

第一篇

电工安全技术基础

第一章 电工与电子技术基础知识 / 2

- 1.1 电工基本概念与基本定律 / 2
- 1.2 电路的组成与连接 / 4
- 1.3 正弦交流电路 / 6
- 1.4 磁路 / 13
- 1.5 半导体器件及其应用 / 16

第二章 电工测量仪表 / 25

- 2.1 电工测量仪表的基本知识 / 25
- 2.2 磁电式测量仪表 / 26
- 2.3 电磁、电动式仪表 / 32
- 2.4 接地电阻测量仪 / 37

第三章 触电危害与触电急救 / 41

- 3.1 电流对人体的伤害 / 41
- 3.2 触电方式与触电事故的规律 / 44
- 3.3 触电急救 / 46

第四章 触电防护技术 / 51

- 4.1 绝缘与屏护 / 51
- 4.2 安全间距 / 55
- 4.3 电气隔离 / 57
- 4.4 剩余电流动作保护 / 59
- 4.5 安全电压 / 65

第五章 电气安全工作要求与措施 / 68

- 5.1 电气安全工作基本要求 / 68
- 5.2 电气安全用具及安全标识 / 70
- 5.3 电气安全的组织措施 / 77
- 5.4 保证安全的技术措施 / 82

第六章 雷电、静电与磁场 / 85

- 6.1 雷电的产生与危害 / 85
- 6.2 防雷装置及防雷措施 / 86

目录

Contents

- 6.3 静电危害与防护 / 93
- 6.4 电磁场的危害与防护 / 95

第七章 电气防火与防爆 / 96

- 7.1 电气火灾与爆炸的原因 / 96
- 7.2 危险物质和危险环境 / 97
- 7.3 防爆设备和防爆电气线路 / 99
- 7.4 电气防火与防爆技术 / 102

第二篇

高压配电与电力线路

第八章 高压配电装置 / 106

- 8.1 高压开关电器 / 106
- 8.2 高压熔断器 / 114
- 8.3 互感器 / 118
- 8.4 电力电容器 / 123

第九章 电力变压器 / 126

- 9.1 电力变压器的结构原理 / 126
- 9.2 电力变压器的分类与技术参数 / 130
- 9.3 电力变压器的运行 / 133
- 9.4 变压器的检修及特殊条件的巡视 / 135
- 9.5 变压器故障和事故处理 / 136

第十章 电力线路 / 141

- 10.1 电力线路的种类与特点 / 141
- 10.2 电力线路的结构组成与敷设 / 142
- 10.3 电力线路的安全运行要求 / 155
- 10.4 电力线路的巡视检查与故障检修 / 156

第十一章 工厂变配电系统及其安全运行 / 162

- 11.1 变配电系统的主接线 / 162
- 11.2 变配电所的类型及其结构布置 / 164
- 11.3 变配电所的安全运行 / 167

第三篇

低压配电与用电设备安全

第十二章 我国低压配电系统的接地形式 / 178

- 12.1 TN 系统 / 178
- 12.2 TT 系统与 IT 系统 / 184
- 12.3 接地装置 / 189

第十三章 低压电器与配电装置 / 193

- 13.1 低压开关电器 / 193
- 13.2 低压保护电器 / 199
- 13.3 电磁式接触器与继电器 / 202
- 13.4 低压配电屏 / 206

第十四章 三相交流异步电动机 / 210

- 14.1 三相异步电动机的结构原理与运行特性 / 210
- 14.2 异步电动机的技术参数 / 214
- 14.3 三相异步电动机的启动、调速与制动 / 216
- 14.4 三相异步电动机的选择、运行和维护 / 221

第十五章 手持式电动工具与移动式电气设备 / 225

- 15.1 基本分类与结构 / 225
- 15.2 安全性能要求 / 227
- 15.3 安全技术措施 / 228
- 15.4 工具管理 / 231

第十六章 照明电路 / 233

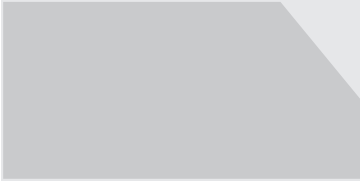
- 16.1 照明的方式与种类 / 233
- 16.2 常用电光源与灯具 / 234
- 16.3 照明设备的安装 / 239
- 16.4 照明负荷计算与导线截面的选择 / 240
- 16.5 照明电路的故障及检修 / 242

第十七章 数字控制设备 / 244

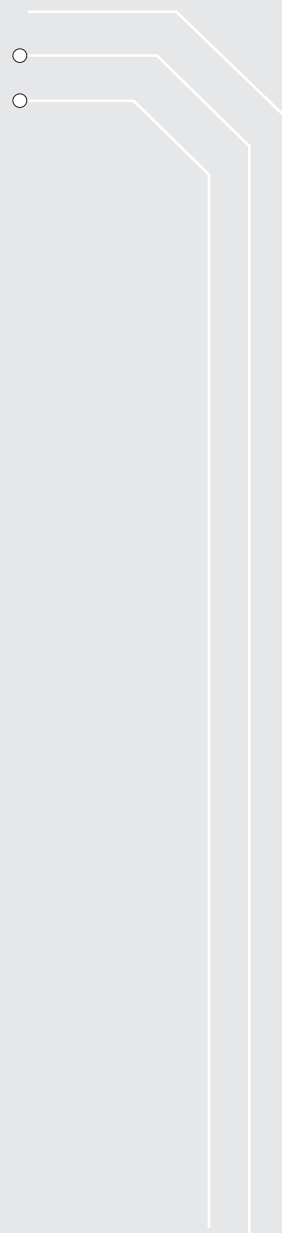
- 17.1 可编程序控制器 (PLC) / 244
- 17.2 变频器 / 253

附录：典型事故案例及事故原因分析 / 267

参考文献 / 275



第一篇 电工安全技术基础



第一章 电工与电子技术基础知识

在现代工业、农业、交通、通信、国防以及日常生活中，电的应用极为广泛。为了保证电气作业的规范及安全，电工应了解一定的电工与电子技术基础知识。本章主要介绍电工基本概念和基本定律、电路的组成与连接、正弦交流电路、电磁感应与磁路、半导体器件及其应用等电工电子基础知识。

1.1 电工基本概念与基本定律

电路中研究的问题很多，涉及的范围也相当广泛。为了便于研究，必须先弄清楚电路的主要物理量和基本定律。

1.1.1 电路中的主要物理量

1. 电流 I

电荷的定向运动形成电流。电流的单位是安培，简称安，用字母 A 表示。常用的电流单位还有千安 (kA)、毫安 (mA) 和微安 (μA)。

2. 电压与电位

(1) 电压 U

在电场中，将单位正电荷从一点移动到另外一点电场力所做的功，叫这两点之间的电压。电压的单位是伏特 (V)，常用的电压单位还有千伏 (kV) 与毫伏 (mV) 等。

(2) 电位 V

在电路中若指定某点 (可任意选取) 为参考点，电路中其他点相对于该点的电压即是该点的电位。电路中任意两点间的电压，就是该两点的电位之差。显然电位与电压具有相同的单位。

3. 电阻 R

电阻衡量的是物质阻碍电流通过的能力，它是物质固有的属性。电阻的单位有欧姆 (Ω)、千欧 (k Ω)、兆欧 (M Ω) 等。

对长直导体，有

$$R = \rho \cdot \frac{l}{S} \quad (1-1)$$

式中， ρ ——导体电阻率，单位为 $\Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$ ；

l ——导体长度，单位为米 (m)；

S ——导体截面积，单位为平方毫米 (mm^2)。

由此可见, 导体电阻与导体长度成正比, 与导体横截面积成反比, 还与导体材质(电阻率)密切相关。

4. 功率和电能

在电路中, 存在着能量的转换。如果电路元件两端的电压 (U) 和通过它的电流 (I) 能够确定, 那么该元件的功率 (P) 为

$$P = U I \quad (1-2)$$

上式中, 若取电压单位为伏特, 电流单位为安培, 则功率的单位是瓦 (W)。

下面介绍电能的计算。

“功”和“能”是同一事物的两种形态。“电功”是由消耗“电能”得到的。因此, “电能”的消耗量, 就是用在时间 (t) 内所做的“电功”来度量的。电能的文字符号用“W”表示, 即

$$W = P t \quad (1-3)$$

电能的单位为瓦·秒, 即焦耳 (J)。实用中, 供电部门收取电费时, 用度作为电能单位。1度等于 $1\text{kW} \cdot \text{h}$ (千瓦·小时)。1kW 的电炉通电 1h 消耗 1度电; 40W 的电灯使用 25h 也消耗 1度电。

1.1.2 电路的基本定律

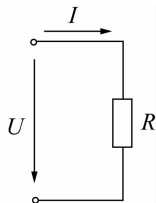


图 1-1 电阻两端的伏安关系

1. 电路的欧姆定律

欧姆定律: 通过线性电阻 R 的电流 I 与作用在其两端的电压 U 成正比, 即

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

2. 基尔霍夫定律

(1) 基尔霍夫电流定律 (KCL)

电流通过导体时, 在同一时间内, 从任意横截面的一侧流入的电荷量, 总等于从另一侧流出该横截面的电荷量。因此, 对于电路中任一节点处, 流入节点的电流总是等于从该点流出的电流。若规定流进节点电流为正, 流出节点电流为负, 则

$$\sum I = 0 \quad (1-5)$$

这就是基尔霍夫电流定律。

(2) 基尔霍夫电压定律 (KVL)

在任何一个闭合回路中, 按一定绕行方向, 沿回路一周各段电压的代数和为零。即

$$\sum U = 0 \quad (1-6)$$

这就是基尔霍夫电压定律。

欧姆定律解决了电路中单一元件上电压与电流之间的关系（简称伏安关系）；基尔霍夫定律解决了电路中各元件之间的电流（或电压）关系，这两大定律奠定了整个电路的基础。

1.2 电路的组成与连接

1.2.1 电路

1. 电路的组成及各元件的作用

一个基本的电流回路称为电路，包括电源、负载、控制保护电器和连接导线，如图 1-2 所示。

- (1) 电源：在电路中提供电能的供电设备，例如电池、发电机等。
- (2) 负载：消耗电能的设备，例如照明灯、电动机、正在充电的电池等。
- (3) 控制设备：在电路中起控制和保护作用。例如开关、熔断器、接触器等。
- (4) 连接导线：由导体材料制成，起着传送信号或传输电能的作用。

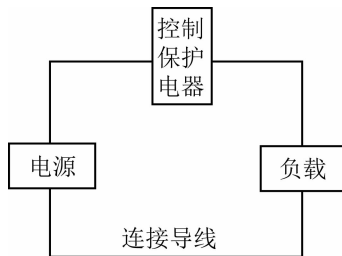


图 1-2 电路的基本结构组成

2. 电路的分类

根据通过电路的电流不同，电路可分为直流电路和交流电路。流过直流电的电路称为直流电路，流过交流电的电路称为交流电路。

1.2.2 电路的状态

电路有三种可能的工作状态：通路，断路，短路。

- (1) 通路（负载工作状态）：指电源与负载接成闭合回路，此时电路流过工作电流。
- (2) 断路（开路）：指电源与负载没有接通成闭合回路，此时电路流过的电流为零。
- (3) 短路：指电源未经负载而直接由导线连接成闭合回路。短路时，电流很大，容易造成严重后果，应予避免。为了避免短路事故所引起的严重后果，通常在电路中接入熔断器或自动断路器，以便在故障时迅速将故障电路自动切断。有时为了工作需要，人为地将电路的某一部分或电阻的某一段短路，这种有目的的短路称为“短接”。

1.2.3 电阻的连接

在电路中,电阻根据不同的需要按一定方式连接起来,联接方式一般有串联、并联和混联三种。在分析计算时,它们都可用一个等效电阻来代替,而不影响电路中的总电压、总电流和总功率。

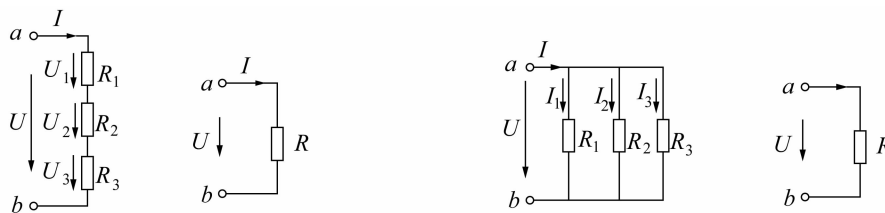
1. 电阻的串联

两个或两个以上电阻依次连接,组成无分支电路,流过相同的电流,称为电阻串联电路。

2. 电阻的并联

两个或两个以上电阻的两端分别接在一起,各电阻承受相等的电压,叫做电阻并联电路。

以图 1-3 为例,将电阻的串联、并联电路的特点总结为表 1-1 所示。



(a) 电阻串联及其等效模型

(b) 电阻并联及其等效模型

图 1-3 电阻的串、并联

表 1-1 电阻的串联、并联特点对比表

连接形式	串联	并联
等效电阻	等效电阻等于串联电阻之和, 即 $R=R_1+R_2+R_3$	等效电阻的倒数等于各分支电路电阻倒数之和, 即 $\frac{1}{R}=\frac{1}{R_1}+\frac{1}{R_2}+\frac{1}{R_3}$
电流	流过各电阻的电流相等, 即 $I=I_1=I_2=I_3$	总电流等于各支路电流之和, 即 $I=I_1+I_2+I_3$
电压	总电压等于各段电压之和, 即 $U=U_1+U_2+U_3$	各并联电阻两端电压相等, 即 $U=U_1=U_2=U_3$
分压与分流	分压公式: $U_1=\frac{U}{R_1+R_2+R_3}R_1=\frac{U}{R}R_1$ $U_2=\frac{U}{R_1+R_2+R_3}R_2=\frac{U}{R}R_2$ $U_3=\frac{U}{R_1+R_2+R_3}R_3=\frac{U}{R}R_3$	分流公式: $I_1=\frac{R}{R_1}I$ $I_2=\frac{R}{R_2}I$ $I_3=\frac{R}{R_3}I$

3. 混联

混联电路既有电阻串联又有电阻并联。混联电路的等效电阻，可以根据其部分电路的串联或并联关系，逐步简化计算。

1.3 正弦交流电路

1.3.1 正弦交流电的基本知识

1. 正弦交流电的基本概念

正弦交流电，是指按正弦规律变化的交流电。如正弦交流电流，可表述如下：

$$i = I_m \sin(\omega t + \varphi_0) = \sqrt{2} I \sin(2\pi f t + \varphi_0)$$

工程中所说的交流电（Ac），通常都指正弦交流电。

2. 正弦交流电的“三要素”

为了准确地描述正弦交流电，需要引入以下几个物理量：

(1) 正弦交流电的周期和频率

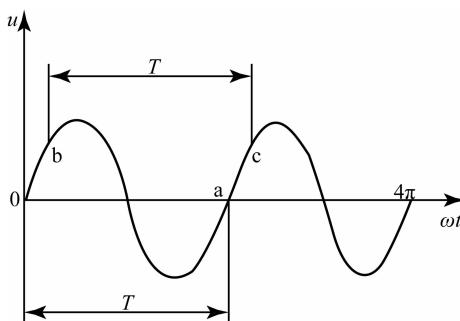


图 1-4 正弦交流电压的周期

交流电的“周期”就是交流电的某一值重复出现的最短时间，用字母“ T ”表示。图1-4中从0点到a点是一个周期，从b点到c点也是一个周期。周期的长短反映了交流电变化的快慢。衡量交流电变化快慢，还常使用另一个物理量——频率。频率为每秒钟变化的周期数，用字母“ f ”表示。可见频率和周期互为倒数关系，即

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

式中，周期的单位是秒（s）；频率的单位是赫（Hz），常用的单位还有千赫（kHz）、兆赫（MHz）。

我国电力工业的标准频率为 50Hz，称为工频，周期是 0.02s。

(2) 正弦交流电的最大值和有效值

最大值就是在一个周期的变化过程中，出现的最大瞬时值。从正弦量的波形曲线上看，最大值就是波幅的最高点，所以也称“幅值”。变量的最大值用大写字母下脚标



以“m”来表示，如 U_m 、 I_m 分别表示电压、电流的“最大值”。

有效值是根据“等效发热原则”来定义的。假设正弦交流电流在一个周期内发热量与某直流电流在同一时间内发热量相同，则该直流电流的大小即为交流电流的有效值。正弦交流电路中最大值除以 $\sqrt{2}$ 即为电路的有效值。

一般电气设备上标的额定电压和额定电流以及通常使用的交流电压和电流的数值都指的是有效值。使用交流电压表和电流表测得的数值也都是有效值。

(3) 正弦交流电的相位角

正弦交流电在每一时刻都是变化的， $(\omega t + \varphi_0)$ 是该正弦交流电在 t 时刻对应的角度，称为相位角，简称相位。对于任一给定的时间 t ，都有对应相位角。

相位角由两个部分组成， ωt 和 φ_0 。 ωt 指的是在 t 时刻所经历的角度， φ_0 是 $t=0$ 时所对应的相位，称为“初相角”，简称“初相”，用字母 φ_0 表示。相位和初相的单位都是弧度 (rad)。

1.3.2 纯电阻、电感、电容电路

1. 纯电阻电路

在实际用电器具和设备中，有的可以忽略次要因素，只突出其电阻性质，从而将其抽象为电阻元件（所谓“纯电阻”），如电阻电炉、白炽灯等。

(1) 电阻元件上正弦电流与电压关系

假定电阻元件 R 上电压为

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

由于电阻元件上的电流与电压每一瞬时都应符合欧姆定律，所以

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

则电流与电压有效值之间关系为

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

(2) 电阻元件上的功率

有功功率是瞬时功率在一个周期内的平均值，也称“平均功率”（用 P 表示），即

$$P = U_R I = I^2 R = \frac{U_R^2}{R} \quad (1-8)$$

有功功率 P 的单位是瓦 (W) 或千瓦 (kW)。

2. 纯电感电路

如果一个实际线圈的电阻忽略不计，那么其就可以被抽象为一个电感元件。

(1) 电感元件上正弦电流与正弦电压的关系

假设电感元件中通过的电流为

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

可以推导出电压有效值为

$$U_L = \omega L I$$

式中 ω ——角频率, $\omega = 2\pi f$

L ——电感量

若令 $X_L = \omega L$, 则

$$U_L = X_L I \quad (1-9)$$

这里的 X_L 称为“感抗”, 感抗的单位同电阻一样, 也是欧姆 (Ω)。

(2) 电感元件上的功率

在一个周期内, 电感元件吸收的能量与放出的能量是相等的, 即 $P=0$, 可见电感并没有消耗功率, 它只是“储能元件”。

电感元件上电压有效值与电流有效值的乘积定义为感性“无功功率”, 用 Q_L 表示。

$$Q_L = U_L I = I^2 X_L = \frac{U_L^2}{X_L} \quad (1-10)$$

为了区别有功功率, 把无功功率的单位改用“乏”(var) 或“千乏”(kvar)。

3. 纯电容电路

实际的电容器不考虑内部损耗等因素, 就可抽象为电容元件。在直流电路中, 电容元件相当于断路。电容元件在正弦交流电情况下又如何呢?

(1) 电容元件上正弦电压与正弦电流关系

假设电容元件两端的电压为

$$u_C = U_{Cm} \sin \omega t$$

可以推导出电流有效值为:

$$I = \omega C U_C$$

式中 C ——电容量

若令 $X_C = \frac{1}{\omega C}$, 则

$$I = \frac{U_C}{X_C} \quad (1-11)$$

这里的 X_C 称为“容抗”, 单位也是欧 (Ω)。

(2) 电容元件上的功率

与电感元件一样, 电容也是储能元件。元件本身没有消耗能量。将电容元件上电压有效值与电流有效值的乘积称为容性无功功率, 用 Q_C 表示。

$$Q_C = U_C I = I^2 X_C = \frac{U_C^2}{X_C} \quad (1-12)$$

Q_C 与 Q_L 一样, 单位也用乏 (var) 表示。

1.3.3 电阻、电感、电容串联电路

电阻、电感、电容元件串联电路是具有一般意义的典型电路, 因为它包含了三个不同的电路参数。常用的串联电路, 可认为是它的特例。

1. 电压与电流的关系

如图 1-5 所示, 电路端电压与电流 (有效值) 之间满足

$$U = I \cdot |Z| \quad (1-13)$$

式中, $Z = R + j(X_L - X_C) = R + jX = |Z| \angle \varphi$, 称为复阻抗;

$|Z|$ 为复阻抗的模, $|Z| = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2} = \sqrt{R^2 + X^2}$

φ 为阻抗角, $\varphi = \arctg \frac{X_L - X_C}{R} = \arctg \frac{X}{R}$

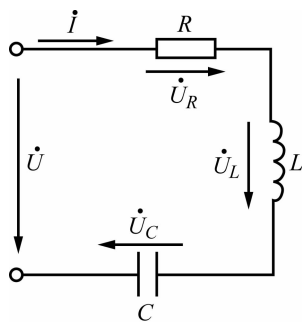


图 1-5 R、L、C 串联电路

2. 电路性质

(1) $X_L > X_C$ 感抗大于容抗, 电路总电压 ($\dot{U}$) 超前电流 ($\dot{I}$) φ 角, 称为“感性”电路。

(2) $X_L < X_C$ 感抗小于容抗, 电路总电压滞后电流 φ 角, 称为“容性”电路。

(3) $X_L = X_C$ 感抗等于容抗, 电路总电压与电流同相, 称为“电阻性电路”。

由上述分析可知, 从阻抗角 φ 的正、负可判别电路的性质。

3. 功率

负载的有功功率为:

$$P = UI \cos \varphi \quad (1-14)$$

负载的无功功率为:

$$Q = UI \sin \varphi \quad (1-15)$$

负载的视在功率为:

$$S = UI \quad (1-16)$$

视在功率的单位是伏安 ($V \cdot A$) 或千伏安 ($kV \cdot A$)。

1.3.4 功率因素的提高

功率计算时, 引出了功率因数 ($\cos \varphi$), 下面将进一步分析提高功率因数的经济价值和主要方法。

1. 提高功率因素的意义

(1) 降低线路电压损耗, 提高供电质量。

三相线路工作电流

$$I = \frac{P}{\sqrt{3}U_N \cos\varphi}$$

可见在线路额定电压不变情况下（一般都如此），传输相同的功率，功率因数越高，电流就越小，因此线路电压损耗就下降了。

(2) 减小电网损耗。

电网损耗

$$\Delta P = 3I^2 R$$

使传输电流下降，可以令电网损耗急剧降低。

(3) 充分发挥供电设备的潜能。

对发电机与变压器等供电设备，其额定容量一般用视在功率表示，即 $S_N = \sqrt{3}U_N I_N$ 。

但它们到底向负载提供了多少能量（有功功率 $P = \sqrt{3}UI \cos\varphi$ ），显然与负载的功率因数有关。功率因数越高，电源容量利用率也就越高。

2. 提高功率因数的主要方法

工业企业中，由于大量使用感应电动机等设备，导致功率因数降低。提高功率因数的方法有：

(1) 正确选用电动机。

应根据拖动机械的需要，正确选用电动机的容量，尽量避免“大马拉小车”的现象。

(2) 减少设备空载运行时间。

设备空载运行时功率因数一般都比较低，因此应尽量减少设备空载运行时间。

(3) 采用无功功率补偿措施。

工厂中常采用并联电容器进行无功功率补偿，用容性电流来补偿（或抵消）感性电流，以达到提高功率因数的目的。接入电容的大小可按式计算

$$C = \frac{P}{U^2 \omega} (\tan\varphi_1 - \tan\varphi_2) \quad (1-17)$$

式中 φ_1 —— 接入电容前的功率因数角

φ_2 —— 补偿后的功率因数角

(4) 对一些高频谐波比较突出的设备，如大型晶闸管变流设备、大容量变频器等，宜串联电抗器进行滤波，以提高功率因数。

1.3.5 三相交流电源

三相交流电源是将三个频率相同、幅值相同，相位彼此相差 120° 的单相电源按照一定的方式连接之后，再向负载供电。三相电源的连接方式有星形联接和三角形联接。

1. 星形（Y）联接

将发电机三相绕组的尾端 U_2 、 V_2 、 W_2 接于一点，三相绕组的首端 U_1 、 V_1 、 W_1 分别与输电线相接，并通过输电线路将电能送往变电站、配电端或用电设备，这种接法称为星形（Y）联接，如图 1-6 所示。

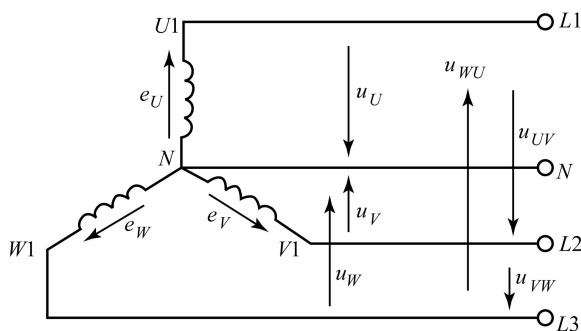


图 1-6 三相电源的星形联接

三相绕组末端相连的一点称为中性点，用“N”表示。从中性点引出的线叫做中性线，由于中性线一般与大地相接，通常又称为地线（或零线）。从首端引出的三根线称为相线，由于它们与大地之间有一定的电位差，因此，俗称火线。

由三根相线和一根中性线组成的输电方式称为三相四线制（通常在低压配电系统中采用）。只由三根相线组成的输电方式称为三相三线制。

三相电源绕组星形联接时可以输出相电压和线电压两种电压。

(1) 相电压

即每相绕组的首端与末端之间的电压（即相线与中性线之间的电压）。

(2) 线电压

即任意两根相线之间的电压（即相线与相线之间的电压）。

在工程技术上，一般用 U_L 表示线电压，用 U_P 表示相电压，有 $U_L = \sqrt{3}U_P$ 。

2. 三角形 (Δ) 联接

将发电机三相绕组首尾端依次连接，如图 1-7 所示，将三个连接点作为三相电源输出点，向外引出三根线，这种接法称为三角形 (Δ) 联接。

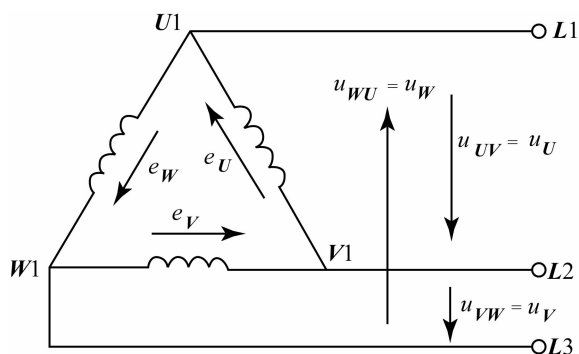


图 1-7 三相电源的三角形联接

由图可见，线电压等于相电压，即

$$U_L = U_P$$

由于电源三角形连接时，若三相绕组不对称，三角形内会有较大的环流，发电机绕组就有烧毁的危险，所以发电机绕组一般不采用三角形联接。出于某种需要变压器

绕组有时采用三角形联接。

1.3.6 三相负载的连接

在三相电路中，负载的联接方法有两种：星形联接和三角形联接。

1. 负载的星形连接

(1) 三相四线制星形联接

它的接线原则与电源的星形联接相仿，即将每相负载的末端 U'_2 、 V'_2 、 W'_2 连成一点（称为中性点） N' ，接到三相电源的中性线上；把首端 U'_1 、 V'_1 、 W'_1 分别接到三相电源线上。如图 1-8 所示，它由三根相线和一根中性线构成，称为三相四线制连接。每相负载承受的电压称为负载的相电压，参考方向如图 1-8 所示。

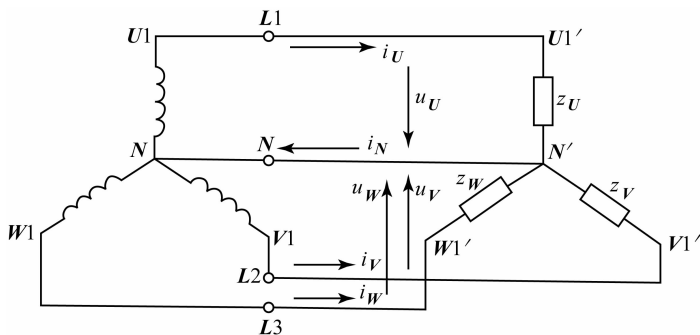


图 1-8 三相四线制星形联接

因为三相电源的对称，所以加在各相负载上的电压大小相等，即

$$U_U = U_V = U_W = U_P = \frac{U_L}{\sqrt{3}}$$

三相电路中的电流有相电流与线电流之分。每相负载中的电流，称为相电流；每根相线中的电流称为线电流。

(2) 三相三线制星形联接

若三相负载对称 $Z_U = Z_V = Z_W$ ，又因为电压对称，所以负载相电流也是对称的，这时中性线电流等于零，中性线上没有电流流过，故可省去中性线，此时并不影响三相电路的工作，各相负载的相电压仍为对称的电源相电压。

生产上常用的三相异步电动机、三相电阻炉等都是三相对称负载。在工程技术上，一般用 I_L 表示线电流，用 I_P 表示相电流，由上面分析可知，负载为星形联接时，相电流即为线电流，即 $I_P = I_L$ 。

(3) 三相不对称负载星形联接时中性线的作用

负载的星形联接中，如果三相负载不对称，则三相负载电流不相等，三个相电流的相量和不为零，中性线上有电流通过，此时星形联接只能用三相四线制，中性线不能省去。因为如果此时断开中性线，各相负载的电压就不再对称，负载也将无法正常工作，可能会造成严重事故。而三相四线制供电实际上就是电源每一相单独地对负载每相供电，故可以保证在每相负载不对称时，各相负载端电压不变，从而使负载正常

工作,甚至在某一相发生故障时,也不至于影响其他两相的正常工作。所以中性线的作用是使星形联接的不对称负载保持相电压的对称。

2. 三相负载的三角形联接

图 1-9 所示为负载的三角形联接。此图没有画出对称三相电源,这里只需要三根端线(相线),采用三相三线制供电,也只能获取三相电源的线电压。

对称三角形负载中电流关系如下:

(1) 线电流是相电流的 $\sqrt{3}$ 倍,即 $I_L = \sqrt{3}I_P$ 。

(2) 在相同的电源电压作用下,对称负载作三角形联接的线电流是星形联接时线电流的 3 倍。

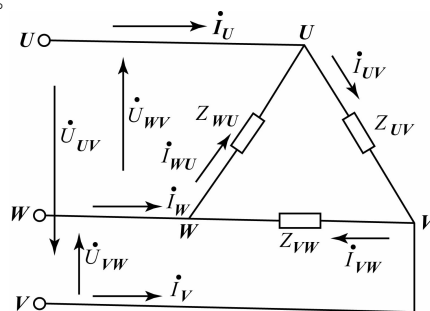


图 1-9 三相负载的三角形联接

1.3.7 三相电路的功率

三相交流电路是三个单相交流电路的组合,因此,不论三相负载采用何种连接方式或三相负载对称与否,三相交流电路的有功功率都为

$$P = P_U + P_V + P_W \quad (1-18)$$

三相交流电路的无功功率为

$$Q = Q_U + Q_V + Q_W \quad (1-19)$$

三相交流电路的视在功率为

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2} \quad (1-20)$$

式中, P_U 、 P_V 、 P_W 、 Q_U 、 Q_V 、 Q_W 分别为每一相的有功功率和无功功率。

在三相负载对称时,不论负载是星形联接或三角形联接,其总功率可表示为

$$P = 3U_P I_P \cos\varphi = \sqrt{3}U_L I_L \cos\varphi \quad (1-21)$$

$$Q = 3U_P I_P \sin\varphi = \sqrt{3}U_L I_L \sin\varphi \quad (1-22)$$

$$S = 3U_P I_P = \sqrt{3}U_L I_L \quad (1-23)$$

1.4 磁 路

1.4.1 铁磁材料

在通电线圈中放入铁芯时,铁芯在电流产生磁场的作用下产生附加磁场,最终使通电线圈内部磁场显著增加,这种现象称为磁化。能被磁化的材料称为铁磁材料,除铁之外,钴、镍及它们的合金和氧化物,都是铁磁材料。各种电机电器线圈中放入铁芯,就是利用铁芯的增磁效应,在较小的激磁电流下产生较强的磁场。

铁磁材料的磁化曲线如图 1-10 所示,为了充分利用铁芯,一般选择磁化曲线的 ab 段。

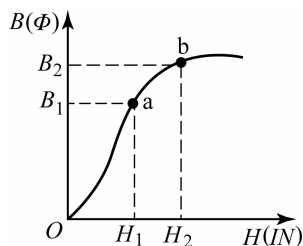


图 1-10 铁磁材料的磁化曲线

1.4.2 磁路

磁通经过的路径叫做磁路。图 1-11 (a)、(b)、(c) 所示分别为变压器、电机和电磁铁的铁芯磁路。

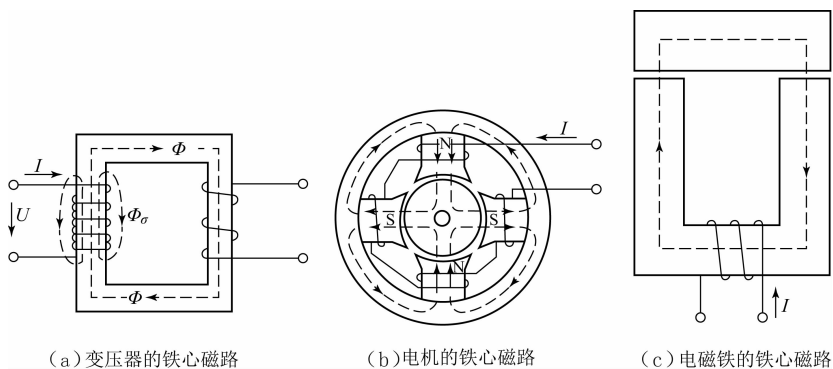


图 1-11 变压器、电机和电磁铁的铁芯磁路

铁芯中的磁通称为主磁通，少量磁通通过周围空气构成的回路称为漏磁通，可忽略不计。若用 Φ 表示磁通，线圈中电流有效值 I 与线圈匝数 N 的乘积称为磁通势、 R_m 称为磁阻。这三个物理量可以分别对应电路中的电流 I 、电动势 E 和电阻 R ，其相互关系也可以对应电路中的欧姆定律，磁路与电路对照见表 1-2。

表 1-2 磁路与电路比较

	电路	磁路
势	电动势 E	磁动势 $F_m = IN$
流	电流 I	磁通 φ
阻	电阻 $R = \frac{1}{\gamma S}$	磁阻 $R_m = \frac{1}{\mu S}$
压	电压 $U = IR$	磁位差 $U_m = HI$
基尔霍夫定律	$\sum I = 0$	$\sum \varphi = 0$
	$\sum (IR) = \sum E$	$\sum (HI) = \sum (IN)$
欧姆定律	$I = \frac{U}{R}$	$\varphi = \frac{U_m}{R_m}$

表中磁阻 R_m 表示物质对磁通的阻碍作用, 不同物质的磁阻不同。若铁芯中存在空气隙, 磁阻 R_m 会增大很多。磁路的欧姆定律只适用于铁芯的非饱和状态。

1.4.3 电磁铁

电磁铁是通过给有铁芯的线圈通电产生电磁力, 来实现机械运动的多功能器件, 在电器元件、设备上有着广泛的应用。尽管电磁铁的结构形式多样, 功能各异, 但它们的基本组成都是相同的, 都是由磁导率很高的软磁性材料铁芯、衔铁和线圈三部分构成, 结构形式如图 1-12 所示。

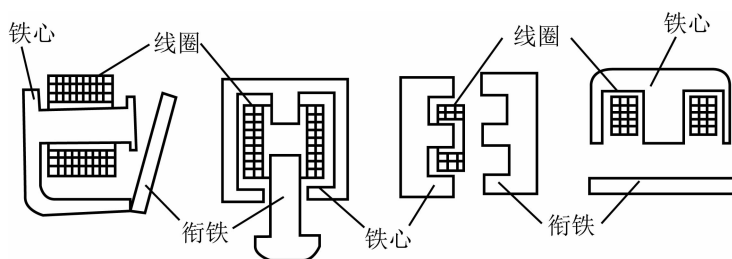


图 1-12 几种电磁铁的结构形式

1. 直流电磁铁

当给直流电磁铁线圈通直流电流后, 磁路中产生恒定的磁通, 衔铁被磁化, 并受到电磁力的吸引而运动; 失电后, 衔铁在弹簧或其他外力的作用下复位, 这就是它的工作原理。

直流电磁铁吸合过程中, 线圈中的电流不变, 仅取决于电源的电压和线圈的内阻, 因此磁动势 IN 也不变。但吸合过程中空气隙变小, 磁阻 R_m 变小, 于是磁通增加, 导致吸合力 F 增加, 完全吸合后达到最大值, 这是直流电磁铁的一个特点。直流电磁铁有可能因为开始气隙过大, 电磁吸力小而吸合不上。完全吸合上后, 如果吸合力 F 过大, 这时可在线圈电路串一个电阻, 使励磁电流减小, 维持吸合就可以了。

2. 交流电磁铁

在交流电磁铁中, 如接入正弦交流电压, 铁芯中的磁通也按正弦规律变化, 只要电压不变, 磁通幅值就不变。这时, 线圈中电流大小完全取决于磁路的磁阻。交流电磁铁吸合瞬间电流都特别大, 就是因为吸合瞬间气隙大、磁阻大。当衔铁吸合后, 气隙没有了, 线圈中电流将大大降低, 为正常工作电流。在实际工作中, 若交流电磁铁衔铁传动机构被异物卡住不能正常吸合的话, 线圈将长期通过很大的起动电流, 导致线圈过热烧毁。

需要注意的是, 交流电磁铁的吸合力 f 是脉动的, 而且一个周期有两次为零, 如图 1-13 所示, 这将引起衔铁的振动。为了消除这种现象, 通常在铁芯的端面上嵌装一个闭合的短路环, 称为分磁环, 如图 1-14 所示。它将原来铁芯中的磁通 Φ 分成 Φ_1 和 Φ_2 两部分, 穿过短路环的磁通在短路环内产生感应电势而有了感应电流, 感应电流又产生磁通阻滞穿过这短路环内磁通的变化, 这样使短路环内的合成磁通 Φ_2' 滞后于短路

环外的磁通 Φ_1 ，使 Φ_1 和 Φ_2' 有了相位差，磁通 Φ_1 和 Φ_2' 不会同时为零。另外，两者的幅值也不一样，所以此时总磁通会保持在一定值以上，使吸引力不至于过小而导致衔铁分开，从而起到消噪的作用。

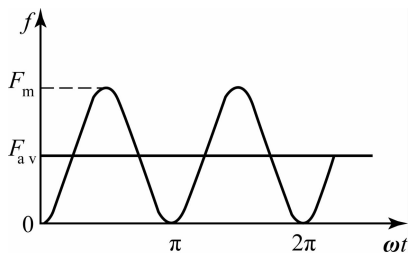


图 1-13 交流电磁铁吸合力波形图

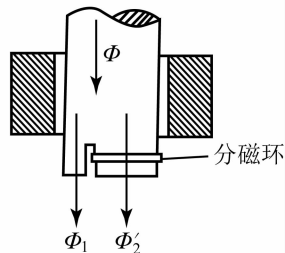


图 1-14 短路环分磁原理

1.5 半导体器件及其应用

半导体是指导电能力介于导体和绝缘体之间的物质，如硅和锗等。一般半导体都是晶体结构，所以半导体管又叫做晶体管。本节主要介绍半导体二极管、三极管、新型电力电子器件的结构、特性和应用。

1.5.1 晶体二极管及整流电路

1. 晶体二极管的结构与类型

晶体二极管由管芯、管壳和两个电极构成。管芯就是一个 PN 结，在 PN 结的两端各引出一个引线，并用塑料、玻璃或金属材料作为封装外壳，就构成了晶体二极管，晶体管的符号如图 1-15 所示。P 区的引出电极称为正极或阳极，N 区的引出电极称为负极或阴极。

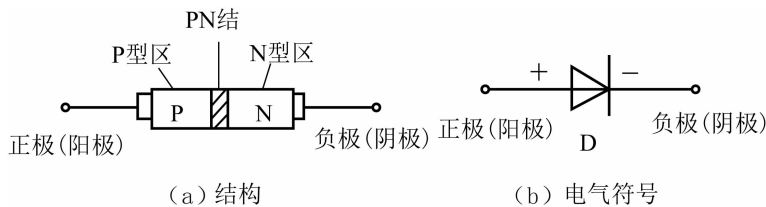


图 1-15 晶体二极管

晶体二极管的种类繁多，按材料不同可分为硅管和锗管两类。硅管反向电流小，工作温度和湿度稳定性高，常用于大功率整流。锗管的工作频率高，常用于高频整流和检波电路。按管芯结构不同可分为点接触型、面接触型和平面型。

2. 晶体二极管的伏安特性

二极管的伏安特性是指加在二极管两端电压和流过二极管的电流之间的关系。图 1-16 (a) 是硅二极管的伏安特性，(b) 是锗二极管的伏安特性。

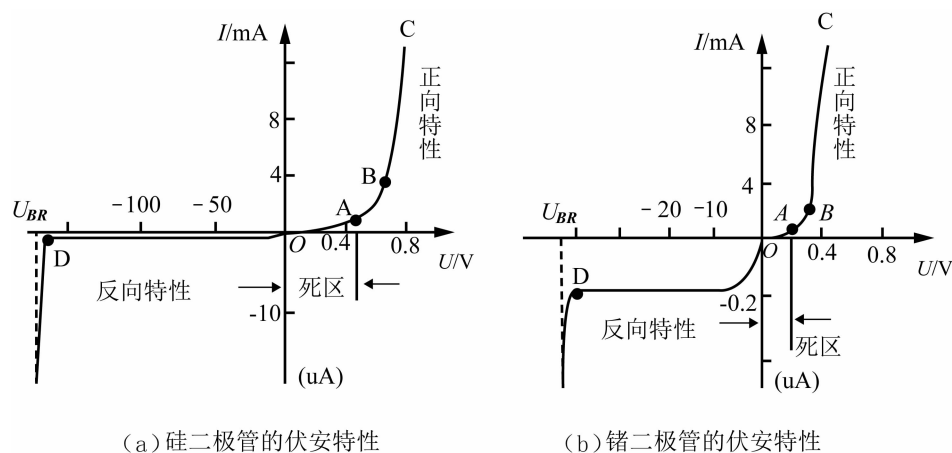


图 1-16 二极管伏安特性曲线

3. 二极管的主要参数

(1) 最大整流电流 I_{FM} : 二极管长期运行时允许通过的最大正向平均电流, 通常称额定工作电流。

(2) 最高反向工作电压 U_{RM} : 为了保证二极管不至于被反向击穿而规定的最高反向电压, 通常称额定工作电压。

(3) 反向饱和电流 I_R : 指二极管未进入击穿区的反向电流。

(4) 最高工作频率 f_M : 指保证二极管正常工作的最高频率。

4. 二极管的选用

硅管内部多为面接触型或平面型结构, 允许工作温度较高, 有的可达 $150\sim 200^{\circ}\text{C}$; 锗管内部多为点接触型结构, 允许的工作温度较低, 只能在 100°C 以下工作。

(1) 普通二极管如 2AP 等系列, 它的 I_{FM} 较小, f_M 一般较高, 主要用于信号检波、取样、小电流整流等。

(2) 整流二极管如 2CZ、2DZ 等系列, 它的 I_{FM} 较大, f_M 很低, 主要用于各种电源设备的整流。

(3) 开关二极管如 2AK、2CK 等系列, 它的 I_{FM} 较小, f_M 较高, 主要用于数字电路和控制电路中。

(4) 稳压二极管如 2CW、2DW 等系列, 用于稳压电源和晶闸管电路。

5. 整流电路

整流电路是二极管的一个重要应用。整流是将交流电转化成脉动直流电, 它的目的是提供一个直流电源。从整流所得的电压波形看, 整流可分为单相半波整流和单相桥式整流。

(1) 单相半波整流

单相半波整流电路由电源变压器 T、整流二极管 D (设它为理想二极管) 及负载组成, 如图 1-17 所示。电路中晶体二极管就像一个自动开关, u_2 为正半周时, 自动把电

源与负载接通； u_2 为负半周时，自动将电源与负载切断。负载上得到方向不变、大小变化的脉动直流电压 u_o 。这种电路整流输出电压仅为输入正弦交流电压的半波，故称为“半波整流电路”。

半波整流电路输出电压的平均值 U_0 为：

$$U_0 \approx 0.45U_2 \quad (1-24)$$

式中 U_2 是变压器二次电压的有效值。

负载上的直流电流 I_0 为：

$$I_0 = \frac{U_0}{R_L} = 0.45 \frac{U_2}{R_L} \quad (1-25)$$

二极管中最高反向电压 U_{RM} 就是变压器二次电压 u_2 的最大值，即 $U_{RM} = \sqrt{2}U_2$ 。

半波整流电路结构简单、使用元件少，但整流效率低，输出电压脉动大，因此，它只适用于要求不高的场合。

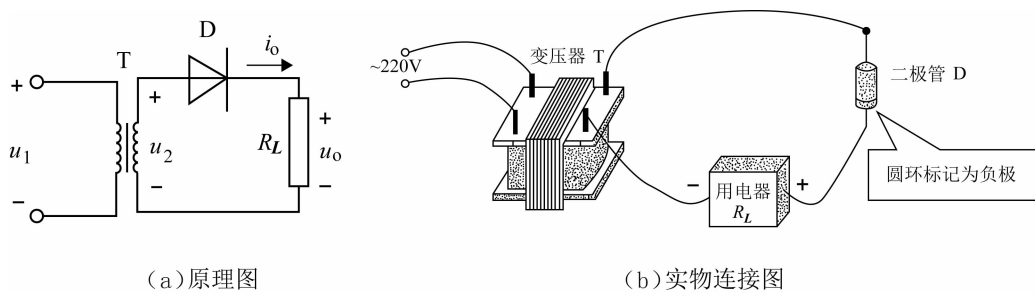


图 1-17 半波整流电路

(2) 单相桥式整流

为了克服半波整流的缺点，常采用桥式整流电路，其原理电路和简化电路见图 1-18。图中 $D_1 \sim D_4$ 四个整流二极管接成电桥形式，故称为桥式整流电路。在 u_2 变化的一个周期内，负载 R_L 上始终流过自上而下的电流，其电压和电流的波形为一全波脉动直流电压和电流。

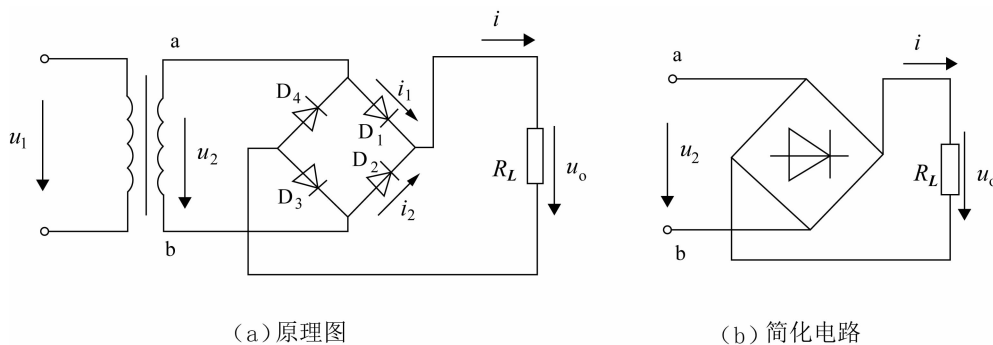


图 1-18 单相桥式整流电路

桥式整流电路输出电压的平均值为：

$$U_0 \approx 0.9U_2 \quad (1-26)$$

式中 U_2 是变压器二次电压的有效值。

负载上的直流电流平均值为：

$$I_0 = \frac{U_0}{R_L} \quad (1-27)$$

现在封装成一整体的多种规格的整流桥堆已批量生产，给使用者带来极大方便，使用时只要将交流电压接到标有“~”符号的管脚上，从标有“+”和“-”的管脚引出的就是整流输出的直流电压正、负端。上述整流电路输出的是脉动电压，只能用于电镀、电解和蓄电池充电等对波形要求不高的工艺和设备中。

1.5.2 晶体三极管及放大电路

晶体三极管是具有放大作用的半导体器件，由晶体管三极管组成的放大电路广泛应用于各种电子设备中，如收音机、电视机、扩音机、测量仪器及自动控制装置等。

1. 晶体三极管的结构与类型

晶体管三极管的三个电极依次为发射极（E），基极（B）和集电极（c），分别由发射区、基区、集电区引出。根据这三层半导体排列方式的不同可分 NPN 型和 PNP 型，它们的结构及电路符号如图 1-19 所示。发射区与基区之间的 PN 结称为发射结，集电区与基区之间的 PN 结称为集电结。

电路符号中发射极箭头的方向，表示发射结加正向电压（正偏）时发射极的电流实际方向，NPN 型与 PNP 型发射极电流的方向刚好相反，两者可在应用上形成互补。

根据管芯所用半导体材料不同，可分为硅管和锗管。由于硅管受温度影响较小、工作稳定，在自动控制设备中常采用硅管。目前我国制造的硅管多为 NPN 型（也有少量 PNP 型），锗管多为 PNP 型。

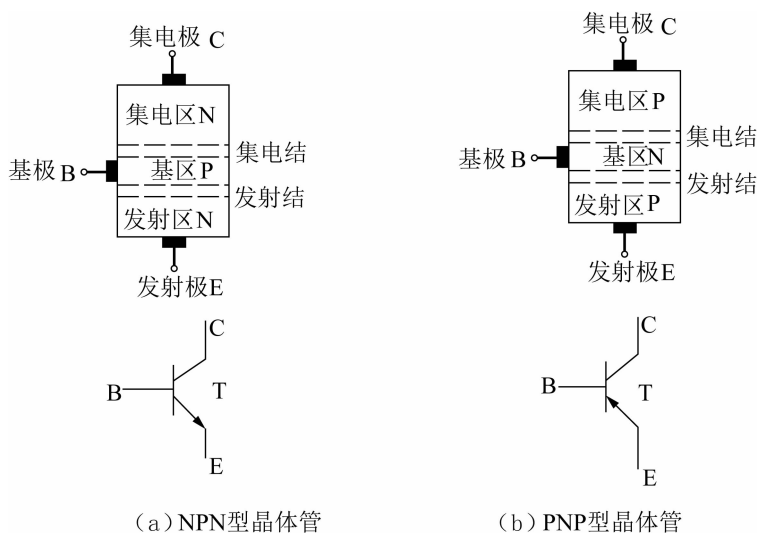


图 1-19 晶体管的结构示意图和图形符号

2. 外形

晶体管种类繁多，外形各不相同。常见的晶体管封装外形见图 1-20。

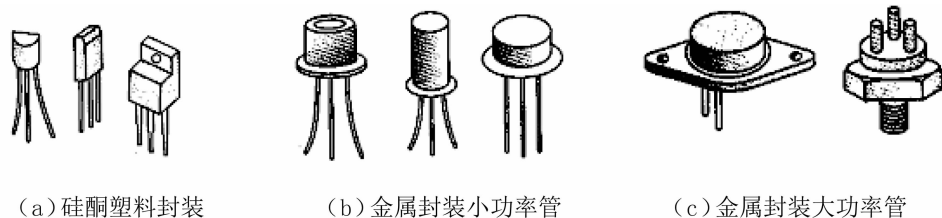


图 1-20 晶体管的外形图

3. 晶体管的电流放大作用

晶体管内部对电流的传输和控制作用，通过图 1-21 所示实验来说明。图中基极与发射极是信号输入端，集电极与发射极是信号输出端，发射极是输入、输出回路的公共端，这种放大电路称为共发射极放大电路。改变可变电阻 R_B ，则基极电流 I_B 、集电极电流 I_C 和发射极电流 I_E 都发生变化，测量结果列于表 1-3 中。

由实验数据可得出以下两个重要结论：

(1) 晶体管各极电流分配关系满足

$$I_E = I_B + I_C$$

即发射极电流等于集电极电流与基极电流之和。由于基极电流很小，因而

$$I_E \approx I_C$$

(2) 晶体管的电流放大作用

基极电流 I_B 比集电极 I_C 、 I_E 小很多，即当 I_B 有微小变化时， I_C 将有较大的变化。这种用基极电流的微小变化使集电极电流发生较大变化的控制作用就叫做晶体管的电流放大作用。

集电极电流 I_C 与基极电流 I_B 的比值称为晶体管的电流放大系数。

$$\beta = \frac{I_C}{I_B}$$

一般情况下， β 在几十至几百之间。

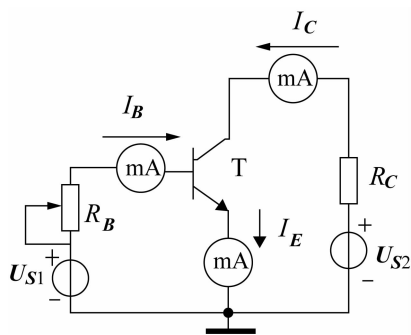


图 1-21 晶体管特性测试电路

表 1-3 晶体管电流测量数据

I_B (mA)	0	0.02	0.04	0.06	0.08	0.10
I_C (mA)	0	0.70	1.40	2.10	2.80	3.50
I_E (mA)	0	0.72	1.44	2.16	2.88	3.60

4. 晶体管器件的型号、主要参数和选用

(1) 晶体管的型号组成部分的符号及其意义见表 1-4。

表 1-4 晶体管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	第五部分
用阿拉伯数字表示电极数目		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的类型			
符号	意义	符号	意义	符号	意义	用阿拉伯数字表示器件的序号	用汉语拼音字母表示规格号（序号相同、规格号不同的晶体管特性差别不大，只是某个或某几个参数有所不同）。
3	晶体三极管	A	PNP 型锗材料	X	低频小功率管		
		B	NPN 型锗材料	G	高频小功率管		
		C	PNP 型硅材料	D	低频大功率管		
		D	NPN 型硅材料	A	表示高频大功率管		

例如，3AG54A 表示锗材料 PNP 型高频小功率晶体管，序号和规格号分别是“54”和“A”。

(2) 晶体三极管的主要参数表征管子性能和适用范围，是选用管子的依据，主要参数有：

① 电流放大倍数

电流放大倍数又称为电流放大系数，表征三极管的电流放大能力。

② 集—基反向漏电流 I_{CBO} ③ 集—射反向漏电流 I_{CEO}

关系到三极管正常工作和安全应用的还有一些极限参数。如：

① 集电极最大允许电流 I_{CM}

② 最大反向击穿电压

三极管有两个 PN 结，因而当反向电压超过某一定值会发生击穿现象。

$U_{(BR)CBO}$ 为射极开路，集电结的反向击穿电压。

$U_{(BR)CEO}$ 为基极开路，集—射极之间的最大允许电压。

$U_{(BR)EBO}$ 为集电极开路，发射结的反向击穿电压。

③ 集电极最大允许功率损耗 P_{CM}

集电极电流流经集电结时将产生大量的热使结温升高，为了控制温度不超过其允许值，规定了集电结功率损耗的最大值，该值称为集电极最大允许功率损耗 P_{CM} 。

集电极损耗功率 $P_{CM} = I_C \cdot U_{CE}$ ，此式在三极管输出特性曲线上是双曲线。三极管的管耗极限线如图 1-22 所示。三极管必须在安全区内工作。

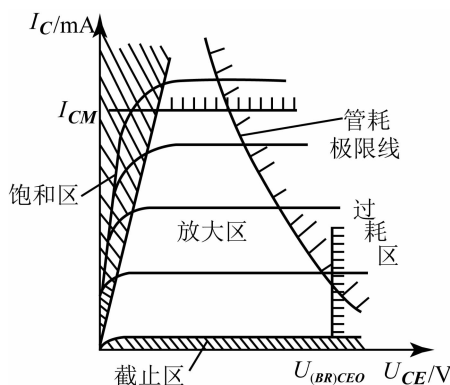


图 1-22 三极管极限损耗线

(3) 晶体管的选用方法

晶体管在超出它的极限参数范围使用时会损坏或失效, 因此在选择方法上首先是根据极限参数范围选择晶体管, 其次是选择正常工作条件下特性优良的晶体管。具体方法如下:

①选择集电极工作电流 I_C 小于集电极最大允许电流 I_{CM} , 以保证晶体管工作的稳定性; 选择晶体管的额定功率 P_C 小于集电极最大允许功耗 P_{CM} , 以保证晶体管工作时不会因为高温而被热击穿; 选择电源电压小于集-射极反向击穿电压 $U_{(BR)CEO}$ 。

②在温度变化大的环境中使用晶体管时, 优先选择热稳定性好的硅材料晶体管; 当信号很小或电源电压只有 1.5V 时, 要优先选择锗材料晶体管。

③用于放大电路的晶体管, β 值不宜太高, 反向电流应尽可能小, 以便电路工作的稳定。 β 值一般选在 50 ~ 100 之间比较合适。

④根据信号的频率范围选择合适的晶体管, 以保证工作在高频段的管子 β 值不致下降太多。

⑤根据负载的大小选择大功率管或小功率管。使用大功率晶体管时, 要注意满足其散热条件, 要安装大小合适的散热片。

5. 晶体三极管的三种基本组态

共发射极、共集电极、共基极是放大电路的三种基本组态。从交流的角度划分, 三种组态基本放大器的电路形式都不同, 各有自己的特点。实质上, 从放大器这一共性来看, 它们的直流状态是一样的: 发射结正偏、集电结反偏。建立合适而稳定的工作点, 是三种组态放大器的共同要求。

1.5.3 新型电力电子器件及应用

电力电子器件适用于高电压、大电流场合, 主要以开关方式工作。电力电子器件是电力电子技术的核心。目前, 常用的电力电子器件有: 普通晶闸管 (SCR)、双向晶闸管、功率场效应管 (MOSFET)、绝缘栅双极晶体管 (IGBT) 等。这些器件各有自己的特点和应用范围。

1. 晶闸管

晶闸管原称为可控整流器 (SCR)，是目前半导体从弱电进入强电领域，制造技术最成熟、应用最广泛的器件之一。它既具有二极管的单向导电性，又具有正向导通的可控特性，因而在调速系统、变频电源、无触点开关等方面得到了广泛的应用。晶闸管的三个电极分别为阳极 A、阴极 K 和控制极 (门极) G。晶闸管的符号和结构如图 1-23 所示。

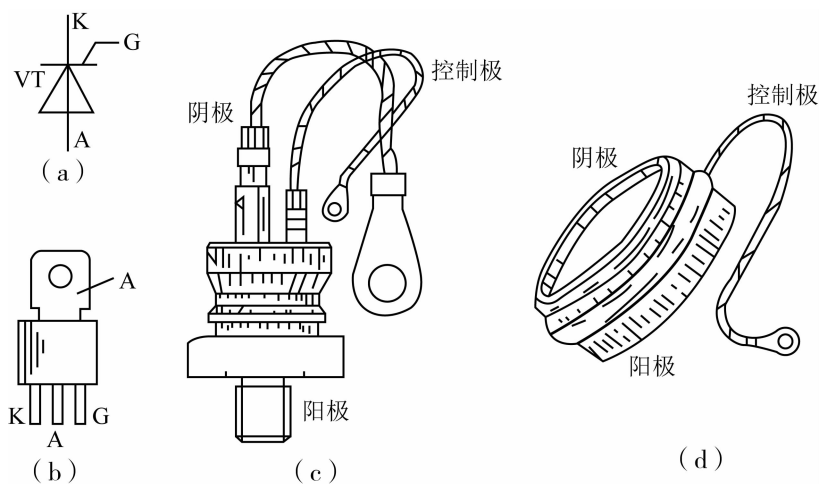


图 1-23 晶闸管的符号和结构

2. 双向晶闸管

双向晶闸管的外形与普通晶闸管类似，有塑封式、螺栓式和平板式。它有三个电极，分别为第一阳极 (T_1)、第二阳极 (T_2) 和门极 (G)，如图 1-24 所示。无论从结构还是特性上来看，双向晶闸管都可看成两个反并联的晶闸管，因此双向晶闸管常用于交流调压场合。

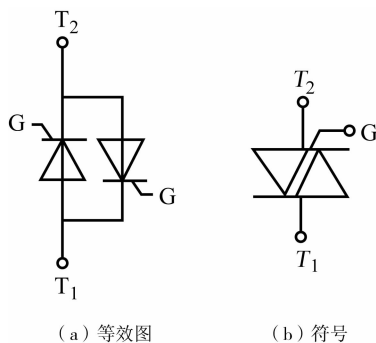


图 1-24 双向晶闸管

双向晶闸管常作为交流调压器的主电路元件，这类调压电路线路简单、成本低廉，在工业加热、照明调光、风扇调速、小容量交流异步电动机调速等方面得到广泛应用。

3. 功率场效应晶体管

功率场效应晶体管,简称功率 MOSFET,是一种单极型电压控制器件,具有自关断能力、输入阻抗高、驱动功率小、开关速度快、工作频率可达到 1MHZ、不存在二次击穿问题、安全工作区宽等优点。MOSFET 属现代电力电子器件,因其电压和电流容量较小,故在高频中小功率的电力电子装置如开关电源、机床伺服、汽车电子化等方面得到广泛应用。

4. 绝缘栅双极晶体管

绝缘栅双极晶体管,简称为 IGBT,是单极和双极技术的混合物,是 20 世纪 80 年代出现的新型复合器件。它既有单极型器件的输入电阻高、工作速度快、热稳定性好和驱动电路简单的特点,又有双极型器件电压低、耐压高和承受电流大等优点。因此发展很快,在电机控制、汽车点火、功率转换及其他工业电子及汽车控制领域广泛应用。1982 年 IGBT 试制成功,1986 年成功生产。目前,IGBT 的生产水平为 2500V、1 000A,而研制水平已走向第三代。IGBT 未来的发展趋势是高电压、高开关频率、低通态压降,产品基本实现模块化。