

晶体管基础知识及其应用

(第二版)

上海市卢湾区业余大学
《晶体管基础知识及其应用》编写组

上海科学技术出版社

再 版 前 言

为了适应生产发展的需要,满足广大电子技术学习班学员、知识青年和业余无线电爱好者学习晶体管电路的要求,我们曾于1972年在学校党支部的领导下,集体编写了《晶体管基础知识及其应用》一书。本书出版以来,曾得到广大读者的支持和鼓励;他们提出了不少宝贵意见,并希望将全书增订后再版。为此,我们在原书的基础上进行了修订,力求能更符合读者的要求。

增订后全书章节的安排,仍按由浅入深的原则,语言力求通俗易懂,着重讲清基本原理,抓住电路分析,并适当结合应用实例,加深读者理解,便于自学。

本书与1972年版本相比,主要删去了晶体二极管、晶体三极管和集成电路的制造工艺;加强了晶体管放大器、脉冲技术等重点章节;并根据当前发展趋势与需要,适当地增补了半导体集成电路的内容。另外,实用线路的分析较为具体,内容上也有所更新。

本书由杨振英、李德辑、傅祖耀、赵健、汤国华、顾正、王大炎、沈庄严、林定家、朱世明等同志编写和修订。

本书在编写过程中,虽经多次审校,但由于我们水平有限,缺点和错误在所难免,诚恳地希望读者批评指正。

上海市卢湾区业余大学
《晶体管基础知识及其应用》编写组

目 录

第一章 电的基本知识	(1)
第一节 直流电	(1)
第二节 交流电	(10)
第三节 变压器和电感器	(14)
第四节 电容器	(16)
第五节 RC 充放电电路	(20)
第六节 交流电路	(24)
第二章 晶体二极管	(28)
第一节 晶体二极管的结构和原理	(28)
第二节 晶体二极管的伏安特性	(34)
第三节 晶体二极管的分类和命名法	(37)
第四节 晶体二极管的主要参数	(38)
第五节 利用万用表测量晶体二极管	(39)
第三章 整流电路	(41)
第一节 单相整流电路	(41)
第二节 滤波器	(52)
第三节 倍压整流电路	(57)
第四节 简单的稳压电路	(61)
第四章 晶体三极管和场效应晶体管	(67)
第一节 晶体三极管的结构	(67)
第二节 晶体三极管的电流分配	(69)
第三节 晶体三极管的放大作用	(71)
第四节 晶体三极管的特性曲线	(71)
第五节 晶体三极管的参数	(76)

第六节	晶体管与温度的关系	(83)
第七节	三极管的简易测试	(85)
第八节	场效应晶体管	(93)
第五章	晶体管放大器	(105)
第一节	概述	(105)
第二节	低频放大器	(114)
第三节	多级放大器	(134)
第四节	功率放大器	(143)
第五节	放大器中的反馈	(156)
第六节	直流放大器	(161)
第六章	正弦波振荡器	(173)
第一节	振荡的基本原理	(173)
第二节	LC 振荡器的基本电路	(175)
第三节	RC 振荡器	(178)
第四节	石英晶体振荡器	(180)
第七章	脉冲技术	(184)
第一节	脉冲波形和参数	(184)
第二节	常用逻辑门电路	(186)
第三节	双稳态触发器	(200)
第四节	单稳态触发器	(207)
第五节	多谐振荡器	(212)
第六节	脉冲整形器——射极耦合开关电路	(217)
第七节	二—十进制计数器	(220)
第八节	显示和译码	(224)
第八章	半导体集成电路	(233)
第一节	概述	(233)
第二节	数字集成电路	(234)
第三节	集成电路触发器	(241)
第四节	MOS 反相器	(253)

第九章 硅可控整流元件	(262)
第一节 可控硅的简介	(262)
第二节 可控硅型号和参数	(266)
第三节 可控硅的构造和原理	(268)
第四节 可控硅触发电路	(270)
第五节 可控硅整流电路	(286)
第六节 可控硅交流调压	(288)
第七节 可控硅开关电路	(290)
第十章 实用线路分析	(293)
第一节 晶体管水位控制器	(293)
第二节 晶体管时间继电器	(297)
第三节 晶体管差动测湿仪	(301)
第四节 晶体管温度控制器	(303)
第五节 晶体管稳压电源	(309)
第六节 来复式单管收音机	(314)
第七节 晶体管无触点行程开关	(319)
第八节 六管超外差式收音机	(322)
第九节 光电控制器	(337)
第十节 晶体管倒顺车电路	(344)
第十一节 8W OTL 扩音机	(350)
第十二节 车床可控硅直流调速	(370)
第十三节 可控硅简易程序控制器	(379)
第十四节 简易通用程序控制器	(385)
附录一 本书使用符号说明	(400)
附录二 继电器和接触器	(408)
附录三 常用分贝表	(423)
附录四 半导体器件型号组成部分的符号及其意义	(426)
附录五 常用二极管、三极管的特性和参数	(427)

第一章 电的基本知识

第一节 直 流 电

一、电 流

电灯泡通了电就会发光,电动机通了电就会旋转,收音机通了电就会发出声音,这都是电的作用,是由于电流通过这些器件所产生的效果。

在同样的额定电压作用下,100瓦灯泡上流过的电流要比25瓦灯泡上流过的电流强一些,因此100瓦的灯泡要比25瓦的灯泡亮一些。电流强度反映了电流的强弱,用符号 I 表示。电流强度的单位是安培,简称安,常用A表示。比安培小的单位有毫安(mA)和微安(μA)。它们之间的换算关系是:

$$1\text{ A (安)} = 1000\text{ mA (毫安)}$$

$$1\text{ mA (毫安)} = 1000\text{ }\mu\text{A (微安)}$$

电一般分直流电和交流电两种。

1. 直流电——方向固定不变的电流,叫做直流电。如干电池、蓄电池、直流发电机输出的电,都是直流电。方向固定不变,大小也不变的电流,叫做稳定直流电,如图1-1(a)所示。方向固定不变,而大小随时间改变的电流,叫做脉动直流电,如图1-1(b)所示。实际上直流电是脉动直流电和稳定直流电的统称。

2. 交流电——电流的方向和大小随时间作周期性变化的,叫做交流电,如图1-1(c)所示。一般从发电厂输出的电

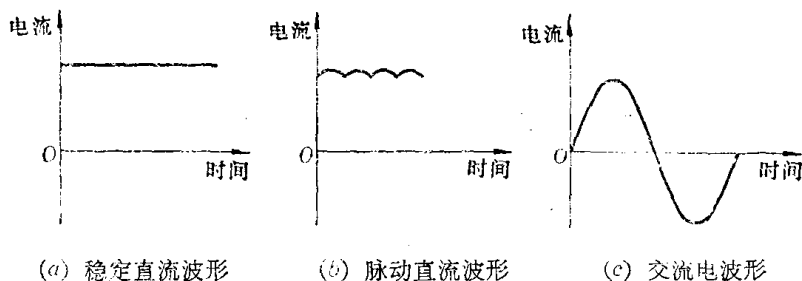


图 1-1

都是交流电。

二、电位、电压、电动势

为了说明电流是怎样产生的，可以用水流来作比喻。把

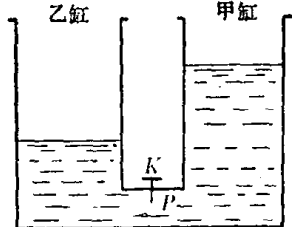


图 1-2

电比作水，电流就好比水流。假设有甲、乙两只水缸，中间有阀门 K 把甲、乙两只缸隔开。设甲缸的水位比乙缸高，如图 1-2 所示。当把阀门 K 打开，水流从甲缸经过管子 P 流向乙缸，这是因为水总是从水位高处流向水位低处的。要水流动，

就得有一个水位差，水位差也称水压。同样，要在导体中有电流流过，就得使导体两端有一个电位差。电流也是从电位高处流向电位低处的，电位差也称电压，电压用符号 U 表示。

许多场合下，电位的数值是对大地而言的（以大地的电位作为零电位）。在具体的电子线路中，一般人为地把某参考点的电位定做零电位，也叫做地电位。而电压则是电路中任何两点间的电位差。

电位、电压的单位都是伏特，简称伏，常用 V 表示。比伏

特小的单位有毫伏(mV)和微伏(μV), 它们之间的换算关系是:

$$1\text{ V(伏)} = 1000\text{ mV(毫伏)}$$

$$1\text{ mV(毫伏)} = 1000\text{ }\mu V(\text{微伏})$$

在图 1-2 中, 当甲缸的水流向乙缸后, 甲缸的水位就逐渐下降, 而乙缸的水位就相应上升。它们之间的水位差就愈来愈小, 最后达到水位差为零。这时, 甲缸的水就不再流向乙缸, 水流也就停止了。那末, 怎样才能产生连续的水流呢? 经验告诉我们, 要维持水的流动, 就必须维持水位差。如果在甲、乙两只水缸之间再接入一只水泵(图 1-3), 在水泵的作用下, 乙缸的水又灌入甲缸, 这样, 就能够维持甲缸和乙缸之间的水位差, 水就能够源源不断地从甲缸流向乙缸, 产生连续不断的水流。这里水泵就起了一个维持水位差的原动力的作用。同样, 要使导体中有连续不断的电流, 就必须维持导体两端的电位差(或电压)。象干电池、蓄电池、发电机等都具有维持电位差的本领。衡量这种本领的物理量称为电动势。这种具有电动势的器件称为电源。

电动势用符号 E 表示, 它的单位和电压一样也是伏特。

习惯上规定, 电流的方向是从电源的正极(即电位高处),

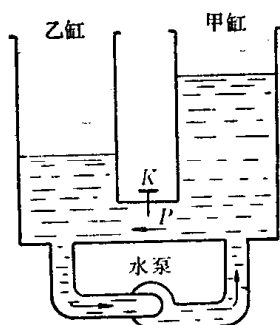


图 1-3

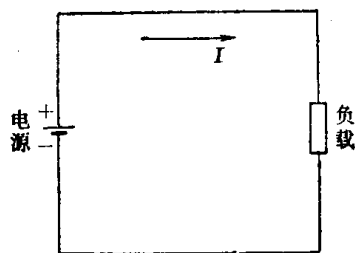


图 1-4

经过外电路(有负载的),流向电源的负极(即电位低处),如图 1-4 所示。图中+和-分别表示电源的正极和负极。

三、电 阻

水流过管子时要受到阻力。管子粗些、短些,阻力就小些;长些、细些,阻力就大些。同样,电流过导体时也受到一定的阻力。这种阻力叫做电阻,用符号 R 表示,它的单位是欧姆,简称欧,常用 Ω 表示。有时为了方便起见,还用千欧($k\Omega$, 简写 k)和兆欧($M\Omega$, 简写 M)。它们之间的换算关系是:

$$1 k\Omega (\text{千欧}) = 1000 \Omega (\text{欧})$$

$$1 M\Omega (\text{兆欧}) = 1000 k\Omega (\text{千欧})$$

导体的电阻大小与导体的材料、长度、截面积和温度等有关。导体的长度愈长,截面积愈小,电阻就愈大;导体的长度愈短,截面积愈大,电阻就愈小。象银、铜和铝等金属材料都是良好的导体。

四、欧 姆 定 律

在电路中,电流、电压、电阻这三者共处于一个统一体中,彼此互相联系,欧姆定律就是反映这三者之间的内部规律性的。关于欧姆定律,可分两部分来介绍。

1. 部分电路的欧姆定律

如图 1-5 所示的电路中,流过电阻 R 的电流 I 与加在电阻 R 上的电压 U 成正比,而与电阻 R 成反比。用公式表示,即:

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

从欧姆定律可知,当电阻值一定时,加在电阻上的电压愈

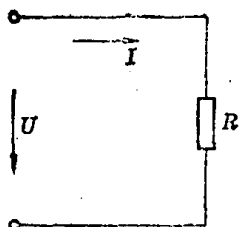


图 1-5

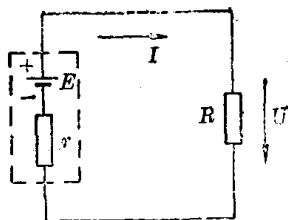


图 1-6

大, 则流过电阻的电流也愈大。

例如: 图 1-5 中, 若电压 $U = 20 \text{ V}$, 电阻 $R = 10 \Omega$, 则流过电阻 R 的电流 I 按公式 (1-1) 计算, 得:

$$I = \frac{U}{R} = \frac{20 \text{ V}}{10 \Omega} = 2 \text{ A}$$

2. 全电路欧姆定律

如图 1-6 所示的闭合电路中, r 表示电源内阻, 电路中流过的电流 I 是与电源的电动势 E 成正比, 而与电路中的总电阻 $R + r$ 成反比。全电路欧姆定律用公式表示, 即:

$$I = \frac{E}{R + r} \quad (1-2)$$

[例] 图 1-6 中, 若电动势 E 为 22 V , 内阻 r 为 1Ω 的电源, 对电阻 R 为 10Ω 的负载供电。问负载上流过的电流为多少? 负载两端的电压又是多少?

[解] 根据全电路的欧姆定律, 先求出电路中的电流, 按公式 (1-2) 计算, 得:

$$I = \frac{E}{R + r} = \frac{22 \text{ V}}{10 \Omega + 1 \Omega} = 2 \text{ A}$$

再根据部分电路的欧姆定律求出负载两端的电压。将公式 (1-1) 变换成 $U = IR$, 可得:

$$U = IR = 2 \text{ A} \times 10 \Omega = 20 \text{ V}$$

由此可见,由于电源中存在内阻,所以当负载接到电源上后,电源的输出电压就降低了。降低的电压就是消耗在电源内阻上的电压,即:

$$Ir = 2\text{ A} \times 1\ \Omega = 2\text{ V}$$

这个电压称为内电路压降。

显然,电源内阻 r 愈大,内电路压降也愈大,负载上实际所得到的电压和电流就愈小。因此,对于电子设备所用的电源,总是要求电源内阻愈小愈好。

五、电功和电功率

电流通过电气设备时,能把电能转换成其他形式的能量。例如,电流通过灯泡就发光,表明电能转换成光能;电流通过扬声器发出声音,表明电能转换成声能;电流通过电炉会发热,表明电能转换成热能;电流通过电动机使电动机运转,表明电能转换成机械能。这种由电流所做的功,简称电功。为了衡量电流做功本领的大小,常用电功率表示。所谓电功率就是在单位时间内电流所做的功,用符号 P 表示,单位是瓦特,简称瓦,常用 W 表示。功率的单位还有千瓦(kW)、兆瓦(MW)、毫瓦(mW)和微瓦(μW),它们之间的换算关系是:

$$1\text{ MW}(\text{兆瓦}) = 10^6\text{ W}(\text{瓦})$$

$$1\text{ kW}(\text{千瓦}) = 1000\text{ W}(\text{瓦})$$

$$1\text{ W}(\text{瓦}) = 1000\text{ mW}(\text{毫瓦})$$

$$1\text{ mW}(\text{毫瓦}) = 1000\ \mu\text{W}(\text{微瓦})$$

电功率与电流、电压之间的关系是:

$$P = UI \quad (1-3)$$

或

$$P = I^2 R \quad (1-4)$$

$$P = \frac{U^2}{R} \quad (1-5)$$

例如：某电路中，在一只 $1\text{ k}\Omega$ 的电阻上流过 0.1 A 的电流，那末电流在电阻上产生的功率，按公式(1-4)计算，得：

$$P = I^2 R = 0.1^2 \times 1000 = 10\text{ W}$$

一般，选用电阻的功率应是 P 的 $2\sim 3$ 倍。

六、电阻的串联和并联

在实际工作中，有时手头现有的电阻数值与需用的电阻数值不符(如阻值过大或过小)，可以采用电阻的串联或并联的方式来解决。

1. 电阻的串联

两个或两个以上的电阻，将它们首尾相接地一个个联接起来，这种联接方式叫做电阻的串联。串联后总的电阻值是各个电阻值之和，即：

$$R = R_1 + R_2 + R_3 + \dots \quad (1-6)$$

图 1-7 表示三个电阻的串联电路*。由公式(1-6)，总电阻

$$R = R_1 + R_2 + R_3 = 50 + 25 + 25 = 100\ \Omega$$

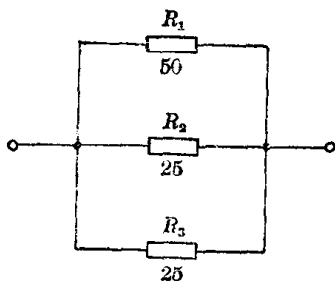


图 1-8

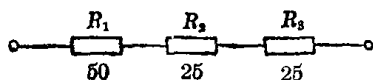


图 1-7

可见，串联后总的电阻值是增加的。

2. 电阻的并联

两个或两个以上的电阻，将它们的一端联接在一起，另一端也联接在一起，这种联接方式叫做电阻的并联。并联后总的电阻

* 本书图上用到电阻值为 Ω 数及电容值为 pF 数时，省写单位 Ω 及 pF 。

值的倒数是各个电阻值的倒数之和,即:

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} + \cdots \quad (1-7)$$

图 1-8 表示三个电阻的并联电路。由公式(1-7),可得

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} = \frac{1}{50} + \frac{1}{25} + \frac{1}{25} = \frac{5}{50} = \frac{1}{10}$$

总电阻

$$R = 10 \Omega$$

可见,并联后总的电阻值是减少的。

七、常用电阻器件

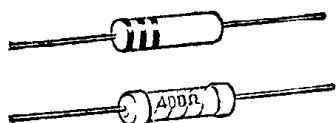
电阻器在电路中使用得很普遍。常用的电阻器可分为固定电阻器和可调电阻器两大类。电阻器按其结构,可分为实芯电阻、薄膜电阻和线绕电阻三种。如图 1-9 所示。

下表列出了各种类型电阻器的主要用途,可供选择电阻时参考。此外,作为特殊用途的,还有阻值可随温度而变化的热敏电阻和随光照而变化的光敏电阻等。

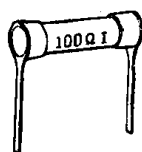
类 型	用 途
合 成 炭 质 电 阻	稳定性较差,用于要求不高的电路
炭 膜 电 阻	广泛应用于直流、交流、脉冲电路
金 属 膜 电 阻	应用于要求较高的仪器中
线 绕 电 阻	用于功率较大的场合,适宜做成高精密的电阻器;不宜用在高频电路中

在电路中,电阻器和电位器的表示方法如图 1-10 所示。

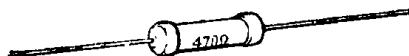
各种电阻的阻值、功率和误差,一般均直接标明在电阻器上,其误差一般有 $\pm 1\%$ 、 $\pm 5\%$ 、 $\pm 10\%$ 、 $\pm 20\%$ 等。选用电阻时,应该注意电阻的类型、阻值和功率。



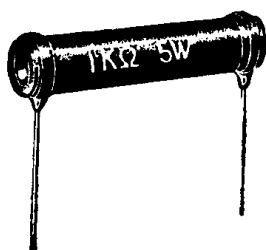
(a) 合成炭质电阻(实芯)



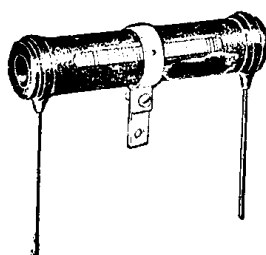
(b) 炭膜电阻(薄膜)



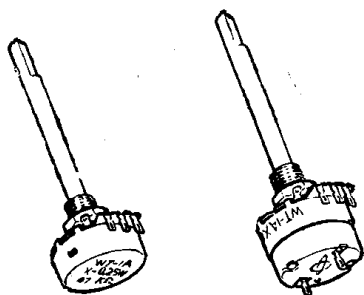
(c) 金属膜电阻(薄膜)



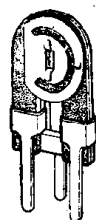
(d) 线绕电阻



(e) 线绕可调电阻



(f) 实芯或薄膜电位器
(可调电阻之一)



(g) 超小型可调
炭膜电位器

图 1-9

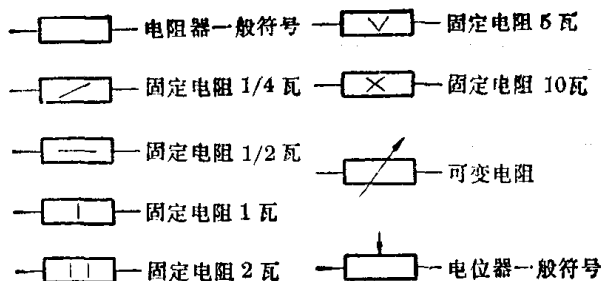


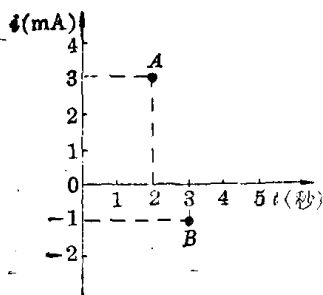
图 1-10

第二节 交 流 电

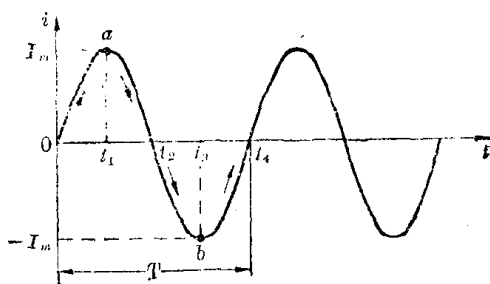
交流电具有便于产生、输送和变换等优点,因此使用非常广泛。研究交流电,必须注意它的三个特性:即周期和频率、最大值和有效值、相位和相位差。

一、周期和频率

为了直观地描述交流电的性质,通常用波形图的方法。在平面上画两条互相垂直的直线,横的那条叫横轴,竖的那条叫纵轴,交点 O 叫原点,如图 1-11(a) 所示。两条轴分别代表两个物理量。在这里横轴表示时间,原点在横轴上的意义就是指时间开始的时刻;纵轴表示电流的数值,原点表示电流为零,上面部分标度表示正方向电流,下面部分标度表示反方向电流(用负值来表示)。从平面上任意一点在二根轴上投影,就可得到一个时间数值和一个电流数值。例如,图 1-11(a) 中, A 点在横轴上的投影是 2, 在纵轴上的投影是 3; 如果横轴的单位采用秒,纵轴的单位采用毫安。由此可知 A 点的意义就是在开始观察后 2 秒钟时,电路中电流的大小是 3 毫安。再如 B 点,就是在 3 秒钟时电路中的电流大小为 1 毫安,方向则相反了(习惯上常记为 -1 毫安)。



(a) 坐标表示法



(b) 交流电流波形

图 1-11

交流电(由发电厂送来的)随时间连续而变化着, 其波形如图 1-11(b)所示。从图中可以看出: 时间 t 从 0 变化到 t_1 时, 电流 i 由 0 逐渐上升到最大值 I_m ; 从 t_1 变化到 t_2 时, 电流 i 由最大值 I_m 逐渐下降到 0; 从 t_2 变化到 t_3 时, 电流 i 由 0 逐渐下降到负的最大值 $-I_m$; 从 t_3 变化到 t_4 时, 电流 i 由负最大值 $-I_m$ 又逐渐上升到 0。之后, 随着时间的继续变化, 电流又重复以上的变化过程(即时间 t 从 0 变化到 t_4 的过程)。交流电往复变化一周所需的时间叫做周期, 用符号 T 表示, 单位是秒。而交流电在每秒钟里往复变化的次数叫做频率, 用符号 f 表示, 单位是赫芝, 简称赫, 常用 Hz 表示。比赫大的单位还有千赫(kHz)和兆赫(MHz), 它们之间的换算关系是:

$$1 \text{ kHz(千赫)} = 1000 \text{ Hz(赫)}$$

$$1 \text{ MHz(兆赫)} = 1000 \text{ kHz(千赫)}$$

我国工业用交流电的频率是 50 赫, 也就是说, 交流电每秒钟往复变化 50 次。收音机上的周率刻度用的 kC, 即 kHz。如 990 kC 就是 990 kHz。

我国第一颗人造地球卫星发送回来的《东方红》乐曲声,

其信号频率是 20009 兆赫。也就是说,无线电波每秒钟变化 20009 百万次。

频率和周期之间的关系是:

$$T = \frac{1}{f} \quad (1-8)$$

例如:频率为 50 Hz 的交流电,其周期 T 是 $\frac{1}{50}$ 秒,即 $T = 0.02$ 秒。

二、瞬时值、最大值和有效值

交流电的大小和方向不断在改变。交流电在某一瞬间的数值称为瞬时值,用小写字母来表示。如 i 、 u 表示交流电流、电压。交流电的最大值或振幅值用 I_m 、 U_m 表示。由于交流电是随时间而变化的,单用最大值还不能反映它的实际效果,于是经常用有效值来表示交流电。有效值是指:当交流电流过某一电阻,它在该电阻上所产生的热量与某一数值的直流电流过同一电阻所产生的热量相同时,这个直流电的数值就称为那个交流电的有效值。有效值用大写字母表示。有效值和最大值之间换算关系如下:

$$I = \frac{1}{\sqrt{2}} I_m = 0.707 I_m \quad (1-9)$$

$$U = \frac{1}{\sqrt{2}} U_m = 0.707 U_m \quad (1-10)$$

平时所用的 220 V 交流电源以及用万用表测量出来的交流电压或交流电流都是指有效值。

三、相位和相位差

为了便于研究两个或两个以上交流电的相互关系,常把