

# 直流电路

电路是电工技术的主要研究对象,是电工技术和电子技术的基础。直流电路是交流电路、电子电路的基础。本章主要介绍电路的基本知识、基本定理、基本定律以及应用这些定理定律分析和计算直流电路的方法。这些方法不仅适用于直流电路的分析计算,原则上也适用于其他电路的分析计算。因此,本章是学习电工电子技术非常重要的基础。

## 1.1 电路的认识

### 问题的提出

若使一个小灯泡点亮,需要用哪些电器元件?如图 1-1 所示电路,各电器元件的作用是什么?举出生活中常用的电路实例,归纳出电路的组成。如何测量图中小灯泡上的电压和流过的电流?电压和电流有着怎样的关系?

### 任务目标

- (1) 理解电路的组成和各部分的作用,重点是电源的应用;
- (2) 理解电路分析中的重要物理量(电流、电压、电动势)及参考方向,掌握电功率的计算;
- (3) 会应用欧姆定律分析计算通路、断路、短路三种电路状态;
- (4) 会用万用表测量电路的电压、电流及元件的阻值。

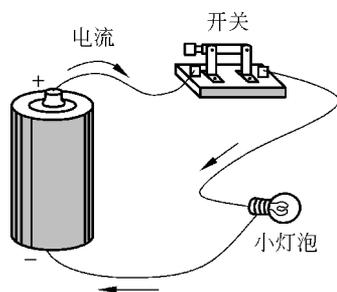


图 1-1 电路实物连接示意图

### 1.1.1 电路及其组成

电路是电流通过的路径,是各种电气设备或元件按一定方式连接起来的统称。如图 1-1 所示为一个简单的实际电路,由干电池(电源)、小灯泡(负载)、开关及导线组成。

在一定条件下,为突出电路的主要电磁性能,忽略次要因素,往往将实际电路元件理想化(模型化)。例如,用电阻  $R$  这个理想电路元件代替灯泡、电阻器、电阻炉等消耗电能的实际元件;用内阻  $R_i$  和理想电压源  $U_s$  相串联的理想元件组合来代替实际的直流电源

等。所谓电路图,就是用理想电路元件及其组合来代替实际电路元件而构成的图形,简称电路,是由电源、负载和中间环节三大部分构成。图 1-2 所示为图 1-1 实物连接图所对应的电路图。

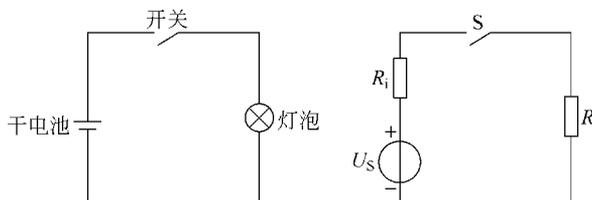


图 1-2 电路模型示意图

(1) 电源: 提供电能(或信号)的装置,将非电能转换成电能。例如蓄电池、发电机和信号源等。

(2) 负载: 吸收或转换电能的部分,将电能转换成非电能。例如电动机、照明灯和电炉等。

(3) 中间环节: 用来连接电源和负载,起传递和控制作用,包括连接导线和控制开关。最简单的中间环节可以是两根连接导线,而复杂的中间环节可以是一个庞大的控制系统。

从电源看,电源本身的电流通路称为内电路,电源以外的电流通路称为外电路。当电路中的电流是不随时间变化的直流电流时,称电路为直流电路;当电路中的电流是随时间变化的交流电流时,称电路为交流电路。直流电路的物理量用大写的字母表示,电压、电流、电动势分别表示为  $U$ 、 $I$ 、 $U_s$ (或  $E$ )。交流电路的物理量用小写的字母表示,电压、电流、电动势分别表示为  $u$ 、 $i$ 、 $e$ 。

电路的结构形式有原理图、接线图、制版图等多种。其功能也各不相同,如电器照明电路、电力电路、通信电路、计算机电路等。

**想一想:** 你能说出构成电路的三个部分吗? 每个部分的作用是什么? 你能画出手电筒的电路图吗?

## 1.1.2 电路的基本物理量

### 1. 电流及其参考方向

电荷的定向运动形成电流。电流的大小用电流强度来描述,即单位时间( $t$ )内通过导体横截面的电荷[量]( $q$ ),简称为电流。定义式为

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

直流电流也称为恒定电流,用  $I$  表示。在国际单位制(SI)中,电流的单位为安[培](A), $1 \text{ 安} = 1 \text{ 库/秒}$ ( $1 \text{ A} = 1 \text{ C/s}$ )。

(1) 电流的实际方向: 正电荷运动的方向。

(2) 电流的参考方向: 电路分析计算时,人为规定的电流方向。可用带箭头的直线表示,如图 1-3 所示;也可用双下标表示,如  $i_{ab}$  表示电流的参考方向由 a 指向 b。

(3) 实际方向与参考方向的关系: 根据参考方向分析计算电流时, 若所得结果为正 ( $I > 0$ ), 说明电流的实际方向与参考方向相同; 若所得结果为负 ( $I < 0$ ), 说明电流的实际方向与参考方向相反。

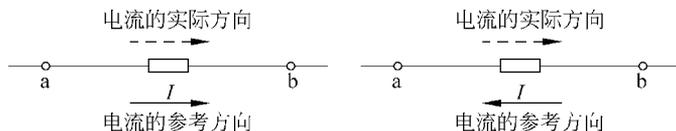


图 1-3 电流的参考方向与实际方向的关系

**注意:** 在分析电路过程中, 一旦选定参考方向, 就不能再更改。

## 2. 电压

电路中, 电场使电荷移动产生电流的同时, 也将电能转化为其他形式的能量。电场对电荷的做功能力, 用电压来衡量。电路中任意两点 a、b 间的电压, 为电场中单位电荷从 a 点移动到 b 点电场力所做的功。定义式为

$$u = \frac{dw}{dq} \quad (1-2)$$

直流电压用  $U$  表示。在国际单位制(SI)中, 电压的单位为伏[特](V),  $1 \text{ 伏} = 1 \text{ 焦/库}$  ( $1\text{V} = 1\text{J/C}$ )。

(1) 电压的实际方向: 正电荷在电场中受电场力作用(电场力做正功时)移动的方向。

(2) 电压的参考方向: 与电流参考方向类似, 即人为指定某一段电路或某一元件上电压的参考方向。可用+、-极性(也称参考极性)表示, 如图 1-4 所示; 也可用双下标表示, 如  $U_{ab}$  表示电压的参考方向由 a 指向 b。

(3) 实际方向与参考方向的关系: 与电流的参考方向选择相似, 若根据参考方向分析计算电压的结果为正 ( $U > 0$ ), 说明电压的实际方向与参考方向相同; 若所得结果为负 ( $U < 0$ ), 说明电压的实际方向与参考方向相反。

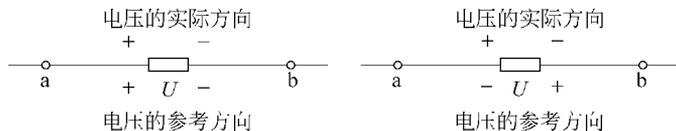


图 1-4 电压的标记方向

**关联参考方向:** 一段电路或一个元件上电压参考方向的选择是任意的, 与电流的参考方向选择无关。为了分析计算方便, 在外电路中, 常将电流和电压的参考方向选择为一致, 这种方式的参考方向称为关联参考方向, 如图 1-5 所示。

## 3. 电位

在电路中任选一点为参考点, 称为零电位点, 则电路中某点到参考点的电压即为该点(相对于参考点)的电位。电路中参考点用符号“ $\perp$ ”表示, 如图 1-6 所示。

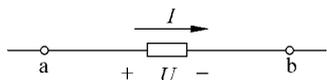


图 1-5 电压电流关联参考方向

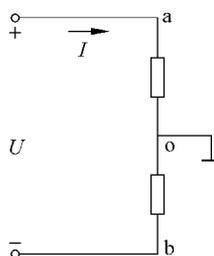


图 1-6 电位示意图

电位用符号  $V$  表示,其单位与电压相同,即为伏[特](V)。

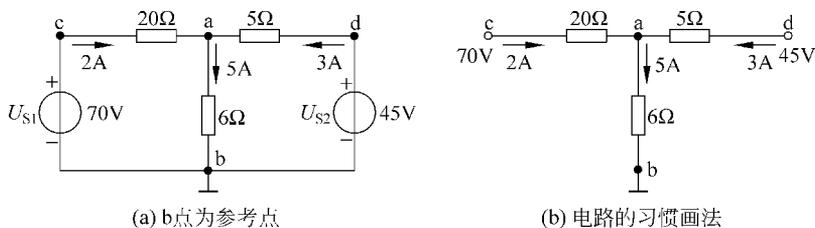
例如,选择  $o$  点为参考点时,则  $a$  点的电位  $V_a = U_{ao}$ ,  $b$  点的电位  $V_b = U_{bo}$ ,  $a$ 、 $b$  两点的电压为

$$U_{ab} = U_{ao} + U_{ob} = U_{ao} - U_{bo} = V_a - V_b = -U_{ba}$$

上式说明,两点间的电压等于该两点电位之差,电压的实际方向是由高电位点指向低电位点。因此,常称电压为电压降。

电子线路中的参考点一般选择元件汇集处(通常是电源的一个极);工程技术中则选择大地或机壳等。

电路有一种习惯画法,即电源不再用符号表示,而是改为标其电位的极性和数值。如图 1-7(a)所示,如果选定  $b$  点为参考点,则图 1-7(a)可改为图 1-7(b)的画法。



(a) b点为参考点

(b) 电路的习惯画法

图 1-7 电路转换

**注意：**一个电路中只能选择一个参考点,电路中各点的电位值与参考点的选择有关,而电压的大小与电位参考点的选择无关。

#### 4. 电动势

在外电路中,电流的方向(正电荷移动的方向)是从高电位流向低电位。为了维持电路中的电流,必须有一种外力源源不断地把正电荷从低电位移到高电位。提供这种外力的装置是电源,反映这种外力大小的参数即为电源的电动势。其定义为:电源内部,外力将单位正电荷由负极移到正极所做的功,用  $U_s$  或  $E$  表示,如图 1-8 所示。

电动势的单位与电压相同,即为伏[特](V)。

**注意：**

(1) 电源电动势的实际方向是从低电位(负极)指向高电位(正极),与电源电压的实际方向相反。

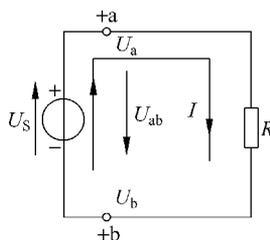


图 1-8 电源电动势

(2) 在电源内部,电流从低电位流向高电位,与电源外部的电流流向相反。

## 5. 电功率

单位时间( $t$ )内,电路或元件上吸收(或释放)的能量叫做电功率,简称功率,用  $p$  表示。即

$$p = \frac{dW}{dt} \quad (1-3)$$

也可表示为

$$p = ui \quad (1-4)$$

在直流电路中,表示为

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

在国际单位制(SI)中,电功率的单位为瓦[特](W),1瓦=1焦/秒(1W=1J/s)。其常用的单位还有千瓦(kW)、毫瓦(mW)、微瓦( $\mu$ W)。它们之间的换算关系为

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

电能的基本单位是焦耳(J),常用千瓦·小时(kW·h)来表示。1千瓦·小时俗称1度电(“度”为非法定单位)。

若元件上的电压、电流实际方向一致,则该元件吸收功率,是负载;若元件上的电压电流实际方向相反,则该元件产生功率,是电源。或者,我们取  $U$ 、 $I$  为关联参考方向,若  $P=UI>0$ ,则元件吸收功率;若  $P=UI<0$ ,则元件发出功率。

**想一想:** 计算电路的电压或电流时,若事先没有标出参考方向,所得结果的正、负有无意义?

## 1.1.3 电阻元件及其伏安特性

### 1. 电阻元件

导体对电流呈现的阻碍作用称为电阻,用符号  $R$  表示。

在国际单位制(SI)中,电阻的单位为欧[姆]( $\Omega$ ),1欧=1伏/安(1 $\Omega$ =1V/A)。其常用的单位还有千欧(k $\Omega$ )、兆欧(M $\Omega$ )。它们之间的换算关系为

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

电阻元件有线性电阻和非线性电阻之分,线性电阻的阻值  $R$  是一个常数。

### 2. 欧姆定律

在线性电阻中,不管通过它的电流是按何种规律变化,在任一瞬间其两端的电压与通过它的电流的关系总是满足欧姆定律。即

$$u = iR \quad \text{或} \quad i = \frac{u}{R} \quad (1-6)$$

直流电路中,如图 1-9(a)所示,若取关联方向,欧姆定律则可表示为

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

若取非关联方向(电阻元件上的电压与电流的参考方向相反),式(1-7)中等号右边应加负号“ $-$ ”。

若令  $G = \frac{1}{R}$ ,则  $G$  称为电阻元件的电导,电导的单位为西[门子](S)。

对于含有电源的电路(全电路),如图 1-9(b)所示,欧姆定律可表示为

$$I = \frac{U_s}{R_i + R} \quad (1-8)$$

上述全电路欧姆定律表达式说明,在全电路中,电流与电源的电动势成正比,与电路的其他所有电阻成反比。

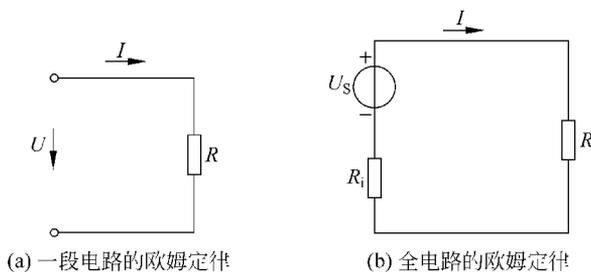


图 1-9 欧姆定律

### 3. 电阻元件的伏安特性

电阻的伏安特性表示电压与电流的关系。

线性电阻元件的伏安特性是一条过原点的直线,如图 1-10(a)所示。

非线性电阻元件的电压与电流不符合欧姆定律的关系,因此其伏安特性不是一条直线,如图 1-10(b)所示。

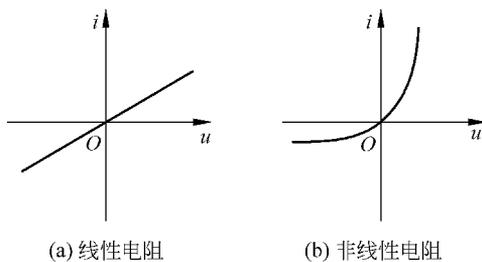


图 1-10 电阻元件的伏安特性曲线

### 4. 电阻元件的功率

直流电路中,电阻元件在时间  $t$  内消耗的电能

$$W = UQ = UI t = I^2 R t = \frac{U^2 t}{R} \quad (1-9)$$

电阻元件消耗的电功率为

$$P = \frac{W}{t} = UI = I^2 R = \frac{U^2}{R} \quad (1-10)$$

由式(1-10)可知,无论取关联参考方向还是非关联参考方向,电功率始终为正( $P \geq 0$ ),因此电阻元件为消耗元件。电阻元件消耗了能量并将其转换成热能、光能等其他形式的能量。受元件的绝缘、耐热、散热等条件的限制,实际的电路元件组成的电气设备,其电压、电流及功率等都有一个额定值(正常工作规定的数值),分别用  $U_N$ 、 $I_N$  及  $P_N$  符号表

示。如一盏电灯的  $U_N = 220\text{V}$ ,  $P_N = 100\text{W}$ , 即是其额定值。

**【例 1.1】** 额定值为  $220\text{V}$ 、 $100\text{W}$  的电灯, 试求其电流和灯丝电阻。若每天用 4 小时, 每月(30 天)用电多少?

解:

$$R = \frac{U^2}{P} = \frac{220^2}{100} = 484(\Omega)$$

$$W = Pt = 0.1 \times (4 \times 30) = 12(\text{kW} \cdot \text{h})$$

**【例 1.2】** 标称值为  $5000\Omega$ 、 $0.5\text{W}$  的电阻, 额定电流为多少? 在使用时电压不得超过多少?

解:

$$I_N = \sqrt{\frac{P}{R}} = \sqrt{\frac{0.5}{5000}} = 0.01(\text{A})$$

使用时电压不得超过

$$U_N = I_N R = 0.01 \times 5000 = 50(\text{V})$$

**注意:** 如果外加电压高于设备的额定电压, 会造成设备烧毁或人身事故, 而电压低于设备的额定电压, 设备就不能正常工作, 也会造成设备损坏。

**想一想:** 额定值分别为  $110\text{V}$ 、 $60\text{W}$  和  $110\text{V}$ 、 $40\text{W}$  的两个灯泡, 能否将它们串联起来接在  $220\text{V}$  的电源上? 为什么?

### 1.1.4 电压源和电流源

电源有两种形式: 一种是以输出电压为主要作用的电压源; 另一种是以输出电流为主要作用的电流源。

#### 1. 电压源

电路中的实际电源, 如电池、直流稳压电源、发电机等, 在分析和计算时, 常将其等效为图 1-11(a) 所示点划线框中的两个理想元件的串联。此模型中, 一个是内阻  $R_i$ , 另一个是数值上等于 a、b 端的开路电压  $U_s$ 。  $U_s$  称为理想电压源(恒压源), 其值为常数, 简称电压源。

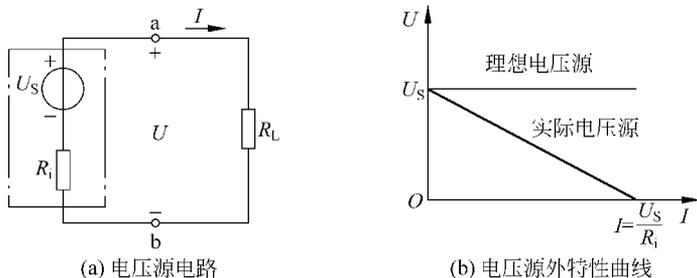


图 1-11 电压源

电压源对外电路输出的电压与电流的关系(伏安特性或实际电压的外特性关系)式为

$$U = U_s - IR_i \quad (1-11)$$

当负载开路时,  $I=0, U=U_S$ ; 当负载短路时,  $U=0, I=\frac{U_S}{R_i}$ 。图 1-11(b) 所示为电压源的外特性曲线。

若内阻  $R_i$  远小于负载电阻  $R_L$  时, 可以将电压源视为理想电压源。

## 2. 电流源

实际电源除了可用两个理想元件的串联来等效外, 还可以用两个理想元件的并联来表示, 如图 1-12(a) 点划线框中所示。此模型中, 一个是内阻  $R_i$ , 另一个是数值上等于 a、b 端的短路电流  $I_S$ 。  $I_S$  称为理想电流源(恒流源), 其值为常数, 简称电流源。

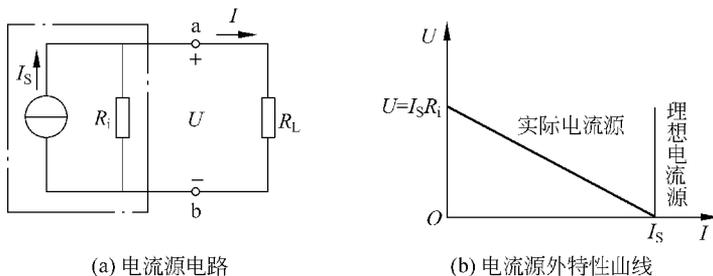


图 1-12 电流源

电流源的伏安特性(外特性)关系式为

$$I = I_S - \frac{U}{R_i} \quad (1-12)$$

或

$$U = I_S R_i - I R_i \quad (1-13)$$

当负载短路时,  $I=I_S, U=0$ ; 当负载开路时,  $I=0, U=U_S=I_S R_i$ 。图 1-12(b) 所示为电流源的外特性曲线。

在实际使用的电源中, 电流源并不多见。光电池和晶体管这类器件工作时的特性类似于电流源。

## 3. 电压源和电流源的等效变换

从电压源的外特性和电流源的外特性可知, 两者是相同的, 因此, 两者之间可以等效变换。这里所说的等效变换是指外部等效, 就是变换前后, 端口处的伏安关系不变。即 a、b 端口间的电压均为  $U$ , 端口处流出(或流进)的电流  $I$  相同, 如图 1-13 所示。

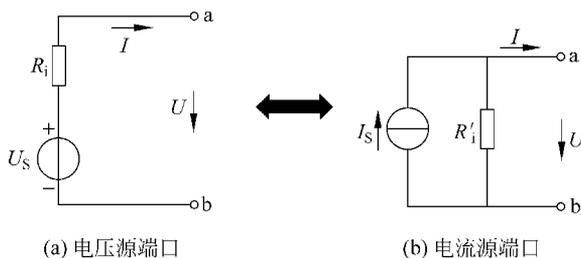


图 1-13 两种电源的等效变换

电压源输出的电流为

$$I = \frac{U_s - U}{R_i} = \frac{U_s}{R_i} - \frac{U}{R_i} \quad (1-14)$$

电流源输出的电流为

$$I = I_s - \frac{U}{R_i} \quad (1-15)$$

根据等效的要求,式(1-14)与式(1-15)中对应项应相等,即

$$I_s = \frac{U_s}{R_i} \quad (1-16)$$

$$R'_i = R_i \quad (1-17)$$

式(1-16)与式(1-17)即为两种电路模型的等效变换条件。

**注意:**变换中如果 a 点是电压源的参考正极性,变换后电流源的电流参考方向应指向 a。

**【例 1.3】** 在图 1-14(a)所示的电路中,已知  $U_{S1} = 12\text{V}$ ,  $U_{S2} = 6\text{V}$ ,  $R_1 = 6\Omega$ ,  $R_2 = 3\Omega$ ,  $R_3 = 1\Omega$ ,求  $I = ?$

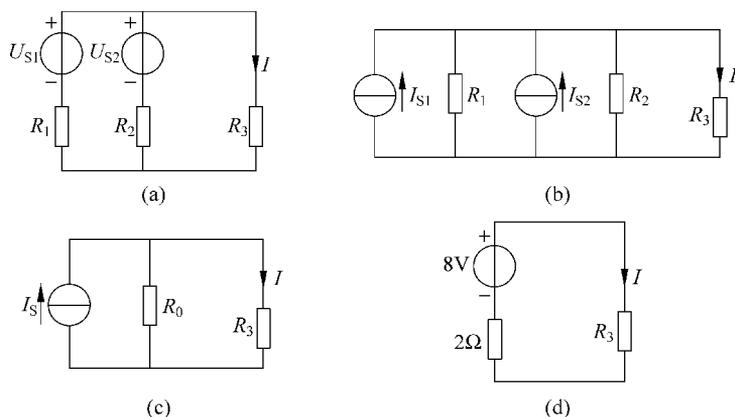


图 1-14 例 1.3 的电路

**解:**先将两个并联的电压源转换为电流源,如图 1-14(b)所示,其中

$$I_{S1} = \frac{U_{S1}}{R_1} = 2(\text{A})$$

$$I_{S2} = \frac{U_{S2}}{R_2} = 2(\text{A})$$

然后,将两个恒流源合并为一个如图 1-14(c)所示的恒流源。其中

$$I_S = 2 + 2 = 4(\text{A})$$

$$R_0 = R_1 // R_2 = 2(\Omega)$$

可以从 1-14(c)图中利用分流关系求得  $I$ ,也可以将电流源转换为电压源[见图 1-14(d)]进行计算。

$$I = \frac{I_S R_0}{R_0 + R_3} = \frac{8}{1 + 2} = \frac{8}{3}(\text{A})$$

**注意:**与恒压源并联的元件对外电路不起作用,与恒流源串联的元件对外电路不起作用,在计算外电路时可将它们去掉(但计算电源内部的各物理量时不能去掉)。

**想一想:**恒压源和恒流源能否进行变换?为什么?

**练一练:**图 1-15(a)所示有源线性二端网络的等效电压源电路如图 1-15(b)所示。已知图 1-15(b)中的  $R_0 = 3$ ,那么图中的  $R$  值是多少?

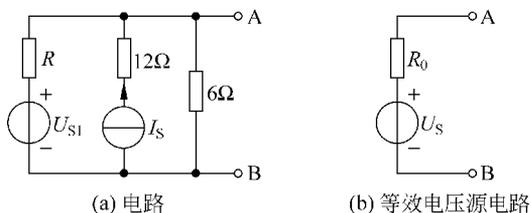


图 1-15 练一练电路图

### 1.1.5 动手做 万用表的使用

#### 预习要求

- (1) 通过阅读说明书,了解万用表(或电压表、电流表)的使用方法及注意事项;
- (2) 回顾电阻的伏安特性;
- (3) 了解一些半导体二极管的相关知识。

#### 1. 实训目的

- (1) 能正确使用万用表进行交流电压的测量、直流电压及电流的测量、电器元件阻值的测量;
- (2) 学会绘制实训曲线。

#### 2. 实训仪器与器件

- (1) 连续可调电源,1台;
- (2) 380V 和 220V 交流输出电源 U、V、W、N;
- (3) 万用表(MP-500型),2台(或直流毫安表和直流电压表各1台);
- (4) 电阻插件,若干块(建议含  $1\text{k}\Omega/2\text{W}$ 、 $1\text{k}\Omega/0.5\text{W}$ );
- (5) 白炽灯,1只(建议选用  $12\text{V}/3\text{W}$ );
- (6) 半导体二极管,1只(建议选用 1N4007)。

#### 3. 实训仪器设备使用方法

##### 1) 交流电压的测量

将红、黑试笔分别插入标有“+”、“-”号插孔中,将旋钮旋至“ $\surd$ ”的四挡范围内,如果不能确定被测电压的大小数值时,应先将旋钮旋至最大量程上,根据指示的大约数值,再选择合适的“ $\surd$ ”位置使指针摆到最大的偏转度。例如,被测电压为 220V,在没有确定数值之前可以将旋钮旋至 500V 位置,知道它的大概数值后即可将挡位旋至 250V 挡即能测出准确的电压值。因为仪表的误差是按满刻值的百分数计算的,因此,指针越接近满度,误差越小。测量 10V 以下交流电压时,用第三条“10”专用刻度数,10V 以上交流电压用第二条刻度数。

##### 2) 直流电压的测量

测量方法与交流电压相似,只需将范围开关旋至“ $\surd$ ”,红表笔接高位端,黑表笔接低位端,按第二条刻度数读取即可。