

# 第1章

## 电路的基本概念和基本定律

### 学习目标

1. 熟练掌握电路和电路模型的组成及作用，能够把实际电路抽象成电路图；
2. 熟练掌握电路的基本物理量；
3. 理解电路中电压、电流、电功率的物理意义，并会计算电压、电流、电功率；
4. 理解电阻的定义和性质、电导的意义，掌握欧姆定律的意义、公式和应用；
5. 理解理想电源、实际电源的定义和伏安特性，了解受控源的相关知识；
6. 理解电路中的几个常用名词，熟练掌握基尔霍夫定律并能够灵活应用定律对电路进行分析和计算；
7. 理解电路的工作状态。

### 案例分析

电路涉及日常生产和生活的方方面面，无论是简单的手电筒电路、单个照明电路，还是复杂的计算机电路、电动机电路，都是依据基本的电路定律进行工作的。那么，电路的分析就必须要以电路的基本概念和基本定律为基础。到底如何识别电路的各个组成，并理解各个元器件的工作原理呢？下面，我们来学习电路的基本概念和基本定律。

## 1.1 电路和电路模型



### 1.1.1 电路

电路是电流的通路，是为了实现某种功能，由用电设备或电路元件按一定方式组合而成的，如手机电路、电视机电路、手电筒电路等。电路的结构形式非常多，但从作用上来看主要有两种：一种用于实现电能的传输与转换；另一种用于实现信号的传递与处理。

从组成上来看，按照各电路元件在电路中所起的作用不同，电路可分为电源、负载和传输控制器件三部分。其中，电源为电路提供电能或者电信号，如发电机、干电池、话筒等；负载使用电能或者接收信号，如电动机、照明灯、扬声器等；连接电源和负载的部分则是传输控制器件，如开关、导线、控制器等。

电源或信号源的电压或电流称为**激励**，它推动电路工作；由激励在电路中所产生的电压和电流称为**响应**。电路分析就是在已知电路的结构与元器件参数的条件下，研究电路的激励与响应的关系。如图 1-1a 所示的手电筒电路，它是一个简单电路，由一个电源(干电池)、一个负载(白炽灯)、一个开关和若干导线(手电筒的金属外壳或者金属线)所组成。图 1-1b 则是其电路模型。

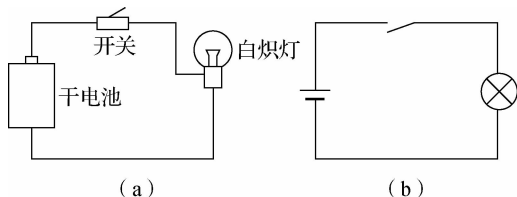


图 1-1 手电筒电路



### 1.1.2 电路模型

电路模型是实际电路的抽象形式，它是对实际电路进行分析和计算的依据。实际电路都是根据人们的需要将实际的电路元件或器件搭接起来，以完成人们的预想要求。在实际电路中，常常使用各种电路元件或器件，如发电机、变压器、电动机、电阻器及电容器等。实际元器件的种类繁多，但在电磁现象方面却有许多共同的地方。

为了便于用数学方法分析电路，一般要将实际电路模型化，用足以反映其电磁性质的理想电路元件或其组合来模拟实际电路中的器件，从而构成与实际电路相对应的电路模型。例如，电阻器、白炽灯、电炉等，它们的主要作用是消耗电能，这样就可以用一个理想电阻元件来反映消耗电能的特征；类似地，能够存储电场能量的元件称为**电容元件**，能够存储磁场能量的元件称为**电感元件**，能够输出电能的元件称为**电源元**

件。理想电路元件是一种理想化的模型，简称电路元件。常见的电路元件有电阻元件(R)、电容元件(C)、电感元件(L)和电源元件(理想电压源、理想电流源)等，如图 1-2 所示。

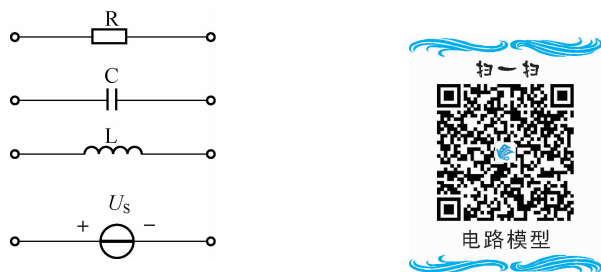


图 1-2 理想电路元件

有了理想电阻、电容、电感等元器件，就可由它们构成与实际电路相对应的电路模型，便于对实际电路进行分析。由理想的电路元件所组成的电路就是实际电路的电路模型，今后分析的都是指**电路模型**，简称**电路**。在电路图中，各种电路元件都用规定的图形符号表示。

表 1-1 列出了几种常用元器件的标准图形符号。

表 1-1 几种常用元器件的标准图形符号

电路元件名称	字母代号	电路符号	电磁性质
电阻元件	R		消耗电能
电感元件	L		储存磁场能量
电容元件	C		储存电场能量
普通电源元件	E		产生电能
恒压源	$U_s$		
恒流源	$I_s$		

## 1.2 电路的基本物理量

电路分析中常用到电流、电压、电位、电动势和电功率等物理量，本节对这些物理量以及与它们有关的概念进行简要说明。

### 1.2.1 电流

初中物理中已经讲过，带电粒子的定向移动形成**电流**。例如，导体中的离子、电解液以及已经电离了的气体中的离子、半导体中的电子和空穴，就属于带电粒子或称

为载流子(空穴也被视为载流子)。习惯上将正电荷定向移动的方向规定为**电流的实际方向**。

电流的大小通常用**电流**来衡量,它表征的是单位时间内通过导体横截面的电荷量。其中,大小和方向随时间变化的电流称为**交流**,用  $i$  来表示,有

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

式中  $dq$ ——在  $dt$  时间内通过导体横截面的电荷量。

方向不随时间变化的电流称为直流,其中大小和方向都不随时间变化的电流称为**恒定直流**(或者**稳恒直流**),用大写字母  $I$  表示,即

$$I = \frac{Q}{t} \quad (1-2)$$

式中  $Q$ ——电荷量,就是电荷的多少,单位是 C(库[仑]);

$t$ ——时间,单位是 s;

$I$ ——电流,单位是 A(安[培])。

根据电流的定义,可以得出,在 1 s 内通过导体横截面的电荷量是 1 C,则电流就是 1 A。电流的常用单位还有千安(kA)、毫安(mA)和微安( $\mu$ A)等。换算关系为

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

电路分析中,除了要计算电流的大小,还要确定电流的方向。习惯上规定正电荷的运动方向(或负电荷运动的相反方向)为电流的正方向,也即电流的实际方向。电流的正方向是客观存在的。在简单电路中,不难根据物理知识判断正电荷的运动方向,从而确定电流的实际方向。但是,在复杂电路中,有时无法预知电流的实际方向,而交流电路的电流方向又时刻发生变化,也无法指定其电流方向。为了方便分析和计算,引入电流的“参考方向”这一概念。具体做法如下。

(1)在分析电路时,先选定某一方向作为电流的正方向(称为参考方向)。

(2)按照选定的参考方向计算电流,若计算结果为正( $i > 0$ ),说明电流的参考方向与实际方向一致;若计算结果为负( $i < 0$ ),说明电流的参考方向与实际方向相反,如图 1-3 所示。

(3)没有设定参考方向,电流的正、负没有意义。

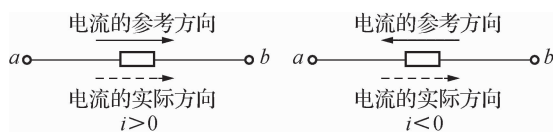


图 1-3 电流的参考方向与实际方向的关系



在电路中,元件电流的参考方向可用箭头表示,如图 1-4 所示,在文字叙述中也可用电流符号加注下标表示,如  $i_{ab}$ ,它表示电流由  $a$  流向  $b$ ,并有  $i_{ab} = -i_{ba}$ 。



图 1-4 电流的参考方向的表示

### 1.2.2 电压

电荷在导体中作定向运动时，一定会受到力的作用。若这个力源是电场，则电荷的运动就要消耗电场能量，或者说电场力对电荷做了功。为了衡量电场力对电荷做功的能力，引入一个新的物理量——电压。在电路中， $a$ 、 $b$  两点间的电压  $u_{ab}$  在数值上等于电场力把单位正电荷从  $a$  点移到  $b$  点所做的功，也就是单位正电荷在移动过程中所减少的电能，即

$$u_{ab} = \frac{dW}{dq} \quad (1-3)$$

式中  $dq$ —— $a$  点移动到  $b$  点的电荷量；

$dW$ ——移动过程中电场力所做的功(即电荷在这一过程中所减少的电能)。

对于稳恒电流， $a$ 、 $b$  两点间电压  $U_{ab}$  为

$$U_{ab} = \frac{W}{Q} \quad (1-4)$$

电压的单位是 V(伏[特])，即当电场力将 1 C 的正电荷从  $a$  点移动到  $b$  点过程中所做的功为 1 J 时， $a$ 、 $b$  两点间的电压为 1 V。常用的单位还有千伏(kV)、毫伏(mV)和微伏( $\mu$ V)等。换算关系为

$$1 \text{ kV} = 10^3 \text{ V}, 1 \text{ mV} = 10^{-3} \text{ V}, 1 \mu\text{V} = 10^{-6} \text{ V}$$

电压的实际方向习惯上规定为电场力移动正电荷做正功的方向，即正电荷在电场的作用下移动的方向为电压的正方向。和对待电流一样，在分析电路之前，可以任意选择某一方向为电压的参考方向。若计算结果为正( $u > 0$ )，说明电压的参考方向与实际方向一致；若计算结果为负( $u < 0$ )，说明电压的参考方向与实际方向相反，如图 1-5 所示。

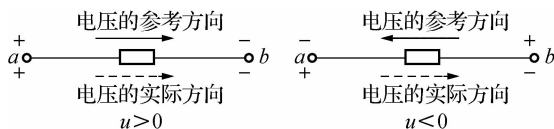


图 1-5 电压的参考方向与实际方向的关系



电压的参考方向可以用箭头、双下标(如  $u_{ab}$ )和正负符号(+、-)三种方式表示，如图 1-6 所示。与电流的情况相似，电压也有  $u_{ab} = -u_{ba}$ 。

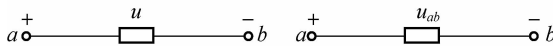


图 1-6 电压的参考方向的表示

在电路分析中，对一个元件既要假设通过它的电流的参考方向，又要假设该元件两端电压的参考极性，两个都可任意假定，而且独立无关。当电压和电流的参考方向一致时，称电压和电流为**关联参考方向**，如图 1-7a 所示；相反，当电压和电流的参考方向相反时，称电压和电流为**非关联参考方向**，如图 1-7b 所示。

chapter 01

chapter 02

chapter 03

chapter 04

chapter 05

chapter 06

chapter 07

chapter 08

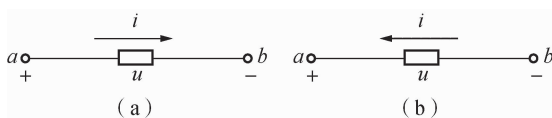


图 1-7 关联参考方向与非关联参考方向

🔊 小提示

在电路分析中，如没有特别说明，电压和电流一般为关联参考方向。

🍏 1.2.3 电位

在调试和检修电气设备时，经常要测量某个点的电位，看其是否符合要求。

某点的电位就是该点到参考点的电压，用字母  $V$  表示。其中，参考点是任意选定的，电路中各点的电位都是针对参考点而言的。通常规定参考点的电位为零，因此参考点又称为零电位点，用接地符号“ $\perp$ ”表示。在电工技术中，通常以与大地连接的点作为参考点；在电子线路中，通常以公共的接机壳点作为参考点。

根据电位的定义可知，某点  $a$  的电位  $V_a$  是该点到参考点(如点  $o$ )的电压，即

$$V_a = U_{ao} \quad (1-5)$$

电位的单位与电压的单位一致，也是伏(V)。

如图 1-8 所示，一电路中的  $o$  点为参考点，则有  $V_a = U_{ao}$ ， $V_b = U_{bo}$ 。

$$U_{ab} = U_{ao} + U_{ob} = U_{ao} - U_{bo} = V_a - V_b \quad (1-6)$$

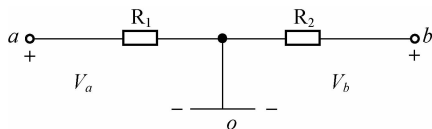


图 1-8 电位表示图

式(1-6)说明，电路中  $a$  点到  $b$  点的电压等于  $a$  点电位与  $b$  点电位之差，所以电压又叫电位差。当  $a$  点的电位高于  $b$  点电位时， $U_{ab} > 0$ ；反之，当  $a$  点电位低于  $b$  点电位时， $U_{ab} < 0$ 。一般地，电压的实际方向规定为由高电位点指向低电位点。

🔊 小提示

参考点是可以任意选定的，一经选定，电路中各点的电位也就确定了。参考点的选择不同，电路中各点的电位将随参考点的变化而变化，但任意两点间的电压是不变的。

🍏 1.2.4 电动势

如图 1-9 所示，正电荷在电场力的作用下不断从高电位点  $a$  向低电位点  $b$  移动， $a$

端的正电荷逐渐减少会使其电位逐渐降低,而***b***端则因为正电荷的增多而电位逐渐升高,由此导致两极之间的电位差逐渐减小,最后为0,电荷不再移动。为了维持导体中的电流能够连续不断地流过,且使得导体***a***、***b***两端的电压不致丧失,就要将***b***端的正电荷移至***a***端。但电场力的作用方向恰好与此相反,因此就必须有另一种力去克服电场力而使***b***端的正电荷移至***a***端。电源中必须具有这种力——**电源力**(非静电力)。

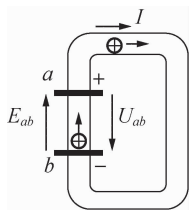


图 1-9 电压与电动势

在干电池中,电源力是靠电极与电解液间的化学反应而产生的;在发电机中,电源力由导体在磁场中做机械运动而产生。为了衡量电源把非电能转化为电能的能力,引入电动势的概念。在电源内部,电源力把单位正电荷从负极移动到正极所做的功即该电源的电动势,用字母***E***表示,即

$$E = \frac{W}{Q} \quad (1-7)$$

由定义可知,电动势的方向是由电源的负极指向正极,即从低电位端指向高电位端,电位升高的方向。对于同一电源,电动势的方向与电源电压的方向正好相反。电动势的大小只取决于电源本身的性质,而与外电路无关。电动势这一概念仅存在于电源元件,当电源元件开路时,电动势***E***与其端电压***U***在数值上是相等的,即 **$E=U$** ,方向相反。

电动势的单位与电压的单位一致,也是伏(V)。但电动势与电压不是同一概念,它们的区别如下。

(1)电动势与电压具有不同的物理意义。电动势用来衡量电源力在电源内部做功的本领,电压用来衡量电场力做功的本领。

(2)电动势与电压的方向不同。电动势的方向习惯上规定为电位升高的方向,即从电源的负极指向正极;电压的方向习惯上规定为电位降低的方向,即从高电位点到低电位点。

(3)电动势仅存在于电源内部,而电压不仅存在于电源内部,也存在于电源外部。电源的电动势在数值上等于电源两端的开路电压。



## 1.2.5 电功率和电能

### 1. 电功率

电路在工作过程中具有传输、储存和转换能量等功能,表现为对能量的吸收和释放,电路吸收或释放能量的速率用**电功率**来衡量。电功率简称**功率**,它定义为单位时间内电路吸收或释放的电能,即

$$p = \frac{dW}{dt} \quad (1-8)$$

式中,***dW***为电路在***dt***时间内吸收或释放的能量。功率的单位是**W**(瓦[特])。此外,常用的单位还有千瓦(kW)、毫瓦(mW)等。换算关系如下。

chapter  
01chapter  
02chapter  
03chapter  
04chapter  
05chapter  
06chapter  
07chapter  
08

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

如果电压和电流选为关联参考方向，如图 1-10a 所示，视为正电荷由高电位端向低电位端移动，电场力做正功，电路吸收电能，其值为正，计算公式为

$$p = \frac{dW}{dt} = \frac{dW}{dq} \times \frac{dq}{dt} = ui \quad (1-8a)$$

在直流情况下： $P=UI$ 。可见，电路的功率等于该电路电压和电流的乘积。

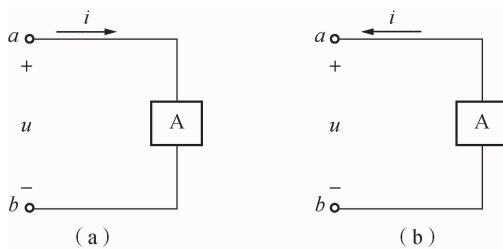


图 1-10 电功率的计算

如果电压和电流选为非关联参考方向，如图 1-10b 所示，电路发出电能，其值为负，计算公式为

$$p = -ui \quad (1-8b)$$

在直流情况下： $P=-UI$ 。

在计算时要注意：应根据电压和电流的参考方向是否关联来选用相应的功率计算公式，再代入相应的电压、电流值。另外， $u$ 、 $i$  值可以为正，也可以为负。即要注意到，公式有正负号，电量值也有正负号。若计算的电路元件的功率为正值，则表示它在吸收电能，实际上是一个负载元件；反之，若计算的功率为负值，则表示它在释放电能，实际上是一个电源元件。

## 2. 电能

在电源内部，外力不断地克服电场力对电荷做功，电荷在电源内部获得了能量，把非电能转化成电能。在外电路中，电荷在电场力的作用下不断地通过负载放出能量，把电能转换成其他形式的能量。由此可见，在电路中电荷只是一种转化和传输能量的媒介物，电荷本身并不产生或者消耗任何能量。通常情况下所说的用电，就是针对使用电荷所携带的能量而言。

在  $t_0$  到  $t$  的一段时间内，电压与电流取关联参考方向，电路消耗的电能

$$W = \int_{t_0}^t p dt = \int_{t_0}^t ui dt \quad (1-9)$$

在直流电路中，电压、电流和功率均为恒定值，则

$$W = P(t - t_0) = UI(t - t_0) \quad (1-9a)$$

当选择  $t_0=0$  时，

$$W = Pt = UI t \quad (1-9b)$$

电能的单位是 J(焦[耳])。功率为 1 W 的用电设备在 1 s 时间内所消耗的电能



1 J。实际应用中,供电部门按照“度”(即千瓦·时)来收取电费,功率为 1 kW 的用电器工作 1 h,所消耗的电能即 1 度(1kW·h),即

$$1 \text{ kW} \cdot \text{h} = 1\,000 \text{ W} \times 3\,600 \text{ s} = 3.6 \times 10^6 \text{ J}$$

## 1.3 电阻元件与欧姆定律



### 1.3.1 电阻元件

自然界的物质按照其导电能力可分为导体、绝缘体和半导体三大类。其中,导体是导电性能良好的物质,是因为导体内有大量的自由电荷;绝缘体内几乎没有自由电荷,因此其导电性能很差;半导体是导电性能介于导体和绝缘体之间的物质。

金属导体容易导电,是因为金属中有大量的自由电子。当电流通过导体时会受到阻力,是因为这些自由电子在导体中运动时,不断地与导体中其他微粒发生碰撞,这使得自由电子的运动受到一定的阻碍作用。在物理学中,用**电阻**来表示导体对电流阻碍作用的大小。电阻用符号  $R$  表示,单位是  $\Omega$ (欧[姆])。电阻的常用单位还有千欧( $\text{k}\Omega$ )、兆欧( $\text{M}\Omega$ )等。换算关系如下:

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

导体的电阻越大,表示导体对电流的阻碍作用越大。不同的导体,其电阻一般不同,电阻是导体本身的一种特性。实验表明:在温度一定的条件下,截面均匀的导体的电阻与导体的长度成正比,与导体的横截面积成反比,并与导体材料的性质有关,即

$$R = \rho \frac{L}{S} \quad (1-10)$$

式中  $L$ ——导体的长度,单位为米(m);

$S$ ——导体的横截面积,单位为平方米( $\text{m}^2$ );

$\rho$ ——导体的电阻率,单位为欧·米( $\Omega \cdot \text{m}$ )。

电阻率  $\rho$  是导体本身的属性,表示长度为 1 m、横截面积为  $1 \text{ m}^2$  的导体在一定温度下的电阻值。

**电阻元件**是对电流呈现阻碍作用的耗能元件,它是所有电子电路中使用最多的元件,其导通电流的特性用电导来衡量,大小为电阻的倒数,即

$$G = \frac{1}{R}$$

其单位是 S(西[门子])。

电阻元件的电阻值大小一般与温度、材料、长度以及横截面积有关,衡量电阻受温度影响大小的物理量是**温度系数**,其定义为温度每升高  $1^\circ\text{C}$  时电阻的相对变化量。实

chapter  
01chapter  
02chapter  
03chapter  
04chapter  
05chapter  
06chapter  
07chapter  
08

验表明，当导体的温度发生变化时，它的电阻也随着变化。不同的材料，当温度升高时，电阻变化的情况不同，若电阻随温度的升高而增加，则称为**正温度系数材料**，否则称为**负温度系数材料**。一般情况下，我们研究的电阻元件都是**恒值电阻**。

如果导体的电阻大小取决于材料本身的性质，而与加在它两端的电压和通过它的电流无关，则这样的电阻元件称为**线性电阻元件**，否则称为**非线性电阻元件**。

### 1.3.2 欧姆定律

欧姆定律反映了流过线性电阻元件的电流与加在它两端的电压之间的关系，是电路分析中最重要的基本定律之一。

**欧姆定律**：导体中的电流与它两端的电压成正比，与导体的电阻成反比。表示为

$$I = \frac{U}{R} \quad \text{或} \quad U = IR \quad (1-11)$$

当电阻中的电流与电压的参考方向是一致的，即电流与电压为关联参考方向时，式(1-11)成立。若为非关联参考方向，则此时的欧姆定律中要加上一个负号，写为

$$I = -\frac{U}{R} \quad \text{或} \quad U = -IR \quad (1-12)$$

**【例 1-1】** 应用欧姆定律对图 1-11 中各电路图列出表达式，并求出电阻值。

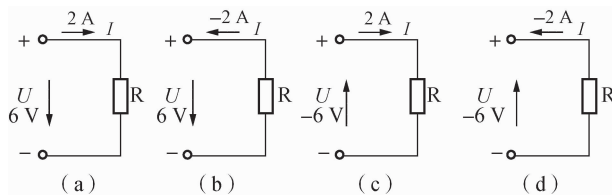


图 1-11 例 1-1 电路图

**【解】** 对于图 a，电压  $U$  与电流  $I$  为关联参考方向，则

$$R = \frac{U}{I} = \frac{6}{2} \Omega = 3 \Omega$$

对于图 b，电压  $U$  与电流  $I$  为非关联参考方向，则

$$R = -\frac{U}{I} = -\frac{6}{-2} \Omega = 3 \Omega$$

对于图 c，电压  $U$  与电流  $I$  为非关联参考方向，则

$$R = -\frac{U}{I} = -\frac{-6}{2} \Omega = 3 \Omega$$

对于图 d，电压  $U$  与电流  $I$  为关联参考方向，则

$$R = \frac{U}{I} = \frac{-6}{-2} \Omega = 3 \Omega$$

如果以电压为横轴、电流为纵轴，画出一个直角坐标系，那么该坐标平面称为  $u-i$  平面。电阻元件两端的电压与通过它的电流可以用  $u-i$  平面上的一条曲线来表示，



称为电阻元件的**伏安特性曲线**。

根据欧姆定律画出的伏安特性曲线是一条通过原点的直线，如图 1-12a 所示，阻值由直线的斜率来决定，这样的电阻元件称为线性电阻元件。线性电阻元件是线性电路元件，如果电路中的元件都是线性元件，这样的电路称为**线性电路**。如图 1-12b 所示的伏安特性是一条曲线，这样的电阻元件称为非线性电阻元件。

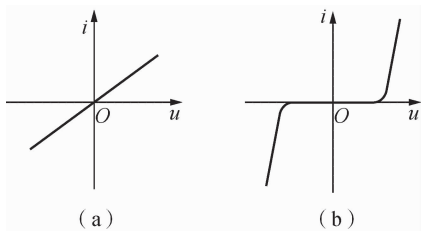


图 1-12 电阻元件的伏安特性曲线

如无特别说明，本书中所说的电阻元件均为线性电阻元件，讨论的电路都是线性电路。根据电功率的计算公式(1-8a)可得

$$P = UI = \frac{U^2}{R} = I^2 R \quad (1-13)$$

由式(1-13)可知，电阻元件的电功率  $P$  恒为正，即电阻元件永远是消耗功率的元件。

## 知识拓展

### 万用表的基本使用方法

#### 一、交流电压的测量方法与注意事项

测量交流电压时，将万用表的转换开关置于交流电压挡，选取合适的量程。表笔不分正、负，用手握住两表笔的绝缘手柄，将两表笔的金属头分别接触被测电压的两端，观察指针的偏转情况，读取读数，数字应看标有交流符号“AC”的刻度线上的指针位置，然后从被测电压端断开表笔。如果不清楚电压高低，则应从大量程向低量程换挡，直至合适进行读数。严禁在测量中拨动转换开关选择量程。

#### 二、直流电压的测量方法与注意事项

直流电压的测量方法和注意事项与测量交流电压基本相同。测量前，必须将转换开关拨到对应的直流电压量程挡。测量前，必须注意表笔的正、负极性，将红表笔接被测电路或元器件的高电位端，黑表笔接被测电路或元器件的低电位端。然后根据该挡量程数字与标直流符号“DC—”刻度线(第二条线)上的指针所指数字，读出被测电压的大小。如果事先不知道被测点电位的高低，可将任意一支表笔先接触被测电路或元器件的任意一端，另一支表笔轻轻地试触一下另一被测端，若表头指针向右(正方向)偏转，说明表笔正、负极性接法正确；若表头指针向左(反方向)偏转，说明表笔极性接反了，交换表笔即可。

chapter  
01chapter  
02chapter  
03chapter  
04chapter  
05chapter  
06chapter  
07chapter  
08

### 三、直流电流的测量方法与注意事项

把转换开关拨到直流电流挡,先估计一下被测电流的大小,然后将转换开关拨至合适的 mA 量程。同时观察标有直流符号“DC”的刻度线。万用表必须串联到被测电路中。测量时必须先断开电路串入电流表。必须注意表笔的正、负极性,即红表笔接电路断口高电位端,黑表笔接低电位端。严禁在测量过程中拨动转换开关选择量程。

### 四、电阻的测量方法与注意事项

不允许带电测量电阻,测量时直接将表笔跨接在被测电阻或电路的两端。测量中换挡必须重新调零。如果指针不能到零,说明表内电池损耗过大电压不足。测量时为了提高测量数据的准确性,倍率挡应选择合适,使指针尽可能接近标度尺的几何中心。测量中不允许用手接触被测电阻两端,否则会因并联上人体电阻使读数偏小,造成测量误差。

## 1.4 电压源与电流源



### 1.4.1 电压源

**理想电压源**简称**电压源**,其端电压恒定不变,或者按照某一固有的函数规律随时间变化,与通过的电流无关,常称为**恒压源**。理想电压源的符号如图 1-13a 所示,理想直流电压源的伏安特性曲线如图 1-13b 所示,是一条不通过原点且与电流轴平行的直线,其端电压不随电流变化。

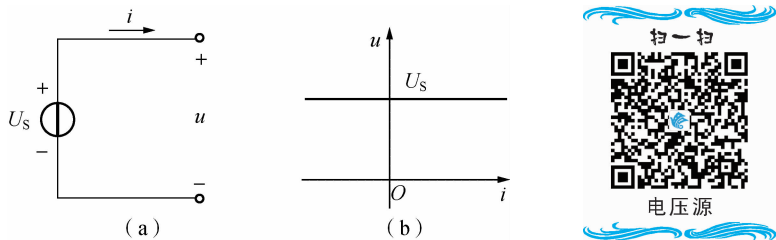


图 1-13 理想电压源

实际电路中,理想电压源是不存在的,电源内部总有电阻。实际电压源可以用一个理想电压源(端电压为  $U_s$ )与一个电阻元件(电阻为  $R_s$ )串联的模型来表示,如图 1-14a 所示,由电路模型可得

$$U = U_s - IR_s \quad (1-14)$$

式(1-14)说明,在接通负载后,实际电压源的端电压  $U$  低于理想电压源的端电压  $U_s$ ,实际电压源的伏安特性曲线如图 1-14b 所示,其端电压  $U$  随电流  $I$  的增大而降低。可见,实际电压源的内阻越小,其特性越接近于理想电压源。工程中常用的稳压电源以及大型电网在工作时的输出电压基本不随外电路变化,都可近似地看作

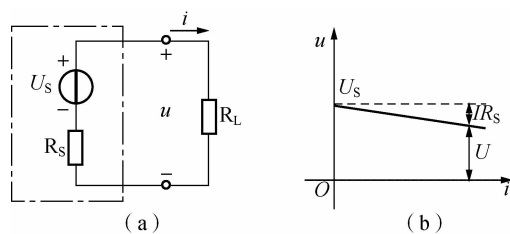


图 1-14 实际电压源

理想电压源。

### 1.4.2 电流源

**理想电流源**简称**电流源**，其电流恒定不变，或者按照某一固有的函数规律随时间变化，与其端电压无关，常称为**恒流源**。

理想电流源的符号如图 1-15a 所示，箭头的方向为电流源电流的参考方向。理想直流感流源的伏安特性曲线如图 1-15b 所示，是一条不通过原点且与电压轴平行的直线，理想电流源的输出电流与它两端的电压无关。

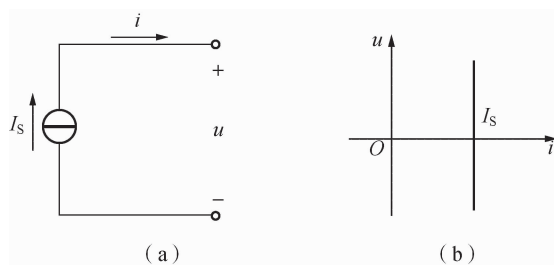


图 1-15 理想电流源



实际电路中，理想电流源也是不存在的，电源内部总有内电导，电流源中的电流并不能全部输出，有一部分将从内部被分流掉。实际电流源可以用一个理想电流源  $I_s$  与一个电阻  $R_s$  并联的模型来表示，如图 1-16a 所示，由电路模型可得

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

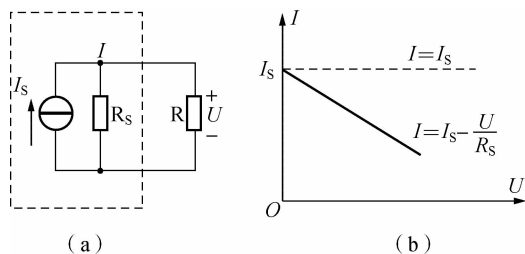


图 1-16 实际电流源

chapter 01

chapter 02

chapter 03

chapter 04

chapter 05

chapter 06

chapter 07

chapter 08

实际电流源的伏安特性曲线如图 1-16b 所示，其电流  $I$  随电压  $U$  增大而降低。可见，实际电流源的内阻越大，其特性越接近于理想电流源。

🔊 小提示

在实际应用中，不能将电压源短路，因为短路电流过大，会烧毁电源；不能将电流源开路，因为其开路电压过高，会损毁电源。

🍏 1.4.3 受控源

电路中除了独立电源外，还有一些器件，它们具有电源的一些特性，但是对于外电路不能独立地提供能量，即非独立电源，又称为受控源。受控电压源的电压和受控电流源的电流都不按给定的时间函数变化，而是受电路中某一部分的电流或电压的控制。

根据受控源在电路中提供的是电流还是电压，以及这一电流或者电压是受电路中另一处的电流还是电压控制，可以将受控源分为电压控制电压源 (VCVS)、电压控制电流源 (VCCS)、电流控制电压源 (CCVS) 以及电流控制电流源 (CCCS) 四种类型，如图 1-17 所示。

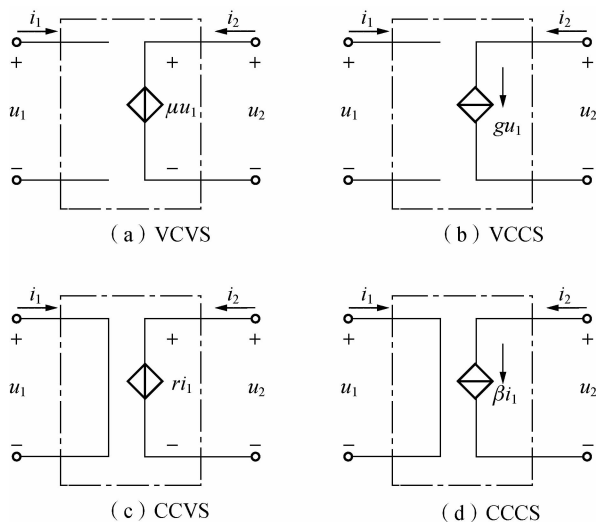


图 1-17 受控源的四种电路模型

为了与独立源区分开来，用菱形符号表示受控源部分。图中， $u_1$  和  $i_1$  分别表示控制电压和控制电流， $\mu$ 、 $g$ 、 $r$  和  $\beta$  分别是有关的控制系数，其中  $\mu$  和  $\beta$  是量纲为一的量， $r$  和  $g$  分别具有电阻和电导的量纲。当这些系数为常数时，被控制量和控制量成正比，这种受控源称为“线性受控源”。表示线性受控源输出特性的数学方程分别为

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{VCVS: } u_2 = \mu u_1 \quad \mu \text{ 称为“电压放大系数”} \\ \text{VCCS: } i_2 = g u_1 \quad g \text{ 称为“转移电导”} \\ \text{CCVS: } u_2 = r i_1 \quad r \text{ 称为“转移电阻”} \\ \text{CCCS: } i_2 = \beta i_1 \quad \beta \text{ 称为“电流放大系数”} \end{array} \right. \quad (1-16)$$

受控源的电压或电流是受电路中别处的电压或电流控制的，若电路中无独立电源，则电路中各处均无电压和电流，于是受控源的控制量为零、受控源的输出电压或电流也为零。因此，受控源不能像独立源那样可作为电路的激励源。受控源反映了电路某处的电压或电流控制另一处电压或电流的关系。

受控源与独立源的区别还在于：

- (1) 结构上来讲，独立源是二端口元件，受控源是四端口元件。
- (2) 从输出上来讲，独立源提供的电压、电流由电源本身决定，而受控源则由控制量决定，当控制量为零时，其输出也为零。
- (3) 更为特殊的是受控源输出的电压、电流可能大于输入端控制量的电压或电流，这是由受控源所代表的电子器件具有放大作用的特性所决定的。

#### 1.4.4 电源元件

当电路中的耗能元件有电流流过时，会不断地消耗电能，因此，电路中只有电阻等耗能元件是不能正常工作的，电路中必须有提供能量的元件——电源。常用电源有干电池、蓄电池、发电机和各种信号源。电源中，能够独立向外提供电能的，称为独立电源，它包括独立电压源和独立电流源；不能独立地向外电路提供电能的电源称为非独立电源，又称为受控源。

## 1.5 基尔霍夫定律

根据欧姆定律分析电路，是中学物理中常用的分析方法，但对某些电路有时是无能为力的，为此本节讨论“基尔霍夫定律”，它是分析与计算电路的理论基础和基本方法。

基尔霍夫定律包括两个部分，即基尔霍夫电流定律(KCL)和基尔霍夫电压定律(KVL)。其中，基尔霍夫电流定律反映了在任意时刻，电路中与某一节点相连的支路电流之间的关系。基尔霍夫电压定律则反映了电路的任一回路中各段电压之间的关系。

### 1.5.1 几个有关的电路名词

电路由电路元件相互连接而成。在叙述基尔霍夫定律之前，需要先介绍电路的几个名词。

#### 1. 支路

电路中通过同一电流的并含有一个以上元件的分支称为“支路”。一条支路流过一

个电流，称为“支路电流”。一个二端元件视为一条支路，其两端电压称为“支路电压”。如图 1-18 所示电路可视为共有 5 条支路和 5 个支路电流。

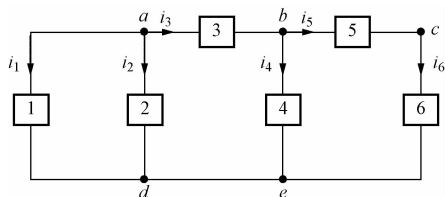


图 1-18 电路名词定义用图

## 2. 节点

三条或三条以上支路的连接点称为“节点”。图 1-18 所示电路中， $a$ 、 $b$  点是节点， $d$  点和  $e$  点间由理想导线相连，应视为一个节点。该电路共有 3 个节点。

## 3. 回路

由支路组成的闭合路径称为“回路”。图 1-18 所示电路中的  $\{1, 2\}$ 、 $\{1, 3, 4\}$ 、 $\{1, 3, 5, 6\}$ 、 $\{2, 3, 4\}$ 、 $\{2, 3, 5, 6\}$  和  $\{4, 5, 6\}$  都是回路。

## 4. 网孔

将电路画在平面上，其内部不含有支路的回路称为“网孔”。图 1-18 所示电路中的  $\{1, 2\}$ 、 $\{2, 3, 4\}$  和  $\{4, 5, 6\}$  回路都是网孔。

网孔与平面电路的画法有关，例如，若将图 1-18 所示电路中的支路 1 和支路 2 交换位置，如图 1-19 所示，则三个网孔变为  $\{2, 1\}$ 、 $\{1, 3, 4\}$  和  $\{4, 5, 6\}$ 。

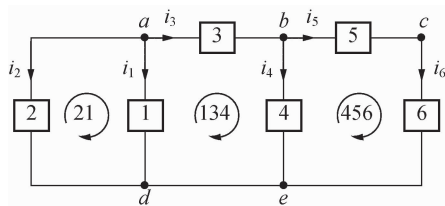


图 1-19 交换支路后的电路

### 小提示

平面电路是指能够画在一个平面上而没有支路交叉的电路。

## 1.5.2 基尔霍夫电流定律

**基尔霍夫电流定律** (Kirchhoff's Current Law)，简称为 KCL，它陈述为：对于任何集总参数电路的任一节点，在任一时刻，流出该节点的全部支路电流的代数和等于零，其数学表达式为



$$\sum i = 0 \quad \text{或} \quad \sum I = 0 \quad (1-17)$$

对电路中的某节点列写 KCL 方程时, 流出该节点的支路电流取正号, 流入该节点的支路电流取负号。例如, 对图 1-18 所示电路中的  $a$ 、 $b$ 、 $c$ 、 $d$  4 个节点写出的 KCL 方程分别为

$$\begin{cases} i_1 + i_2 + i_3 = 0 \\ -i_3 + i_4 + i_5 = 0 \\ -i_5 + i_6 = 0 \\ -i_1 - i_2 - i_4 - i_6 = 0 \end{cases}$$

KCL 方程是以支路电流为变量的常数线性齐次代数方程, 它对连接到该节点的各支路电流施加了线性约束。若已知  $i_1 = 1 \text{ A}$ ,  $i_3 = 3 \text{ A}$  和  $i_5 = 5 \text{ A}$ , 则由 KCL 方程可求得

$$\begin{cases} i_2 = -i_1 - i_3 = -1 \text{ A} - 3 \text{ A} = -4 \text{ A}, \\ i_4 = i_3 - i_5 = 3 \text{ A} - 5 \text{ A} = -2 \text{ A}, \\ i_6 = i_5 = 5 \text{ A}, \end{cases}$$

此例说明, 根据 KCL 方程可以通过一些电流求出另一些电流。



### 1.5.3 基尔霍夫电压定律

基尔霍夫电压定律(Kirchhoff's Voltage Law), 简称为 KVL, 它陈述为: 对于任何集总参数电路的任一回路, 在任一时刻, 沿该回路全部支路电压的代数和等于零, 其数学表达式为

$$\sum u = 0 \quad \text{或} \quad \sum U = 0 \quad (1-18)$$

在列写回路 KVL 方程时, 参考方向与回路的绕行方向相同的支路电压取正号, 与绕行方向相反的支路电压取负号。例如, 对如图 1-20 所示电路的 3 个回路, 沿顺时针方向绕行回路一周, 写出的 KVL 方程为

$$\begin{cases} u_2 + u_4 + u_3 - u_1 = 0 \\ u_5 - u_4 - u_2 = 0 \\ u_5 + u_3 - u_1 = 0 \end{cases}$$

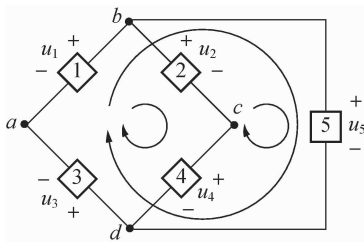


图 1-20 具有 5 条支路和 4 个节点的电路

chapter 01

chapter 02

chapter 03

chapter 04

chapter 05

chapter 06

chapter 07

chapter 08

KVL 方程是以支路电压为变量的常系数线性齐次代数方程，它对支路电压施加了线性约束。例如，若已知如图 1-20 所示电路中  $u_1 = 1 \text{ V}$ ， $u_2 = 2 \text{ V}$ ， $u_5 = 5 \text{ V}$ ，则由 KVL 方程可求得

$$u_3 = u_1 - u_5 = 1 \text{ V} - 5 \text{ V} = -4 \text{ V}$$

$$u_4 = -u_2 + u_5 = -2 \text{ V} + 5 \text{ V} = 3 \text{ V}$$

此例说明，根据 KVL 方程，可以通过一些电压求出另一些电压。

## 1.6 电路的工作状态

在学习电子电路的过程中，要学会分析电路，就要从分别了解电路的工作状态开始。电源与负载连接构成电路，根据电路的负载情况，电路有几种不同的工作状态：开路(空载)、短路和通路(负载)。3 种状态下的电源电压分别是  $U = E$ ， $U = 0$ ， $U = E - IR$ 。本节以简单直流电路为例，分别介绍这 3 种状态的具体情况。



### 1.6.1 开路状态

“开路”就是电源两端断开或者电路某处断开，电路中没有电流通过，电源不向负载输送电能。对于电源来说，这种状态叫“空载”。开路状态的主要特点是：电路中的电流为零，电源的端电压和电动势相等。



### 1.6.2 短路状态

如果外电路被阻值近似为零的导体接通，这时电源就处于“短路”状态，电路中的电流(短路电流)  $I \approx U_s / R_s$ 。我们知道，电源的内阻一般都是很小的，因而短路电流可能达到非常大的数值，所以短路可能导致电源烧毁，必须严格防止，避免发生。防止短路的最常见方法是在电路中安装“保险管”。保险管中的熔丝是由低熔点的铅锡合金或银丝制成。当电流增大到一定数值时，熔丝首先被熔断，从而切断电路。

在短路状态下，电源的端电压为

$$U = U_s - IR_s = U_s - \frac{U_s}{R_s} R_s = 0$$

可见，短路状态的主要特点是：短路电流很大，电源的端电压为零。

这里需要说明，通常电源的内阻都基本不变并且数值很小，所以可近似认为电源的端电压等于电源电动势。今后若不特别指出或标出电源的内阻时，就表示内阻很小，可以忽略不计。



### 1.6.3 通路状态

“通路”就是电路中的开关闭合，负载中有电流流过。在这种状态下，电源的端电压与负载电流的关系可以用电源外特性确定，即

$$U = IR_s = U_s - IR_L$$

式中  $U$ ——电源端电压；

$U_s$ ——理想电源电压，即电动势；

$I$ ——电路中的电流；

$R_s$ ——电源内阻；

$R_L$ ——负载电阻。

根据负载的大小，通路状态下的电路又分为满载、轻载和过载 3 种情况。负载在额定功率下的工作状态称为**额定工作状态或满载**；低于额定功率时的工作状态称为**轻载**；高于额定功率时的工作状态称为**过载**。由于用电器过载很容易烧坏电器，电源过载容易损坏电源，电线过载容易引起火灾，因而一般情况下都不允许出现过载。

电路的这 3 种状态在生活中随处都可以看到。如将电灯的开关合上，电灯发亮，这就是一种通路状态。如果打开电灯的同时打开冰箱、空调、电饭煲、电视、电脑、音箱、电炒锅，这时负载比较多，电路容易出现过载，过载时电线容易冒烟起火；当把开关断开时，电灯熄灭，这时候电路处于开路状态。而当两根电线（火线、零线）的外皮被老鼠弄破，两根线碰在一起时，就会造成短路，若有过流开关，则过流开关马上工作；若没有过流开关，则电线马上冒烟起火。

## 本章实训 万用表的使用

### 实训任务引入和介绍

熟练地使用万用表是电路分析中最基本同时也是最重要的技能之一。为了加深对电路基本概念和基本定律的理解，本章实训结合万用表的基本操作规范，使用万用表对电子元件进行实际测量。

### 实训目的

1. 学习万用表的使用方法；
2. 学习电压、电流的测量方法；
3. 学会用欧姆表测量内阻。

### 实训条件

万用表、稳压电源、电阻(若干)、导线(若干)。

### 操作步骤

#### 1. 测量电压

直流电压的测量，自选电路图进行连接后，先估计被测电压的大小，再将万用表的转换开关转到合适的电压(DC 挡)量程，红表笔接正，黑表笔接负，然后结合示值与当前量程读出被测电压值。

交流电压的测量，只需将转换开关转到 AC 挡的合适量程，即可按照同样的方法测量。由于此时电路中的电流是交变的，因而表笔不分正、负。

### 2. 测量直流电流

自选电路图进行连接后，先估计被测电流的大小，再将转换开关转到合适的电流(DC挡)量程，将电路断开后，按照红表笔接正、黑表笔接负的方式将万用表串联到电路中。接通电路，结合当前量程和示值读出电流的大小。

### 3. 测量电阻

将万用表调至电阻挡( $\Omega$ )，将红、黑两支表笔短接，观察其示值，若示值为零，则将两支表笔分别稳定地搭接在被测电阻的两端，直接测量读数；若短接后示值不为零，则需要调零操作后才可进行测量。传统的指针式万用表可通过旋转调零旋钮进行手动调零，电子式万用表一般会在开机后自动调零，不需要手动操作。

### 实训结果

---



---

### 总结分析

---



---

### 实训考核

教师评分：

---

自我评价：

---

## 本章检测

- 1-1 电路的组成及各组成部分的作用是什么？
- 1-2 什么是理想电压源？什么是理想电流源？
- 1-3 如图 1-21 所示，按给定的电压、电流参考方向，求出元件端电压  $U$  的值。
- 1-4 计算图 1-22 中电阻  $R$  的值，已知  $U_{ab} = -12 \text{ V}$ 。

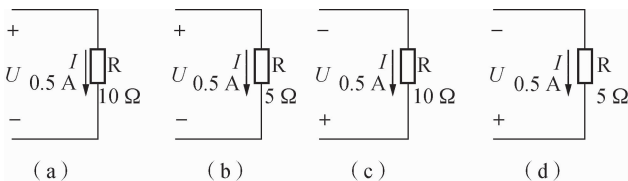


图 1-21 习题 1-3 图

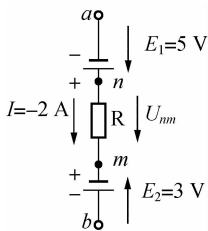


图 1-22 习题 1-4 图

- 1-5 计算图 1-23 中  $b$  点的电位。
- 1-6 分别计算  $S$  打开与闭合时图 1-24 电路中  $A$ 、 $B$  两点的电位。

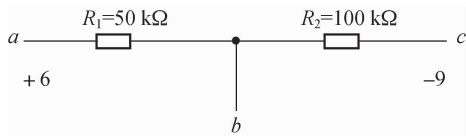


图 1-23 习题 1-5 图

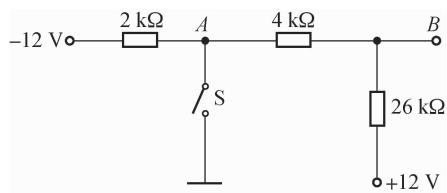


图 1-24 习题 1-6 图

1-7 额定值为 1 W、100 Ω 的碳膜电阻，在使用时电流和电压不得超过多大值？

1-8 若电源的开路电压为 12 V，短路电流为 30 A，求电源的电动势与内阻。

1-9 如图 1-25a、b 所示电路中，若  $I=0.6\text{ A}$ ，则  $R=?$  如图 1-25c、d 所示电路中，若  $U=0.6\text{ V}$ ，则  $R=?$

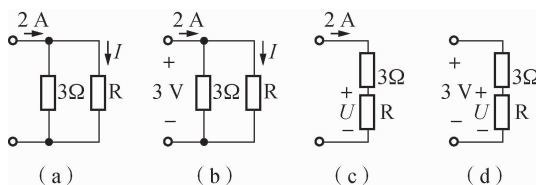


图 1-25 习题 1-9 图

1-10 如图 1-26 所示电路，(1)求  $a、b$  间的电压  $U_{ab}$ ；(2)若  $a、b$  间用导线连接，求通过导线上的电流  $I_{ab}$ 。

1-11 如图 1-27 所示的电路中，电流  $I=10\text{ mA}$ ， $I_1=6\text{ mA}$ ， $R_1=3\text{ k}\Omega$ ， $R_2=1\text{ k}\Omega$ ， $R_3=2\text{ k}\Omega$ 。求电流表  $A_4$  和  $A_5$  的读数各为多少。

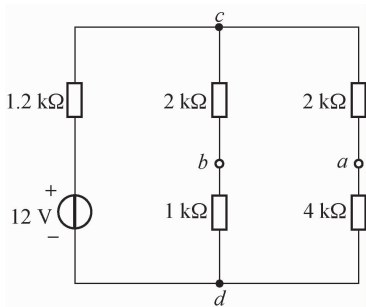


图 1-26 习题 1-10 图

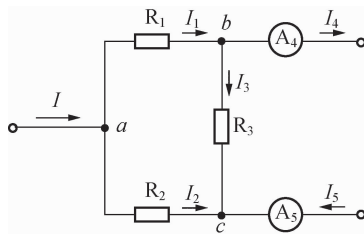


图 1-27 习题 1-11 图

1-12 如图 1-28 所示的电路中，有几条支路和几个节点？ $U_{ab}$  和  $I$  各等于多少？

1-13 如图 1-29 所示的电路中，已知  $R_1=2\text{ }\Omega$ ， $R_2=4\text{ }\Omega$ ， $R_3=R_4=1\text{ }\Omega$ ，求电流  $i$ 。

1-14 求如图 1-30 所示电路中的电流  $I$  和电压  $U$ 。

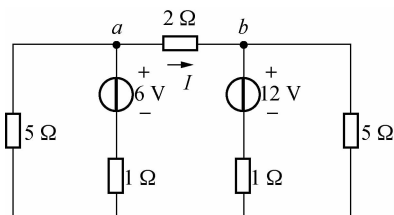


图 1-28 习题 1-12 图

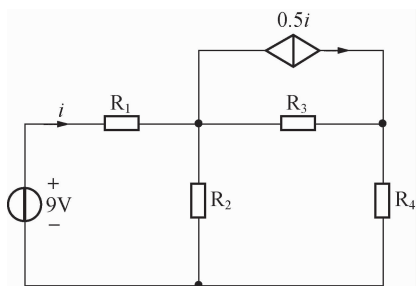


图 1-29 习题 1-13 图

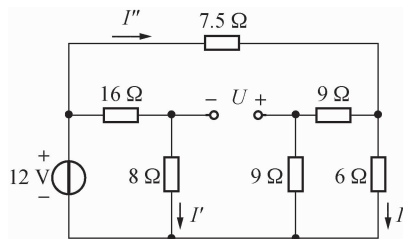


图 1-30 习题 1-14 图

1-15 某一晶体管收音机电路，已知电源电压为 24 V，现用分压器获得各段电压（对地电压）分别为 19 V、11 V、7.5 V 和 6 V，各段负载所需电流如图 1-31 所示，求各段电阻的数值。

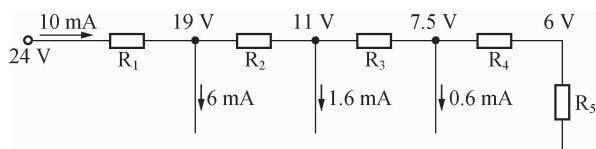


图 1-31 习题 1-15 图

