

## 电路基础知识

本项目在中学物理电学的基础上,从分析电路的角度和要求出发,介绍电路的基本概念和物理量,论述常用电路元件的特征及其构成电路后电压、电流的约束关系。这些约束关系贯穿全书,是后续内容的基础。

### 任务一 认识电路

#### 一、什么是电路

什么是电路?这是一个很简单,但是解析起来又十分复杂的问题。简单地讲,电路就是电传输的通道。电路是电流的流通过径,它是由一些电气设备和元器件按一定方式连接而成的。复杂的电路呈网状,又称网络,如电阻、电容、电感、二极管、三极管和开关等构成的网络。电路和网络这两个术语是通用的。电路的大小可以相差很大,小到硅片上的集成电路,大到输电网络。

电荷的定向移动形成电流。河水之所以能够流动,是因为河床的高低形成了水位差;电荷之所以能够移动,是因为在电路中存在电位差。电位差也就是电压,电压是形成电流的原因。电流分直流和交流两种,大小和方向不随时间变化的电流称为直流电流,大小和方向随时间变化的电流称为交流电流。最简单的电路由电源、导线、负载、开关等元件组成。图 1-1 所示为手电筒及其电路示意图。



微课  
认识电路

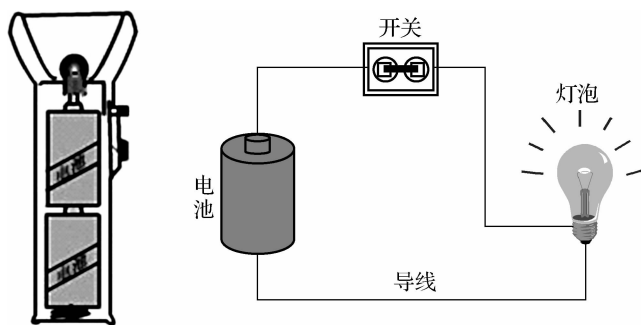


图 1-1 手电筒及其电路示意图

## 二、电路的组成及其功能

实际电路由各种电气设备组成,这些设备主要有发电设备(称为电源),如各种发电机、电池等;用电设备(称为负载),如各种电动机、电灯、电热设备、电子元件(如二极管、三极管等)、电气元件(如继电器、接触器等)等;还有变换、传输、控制、测量、保护等辅助装置,如变压器、输电线、开关、各种仪表、断路器、熔断器等。电源和负载是构成任一完整电路的两个基本部分,也是必需部分。

电力系统实际上是一个复杂的电路,图 1-2 所示为电力系统组成示意图。在火力发电厂中,煤炭燃烧产生的热能使水变成水蒸气,水蒸气带动汽轮机,汽轮机带动发电机发出电能,经升压变压器将发电机输出的电压升高,由输电线送往远处的大型电力用户(城市或工厂)附近,再经降压变压器将电压降低,送至各种用电设备,把电能转换成生产及生活所需的机械能、热能、光能等。

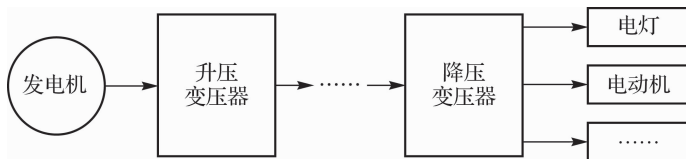


图 1-2 电力系统组成示意图

图 1-3 所示为接收机的电路示意图。接收装置将微弱的电磁波信号接收下来,经过放大、变换处理后,送到扬声器、显示器、记录器等设备。当然,这些装置也必须有电源才能工作,但其中转换的能量是很小的,它们的主要作用是处理和传递信号。

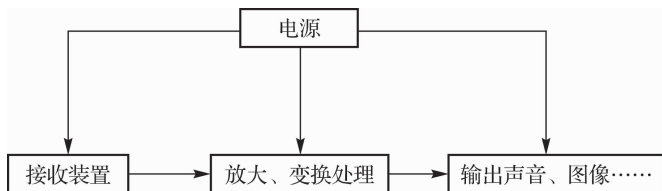


图 1-3 接收机的电路示意图

从上面列举的两个电路实例可归纳出电路的主要功能及基本要求。

(1)转换与传输能量,要求在转换与传输过程中损耗小、效率高。(在供配电技术中涉及的电路大多属于此类)

(2)处理与传递信号,要求在处理与传递过程中失真小、灵敏度高。(在电子技术中涉及的电路大多属于此类)

无论是实现电路的哪种功能,都需要有电源或信号源,它是电路中产生电压或电流的动力,称为激励。由激励在电路各部分产生的电压或电流称为响应。分析电路就是找出电路中激励与响应的关系。

### 三、电路模型

将组成实际电路的各种器件理想化,即在一定条件下突出主要的电磁性质,进行科学的抽象和概括,定义了各种电路理想元件。例如,忽略电路中导线的电阻值,将其看作电阻为零的理想导线。

实际电路元件通电时所产生的电磁感应虽然比较复杂,但归纳起来无非下列三种基本效应。

- (1)电阻效应——将电能转换为热能消耗掉。
- (2)磁场效应——将电能转换为磁场能量并储存起来。
- (3)电场效应——将电能转换为电场能量并储存起来。

据此,相应引入三个理想电路元件,每个理想电路元件只反映上述一种效应,这三个理想电路元件如下。

- (1)理想电阻元件。它只产生电阻效应,也就是通电时起消耗电能的作用,没有其他作用。
- (2)理想电感元件。它只产生磁场效应,也就是通电时将电能转换为磁场能量并储存起来。
- (3)理想电容元件。它只产生电场效应,也就是通电时将电能转换为电场能量并储存起来。

理想电路元件简称电路元件,理想电阻元件简称电阻元件,理想电感元件简称电感元件,理想电容元件简称电容元件。三种常用电路元件的模型如图 1-4 所示。

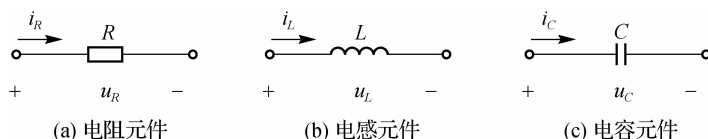


图 1-4 三种常用电路元件的模型

图 1-5 所示为手电筒的电路模型。其中,突出实际电源的电磁性质,将其抽象成电动势和内电阻两个理想元件串联,白炽灯则由一个理想电阻元件来表征,它们之间的各条连接线均是理想导线。

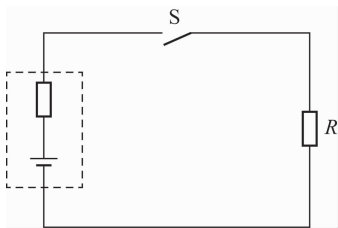


图 1-5 手电筒的电路模型

图 1-6(a)表示一个实际线圈,它可以抽象成图 1-6(b)所示的电路模型,其中  $R$  代表线圈的电阻, $L$  代表线圈的电感, $C$  代表线圈的匝间电容。根据实际使用情况的不同,可以把电

路模型简化。若电能损耗较小可以忽略,其电阻  $R$  可以省去;电容  $C$  不大,在频率较低时,其影响也可以略去。因此,对于同一个实际电路,在不同的使用条件下,可以使用不同的电路模型描述。

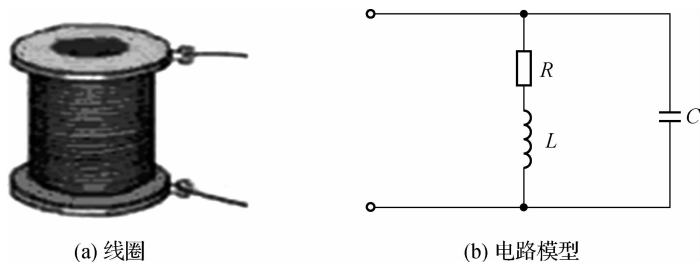


图 1-6 线圈实物及其电路模型

在电路中电路模型一般使用图形符号表示,本教材常用的图形符号如表 1-1 所示。

表 1-1 本教材常用的图形符号

名称	图形符号	名称	图形符号	名称	图形符号
电阻		接地或接机壳		灯	
电位器		二极管		电池	
电容		电流表		开关	
电感		电压表		熔断器	

## 任务二 电压及其测量

### 一、电位及电动势

电位又称电势,其数值只具有相对的意义。通常,选取无穷远处为电位零点,这时,电位的数值等于静电力使电荷在静电场中的某一点所具有的电势能。电位表征电能的强度,它的数值大小取决于电位零点的单位电荷从该点移到势能零点位置所做的功。电位常用的符号为  $V$ ,在国际单位制中的单位是伏特(V)。

电位是相对于电路参考点(令该点为零电位点)而言的某点电压,通常用上表示参考点。所以计算电位就是选定参考点后,计算各点相对于参考点之间的电压。例如,图 1-7 中,选定  $c$  点为参考点,则  $b$  点的电位  $V_b = U_2 = 5 \text{ V}$ ,  $a$  点的电位  $V_a = U_1 + U_2 = E_S = 15 \text{ V}$ 。当选取不同的参考点时,电路中各点有不同的电位,但任意两点间的电压(电位差)不变。



微课  
电路中各点电位的计算

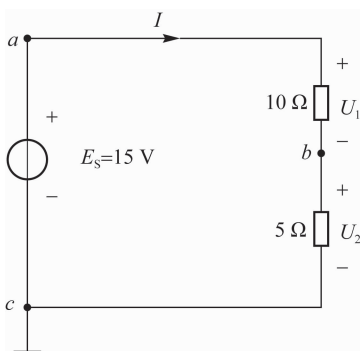


图 1-7 电位的计算

电动势是一个表征电源特征的物理量。电源的电动势的大小表明了电源将其他形式的能量转化为电能的本领。在数值上,电源的电动势等于非静电力将单位正电荷从电源的负极通过电源内部移到电源正极时所做的功。电动势能够克服导体电阻对电流的阻力,使电荷在闭合的导体回路中流动。电动势常用符号  $E$  (有时也可用  $\epsilon$ ) 表示,单位是伏特(V)。

电动势的方向规定为从电源的负极经过电源内部指向电源的正极,即与电源两端电压的方向相反。

例如,在图 1-7 所示电路中,电源的电动势用  $E_S$  表示,电动势的正方向与电压的正方向相反。 $E_S = 15 \text{ V}$  表示单位正电荷由电源负极移动到正极要吸收 15 J 的能量。

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。电源的方向是由负极指向正极,标出电源的正、负极性,电流方向;负载的极性为电流流入端为正,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“走”到零电位点,不论所经过的是电源,还是负载,只要是从正极到负极,就取该电位降为正,反之就取负,然后求代数和。

以图 1-8 所示电路为例,点 D 是参考点,各电源的极性和电流的方向如图所示,求点 A 的电位时有三条路径。

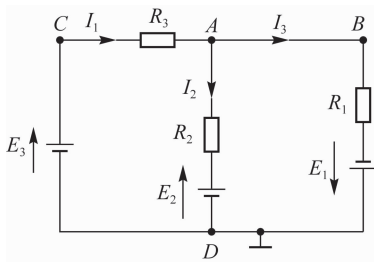


图 1-8 电路示例

沿  $A-E_2-D$  路径:  $V_A = I_2 R_2 + E_2$

沿  $A-B-E_1-D$  路径:  $V_A = I_3 R_1 - E_1$

沿  $A-C-E_3-D$  路径:  $V_A = -I_1 R_3 + E_3$

这三种计算方法的结果是完全相同的。

## 二、电压及其参考方向

电压又称电势差或电位差,是衡量单位电荷在静电场中由于电势不同所产生的能量差的物理量。电压的概念与水位高、低之间所造成的“水压”相似。需要指出的是,电压一般只用于电路中,电势差或电位差则普遍应用于一切电现象中。



微课

电压及其测量

如果用  $u(t)$  表示电压,则电压可用公式表示为

$$u(t) = \frac{d\tau w}{dq} \quad (1-1)$$

式中,  $d\tau w$  为  $dq$  电荷在  $t$  时刻由一点移到另一点所释放或吸收的能量。在国际单位制中,能量的单位为焦耳(J),电压的单位为伏特(V)。

在分析电路时,电路两点间或任一元件两端的电压要给定一个方向,即电压的参考方向。电路图中电压的参考方向可用箭头表示,也可用“+”“-”或双下标字母表示(如  $u_{ab}$ )。有了参考方向,电压的正负才有意义。电压数值为正时,表明其参考方向与实际方向一致;电压数值为负时,表明其参考方向与实际方向相反。

在图 1-9 所示的一段电路中,正电荷由  $a$  点运动到  $b$  点时,在该段电路释放出电势能,则电压  $u_{ab}$  为正;若电势能增加,则电压  $u_{ab}$  为负。

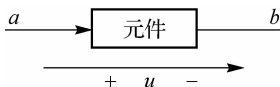


图 1-9 电压的参考方向

如果电场力把 1 C 电量从点  $A$  移到点  $B$  所做的功是 1 J,则  $A$  与  $B$  两点间的电压就是 1 V。电压的单位除 V 外,还有 mV(毫伏)、kV(千伏),其换算关系为  $1 \text{ V} = 10^{-3} \text{ kV} = 10^3 \text{ mV}$ 。电压量随处可见,小到毫伏级的心电信号、无线电信号,大到几万伏的输电线路。

**【例 1-1】** 图 1-10 所示电路中,已知  $U_{ce} = 5 \text{ V}$ ,  $U_{cd} = 2 \text{ V}$ ,若分别以  $e$  和  $c$  为参考点,求  $c$ 、 $d$ 、 $e$  三点的电位及  $U_{cd}$ 。

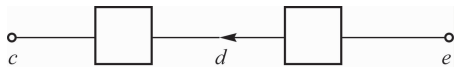


图 1-10 【例 1-1】图

**解** (1)以  $e$  为参考点。

$$V_c = U_{ce} + V_e = 5 \text{ V}$$

$$U_{de} = U_{ce} - U_{cd} = 5 - 2 = 3 \text{ V}$$

$$V_e = 0 \text{ V}$$

$$V_d = U_{de} + V_e = 3 + 0 = 3 \text{ V}$$

$$U_{ed} = V_e - V_d = -3 \text{ V}$$

(2) 以  $c$  为参考点。

$$V_c = 0 \text{ V}$$

$$V_e = -5 \text{ V}$$

$$V_d = U_{dc} + V_c = -2 + 0 = -2 \text{ V}$$

$$U_{ed} = V_e - V_d = -3 \text{ V}$$

**【例 1-2】** 在图 1-11 所示电路中, 已知  $U_1 = -100 \text{ V}$ ,  $U_2 = 200 \text{ V}$ , 求  $U_{ab}$  和  $U_{cd}$ 。

**解**  $U_1$  和  $U_2$  以图中箭头的方向为参考方向, 现  $U_{ab}$  表示的参考方向和  $U_1$  箭头的方向相反 [图 1-11(a)],  $U_{cd}$  表示的参考方向与  $U_2$  箭头的方向一致 [见图 1-11(b)], 故有

$$U_{ab} = -U_1 = -(-100) \text{ V} = 100 \text{ V}$$

$$U_{cd} = U_2 = 200 \text{ V}$$

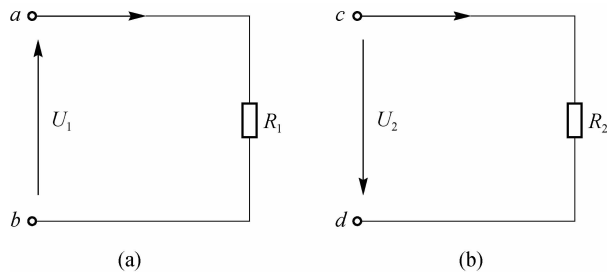


图 1-11 【例 1-2】图

### 三、电压放大器的设计

当对毫伏、微伏级的电压信号进行分析、处理时, 首先需要将其放大, 一般采用运算放大器来完成。在图 1-12 中,  $u_{i1}$ 、 $u_{i2}$  为毫伏级的输入信号, 该信号经差动放大器放大后从  $u_o$  端输出。调节  $R_w$  可以改变  $u_o$  的大小。

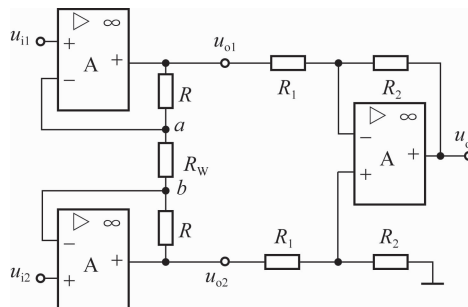


图 1-12 电压放大器设计图

## 四、安全电压

在生产、生活中经常需要用电,有时可能出现电击现象,而电击对人体的危害程度主要取决于通过人体电流的大小和通电时间长短。电流越大,致命危险越大;持续时间越长,死亡的可能性越大。能引起人感觉的最小电流值称为感知电流,交流为 1 mA,直流为 5 mA;人触电后能自行摆脱的最大电流称为摆脱电流,交流为 10 mA,直流为 50 mA;在较短的时间内危及生命的电流称为致命电流,如 100 mA 的电流通过人体 1 s,足以致命,一般规定致命电流为 50 mA。在有防止触电保护装置的情况下,人体允许通过的电流一般按 30 mA 考虑。

根据欧姆定律  $I=U/R$  可知,流经人体电流的大小与外加电压和人体电阻有关。人体电阻除人的自身电阻外,还应附加上人体以外的衣服、鞋等的电阻。虽然人体电阻一般可达 5 000  $\Omega$ ,但是影响人体电阻的因素很多,如皮肤潮湿出汗、带有导电性粉尘、加大与带电体的接触面积和压力以及衣服、鞋、袜的潮湿油污等情况,均能使人体电阻降低,所以通常流经人体电流的大小是无法事先计算出来的。因此,为确定安全条件,往往不采用安全电流,而是采用安全电压来进行估算。一般情况下,也就是干燥而触电危险性较大的环境下,安全电压规定为 36 V;对于潮湿而触电危险性较大的环境(如金属容器、管道内施焊检修),安全电压规定为 12 V。这样,触电时通过人体的电流可被限制在较小范围内,可在一定程度上保障人身安全。

## 五、电压的测量

电压的测量一般采用电压表和万用表进行。

测量直流电压通常采用磁电式电压表,测量交流电压主要采用电磁式电压表。电压表必须与被测电路并联,否则将烧毁电表,如图 1-13(a)所示。此外,测量直流电压时还要注意仪表的极性,正、负极不能接反。

在测量大的直流电压时需要扩大表的量程,方法是在表头上串联一个称为倍压器的高值电阻  $R_V$ ,其值为  $R_V=(m-1)R_0$ 。其中  $R_0$  为表头内阻, $m=U/U_0$  为倍压系数, $U_0$  为表头的量程, $U$  为扩大后的量程。在图 1-13(b)中有以下两式成立。

$$\frac{U}{U_0} = \frac{R_0 + R_V}{R_0}, R_V = R_0 \left( \frac{U}{U_0} - 1 \right)$$

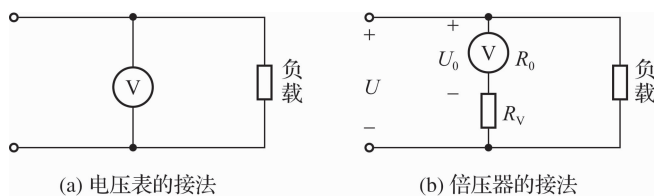


图 1-13 电压表的两种接法

**【例 1-3】** 有一电压表,其量程为 10 V,内阻为 1 000  $\Omega$ 。若要将量程扩大到 100 V,还需串联多大电阻?



$$\text{解 } R_V = 1\,000 \times \left( \frac{100}{10} - 1 \right) = 9\,000 \, \Omega$$

电压测量工具实物如图 1-14 所示。

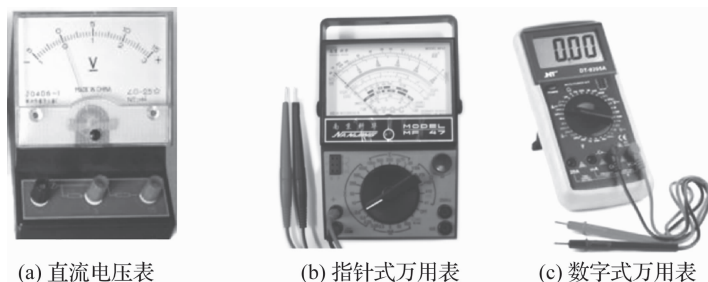


图 1-14 电压测量工具实物

## 任务三 电流及其测量

### 一、电流及参考方向

#### 1. 电流的基本概念

电流是指电荷的定向移动。电源的电动势形成了电压,继而产生了电场力,在电场力的作用下,处于电场内的电荷发生定向移动,形成了电流,如图 1-15 所示。



微课

电流及其测量

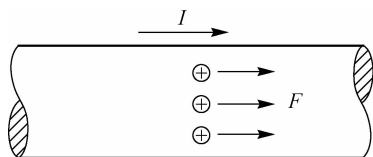


图 1-15 电流在电场内移动示意图

电流是描述电荷定向移动的物理量。导线中的电流强度定义为单位时间内通过导线横截面的电荷量。电流强度简称电流,用字母  $i$  表示,即

$$i(t) = \frac{dq}{dt} \quad (1-2)$$

式中,  $dq$  为在  $dt$  时间内流过导体横截面的电荷量。

如果电流是恒定的,即其大小和方向不随时间变化,称为直流电流,一般用大写字母  $I$  表示;若其大小与方向随时间变化,则称为交流电流,一般用小写字母  $i$  表示。在国际单位制中,电流的单位是安培(A)。分析电路时还会用到千安(kA)、毫安(mA)、微安( $\mu$ A)等,它们之间的换算关系为

$$1 \text{ A} = 10^{-3} \text{ kA} = 10^3 \text{ mA} = 10^6 \mu\text{A}$$

电荷有正、负之分,正电荷或负电荷定向流动都形成电流,习惯上规定正电荷的移动方向为电流的实际方向。在外电路,电流由正极流向负极;在内电路,电流由负极流向正极。在电路图上一般用箭头标示电流的方向。

电流是看不见摸不着而客观存在的,日常生活中电流无处不在。例如,手电筒打开时,灯亮了,这时电流就存在;手电筒关闭时,灯灭了,这时电流就不存在。

## 2. 电流的参考方向

在简单电路中,电流的实际方向可由电源的极性确定。在复杂电路中,电流的实际方向有时则事先难以确定。为了分析电路的需要,引入了电流的参考方向的概念,如图 1-16 所示。

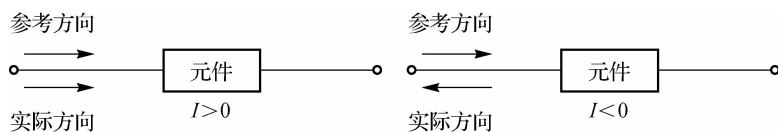


图 1-16 电流的参考方向

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,并据此正方向进行计算:若计算得到结果为正值,说明电流的实际方向与参考方向相同;若计算得到结果为负值,说明电流的实际方向与参考方向相反。

电流的参考方向与实际方向一致时, $I > 0$ ;电流的参考方向与实际方向相反时, $I < 0$ 。

**【例 1-4】** 如图 1-17 所示,各电流的参考方向已设定,已知  $I_1 = 6 \text{ A}$ ,  $I_2 = -1 \text{ A}$ ,  $I_3 = 5 \text{ A}$ 。试确定  $I_1$ 、 $I_2$ 、 $I_3$  的实际方向。

**解**  $I_1 > 0$ ,故  $I_1$  的实际方向与参考方向相同, $I_1$  由  $b$  点流向  $c$  点。

$I_2 < 0$ ,故  $I_2$  的实际方向与参考方向相反, $I_2$  由  $a$  点流向  $b$  点。

$I_3 > 0$ ,故  $I_3$  的实际方向与参考方向相同, $I_3$  由  $d$  点流向  $b$  点。

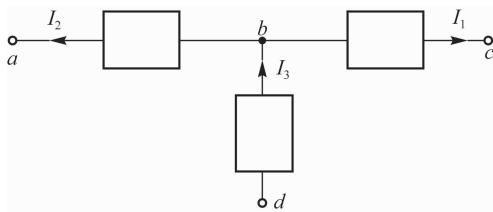


图 1-17 【例 1-4】图

## 3. 关联参考方向

任意假设的电压、电流的方向称为参考方向。参考方向可任意标定,标定后,电流、电压、电动势的值可正可负,计算结果存在两种情况:

- (1)“+”说明参考方向与真实方向相同。
- (2)“-”说明参考方向与真实方向相反。

**注意:**(1)选定参考方向后不能再更改。

(2) 计算结果的正、负只有与图中参考方向结合起来才有物理意义。

关联参考方向就是元件上电流和电压的参考方向一致,即电流从高电位流向低电位。非关联参考方向就是元件上电流和电压的参考方向不一致,即电流从低电位流向高电位。图 1-18(a)中, $u$ 、 $i$  为关联参考方向,图 1-18(b)中, $u$ 、 $i$  为非关联参考方向。



图 1-18 关联与非关联参考方向

**【例 1-5】** 如图 1-19 所示,试判断  $U$ 、 $I$  是否为关联参考方向。

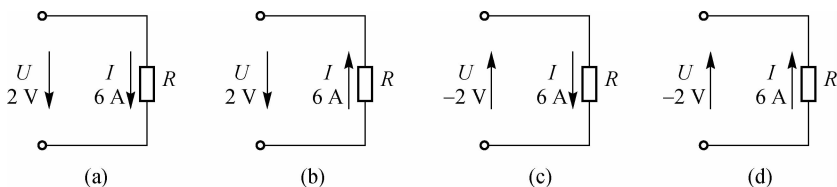


图 1-19 【例 1-5】图

**解** 图 1-19(a)、图 1-19(c)为关联参考方向;图 1-19(b)、图 1-19(d)为非关联参考方向。

判断某一电路元件是电源还是负载的方法如下。

根据电压和电流的实际方向可确定某一电路元件是电源还是负载。

电源: $U$  和  $I$  的实际方向相反,电流从“+”端流出,输出功率。

负载: $U$  和  $I$  的实际方向相同,电流从“+”端流入,吸收功率。

**【例 1-6】** 图 1-20 所示为电流或电压的参考方向,试判断其实际方向。

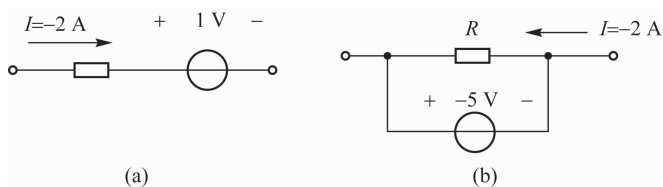


图 1-20 【例 1-6】图

**解** 图 1-20(a)中,电流小于零,实际方向与参考方向相反;电压大于零,实际方向与参考方向相同。

图 1-20(b)中,电流小于零,实际方向与参考方向相反;电压小于零,实际方向与参考方向相反。

**【例 1-7】** 某电路中有  $a$ 、 $b$ 、 $c$  三点,已知  $U_{ab} = 8 \text{ V}$ 、 $U_{ac} = 3 \text{ V}$ ,若取  $a$  点为参考点,则  $V_b$ 、 $V_c$  各为多少?若取  $b$  点为参考点,则  $V_a$ 、 $V_c$  各为多少?选择不同的参考点同一点的电位还相同吗?

**解** 由  $U_{ab}=V_a-V_b$  可得:

若取  $a$  点为参考点, 则  $V_a=0$ ,

$$V_b=V_a-U_{ab}=0-8=-8 \text{ V}$$

$$V_c=V_a-U_{ac}=0-3=-3 \text{ V}$$

若取  $b$  点为参考点, 则  $V_b=0$ ,

$$V_a=U_{ab}+V_b=8 \text{ V}$$

$$V_c=V_a-U_{ac}=8-3=5 \text{ V}$$

可知, 选择不同的参考点, 同一点的电位是不同的。

**【例 1-8】** 如图 1-21 所示, 流过元件 X 的电流  $I=-1 \text{ A}$ , 加在元件 X 两端的电压  $U=2 \text{ V}$ , 该元件是电源还是负载?

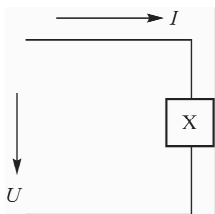


图 1-21 【例 1-8】图

**解** 方法一: 由于  $U$  与  $I$  的实际方向相反, 元件 X 是电源, 输出功率。

方法二: 由于  $U$  与  $I$  的正方向相同,  $P=UI=-2 \text{ W}<0$ , 元件 X 是电源。

#### 4. 电流放大器的设计

电流的强度有大有小, 当小电流信号不能驱动大负载时, 就需要将其放大。小电流信号一般使用三极管放大, 如使用单片机的输出口控制继电器、电磁阀等。由于单片机的输出电流较小, 因此需要放大器放大电流信号, 如图 1-22 所示, 单片机 CPU 输出的信号经三极管 VT 放大后可以驱动继电器 KA。

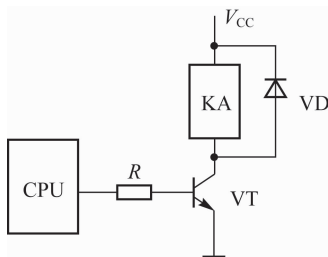


图 1-22 单片机 CPU 的放大电流信号

#### 5. 电流对人体的伤害

人体的某一部分碰到带电的物体, 电流就要通过人体, 即触电。电流通过人体, 对人的身体和内部组织会造成不同程度的损伤, 这种损伤分为电击和电伤两种。电击是指电流通过人体时, 使内部组织受到较为严重的损伤。电击会使人觉得全身发热、发麻, 肌肉发生不

自主的抽搐,逐渐失去知觉。如果电流继续通过人体,将使触电者的心脏、呼吸系统和神经系统受损,直到心脏活动停止、呼吸停止,最终死亡。电伤是指电流对人体外部造成的局部损伤,电伤从外观来看一般有电弧烧伤、电的烙印和熔化的金属渗入皮肤(称为皮肤金属化)等伤害。总之,当人触电后,电流通过人体和发生电弧,往往使人体受到严重伤害,甚至造成死亡。

研究表明,当人体通过 0.6 mA 的电流时,会引起人体麻刺的感觉;通过 20 mA 的电流,会引起剧痛和呼吸困难;通过 50 mA 的电流,就有生命危险;通过 0.1 A 以上的电流,就能引起心脏麻痹、心房停止跳动,直至死亡。

触电会威胁触电者的生命安全,其危险程度和下列因素有关。

- (1)人体承受的电压。
- (2)通过人体的电流。
- (3)电流作用时间的长短。
- (4)电源频率的高低。
- (5)电流通过人体的路径。
- (6)触电者的体质状况。
- (7)人体的电阻。

人体承受的电压越高,对人体的危害越重。较低的电压对人体不会造成大的伤害;较高的电压,轻则引起灼伤,重则使人死亡。在较干燥的环境中,36 V 以下的电压是安全的。

通过人体的电流决定于触电者接触到电压的高低和人体电阻的大小。人体接触的电压越高,通过人体的电流越大。人体电阻越小,通过人体的电流越大。人体的电阻一般为 10~100 k $\Omega$ ,主要是皮肤角质层电阻最大,当皮肤失去角质层时,人体电阻就会降到 800~1 000  $\Omega$ 。如果皮肤出汗、潮湿和有灰尘(如金属灰尘、炭质灰尘),也会使皮肤电阻大大降低。

电流通过人体时间的长短与人体的受伤害程度有密切的关系,人体处于电流作用下,时间越短获救的可能性越大,电流通过人体时间越长,电流对人体机能的破坏越大,获救的可能性也就越小。

研究表明,50~60 Hz 工频电源对人体伤害最大;电流流过心脏比流过人体其他部位更危险。

很多人认为 220 V 电压对人没有太大危险,使用中不必担心,这完全不对。220 V 电压虽然不高,但因为在生活和工作中使用较多,加之人们对 220 V 的低电压经常忽视,触电的机会较多。统计表明,在人体触电事故中,低压触电事故所占比重较大。因此,在低压用电系统中,我们更应注意安全,避免触电。

## 二、电流的测量

电流的测量可使用电流表或万用表的电流挡进行。

测量直流电流通常采用磁电式电流表,测量交流电流主要采用电磁式电流表。电流表必须与被测电路串联,否则将烧毁电表。此外,测量直流电流时还要注意仪表的极性,电流

表的正端为电流流入的方向。连接如图 1-23(a)所示。

在测量大电流时需要扩大电流表的量程,方法是在表头上并联一个分流的低值电阻  $R_A$ ,如图 1-23(b)所示,分流电阻的阻值为  $R_A = R_0 / (n - 1)$ 。其中  $R_0$  为表头内阻,  $n = I / I_0$  为分流系数,  $I_0$  为表头的量程,  $I$  为扩大后的量程。在图 1-23(b)中有

$$I_0 = I \frac{R_A}{R_0 + R_A}, R_A = \frac{R_0}{\frac{I}{I_0} - 1} \quad (1-3)$$

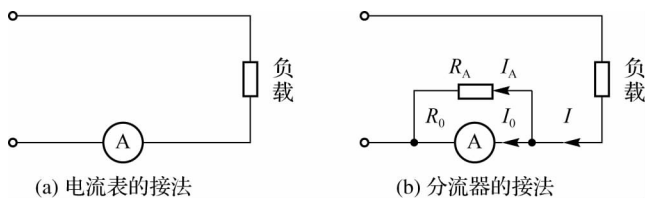


图 1-23 测量直流电流

**【例 1-9】** 有一磁电式电流表,当使用分流器时,表头的满偏电流为 5 mA。表头内阻为 200  $\Omega$ 。现将量程(满表值)扩大为 1 A,则分流的电阻应为多大?

解  $R_A = \frac{R_0}{\frac{I}{I_0} - 1} = \frac{200}{\frac{1}{0.005} - 1} \approx 1.005 \Omega$

直流电流表如图 1-24 所示。



图 1-24 直流电流表

用电流表和万用表测量图 1-25 中的电流。其中  $U_S$  为 0~5 V 的直流电源,  $R$  为 10 k $\Omega$  的可调电位器,  $A_1$  为电流表,  $A_2$  为万用表,  $R_2$  为 10 k $\Omega$  的电阻。调节直流电源、电位器时观察  $A_1$ 、 $A_2$  示数的变化情况。(注意选择量程和极性)

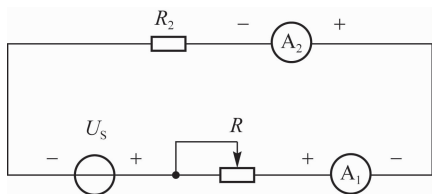


图 1-25 测电流

## 任务四 电能与电功率

电路是转换与传输能量的装置。在电路工作时,总是伴随着电能与其他形式能量的转换。各种电气设备工作时,其电压、电流和功率都有一定的限制,超过容许值可能造成设备损坏。分析电路时要计算电路中各元件的功率。

单位时间内电场力所做的功称为电功率,简称功率,用字母  $p$  表示。电功率是表征电路中能量转换速率的物理量,即

$$p(t) = \frac{d\omega}{dt} = \frac{d\omega}{dq} \cdot \frac{dq}{dt} = ui \quad (1-4)$$

对于一段电路或一个元件,当电压  $u$  与电流  $i$  取关联参考方向时, $u$  与  $i$  的乘积就是此时刻该段电路或元件吸收或释放的电能。 $p$  值为正时,表示该元件吸收电能,为负载; $p$  值为负时,表示该元件释放(供给)电能,为电源。

在直流电路中,电压与电流均不随时间变化,功率用  $P$  表示,有

$$P = UI \quad (1-5)$$

在国际单位制中,功率的单位为瓦特,简称瓦(W)。当功率较大时,用千瓦(kW)表示;当功率较小时,常用毫瓦(mW)、微瓦( $\mu$ W)表示。它们之间的换算关系为

$$1 \text{ W} = 10^{-3} \text{ kW} = 10^3 \text{ mW} = 10^6 \mu\text{W}$$

**【例 1-10】** 在图 1-26 所示电路中,设  $I=1 \text{ A}$ ,  $U_{S1}=6 \text{ V}$ ,  $U_{S2}=2 \text{ V}$ , 计算各元件的功率。

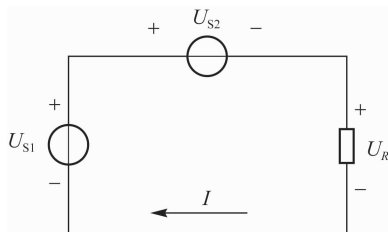


图 1-26 【例 1-10】电路

**解**  $U_R = U_{S1} - U_{S2} = (6 - 2) \text{ V} = 4 \text{ V}$

各元件的功率分别为

$$P_R = U_R I = 4 \times 1 \text{ W} = 4 \text{ W} \quad \text{吸收 } 4 \text{ W, 起负载作用}$$

$$P_{U_{S1}} = (-U_{S1}) I = (-6) \times 1 \text{ W} = -6 \text{ W} \quad \text{发出 } 6 \text{ W, 起电源作用}$$

$$P_{U_{S2}} = U_{S2} I = 2 \times 1 \text{ W} = 2 \text{ W} \quad \text{吸收 } 2 \text{ W, 起负载作用}$$

整个电路满足  $\sum P = P_R + P_{U_{S1}} + P_{U_{S2}} = 0$ , 符合能量守恒定律。

电能是一段时空中电路转换的能量之和,用字母  $\omega$  (或  $W$ ) 表示,即

$$\omega = \int_0^t p(t) dt$$



微课

电能与电功率

对于直流电路,功率不随时间变化,有

$$W = P\Delta t = UI\Delta t$$

式中, $P$ 的单位为瓦(W); $\Delta t$ 的单位为秒(s); $W$ 的单位为焦耳(J)。电能的实用单位为  $\text{kW}\cdot\text{h}$ (千瓦时)。

在国际单位制中,能量的单位为焦耳,简称焦(J)。当已知设备的功率为 $P$ 时,在 $t$ 秒内消耗的电能 $W = Pt$ 。电能就等于电场力所做的功,单位是J。在电工技术中,往往直接用  $\text{W}\cdot\text{s}$ (瓦特秒)做单位,实际上则用  $\text{kW}\cdot\text{h}$ (千瓦时)做单位,俗称度。 $1\text{ kW}\cdot\text{h} = 3.6 \times 10^6 \text{ W}\cdot\text{s}$ 。

**【例 1-11】** 有三盏电灯接在 110 V 电源上,其额定值分别为 110 V、100 W、110 V、60 W、110 V、40 W,求总功率  $P$ 、总电流  $I$ ,以及通过各灯泡的电流和等效电阻。

**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

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

(2)总电流为

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

(3)各灯泡的电流和等效电阻为

$$I_1 = \frac{P_1}{U_1} = \frac{100}{110} \approx 0.909 \text{ A}$$

$$I_2 = \frac{P_2}{U_2} = \frac{60}{110} \approx 0.545 \text{ A}$$

$$I_3 = \frac{P_3}{U_3} = \frac{40}{110} \approx 0.364 \text{ A}$$

$$R = \frac{U}{I} = \frac{110}{1.82} \approx 60.4 \Omega$$

**【例 1-12】** 有一 220 V、60 W 的电灯,接在 220 V 的直流电源上,试求通过电灯的电流和电灯在 220 V 电压下工作时的电阻。如果每晚用 3 h,则一个月消耗电能多少?

**解**  $I = P/U = 60/220 \approx 0.273 \text{ A}$

$$R = U/I = 220/0.273 \approx 806 \Omega$$

电阻也可用下式计算。

$$R = P/I^2 \text{ 或 } R = U^2/P$$

一个月消耗的电能,也就是所做的功为

$$W = Pt = 60 \times 3 \times 30 \div 1000 = 5.4 \text{ kW}\cdot\text{h}$$

电度表(电能表)就是常用的测量电能的仪表。

**【例 1-13】** 图 1-27 所示为直流电路,其中  $U_1 = 5 \text{ V}$ ,  $U_2 = -9 \text{ V}$ ,  $U_3 = 4 \text{ V}$ ,  $I = 5 \text{ A}$ ,求各元件接收或发出的功率  $P_1$ 、 $P_2$  和  $P_3$ ,并求整个电路的功率  $P$ 。

**解**  $P_1$  的电压参考方向与电流参考方向相关联,故

$$P_1 = U_1 I = 5 \times 5 = 25 \text{ W (接收 25 W)}$$

$P_2$  和  $P_3$  的电压参考方向与电流参考方向非关联,故



$$P_2 = -U_2 I = -(-9) \times 5 = 45 \text{ W (接收 45 W)}$$

$$P_3 = -U_3 I = -4 \times 5 = -20 \text{ W (发出 20 W)}$$

整个电路的功率为  $P$ , 设接收功率为正, 发出功率为负, 则

$$P = 25 + 45 - 20 = 50 \text{ W}$$

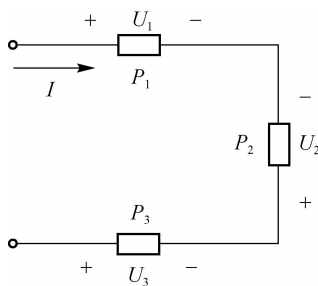


图 1-27 【例 1-13】电路

## 任务五 电阻及电阻器的识别与检测

### 一、电阻

#### 1. 电阻的物理概念

白炽灯泡、电炉、电烙铁等电气设备在一定条件下可用电阻元件(简称电阻)作为其电路模型。电阻在电路中起阻碍电流流动的作用。在电场力的作用下,电荷通过电阻时要克服阻力做功。一般电阻只要有电流流过,就要吸收电能,所以电阻是消耗电能的元件。

导体的电阻阻值  $R$  由其材料的性质及几何尺寸决定,即

$$R = \rho \frac{l}{S}$$

式中,  $\rho$  为材料的电阻率;  $l$  为导体的长度;  $S$  为导体的横截面积。

#### 2. 电阻的伏安特性

非时变线性电阻的阻值为常数,其电路如图 1-28(a)所示。当其电压  $u$  和电流  $i$  取关联参考方向时,根据欧姆定律,得

$$u = iR \quad (1-6)$$

式中,  $R$  为元件的电阻值。当电压单位用伏特(V)、电流单位用安培(A)时,电阻的单位为欧姆( $\Omega$ )。其伏安关系为过原点的一条直线,如图 1-28(b)所示。

电阻的倒数用  $G$  表示,称为电导,即

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

电导的单位为西门子(S)。

式(1-6)用电导表示,可写成



微课

电阻与电阻器



微课

欧姆定律

$$i = Gu$$

(1-8)

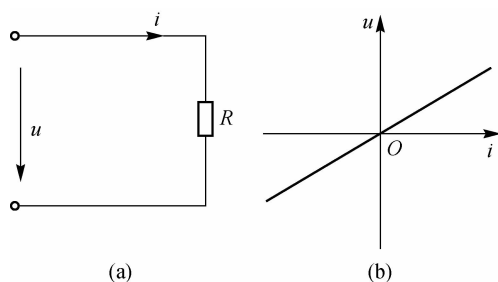


图 1-28 非时变线性电阻的电路及其伏安关系

电阻吸收的功率为

$$p = ui = i^2 R = u^2 G \quad (1-9)$$

线性电阻元件有两个特殊的极端情况值得注意：一是不论它的端电压为何值，若流过的电流都为零，此时电阻两端称为开路；二是不论它的电流为何值，若电阻两端的电压都为零，此时电阻两端称为短路。开路和短路状态的伏安关系如图 1-29 所示，在  $u-i$  平面上分别与电压轴和电流轴重合。

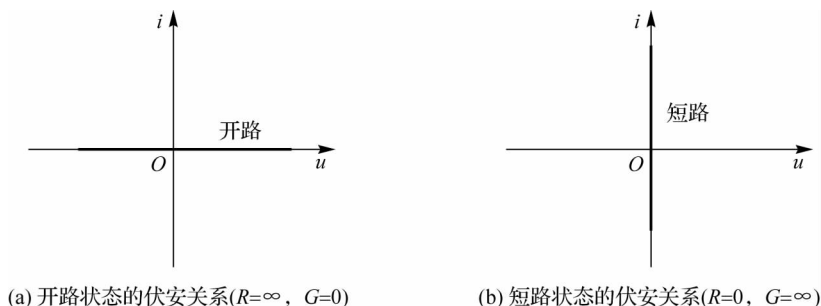


图 1-29 开路与短路状态的伏安关系

非线性电阻的伏安关系在  $u-i$  平面上是一条曲线，它的阻值随着流过的电流或两端电压的改变而改变。图 1-30(a) 表示的半导体二极管是一个典型的非线性电阻，其伏安关系如图 1-30(b) 所示。

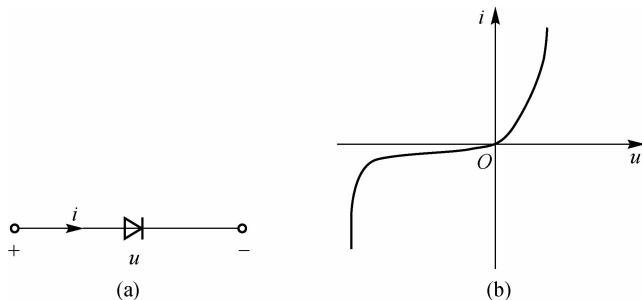


图 1-30 二极管的电路符号及伏安关系

**【例 1-14】** 有一个 220 V、50 W 的灯泡,其灯丝电阻是多少? 每天用 5 h,一个月(按 30 天计算)消耗的电能是多少千瓦时?

**解** 灯泡灯丝电阻为

$$R = \frac{U^2}{P} = \frac{220^2}{50} = 968 \Omega$$

一个月消耗的电能为

$$W = Pt = 50 \times 10^{-3} \times 5 \times 30 = 7.5 \text{ kW} \cdot \text{h}$$

## 二、电阻器和电位器的技术参数

### 1. 电阻器和电位器型号的命名方法

根据国家标准《电子设备用固定电阻器、固定电容器型号命名方法》(GB/T 2470—1995)的规定,电阻器和电位器的型号由四部分组成,如表 1-2 所示。

表 1-2 电阻器和电位器型号的命名方法

第一部分 (主称)		第二部分 (材料)		第三部分 (特征分类)			第四部分 (序号)
符号	意义	符号	意义	符号	意义		
					电阻器	电位器	
R	电阻器	T	碳膜	1	普通	普通	一般用数字表示产品的序号,用于区分外形尺寸和性能指标
W	电位器	H	合成膜	2	普通	普通	
		S	有机实心	3	超高频	普通	
		N	无机实心	4	高阻	普通	
		Y	氧化膜	5	高温	普通	
		J	金属膜	6	高温	普通	
		C	沉积膜	7	精密	精密	
		I	玻璃釉膜	8	高压	特殊函数	
		P	硼碳膜	9	特殊	特殊	
		U	硅碳膜	G	高功率	特殊	
		X	线绕	T	可调	特殊	
		G	光敏	D	可调	多圈	
		M	压敏	W	可调	微调	
		R	热敏	B	温度补偿	多圈	
				C	温度测量	多圈	
				P	旁热式	多圈	
				W	稳压式	多圈	
				Z	正温度系数	多圈	

例如,高压碳膜电阻器的型号命名如图 1-31 所示。

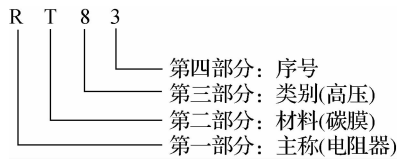


图 1-31 高压碳膜电阻器的型号命名

又如,多圈金属膜电位器的型号命名如图 1-32 所示。

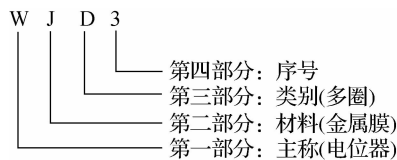


图 1-32 多圈金属膜电位器的型号命名

## 2. 电阻器、电位器的图形符号

电阻器、电位器的图形符号如图 1-33 所示。

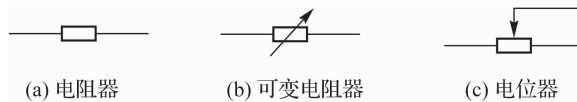


图 1-33 电阻器、电位器的图形符号

## 3. 电阻器的主要性能指标

### 1) 标称阻值

电阻器的标称值是指电阻器的阻值,阻值是电阻的主要参数之一。不同类型的电阻,其阻值范围不同,不同精度的电阻其阻值也不同。根据国家标准,常用的标称电阻值系列如表 1-3 所示。常见标注方法有 E96、E24、E12 和 E6 几种,这些标注方法也适用于电位器,即表 1-3 中数值再乘以  $10^n$ ,其中  $n$  为正整数或负整数。

表 1-3 常用的标称电阻值系列

标称值系列	精度	电阻器(R)、电位器(W)
E96	$\pm 1\%$	1.00,1.02,1.05,1.07,1.10,1.13,1.15,1.18,1.21,1.24,1.27,1.30,1.33,1.37,1.40,1.43,1.47,1.50,1.54,1.58,1.62,1.65,1.69,1.74,1.78,1.82,1.87,1.91,1.96,2.00,2.05,2.10,2.15,2.21,2.26,2.32,2.37,2.43,2.49,2.55,2.61,2.67,2.74,2.80,2.87,2.94,3.01,3.09,3.16,3.24,3.32,3.40,3.48,3.57,3.65,3.74,3.83,3.92,4.02,4.12,4.22,4.32,4.42,4.53,4.64,4.75,4.87,4.99,5.11,5.23,5.36,5.49,5.62,5.76,5.90,6.04,6.19,6.34,6.49,6.65,6.81,6.98,7.15,7.32,7.50,7.68,7.87,8.06,8.25,8.45,8.66,8.87,9.09,9.31,9.53,9.76

续表

标称值系列	精度	电阻器(R)、电位器(W)
E24	±5%	1.0,1.1,1.2,1.3,1.5,1.6,1.8,2.0,2.2,2.4,2.7,3.0,3.3,3.6,3.9,4.3,4.7,5.1,5.6,6.2,6.8,7.5,8.2,9.1
E12	±10%	1.0,1.2,1.5,1.8,2.2,2.7,3.3,3.9,4.7,5.6,6.8,8.2
E6	±20%	1.0,1.5,2.2,3.3,4.7,6.8,8.2

E系列是一种由几何级数构成的数列。E系列首先在英国的电工行业中应用,故采用electricity的首字母E标志这一系列,它是以 $\sqrt[6]{10}$ 、 $\sqrt[12]{10}$ 、 $\sqrt[24]{10}$ 、 $\sqrt[48]{10}$ 、 $\sqrt[96]{10}$ 、 $\sqrt[192]{10}$ 为公比的几何级数,分别称为E6系列、E12系列、E24系列、E48系列、E96系列、E192系列。

(1)E6系列的公比为 $\sqrt[6]{10} \approx 1.47$ 。

(2)E12系列的公比为 $\sqrt[12]{10} \approx 1.21$ 。

(3)E24系列的公比为 $\sqrt[24]{10} \approx 1.10$ 。

(4)E48系列的公比为 $\sqrt[48]{10} \approx 1.049$ 。

(5)E96系列的公比为 $\sqrt[96]{10} \approx 1.024$ 。

(6)E192系列的公比为 $\sqrt[192]{10} \approx 1.012$ 。

E系列由国际电工委员会(IEC)于1952年发布为国际标准,该系列适用于电子元件。

(1)E6系列适用于误差为±20%(M)的电阻、电容和电感数值。

(2)E12系列适用于误差为±10%(K)的电阻、电容和电感数值。

(3)E24系列适用于误差为±5%(J)的电阻、电容和电感数值。

(4)E48系列适用于误差为±2%(G)的电阻数值。

(5)E96系列适用于误差为±1%(F)的电阻数值。

(6)E192系列适用于误差为±0.5%(D)的电阻和电容器数值。

从表1-3不难看出,采用E24标准时,表中所列数值,后一个数除以前一个数约等于1.10,即公比为 $\sqrt[24]{10} \approx 1.10$ ,如 $1.2 \div 1.1 \approx 1.10$ 。当采用E96标准时,表中所列数值,后一个数除以前一个数约等于1.024,即公比为 $\sqrt[96]{10} \approx 1.024$ ,如 $1.33 \div 1.30 \approx 1.024$ 。常用的三色环电阻和三位数码表示的贴片电阻采用E24标准,精度为±5%;四色环电阻和四位数码表示的贴片电阻采用E96标准,精度为±1%。

## 2) 额定功率

电阻器在电路中长时间连续工作不损坏,或不显著改变其性能所允许消耗的最大功率称为电阻器的额定功率。电阻器的额定功率并不是电阻器在电路中工作时一定要消耗的功率,而是电阻器在电路中工作时所允许消耗的最大功率。不同类型的电阻器具有不同系列的额定功率,如表1-4所示。电阻器的额定功率值等于其所承受的最高电压和最大电流的乘积。每个电阻器都有其额定功率值,常见电阻的额定功率有1/8 W、1/4 W、1/2 W、1 W、2 W、3 W、4 W、5 W、10 W等。其中1/8 W和1/4 W的电阻器较为常用,在大电流场合,大

功率的电阻器也很普遍。图 1-34 所示为各额定功率值的电阻器在电路图上的符号。不难看出,额定功率值在 1 W 以上用罗马数字表示。

表 1-4 电阻器的功率等级

名 称	额定功率/W					
实芯电阻器	0.25	0.5	1	2	5	—
线绕电阻器	0.5	1	2	6	10	15
	25	35	50	75	100	150
薄膜电阻器	0.025	0.05	0.125	0.25	0.5	1
	2	5	10	25	50	100

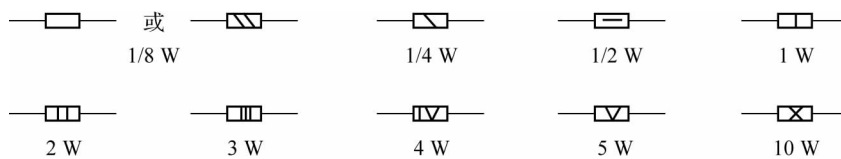


图 1-34 各额定功率值的电阻器在电路图上的符号

#### 4. 电阻器的标识方法

##### 1) 直标法

直标法是指在电阻体表面直接标注主要参数和技术性能。

##### 2) 数字法

数字法是指用三位数字表示阻值,它主要用于片状电阻中。如图 1-35 所示,223 代表其阻值为  $22 \times 10^3 \Omega = 22 \text{ k}\Omega$ 。



微课  
电阻器的识读



图 1-35 贴片电阻

##### 3) 文字符号法

文字符号法是指将字母和数字两者有规律地组合起来表示出电阻器的阻值与允许误差,标注在电阻体表面,如图 1-36 所示,最后的字母或数字表示误差。

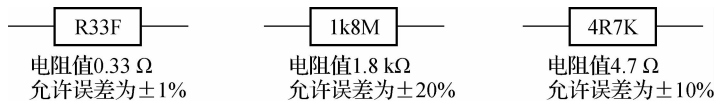


图 1-36 文字符号法标识电阻示意图

允许误差,0级表示 $\pm 2\%$ ,I级表示 $\pm 5\%$ ,II级表示 $\pm 10\%$ ,III级表示 $\pm 20\%$ 。允许误差也可以用字母表示,见表1-5。

表 1-5 文字符号法表示的电阻器的允许误差

文字符号	允许误差	文字符号	允许误差
B	$\pm 0.1\%$	J	$\pm 5\%$
C	$\pm 0.25\%$	K	$\pm 10\%$
D	$\pm 0.5\%$	M	$\pm 20\%$
F	$\pm 1\%$	N	$\pm 30\%$
G	$\pm 2\%$		

电阻器的单位文字符号的含义见表1-6。

表 1-6 电阻器的单位文字符号的含义

文字符号	单 位	文字符号	单 位
R	欧姆	G	千兆欧姆
K	千欧姆	T	兆兆欧姆
M	兆欧姆		

其中, $1\text{ M}\Omega=10^3\text{ k}\Omega=10^6\text{ }\Omega$ 。

#### 4) 色环法

色环法是指用不同颜色的色环来表示电阻器的阻值与允许误差,如图1-37所示。

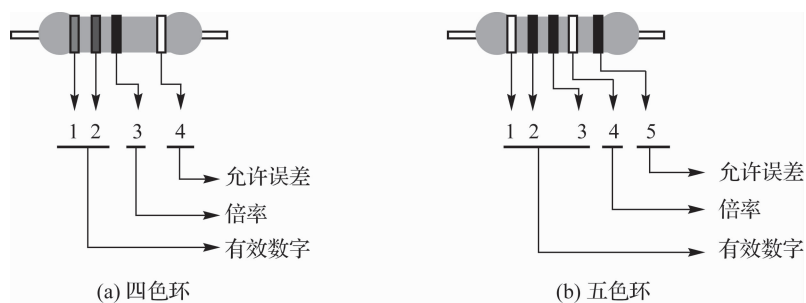


图 1-37 四色环和五色环标识电阻器

对于四色环电阻,第一、第二色环代表电阻的第一、第二位数,第三色环代表倍率 $10^n$ ,第四色环表示允许误差。例如,某色环电阻前三色环的颜色分别为黄、紫、橙,第四色环为金,则其电阻值为 $47\text{ k}\Omega\pm 5\%$ 。色环电阻的单位为 $\Omega$ ,阻值环和误差环颜色对应的数码和误差见表1-7。

表 1-7 阻值环和误差环颜色对应的数码和误差

颜色	棕	红	橙	黄	绿	蓝	紫	灰	白	黑	金	银	无色
数码	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0			
倍率	$10^1$	$10^2$	$10^3$	$10^4$	$10^5$	$10^6$	$10^7$	$10^8$	$10^9$	$10^0$	$10^{-1}$	$10^{-2}$	
允许误差	$\pm 1\%$	$\pm 2\%$			$\pm 0.5\%$	$\pm 0.2\%$	$\pm 0.15\%$				$\pm 5\%$	$\pm 10\%$	$\pm 20\%$

### 三、电阻在电路中的作用

电阻是电路中最常用的元件,在电路中的作用是稳定和调节电路中的电流和电压,包括限制电路电流、降低电压、分配电流和电压等。

#### 1. 限流

为使通过用电器的电流不超过额定值或实际工作的规定值,以保证用电器的正常工作,通常可在电路中串联一个可变电阻。当改变这个电阻的大小时,电流的大小也随之改变。把这种可以限制电流大小的电阻称为限流电阻。例如,在给蓄电池充电的电路中,为了使充电电流不超过规定值,可在电路中接入限流电阻,在充电过程中适当调节接入电阻的大小,可使电流的大小保持稳定;再如在可调光台灯的电路中,为了控制灯泡的亮度,也可在电路中接入一个限流电阻,通过调节接入电阻的大小来控制电路中电流的大小,从而控制灯泡的亮度。

#### 2. 分流

当在电路的干路上需同时接入几个额定电流不同的用电器时,可以在额定电流较小的用电器两端并联一个电阻,这个电阻的作用是分流。例如,有甲、乙两个灯泡,额定电流分别是 0.2 A 和 0.4 A,显然两灯泡不能直接串联接入同一电路。但若在甲灯两端并联一个合适的分流电阻(见图 1-38),则当开关 S 闭合时,甲、乙两灯就都能正常工作了。

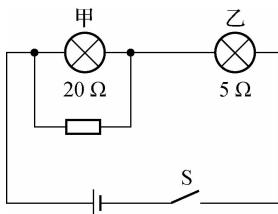


图 1-38 分流电阻示意图

#### 3. 分压

一般用电器上都标有额定电压值,若电源比用电器的额定电压高,则不可以把用电器直接接在电源上。在这种情况下,可给用电器串接一个合适阻值的电阻,让它分担一部分电压,用电器便能在额定电压下工作,称这样的电阻为分压电阻。如常用的测电笔里有一个阻值很大的高电阻,它也是一个分压电阻。人体的电阻一般为高电阻的 1/10,这样人站在地面上用测电笔接触 220 V 的电源,测电笔中高电阻分压约为 200 V,人体承受的电压就只有



20 V, 低于 36 V(安全电压), 这样就没有触电的危险了。

#### 4. 将电能转化为内能

电流通过电阻时, 会把电能全部(或部分)转化为内能。用来把电能转化为内能的用电器称为电热器, 如电烙铁、电炉、电饭煲、取暖器等。

### 四、电阻的测量方法

#### 1. 万用表测量电阻的原理和方法

万用表的欧姆挡实质上是一个多量程的欧姆表。电阻测量是以欧姆定律为基础的, 在给定电源电压不变的前提下, 回路电阻增加一倍, 则电流减为一半。

万用表测量电阻的基本电路如图 1-39 所示。

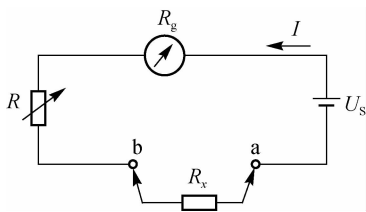


图 1-39 万用表测量电阻的基本电路

在该电路中, 表头电阻  $R_g$ 、辅助电源  $U_s$ 、限流电阻  $R$  作为万用表的内部电路, 参数是相对恒定的。接在 a、b 两端的是被测电阻  $R_x$ 。根据欧姆定律有

$$I = \frac{U_s}{R_g + R + R_x}$$

当  $R_x = 0$  时, 相当于 a、b 端短路,  $I = U_s / (R_g + R) = I_{\max}$ , 回路中电流最大, 表头满偏停到右端。该点被定为欧姆表的零值刻度, 可以通过改变电阻  $R$  进行调节(即调零)。

当  $R_x = \infty$  时, 相当于 a、b 端开路,  $I = 0$ , 指针不偏转, 停留在左端的机械零位, 该点被定为欧姆表的无穷大( $\infty$ )刻度。当被测电阻  $R_x$  在零到无穷大范围内变化时, 指针的偏转角也在欧姆值  $0 \sim \infty$  刻度范围内变化。

在图 1-39 中, 当  $R_x = R_g + R = R_T$  时(其中  $R_T$  为中心阻值), 则

$$I = \frac{U_s}{R_g + R + R_x} = \frac{U_s}{2(R_g + R)} = \frac{I_{\max}}{2}$$

#### 2. 表头内阻的测量

如图 1-40 所示, 欲测电压表的内电阻, 可闭合开关 S, 调节滑动触头 P 的位置, 使两表均有一明显读数,  $U$  为电压表读数,  $I$  为电流表读数。由电阻定义式可得电压表内阻为

$$R_V = \frac{U}{I}$$

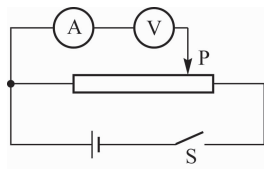


图 1-40 测内电阻原理图

### 3. 接地电阻的测量

接地电阻是指接地装置对地电压和流入地中电流的比值。接地电阻包括接地线电阻、接地体电阻、接地体与土壤间的接触电阻,以及土壤中的散流电阻。由于其中接地线电阻、接地体电阻、接触电阻相对较小,故通常近似以散流电阻为接地电阻。变压器和发电机的工作接地电阻值一般不得大于  $4\ \Omega$ ;保护线 PE 每处重复接地电阻值不得大于  $10\ \Omega$ ;防雷装置的冲击接地电阻值不得大于  $30\ \Omega$ 。

接地电阻一般使用手摇式地阻表和钳形地阻表测量。

手摇式地阻表是一种较为传统的测量仪表,它的基本原理是采用三点式电压落差法,其测量方法是在被测地线接地极(暂称为 X)一侧地上打入两根辅助测试极,要求这两根测试极位于被测地极的同一侧,三者基本在一条直线上,距被测地极较近的一根辅助测试极(称为 Y)距离被测地极  $20\ \text{m}$  左右,距被测地极较远的一根辅助测试极(称为 Z)距离被测地极  $40\ \text{m}$  左右。测试时,按要求的转速转动摇柄,地阻表通过内部磁电机产生电能,在被测地极 X 和辅助测试极 Z 之间“灌入”电流,此时在被测地极 X 和辅助测试极 Y 之间可获得一电压,仪表通过测量该电流和电压值,即可计算出被测接地极的地阻。

钳形地阻表是一种新颖的测量工具,它方便、快捷,外形酷似钳形电流表,测试时无须辅助测试极,只需往被测地线上一夹,几秒钟即可获得测量结果,极大地方便了接地电阻的测量工作。钳形地阻表还有一个很大的优点,即可以对在用设备的地阻进行在线测量,而无须切断设备电源或断开地线。

虽然钳形地阻表测试时使用一定频率的信号以排除干扰,但在被测线缆上有很大电流存在的情况下,测量也会受到干扰,导致结果不准确。所以,按照要求,在使用时应先测线缆上的电流,只有在电流不是非常大时才可进一步测量地阻。有些仪表在测量地阻时自动进行噪声干扰检测,当干扰太大以致测量不能进行时会给出提示。

### 4. 绝缘电阻的测量

现代生活日新月异,人们一刻也离不开电。在用电过程中就存在着用电安全问题,电气设备(如电机、电缆、家用电器等)的正常运行的前提包括绝缘材料的绝缘程度,即绝缘电阻的数值。当受热和受潮时,绝缘材料老化,其绝缘电阻便降低,从而造成电气设备漏电或短路事故的发生。为了避免事故发生,要求经常测量各种电气设备的绝缘电阻,判断其绝缘程度是否满足设备需要。

绝缘电阻是通常情况下所说的绝缘材料在没有被击穿时的电阻值,如电机的带电部分与不带电的机壳之间的电阻,互相没有电的联系的两个导体之间的电阻,如变压器的原绕组

和副线组之间没有接通负载时的电阻,两条输电线之间的电阻,家用电器带电部分与外露非带电金属部分之间的电阻等。

绝缘体有阻止电流通过的特性,但若加上高电压时会有少许的漏电流流过绝缘体的内部或表面。绝缘电阻衡量阻止漏电流通过的能力,阻值越大越好,通常以兆欧(MΩ)计量。测量绝缘电阻一般使用兆欧表。

兆欧表俗称摇表,是测量绝缘电阻的专用仪表,主要由磁电式流比计与手摇直流发电机组成。

兆欧表的接线端钮有3个(见图1-41),分别标有“G(屏)”“L(线)”“E(地)”。被测电阻接在L和E之间,G端的作用是消除表壳表面L、E两端间的漏电和被测绝缘物表面漏电的影响。在进行一般测量时,把被测绝缘物接在L、E之间即可。但测量表面不干净或潮湿的对象时,为了准确测出绝缘材料内部的绝缘电阻,就必须使用G端。图1-42所示为测量电缆绝缘电阻的接线图。

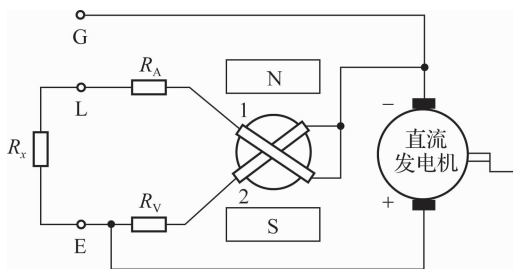


图 1-41 兆欧表测电阻

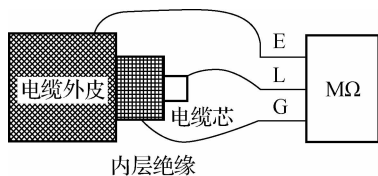


图 1-42 测量电缆绝缘电阻的接线图

## 任务六 电阻的串、并联及等效变换

### 一、电阻的串联及分压

把若干个电阻一个接一个成串地连接起来,使电流只有一条通路,称为电阻的串联电路,如图1-43(a)所示。串联电路的特点是:电路中的电流处处相等。

设各电阻上的电压、电流参考方向如图1-43(a)所示,根据电阻串联电压关系,有

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



微课  
电阻串联电路  
的安装与测量

根据欧姆定律,每个电阻上的电压分别为

$$U_1 = R_1 I, U_2 = R_2 I, \dots, U_n = R_n I$$

代入上式,得

$$U = (R_1 + R_2 + \dots + R_n) I = R_{\text{eq}} I \quad (1-10)$$

其中

$$R_{\text{eq}} = R_1 + R_2 + \dots + R_n = \sum_{k=1}^n R_k \quad (1-11)$$

即若干电阻串联,其等效电阻  $R_{\text{eq}}$  为各串联电阻之和,如图 1-43(b)所示。等效电阻就是将电阻  $R_{\text{eq}}$  接在端口 1—1' 处时,其端口电压  $U$  与电流  $I$  的关系等同于  $R_1, R_2, \dots, R_n$  串联接在端口 1—1' 的电压  $U$  与电流  $I$  的关系。

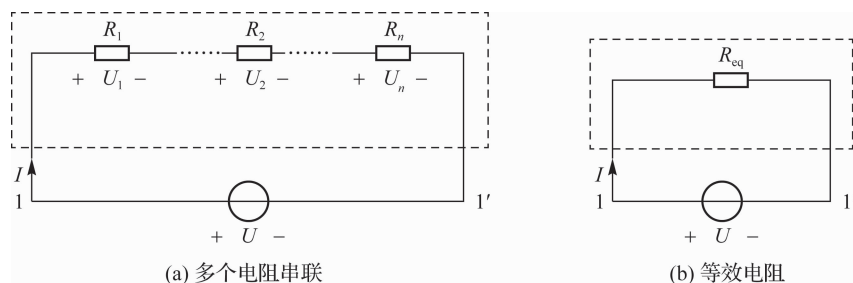


图 1-43 电阻的串联

串联电路各电阻上的电压为  $U_1 = I_1 R_1, U_2 = I_2 R_2, \dots, U_n = I_n R_n$ , 而串联电路中各电阻的电流相等,即  $I_1 = I_2 = \dots = I_n = I$ , 故串联电路各电阻上的电压与电阻值成正比分配,即

$$U_1 : U_2 : \dots : U_n = R_1 : R_2 : \dots : R_n \quad (1-12)$$

串联电路各电阻上的功率为  $P_1 = I_1^2 R_1, P_2 = I_2^2 R_2, \dots, P_n = I_n^2 R_n$ , 而串联电路中各电阻的电流相等,即  $I_1 = I_2 = \dots = I_n = I$ , 故串联电路各电阻上消耗的功率均与电阻值成正比分配,即

$$P_1 : P_2 : \dots : P_n = R_1 : R_2 : \dots : R_n \quad (1-13)$$

而等效电阻  $R_{\text{eq}} = R_1 + R_2 + \dots + R_n = \sum_{k=1}^n R_k$ , 所以

$$\begin{aligned} P_{\text{eq}} &= I^2 R_{\text{eq}} = I^2 (R_1 + R_2 + \dots + R_n) \\ &= I^2 R_1 + I^2 R_2 + \dots + I^2 R_n = P_1 + P_2 + \dots + P_n \end{aligned} \quad (1-14)$$

因此,等效电阻  $R_{\text{eq}}$  所消耗的功率等于各串联电阻消耗功率之和。

**【例 1-15】** 图 1-44 表示一个电阻分压器,设输入电压  $U_1 = 50 \text{ V}$ , 电阻  $R_2 = 1.2 \text{ k}\Omega$ , 求输出电压  $U_2$  为  $12 \text{ V}$  时的  $R_1$ 。

**解** 由式(1-12)给出的电阻的分压关系可得

$$\frac{R_2}{R_1 + R_2} = \frac{U_2}{U_1}$$

代入已知量,有方程式

$$\frac{1.2}{R_1 + 1.2} = \frac{12}{50}$$



微课  
电阻串联电路  
分析及应用

解得  $R_1 = 3.8 \text{ k}\Omega$ 。

若图 1-44 中电阻( $R_1 + R_2$ )用带滑动触头的电阻  $R$ (电位器)代替(见图 1-45),只要改变滑动触头的位置,就可以使电压  $U_2$  的数值在  $0 \sim U_1$  连续改变。在实际应用电路中,为了减少电源的数量,可以利用以上串联电阻的分压原理,很方便地得到各种所需要的电压等级。在指针式万用表中通过串联不同的分压电阻,可以使同一个表头测量不同的电压。

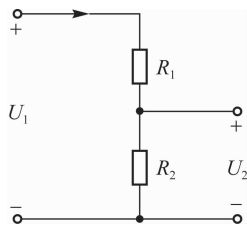


图 1-44 电阻分压器

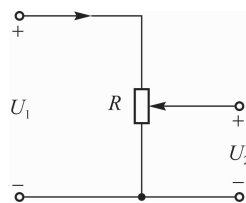


图 1-45 电位器

**【例 1-16】** 电路如图 1-46 所示,欲将量程  $U_V$  为 5 V、内阻  $R_V$  为  $10 \text{ k}\Omega$  的电压表改装成 5 V、25 V、100 V 多量程的电压表,求所需串联电阻的阻值。

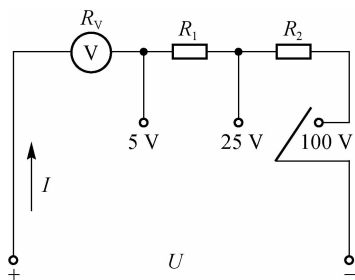


图 1-46 多量程电压表

**解** 设 25 V 量程需串联电阻  $R_1$ , 100 V 量程需再串联电阻  $R_2$ 。  
表头允许通过的电流为

$$I = \frac{U_V}{R_V} = \frac{5}{10 \times 10^3} \text{ A} = 0.5 \text{ mA}$$

对 25 V 量程来说,需串联电阻  $R_1$  的阻值应为

$$R_1 = \frac{U_{R_1}}{I} = \frac{25 - 5}{0.5 \times 10^{-3}} \Omega = 40 \text{ k}\Omega$$

同理,100 V 量程还需串联一个电阻  $R_2$ , 其阻值为

$$R_2 = \frac{U_{R_2}}{I} = \frac{100 - 25}{0.5 \times 10^{-3}} \Omega = 150 \text{ k}\Omega$$

## 二、电阻的并联及分流

若干电阻的两端分别接在电路的两个节点上,称为电阻的并联,如图 1-47(a)所示。各并联电阻上有相同的电压。



微课

电阻并联电路  
的安装与测量

设电压、电流的参考方向如图 1-47(a)所示,根据欧姆定律,并联各电阻中的电流分别为

$$I_1 = \frac{U}{R_1}, I_2 = \frac{U}{R_2}, \dots, I_n = \frac{U}{R_n}$$

应用并联电路电流关系,有

$$I = I_1 + I_2 + \dots + I_n = \frac{U}{R_1} + \frac{U}{R_2} + \dots + \frac{U}{R_n} = \frac{U}{R_{\text{eq}}} \quad (1-15)$$

$$\frac{1}{R_{\text{eq}}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \dots + \frac{1}{R_n} = \sum_{k=1}^n \frac{1}{R_k} \quad (1-16)$$

即等效电阻的倒数等于各并联电阻的倒数之和,如图 1-47(b)所示。若用电导表示,有

$$G_{\text{eq}} = \frac{1}{R_{\text{eq}}} = \sum_{k=1}^n \frac{1}{R_k} = G_1 + G_2 + \dots + G_n = \sum_{k=1}^n G_k \quad (1-17)$$

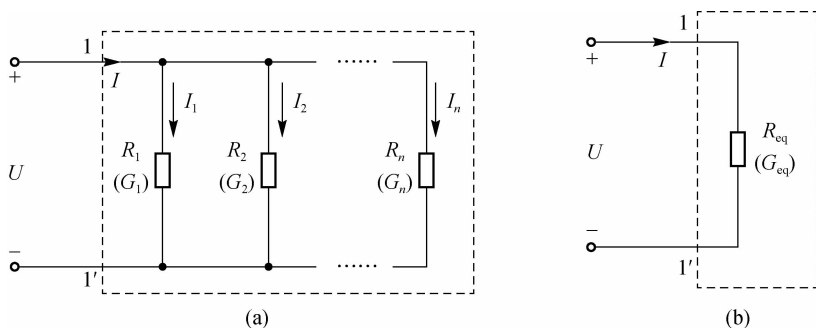


图 1-47 电阻的并联

各个并联电阻中的电流为

$$I_k = G_k U = \frac{G_k}{G_{\text{eq}}} I \quad (k=1, 2, \dots, n) \quad (1-18)$$

写成比例关系为

$$I_1 : I_2 : \dots : I_n = G_1 : G_2 : \dots : G_n \quad (1-19)$$

即各个并联电阻中的电流与各自的电导成正比,这是并联电阻的分流关系。

各个并联电阻消耗的功率也与各自的电导成正比,即

$$P_1 : P_2 : \dots : P_n = G_1 : G_2 : \dots : G_n$$

其总功率为

$$P = P_1 + P_2 + \dots + P_n = \sum_{k=1}^n P_k$$

如图 1-48(a)所示,当  $n=2$ ,即只有两个电阻并联时,其等效电阻如图 1-48(b)所示,为

$$R_{\text{eq}} = \frac{1}{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}} = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} \quad (1-20)$$

两个并联电阻中的电流分别为

$$I_1 = \frac{G_1}{G_{\text{eq}}} I = \frac{R_2}{R_1 + R_2} I, I_2 = \frac{G_2}{G_{\text{eq}}} I = \frac{R_1}{R_1 + R_2} I$$