这一缺点, 在  $R_e$  两端并接电容  $C_e$ , 使  $C_e$  对交流信号近似短路, 不致因负反馈引起放大倍数减小。  $C_e$  称为射极旁路电容, 其大小选择见经验值。

#### 3. 关于电路参数的经验值

对于如图 6-26 所示的电路:

$$\text{当 } I_1 \gg I_B \text{ 时, } I_1 \approx I_2 \quad U_B \approx \frac{R_{b2}}{R_{b1} + R_{b2}} U_{CC};$$

$$\text{当 } U_B \gg U_{BE} \text{ 时} \quad I_E \approx \frac{U_B}{R_e}.$$

在这两个条件存在的情况下,  $U_B$ 、 $I_E$  的大小只和电路参数有关, 不随温度变化, 与三极管的  $\beta$  值也无关。  $I_1$ 、 $U_B$  愈大, 电路工作点的稳定性愈好。

但需要提出的是, 在实际电路中,  $I_1$ 、 $U_B$  均不能太大。当  $I_1$  太大时 (即  $R_{b1}$ 、 $R_{b2}$  阻值太小时), 一方面由于  $R_{b1}$ 、 $R_{b2}$  上的功耗增大, 另一方面由于  $R_{b1}$ 、 $R_{b2}$  对信号源分流作用加大, 致使电路的放大倍数降低。

$U_B$  也不能太大。若  $U_B$  太大,  $U_{CE}$  减小, 电路动态工作范围就会变小。通常, 该电路的经验值为

$$\text{硅管:} \quad I_1 = (5 \sim 10) I_B, \quad U_B = (3 \sim 5) V \quad (6-11)$$

$$\text{锗管:} \quad I_1 = (10 \sim 20) I_B, \quad U_B = (1 \sim 3) V \quad (6-12)$$

$$\text{电容:} \quad C_e \text{ 的容抗: } X_{C_e} \leq (1/3 \sim 1/10) R_e \quad (6-13)$$

电容器  $C_e$  的值由上式推导出。

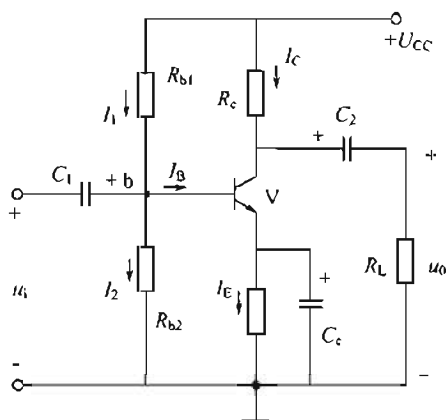


图 6-26 分压式偏置放大电路

### 6.5.2 电路的静态工作点

在分析如图 6-26 所示电路的静态工作点时, 应先从  $U_B$  计算入手, 按照  $I_1 \gg I_B$  的假定, 可得到

$$U_B \approx \frac{R_{b1}}{R_{b1} + R_{b2}} U_{CC}$$

$$I_E = \frac{U_B - U_{BE}}{R_e}$$

当  $U_B \gg U_{BE}$  时, 可以近似地认为  $I_C \approx I_E \approx \frac{U_B}{R_e}$

$$U_{CE} = U_{CC} - I_E(R_e + R_c) \approx U_{CC} - I_C(R_e + R_c) \quad (6-14)$$

从以上分析我们还看到一个现象: 就是  $I_C$  的大小基本上与三极管的参数无关。因此, 即使三极管的特性不一样, 电路的静态工作点的  $I_C$  值也没有多少改变。这在批量生产或常需要更换三极管的地方, 很方便。

### 6.5.3 电压放大倍数的计算

图 6-26 由于接入了旁路电容, 因而此时的电压放大倍数和基本放大电路相同。即

$$\text{不带负载时} \quad A_u = -\beta \frac{R_C}{r_{be}}$$

$$\text{带负载后} \quad A_u = -\beta \frac{R'_L}{r_{be}}$$

其中,  $R'_L = R_L // R_C$ 。

## 6.6 射极输出器

### 6.6.1 电路结构

射极输出器的电路如图 6-27 所示。从图中可以看出, 三极管集电极直接接到直流电源上, 输出信号从发射极电阻两端引出, 所以称作射极输出器。从该电路的微变等效电路 (图 6-28) 上可以看到, 集电极是输入回路和输出回路的公共端, 所以又称为共集放大电路。

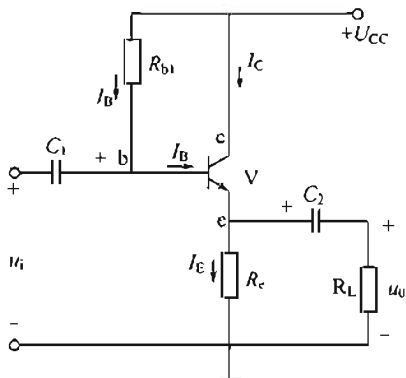


图 6-27 射极输出器

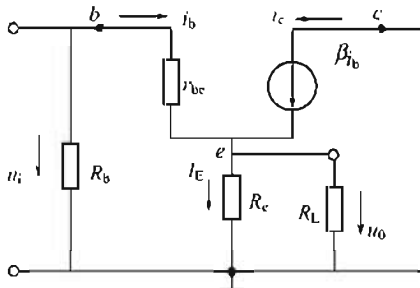


图 6-28 射极输出器的微变等效电路

### 6.6.2 射极输出器的特点

射极输出器有以下几个特点：

#### 1. 静态工作点稳定

从如图 6-27 所示的直流通路可知： $R_e$  具有负反馈的作用，可以稳定点  $Q$ 。

$$U_{CC} = I_B R_b + U_{BE} + I_E R_e = \frac{I_E}{1+\beta} R_b + U_{BE} + I_E R_e \quad (6-15)$$

$$I_C \approx I_E = \frac{U_{CC} - U_{BE}}{R_e + R_b / (1+\beta)} \quad (6-16)$$

$$U_{CE} \approx U_{CC} - I_C R_e \quad (6-17)$$

#### 2. 电压放大倍数近似为 1

由图 6-28 微变等效电路可得

$$U_o = I_E R'_L = (1+\beta) I_B R'_L$$

式中  $R'_L = R_e // R_L$

$$U_i = I_B r_{be} + I_E R'_L = I_B [r_{be} + (1+\beta) R'_L]$$

电压放大倍数为

$$A_u = \frac{U_o}{U_i} = \frac{(1+\beta) R'_L}{r_{be} + (1+\beta) R'_L} \quad (6-18)$$

在 (6-18) 式中，一般有  $r_{be} \ll (1+\beta) R'_L$ ，所以  $A_u \approx 1$ ，而略小于 1。这表明输出电压幅度和输入电压近似相等； $A_u > 0$ ，说明输出电压和输入电压同相位。故射极输出器又称为射极跟随器。

#### 3. 输入电阻高，输出电阻低

由图 6-28 所示的微变等效电路的输入端还可近似得出射极输出器的输入、输出电阻：

$$r_i = R_b // [r_{be} + (1+\beta) R'_L] \approx R_b // (1+\beta) R'_L \quad (6-19)$$

$$r_o \approx \frac{r_{be}}{\beta} \quad (6-20)$$

输入电阻可高达几十千欧至几百千欧，输出电阻一般为几欧至几百欧。

### 6.6.3 射极输出器的应用

射极输出器的特点是电压跟随，即输入电阻很大、输出电阻很小、电压放大倍数接近于 1 而小于 1。所以，射极输出器常被用作多级放大电路的输入级和输出级或作为隔离用的中间级。

#### 1. 作为测量放大器的输入级

由于它具有输入电阻高，从信号源取用的电流小的特点，因而它可以提高测量精度并减小对被测电路的影响。

#### 2. 作为中间级

其高输入阻抗对前一级影响很小；对后一级来说，因其输出电阻低，又有射极跟随性，在与输入电阻不高的共射放大电路配合时，既可保证输入相位不变，又可起到阻抗变换作用，从而提高多级放大电路的放大能力。

#### 3. 作为放大器的输出级

射极输出器输出电阻低，所以带载能力强。若放大器的负载是变化的，在负载变化时，



为了保证放大器的输出电压比较稳定, 就可以用射极输出器作为放大器的输出级。

## 6.7 多级放大电路

在实际工作中, 为了放大微弱的信号, 用一个三极管组成的放大电路, 其电压放大倍数往往是不够的。为了达到更高的放大倍数, 需要将若干个单管放大电路连接起来, 组成多级放大电路。为了保证信号在各级间不失真地逐级放大, 还有些问题需要讨论。

### 6.7.1 级间耦合方式

在多级放大电路中, 各级之间的连接方式叫级间耦合。常用的级间耦合有阻容耦合、直接耦合和变压器耦合 (见图 6-29)。

所谓阻容耦合和变压器耦合, 是指两级放大电路之间通过电容或变压器连接起来的方式。这两种耦合方式共同的优点是: 由于电容和变压器具有隔离直流作用, 各级的直流电路互不相通, 因而每一级的静态工作点都是相互独立的, 互不影响。

这两种耦合方式的缺点是: ①不适合传送缓慢变化的信号; ②在线性集成电路中几乎无法采用。

直接耦合方式是指不经过电抗元件, 把两级放大电路直接连接的方式。这种耦合方式不仅能放大交流信号, 也能放大直流或缓慢变化的信号。但是, 直接耦合时各级直流通路互相沟通, 各级静态工作点互相影响。

直接耦合电路适宜集成化产品, 其应用领域已越来越大。

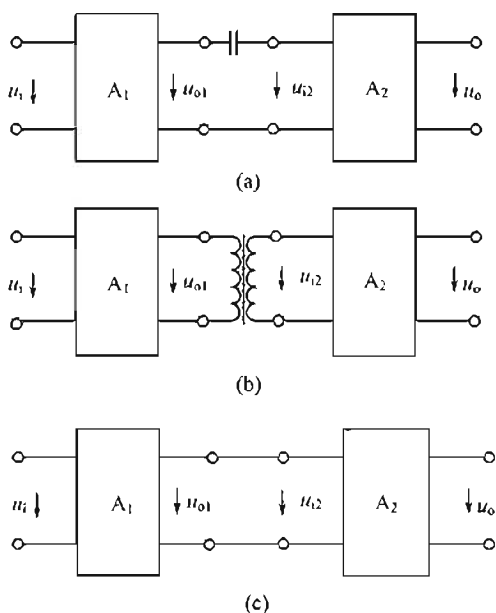


图 6-29 多级放大电路极间的耦合方式

### 6.7.2 多级放大电路的电压放大倍数

在多级放大电路中, 前一级的输出电压就是后一级的输入电压, 如图 6-29 所示。所以, 对两级放大电路, 电压放大倍数是

$$A_u = \frac{u_o}{u_i} = \frac{u_{o2}}{u_{i1}} \times \frac{u_{o1}}{u_{o1}} = A_{u1} A_{u2} \quad (6-21)$$

由此推出  $N$  级放大电路的电压放大倍数即为这  $N$  个放大电路单个的电压放大倍数的乘积。需要注意的是: 每个放大电路都是带负载的, 即后一个是前一个的负载, 因此它比每一级不带负载时的放大倍数要小。

## 6.8 功率放大器

在一些电子设备中, 常要求放大电路的输出级带动某些负载工作。例如, 使仪表指针偏转, 使扬声器发声, 驱动自控系统中的执行机构等。因而要求放大电路有足够大的输出功率。这种放大电路统称为功率放大器。

### 6.8.1 对功率放大电路的一般要求

对电压放大电路的要求是使负载得到放大的不失真的电压信号；对功率放大电路则主要要求它输出足够大的输出功率。对功率放大电路的一般要求如下。

#### 1. 提供足够的输出功率

在电子元件参数允许的范围内，放大电路的输出电压和输出电流都要有足够大的变化量，以便根据负载的要求，提供足够的输出功率。

#### 2. 具有较高的效率

放大电路输出给负载的功率是由直流电源提供的。在输出功率较大时，如果效率不高，不仅造成能量浪费，而且消耗在电路内部的电能将转换为热量，使元件温度升高。

#### 3. 尽量减少非线性失真

由于功率放大电路的工作点变化范围大，因此，输出波形的非线性失真问题要比小信号放大电路严重得多。应对这个问题特别注意。

目前的功率放大电路主要采用无输出变压器的功放电路，这类电路称为 OTL 型功率放大电路。

### 6.8.2 OCL 互补对称式功率放大电路 OCL 电路

#### 1. 电路和工作原理

OCL (Output Capacitor Less, 无输出电容) 互补对称式功率放大电路，简称 OCL 电路，如图 6-30(a) 所示。电路中两只三极管， $V_1$  为 NPN 型， $V_2$  为 PNP 型，但两管材料和参数相同，特性对称。由  $+U_{CC1}$  和  $-U_{CC2}$  两个对称直流电源供电。该电路可以看成是两个复合的射极跟随器。下面分析电路工作原理。

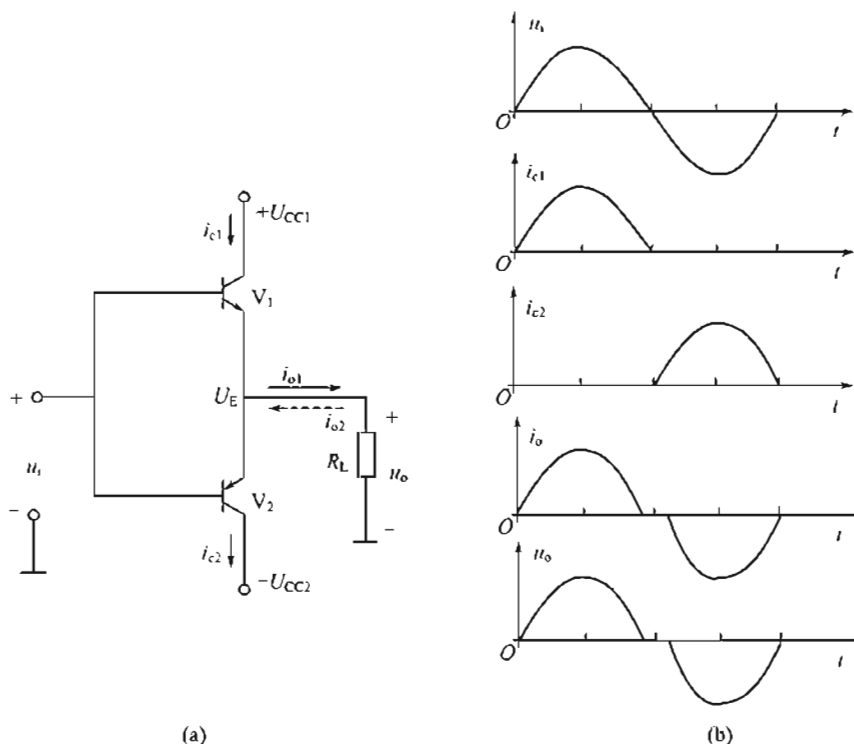


图 6-30 OCL 电路及工作波形

静态时：出于两管特性对称，供电电源对称，两管射极电位  $U_E=0$ ， $V_1$ 、 $V_2$  均截止，电路中无功率损耗。

动态时：忽略发射结死区电压，在  $u_i$  的正半周内， $V_1$  导通， $V_2$  截止。 $V_1$  以射极输出器的形式将正方向的信号变化传递给负载。电流方向如图 6-30(a) 所示的实线箭头。最大输出电压幅度受  $V_1$  管饱和限制，约为  $+U_{CC}$ 。

在负半周， $V_2$  导通， $V_1$  截止。 $V_2$  以射极输出器的形式将负方向的信号变化传递给负载。电流方向如图 6-30(a) 所示的虚线箭头。最大输出电压幅度受  $V_2$  管饱和的限制，约为  $-U_{CC2}$ 。

如上所述，两个三极管的静态电流均为 0。这种只在信号半个周期内导通的工作状态称为乙类工作状态。

在如图 6-30(a) 所示的电路中，尽管两只三极管都只在半个周期内导通，但它们交替工作，使负载得到完整的信号波形。这种形式称为“互补”。

如图 6-30 所示的电路的特点是：电路简单，效率高，低频响应好，易集成化。缺点是：电路输出的波形在信号过零的附近产生失真 [见图 6-30(b)]。由于三极管输入特性存在死区，在输入信号的电压低于导通电压期间， $V_1$  和  $V_2$  都截止，输出电压为零，出现了两只三极管交替波形衔接不好的现象，故出现了图 6-30(b) 中的失真，这种失真称为“交越失真。”

## 2. 输出功率和效率

在 OCL 电路中，每只三极管集电极静态电流为零，因而该电路效率高。

### (1) 输出功率 $P_o$

当输入正弦信号时，每只三极管只在半周期内工作，忽略交越失真，并设三极管饱和压降  $U_{CES}=0$ ，在  $U_{om} \approx U_{CC}$  时输出电压幅度最大。最大交流输出功率为

$$P_{om} \approx I_O U_O \frac{U_{om} I_{om}}{2} \quad (6-22)$$

式中  $I_{om}$ ——集电极交流分量电流最大值；

$U_{om}$ ——三极管 c, e 极间交流电压最大值。

### (2) 效率

直流电源送入电路的功率，一部分转化为输出功率，另一部分则损耗在三极管中。OCL 电路的效率为

$$\eta = \frac{P_o}{P_E}$$

式中  $P_o$ ——电路输出功率；

$P_E$ ——直流电源提供的功率。

每个直流电源只提供半波电流，其电流平均值约为

$$\bar{I}_E \approx \frac{1}{\pi} \frac{U_{CC}}{R_L}$$

每个直流电源提供的功率

$$P'_E \approx U_{CC} \bar{I}_O = \frac{1}{\pi} \frac{U_{CC}^2}{R_L}$$

两个直流电源提供的总功率

$$P_E \approx 2P'_E = \frac{2}{\pi} \frac{U_{CC}^2}{R_L} \approx \frac{2}{\pi} \frac{U_{om}^2}{R_L}$$

OCL 电路最高效率为

$$\eta = \frac{P_{om}}{P_E} = \frac{\pi}{4} \approx 78.5\%$$

这是 OCL 电路在理想情况下 ( $U_{CES}=0$ ,  $U_{om} \approx U_{CC}$ ) 的最高效率。

### 6.8.3 OTL 互补对称式功放电路

OCL 电路结构简单, 但存在双电源供电的问题。所以在分立元件电路中常用单电源互补对称功放电路, 又称 OTL (Out Transformer Less) 电路。

OTL 电路如图 6-31 所示。它与图 6-30 所示的 OCL 电路相比, 去掉了负电源, 接入了一个隔直流的电容器  $C$ 。

静态时: 调整  $R_1$  大小, 由于三极管  $V_1$ 、 $V_2$  对称, 可使  $U_E = U_A = U_{CC}/2$ 。

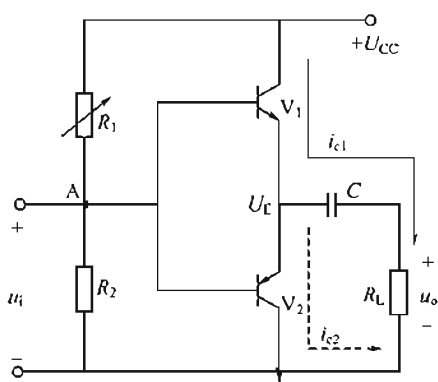


图 6-31 OTL 电路

动态时: 输入信号  $u_i$  叠加在静态值  $U_A = U_{CC}/2$  上。

当  $u_i$  为正半周时,  $u_i > U_{CC}/2$ ,  $V_1$  导通,  $V_2$  截止。输出回路电流路径  $U_{CC} \rightarrow V_1 \rightarrow C \rightarrow R_L \rightarrow$  公共端, 电流方向如图 6-31 所示的实线。此间电容  $C$  被充电, 电容器充电后两端电压为  $U_C = U_{CC}/2$ 。

当  $u_i$  为负半周时,  $U_A < U_{CC}/2$ ,  $V_2$  导通,  $V_1$  截止, 输出回路由已充电的电容器放电来提供电流。电流路径为  $C(+)\rightarrow V_2 \rightarrow$  公共端  $\rightarrow R_L \rightarrow C(-)$ 。电流方向如图 6-31 所示的虚线。

$R_L$  在以上过程中获得完整的正弦电流。

在上述过程中,  $V_1$  导通时对电容  $C$  充电,  $V_2$  导通时对电容  $C$  放电。只要电容  $C$  的容量选得足够大, 使电容充、放电时间常数远大于信号周期, 那么在信号变化过程中, 电容两端的电压就基本保持不变, 电容器起到了电源的作用。

### 6.8.4 功率放大电路的集成器件

在功率放大电路方面, 从元件到电路系统, 目前都有品种繁多的集成功放器件可供选用。例如, 单片集成功率晶体管 LM195 便是单片集成功率晶体管中的一个典型产品。它比分立的功率晶体管具有更好的性能: 它带有内部保护电路, 且总电流放大倍数可达  $10^6$ , 基极驱动电流只需  $3\mu A$ , 可产生  $1.8A$  的集电极电流。又如, 5G37 集成功率放大器, 内部是由两级直接耦合电路组成的功率放大电路, 当电源电压为  $6\sim 20V$  时, 能向  $8\Omega$  负载提供  $2\sim 3W$  的不失真功率。再如集成功放 LM384, 可以经阻容耦合向  $8\Omega$  负载提供  $5W$  输出功率。

随着高科技的发展, 集成电路器件已越来越广泛地应用于功率放大电路方面。

## 本章小结

1. 半导体三极管是一种电流控制器件。其输出特性曲线可分为三个工作区：放大区（或恒流区）、饱和区和截止区。

2. 共射放大电路是晶体管放大电路的基本形式。对放大电路的基本要求是：对输入信号应不失真地进行放大。因此，放大电路的三极管必须工作在放大区，而不能工作在截止区或饱和区。要保证信号不失真，必须给放大电路设置合理的静态工作点，即直流分量  $I_B$ ,  $I_C$ ,  $U_{CE}$ 。

3. 放大电路的基本分析方法有两种：工程估算法和图解法。以上分析方法要解决的主要矛盾是三极管的非线性问题。

4. 采用工程估算法确定放大电路的静态工作点时，用直流通路；确定交流参数时，用微变等效电路。

需要强调的是：微变等效电路只能用于分析放大电路的动态情况，即交流参数，不能确定静态工作点。

5. 用图解法分析放大电路时，首先根据直流通路画出直流负载线，并确定静态工作点；然后根据交流通路（或微变等效电路）画出交流负载线，以求得电压放大倍数。利用图解法还可以直观、形象地表示出电路参数对静态工作点的影响，以及静态工作点的位置与非线性失真的关系。

6. 工作点稳定的放大电路是针对半导体器件的热不稳定性而提出的。分压式电流负反馈偏置稳压电路是常用的电路。

7. 多级放大电路的级间耦合方式有三种：阻容耦合、变压器耦合和直接耦合。多级放大电路的电压放大倍数是各级电压放大倍数的乘积。

8. 本章基本要求：

- (1) 了解三极管的电流放大作用，熟悉三极管的电流分配关系；
- (2) 了解三极管的特性参数及应用；
- (3) 了解分析放大电路的两种方法：工程估算法和图解法；
- (4) 熟悉静态工作点稳定的放大电路的工作原理及调试方法。

## 练习题

6.1 三极管任意断掉一只管脚，剩下两个电极能否当二极管用？

6.2 如图 6-32 所示各三极管的实际对地电位数据中，分析各三极管：

(1) 三极管的类型；

(2) 是处于哪种工作状态；或是损坏，是哪个结损坏了，是断路还是短路？

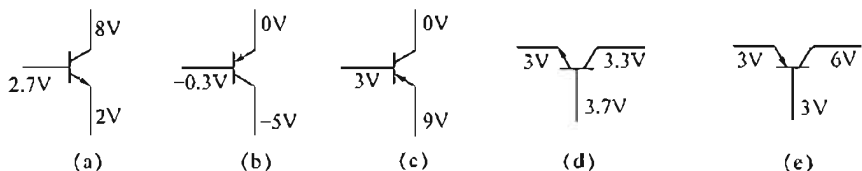


图 6-32 题 6.2 图

## 128 | 电工与电子学

- 6.3 如图 6-33 所示电路, 已知  $U_{CC}=15\text{V}$ ,  $R_b=500\text{k}\Omega$ ,  $R_c=5\text{k}\Omega$ ,  $\beta=50$ , 估算放大电路的静态工作点, 求  $R_L$  接入前、后的电压放大倍数。
- 6.4 一单管电压放大电路如图 6-34 所示,  $U_{CC}=15\text{V}$ ,  $R_b=500\text{k}\Omega$ ,  $R_c=5\text{k}\Omega$ ,  $\beta=100$ , 可变电阻  $R_P$  串联于基极电路。
- (1) 要使  $U_{CE}=7\text{V}$ , 求  $R_P$  的阻值;
  - (2) 要使  $I_C=1.5\text{mA}$ , 求  $R_P$  的阻值;
  - (3) 若  $R_b=0$ , 此电路可能发生什么问题?

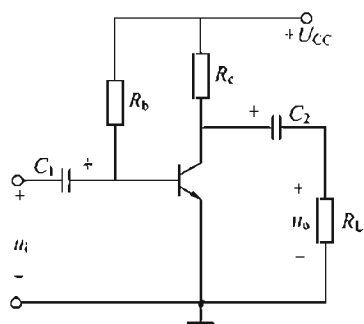


图 6-33 题 6.3 和题 6.6 图

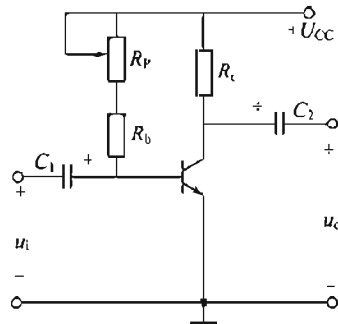


图 6-34 题 6.4 图

- 6.5 如图 6-34 所示电路, 实验时输入为正弦波信号, 用示波器观测到的波形如图 6-35 所示, 说明它们各属于什么性质的失真? 如何消除失真?

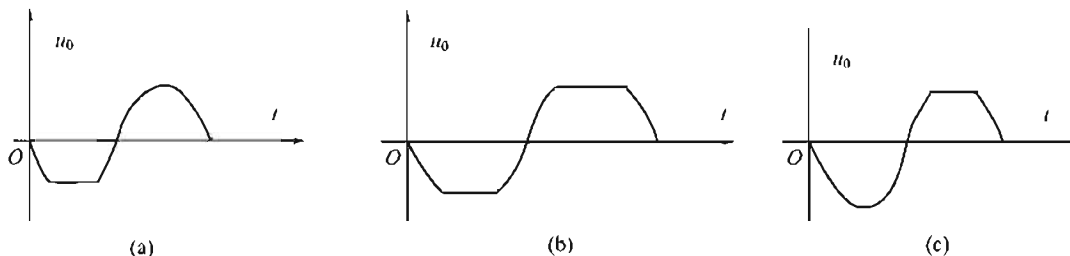


图 6-35 题 6.5 图

- 6.6 在如图 6-33 所示放大电路中, 已知  $U_{CC}=12\text{V}$ ,  $R_b=400\text{k}\Omega$ ,  $R_c=3\text{k}\Omega$ ,  $\beta=100$ , 请估算放大电路的静态工作点和电压放大倍数, 并画出微变等效电路。
- 6.7 在如图 6-36 所示放大电路中, 求: 静态工作点, 输入电阻, 输出电阻, 电压放大倍数, 并画出微变等效电路。
- 6.8 在如图 6-37 所示放大电路中,  $\beta=60$ , 求: 接入负载电阻  $R_L$  及  $R_L$  断开时, 电路的输入电阻, 输出电阻, 电压放大倍数并画出微变等效电路。

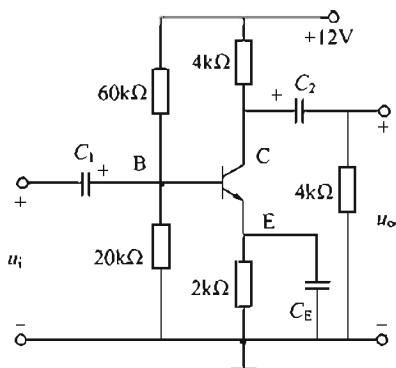


图 6-36 题 6.7 图

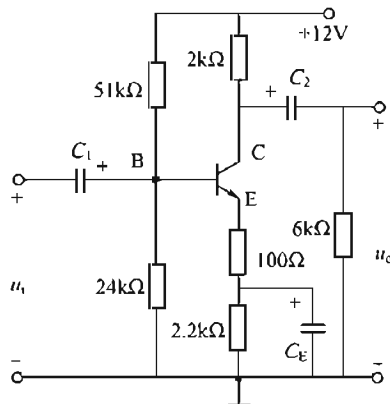


图 6-37 题 6.8 图

6.9 两级放大电路如图 6-38 所示。

- (1) 画出该电路的微变等效电路；
- (2) 求该放大电路输入电阻和输出电阻；
- (3) 求各级电压放大倍数和总电压放大倍数。

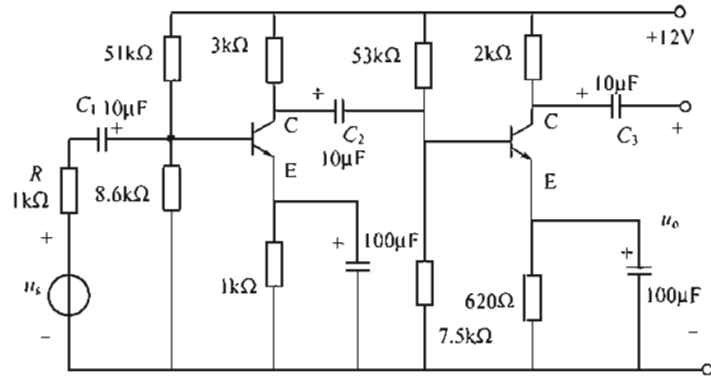


图 6-38 题 6.9 图

## 第 7 章 集成运算放大器

【内容提要】本章首先简单介绍直接耦合放大电路，然后再引入集成运算放大器（简称运算放大器）的基本结构和主要参数、理想运算放大器的分析方法，在此基础上介绍运算放大器的线性应用及线性运算电路的分析方法，主要包括反比例电路、同比例电路、差分电路等，最后简单介绍了运算放大器使用时应注意的问题。

### 7.1 直接耦合放大电路

在测量仪表及自动控制系统中，常常会遇到一些变化缓慢的低频信号（几 Hz~几十 Hz），这类信号只能用直接耦合放大电路。

#### 7.1.1 零点漂移

直接耦合放大电路最大的问题是零点漂移。即在不少于两级的耦合放大电路中，即使输入端不加信号，输出端也会出现大小变化的电压信号，简称零漂，且级数越多，放大倍数越大，零漂现象越严重。这将使放大电路不能正常工作。

引起零漂的原因很多，如电源电压波动、温度变化等，其中温度变化的影响尤为严重。在阻容耦合电路中，零漂被限制在本级内，所以影响小；而在直接耦合电路中，前级的零漂将毫无阻拦地被逐级放大，因此抑制零漂应着眼于第一级。

解决零漂的办法之一就是采用差动放大电路。

#### 7.1.2 差动放大电路

##### 1. 电路组成及原理

差动放大电路如图 7-1 所示，两侧的三极管电路完全对称。即  $R_{c1} = R_{c2}$ ， $R_{b1} = R_{b2}$ ，三极管  $V_1$ 、 $V_2$  的参数相同，两管的射极相连并接有公共的射极电阻  $R_e$ ，由两组电源  $+U_{cc}$  和  $-U_{ee}$  供电。

由于三极管  $V_1$ 、 $V_2$  的参数完全相同且电路对称，因而在静态时， $U_i = 0$ ，三极管集电极电压  $U_{c1} = U_{c2}$ ， $U_0 = U_{c1} - U_{c2} = 0$ ，达到了零输入、零输出的要求。

如果温度升高， $I_{c1}$  和  $I_{c2}$  同时增大， $U_{c1}$  和  $U_{c2}$  同时减小，两管集电极电压变化量相等。所以  $\Delta U_0 = \Delta U_{c1} - \Delta U_{c2} = 0$ ，输出电压仍然为零，即零漂因电路对称面抵消了。

##### 2. 差模信号和差模放大倍数

在图 7-1 中，输入信号  $u_{id}$  分成幅度相同的两

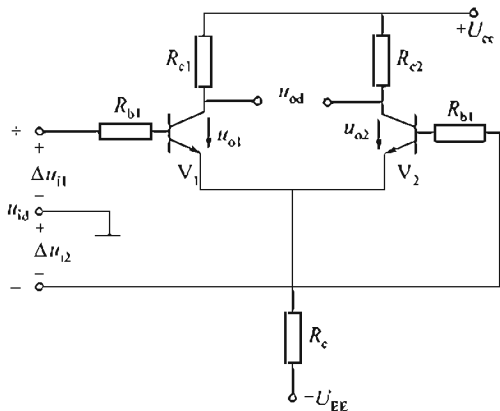


图 7-1 差动放大电路



个部分： $u_{i1}$  和  $u_{i2}$ 。它们分别加到两只三极管的基极。它们极性相反。这种对地大小相等、极性相反的电压信号称为差模信号，用  $u_{id}$  表示为

$$u_{id} = u_{i1} - u_{i2} \quad (7-1)$$

差模信号是待放大的有用信号。在它的作用下，一只三极管内电流上升，另一只三极管内电流下降，于是输出端将有电压输出。所以差动放大电路能对差模信号进行放大。

输出电压为

$$U_{od} = U_{o1} - U_{o2} = A_1 U_{id}$$

式中  $A_1$ ——单侧的放大倍数

电压放大倍数为

$$A_d = A_1 \approx \frac{\beta R_c}{R_b + r_{be}} \quad (7-2)$$

### 3. 共模信号和共模抑制比

在差动电路中，如果两输入端同时加一对对地大小相等、极性相同的信号电压，这种信号称为共模信号，用  $u_{ic}$  表示， $u_{ic} = u_{ic1} = u_{ic2}$ 。

共模信号是无用的信号（如噪声信号），零漂信号就是一种共模信号。

差动放大电路由于电路对称，当输入共模信号时， $u_{ic1} = u_{ic2}$ ，则  $u_{oc1} = u_{oc2}$ ，所以共模输出  $u_{oc} = u_{oc1} = u_{oc2} = 0$ ，表明差动电路对共模信号无放大能力，即抑制共模信号的能力。这种能力指标称为共模抑制比，用  $K_{CMRR}$  表示。

$$K_{CMRR} = \left| \frac{A_d}{A_c} \right| \quad (7-3)$$

式中  $A_d$ ——差模信号放大倍数；

$A_c$ ——共模信号放大倍数。

$K_{CMRR}$  对理想的差动放大电路为无穷大，对实际差动电路来说， $K_{CMRR}$  越大越好。

## 7.2 集成运算放大器

集成电路是相对于分立元件而言的，就是把整个电路的各个元件以及相互之间的连接同时制造在一块半导体芯片上，组成一个不可分割的整体。近年来，由于集成电路中元器件密度高，引线短，外部接线大为减少，因而大大提高了电子电路的可靠性和灵活性。

### 7.2.1 集成运算放大器的基本组成

集成运算放大器是一种集成化的半导体器件，它实质上是一个具有很高放大倍数的、直接耦合的多级放大电路，可以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，每一种型号的內部电路都不同，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 7-2 所示。输入级一般采用具有恒流源的双输入端的差分放大电路，其目的就是减小放大电路的零点漂移，提高输入阻抗。中间放大级的主要作用是电压放大，使整个集成运算放大器有足够高的电压放大倍数。功率输出级一般采用射极输出器构成的电路，其目的是实现与负载的匹配，使电路有较大的输出功率和较强的带负载能力。偏置电路的作用是为上述各级电路提供稳定合适的偏置电流，稳定各级的静态工作点，一般由各种恒流源电路构成。

如图 7-3 所示为 LM741 集成运算放大器的电路符号、外形和管脚图。它有 8 个管脚，各管脚的用途分别作如下介绍。

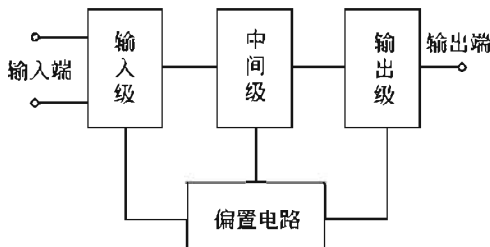


图 7-2 集成运放总体框图

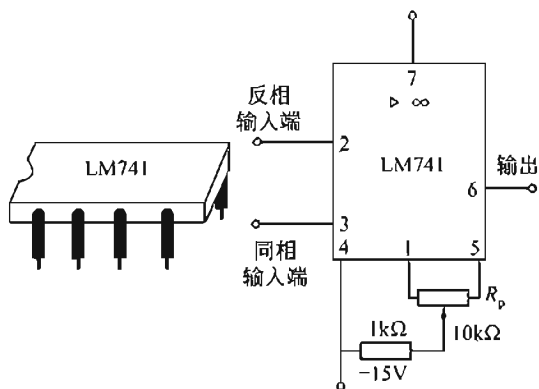


图 7-3 LM741 的电路符号、外形和管脚图

### 1. 输入端和输出端

管脚 2 和 3 为差分输入级的两个输入端，管脚 6 为功放级的输出端，管脚 2 为反相输入端，输入信号由此端与参考端接入时，6 端的输出信号与输入信号反相（或极性相反）。管脚 3 为同相输入端，输入信号由此端与参考端接入时，6 端的输出信号则与输入信号同相（或极性相同），运算放大器的反相和同相输入端对于它的应用极为重要，不能混淆。

### 2. 电源端

管脚 7 与 4 为外接电源端，为集成运算放大器提供直流电源。运算放大器通常采用双电源供电方式，4 脚接负电源组的负极，7 脚接正电源组的正极，使用时不能接错。

### 3. 调零端

管脚 1 和 5 为外接调零补偿电位器端。集成运算放大器的输入级虽为差分电路，但电路参数和晶体管特性不可能完全对称，因而当输入信号为零时，输出一般不为零。调节电位器  $R_P$  可使输入信号为零时，输出信号也为零。

## 7.2.2 集成运算放大器的主要参数

### 1. 开环差模电压增益 $A_{ud}$

开环差模电压增益  $A_{ud}$  是指集成运算放大器组件没有外接反馈电阻（开环）时，对差模信号的电压增益。 $A_{ud}$  愈大，运算放大器的精度愈高，工作愈稳定，集成运算放大器的  $A_{ud}$  很高，为  $10^4 \sim 10^6$ （LM741 的  $A_{ud}$  在  $10^5$  以上），目前高增益集成运算放大器的  $A_{ud}$  可达  $10^7$ 。

### 2. 输入失调电压 $U_{I0}$ 及其温漂 $\frac{\Delta U_{I0}}{\Delta T}$

在理想情况下，当输入信号为零时，输出电压  $u_o = 0$ ，不输出但实际上，当输入信号为零时，输出电压  $u_o \neq 0$ ，在输入端加上相应的补偿电压使其输出电压为零，该补偿电压称为输入失调电压  $U_{I0}$ 。 $U_{I0}$  一般为毫伏级。

$U_{I0}$  是温度的函数，用输入失调电压温漂  $\frac{\Delta U_{I0}}{\Delta T}$  来表示  $U_{I0}$  受温度影响的程度，其典型值为每摄氏度几个毫伏。 $U_{I0}$  可以通过调节调零电位器得到解决，但不能通过调节调零电位器

使  $\frac{\Delta U_{I0}}{\Delta T}$  得到一次性补偿。

### 3. 输入失调电流 $I_{I0}$ 及其温漂 $\frac{\Delta U_{I0}}{\Delta T}$

当输入信号为零时，输入级两个差分输入端的静态电流之差称为输入失调电流  $I_{I0}$ 。 $I_{I0}$  的存在，将在输入回路电阻上产生一个附加电压，使输入信号为零时，输出电压  $u_0 \neq 0$ ，所以  $I_{I0}$  愈小愈好，其值一般为几十至几百纳安。

$I_{I0}$  也是温度的函数，用输入失调电流温漂  $\frac{\Delta I_{I0}}{\Delta T}$  来表示  $I_{I0}$  受温度影响的程度。 $\frac{\Delta I_{I0}}{\Delta T}$  的典型值为每摄氏度几纳安，高质量的集成运算放大器的  $\frac{\Delta I_{I0}}{\Delta T}$  可达每摄氏度几皮安。

### 4. 差模输入电阻 $r_{id}$ 和输出电阻 $r_o$

运算放大器两个输入端之间的电阻  $r_{id} = \frac{\Delta U_{id}}{\Delta I_{id}}$ ，称为差模输入电阻。这是一个动态电阻，它反映了运算放大器的差分输入端向差模输入信号源所取用电流的大小。通常希望  $r_{id}$  尽可能大一些，一般为几百千欧到几兆欧。

输出电阻  $r_o$  是指运算放大器在开环状态下，输出端电压变化量与输出电流变化量的比值。它的值反映运算放大器带负载的能力。其值越小带负载的能力越强， $r_o$  的数值一般是几十欧姆到几百欧姆。

### 5. 共模抑制比 $K_{CMRR}$

共模抑制比是衡量输入级各参数对称程度的标志，它的大小反映了运算放大器抑制共模信号的能力，其定义为差模电压放大倍数与共模电压放大倍数的比值，表示为  $K_{CMRR} = \left| \frac{A_d}{A_c} \right|$

### 6. 最大差模输入电压 $U_{Idmax}$

同相输入端和反相输入端之间所允许加的最大电压差称为最大差模输入电压。若实际所加的电压超过这个电压值，运算放大器输入级的三极管将出现反向击穿现象，使运放输入特性显著恶化，甚至造成永久性损坏，LM741 的  $U_{Idmax}$  约为  $\pm 36V$ 。

### 7. 最大共模输入电压 $U_{ICmax}$

运算放大器对共模信号具有抑制的性能，但这个性能是在规定的共模电压范围内才具有的。如超出这个电压，运算放大器的共模抑制性能就大为下降，甚至造成器件损坏。LM741 的  $U_{ICmax}$  约为  $\pm 16V$ 。

### 8. 静态功耗 $P_{CO}$

静态功耗是指不接负载，且输入信号为零时，运算放大器本身所消耗的电源总功率。一般  $P_{CO}$  为几十毫瓦。

### 9. 最大输出电压 $U_{OPP}$

能使输出电压和输入电压保持不失真关系的最大输出电压称为最大输出电压。LM741 的最大输出电压约为  $\pm 16V$ 。

## 7.2.3 放大电路中的负反馈

在放大电路中负反馈的应用是极为广泛的，采用负反馈的目的是为了改善放大电路的性能，而对于工作于线性状态的运算放大器必须使用负反馈技术。

### 1. 反馈的基本概念

放大器正常工作时,是将输入信号经放大器放大后输出。信号的传递方向是从输入端经放大器到输出端。如果采用一定的方式,把放大电路的全部或部分输出电压(或电流),回送到放大电路的输入回路,以改善放大电路的某些性能,这种方法称为反馈;若返回的信号削弱了原输入信号则称为负反馈;若返回的信号增强了原输入信号则称为正反馈。在放大电路中经常采用的是负反馈。

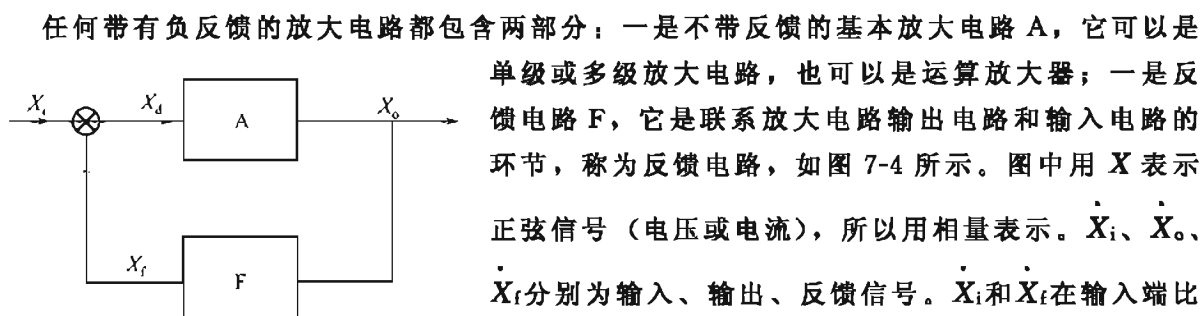


图 7-4 反馈电路

任何带有负反馈的放大电路都包含两部分:一是不带反馈的基本放大电路 A,它可以是单级或多级放大电路,也可以是运算放大器;一是反馈电路 F,它是联系放大电路输出电路和输入电路的环节,称为反馈电路,如图 7-4 所示。图中用  $\dot{X}$  表示正弦信号(电压或电流),所以用相量表示。 $\dot{X}_i$ 、 $\dot{X}_o$ 、 $\dot{X}_f$  分别为输入、输出、反馈信号。 $\dot{X}_i$  和  $\dot{X}_f$  在输入端比较( $\otimes$ 是比较环节的符号)并根据图中“+”、“-”极性可得净输入信号  $\dot{X}_d = \dot{X}_i - \dot{X}_f$ 。

若  $\dot{X}_f$  与  $\dot{X}_i$  同相,则

$$\dot{X}_d = \dot{X}_i - \dot{X}_f < \dot{X}_i$$

即反馈信号削弱了净输入信号的作用,是负反馈。

### 2. 负反馈的基本类型

根据反馈电路从放大电路输出端取样方式的不同,可分为电压反馈和电流反馈两种。反馈信号取自输出电压,称为电压反馈,如图 7-5(a)所示。反馈信号取自输出电流,称为电流反馈,如图 7-5(b)所示。

根据反馈信号与放大电路输入信号连接方式的不同,可分为串联反馈和并联反馈。反馈信号与放大电路输入信号串联为串联反馈,串联反馈反馈信号以电压形式出现,如图 7-6(a)所示。反馈信号与放大电路输入信号并联为并联反馈,并联反馈反馈信号以电流形式出现,如图 7-6(b)所示。

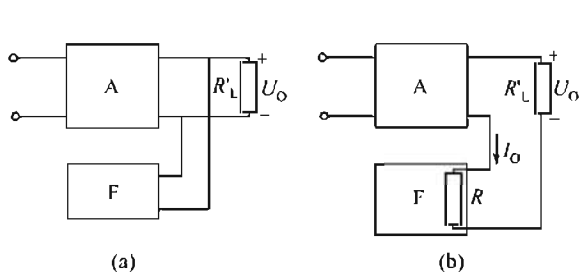


图 7-5 电压和电流反馈电路图

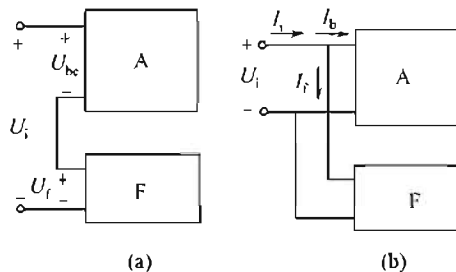


图 7-6 串联反馈和并联反馈

综上所述,负反馈的基本类型有四种:

- ① 电压串联负反馈;
- ② 电压并联负反馈;
- ③ 电流串联负反馈;

## ④ 电流并联负反馈。

## 3. 反馈类型的判别

判断放大电路中反馈的类型，可以按如下步骤进行。

① 找出反馈元件（或反馈电路），即确定在放大电路输出和输入回路间起联系作用的元件，如有这样的元件存在，电路中才有反馈存在，否则就不存在反馈。

## ② 判断电路中的反馈是电压反馈还是电流反馈。

如果反馈信号取自放大电路的输出电压，就是电压反馈。在共发射极放大电路中，电压反馈的反馈信号一般是由输出级三极管的集电取出；如果反馈信号取自输出电流，则是电流反馈。在共发射极放大电路中，电流反馈的反馈信号一般是由输出级三极管的发射极取出的。另外，可用输出端短路法判别，即将放大电路的输出端短路（注意：放大器的输出可等效为信号源；输出短路是将负载短路），如短路后反馈信号消失了，为电压反馈，否则为电流反馈。

## ③ 判断电路中的反馈是串联反馈还是并联反馈。

如果反馈信号和输入信号是串联关系则为串联反馈。在共发射极放大电路中，串联反馈是通过反馈电路将反馈信号送到输入回路三极管的发射极上，通过发射极电阻压降来影响输入信号。如果反馈信号和输入信号是并联关系则为并联反馈。在共发射极放大电路中，并联反馈是通过反馈电路将反馈信号引到输入级三极管的基极上。对于运算放大器，若反馈信号和输入信号加在运算放大器的同一个输入端是并联反馈，若反馈信号和输入信号加在不同的输入端是串联反馈。

## ④ 判断电路中的反馈是正反馈还是负反馈。

判别正、负反馈可采用瞬时极性法。瞬时极性是指交流信号某一瞬间的极性，一般要在交流通路里进行。首先假定放大电路输入电压以对地的瞬时极性是正或负，然后按照闭环放大电路中信号的传递方向，依次标出有关各点在同一瞬间对地的极性（用+或-表示）。如果反馈信号削弱输入信号属负反馈，反之属正反馈。

【例 7-1】 判断图 7-7 所示电路的反馈类型。

解：从图 7-7 所示放大电路的信号通路可以看出，电阻  $R_f$  将运算放大器的输入和输出回路联系起来，所以该元件是反馈元件。从运算放大器的输出端看， $\dot{U}_f = \dot{U}_o$ ，因为若将负载短路即将运算放大器的输出短路，则输出信号为零而反馈信号也为零，所以为电压型反馈。而从输入端看，信号源的输入信号和经反馈电阻反馈回来的反馈信号均加在运算放大器反相输入端，所以为并联反馈。因为净输入信号  $\dot{I}_- = \dot{I}_1 - \dot{I}_f$ ，由瞬时极性可知， $\dot{I}_f$  将对  $\dot{I}_1$  分流使  $\dot{I}_-$  减小，反馈信号减弱了输入信号的作用，所以是负反馈。综上所述，该电路的反馈类型是电压并联负反馈。

## 4. 负反馈对放大电路性能的影响

## (1) 降低放大倍数

由于反馈电压的存在，使净输入电压下降，输出电压也下降，所以包含反馈回路后的电压放大倍数必然减小。反馈电压越大，电压放大倍数减小得越多。

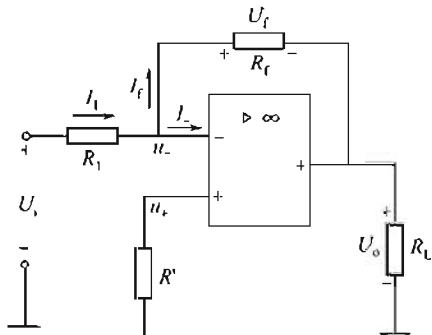


图 7-7 例 7-1 图

### (2) 提高放大倍数的稳定性

放大电路在工作过程中, 由于环境温度变化、三极管老化、电源电压变化等情况, 都会引起放大器电压放大倍数发生变化, 使放大倍数不稳定。加入负反馈后, 在同样的外界条件下, 由于上述各种原因所引起的电压放大倍数的变化就比较小, 即放大倍数比较稳定。

提高放大倍数的稳定性, 这一点对放大电路来说是很重要的。因为三极管参数受温度影响较大, 同型号三极管的参数差别也较大。所以, 在放大电路中采用负反馈, 其优点就更加突出了。

### (3) 改善波形失真

放大电路由于工作点选择不合适, 或者输入信号过大, 都将引起输出信号波形的失真, 但引入负反馈后, 可将失真的输出信号反送到输入端, 使净输入信号发生某种程度的失真, 经过放大后, 即可使输出信号的失真得到一定程度的补偿。从本质上讲, 负反馈是利用失真的波形来改善波形的失真, 因此只能减小失真, 不能完全消除失真。

### (4) 对放大电路输入电阻、输出电阻的影响

不同类型的负反馈对放大电路的输入、输出电阻影响不同。串联负反馈使输入电阻增大; 并联负反馈使输入电阻减小。电压负反馈能减小输出电阻, 稳定输出电压; 电流负反馈能增大输出电阻, 稳定输出电流, 因此必须根据不同用途引入不同类型的负反馈。此外, 负反馈还可以使放大电路通频带得到扩展。

## 7.3 理想集成运算放大器的分析方法

### 7.3.1 理想集成运算放大器

在分析运算放大器时, 为了使问题分析简化, 通常把它看成一个理想元件。理想集成运算放大器的主要条件是:

- ① 开环差模电压增益  $A_{ud} = \infty$ ;
- ② 共模抑制比  $K_{CMRR} = \infty$ ;
- ③ 开环差模输入电阻  $r_{id} = \infty$ ;
- ④ 开环共模输入电阻  $r_{ic} = \infty$ ;
- ⑤ 开环输出电阻  $r_o = 0$ 。

当然, 理想的运算放大器是不存在的。但是由于实际集成运算放大器的参数接近理想集成运算放大器的条件, 常把集成运算放大器看成理想元件。用分析理想运算放大器的方法分析和计算实际运算放大器, 所得结果完全可以满足工程要求。

集成运算放大器可以工作在线性区, 也可以工作在非线性区。理想集成运算放大器的符号如图 7-8 所示, 集成运算放大器的开环电压放大倍数  $A_{ud}$  很大, 即使加到两个输入端之间的信号很小, 甚至受到一些外界干扰信号的影响, 都会使输出达到饱和而进入非线性状态。所以集成运算放大器在开环或电路连接成正反馈的情况下应用时, 均属于非线性应用。在直流信号放大电路中使用的集成运算放大器是工作在线性区域的, 把集成运算放大器作为一个线性放大元件应用, 它的输出和输入之间应满足如下的关系, 即

$$u_o = A_{ud} u_i = A_{ud} (u_+ - u_-) \quad (7-4)$$

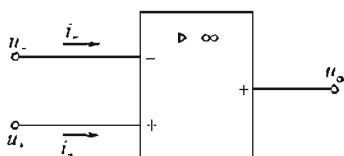


图 7-8 理想集成运算放大器的符号

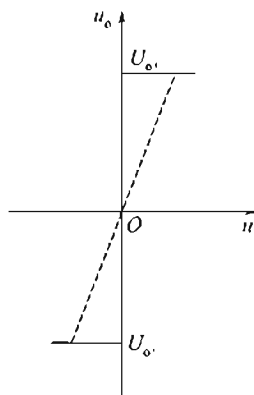


图 7-9 电压传输特性

集成运算放大器的电压传输特性如图 7-9 所示。图中横坐标为  $u_i = u_+ - u_-$ ，图中实线表示理想集成运算放大器的电压传输特性，虚线表示实际集成运算放大器的电压传输特性。由于实际集成运算放大器的  $A_{ud} \neq \infty$ ，当输入信号电压  $u_i = u_+ - u_-$  很小时，经放大  $A_{ud}$  倍后，输出电压幅值仍小于集成运算放大器的饱和电压  $U_{O+}$ （或  $U_{O-}$ ），所以实际集成运算放大器有一个线性工作区域（实际集成运算放大器电压传输特性曲线的斜直线部分），但由于  $A_{ud}$  很大，实际集成运算放大器的特性很接近理想特性，如果集成运算放大器的外部电路接成正反馈，则可以加速变化过程，使实际的电压传输特性更接近理想特性。

为了使集成运算放大器工作在线性区，通常把外部电阻、电容、半导体器件等，跨接在集成运算放大器的输出端与输入端之间，构成闭环负反馈工作状态，限制其电压放大倍数。工作在线性区域的理想集成运算放大器有两个重要结论。

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）。

由式(7-4)可知，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

$$u_i = u_+ - u_- = \frac{u_o}{A_{ud}}$$

而理想集成运算放大器  $A_{ud} = \infty$ ，输出电压  $u_o$  又是一个有限值，所以有

$$u_i = u_+ - u_- = 0$$

即

$$u_+ = u_- \quad (7-5)$$

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  $r_{id} = \infty$ ，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

$$i_+ = i_- = 0 \quad (7-6)$$

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，但又不能真正地断开，故这种现象通常称为“虚断”。对于理想集成运算放大器，无论它工作在线性区，还是工作在非线性区，式(7-6)总是成立的。

应用上述两个结论，可以使集成运算放大器应用电路的分析大大简化，因此，这两个结

论是分析具体运算放大器组成电路的依据。

运算放大器工作在饱和区时, 式(7-4)不能满足, 这时输出电压  $u_o$  只有两种可能, 或等于  $U_{0+}$  或等于  $U_{0-}$ , 而  $u_+$  与  $u_-$  不一定相等:

当  $u_+ > u_-$  时,  $u_o = U_{0+}$ ;

当  $u_+ < u_-$  时,  $u_o = U_{0-}$ 。

### 7.3.2 反相输入运算电路的分析方法

反相输入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。这是应用最广的一种输入方式, 可构成反相比例、加法、积分、微分、对数等运算电路。

#### 1. 反相比例运算电路

如图 7-10 所示的电路, 输入信号  $u_I$  经过电阻  $R_1$  加到集成运放的反相输入端与地之间, 反馈电阻  $R_f$  跨接在输出端与反相输入端之间, 其作用是使电路工作在线性状态。该电路的

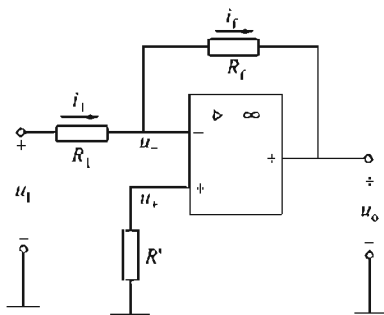


图 7-10 反相输入比例运算放大电路

反馈类型为电压并联负反馈。图 7-10 所示的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。由于实际集成运算放大器的  $A_{ud}$ 、 $r_{id}$  均不是无穷大, 所以式(7-5)和式(7-6)都是近似关系式, 故  $u_+ = u_- \approx 0$ 。分析图 7-10 所示的电路可知, 因为  $i_+ \approx i_- = 0$ , 所以  $R_1$  上无电压降, 运算放大器的输入电阻  $r_{id}$  上也无电压降, 所以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

$$u_+ = u_- = 0$$

$$i_1 = \frac{u_I - u_-}{R_1} = \frac{u_I - 0}{R_1} = \frac{u_I}{R_1}$$

$$i_f = \frac{u_- - u_o}{R_f} = \frac{0 - u_o}{R_f} = -\frac{u_o}{R_f}$$

因为

$$i_1 = i_f$$

所以

$$u_o = -\frac{R_f}{R_1} u_I \quad (7-7)$$

式(7-7)表明,  $u_o$  与  $u_I$  之间成比例关系, 比例系数为  $\frac{R_f}{R_1}$ 。式中负号表示输出电压与输入电压反相位。这就是反相输入比例运算电路名称的由来。

由式(7-7)可以看出,  $u_o$  与  $u_I$  的关系与集成运算放大器本身的参数无关, 仅与外部电阻  $R_1$  和  $R_f$  有关。只要电阻的精度和稳定性很高, 电路的精度和稳定性就很高。

在图 7-10 电路中, 同相输入端的外接电阻  $R'$  称为平衡电阻, 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。运算放大器工作时, 它的两个输入端静态基极偏置电流将在电阻  $R_1$ 、 $R'$  上分别产生压降, 从而影响差分输入级的输入端电位, 使得运算放大器的输出端产生附加偏移电压, 亦即当外加信号  $u_I = 0$  时, 输出信号将不为零。平衡电阻  $R'$  的作用就是当  $u_I = 0$  时, 使输出信号也为零。当  $u_I = 0$ ,  $u_o = 0$  时, 电阻  $R_1$  和  $R_f$  相当于并



联, 所以反相输入端与“地”之间的等效电阻为  $R_1 // R_f$ , 因而平衡电阻  $R'$  应为

$$R' = R_1 // R_f \quad (7-8)$$

反相输入比例运算电路的输入阻抗为

$$r_i = \frac{u_1}{i_1} = \frac{R_1 i_1}{i_1} = R_1 \quad (7-9)$$

反相输入比例运算电路的特点如下:

- ① 输出与输入信号相位相反;
- ② 输出信号是输入信号的  $\frac{R_f}{R_1}$  倍, 输出信号可能大于输入信号, 也可能小于输入信号;
- ③ 输入阻抗较小, 约等于  $R_1$ ;
- ④ 输出阻抗较小;
- ⑤ 同相输入端与反相输入端之间为虚短;
- ⑥ 输入端存在“虚地”现象;
- ⑦ 不存在共模输入信号。

当选取  $R_1 = R_f$  时, 即  $u_o = -u_1$ , 即  $u_o$  与  $u_1$  大小相等、相位相反。这时图 7-10 所示的电路称为反相器或倒相器。

## 2. 反相加法运算电路

在图 7-10 所示电路的基础上增加若干个输入回路, 就可以对多个输入信号实现代数相加运算, 图 7-11 是具有两个输入信号的反相加法运算电路。

由图分析可知

$$\begin{aligned} i_1 &= \frac{u_{11}}{R_1} \\ i_2 &= \frac{u_{12}}{R_2} \\ i_f &= i_1 + i_2 \\ i_f &= \frac{0 - u_o}{R_f} = -\frac{u_o}{R_f} \end{aligned}$$

由上列各式可得

$$u_o = -\left(\frac{R_f u_{11}}{R_1} + \frac{R_f u_{12}}{R_2}\right) \quad (7-10)$$

由式(7-10)可以看出,  $u_o$  与  $u_1$  的关系仅与外部电阻有关, 所以反相加法运算电路也能达到很高的运算精度和稳定性。

若使  $R_f = R_1 = R_2$ , 则

$$u_o = -(u_{11} + u_{12}) \quad (7-11)$$

图 7-11 中的平衡电阻

$$R' = R_1 // R_2 // R_f$$

## 3. 反相积分电路

把反相比例运算电路中的反馈电阻  $R_f$  换成电容  $C_f$ , 就构成了反相积分电路, 如图 7-12 所示。根据“虚地”的特点, 分析图 7-12 可知

$$\begin{aligned} i_1 &= \frac{u_1 - 0}{R_1} = \frac{u_1}{R_1} \\ i_c &= i_f = i_1 \\ u_o &= -u_c = -\frac{1}{C_f} \int i_c dt = -\frac{1}{C_f R_1} \int u_1 dt \end{aligned} \quad (7-12)$$

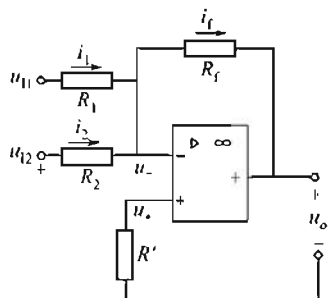


图 7-11 反相加法运算电路

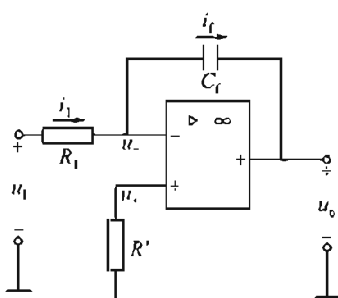


图 7-12 反相积分电路

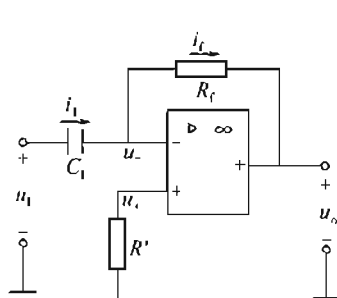


图 7-13 反比例微分运算电路

式(7-12)表明,  $u_o$  与  $u_i$  是积分运算关系, 式中负号反映  $u_o$  与  $u_i$  的相位关系。  $R_1 C_f$  称为积分时间常数, 它的数值越大, 达到某一  $u_o$  值所需的时间越长。

#### 4. 反比例微分运算电路

如果把反比例运算电路中的电阻  $R_1$  换成电容  $C$ , 则成为反比例微分运算电路, 如图 7-13 所示。

根据电路可以得到

$$\begin{aligned} i_1 &= i_c = i_f & u_i &= u_c \\ u_o &= -I_f R_f & i_c &= C_1 \frac{du_c}{dt} \\ u_o &= -R_f C_1 \frac{du_i}{dt} \end{aligned} \quad (7-13)$$

式中  $C_1 R_f$ ——微分时间常数。

### 7.3.3 同相输入运算电路的分析方法

#### 1. 同相比例运算电路

如图 7-14 所示的电路, 输入信号  $u_i$  通过  $R_2$  加到集成运算放大器的同相输入端。电阻  $R_f$  跨接在输出端与反相输入端之间, 使电路工作在闭环状态。经分析可知, 该电路的反馈形式为电压串联负反馈。图 7-14 所示的电路称为同相比例运算电路。对图 7-14 分析可知

$$\begin{aligned} u_+ &= u_- \\ i_1 &= \frac{u_-}{R_1} \\ i_f &= \frac{u_- - u_o}{R_f} \\ i_f &= -i_1 \\ u_i &= u_+ = u_- \end{aligned}$$

整理后得

$$u_o = \left(1 + \frac{R_f}{R_1}\right) u_i \quad (7-14)$$

式(7-14)表明, 输出电压  $u_o$  和输入电压  $u_i$  成比例关系, 比例系数是  $1 + \frac{R_f}{R_1}$ , 而  $u_o$  与  $u_i$  同相位。为了保证差动输入级的静态平衡, 电阻  $R_2$  应满足  $R_2 = (R_1 // R_f)$  的关系。

在图 7-14 所示的电路中,若  $R_1 = \infty$  (即断开  $R_1$ ),这时电路的输出电压  $u_o$  等于输入电压  $u_i$ ,电路称为电压跟随器。电压跟随器有极高的输入电阻和极低的输出电阻,它在电路中能起到良好的隔离作用。若再令  $R_2 = R_f = 0$ ,则电路成为另一种形式的电压跟随器,如图 7-15 所示。

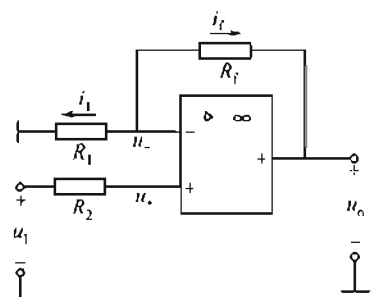


图 7-14 同相比例运算电路

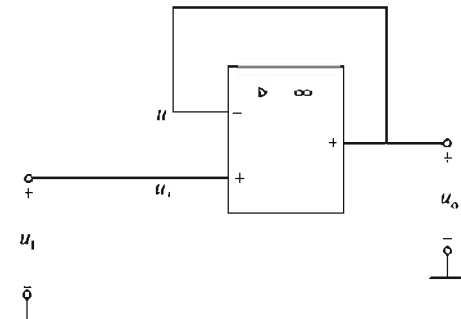


图 7-15 电压跟随器

同相比例运算电路的特点是：

- ① 输出与输入信号相位相同；
- ② 输出信号是输入信号的  $1 + \frac{R_f}{R_1}$  倍，输出信号可能大于或等于输入信号；
- ③ 输入阻抗较大，约等于  $r_{id}$ ；
- ④ 输出阻抗较小；
- ⑤ 同相输入端与反相输入端之间为虚短；
- ⑥ 不存在“虚地”现象；
- ⑦ 存在共模输入信号。

【例 7-2】在图 7-16 所示的电路中，试计算  $u_o$  的大小。

解：图 7-16 是一电压跟随器，电源电压 15V 经两个  $15k\Omega$  的电阻分压后，在同相输入端得到 7.5V 的输入电压。

故

$$u_o = u_i$$

所以

$$u_o = 7.5V$$

可见， $u_o$  只与电源电压和分压电阻有关，其精度和稳定性较高，可用作基准电压。

## 2. 同相加法运算电路

在图 7-17 所示的电路中增加若干个输入回路，可以对多个输入信号实现代数相加运算，图 7-17 是具有两个输入信号的同相加法运算电路。对图 7-17 分析可知

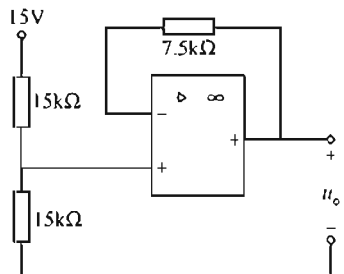


图 7-16 例 7-2 图

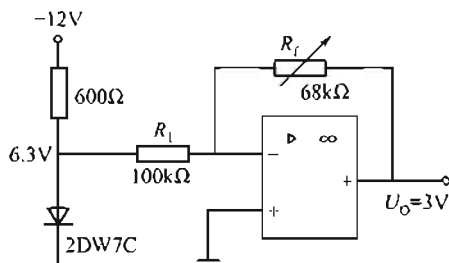


图 7-17 电压-电压变换电路

$$i_2 = \frac{u_{I1} - u_+}{R_2} \quad i_3 = \frac{u_{I2} - u_+}{R_3}$$

因为  $i_+ = 0$ ，所以  $i_2 = -i_3$ 。

由以上各式可得

$$\frac{u_{I1} - u_+}{R_2} = -\frac{u_{I2} - u_+}{R_3}$$

将上式改写为

$$\frac{u_{I1}}{R_2} + \frac{u_{I2}}{R_3} = \left( \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} \right) u_+$$

从反相输入端看

$$\begin{aligned} i_1 &= -i_f & i_1 &= \frac{u_- - 0}{R_1} & i_f &= -\frac{u_- - u_0}{R_f} \\ \frac{u_-}{R_1} &= \frac{u_- - u_0}{R_f} & u_- &= \frac{R_1}{R_f + R_1} u_0 \end{aligned}$$

由  $u_+ = u_-$  得

$$u_0 = \left( 1 + \frac{R_f}{R_1} \right) \left( \frac{R_3 u_{I1}}{R_2 + R_3} + \frac{R_2 u_{I2}}{R_2 + R_3} \right) \quad (7-15)$$

若选取  $R_2 = R_3$  则

$$u_0 = \frac{1}{2} \left( 1 + \frac{R_f}{R_1} \right) (u_{I1} + u_{I2})$$

若选取  $R_f = R_1$  则

$$u_0 = u_{I1} + u_{I2}$$

因而实现了加法运算，图中  $R_2 // R_3 = R_1 // R_f$ 。

### 3. 差分输入运算电路的分析方法

当集成运算放大器的同相输入端和反相输入端都接有输入信号时，称为差分输入运算电路，如图 7-17 所示。对图进行分析可得到如下关系式，即

$$\begin{aligned} u_- = u_+ &= \frac{R_3 u_{I2}}{R_2 + R_3} & i_1 &= \frac{u_{I1} - u_-}{R_1} \\ i_f &= \frac{u_- - u_0}{R_f} & i_1 &= i_f \end{aligned}$$

综合上面的几个关系式可以得到

$$u_0 = \frac{u_{I2} R_3}{R_2 + R_3} \left( 1 + \frac{R_f}{R_1} \right) - \frac{R_f}{R_1} u_{I1}$$

当  $R_3 = R_f$ 、 $R_2 = R_1$  时

$$u_0 = \frac{R_f}{R_1} (u_{I2} - u_{I1}) \quad (7-16)$$

式(7-16)表明，输出电压  $u_0$  与两个输入电压的差值成正比。在  $R_3 = R_f$ 、 $R_2 = R_1$  的条件下，电路也满足了两个输入端对地直流电阻相等的要求。

若再有  $R_1 = R_f$  的条件成立，则式(7-16)又可写成  $u_0 = u_{I2} - u_{I1}$ ，这时图 7-17 所示

的电路就成为一个减法运算电路。差分输入运算电路在测量与控制系统中得到了广泛的应用。

### 7.3.4 信号转换电路

属于信号转换的电路种类很多，主要有电源变换电路和非电量转换成电信号的电路。这些电路属于对运放的直接或间接的应用。

在电源变换电路中，有电压-电压变换、电压-电流变换、电流-电压变换和电流-电流变换。

在非电量转换成电信号的电路中，有光-电转换电路、时间-电压转换电路，还有机械变形、压力、温度等物理量变换成电信号的电路。

#### 1. 电源变换电路

##### (1) 电压-电压变换电路

在一些基准电压源的应用中，如标准稳压管 2CW7C，它的输出电压都是固定的，其值与实际要求的基准电压常常不符，这时就可以用集成运算放大器进行变换。图 7-17 就是电压-电压变换电路，它是将稳压管的稳定电压 6.3V 变换成 3V 基准电压输出。

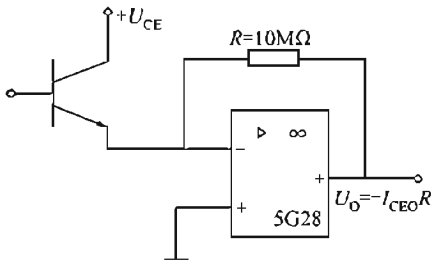


图 7-18 电流-电压变换电路

##### (2) 电流-电压变换电路

在很多电流测量系统中，常采用通过电压测量来指示电流大小的方法。这就要用到电流-电压变换电路，图 7-18 便是电流-电压变换电路。该电路用高阻输入的集成运算放大器 5G28 来测量三极管反向饱和电流  $I_{CEO}$ 。图中  $U_0 = -I_{CEO}R$ ，当  $R$  值给定时， $U_0$  的大小就准确地反映了  $I_{CEO}$  的大小。

#### 2. 非电量转换成电信号的应用电路

##### (1) 把光信号变换成电信号

图 7-19 是一种最简单的光电转换电路，其中  $U_o = -2I_s R_P$ 。

##### (2) 检测物理量变化的运算放大电路

图 7-20 是用来测温度、压力、流量等物理量变化的运算放大电路。当物理量不变时，电桥平衡，电路输出电压为零；当物理量发生变化时，传感元件阻值改变，电桥失衡，于是有一个信号送到放大器的输入端。电路的输出电压反映了这个变化。

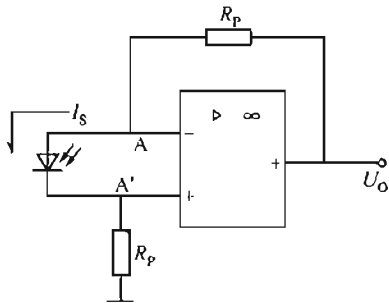


图 7-19 光电转换电路

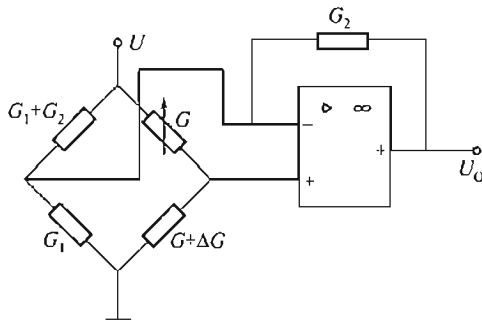


图 7-20 电桥放大器

该电路是使用电桥的失衡输出信号来对物理量的变化进行检测的, 所以又称电桥放大器。

### 7.3.5 集成运放的非线性应用——电压比较器

电压比较器是将一个模拟量的电压信号与一个参考电压相比较, 在二者幅度相等的附近, 输出电压将产生跃变。通常电压比较器输入的是连续变化的模拟信号, 输出的是以高、低电平为特征的数字信号或脉冲信号。电压比较器广泛地用于越限报警、模/数转换、波形变换及信号测量等方面。

#### 1. 工作原理

图 7-21(a) 为反相型电压比较器, 图 7-21(b) 为同相型电压比较器。以图 7-21(a) 为例。

当  $u_i < U_R$  时, 差动输入信号  $U_A - U_{A'} < 0$ ,  $u_o = +U_{om}$ ;

当  $u_i > U_R$  时, 差动输入信号  $U_A - U_{A'} > 0$ ,  $u_o = -U_{om}$ 。

即当输入电压  $u_i > U_R$  时, 电路反转, 输出负饱和电压  $-U_{om}$ ; 当输入电压  $u_i < U_R$  时, 输出正饱和电压  $+U_{om}$ 。

#### 2. 传输特性

输入电压与输出电压的关系特性, 如图 7-22 所示。

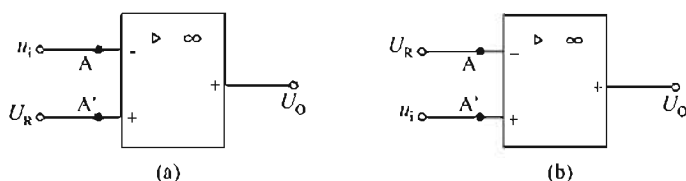


图 7-21 电压比较器

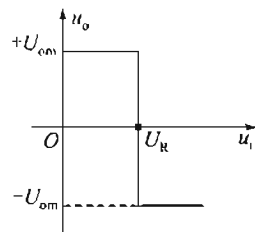


图 7-22 电压传输特性

#### 3. 过零比较器

在图 7-22 所示的反相电压比较器中, 当参考电压  $U_R = 0$  时, 该电路就变为一个过零比较器, 其关系是: 当  $u_i > 0$ ,  $U_R > 0$  时,  $U_o = -U_{om}$ ;

当  $u_i < 0$ ,  $U_R < 0$  时,  $U_o = +U_{om}$ 。

过零比较器如图 7-23 所示, 利用这个特性可以进行波形变换, 如将输入的正弦波变换成矩形波电压输出, 如图 7-24 所示。

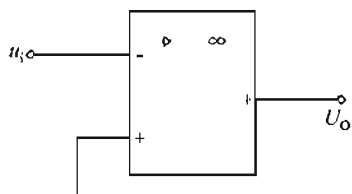


图 7-23 过零比较器

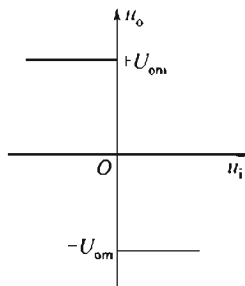


图 7-24 传输特性

## 本章小结

1. 直接耦合放大电路是组成集成运算放大器的基础。直接耦合放大电路的主要问题是零点漂移。抑制的办法是采用差动放大电路。
2. 集成运算放大器有“万能放大器”的称号，是因为集成运算放大器的品种很多，应用很广，它与各种反馈网络可以组成不同种类的应用。
3. 理想运算放大器的工作条件是运算放大器工作分析的基础。
4. 随着大规模、超大规模集成电路的飞速发展，模拟与数字之间的差别越来越模糊，运算放大器的应用空间将更为广阔。

## 练习题

- 7.1 电路如图 7-25 所示。若要电压放大倍数  $A_{uf} = -27$ ，当输入端电阻  $R_1 = 10\text{k}\Omega$  时，选用负反馈电阻  $R_f$ 。
- 7.2 电路如图 7-26 所示。  
(1) 已知：  $R_f = 20\text{k}\Omega$ ，  $R_1 = R_2 = R_3 = 10\text{k}\Omega$ ，  $U_{i1} = 0.1\text{V}$ ，  $U_{i2} = 0.2\text{V}$ ，  $U_o = -2\text{V}$ ，求  $U_{i3}$  的大小。  
(2) 若  $R_f = R_1 = R_2 = R_3 = 10\text{k}\Omega$ ，  $U_{i1} = 0.1\text{V}$ ，  $U_{i2} = 0.2\text{V}$ ，  $U_{i3} = 0.52\text{V}$ ，求  $U_o$  的大小。
- 7.3 求图 7-27 所示电路的输出电压和输入电压的关系。
- 7.4 在图 7-28 所示电路中，当输出电压  $u_o \geq 3\text{V}$  时，驱动报警信号；当输入信号  $u_{i1} = u_{i2} = u_{i3} = 0$  时，输出电压  $u_o = 0$ 。若  $u_{i1} = 1\text{V}$ ，  $u_{i2} = -4.5\text{V}$ ，问  $u_{i3}$  多大时才发出报警信号？
- 7.5 如图 7-29 所示电路，其输入信号电压  $u_{i1}$  和  $u_{i2}$  的波形如图中所示，画出对应的输出电压的波形。
- 7.6 如图 7-30 所示为积分电路，图 7-30(b) 为输入矩形波信号（幅度为  $10\text{V}$ ，频率为  $50\text{Hz}$ ）。当  $t \leq 0$  时，试在图 7-30(b) 上画出  $u_o$  的波形。

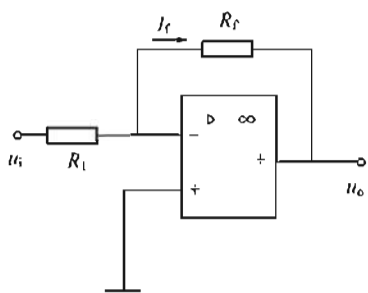


图 7-25 题 7.1 图

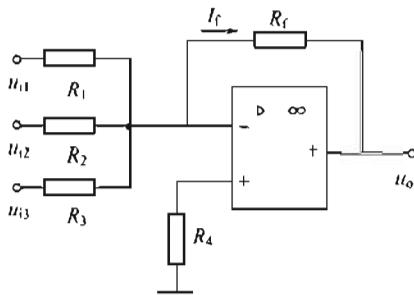


图 7-26 题 7.2 图

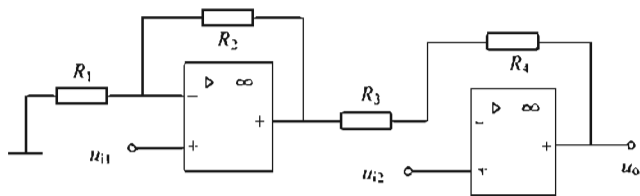


图 7-27 题 7.3 图

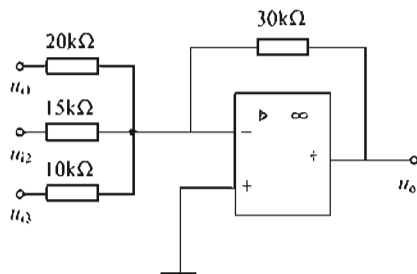


图 7-28 题 7.4 图

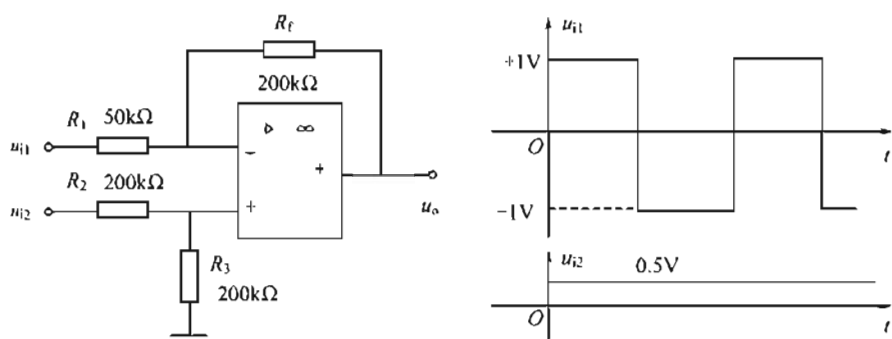


图 7-29 题 7.5 图

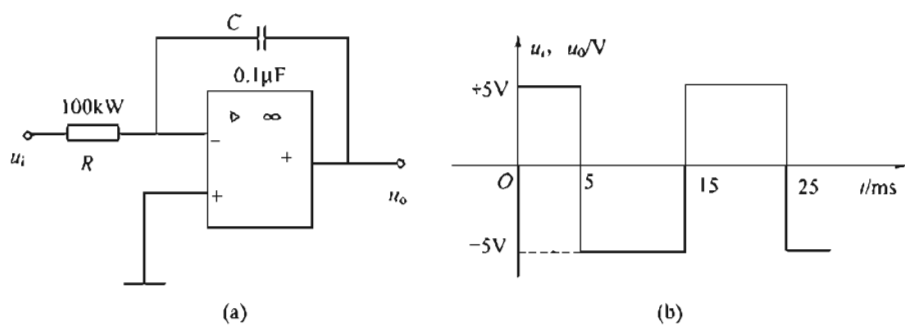


图 7-30 题 7.6 图



## 第 8 章 晶 閘 管 及 可 控 整 流

【内容提要】本章主要讨论晶闸管的基本特性及其主要参数；可控整流电路的基本原理和基本的分析方法；晶闸管的过电压及过电流保护。

### 8.1 晶 閘 管

晶闸管又称可控硅，是硅晶体闸流管的简称。晶闸管是大功率变流器件，利用其整流可控特性可方便地对大功率电源进行控制和变换。它具有体积小、重量轻、耐压高、容量大、使用维护简单、控制灵敏等优点，所以在生产上得到了广泛的应用。

晶闸管的主要用途有：

① 可控整流。把交流电变换为大小可调的直流电称为可控整流。例如，直流电动机调压调速，电解、电镀电源均可采用可控整流供电。

② 有源逆变。有源逆变是指把直流电变换成与电网同频率的交流电，并将电能返送给交流电源。例如，目前采用的高压输电工程，将三相交流电先变换成高压直流电，再进行远距离输送，到目的地后，再利用有源逆变技术把直流电变成与当地电网同频率的交流电供给用户。

③ 交流调压。交流调压是指把不变的交流电压变换成大小可调的交流电压例如，用于灯光控制、温度控制及交流电动机的调压调速

④ 变频器。把某一频率的交流电变换成另一频率的交流电的设备称为变频器。例如，晶闸管中频电源、不停电电源（UPS），异步电动机变频调速中均含有变频器。

⑤ 无触点功率开关。用晶闸管可组成无触点功率开关取代接触器、继电器，适用于操作频繁的场所。例如，可用于控制电动机的正反转和防爆、防火的场合。

晶闸管包括普通晶闸管、双向晶闸管、快速晶闸管、可关断晶闸管、光控晶闸管和逆导晶闸管等。由于普通晶闸管的应用十分广泛，故本章着重介绍普通晶闸管。

#### 8.1.1 晶 閘 管 的 结 构

晶闸管是用硅材料制成的半导体器件，有三种结构形式：螺栓式、平板式和塑料封装式。平板式又分为风冷平板式和水冷平板式。

晶闸管的结构及图形符号如图 8-1 所示，它有三个电极：阳极 A、阴极 K 和门极 G。螺栓式晶闸管的阳极是紧栓在铝制散热器上的，而平板式晶闸管则用两个彼此绝缘的而形状相同的散热器把阳极与阴极紧紧夹住。

晶闸管的内部结构如图 8-2 所示，它的管芯由四层（ $P_1$ 、 $N_1$ 、 $P_2$ 、 $N_2$ ）三端（A，K，G）半导体器件构成，具有三个 PN 结，即  $J_1$ 、 $J_2$ 、 $J_3$ ，由此可见，晶间管是一个四层三端三结大功率半导体元件。

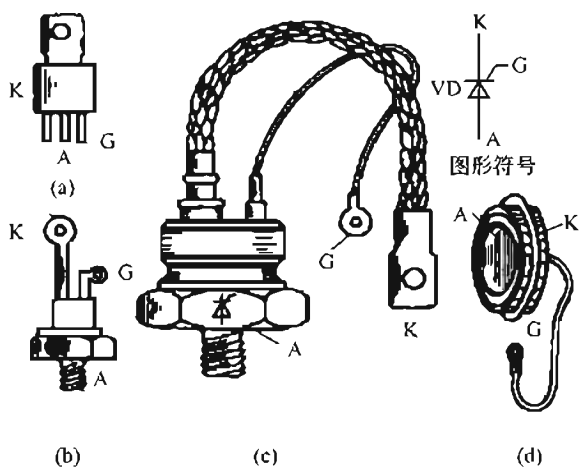


图 8-1 晶闸管的结构及图形符号

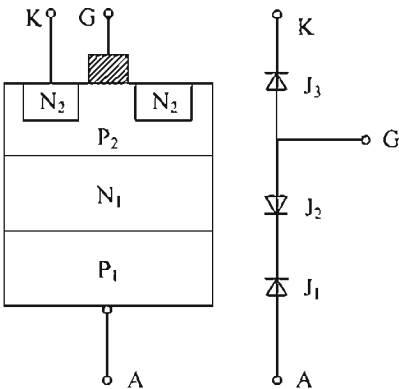


图 8-2 晶闸管内部结构示意图

8.1.2 工作原理

为了搞清晶闸管的导通和关断条件，可用如图 8-3 所示电路做实验说明。晶闸管与灯泡串联，经开关  $S_1$  接到电源  $E_a$  上，门极与阴极经开关  $S_2$  接到电源  $E_g$  上。开关  $S_1$ 、 $S_2$  皆为双掷开关，可有正、零、反三种位置。首先规定当  $E_a$  的正极经灯泡接阳极 A、负极接阴极 K。称晶闸管承受正向阳极电压；当  $E_a$  的负极接阳极 A，正极接阴极 K，称晶闸管承受反向阳极电压。当  $E_g$  的正极接门极 G，负极接阴极 K 时，称晶闸管承受正向门极电压；当  $E_g$  的负极接门极 G，正极接阴极 K 时，称晶闸管承受反向门极电压。

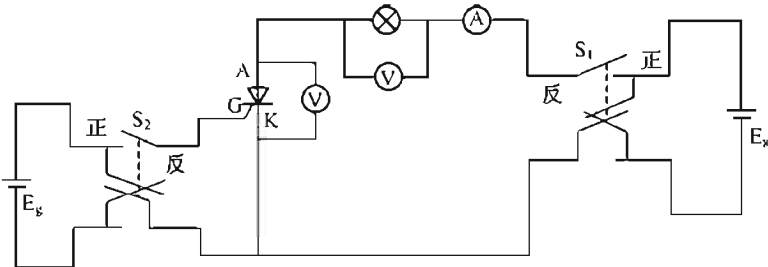


图 8-3 晶闸管实验电路

然后按表 8-1 所列各项逐一进行实验，实验条件和结论见表 8-1。

表 8-1 晶闸管导通与判断实验

实验序号		实验前灯的状态	晶闸管承受电压		实验后灯的状态	晶闸管的电压 $U_T$	灯泡两端电压 $U_R$	晶闸管中的电流 $I_T$
			阳极电压	门极电压				
导通实验	1			反向				
	2			0				
	3		反向	正向	暗	$E_a$	零	零
	4			反向				
	5	暗	正向	0				
	6			正向				
关断实验	7			正向				
	8	亮	正向	0	亮	1V 左右	约为 $E_a$	约为 $\frac{E_a}{R}$
	9			反向				
	10	亮	正向逐渐减至零	任何	暗	随正向电压逐渐减小， $I_T$ 下降。当 $I_T$ 下降至某一小数值时，突变为零时， $U_T$ 升为 $E_a$ ， $U_R$ 降为零		

从实验中得出晶閘管的导通与关断的主要结论如下。

① 晶閘管承受反向阳极电压时，不论门极承受何种电压，总处于关断状态，不会导通。

② 晶閘管导通必须同时具备两个条件：一是承受正向阳极电压；二是承受正向门极电压。

③ 晶閘管一旦导通，门极便失去控制作用。

④ 晶閘管导通后，当减小电源电压  $E_a$ ，使流过晶閘管的电流减小到某数值时，晶閘管便会关断，这种维持晶閘管导通的最小电流称为维持电流。

⑤ 晶閘管关断时承受全部电源电压；导通后阳极与阴极间的管压降很小，只有 1V 左右，电源电压主要降落在负载上。

### 8.1.3 晶閘管的主要参数

要正确使用晶閘管，除要了解晶閘管的工作原理外，还要掌握其参数，以便更好地使用晶閘管。以下介绍晶閘管的几个主要参数。

#### 1. 正向阻断峰值电压 $U_{DRM}$

在门极断开和晶閘管正向阻断的情况下，结温为额定值时，允许重复加到晶閘管阳极与阴极之间的正向峰值电压，称为正向阻断峰值电压，用  $U_{DRM}$  表示。

#### 2. 反向阻断峰值电压 $U_{RRM}$

在门极断开的情况下，结温为额定值时，允许重复加到晶閘管阳极与阴极之间的反向峰值电压，称为反向阻断峰值电压，用  $U_{RRM}$  表示。

#### 3. 额定电压 $U_{TN}$

取  $U_{DRM}$  与  $U_{RRM}$  中较小者，按照相应的电压等级将其定义为晶閘管的额定电压。

在实际应用中，由于晶閘管的过电压、过电流能力差，所以在选择晶閘管额定电压值时，应考虑 2~3 倍的安全裕量。如在单相交流电路中有效值为 220V 时，最大值为 311V，则应选用晶閘管额定电压为 600V、700V 或者 800V。

#### 4. 额定电流 $I_{T(AV)}$

在环境温度为 40℃ 和标准散热条件下，按照相应的电流系列，将晶閘管的阳极与阴极之间允许通过的正弦半波电流的平均值定义为晶閘管的额定电流。

实际中晶閘管的过电流能力较差，选择额定电流时也应该考虑 1.5~2 倍的安全裕量。

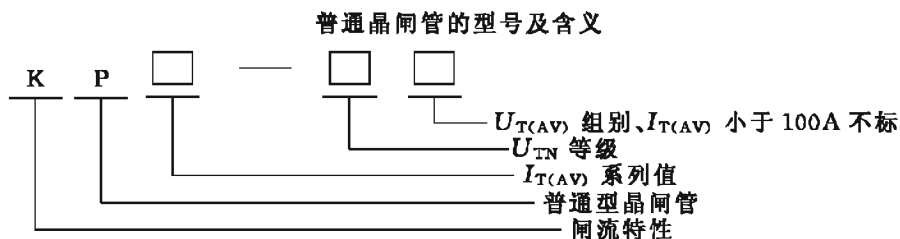
#### 5. 维持电流 $I_H$

在规定的环境温度下和门极断开的情况下，维持晶閘管继续导通所需要的最小阳极电流称为维持电流。当晶閘管的阳极电流小于维持电流时，晶閘管关断。

#### 6. 通态平均电压 $U_{T(AV)}$

在规定的环境温度和标准散热条件下，元件通以额定电流时，阳阴极之间的管压降的平均值称为通态平均电压，用  $U_{T(AV)}$  表示， $U_{T(AV)}$  是有级别的，从 A 级到 I 级，A 级为 0.4V，I 级为 1.2V。

例如 KP200—9B 表示普通型晶閘管，额定电流为 200A，额定电压为 9 级，即 900V，通态平均电压为 B 级，即 0.5V。



## 8.2 单相可控整流电路

在实际生产中，很多设备需要大小可调的直流电，例如，电解、电镀、电焊等设备。把交流电变成直流电的过程叫整流。由晶闸管组成的可控整流电路可以把交流电变成直流电，达到直流电源输出电压可调的目的。

### 8.2.1 单相半波可控整流电路

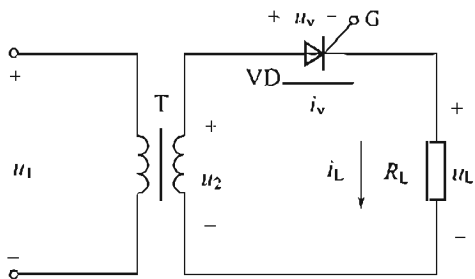


图 8-4 单相半波可控整流电路图

如图 8-4 所示是单相半波可控整流电路，由晶闸管 VD、负载  $R_L$  和单相整流变压器 T 组成。T 是用来变换电压的， $u_2$  为正弦交流电， $u_L$ 、 $i_L$  分别为整流输出电压瞬时值和负载电流瞬时值， $u_v$ 、 $i_v$  分别为晶闸管两端电压瞬时值和流过电流瞬时值。

电路工作时波形如图 8-5 所示。

在图 8-5 的  $0 \sim \omega t_1$  期间，晶闸管承受正向阳极电压，触发电路未送出门极触发脉冲，所以，晶闸管保持阻断状态，无直流电压输出。

在  $\omega t_1$  时刻，触发电路送出触发脉冲，晶闸管被触发导通若忽略管电压降，负载两端电压就是变压器次级电压  $u_2$ ，负载电流  $i_L$  的波形与  $u_L$  的波形相似。

当  $\omega t = \pi$  时， $u_2$  下降到零，晶闸管电流也下降到零而关断，电路无输出。

在  $u_2$  的负半周，即  $\omega t$  为  $\pi \sim 2\pi$  时，晶闸管承受反向电压，处于以反向阻断状态，负载两端电压  $u_L$  为零。

下一个周期循环往复。

在单相整流电路中把晶闸管从承受正向电压的时刻起，到触发导通时所对应的电角度称为控制角，用  $\alpha$  表示，在图 8-5 中， $0 \sim \omega t_1$  期间所对应的电角度为  $\alpha$ 。

把晶闸管在一个周期内导通所对应的电角度叫导通角，用  $\theta$  表示，在图 8-5 中， $\omega t_1 \sim \pi$  所对应的电角度为  $\theta$ 。

由图可以看出，在单相半波整流电路中，控制角  $\alpha$  愈小，即导通角  $\theta$  愈大，负载电压、电流

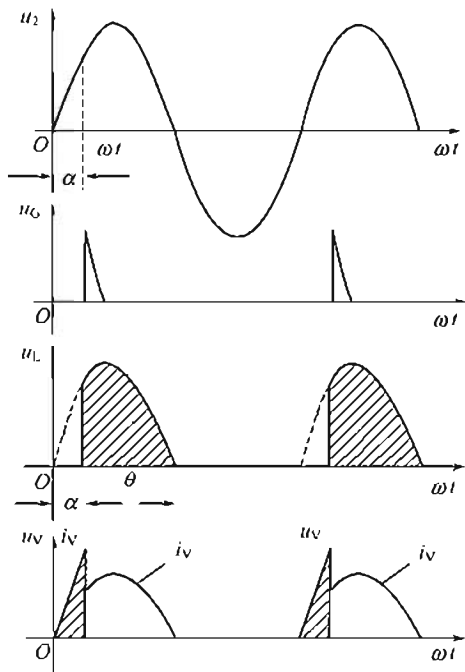


图 8-5 波形图

的平均值就愈大。所以改变控制角  $\alpha$  的大小, 就可以改变输出电压值, 达到调压的目的。

各电量计算公式如下。

1. 负载上直流平均电压  $\overline{U_L}$

根据平均值的定义,  $u_L$  波形的平均值  $U_L$  为

$$\overline{U_L} = \frac{1}{2\pi} \int_{\alpha}^{\pi} \sqrt{2} U_2 \sin \omega t d\omega t = 0.45 U_2 \times \frac{1 + \cos \alpha}{2} \quad (8-1)$$

2. 流过负载电流的平均值为

$$\overline{I_L} = \frac{\overline{U_L}}{R_L} \quad (8-2)$$

3. 晶閘管元件承受的最大正、反向电压均为  $\sqrt{2} U_2$

**【例 8-1】** 有一电阻性负载, 其阻值为  $15\Omega$ , 要求负载两端的电压平均值为  $74.2V$ , 采用单相半波整流电路, 直接由交流电  $220V$  供电。试求晶閘管的导通角  $\theta$ 、晶閘管中通过电流的平均值。并选择晶閘管元件。

解: 由式(8-1) 可知:

$$74.2 = 0.45 \times 220 \times (1 + \cos \alpha) / 2$$

得  $\alpha = 60^\circ$

所以导通角  $\theta = 180^\circ - \alpha = 120^\circ$

晶閘管中通过的电流平均值为

$$\overline{I_L} = \frac{\overline{U_L}}{R_L} = \frac{74.2}{15} A \approx 5 A$$

晶閘管承受的最大反向电压为

$$U_{TM} = \sqrt{2} U_2 = \sqrt{2} \times 220 V \approx 311 V$$

按 2 倍余量选择晶閘管元件, 则额定电流为  $10A$ , 额定电压为  $600V$ , 型号为 KP10-6。

**【例 8-2】** 单相半波可控整流电路直接由交流电网  $220V$  供电, 要求输出的直流平均电压在  $50 \sim 92V$  之间可调, 试求控制角  $\alpha$  的可调范围。

解: 由式(8-1) 可知:

$\overline{U_L} = 50V$  时,

$$\cos \alpha = \frac{2 \overline{U_L}}{0.45 U_2} - 1 \approx 0 \quad \alpha = 90^\circ$$

$\overline{U_L} = 92V$  时,

$$\cos \alpha = \frac{2 \overline{U_L}}{0.45 U_2} - 1 \approx 0.8 \quad \alpha = 30^\circ$$

故控制角  $\alpha$  的可调范围为  $30^\circ \sim 90^\circ$ 。

### 8.2.2 单相半控桥式整流电路

如图 8-6(a) 所示的电路为单相半控桥式整流电路, 其中晶閘管  $VD_3$ 、 $VD_4$  的阴极连在一起, 为共阴极接法, 二极管  $VD_1$ 、 $VD_2$  阳极连在一起, 为共阳极接法。

如图 8-6(b) 所示, 当  $u_2$  处于正半周且电角度  $\omega t$  为控制角  $\alpha$  时, 触发晶閘管由于  $VD_2$  正偏导通,  $VD_3$  承受正向电压, 所以  $VD_2$  与  $VD_3$  就导通, 电流  $I_L$  由  $a \rightarrow VD_3 \rightarrow$  负载  $\rightarrow R_L \rightarrow VD_2 \rightarrow b$  端, 此时负载电压  $U_L$  等于  $u_2$ ,  $\omega t = \pi$  时,  $VD_3$ ,  $VD_2$  关断。

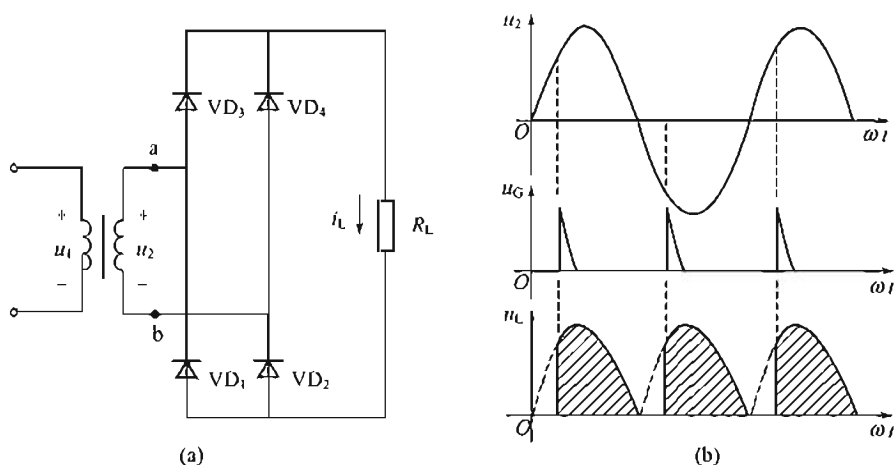


图 8-6 单相半控桥式整流电路

当  $u_2$  处于负半周时，将以相同的控制角触发晶闸管， $VD_4$  与  $VD_1$  导通，电流  $i_L$  从  $b \rightarrow VD_4 \rightarrow$  负载  $R_L \rightarrow VD_1 \rightarrow a$  端，直到  $\omega t = 2\pi$  时， $I_L = 0$ ， $VD_4$  关断，负载电阻上得到一个缺角全波电压波形。

各电量计算如下：

1. 负载上电压的平均值为

$$\bar{U}_L = \frac{1}{\pi} \int_{\alpha}^{\pi} \sqrt{2} U_2 \sin \omega t d\omega t = 0.9 U_2 \times \frac{1 + \cos \alpha}{2} \quad (8-3)$$

2. 负载电流的平均值为

$$\bar{I}_L = \frac{\bar{U}_L}{R_L} \quad (8-4)$$

3. 流过元件的平均电流为

$$I_V = \frac{I_L}{2} \quad (8-5)$$

4. 晶闸管及二极管承受的最大正、反向电压均为  $\sqrt{2} U_2$

## 8.3 晶闸管的触发电路

晶闸管由关断转为导通，除阳极要承受正向电压外，门极还要加上适当的触发电压，改变触发脉冲输出时刻便可达到改变输出直流电压的目的。为门极提供触发电压和电流的电路称为触发电路。触发电路的类型很多，由于单结晶体管触发电路输出的脉冲具有前沿陡、抗干扰能力强和温补性能等特点，应用十分广泛。本节只介绍单结晶体管触发电路。

### 8.3.1 单结晶体管

1. 结构

单结晶体管的原理结构如图 8-7(a) 所示，图中  $e$  为发射极， $b_1$  为第一基极， $b_2$  为第二基极。用一块高电阻率的 N 型半导体硅片连接两个基极，硅片本身电阻约为  $3 \sim 10 k\Omega$ ，在硅片靠近  $b_2$  极处用 P 型杂质引出一个电极  $e$  极，形成 PN 结。

图 8-7(b)、(c) 分别为单结晶体管的等效电路和规定的图形符号。因此此晶体管仅有一

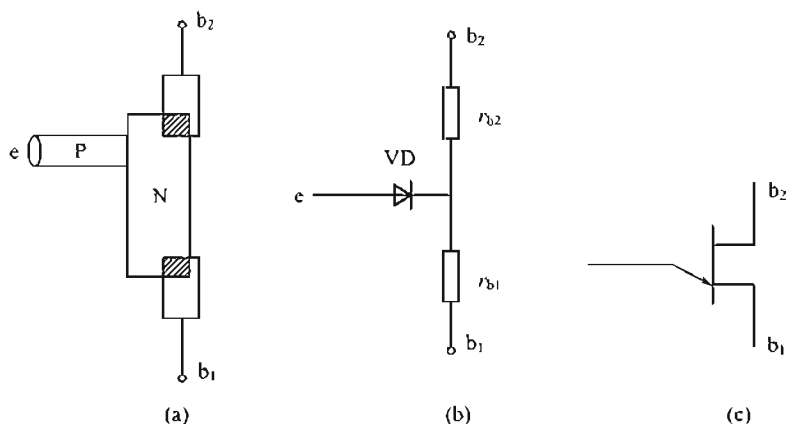


图 8-7 单结晶体管的原理结构

个 PN 结和两个基极，所以也称为“单结管”或“双基极二极管”。

单结晶体管  $b_1$  与  $b_2$  极之间正、反向电阻相等，约为  $3 \sim 10 \text{ k}\Omega$ ，而  $e$  极和  $b_1$  极或  $b_2$  极正向电阻小于反向电阻且  $r_{b1} > r_{b2}$ ，使用万用表  $R \times 1 \text{ k}$  挡来判别单结晶体管的发射极是很容易的，只要发射极判别对了，即使  $b_1$  与  $b_2$  接反了也不会烧坏单结晶体管，只是没有脉冲或输出脉冲幅度很小。

## 2. 单结管的伏安特性

单结管伏安特性是指在第二基极  $b_2$  与第一基极  $b_1$  之间加上固定直流正向电压  $U_{bb}$ ，发射极电流  $I_e$  与发射极正向电压之间的关系曲线  $I_e = f(U_e)$ ，如图 8-8(b) 所示，图 8-8(a) 为测试电路。

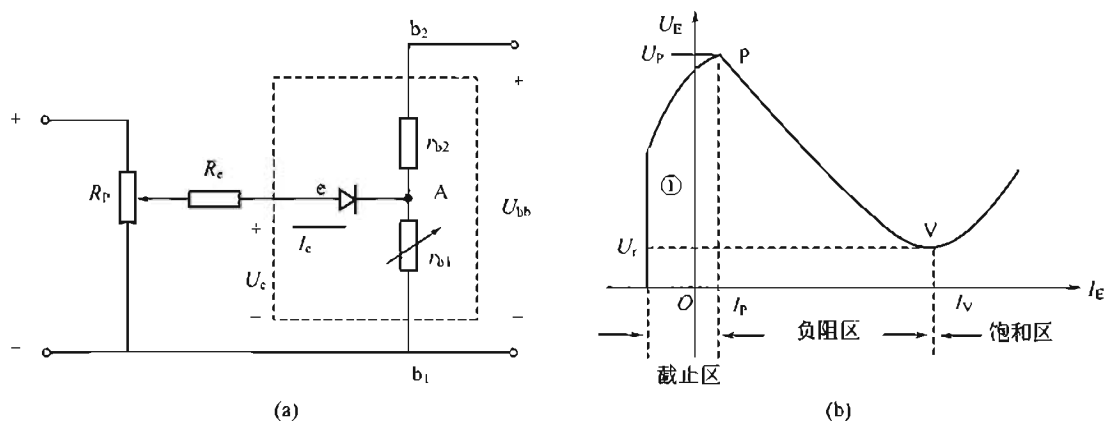


图 8-8 单结晶体管试验电路及伏安特性曲线

单结晶体管的伏安特性分为下面三个阶段。

### (1) 截止区

当基极电压  $U_{bb}$  为零时，单结晶体管的伏安特性如图 8-8(b) 中①曲线所示。

当  $U_{bb}$  不等于零时，等效电路中点 A 和第一基极  $b_1$  之间的电压称为阈值电压：

$$U_A = \frac{r_{b1} U_{bb}}{r_{b1} + r_{b2}} = \eta U_{bb} \quad (8-6)$$

$\eta$  称为单结晶体管的分压比。

随着  $U_e$  的增大，反向漏电流减小。当  $U_e = U_A$  时，等效电路中二极管的电压为零，则

$I_e=0$ ；再增大  $U_e$ ，PN 结开始承受正向电压，发射极正向漏电流增大，当  $U_e=U_P=U_A+U_V$  ( $U_V$  为二极管正向压降) 时，等效二极管导通，单结晶体管由截止变为导通，此时点 P 称为峰点，点 P 所对应的电压称为峰点电压，所对应的电流称为峰点电流。所以，峰点电压  $U_P$  是单结晶体管由截止变为导通所需要的最小发射极电压。

### (2) 负阻区 PV 段

当发射极电压增大到峰点电压  $U_P$  时，等效二极管导通，这时发射极电流  $I_e$  开始剧增，发射极向  $eb_1$  区间注入大量空穴载流子， $r_{b1}$  值变小，于是等效电路点 A 的电压变小， $I_e$  进一步增大，在元件内部形成强烈正反馈，直到  $r_{b1}$  减至最小值  $5\sim 20\Omega$  时， $U_A$  也减到最小值，形成 PV 段。在 PV 段动态电阻  $\Delta R_{eb1}=\Delta U_e/\Delta I_e$  为负值，又称为负阻区，曲线上点 V 为谷点，点 V 对应的电压、电流分别为谷点电压  $U_V$  和谷点电流  $I_V$ 。

### (3) 饱和 VN 段

当  $r_{b1}$  减小到最小值时，电路工作在特性曲线点 V 处，如再增大发射极电流，发射极电压将缓慢增大，动态电阻恢复到正常值。单结晶体管处于饱和导通状态。所以谷点电压是维持单结晶体管导通的最小发射极电压。

总之，单结晶体管伏安特性曲线大致可分为三个区：截止区、负阻区和饱和区，当  $U_e<U_P$  时单结晶体管处于截止状态；当  $U_e>U_P$  时单结晶体管由负阻区进入饱和区；当  $U_e>U_V$  时单结晶体管处于饱和状态。

国产单结晶体管的型号有 BT31、BT33、BT35 等，其中 B 表示半导体，T 表示特种管，3 表示有 3 个电极，第四个数表示耗散功率为 100mW，300mW，500mW。

## 8.3.2 单结晶体管触发电路

利用单结晶体管的负阻特性及 RC 的充、放电特性可组成单结晶体管自激振荡电路，如图 8-9 所示。

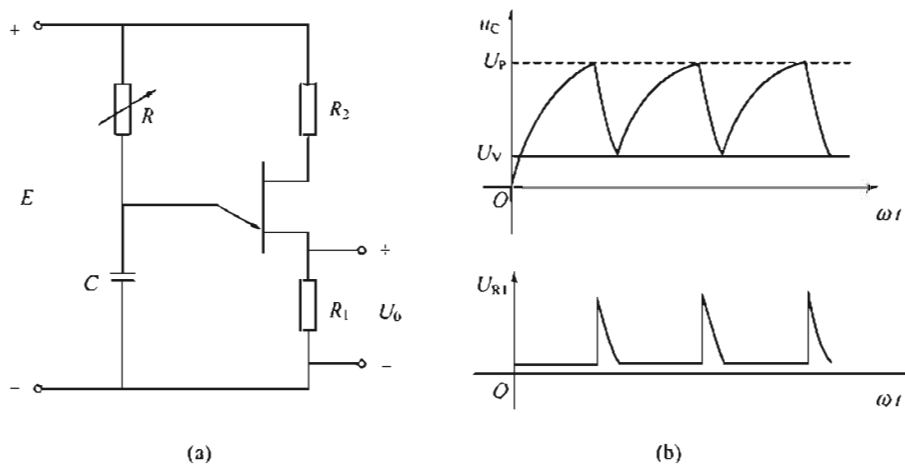


图 8-9 单结晶体管自激振荡电路

假定在接通直流电源  $U_{bb}$  之前，电容  $C$  上没有电压，一旦接通  $U_{bb}$ ，电源立即通过  $R$  对电容充电，电容两端电压按指数函数规律增长。当  $u_c>U_P$  时，单结晶体管立即导通，于是电容  $C$  立即就向输出电阻  $R_1$  放电。由于  $R_1$  很小 ( $50\sim 100\Omega$ )，所以放电速度非常快，在输出电阻  $R_1$  上形成尖脉冲电压。当  $u_c$  下降到谷点电压  $U_V$  之后，单结晶体管截止，发射极电流  $I_e$  几乎为零，输出尖脉冲停止，电容  $C$  再次充电。



如此周而复始，在电容  $C$  上形成了类似锯齿的锯齿波，在输出端  $R_1$  上形成了一系列的尖脉冲。

改变可变电阻  $R$  或电容  $C$  均能改变脉冲的输出时刻，一般都是通过改变  $R$  实现的，因为改变  $R$  比较容易且投资又小。一般  $C$  值取  $0.1 \sim 0.47 \mu\text{F}$ 。 $C$  值太小会造成触发功率不够， $C$  值过大最小控制角增大，移相范围变小。

$R_1$  在  $50 \sim 100 \Omega$  之间取值为宜， $R$  值太小，则放电速度太快，脉冲太窄且幅度小，不利于触发晶閘管， $R_1$  太大，将有可能发生由于流过未导通单结管的漏电流在  $R_1$  上产生的“残压”太大，而导致晶閘管误导通。

$R_2$  是温度补偿电阻，因峰点电压  $U_p = \eta U_{bb} + U_v$ ，分压比  $\eta$  不随温度的变化而变化，但  $U_v$  随温度上升而下降。所以峰点电压随温度上升而下降，将会引起  $U_p$  不稳定，影响控制角。在电路中接入不随温度变化的电阻  $R_2$ ，当温度升高时， $U_v$  值虽然下降，而  $r_{bb}$  却增大，电流  $I_{bb} = E / (R_1 + R_2 + r_{bb})$  减小， $R_1$ 、 $R_2$  上电压降相应减小，而  $E$  为恒定值，于是  $U_{bb} = E - (U_{R1} + U_{R2})$  增大，以  $\eta U_{bb}$  的增加来补偿  $U_v$  的减小，从而维持  $U_p$  不变，使触发电路工作点基本稳定不变。 $R_2$  一般取  $200 \sim 600 \Omega$ 。

### 8.3.3 单结晶体管同步触发电路

如图 8-10 所示，主电路和触发电路由电压  $u_1$  同时供电。触发电路经单相半波整流后，再经稳压管  $VD_1$  削波得到梯形波电压。在梯形波由正到负过零点时，电容  $C$  放电，因而电容  $C$  能在主电路晶閘管开始承受正向电压，从零开始充电。每周周期产生的第一个有用的触发尖脉冲时间都一样，即每周期的控制角  $\alpha$  都相同，因而触发电路与主电路取得了同步，致使  $U_L$  的波形有规律地调节变化。

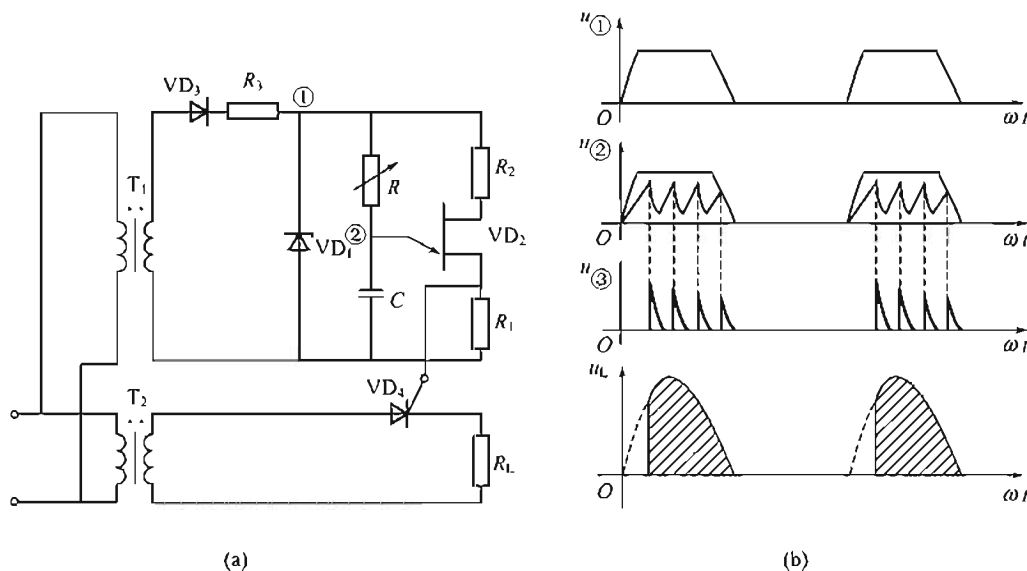


图 8-10 单结晶体管同步触发电路

晶閘管的导通角和输出电压平均值都保持不变。

改变电阻  $R$  可改变输出电压平均值， $R$  增大时，电容  $C$  充电变慢，使每一周期出现第一个脉冲的时间推迟，即控制角增大，则晶閘管的导通角和输出电压平均值都变小。因此，调节电阻  $R$  就可达到调压的目的。

## 8.4 晶闸管的保护

晶闸管的主要缺点是过载能力差，在实际应用时必须加以保护，以防损坏。

### 8.4.1 过电流保护

造成晶闸管过电流的主要原因是：电网电压波动太大，负载超过允许值，电路中晶闸管误导通以及击穿短路等。

因为晶闸管承受过电流的能力比一般电器元件差，所以必须在极短时间内把电源断开或把电流值降下来，最常用的方法是采用快速熔断器。

快速熔断器是最有效、最简单的过电流保护元件，专门为保护大功率半导体元件而制造，简称快熔，与普通熔断器相比具有快速熔断的特性，在通常的短路电流时，熔断时间小于 20ms，能保证在晶闸管损坏之前快速切断短路故障。

快速熔断器的熔体采用一定形状的银质熔丝，周围填充以石英砂，构成封闭式熔断器。银质熔丝的导热性好、热量小，与普通的熔丝相比，在同样的过电流倍数下，银质熔丝的熔断时间要短得多。我国目前生产的快速熔断器中大容量的有 RTK，RS3，RS0；小容量的有 RSI 系列。

快速熔断器的接法一般有如下三种接法。

- ① 与晶闸管元件串联，流过快熔的电流就是流过晶闸管的电流，保护最直接可靠，如图 8-11 所示，图中 FU 即快速熔断器；
- ② 接在交流侧，如图 8-12 所示。
- ③ 接在直流侧，如图 8-13 所示。

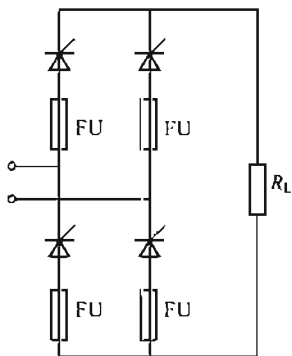


图 8-11 快速熔断器图的接法

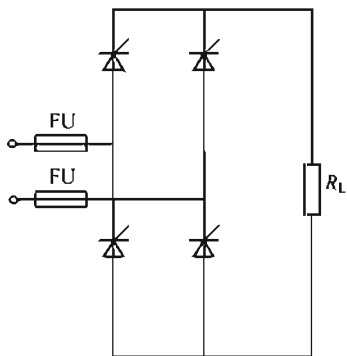


图 8-12 快速熔断器图的接法

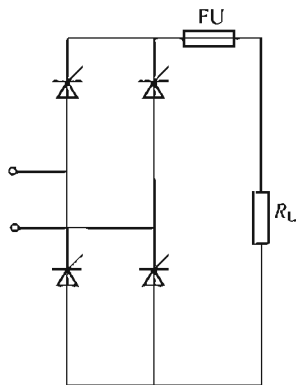


图 8-13 快速熔断器的接法

图 8-12、图 8-13 这两种接法，虽然快速熔断器的数量用得较少，但保护效果不如图 8-11，所以，这两种接法较少被采用。

选择快速熔断器时要考虑以下几点：

- ① 快速熔断器的额定电压应大于线路正常工作电压；
- ② 快速熔断器的额定电流应大于或等于内部熔体的额定电流；
- ③ 熔体的额定电流是有效值，用  $I_{FU}$  表示，选择时取  $I_{FU} = I_{T(AV)}$ 。

其中， $I_{T(AV)}$  为被保护的晶闸管的额定电流； $I_{FU}$  为快速熔断器熔体的电流有效值。

由于晶閘管额定电流在选择时已考虑了 1.5~2 倍的安全裕量，因而取  $I_{FU} = I_{T(AV)}$ 。例如，20A 晶閘管就选配熔体为 20A 的快速熔断器与之相串联即可。对于小容量整流装置也可以用普通 RL1 系列熔断器代替，但是熔体的额定电流只能按晶閘管额定电流的 1/3~2/3 来选配。

8.4.2 过电压保护

整流元件两端的电压远远超过额定电压的现象称为过电压。晶閘管元件的过电压能力较差，当加在晶閘管元件两端电压达到反向击穿电压时，短时间就会造成晶閘管损坏。

电路中出现过电压的原因及分类有下面几种：

- ① 变压器初、次级合闸时产生的过电压称为操作过电压；
- ② 晶閘管由正向导通转为反向阻断引起的过电压称为换相过电压；
- ③ 直流侧快速熔断器熔断时引起的过电压称为直流侧过电压。

为了抑制过电压，常在晶閘管电路中接入阻容吸收电路，因为电路断开时，电路中电感储存的能量在极短的时间要释放出来，电路中接电容的目的方面是将电感储存的磁场能量转化为电场能量，另一方面利用电容  $C$  两端电压不能突变来抑制过电压。

串联电阻的目的是为了在能量转化过程中消耗部分能量，同时抑制  $LC$  高频振荡，如换相过电压；图 8-14(c) 中  $RC$  并接在直流侧抑制直流侧过电压。

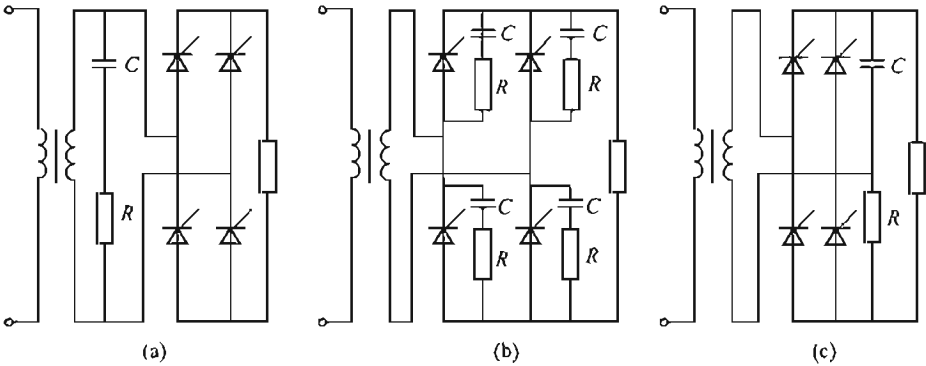


图 8-14 晶閘管的过电压保护

8.5 双向晶閘管简介

双向晶閘管和普通晶閘管一样，也有塑料封装型、螺栓型和平板压接型等几种不同的结构。塑料封装型元件的电流容量只有几安培，目前，台灯调光、家用风扇调速多用此种形式，螺栓式电流容量为几十安培，大功率双向晶閘管元件都是平板压接型结构。

双向晶閘管的图形符号如图 8-15 所示，从外部看双向晶閘管有三个引出端，分别是主端子  $A_1$ 、主端子  $A_2$  和门极  $G$ ，其中主端子  $A_1$  和门极  $G$  从同一面引出，主端子  $A_2$  从另一面引出。

双向晶閘管主端子在不同极性下都具有导通和阻断能力，门极电压相对于主端子  $A_1$  无论是正还是负都有可能控制双向晶閘管导通，因而按门极极性和主端子的极性组合可能有以下四种触发方式。

- ①  $I_+$  触发方式：对主端子电压  $A_2$  为正、 $A_1$  为负；对门极电压

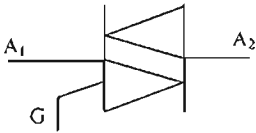


图 8-15 双向晶閘管的图形符号

G 为正,  $A_1$  为负。

② I- 触发方式: 对主端子电压  $A_2$  为正、 $A_1$  为负; 对门极电压 G 为负、 $A_1$  为正。

③ III+ 触发方式: 对主端子电压  $A_2$  为负、 $A_1$  为正; 对门极电压 G 为正、 $A_1$  为负。

④ III- 触发方式: 对主端子电压  $A_2$  为负、 $A_1$  为正; 对门极电压 G 为负、 $A_1$  为正。

由于双晶闸管内部结构的原因, 四种触发方式的灵敏度各不相同, 其中 III+ 触发方式所需的门极功率相当大, 在实际应用中只能选 I+、I-、III- 的组合。

## 8.6 晶闸管的应用实例

晶闸管调光和调温装置在工业和家用电器中已得到广泛应用。如图 8-16(a) 所示为双向二极管触发的双向晶闸管的台灯调光电路。在小导通角 (大  $\alpha$ ) 时, 过大的电位器  $R_p$  阻值使电容  $C_1$  充电缓慢, 由于小导通角的触发电路电源电压已过峰值, 并降得很低, 造成  $C_1$  充电电压过小,  $u_{C1}$  电压不足以击穿双向二极管, 因而实用电路图 8-16(b) 增设了  $R_2C_2$  阻容电路。当在小导通角时获得了一个滞后的电压  $u_{C2}$ , 它给电容  $C_1$  增加一个充电电路, 使小导通角时  $u_{C1}$  能增大, 以保证晶闸管 V 能可靠触发导通, 增大调压范围。

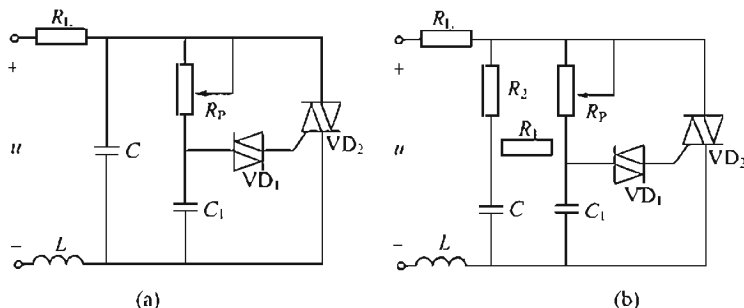


图 8-16 晶闸管调光电路

## 本章小结

1. 晶闸管是大功率四层三端三结半导体元件, 一般做成螺栓式、平板式和塑料封装式。晶闸管导通必须满足两个条件: ①承受正向阳极电压; ②承受正向门极电压。

2. 晶闸管元件过电压、过电流能力较差, 在使用时, 应在额定参数范围内使用。选择额定电流时应考虑 1.5~2 倍的安全裕量, 选择额定电压时应考虑 2~3 倍的安全裕量, 同时还要进行相应的过电压和过电流保护, 以免损坏元件。

3. 单相整流电路可以把交流电变成大小可调的直流电, 对于单相半波整流电路:

$$\overline{U_L} = 0.45U_2 \times \frac{1 + \cos\alpha}{2}$$

对单相半控桥式整流电路

$$\overline{U_L} = 0.9U_2 \times \frac{1 + \cos\alpha}{2}$$

4. 单结晶体管可组成晶闸管的触发电路, 峰点电压、谷点电压是单结管很重要的参数, 要掌握其意义。

## 练 习 题

- 8.1 晶閘管和二极管都具有单向导电性，它们有何不同？
- 8.2 导通后的晶閘管要关断的条件是什么？关断时管子承受的电压大小取决于什么？
- 8.3 晶閘管为什么要加保护电路？有哪些保护电路？
- 8.4 在单结晶体管组成的触发电路中，为什么要采用稳压削波环节？
- 8.5 在单结晶体管自激振荡电路中， $R$  起什么作用？不接  $R$  对电路有什么影响？
- 8.6 晶閘管的正常导通条件是什么？导通后流过晶閘管的电流大小取决于什么？
- 8.7 单结晶体管导通的条件是什么？在什么情况下单结晶体管由导通转为截止？
- 8.8 有一电阻性负载需要直流电压为  $60\text{V}$ ，电流为  $30\text{A}$ ，今采用单相半波可控整流电路，直接由  $220\text{V}$  电网供电，试求晶閘管的导通角，并选取用晶閘管元件。
- 8.9 单结管触发电路，已知两基极所加电压  $U_{bb}=20\text{V}$ ，分压比  $\eta=0.6$ ，求峰点电压  $U_F$ 。
- 8.10 对单相半波整流电路，试画出  $\alpha=45^\circ$  时  $u_L$ ， $i_L$  的波形。
- 8.11 如图 8-17 所示电路，在  $\omega t_1$  时刻合上开关  $S$ ，到  $\omega t_2$  时刻打开开关  $S$ 。试画出：
  - ① 负载电阻  $R$  上的电压波形；
  - ② 晶閘管阳极与阴极间电压波形。

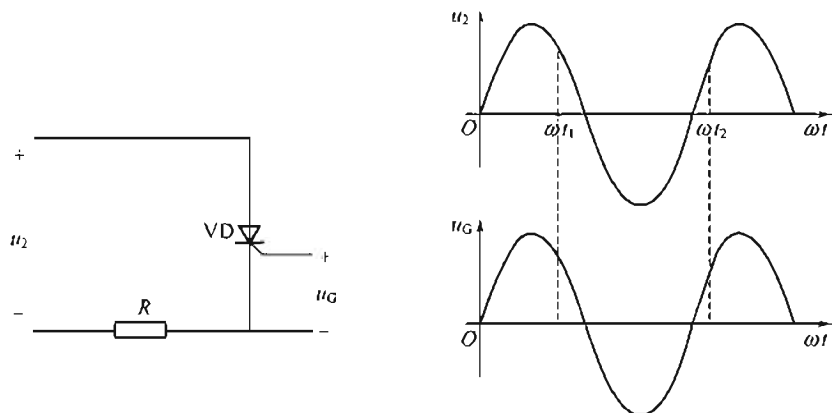


图 8-17 题 8.11 图

- 8.12 如何用万用表判别晶閘管的好坏？
- 8.13 单相半控桥式整流电路带  $7.5\Omega$  的纯电阻负载，电源电压为  $220\text{V}$ ，计算当控制角在  $60^\circ\sim 120^\circ$  范围内调节时，输出电压的调节范围。

## 第 9 章 数字电路基础

【内容提要】本章主要讨论数字电路的基本知识，包括数制及其转换；基本门电路；逻辑函数的化简；组合逻辑电路及时序逻辑电路的基本设计及应用。

随着科学技术的发展，在计算机、通信系统、测量仪表、数控装置等方面都大量地采用数字电路。数字信号是一种不连续变化的脉冲信号，能够对数字信号进行运算和各种逻辑处理的电路称为数字电路。数字电路的任务主要是脉冲的产生、变换、传送、控制、记忆、计数和运算。数字电路是现代电气设备中不可缺少的重要部分。

### 9.1 数制与编码

#### 9.1.1 数制

数制即计数的方法。在日常生活中，最常用的是十进制。数字电路中采用的数制有二进制、八进制以及十六进制等。

##### 1. 十进制

十进制是最常用的数制。在十进制数中有 0~9 这 10 个数码，任何一个十进制数均用这 10 个数码来表示。计数时以 10 为基数，逢十进一，同一数码在不同位置上表示的数值同。例如

$$999 = 9 \times 10^2 + 9 \times 10^1 + 9 \times 10^0$$

其中， $10^2$ 、 $10^1$ 、 $10^0$  称为十进制各位的“权”。

对于任意一个十进制整数  $M$ ，可用下式来表示：

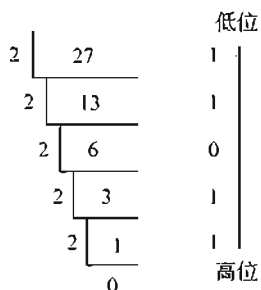
$$M = \pm (a_n \times 10^{n-1} + a_{n-1} \times 10^{n-2} + \cdots + a_2 \times 10^1 + a_1 \times 10^0)$$

式中  $a_1$ 、 $a_2$ 、 $\cdots$ 、 $a_{n-1}$ 、 $a_n$ ——各位的十进制数码。

##### 2. 二进制

在数字电路中广泛应用的是二进制。在二进制数中，只有“0”和“1”两个数码，计数时以 2 为基数，逢二进一，即  $1+1=10$ ，同一数码在不同位置所表示的数值是不同的。对于任何一个二进制整数  $N$ ，可用下式表示：

$$N = \pm (K_n \times 2^{n-1} + K_{n-1} \times 2^{n-2} + \cdots + K_2 \times 2^1 + 1 \times 2^0)$$



例如

$$(1011)_2 = 1 \times 2^3 + 0 \times 2^2 + 1 \times 2^1 + 1 \times 2^0$$

其中， $2^0$ 、 $2^1$ 、 $2^2$ 、 $2^3$  为二进制数各位的“权”。

##### 3. 二进制数与十进制数之间的转换

数字电路采用二进制比较方便，但人们习惯用十进制，因此，经常需在两者间进行转换。

(1) 二进制数转换为十进制数——按权相加法

例如，将二进制数 1101 转换成十进制数。

$$(1101)_2 = 1 \times 2^3 + 1 \times 2^2 + 0 \times 2^1 + 1 \times 2^0 = 8 + 4 + 0 + 1 = (13)_{10}$$

(2) 十进制数转换为二进制数——除二取余法

例如，将十进制数 27 转换为二进制数。

换算结果为  $(27)_{10} = (11011)_2$ 。

由以上可以看出，把十进制整数转换为二进制整数时，可将十进制数连续除 2，直到商为 0，每次所得余数就依次是二进制由低位到高位各位数字。

#### 4. 十六进制

十六进制数有 16 个数码 0、1、2、3、4、5、6、7、8、9、A、B、C、D、E、F。其中，A~F 分别代表十进制的 10~15，计数时，逢十六进一。为了与十进制区别，规定十六进制数通常在末尾加字母 H，例如 28H、5678H 等。十六进制数各位的“权”从低位到高位依次是  $16^0$ 、 $16^1$ 、 $16^2$ ... 例如

$$5C4H = 5 \times 16^2 + 12 \times 16^1 + 4 \times 16^0 = (1476)_{10}$$

可见，将十六进制数转换为十进制数时，只要按“权”展开即可。

要将十进制数转换为十六进制数时，可先转换为二进制数，再由二进制数转换为十六进制数。例如

$$(29)_{10} = (11101)_2 = (1D)_{16}$$

### 9.1.2 编码

用数字或某种文字符号来表示某一对象和信号的过程叫编码。在数字电路中，十进制编码或某种文字符号难于实现，一般采用四位二进制数码来表示一位十进制数码，这种方法称为——二-十进制编码，即 BCD 码。由于这种编码的四位数码从左到右各位对应值分别为  $2^3$ 、 $2^2$ 、 $2^1$ 、 $2^0$ ，即 8、4、2、1，所以 BCD 码也叫 8421 码，其对应关系如下：

十进制数码	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9*
8421(BCD)码	0000	0001	0010	0011	0100	0101	0110	0111	1000	1001

例如，一个十进制数 369 可用 8421 码表示为

十进制数：	3	6	9
BCD 码：	0011	0110	1001

除此之外，还有一些其他编码方式，这里不再介绍。

## 9.2 基本逻辑门电路

所谓逻辑，是指条件与结果之间的关系。输入与输出信号之间存在一定逻辑关系的电路称为逻辑电路。门电路是一种具有多个输入端和一个输出端的开关电路。由于其输出信号与输入信号之间存在着一定的逻辑关系，所以称为逻辑门电路。门电路是数字电路的基本单元。

### 9.2.1 与逻辑及与门电路

#### 1. 与逻辑

与逻辑是指当决定事件发生的所有条件 A、B 均具备时，事件 F 才发生。如图 9-1 所

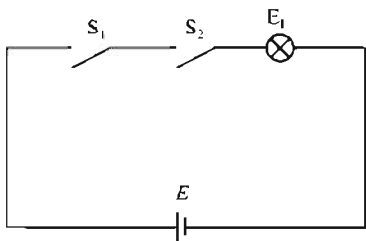


图 9-1 与逻辑举例

示，只有当开关  $S_1$  与  $S_2$  同时接通时灯泡才亮。

完整地表示输入输出之间逻辑关系的表格称为真值表。若开关接通为“1”，断开为“0”灯亮为“1”、不亮为“0”，则如图 9-1 所示关系的真值表见表 9-1 所示。

表 9-1 真值表

$A$	$B$	$F$	$A$	$B$	$F$
0	0	0	1	0	0
0	1	0	1	1	1

与逻辑通常用逻辑函数表达式表示为  $F=A \times B$ 。

2. 与门电路

实现与逻辑运算的电路称为与门电路，二极管与门电路如图 9-2(a) 所示，输入端  $A$ 、 $B$  代表条件，输出端  $F$  代表结果。

当  $U_A=U_B=0$  时， $VD_1$ 、 $VD_2$  均导通，输出  $U_F$  被限制在  $0.7V$ ；当  $U_A=0V$ ， $U_B=3V$  时， $VD_1$  先导通， $U_F=0.7V$ ， $VD_2$  承受反压而截止；当  $U_A=3V$ ， $U_B=0V$  时， $VD_2$  先导通， $VD_1$  承受反压而截止；当  $U_A=U_B=3V$  时， $VD_1$ 、 $VD_2$  导通，输出端电压  $U_F=3.7V$ ，若忽略二极管电压降，高电平用 1，低电平用 0 代替，其结果与真值表是一致的，与门电路的图形符号如图 9-2(b) 所示。与逻辑又称为逻辑乘，逻辑乘的基本运算规则为

$0 \cdot 0=0, 0 \cdot 1=1, 1 \cdot 0=0, 1 \cdot 1=1$

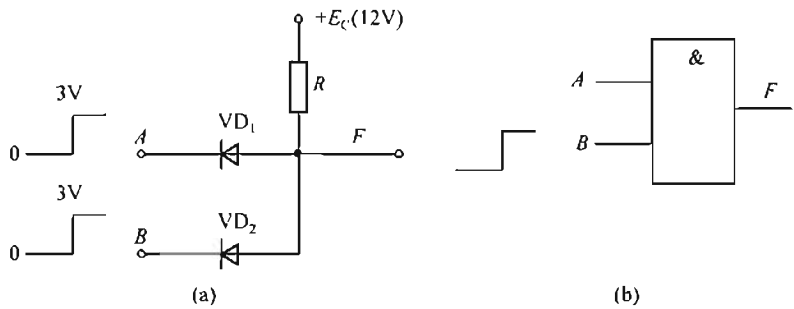


图 9-2 与门电路和图形符号

9.2.2 或逻辑及或门电路

1. 或逻辑

或逻辑是指当决定事件发生的各种条件  $A$ 、 $B$  中只要具备一个或一个以上时，事件  $F$  就发生。例如，把两个开关并联后与一盏灯串联接到电源上，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，如图 9-3(a) 所示，真值表见表 9-2，



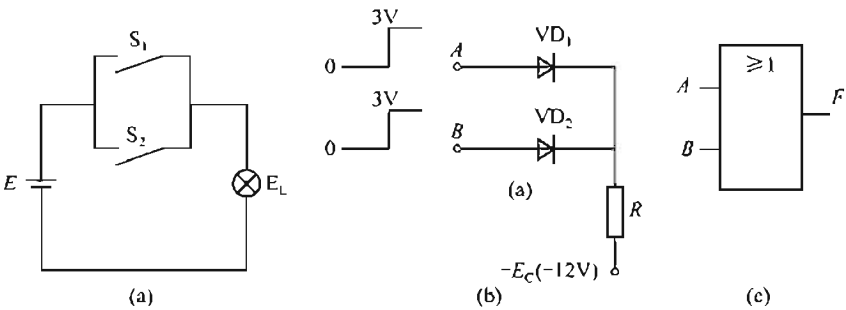


图 9-3 或门

表 9-2 真值表

A	B	F	A	B	F
0	0	0	1	0	1
0	1	1	1	1	1

其逻辑函数表达式为  $F=A+B$ 。

2. 或门电路

用二极管实现“或”逻辑的电路如图 9-3(b) 所示；图 9-3(c) 是或门的图形符号。或逻辑又称为逻辑加，逻辑加的基本运算规则为

$0+0=0, 0+1=1, 1+0=1, 1+1=1$

9.2.3 非逻辑及非门电路

1. 非逻辑

非逻辑是指某事件的发生取决于某个条件的否定，即某条件成立，这事件不发生；某条件不成立，这事件反而会发生。如图 9-4(a) 所示，开关 S 接通，灯 EL 灭；开关断开。灯 EL 亮，灯亮与开关断合满足非逻辑关系。其真值表见表 9-3，其逻辑表达式为  $F=A$ 。

表 9-3 真值表

A	F	A	F
0	1	1	0

2. 非门电路

用三极管连接的非门如图 9-4(b) 所示，在实际电路中，若电路参数选择合适，当输入

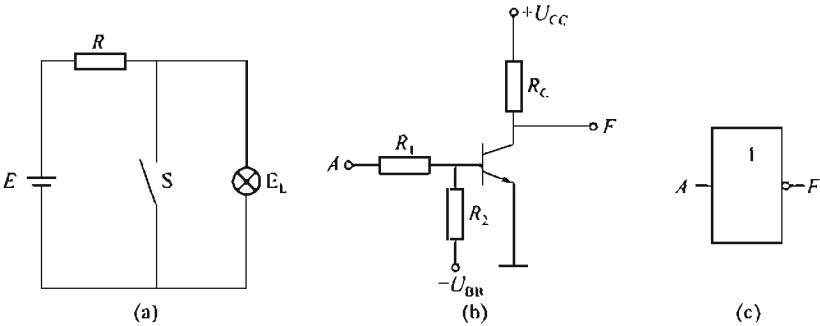


图 9-4 非门

为低电平时，三极管因发射结反偏而截止，则输出为高电平；当输入为高电平时，三极管导通，则输出为低电平。所以输入与输出符合非逻辑关系，非门也称为反相器。如图 9-4(c) 所示是非门的图形符号。

#### 9.2.4 复合门电路

基本逻辑门经简单组合可构成复合门电路。常用的复合门电路有与非门电路和或非门电路。

与门的输出端接一个非门，使与门的输出反相，就构成了与非门。与非门的逻辑表达式为  $F = \overline{AB}$ ，与非门的图形符号如图 9-5 所示。

或门输出端接一个非门，使输入与输出反相，构成了或非门。或非门的逻辑表达式为  $F = \overline{A+B}$ ，其图形符号如图 9-6 所示。

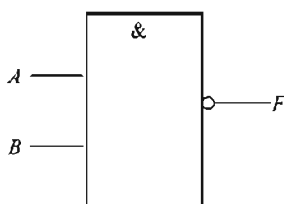


图 9-5 与非门的图形符号

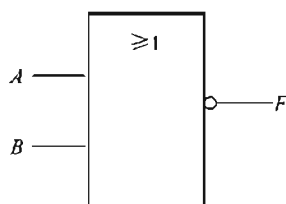


图 9-6 或非门的图形符号

【例 9-1】两个输入端的与门、或门和与非门的输入波形如图 9-7(a) 所示，试画出其输出信号的波形。

解：设与门的输出为  $F_1$ ，或门的输出为  $F_2$ ，与非门的输出为  $F_3$ ，根据逻辑关系其输出波形如图 9-7(b) 所示。

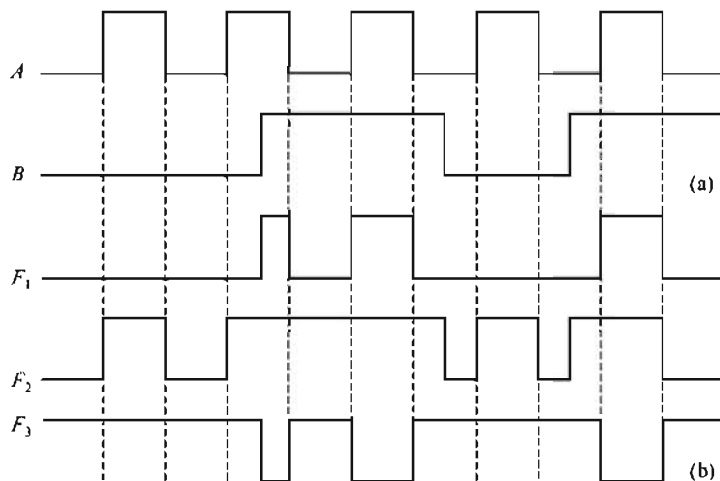


图 9-7 例 9-1 图

### 9.3 基本逻辑及应用

逻辑代数也称为布尔代数，是分析和设计逻辑电路的一种数学工具，可用来描述数字电路、数字的结构和特性。逻辑代数由逻辑变量、逻辑常数和运算符组成。逻辑代数有“0”和“1”两种逻辑值，它们并不表示数量的大小，而表示逻辑“假”与“真”两种状态，如开关的开与关等。所以，逻辑“1”与逻辑“0”与自然数 1 和 0 有着本质的区别。

### 9.3.1 基本逻辑关系

门电路的逻辑关系则有以下几种。

与逻辑： $F=A \cdot B$ 。

或逻辑： $F=A+B$ 。

非逻辑： $F=\overline{A}$ 。

### 9.3.2 逻辑代数的运算法则的基本规律

#### 1. 基本运算法则

$$\begin{aligned} 0 \cdot A &= 0 & 1 \cdot A &= A \\ A \cdot \overline{A} &= 0 & A \cdot A &= A \\ 0 + A &= A & 1 + A &= 1 \\ A + \overline{A} &= 1 & A + A &= A & \overline{\overline{A}} &= A \end{aligned}$$

#### 2. 逻辑代数的基本定律

交换律： $A \cdot B = B \cdot A$      $A + B = B + A$

结合律： $ABC = (AB)C = A(BC)$      $A + B + C = (A + B) + C = A + (B + C)$

分配律： $A(B + C) = AB + AC$      $A + BC = (A + B)(A + C)$

反演律： $\overline{AB} = \overline{A} + \overline{B}$      $\overline{A + B} = \overline{A} \overline{B}$

【例 9-2】 试证明：

(1)  $A + \overline{AB} = A + B$ ;

(2)  $AB + \overline{AC} + BC = AB + \overline{AC}$ 。

证明：

(1)  $A + \overline{AB} = A + AB + \overline{AB} = A + B (A + \overline{A}) = A + B$

(2)  $AB + \overline{AC} + BC = AB + \overline{AC} + (A + \overline{A})BC$   
 $= (AB + ABC) + (\overline{AC} + \overline{A}BC) = AB + \overline{AC}$

推论：

$$AB + \overline{AC} + BCD = AB + \overline{AC}$$

证明：

$$AB + \overline{AC} + BCD = AB + \overline{AC} + BC + BCD = AB + \overline{AC} + BC = AB + \overline{AC}$$

【例 9-3】 用逻辑代数运算法则化简逻辑式： $F = \overline{AB} \overline{C} + \overline{A}BC + \overline{B} + BC$ 。

$$\begin{aligned} \text{解：} \quad F &= \overline{AB} \overline{C} + \overline{A}BC + \overline{B} + BC \\ &= \overline{AB} (\overline{C} + C) + \overline{B} (1 + C) = \overline{AB} + \overline{B} = \overline{AB} + \overline{B} (1 + \overline{A}) \\ &= \overline{A} (B + \overline{B}) + \overline{B} = \overline{A} + \overline{B} \end{aligned}$$

### 9.3.3 逻辑函数的卡诺图法化简

卡诺图法化简是逻辑函数的图解法化简，它有确定的化简步骤，可以确定最终的化简结果，能比较方便地得到逻辑函数的最简与-或式。

#### 1. 最小项的概念

##### (1) 最小项的定义

对于有  $n$  个变量的逻辑函数，可组成  $2^n$  个乘积项，且满足：

- ① 每个乘积项中包含了全部变量。
- ② 每个变量在每个乘积项中都以原变量或反变量的形式只出现一次。

这样的乘积项称为逻辑函数的最小项

由定义可知，对有  $n$  个变量的逻辑函数，全部最小项共有  $2^n$  个。三变量的全体最小项见表 9-4。把原变量取 1，反变量取 0，可找出各最小项所对应的变量取值。

表 9-4 三变量最小项表

最小项	$\overline{A}\overline{B}\overline{C}$	$\overline{A}\overline{B}C$	$\overline{A}B\overline{C}$	$\overline{A}BC$	$A\overline{B}\overline{C}$	$A\overline{B}C$	$AB\overline{C}$	$ABC$
对应变量取值	000	001	010	011	100	101	110	111
编号	$m_0$	$m_1$	$m_2$	$m_3$	$m_4$	$m_5$	$m_6$	$m_7$

为表达方便，将最小项编号，用  $m$  表示最小项，其下标为最小项的编号。编号方式为：把最小项对应的变量取值看作二进制数，其所对应的十进制数就是该最小项的编号。

### (2) 最小项的性质

- ① 对任意一个最小项，只有一组变量取值使其值为 1。而其余各种变量取值均使其值为 0。
- ② 不同的最小项，使其值为 1 的那组变量取值也不同。
- ③ 对于变量的任一组取值，任意两个或多个最小项的乘积恒为 0。
- ④ 对于变量的任一组取值，全体最小项的和为 1。
- ⑤ 逻辑上相邻的两个最小项可合并为一项，并消去相反项。

所谓逻辑上相邻，是指两个最小项中只有一个变量为互反变量，其余变量均相同，简称相邻项。如三变量最小项  $\overline{A}\overline{B}\overline{C}$  和  $A\overline{B}\overline{C}$ ， $A$ 、 $\overline{A}$  互反，其余相同，为相邻项，将其相加结果为  $\overline{B}\overline{C}$ ，两项合并为一项，合并结果为相同变量。

### (3) 逻辑函数的最小项表达式

若干个最小项之“和”组成的逻辑函数表达式称为最小项表达式，也称为标准与-或式。

例如，如表 9-5 所示真值表，写出该逻辑函数的最小项表达式。

表 9-5 真值表

A	B	C	Y	A	B	C	Y
0	0	0	0	1	0	0	1
0	0	1	1	1	0	1	1
0	1	0	0	1	1	0	0
0	1	1	1	1	1	1	1

由真值表可知，使  $Y=1$  的变量组合有：001、011、100、101、111。对应的最小项为： $\overline{A}\overline{B}C$ 、 $\overline{A}BC$ 、 $A\overline{B}\overline{C}$ 、 $A\overline{B}C$ 、 $ABC$ 。

因此，该逻辑函数的最小项表达式为

$$Y = \overline{A}\overline{B}C + \overline{A}BC + A\overline{B}\overline{C} + A\overline{B}C + ABC$$

也可写作

$$\begin{aligned} Y &= F(A, B, C) \\ &= m_1 + m_3 + m_4 + m_5 + m_7 \\ &= \sum m(1, 3, 4, 5, 7) \end{aligned}$$

任何一个逻辑函数都可写成最小项表达式。

需要注意的是，提到最小项的概念，必须指出变量的个数，如  $\overline{A}BC$  对于三变量逻辑函

数来说,是最小项,而对四变量逻辑函数来说则不是。

【例 9-4】 将函数式  $Y = A\bar{B} + \overline{A+C}$  写成最小项表达式。

$$\begin{aligned}
 \text{解: } Y &= A\bar{B} + \overline{A+C} \\
 &= A\bar{B} + \bar{A}C = A\bar{B}(C+\bar{C}) + \bar{A}(B+\bar{B})C \\
 &= A\bar{B}C + A\bar{B}\bar{C} + \bar{A}BC + \bar{A}\bar{B}C \\
 &= m_5 + m_4 + m_3 + m_1 \\
 &= \sum m(1, 3, 4, 5)
 \end{aligned}$$

## 2. 逻辑函数的卡诺图表示法

### (1) 卡诺图

卡诺图又称最小项方格图,它是用  $2^n$  个方格来表示  $n$  个变量的  $2^n$  个最小项,并使在逻辑上相邻的最小项在空间位置上也相邻。它既可以表示逻辑函数,也可直接化简逻辑函数。

在卡诺图中,将  $n$  个变量分为两组,即行变量和列变量,行、列变量的取值顺序必须按格雷码排列,以保证相邻位置上的最小项的逻辑相邻性。

① 两变量卡诺图。2 个变量  $A$ 、 $B$  的卡诺图共有  $2^2=4$  个方格,表示 4 个最小项  $\bar{A}\bar{B}$ 、 $\bar{A}B$ 、 $A\bar{B}$  和  $AB$ ,如图 9-8 所示。

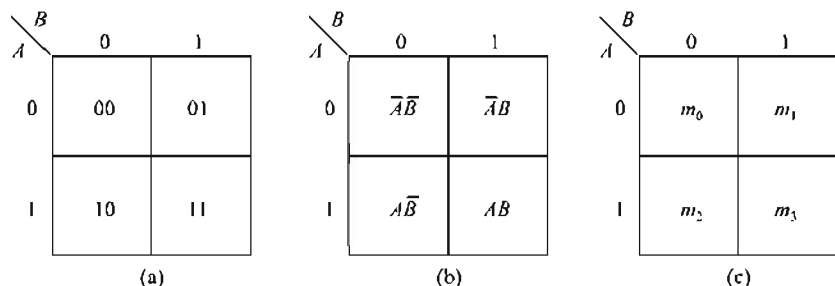


图 9-8 两变量卡诺图

为画图方便,通常在卡诺图的左上角标注变量,左边和上边标注对应的变量取值,变量二进制码的数值为最小项的编号。

② 三变量卡诺图。3 个变量  $A$ 、 $B$ 、 $C$  的卡诺图共有  $2^3=8$  个方格,它表示 8 个最小项,为使其具有空间相邻性,将 11 与 10 互换位置,如图 9-9 所示。

③ 四变量卡诺图。3 个变量  $A$ 、 $B$ 、 $C$ 、 $D$  的卡诺图共有  $2^4=16$  个方格,它表示 16 个最小项,为使其具有空间相邻性,将 11 与 10 互换位置,如图 9-10 所示。

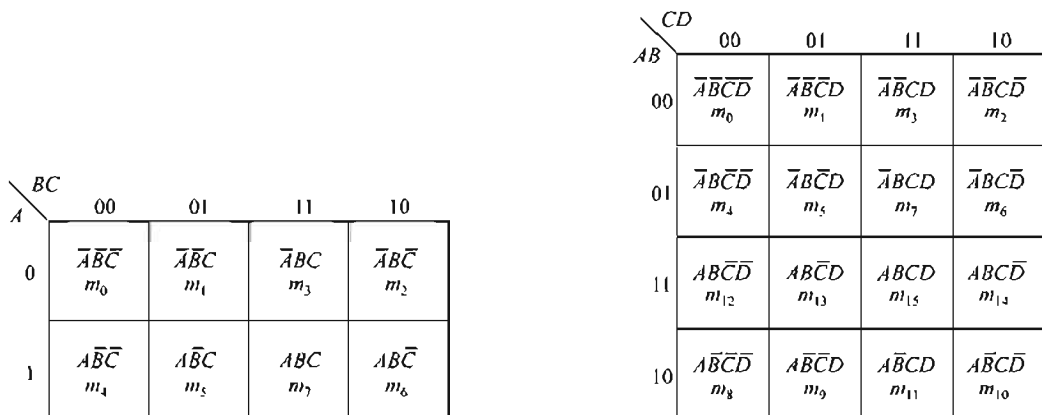


图 9-9 三变量卡诺图

图 9-10 四变量卡诺图

由图可看出,任意位置上相邻的最小项在逻辑上也相邻,同一行或同一列首尾方格里的最小项在逻辑上也是相邻的。

卡诺图的主要缺点是随着变量数目的增多,图形迅速复杂化,因此逻辑变量在五个以上时,很少使用卡诺图。

### (2) 逻辑函数的卡诺图

既然任何一个逻辑函数都能表示为若干个最小项之和的形式,而每一个最小项在卡诺图中都有相应的位置,那么自然可以用卡诺图来表示逻辑函数。具体做法是:先把逻辑函数化成最小项表达式,然后在卡诺图上把式中各最小项所对应的方格内填入 1,其余方格内填入 0 (也可不填),就得到了该逻辑函数的卡诺图。

【例 9-5】画出逻辑函数  $Y = A\bar{B}C + \bar{A}\bar{B}\bar{C} + \bar{A}BC + ABC$  的卡诺图。

解:该逻辑函数共有  $A$ 、 $B$ 、 $C$  三个变量,其表达式为最小项表达式。根据画逻辑函数卡诺图的方法,可得到该函数的卡诺图 (见图 9-11)。

【例 9-6】画出例 9-4 中函数式的卡诺图。

解:先把该函数式转换成最小项表达式,由例 9-4 可知

$$Y = A\bar{B} + \bar{A} + \bar{C} = \sum m(1, 3, 4, 5)$$

因此,该函数式的卡诺图如图 9-12 所示。

$\backslash BC$ $A$	00	01	11	10
0	1	1	0	0
1	0	1	1	0

图 9-11 例 9-5 卡诺图

$\backslash BC$ $A$	00	01	11	10
0	0	1	1	0
1	1	1	0	0

图 9-12 例 9-6 卡诺图

$\backslash BC$ $A$	00	01	11	10
0	0	0	1	0
1	0	1	1	1

图 9-13 例 9-7 卡诺图

【例 9-7】画出表 9-6 所示逻辑函数的卡诺图。

在卡诺图中,将真值表中函数值为 1 的变量组合所对应的最小项的方格填入 1,其他方格填入 0 或不填,即得出该函数的卡诺图 (见图 9-13)。

表 9-6 例 9-7 函数真值表

$A$	$B$	$C$	$Y$	$A$	$B$	$C$	$Y$
0	0	0	0	1	0	0	0
0	0	1	0	1	0	1	1
0	1	0	0	1	1	0	1
0	1	1	1	1	1	1	1

### 3. 逻辑函数的卡诺图化简法

根据卡诺图的相邻性,对相邻最小项进行合并。合并时保留相同变量,消去相反变量,以达到化简的目的。两个相邻最小项合并,可消去 1 个变量,4 个相邻最小项合并,可消去 2 个变量,把  $2^n$  个相邻最小项合并,可消去  $n$  个变量。

用卡诺图化简逻辑函数的步骤如下:

- (1) 画出逻辑函数的卡诺图
- (2) 合并卡诺图中相邻的最小项

把卡诺图中  $2^n$  个相邻最小项方格用圈圈起来进行合并, 直到所有为 1 的方格圈完为止。画圈的规则是:

- ① 圈要尽量大, 这样消去的变量就多, 但每个圈中所包含的方格数只能是  $2^n$  个, 且只有相邻的 1 才能被圈在一起。
- ② 圈要尽量少, 这样逻辑函数的与项就少, 但所有填 1 的方格必须被圈, 不能遗漏。
- ③ 每个为 1 的方格可被圈多次, 但每个圈中至少有一个 1 只被圈过一次。
- ④ 同一行或同一列的首尾方格相邻。
- ⑤ 四个顶点是相邻的。

将合并化简后的各与项进行逻辑加, 即为所求逻辑函数的最简与-或式。

**【例 9-8】** 用卡诺图化简逻辑函数  $Y = \overline{A}\overline{B}C\overline{D} + \overline{B}\overline{C}\overline{D} + A\overline{B}D + A\overline{B}C$ 。

解: (1) 画卡诺图。首先写出最小项表达式

$$\begin{aligned} Y &= \overline{A}\overline{B}C\overline{D} + \overline{B}\overline{C}\overline{D} + A\overline{B}D + A\overline{B}C \\ &= \overline{A}\overline{B}C\overline{D} + A\overline{B}\overline{C}\overline{D} + \overline{A}\overline{B}\overline{C}\overline{D} + A\overline{B}C\overline{D} + A\overline{B}\overline{C}D + A\overline{B}C\overline{D} \\ &= m_2 + m_8 + m_0 + m_{11} + m_9 + m_{10} \\ &= \sum m(0, 2, 8, 9, 10, 11) \end{aligned}$$

该逻辑函数的卡诺图如图 9-14 所示。

- (2) 合并最小项。图 9-14 中, 可画两个圈。注意卡诺图中四个顶角的四个 1 是相邻的。
- (3) 写出最简与-或式。

$$Y = A\overline{B} + \overline{B}\overline{D}$$

**【例 9-9】** 用卡诺图化简逻辑函数

$$Y = F(A, B, C, D) = \sum m(3, 4, 5, 7, 9, 13, 14, 15)。$$

解: (1) 画四变量逻辑函数的卡诺图, 如图 9-15 所示, 并将各最小项在卡诺图相应方格内填 1。

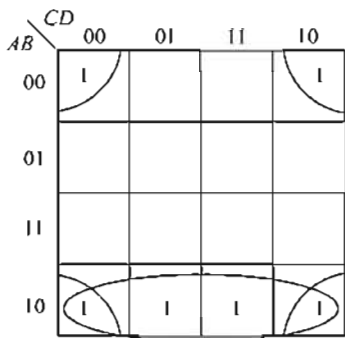


图 9-14 例 9-8 卡诺图

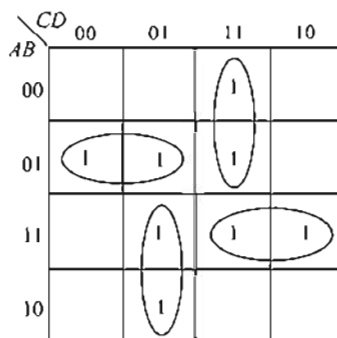


图 9-15 例 9-9 卡诺图

- (2) 合并相邻最小项。注意每个圈中至少有一个 1 只被圈过一次。
- (3) 写出逻辑函数的最简与-或式。

$$Y = \overline{A}\overline{B}\overline{C} + \overline{A}C\overline{D} + A\overline{C}\overline{D} + ABC$$

**【例 9-10】** 已知某逻辑函数的卡诺图如图 9-16 所示, 写出其最简与-或式。

解: 此图可采用负逻辑法, 将 0 项圈起来然后取反, 却得所求。即  $Y = \overline{B}\overline{C}\overline{D} = \overline{B} + \overline{C} + \overline{D}$

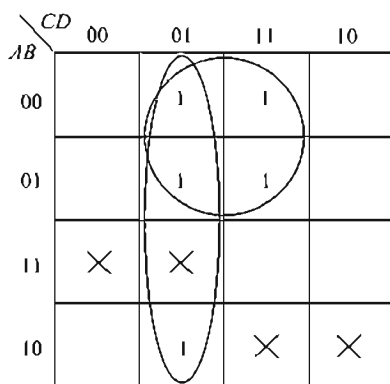


图 9-16 例 9-10 卡诺图

由上例可知,当 0 方格较少时,采用圈 0 方格的方法化简逻辑函数更简单。

#### 4. 具有无关项的逻辑函数的化简

##### (1) 逻辑函数中的无关项

有些  $n$  变量逻辑函数,变量的取值有时是带有约束条件的,不一定所有的变量取值组合都会出现,即函数不一定与  $2^n$  个最小项都有关系,而是仅与其中一部分有关,与另一部分无关。我们称那些与逻辑函数值无关的最小项为无关项,也称随意项、约束项。

例如,8421BCD 码中,1010~1111 六种代码是不允许出现的,这六种代码所对应的六个最小项就是无

关项。

在逻辑函数式中用  $d$  和相应的编号表示无关项。如函数式

$Y = F(A, B, C, D) = \sum m(1, 3, 5, 7, 9) + \sum d(10, 11, 12, 13)$  中,  $\sum m$  部分为使函数值为 1 的最小项,  $\sum d$  部分无关项,即  $m_{10}$ 、 $m_{11}$ 、 $m_{12}$ 、 $m_{13}$  为无关项。

##### (2) 利用无关项化简逻辑函数

在卡诺图中,无关项所对应的方格常用“×”或“Φ”来表示。因为无关项是不会出现或对函数值没有影响的项,因此在用卡诺图化简时,根据需要,可以看作 1 或 0。

【例 9-11】用卡诺图化简具有无关项的逻辑函数

$$Y = F(A, B, C, D) = \sum m(1, 3, 5, 7, 9) + \sum d(10, 11, 12, 13)$$

解:(1)画卡诺图。如图 9-17 所示,在最小项方格内填 1,在无关项方格内填 ×。

(2)合并相邻最小项。与 1 方格相邻并圈在一起的被当作 1 方格,没有被圈的无关项是丢弃不用的。1 方格不能遗漏,×方格可以不用。

(3)写出逻辑函数的最简与-或式。

$$Y = \overline{A}D + \overline{C}D$$

该例题若不利用无关项,便得不到如此简化的与-或式。

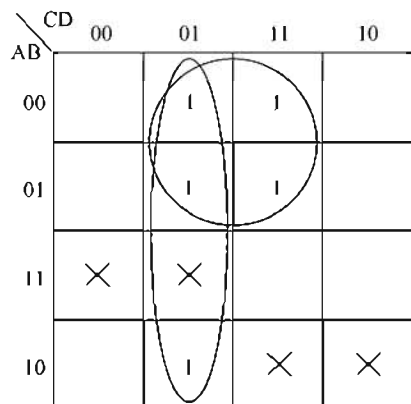


图 9-17 例 9-11 卡诺图

## 9.4 触 发 器

利用集成门电路可以组成具有记忆功能的触发器。触发器是一种具有两种稳定状态的电路,可以分别代表二进制数码 1 或 0。当外加触发信号时,触发器能从一种状态翻转到另一种状态,即它能按逻辑功能在 1、0 两数码之间变化,因此,触发器是储存数字信号的基本单元电路,是各种时序电路的基础。

目前,触发器大多采用集成电路产品。按逻辑功能的不同,触发器有 RS 触发器、JK 触发器和 D 触发器等。



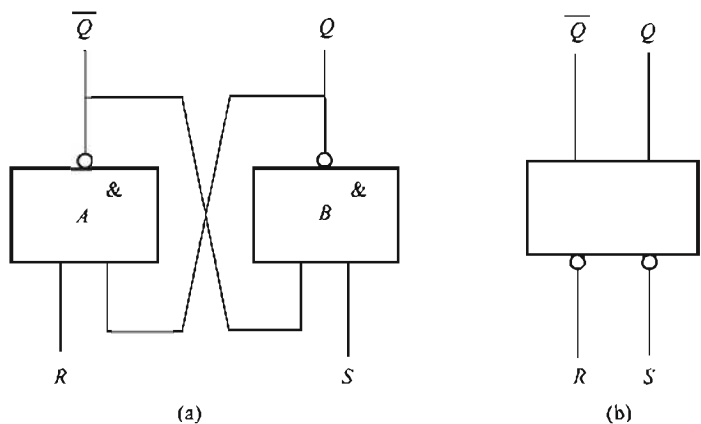


图 9-18 基本 RS 触发器的逻辑图和图形符号

9.4.1 基本 RS 触发器

如图 9-18 所示是基本 RS 触发器的逻辑图和图形符号。它由两个与非门交叉连接而成。 $R, S$  是输入端,  $Q, \overline{Q}$  是输出端。在正常条件下, 若  $Q=1$ , 则  $\overline{Q}=0$ , 称触发器处于“1”态; 若  $Q=0$ , 则  $\overline{Q}=1$ , 称触发器处于“0”态; 输入端  $R$  称为置“0”端,  $S$  称为置“1”端。

下面分析输入与输出的逻辑关系。

1.  $S=1, R=0$

当  $R=0$  时, 与非门 A 的输出为 1, 即  $\overline{Q}=1$ 。由于  $S=1$ , 与非门 B 的两个输入端全为 1, 所以 B 门的输出为 0, 即  $Q=0$ 。若触发器原来处于“0”态, 在  $S=1, R=0$  信号作用下, 触发器仍保持“0”态; 若原来处于“1”态, 则触发器就会由“1”状态翻转为“0”状态。

2.  $S=0, R=1$

设触发器的初始状态为 0, 则  $Q=0, \overline{Q}=1$ 。由于  $S=0$ , B 门有一个输入为 0, 其输出  $Q$  则为 1, 而 A 门的输入全为 1, 其输出则为 0。因此, 触发器由“0”状态翻转为“1”状态。

若它的初始状态为 1 态, 触发器仍保持“1”状态不变。

3.  $S=1, R=1$

在  $S=1, R=1$  时, 若触发器原来处于“0”态, 即  $Q=0, \overline{Q}=1$ , 此时 B 门的两个输入端都是 1。输出  $Q=0$ , A 门有一个输入为 0, 输出  $\overline{Q}=1$ , 触发器的状态不变。若触发器原来处于“1”状态, 即  $Q=1, \overline{Q}=0$ , 此时, A 门输出为 0, 即  $\overline{Q}=0$ , B 门输出为 1, 即  $Q=1$ , 触发器的状态也不变。由此可见,  $S=1, R=1$  触发器保持原有状态, 这体现了触发器的记忆功能。

4.  $S=0, R=0$

$R, S$  全为 0 时, A、B 两门都有 0 输入端, 则它们的输出  $Q, \overline{Q}$  全为 1, 这时, 不符合  $Q$  与  $\overline{Q}$  相反的逻辑状态。当  $R$  和  $S$  同时由 0 变为 1 后, 触发器的状态不能确定, 这种情况在使用中应避免出现。综上所述, 可列出基本 RS 触发器的逻辑状态表 (见表 9-7)。

表 9-7 基本 RS 触发器的状态表

R	S	Q	$\overline{Q}$	逻辑功能
0	0	不定	不定	不允许

0	1	0	1	置 0
1	0	1	0	置 1
1	1	不变	不变	保持

从上述分析可知,基本 RS 触发器有两个状态,它可以直接直位或复位,并具有存储和记忆功能。

#### 9.4.2 同步 RS 触发器

如图 9-19(a) 所示是同步 RS 触发器的逻辑电路图,图 9-19(b) 是其图形符号。其中,与非门 A 和 B 构成基本 RS 触发器,与非门 C、D 构成导引电路,通过它把输入信号引导到基本触发器上。 $R_D$ 、 $S_D$  是直接复位、直接置位端。只要在  $R_D$  或  $S_D$  上直接加上一个低电平信号,就可以使触发器处于预先规定的“0”状态或“1”状态。另外, $R_D$  和  $S_D$  在不使用时应置高电平。 $CP$  是时钟脉冲输入端,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,C 门、D 门的输出均为 1,基本触发器保持原状态不变。在时钟脉冲来到之后,即  $CP=1$  时,触发器才按 R、S 端的输入状态决定其输出状态。时钟脉冲过去之后,输出状态保持时钟脉冲为高电平时的状态不变。

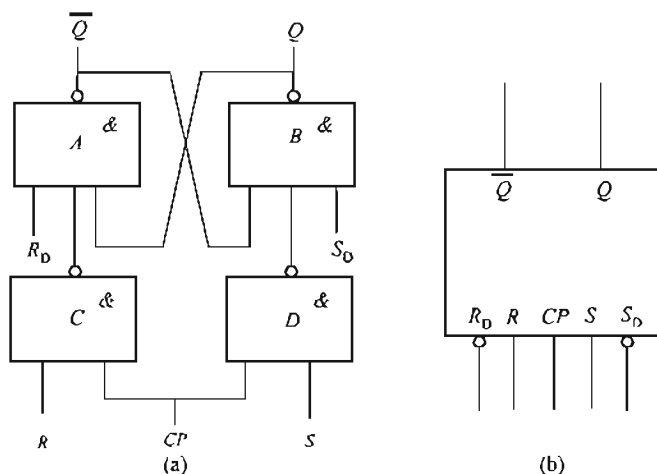


图 9-19 同步 RS 触发器逻辑电路图

在时钟脉冲来到之后, $CP$  变为 1, R 和 S 的状态开始起作用,其工作状态如下所述。

##### 1. $S=1, R=0$

由于  $S=1$ ,当时钟脉冲来到时, $CP=1$ ,C 门输出为 0。若触发器原来处于“0”态,即  $Q=0, \bar{Q}=1$ ,则 A 门输出转变为  $Q=1$ 。因为  $R=0$ ,D 门输出为 1,B 门输入全为 1,则输出变为  $\bar{Q}=0$ 。若触发器原来处于“1”状态,即  $Q=1, \bar{Q}=0$ ,则 A 门输出为  $Q=1$ 。因为  $R=0$ ,D 门输出为 1,B 门输入全为 1,则输出为  $\bar{Q}=0$ 。结论,当  $S=1, R=0$  时不管触发器原来处于何种状态,在  $CP$  到来后触发器处于“1”状态。

##### 2. $S=0, R=1$

由于  $R=1$ ,时钟脉冲来到之后, $CP=1$ ,D 门输入全为 1,则 D 门输出为 0,不管触发器原来处于何种状态, $\bar{Q}=1$ 。由于 A 门输入全为 1,所以  $Q=0$ 。

##### 3. $R=0, S=0$

由于  $R=0, S=0$ ,则 C 门、D 门均输出为 1,所以触发器的状态不会改变。

4.  $S=1, R=1$

$R=1, S=1$ ，当时钟脉冲到来之后， $CP=1$ ，则  $C$  门与  $D$  门输出都为 0， $A$  门与  $B$  门输出为 1，即  $Q=Q=1$ ，破坏了  $Q$  与  $\bar{Q}$  的逻辑关系，当输入信号消失后，触发器的状态不能确定，因而实际使用中应避免出现此情况。

如图 9-20 所示是同步 RS 触发器的工作波形，表 9-8 是其逻辑状态表。表中  $Q_{n+1}$  表示脉冲到来之后的状态称为次态， $Q_n$  表示现态。

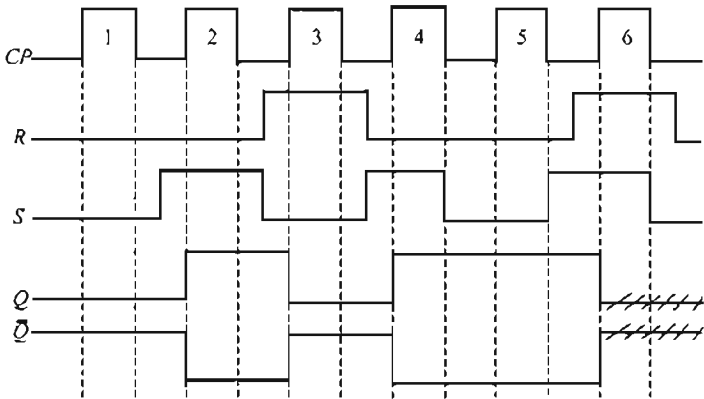


图 9-20 时序图

表 9-8 逻辑状态表

R	S	$Q_{n+1}$	R	S	$Q_{n+1}$
0	0	保持	1	0	1
0	1	0	1	1	不定

由图 9-20 可知，触发器状态随  $R$ 、 $S$  及  $CP$  脉冲而变化，在时钟脉冲  $CP$  作用期间，即  $CP=1$  期间， $R$  和  $S$  不能同时为 1，若  $R$ 、 $S$  的状态连续发生变化，则触发器的状态亦随之发生变化，即出现了在一个计数脉冲作用下，可能引起触发器一次或多次翻转，产生了“空翻”现象，因此，同步 RS 触发器不能作为计数器使用。

9.4.3 JK 触发器

主从 JK 触发器是一种无空翻的触发器。如图 9-21(a) 所示是 JK 触发器的逻辑电路图，图 9-21(b) 是其图形符号。它由两个同步 RS 触发器组成，前级为主触发器，后级为从触发器， $\bar{S}_D$ 、 $\bar{R}_D$  是直接置位、复位端（平时应处于高电平）， $J$ 、 $K$  为控制输入端，时钟脉冲经过反相器  $\bar{S}_D$ 、 $\bar{R}_D$  具有直接置位、复位端（平时应处于高电平）， $J$ 、 $K$  为控制输入端，时钟脉冲经过反相器

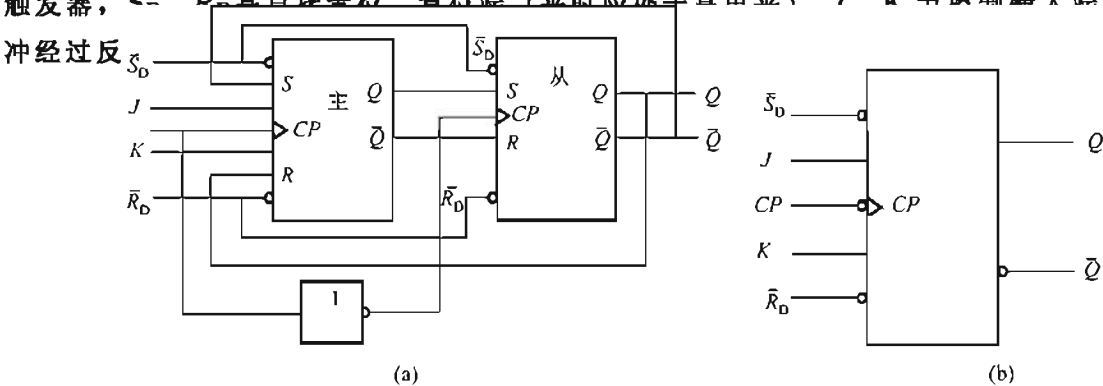


图 9-21 JK 触发器

时钟脉冲作用期间,  $CP=1$ ,  $\overline{CP}=0$ , 从触发器被封锁, 保持原状态,  $Q$  在脉冲作用期间不变; 主触发器的状态取决于时钟脉冲为低电平的状态和  $J$ 、 $K$  输入端的状态。

当时钟脉冲过去后,  $CP=0$ ,  $\overline{CP}=1$ , 主触发器被封锁, 从触发器导引门畅通, 将主触发器的状态移入从触发器中。其工作过程如下。

#### 1. $J=0$ , $K=0$

设触发器的初始状态为“0”态。当主触发器  $CP=1$  时, 由于主触发器的  $J=0$  和  $R=0$ , 它的状态保持不变, 当  $CP$  下跳时, 由于主触发器的  $J=0$  和  $R=1$ , 也保持原状态不变; 如果初始状态为 1, 也保持原状态不变。

#### 2. $J=0$ , $K=1$

设触发器的初始状态为“1”, 当时钟脉冲上升沿来到之后, 主触发器  $Q=0$ ,  $\overline{Q}=1$ , 所以, 在  $CP=1$  期间, 主触发器被置为 0。由于  $\overline{CP}=0$ , 从触发器被封锁, 主触发器的 0 态被暂存起来, 当时钟脉冲下跳后,  $CP=0$ , 主触发器被封锁, 而  $\overline{CP}=1$ , 从触发器打开, 取得与主触发器一致。

若触发器的初始状态为 0, 由同样的分析可知, 在时钟脉冲作用后, 触发器的状态仍为 0。可见, 不论触发器原来的状态如何, 当  $J=0$ ,  $K=1$  时, 总是使触发器置 0。

#### 3. $J=1$ , $K=0$

同样分析可得, 当时钟脉冲作用之后, 触发器的状态总是和  $J$  状态一致, 即保持 1 态。

#### 4. $J=1$ , $K=1$

设时钟脉冲到来之前, 即  $CP=0$ , 触发器的初始状态为“0”, 这时主触发器的  $S=\overline{Q}=1$ ,  $R=Q=0$ , 当时钟脉冲到来之后, 即  $CP=1$  时, 由于主触发器的  $J=1$  和  $R=0$ , 故翻转为“1”态。当  $CP$  从 1 下跳为 0 时, 由于从触发器  $J=1$  和  $R=0$ , 它也翻转为“1”态。反之, 设主触发器的  $J=0$  和  $R=1$ , 当  $CP=1$  时, 它翻转为“0”态。当  $CP$  下跳为 0 时, 从触发器也翻转为“0”态。

$JK$  触发器的逻辑功能见表 9-9。

表 9-9  $JK$  触发器的逻辑功能

$J$	$K$	$Q_{n+1}$	$J$	$K$	$Q_{n+1}$
0	0	$Q_n$	1	0	1
0	1	0	1	1	$\overline{Q_n}$

表 9-9 中  $Q_{n+1}$  是脉冲到来之后的状态 (次态);  $Q_n$  称为现态。

由以上分析可知, 当  $J=K=1$  时, 每到  $J=K=1$  时, 每来一时钟脉冲, 触发器状态就翻转一次; 当  $J=K=0$  时, 触发器将保持原状态不变; 当  $J \neq K$  时, 触发器翻转后的状态将和  $J$  的状态一致, 主触发器的状态更新发生在时钟脉冲  $CP=1$  期间, 从触发器的状态翻转发生在时钟脉冲的下降沿。

### 9.4.4 $D$ 触发器

如图 9-22(a) 所示是  $D$  触发器的图形符号;  $D$  触发器只有一个同步输入端, 其应用十分广泛, 其中,  $D$  是数据输入端,  $CP$  为时钟脉冲输入端,  $\overline{S_D}$ 、 $\overline{R_D}$  为直接置位、复位端, 它们均为低电平有效, 不用时应使之处于高电平状态, 表 9-10 是其逻辑功能表。如图 9-22(b) 所示是其工作波形时序图。

表 9-10 D 触发器逻辑功能表

$D_n$	$Q_{n+1}$	$D_n$	$Q_{n+1}$
0	0	1	1

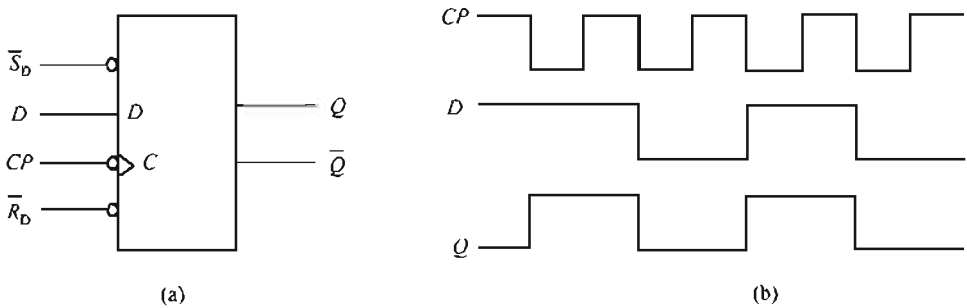


图 9-22 工作波形时序图

D 触发器的逻辑功能是当  $D=0$  时，在时钟脉冲下降沿到来后，输出状态将变成  $Q_{n+1}=0$ ；而当  $D=1$  时，在  $CP$  下降沿到来后，输出状态将变成  $Q_{n+1}=1$ 。综上所述，D 触发器的输出状态只取决于  $CP$  到达前  $D$  输入端的状态，与触发器现态无关，即  $Q_{n+1}=D$ 。

【例 9-12】将 D 触发器的输入端  $D$  接到输出端  $\bar{Q}$ ，如图 9-23 所示，试分析其功能。

解：若初态为 0，即  $Q=0$ 、 $\bar{Q}=1$ ，则当  $CP$  上升沿来到时， $Q$  翻转为 1，即  $Q=1$ 、 $\bar{Q}=0$ ；下一个  $CP$  上升沿来到时， $Q$  翻转为 0，即  $Q=0$ 、 $\bar{Q}=1$ 。可见，每来一个  $CP$  脉冲，触发器翻转一次，具有计数功能，即  $Q_{n+1}=\bar{Q}$ 。此电路称为 T 触发器电路。

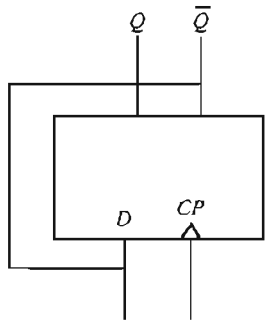


图 9-23 例 9-12 电路

## 9.5 计 数 器

在电子计算机和数字系统中，计数器是重要的基本部件，它能累计和寄存输入脉冲的数目。计数器的应用十分广泛，在各种数字设备中几乎都要用计数器。计数器按其进位制的不同，可分为二进制计数器和十进制计数器，本节着重介绍二进制计数器。

如图 9-24 所示是由 JK 触发器组成的四位二进制加法计数器的逻辑电路图 JK 触发器作计数器使用时，JK 输入端悬空，相当于接高电平，根据 JK 触发器的工作原理。 $J=K=1$  时，每当一个时钟脉冲结束时，触发器就翻转一次，实现计数；低位触发器翻转两次，即计两个数就产生进位。计数前先在清零状态下，即  $Q_0=$

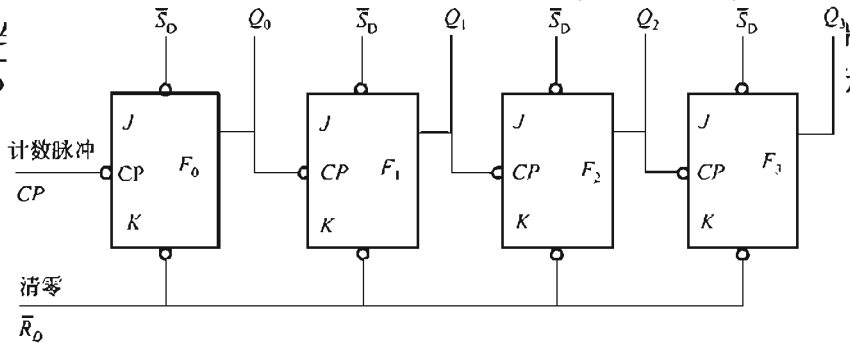


图 9-24 加法计数器的逻辑电路图

$Q_1=Q_2=Q_3=0$ ，这种情况称计数器清 0。已清 0 的所有计数器初始状态为“0”即计数器为“0000”状态。

当第一个脉冲结束时，触发器  $F_0$  由 0 变为 1，即  $Q_0$  由 0 变为 1， $\overline{Q_0}$  由 0 变为 1 产生一正跳变，它对  $F_1$  不起作用，这时计数器呈  $Q_3Q_2Q_1Q_0=0001$  状态。

当第二个脉冲结束时，触发器  $F_0$  由 1 变为 0，即  $Q_0=0$ ， $\overline{Q_0}=1$ ，由于  $Q_0$  由 1 变为 0 产生负跳变，送至  $F_1$  的输入端，于是  $F_1$  由 0 变为 1，并产生一正跳变，这个脉冲对  $F_2$  不起作用，故计数器呈  $Q_3Q_2Q_1Q_0=0010$  状态。

当第三个计数脉冲结束时，触发器  $F_0$  翻转为 1，即  $Q_1=1$ ， $Q_1=0$ ， $F_1F_2F_3$  都不翻转，计数器状态为  $Q_3Q_2Q_1Q_0=0011$ 。如此，可画出如图 9-25 所示的波形图，其状态见表 9-11。

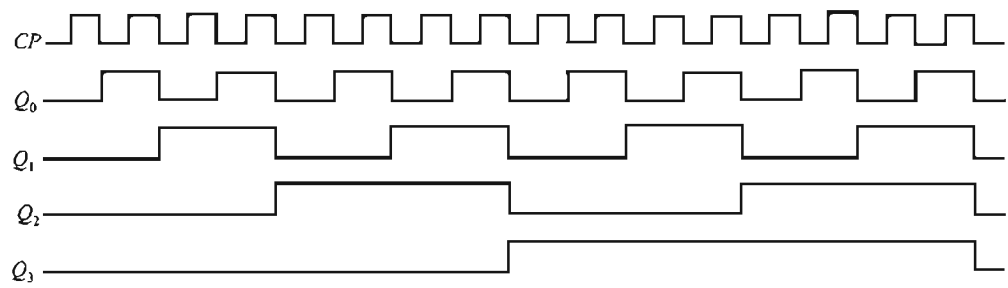


图 9-25 二进制加法计数器的工作波形图

表 9-11 加法计数器状态表

输入脉冲脉冲序号	$Q_3$	$Q_2$	$Q_1$	$Q_0$
0	0	0	0	0
1	0	0	0	1
2	0	0	1	0
3	0	0	1	1
4	0	1	0	0
5	0	1	0	1
6	0	1	1	0
7	0	1	1	1
8	1	0	0	0
9	1	0	0	1
10	1	0	1	0
11	1	0	1	1
12	1	1	0	0
13	1	1	0	1
14	1	1	1	0
15	1	1	1	1

如图 9-25 所示，第一位  $Q_0$  每累计一个数，状态都要变一次；第二位  $Q_1$  每累计两个数，状态变一次；第三位  $Q_2$  每累计四个数，状态变一次；第四位  $Q_3$  每累计八个数，状态变一次。每个触发器的脉冲的频率是低一位触发器输出脉冲频率的二分之一。所以，这种计数器也可作分频器使用。

## 本章小结

1. 数字电路中经常使用二进制和十六进制数。二进制数换算成十进制数时，可以用二进制数各位的权与相应位上的数的乘积来表示。十进制数换算成二进制时，可用除二取余法。十六进制数和十进制数之间的转换要借助于二进制数。
2. 逻辑函数在使用时常常需要进行化简，化简的方法有多种，最常用的有公式法和卡诺图法。
3. 门电路是具有多个输入端和一个输出端的开关电路。
4. 触发器具有两个稳态，目前常用的有  $JK$  触发器和  $D$  触发器。
5. 计数器和寄存器是常用的基本逻辑部件，常用它们组成各种不同功能的逻辑电路。

## 练习题

- 9.1 基本  $RS$  触发器与同步触发器有什么差别？
- 9.2 数字电路与模拟电路的主要区别是什么？数字电路有何优点？
- 9.3  $RS$  触发器的两个严重缺点是什么？试分析  $JK$  触发器是怎样克服这两个缺点的？
- 9.4 为什么二进制计数器又称为分频器？
- 9.5 二进制数有何特点？为什么在数字系统中要采用二进制？
- 9.6 将下列二进制数转换成十进制数：  
①  $(100)_2$     ②  $(10100)_2$     ③  $(11011)_2$     ④  $(1010)_2$
- 9.7 将下列十进制数转换成二进制数：  
① 5    ② 9    ③ 51    ④ 99
- 9.8 将下列十六进制数转换成二进制数和十进制数：  
① 17H    ② 11H    ③ 25H    ④ 99H
- 9.9 三输入端与门、或门和与非门的输入信号如图 9-26 所示，试画出其输出信号波形。

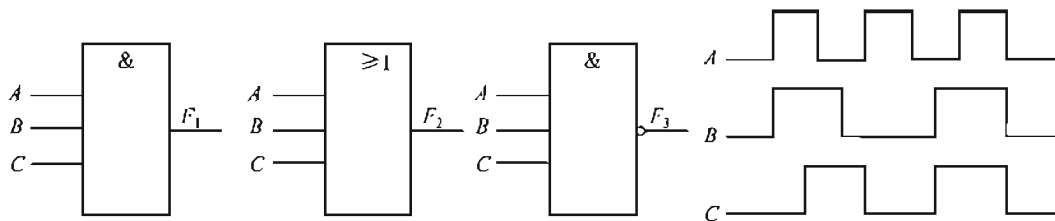


图 9-26 题 9.9 图

- 9.10 证明下列等式：  
①  $A + \overline{A}B = A + B$     ②  $ABC + A\overline{B}C + AB\overline{C} = AC + AB$
- 9.11 在基本  $RS$  触发器中输入如图 9-27 所示的波形，试画出  $Q$  和  $\overline{Q}$  端的波形。
- 9.12 主从  $JK$  触发器的初始状态为 0，请画出在如图 9-28 所示的  $CP$ 、 $J$ 、 $K$  信号的作用下  $Q$  端的波形。

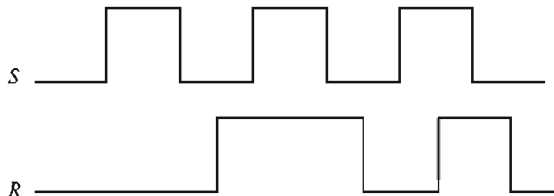


图 9-27 题 9.11 图

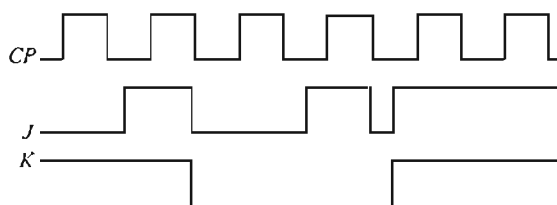


图 9-28 题 9.12 图

9.13 D 触发器的输入波形如图 9-29 所示，试画出  $Q$  端的输出波形（设初态为 0）。

9.14 已知逻辑电路的输入  $A$ 、 $B$  和输出波形如图 9-30 所示，试写出  $Y$  的逻辑表达式。

9.15 已知电路如图 9-31 所示，试分析该电路的逻辑功能。

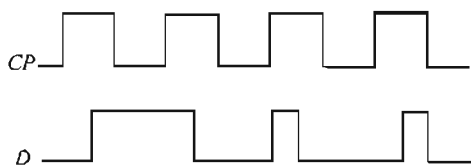


图 9-29 题 9.13 图

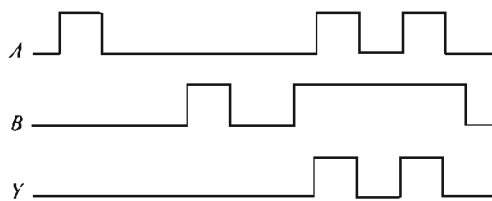
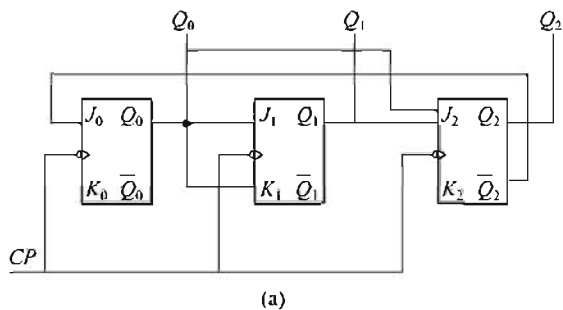
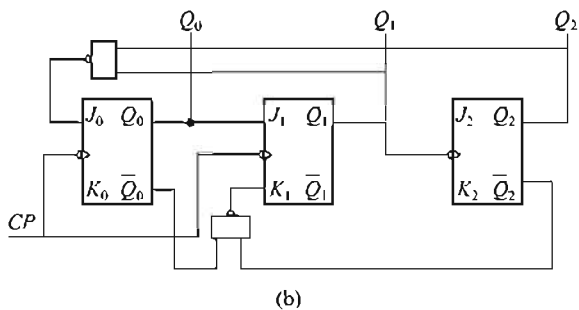


图 9-30 题 9.14 图



(a)



(b)

图 9-31 题 9.15 图



# 附录

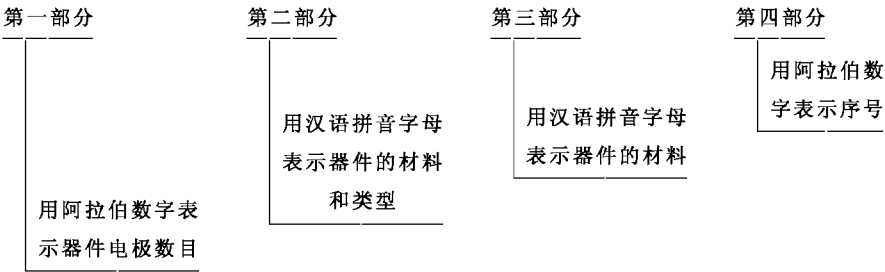
## 附录 A 半导体器件命名方法

(国家标准 GB 249—64)

本标准适用于无线电电子设备用半导体器件的型号命名。  
型号组成部分的符号及其意义：

第一部分		第二部分		第三部分		第四部分
用数字表示 器件电极数目		用汉语拼音字母 表示器件的材料和极性		用汉语拼音字母 表示器件类型		用数字表示 器件序号
符号	意义	符号	意义	符号	意义	
2	二极管	A	N 型锗材料	P	普通管	
3	晶体管	B	P 型锗材料	V	微波	
		C	N 型硅材料	W	稳压管	
		D	P 型硅材料	C	参量管	
		A	PNP 型锗材料	Z	整流管	
		B	NPN 型锗材料	L	整流堆	
		C	PNP 型硅材料	S	隧道管	
		D	NPN 型硅材料	U	光电管	
				K	开头管	
				X	低频小功率管 截止频率<3MHz 耗散功率<1W	
				G	高频小功率管 截止频率≥3MHz 耗散功率<1W	
				D	低频大功率管 截止频率<3MHz 耗散功率≥1W	
				A	高频大功率管 截止频率≥3MHz 耗散功率≥1W	
				T	可控整流	

半导体器件的型号由四部分组成：



## 一、二极管

### (1) 检波与整流二极管

www.qitubk.com 奇兔電子書下載

(2) 稳压二极管

参数		稳定电压	稳定电流	耗散功率	最大稳定电流	动态电阻
符号		$U_z$	$I_z$	$P_z$	$I_{zM}$	$r_z$
单位		V	mA	mW	mA	$\Omega$
测试条件		工作电流 等于稳定电流	工作电压 等于稳定电压	$-60^{\circ}\text{C}\sim+50^{\circ}\text{C}$	$-60^{\circ}\text{C}\sim+50^{\circ}\text{C}$	工作电流 等于稳定电流
型          号	2CW11	3.2~4.5	10	250	55	$\leq 70$
	2CW12	4~5.5	10		45	$\leq 50$
	2CW13	5~6.5	10		38	$\leq 30$
	2CW14	6~7.5	10		33	$\leq 15$
	2CW15	7~8.5	5		29	$\leq 15$
	2CW16	8~9.5	5		26	$\leq 20$
	2CW17	9~10.5	5		23	$\leq 25$
	2CW18	10~12	5		20	$\leq 30$
	2CW19	11.5~14	5		18	$\leq 40$
	2CW20	13.5~17	5		15	$\leq 50$
	2DW7A	5.8~6.6	10	200	30	$\leq 25$
	2DW7B	5.8~6.6	10		30	$\leq 15$
	2DW7C	6.1~6.5	10		30	$\leq 10$

(3) 开关二极管

参数		反向击穿电压	最高反向工作电压	反向压降	反向恢复时间	零偏压电容	反向漏电流	最大正向电流	正向压降
单位		V	V	V	ns	pF	$\mu\text{A}$	mA	V
型          号	2AK1	30	10	$\geq 10$	$\leq 200$	$\leq 1$		$\geq 100$	
	2AK2	40	20	$\geq 20$	$\leq 200$			$\geq 150$	
	2AK3	50	30	$\geq 30$	$\leq 150$			$\geq 200$	
	2AK4	55	35	$\geq 35$	$\leq 150$			$\geq 200$	
	2AK5	60	40	$\geq 40$	$\leq 150$			$\geq 200$	
	2AK6	75	50	$\geq 50$	$\leq 150$			$\geq 200$	
	2CK1	$\geq 40$	30	30	$\leq 150$	$\leq 30$	$\leq 1$	100	$\leq 1$
	2CK2	$\geq 80$	60	60					
	2CK3	$\geq 120$	90	90					
	2CK4	$\geq 150$	120	120					
	2CK5	$\geq 180$	180	180					
	2CK6	$\geq 210$	210	210					

二、晶体管

(1) 3DG6

参数符号		单位	测试条件	型号			
				3DG6A	3DG6B	3DG6C	3DG6D
直流参数	$I_{CBO}$	$\mu\text{A}$	$U_{CB}=10\text{V}$	$\leq 0.1$	$\leq 0.1$	$\leq 0.1$	$\leq 0.1$
	$I_{EBO}$	$\mu\text{A}$	$U_{EB}=1.5\text{V}$	$\leq 0.1$	$\leq 0.1$	$\leq 0.1$	$\leq 0.1$
	$I_{CEO}$	$\mu\text{A}$	$U_{CE}=10\text{V}$	$\leq 0.1$	$\leq 0.1$	$\leq 0.1$	$\leq 0.1$
	$U_{BES}$	V	$I_B=1\text{mA}$ $I_C=10\text{mA}$	$\leq 1.1$	$\leq 1.1$	$\leq 1.1$	$\leq 1.1$
	$h_{FE}$		$U_{CB}=10\text{V}$ $I_C=3\text{mA}$	10~200	20~200	20~200	20~200

续表

参数符号		单位	测试条件	型号			
				3DG6A	3DG6B	3DG6C	3DG6D
交流参数	$f_T$	MHz	$U_{CE}=10V$ $I_C=3mA$ $f=30MHz$	$\geq 100$	$\geq 150$	$\geq 200$	$\geq 150$
	$G_p$	dB	$U_{CB}=10V$ $I_C=3mA$ $f=100MHz$	$\geq 7$	$\geq 7$	$\geq 7$	$\geq 7$
	$C_{od}$	pF	$U_{CB}=10V$ $I_C=3mA$ $f=5MHz$	$\leq 4$	$\leq 3$	$\leq 3$	$\leq 3$
极限参数	$U_{CBO(BR)}$	V	$I_C=100\mu A$	30	45	45	45
	$U_{CEO(BR)}$	V	$I_C=200\mu A$	15	20	20	30
	$U_{EBO(BR)}$	V	$I_E=-100\mu A$	4	4	4	4
	$I_{CM}$	mA		20	20	20	20
	$P_{CM}$	mW		100	100	100	100
	$I_{Im}$	℃		150	150	150	150

## (2) 3DK4

参数符号		单位	测试条件	型号			
				3DK4A	3DK4B	3DK4C	3DK4D
直流参数	$I_{CBO}$	$\mu A$	$U_{CB}=10V$	$\leq 1$	$\leq 1$	$\leq 1$	$\leq 1$
	$I_{EBO}$	$\mu A$	$U_{EB}=10V$	$\leq 10$	$\leq 10$	$\leq 10$	$\leq 10$
	$U_{CES}$	V	$I_B=50mA$ $I_C=500mA$	$\leq 1$	$\leq 1$	$\leq 1$	$\leq 1$
	$U_{BES}$	V	$I_B=500mA$ $I_C=500mA$	$\leq 1.5$	$\leq 1.5$	$\leq 1.5$	$\leq 1.5$
	$h_{FE}$		$U_{CB}=10V$ $I_C=3mA$	20~200	20~200	20~200	20~200
交流参数	$f_T$	MHz	$U_{CE}=1V$ $I_C=50mA$ $f=30MHz$ $R=5\Omega$	$\geq 100$	$\geq 100$	$\geq 100$	$\geq 100$
	$C_{od}$	pF	$U_{CB}=10V$ $I_E=0$ $f=5MHz$	$\leq 15$	$\leq 15$	$\leq 15$	$\leq 15$
开关参数	$t_{on}$	ns	$U_{CE}=26V$ $U_{EB}=1.5V$ 脉冲幅度 7.5V 脉冲宽度 1.5 $\mu s$ 脉冲重复频率 1.5kHz	50	50	50	50
	$t_{off}$	ns		100	100	100	100
极限参数	$U_{CBO(BR)}$	V	$I_C=100\mu A$	20	40	60	40
	$U_{CEO(BR)}$	V	$I_C=200\mu A$	15	30	45	30
	$U_{EBO(BR)}$	V	$I_E=-100\mu A$	4	4	4	4
	$I_{CM}$	mA		800	800	800	800
	$P_{CM}$	mW	不加散热板	700	700	700	700
	$T_{Im}$	℃		175	175	175	175

## 附录 C 用电安全措施

### 一、常用安全措施

由于存在人身伤害、火灾以及对设备和材料损坏等因素，所有运行的电工和电子电路都应该遵守下列基本的安全措施。

1. 电路和设备通电工作前，需切断电源。互锁安全设备绝对不能过载使用，决不要主观认为电路是断电的，使用前应用电压表检查设备是否断电。
2. 必须在电路断电后，才能移除和替换熔断丝。
3. 保证所有设备接地良好。
4. 当移除或安装酸性电池时，要有额外的安全措施。
5. 使用清洁液清洗设备时，要确保通风。
6. 要将清洁用的碎片和其他可燃物质放在金属密闭容器中存放。
7. 当发生电气火灾时，应立即切断电源，并马上报告有关部门。

### 二、高压安全措施

随着操作者对工作电器的熟悉，就会对日常工作程序粗心大意了。一些电气设备所用电压的危险性较大，无意接触就会致人死命。无论什么时候，在高电压设备工作时，应该遵守下列安全措施。

1. 要考虑你每一行为的后果。因为会伤害自己和他人的人身安全，决不要以任何个人理由冒险一试。
2. 避免接触正在工作的电路。在接通高电压时，不要对电路进行操作或调整。
3. 不要单独工作，应在有其他人在场时工作，以免发生紧急事故，没有人能提供帮助或急救。想要从事电工和电子领域工作，应该考取 CPR 资格证书。
4. 不要擅自改动互锁装置。
5. 不要使自己与地接触。当调整电路或使用测量仪器时，确保自己没有接地。连接设备和电路时，要单手操作。要练习将另外一只手放在衣服口袋里。
6. 有水渗漏时，决不要将设备通电。

### 三、个人安全措施

当你对电工和电子电路设备进行操作时，须确保安全。如果电源不安全，不要工作。

1. 保证工作环境干燥、清洁。避免在潮湿的环境下工作，因为人体皮肤的电阻值会因潮湿而下降，增加电击的机会。
2. 不要穿宽松、有摆沿的衣服。这样的衣服不仅容易接触设备，而且可能成为电的导体。
3. 只穿绝缘鞋。这样将减小电击机会。
4. 摘掉全部戒指、手表、手镯、项链和标牌以及类似金属饰物。避免穿戴配有裸露金属拉链、纽扣和其他金属扣件的衣物。因为金属是导体，通电发热后，容易引起严重烧伤。
5. 不要徒手移动设备发热部件。
6. 用短路棒短路电容两个端子，放掉高电压。电容器能长时间保存电荷，而这经常被忽略。

**184** | 电工与电子学

7. 保证工作设备接地良好。将所有测试设备连接到被测电路或设备上并可靠接地。
8. 断电后才将夹子接入电路。手拿无绝缘层的夹子会有受电击危险。
9. 测量高于 300V 电压时，不要握住测试端子。这样可消除测试端子漏电而受到电击的危险。

安全大事，人人有责。每个人无论课内外都要重视安全问题，确保人身和设备安全。

每个工作班组都应该强调安全事项，经常进行安全培训。无论什么时候，对下一步做什么或应该怎么做有疑问的话，最好是请教指导教师。

## 参 考 文 献

- [1] 徐国和 . 电工与电子技术 [M]. 北京: 高等教育出版社, 1993.
- [2] 沈裕钟 . 电工与工业电子学 [M]. 北京: 高等教育出版社, 1997.
- [3] 刘光源 . 机床电气设备的维修 [M]. 北京: 机械工业出版社, 1998.
- [4] 郑凤翼 . 电工工具与电工材料 [M]. 北京: 人民邮电出版社, 1999.
- [5] 任致程 . 电子制作工艺技巧 [M]. 北京: 人民邮电出版社, 1999.
- [6] 钱允琪, 译 . 数字电路的计算 [M]. 北京: 科学出版社, 2003.
- [7] 林平勇 . 电工与电子技术 [M]. 北京: 高等教育出版社, 2004.
- [8] 李宇峰, 译 . 电工与电子技术 [M]. 北京: 高等教育出版社, 2004.
- [9] 董桂桥 . 电工与电子基础 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2004.
- [10] 韩朝 . 电工与电子技术 [M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2005.
- [11] 张晓东 . 电工实用电子制作 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2005.
- [12] 何希才 . 数字电路入门 [M]. 北京: 科学出版社, 2005.