

# 第 1 章 电路的基本概念和基本定律

## 1.1 电路和电路模型

### 学习目标

通过本节学习，学生应能：

- 描述电路实物图和电路图的差异。
- 描述理想元件与实际元件概念。

### 1.1.1 电路

电路是指电流的流通过径，一般来说，电路由四个部分组成：电源、负载、导线以及接通或切断电流的开关，如图 1.1 所示。

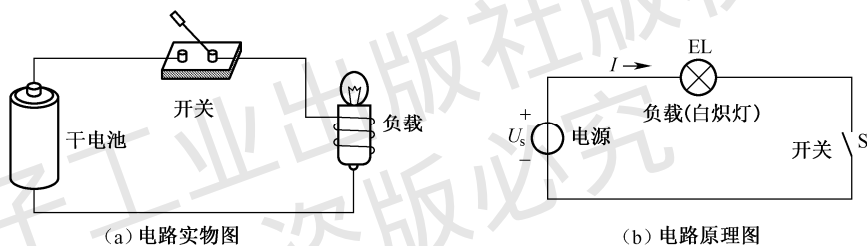


图 1.1 电路的基本结构

电路中，电源是将非电形态的能量转换成电能的供电设备，例如，发电机、电池等。负载是将电能转换成非电形态能量的用电设备，例如，电动机、照明灯等。电路中负载的大小通常用负载取用功率的大小来衡量。例如，在照明电路中，100W 的白炽灯比 40W 的白炽灯从电源取用的功率大，即 100W 的白炽灯比 40W 的白炽灯负载大。连接导线起着传送信号、传输电能的作用，例如电话线、输电线等。

实际应用中，电路除了电源、负载和连接导线外，还必须有一些控制设备，例如，控制电路通、断的开关及保障安全用电的熔断器、漏电保护器等。这些设备根据电路功能不同，有许多品种可供选用，它们不仅保证了电路安全、可靠地工作，而且使电路自动完成某些特定工作成为可能。

### 1.1.2 电路模型

实际电路用途各异，构成实际电路的元器件种类繁多，其电气元件的电磁性能的表现往往相互交织。例如，电流经过线圈时，电能转化为热能，同时电流在线圈周围产生磁场，也就是存储了磁场能；线圈匝与匝之间形成的电容有电场存在，可见又存储了电场能。这三种

电磁现象同时存在于同一个线圈中，使电路的分析非常复杂。为此，在一定条件下，经常忽略次要性质，用足以表征其主要特性的模型即理想元件组合起来模拟实际器件。例如，电阻元件表示只消耗电能；电感元件表示只存储磁场能；电容元件表示只存储电场能；理想电源表示只将其他形式的能量转换为电能等。这种科学的方法可以方便地对电路进行分析和计算。用理想元件组成的电路称为实际电路的电路模型，图 1.1 (a) 电路实物图的电路模型如图 1.1 (b) 所示。

## 阅读与思考 1 导电材料的特性及应用

导电材料在电气和电子工业技术中有着特别重要的意义，其特性及应用见表 1.1 所列。由于微量的杂质影响，便能大大地降低它们的导电性能，所以要将它们提炼成纯度尽可能高的材料。

表 1.1 导电材料的特性及应用

材 料	特 性	应 用
铜	导电和导热性能极好，较软，易变形（轧制和延伸），可切削性差。在冷却成形后易碎裂，而退火后重新变软 在潮湿的空气中会生成铜绿，但铜绿可以防止其他的腐蚀	电解铜作为导体应用于导线、线圈和印制电路中。用作输电线和汇流母线。用作导热体：如半导体器件的散热器、烙铁头、散热管。用于开关的触点的制造
铝	是较好的导电和导热材料。铝在空气中会形成一层具有一定密度、导电性能极差的氧化层，此氧化层可保护铝不再受到其他的腐蚀 抗拉强度弱，易于加工，能承受弱碱的腐蚀	作为导体用于汇流母线和架空输电线以及集成电路中。可作为电缆外套、电容器薄膜、外壳、天线的板材、半导体器件的散热器
银	是最好的导电和导热材料。耐腐蚀，较软，氧化层导电，易被硫化 与铜、铂、铱、钯或镉组成的合金具有特别的特性（硬度高、耐电弧等）	用于高频电子技术中的导体，继电器及接触器的触点、双金属片触点、汽车闪光灯信号接触片
金	化学性能稳定、较软、延伸性好	在集成电路中用作触点和引出端连接线
铜锌合金 (黄铜)	抗拉强度大于铜，含铜量为 56%~95%。具有较大的韧性	用来制造螺钉、接线夹、铆钉、插座以及开关中的触点
铜锡合金 (锡青铜)	有较大的抗拉强度，含有 80%~98% 的铜。耐腐蚀性好	触点弹簧
铝合金	铝通过与铜、锰、硅、镁组成的合金，有很好的铸造和锻造性能。铝合金易被加工切削	室外架空线、导线、汇流母线、铝质螺钉、仪器外壳、笼型电机的转子

## 阅读与思考 2 绝缘材料特性及应用

绝缘材料分为天然材料和塑料两类，其特性及应用见表 1.2 所列。

表 1.2 绝缘材料（选列）的特性及应用

名称		特性	应用	
天然材料	纯天然物	云母	弹性柔韧的矿石，耐高温，透明，不透水	电容器中的介质材料。大功率半导体器件的绝缘片
		石英	较好的导热体，能通过氧化形成氧化薄层	在熔断器中用来消除电火花。用于集成电路中的绝缘
	经加工的	玻璃	由石英矿砂构成，坚硬，脆性大，不透水	用于灯泡、电子管、二极管的外壳及绝缘子，薄膜电路的基片、光导纤维
		陶瓷	较好的绝缘体，耐电弧，不透水，耐高温，耐化学腐蚀，耐老化	作为大功率半导体的绝缘体、外壳，作为薄膜电路的基片，作为开关及电源插座的附件，作为电介质及电阻器
塑料	热塑性塑料	聚氯乙烯	耐碱、盐、稀酸、油和汽油，不易燃。本质坚硬。采用增塑剂能使其变软且增加弹性	用作导线的绝缘、绝缘软管、伸缩软管、管材黏合带
		聚苯乙烯	在纯净的状态时呈透明，脆性大，易燃	在高频技术中作为线圈骨架、接线板、绝缘薄膜和导线绝缘子
		聚乙烯	电气性能几乎与温度无关，化学性能稳定，不吸水，易燃	用于天线馈线的绝缘，用作绝缘薄膜、包装用薄膜、导线护管、电缆护套
	热固性塑料	环氧树脂	韧性，耐化学腐蚀，电气性能相当好，耐热	作为树脂：浇铸树脂、黏合树脂、树脂清漆，用作绝缘。用于线圈、变压器的绝缘浇铸 作为层压塑料：胶木板 作为模压塑料材料：开关部件、外壳

## 1.2 电流、电压及其参考方向

### 学习目标

通过本节学习，学生应能：

- 描述电流强度表达式及其单位。
- 解释电流的实际方向和参考方向。
- 描述移动电荷电场力做功与电压的关系。
- 解释电压的实际方向和参考方向。
- 解释电压与电位的关系及区别。

### 1.2.1 电流

电流是指电荷的定向移动。

#### 1. 电流的大小

电流的大小是用电流强度来衡量的。电流强度是指单位时间内通过某一导体横截面的电荷量。电流强度简称电流，用字母  $I$ （或  $i$ ）表示。

大小、方向随时间变化的电流称为交变电流（简称交流）。规定其电流强度用小写字母  $i$  表示。设  $dt$  时间内通过导体横截面的电荷量为  $dq$ ，则电流强度为：

$$i = \frac{dq}{dt}$$

大小、方向均不随时间变化的电流称为恒定电流（简称直流）。规定其电流强度用大写字母  $I$  表示，即

$$I = \frac{q}{t}$$

式中， $q$  为时间  $t$  内通过导体横截面的电荷量，单位为库[仑]（C）；

$I$  为电流强度，单位是安[培]（A）。

电流强度还有常用单位 mA（毫安）和  $\mu\text{A}$ （微安）。它们之间的换算关系为：

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

## 2. 电流的方向

人们习惯上规定正电荷定向运动的方向为电流的方向（实际方向）。电流的实际方向是客观存在的，在简单的直流电路中，我们可以很容易地确定出电流的实际方向，但在复杂的直流电路中，电流的实际方向有时难以确定。为了便于分析问题，可以预先假定一个电流方向，称为参考方向（也称为正方向），并在电路中用箭头标出。求解电路电流时应根据假定的电流参考方向进行。如果计算结果为正，表示电流实际方向与参考方向一致；如果计算结果为负，表示电流实际方向与参考方向相反。图 1.2 所示电路中，假如电路中电流的实际方向是从上向下的，大小为 1A，为了表达这个事实，既可以像图 1.2（a）那样标注参考方向，并写出  $I=1\text{A}$ ；也可以像图 1.2（b）那样标注参考方向，但应写明  $I=-1\text{A}$ 。也就是说电流的正、负只有在选择了参考方向之后才有意义。

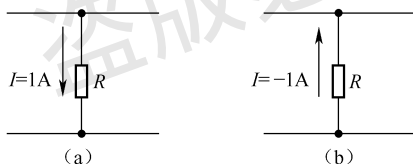


图 1.2 电流的方向

交流电的实际方向是随时间而变的，所以也必须规定电流的参考方向。如果某一时刻电流为正值，即表示该时刻电流的实际方向与参考方向一致；如果是负值，则表示该时刻电流的实际方向与参考方向相反。也就是说，电路图中标注的电流方向都是参考方向，不是实际方向。电流的参考方向可以任意规定，电流的实际方向应结合电流参考方向的代数量  $I$  的正负来表明。要提醒注意的是，我们后面分析的电动势、电压、电位等物理量的正负时，也与参考方向（参考点）的选择有关。

## 1.2.2 电压

### 1. 电压的大小

导体中存在电场时，电场力对电荷的作用使其作定向移动，电场力对电荷做功，运动电

荷的电能将减少，电能转化为其他形式的能。在电路中电场力将单位正电荷从 A 点移动到 B 点所做的功称为 A、B 两点间的电压，用字母  $U(u)$  表示，即

$$u_{AB} = \frac{dW_{AB}}{dq}$$

式中， $dq$  为电量；

$dW_{AB}$  为  $dq$  从 A 点移动到 B 点电场力所做的功。

对于直流电压有

$$U_{AB} = \frac{W_{AB}}{q}$$

式中， $W_{AB}$  为  $q$  从 A 点移动到 B 点电场力所做的功。

在国际单位制中，电压单位为伏特，用大写字母 V 表示。此外，电压单位还有 kV（千伏）、mV（毫伏）和  $\mu$ V（微伏）。它们之间的换算关系为：

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

## 2. 电压的方向

有些直流电路很难判断电压的实际方向，而交流电压的实际方向是随时间而变化的。因此为了判断电压的实际方向，与电流一样也需要引入参考方向。电压参考方向的表示方法如图 1.3 所示。电压参考方向可以用双下标表示，如  $U_{AB}$  表示电压的参考方向由 A 指向 B。在电路图中，通常用“+”、“-”极性表示，由“+”到“-”表示电压降的方向，也可以用箭头表示电压降方向。

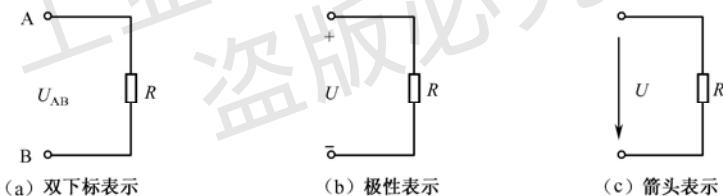


图 1.3 电压参考方向表示法

电路的电流参考方向和电压参考方向可任意选取，但为分析方便，常选某段电路（或某个元件）的电流与电压参考方向一致，称之为关联参考方向。在关联参考方向下，电流从电压高电位端经某段电路（或某个元件）流向低电位端，如图 1.4（a）所示；当电压参考方向与电流参考方向不一致时称为非关联参考方向，如图 1.4（b）所示。

我们规定当电压的实际方向与参考方向一致时，电压为正值；当实际方向与参考方向相反时，电压为负值。这样根据电压的参考方向与正负值可判断出电压的实际方向。

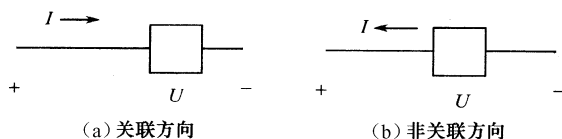


图 1.4 电流和电压的参考方向

### 1.2.3 电位

在电路中任选一点为参考点，则某点 A 到参考点的电压降称为 A 点的电位，用  $V$  表示。电位的单位与电压单位相同，为伏特(V)。如果 A、B 两点的电位分别为  $V_A$ 、 $V_B$ ，则该两点间的电压  $U_{AB}$  可表示为：

$$U_{AB}=V_A-V_B$$

一般来说参考点可以任意选取，工程上常选大地、设备外壳、接地点作为参考点。规定参考点的电位为零，故参考点又叫零电位点。参考点在电路图中常用符号“ $\perp$ ”表示。

**例 1.1** 在图 1.5 所示电路中，分别以 C、A 为参考点，可以求出 A、B、C 各点的电位值及 BA 两点之间的电压  $U_{BA}$  ( $U_S=10V$ ,  $R_1=1\Omega$ ,  $R_2=9\Omega$ ,  $I=1A$ )。

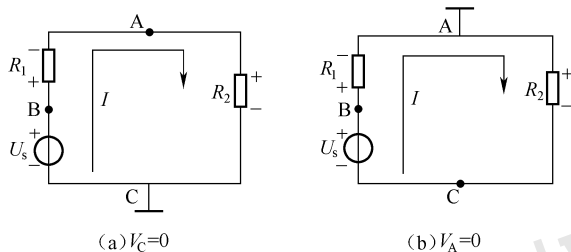


图 1.5 例 1.1 图

解：

(1) 以 C 点为参考点 ( $V_C=0V$ )，A、B、C 点的电位值分别为：

$$V_C=0V$$

$$V_A=IR_2=1\times 9=9(V)$$

A 点与参考点之间有 2 段电路，沿任一电路计算结果是一致的。即电路中某点对参考点电位是唯一的。

$$V_B=U_S=10V$$

$$U_{BA}=V_B-V_A=10-9=1(V)$$

(2) 以 A 点为参考点 ( $V_A=0V$ )，A、B、C 点的电位值分别为：

$$V_A=0V$$

$$V_B=IR_1=1\times 1=1(V)$$

$$V_C=-IR_2=-1\times 9=-9(V)$$

$$U_{BA}=V_B-V_A=1-0=1(V)$$

可见，参考点选择的不同，电位值也就不同，但电压值不变，即电位值与参考点的选择有关，而电压值与参考点无关。

## 1.3 电能与电功率

### 学习目标

通过本节学习，学生应能：

- 描述电能及电功率。

- 解释影响电功率大小的因素。
- 描述功率平衡。

## 1. 电能

电流通过电阻时会消耗能量，其表达式为：

$$dw = u \cdot idt$$

在直流情况下为：

$$W = UI t$$

电能的单位为焦耳 (J)。常用  $\text{kW} \cdot \text{h}$  (俗称度) 作为电能的单位，例如  $1\text{kW}$  的电炉通电  $1\text{h}$  (1 小时) 消耗的电能 1 度电。

$$1\text{kW} \cdot \text{h} = 10^3 \times 3600 \text{ J} = 3.6 \times 10^6 \text{ J}$$

## 2. 电功率

用电设备单位时间里所消耗的电能叫做电功率，用字母  $p$  表示，即

$$p = \frac{dw}{dt} = \frac{dw}{dq} \cdot \frac{dq}{dt} = u \cdot i$$

在直流情况下为：

$$P = UI$$

功率的单位为瓦，符号为  $\text{W}$ 。常用的有千瓦 ( $\text{kW}$ )、兆瓦 ( $\text{MW}$ ) 和毫瓦 ( $\text{mW}$ ) 等。

用  $P=UI$  计算功率时，如果按图 1.4 (a) 所示电流、电压选用关联参考方向，当计算所得的  $p > 0$  时，表示该支路实际吸收 (消耗) 功率；当计算所得  $p < 0$  时，表示支路实际发出功率。

同样，如果按图 1.4 (b) 所示电流、电压选择非关联参考方向，则按  $P=UI$  计算所得的  $p < 0$  时，表示该支路实际吸收功率； $p > 0$  时，表示该支路实际发出功率。

根据能量转换与守恒定律可知：一个电路中，每一瞬间，接受电能的各元件功率的总和等于发出电能的各元件功率的总和，即所有元件接受的功率的总和为零。这个结论叫做“电路的功率平衡”。

**例 1.2** 图 1.6 所示直流电路中， $U_1=4\text{V}$ ， $U_2=-8\text{V}$ ， $U_3=6\text{V}$ ， $U_4=6\text{V}$ ， $I=4\text{A}$ ，求各元件吸收或发出的功率  $P_1$ 、 $P_2$ 、 $P_3$  和  $P_4$ 。

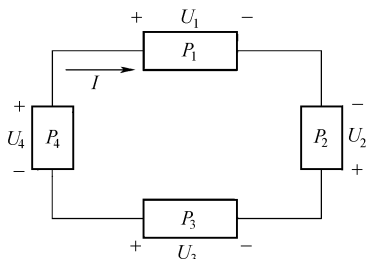


图 1.6 例 1.2 图

**解：** $P_1$  的电压参考方向与电流参考方向相关联，故

$$P_1 = U_1 I = 4 \times 4 = 16 \text{ (W)} \text{ (吸收 16W)}$$

$P_2$ 、 $P_3$  和  $P_4$  的电压参考方向与电流参考方向非关联，故

$$P_2 = U_2 I = (-8) \times 4 = -32 \text{ (W)} \text{ (吸收 32W)}$$

$$P_3 = U_3 I = 6 \times 4 = 24 \text{ (W)} \text{ (发出 24W)}$$

$$P_4 = U_4 I = 6 \times 4 = 24 \text{ (W)} \text{ (发出 24W)}$$

整个电路吸收功率  $16\text{W} + 32\text{W} = 48\text{W}$ ；发出功率  $24\text{W} + 24\text{W} = 48\text{W}$ ，功率平衡。

### 阅读与思考 3 电度表的基本原理简介

通常用户用电量的多少是由电度表来记录的，而电费是由电度表中转盘的转数来确定的。我们常见的用于计量用电量的电度表的内部结构如图 1.7 所示。

在电度表内部，电流流经电压线圈和电流线圈时所产生的磁感应线，与转盘（金属导体）上产生的涡流发生相互作用，从而产生电磁力并形成旋转力。用电量越大，转盘的转速越快，所以使用的电量以转盘的转数来表示，并据此计算电费。

在说明电度表转盘的转动原理时，常引用阿喇戈（Arago）圆盘为例证，如图 1.8 所示。若沿着一块由轴支撑的圆盘的周边移动磁铁，圆盘就好像受到磁铁吸引那样会跟随旋转。

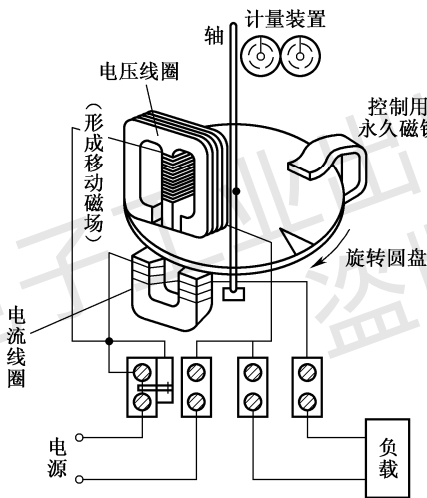


图 1.7 电度表内部结构

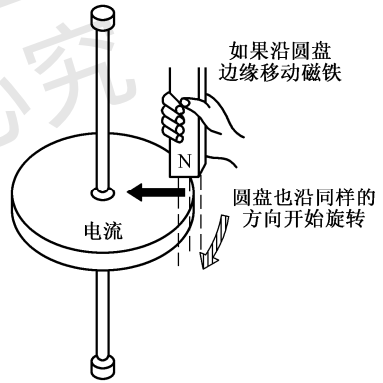


图 1.8 阿喇戈圆盘示意图

当然，电度表工作时并不是移动永久磁铁，所说的移动磁铁，只不过是巧妙地使用线圈的组合（电压线圈和电流线圈），在旋转的圆盘周围产生如同移动永久磁铁时产生的那种磁感应线。当然，如果切断电压线圈的通路，就会使得圆盘不能旋转，但由于电流线圈仍然是通路，所以不会影响用户用电。这也就是窃电者窃电时常用的手法之一。

通过将电流产生的磁感应线转变成移动磁场，就能在旋转圆盘上产生出涡流（感应电流），并产生电磁力使圆盘旋转。

### 技术与应用 1 用电度表测量家电功耗的简易方法

利用家庭的电度表，可测量自己家中电气产品的总耗电功率或单个产品的耗电功率。在



测量单个产品发生的异常耗电时，还可及时发现些漏电的隐患。其测量方法如下。

## 1. 确定电度表的计算常数

对于家用电度表，电表的表面除标注该表的电流外，还标有 3000r/kWh 或 2000r/kWh 的字样，他们分别代表该种电度表指示每耗电  $1\text{kW}\cdot\text{h}$ ，表盘就走 3000 转或 2000 转。利用以上关系，可换算出电度表每耗电  $1\text{W}\cdot\text{s}$ ，表盘可走  $1/1200\text{r}$  或  $1/1800\text{r}$ ，1200 或 1800 称为电度表的计算常数。

## 2. 用电器耗电功率的计算

只要记录电度表每走一转所需要的时间，再用电度表的计算常数除以该时间（秒数），即等于该用电器的耗电功率。例如，某电器单独接入电源 220V 上，电度表标注是 2000r/kWh，则该电度表计算常数为 1800，此时电度表表盘每走一转用去 18s，则该电器的耗电功率为  $1800/18=100\text{W}$ 。

# 1.4 电阻

## 学习目标

通过本节学习，学生应能：

- 描述影响电阻值大小的因素。
- 解释温度变化对电阻的影响。
- 描述电阻率。

### 1.4.1 电阻

当金属导体两端加上电压时，金属导体中的自由电子作定向运动形成电流。自由电子在运动中与金属正离子频繁碰撞，这种碰撞阻碍了自由电子的定向运动，即对电流有阻碍作用。我们用电阻来描述这种阻碍作用。不仅金属有电阻，其他物体也有电阻。

对金属导体来说，它的电阻是由导体的长短、粗细、材料以及温度决定的。在保持温度（ $20^{\circ}\text{C}$ ）不变条件下，电阻与导体的长度成正比，与导体的横截面积成反比。即

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

式中， $R$  为电阻，单位为欧姆（ $\Omega$ ）；

$l$  为导体的长度，单位为米（ $\text{m}$ ）；

$S$  为导体的横截面积，单位为平方米（ $\text{m}^2$ ）；

$\rho$  为材料的电阻率，单位为欧·米（ $\Omega\cdot\text{m}$ ）。

不同的物质有不同的电阻率，电阻率的大小反映了各种材料的导电性能的好坏，电阻率越小的物质导电性能越好。通常将电阻率小于  $10^{-6}\Omega\cdot\text{m}$  的材料称为导体；电阻率大于  $10^7\Omega\cdot\text{m}$  的材料称为绝缘体；而电阻率的大小介于导体和绝缘体之间的材料称为半导体。几种常见材料的电阻率见表 1.3。

表 1.3 几种常见材料的电阻率及温度系数

材料名称		电阻率 $\rho$ ( $\Omega \cdot m$ ) (20°C)	平均电阻温度系数 $\alpha$ (1/°C) (0°C~100°C)
导体	银	$1.59 \times 10^{-8}$	$3.8 \times 10^{-3}$
	铜	$1.69 \times 10^{-8}$	$3.93 \times 10^{-3}$
	铝	$2.65 \times 10^{-8}$	$4.23 \times 10^{-3}$
	铁	$9.78 \times 10^{-8}$	$5.0 \times 10^{-3}$
	钨	$5.48 \times 10^{-8}$	$4.5 \times 10^{-3}$
	钢	$1.30 \sim 2.50 \times 10^{-7}$	$6.0 \times 10^{-3}$
	锡	$1.14 \times 10^{-7}$	$4.4 \times 10^{-3}$
	锰铜	$4.2 \sim 4.8 \times 10^{-7}$	$6 \times 10^{-4}$
	康铜	$4.8 \sim 5.2 \times 10^{-7}$	$5 \times 10^{-4}$
	铁铬铝合金	$1.3 \sim 1.4 \times 10^{-6}$	$2.8 \times 10^{-4}$
半导体	碳	$3.5 \times 10^{-5}$	$-0.5 \times 10^{-3}$
	锗 } 纯	0.6	
	硅 } 2 300		
绝缘体	塑料	$10^{15} \sim 10^{16}$	
	陶瓷	$10^{12} \sim 10^{13}$	
	云母	$10^{11} \sim 10^{15}$	
	石英	$75 \times 10^{16}$	
	玻璃	$10^{10} \sim 10^{14}$	

### 1.4.2 温度变化对电阻的影响

一般金属的电阻随温度的上升而增大，温度每升高 1°C 时，金属电阻的增加量约为千分之三至千分之六。所以，温度变化不大时，金属电阻可认为是不变的。但当温度变化大时，电阻的变化就不可忽视。例如，40W 白炽灯的灯丝电阻在不发光时约为 100Ω，正常发光时超过 1kΩ，即超过原来的 10 倍。而半导体、电解液、绝缘体等的电阻却随温度上升而减小。电阻随温度变化的情况如图 1.9 所示。

根据实验可知，若在初始温度为  $t_1$  时，电阻为  $R_1$ ，当温度为  $t_2$  时，电阻为  $R_2$ ，它们之间存在着下列关系

$$R_2 = R_1 [1 + \alpha(t_2 - t_1)]$$

式中， $\alpha$  为电阻温度系数，单位为 1/°C。

根据电阻温度系数，利用式  $R_2 = R_1 [1 + \alpha(t_2 - t_1)]$  就可以计算出不同温度下物质的电阻值。例如，若 20°C 时某铜线的电阻为 540Ω，到 30°C 时约为 561Ω。温度传感器就是利用材料的电阻随温度发生变化的特征而制成的一类非常有用的测量元件。

如果我们将图 1.9 中温度系数的直线向下延时，并与横轴相交，交点出现在  $t_3 = -234.5^\circ\text{C}$  处，如图 1.10 所示。这个温度就是铜的推测的热力学零度，在该点电阻为零。但实现图 1.10 所示曲线的低温端已偏离直线，而且热力学温度在  $-273.15^\circ\text{C}$  时达到零电阻值。目前电工领域中超导课题的研究，就是基于这一理论进行的。

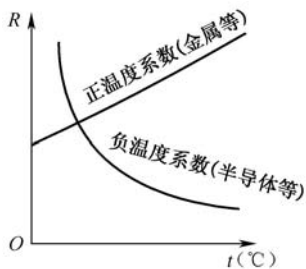


图 1.9 温度变化对导体电阻的影响

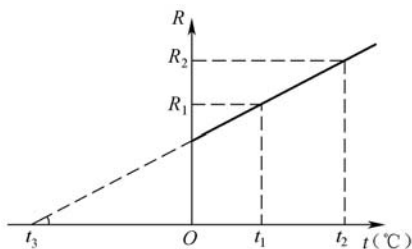


图 1.10 电阻值随温度变化曲线

**例 1.3** 有一台电动机，其线圈是铜芯漆包线，在常温  $26^{\circ}\text{C}$  时测得电阻为  $1.25\Omega$ ，通电运行 3h 后，测得电阻为  $1.5\Omega$ ，问此时电动机线圈的温度是多少？

**解：**从表 1.1 中查出铜的平均电阻温度系数  $\alpha = 3.93 \times 10^{-3} 1/^{\circ}\text{C}$ ，由  $R_2 = R_1 [1 + \alpha(t_2 - t_1)]$  得

$$t_2 = \frac{R_2 - R_1}{\alpha R_1} + t_1 = \left( \frac{1.5 - 1.25}{1.25 \times 3.39 \times 10^{-3}} + 26 \right) = 76.89 (^{\circ}\text{C})$$

## 技术与应用 2 压敏电阻

压敏电阻的阻值随电压的增加而急剧减小。这种电阻称为 VDR (Voltage Dependent Resistor) 变阻器。

压敏电阻由碳化硅与黏合剂混合后经高温烧结而成。碳化硅晶体呈微粒状、多孔，且十分坚硬。

压敏电阻有中间带孔和无孔两种，如图 1.11 所示。表面还有金属涂层，用作焊接引出线。

压敏电阻的电压-电流特性曲线如图 1.12 所示。由图可见，电流的变化速度比电压快得多。当电压较大时，电流则增大许多倍，即电阻变小。

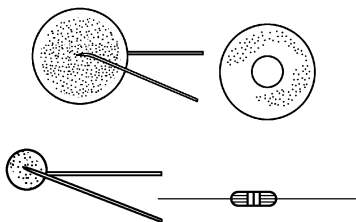


图 1.11 压敏电阻外形图

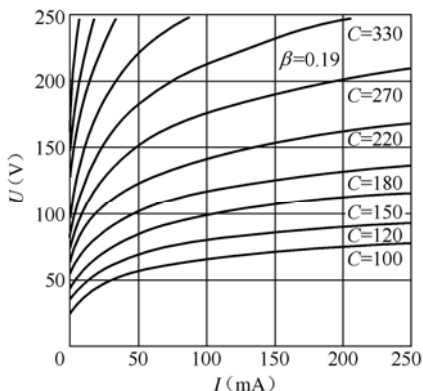


图 1.12 压敏电阻电压-电流特性

压敏电阻可用于对某些元件进行过压保护，例如线圈、开关等。这时，应将压敏电阻并联在被保护的元件两端。当电路上出现高电压（过电压）时，压敏电阻中的电流急剧增加，并且其两端电压维持在允许值范围内。从而保护所并联的元件免受高电压击穿。此外，压敏电阻还可用于稳压设备。

## 1.5 欧姆定律

### 学习目标

通过本节学习，学生应能：

- 描述电导。
- 运用欧姆定律求解电路参数。
- 描述线性电阻和非线性电阻的电流、电压关系曲线。
- 运用全电路欧姆定律求解电路参数。

电阻在通过电流时总是消耗能量，也就是说电阻总是吸收电功率的，它的电压方向总是与电流的方向一致。

### 1.5.1 欧姆定律

若电阻  $R$  值与其工作电流或电压无关，为恒定值，这样的电阻元件称为线性电阻元件。任何元件的电流与电压的关系用曲线图形表示，称为元件的电流、电压的关系特性曲线，如图 1.13 (a) 所示。线性电阻元件的电流、电压的关系为通过坐标原点的直线，或者说流过电阻元件的电流与电压成正比，这个关系称为欧姆定律。在电流和电压的关联参考方向下，欧姆定律的表达式为：

$$U = RI$$

当电流和电压在非关联参考方向下，欧姆定律的表达式为：

$$U = -RI$$

电阻  $R$  的倒数称为电导，用  $G$  表示，即

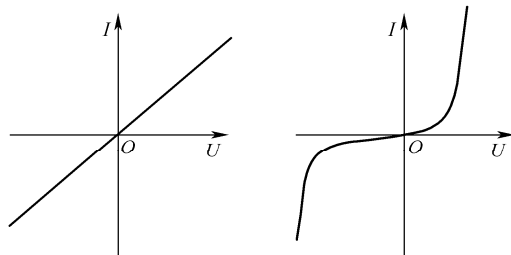
$$G = \frac{1}{R}$$

电导的单位为西门子 (S)。

同一电阻元件，既可用电阻  $R$  表示，也可用电导  $G$  表示。引用电导后，欧姆定律可表达为：

$$I = GU$$

若电阻  $R$  值不是恒定值，其阻值随着其工作电流或电压变化而变化，则称电阻为非线性电阻元件。非线性电阻的电流、电压特性曲线如图 1.13 (b) 所示。



(a) 线性电阻

(b) 非线性电阻

图 1.13 电阻的电流、电压特性曲线

除特别说明外，我们一般所说的电阻元件均指线性电阻元件，并简称为电阻。

显然，非线性电阻的电流、电压关系特性不是线性的，所以也就无法用欧姆定律描述，或者说欧姆定律只适用于线性电阻元件的分析与计算。

## 1.5.2 全电路欧姆定律

对整个电路的电源来说，电源本身的电流通路称为内电路，内电路的电阻称为内阻，用  $R_0$  表示，在分析问题时常将内电路等效成一个理想电动势  $E$  和一个电阻  $R_0$  串联的电路。电源以外的电流通路称为外电路，外电路的所有负载可以等效成一个电阻，称为外电阻或负载电阻，用  $R$  表示。内电路和外电路总称为全电路，可以用图 1.14 所示的电路图来描述。

对于全电路中电流、电阻和电动势之间满足以下全电路欧姆定律关系：

$$I = \frac{E}{R_0 + R}$$

由上式可见，电路中的电流不仅与电动势、负载电阻的大小有关，还与内电阻大小有关。一般情况下我们要求电源内阻越小越好，这时电源可以更多地向外电路提供电流（电能）。

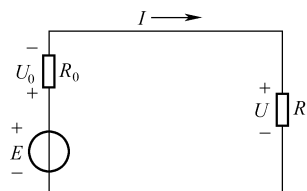


图 1.14 全电路图

## 1.6 电阻的串、并联

### 学习目标

通过本节学习，学生应能：

- 描述电阻的串联和并联。
- 运用公式计算等效电阻。
- 运用公式计算串联电阻的分压及并联电阻的分流。
- 描述电阻分压及分流的应用。

### 1.6.1 电阻的串联

#### 1. 串联电阻的性质

电阻的串联如图 1.15 所示。串联电阻是指电阻元件没有分支而依次相连，使电流只有一条通路，每个电阻流过相同的电流，施加于电路的总电压是每个电阻两端电压之和。若三个电阻串联则有

$$U = U_1 + U_2 + U_3 = (R_1 + R_2 + R_3)I = RI$$

式中， $R = R_1 + R_2 + R_3$  为串联电阻的等效电阻。

如果有  $n$  个电阻串联，整个电路的等效电阻为：

$$R = R_1 + R_2 + \cdots + R_n$$

显然，串联电阻的等效电阻大于电路中最大的单个电阻值。

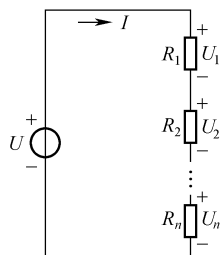


图 1.15 电阻串联

## 2. 串联电阻的分压

若电路中有  $n$  个电阻串联，第  $n$  个电阻  $R_n$  两端的电压  $U_n$  与电路总电压  $U$  之比为：

$$\frac{U_n}{U} = \frac{IR_n}{IR} = \frac{R_n}{R}$$

即第  $n$  个电阻两端的电压  $U_n$  为：

$$U_n = \frac{R_n}{R_1 + R_2 + \cdots + R_n} U$$

由于  $U_n$  正比于  $R_n$ ，所以串联电路中电阻越大，电阻两端的电压就越高。

**例 1.4** 试分别求出图 1.16 所示电路中  $R_1$ 、 $R_2$  两端的电压。

- (1)  $R_1=1\Omega$ ,  $R_2=9\Omega$ ; (2)  $R_1=R_2=5\Omega$ 。

**解：**(1) 由分压公式得：

$$U_1 = \frac{R_1}{R_1 + R_2} U = \frac{1}{1+9} \times 10 = 1 \text{ (V)}$$

$$U_2 = \frac{R_2}{R_1 + R_2} U = \frac{9}{1+9} \times 10 = 9 \text{ (V)}$$

(2)

$$U_1 = \frac{R_1}{R_1 + R_2} U = \frac{5}{5+5} U = \frac{1}{2} U = 5 \text{ (V)}$$

同理可得：

$$U_2 = \frac{1}{2} U = 5 \text{ V}$$

可见，串联电阻阻值越大，分得电压越大；阻值相等，分得电压相同。

## 1.6.2 电阻的并联

### 1. 并联电阻的性质

并联电阻如图 1.17 所示。并联电阻是指每个电阻都直接承受电源电压，即每个电阻都在同一个电源电压下工作。在这种情况下，电路中通过各电阻的电流之和等于总的等效电阻从电源得到的总电流，即

$$I = I_1 + I_2 + I_3 = \frac{U}{R_1} + \frac{U}{R_2} + \frac{U}{R_3} = U \frac{1}{R}$$

式中， $R \left( \frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} \right)$  为并联电阻的等效电阻。

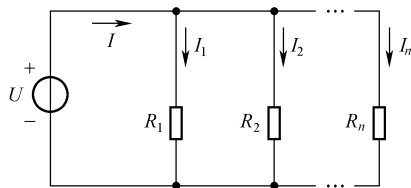


图 1.17 电阻并联

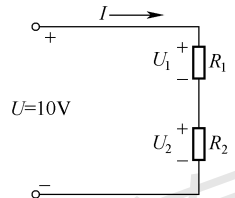


图 1.16 例 1.4 图

若使用电导表示，总电导为：

$$G=G_1+G_2+G_3$$

其中， $G_1=\frac{1}{R_1}$ ， $G_2=\frac{1}{R_2}$ ， $G_3=\frac{1}{R_3}$

## 2. 并联电阻的分流

若电路中有  $n$  个电阻并联，流过第  $n$  个电阻的电流  $I_n$  与总电流  $I$  之比为：

$$\frac{I_n}{I} = \frac{\frac{U}{R_n}}{\frac{U}{R}} = \frac{R}{R_n}$$

即流过第  $n$  个电阻中的电流为：

$$I_n = \frac{R}{R_n} I$$

由于  $I_n$  反比于  $R_n$ ，并联电路中的电阻越大，该电阻支路分得电流越少。

对于两个电阻并联的特殊情况，有

$$R = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}$$

因此，分流公式为：

$$I_1 = \frac{R}{R_1} I = \frac{R_2}{R_1 + R_2} I$$

$$I_2 = \frac{R}{R_2} I = \frac{R_1}{R_1 + R_2} I$$

**例 1.5** 试分别求出图 1.18 所示电路中  $R_1$ 、 $R_2$  两端的电压。(1)  $R_1=2\Omega$ ， $R_2=8\Omega$ ；(2)  $R_1=R_2=5\Omega$ 。

解：(1) 由分流公式得：

$$I_1 = \frac{R_2}{R_1 + R_2} I = \frac{8}{2+8} \times 2 = 1.6 \text{ (A)}$$

$$I_2 = \frac{R_1}{R_1 + R_2} I = \frac{2}{2+8} \times 2 = 0.4 \text{ (A)}$$

(2)

$$I_1 = \frac{R_2}{R_1 + R_2} I = \frac{5}{5+5} \times 2 = 1 \text{ (A)}$$

同理可得：

$$I_2 = \frac{1}{2} I = 1 \text{ A}$$

可见，电阻并联时阻值越大，分得电流越少；阻值相等，分得电流相同。

## 1.6.3 电阻的串、并联（混联）

实际电气工程中，常需要将串联电阻和并联电阻结合起来满足电气要求。图 1.19 所示就

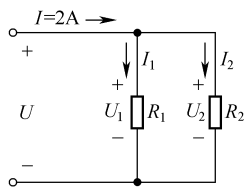


图 1.18 例 1.5 图

是电阻串、并联电路。

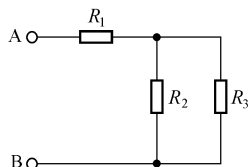


图 1.19 电阻串、并联

**例 1.6** 试求图 1.19 所示电路的等效电阻。已知  $R_1=5\Omega$ ,  $R_2=15\Omega$ ,  $R_3=10\Omega$ 。

**解：**先计算出  $R_2$  和  $R_3$  的并联电阻值  $R_{23}$ ，再将  $R_{23}$  和  $R_1$  串联求出电路的等效电阻  $R_{AB}$ 。

$$R_{23} = \frac{R_2 R_3}{R_2 + R_3} = \frac{15 \times 10}{15 + 10} = 6 (\Omega)$$

$$R_{AB} = R_1 + R_{23} = 6 + 5 = 11 (\Omega)$$

## 阅读与思考 4 关于电阻器与电位器符号的解释

电阻器与电位器符号如图 1.20 所示，其中图 (a) 表示一般阻值固定的电阻器；图 (b) 表示半可调或微调电阻器；图 (c) 表示电位器；图 (d) 表示带开关的电位器。电阻器的文字符号是“ $R$ ”，电位器的文字符号是  $RP$ ，即在  $R$  的后面再加一个说明它有调节功能的字符“ $P$ ”。

在某些电路中，对电阻器的功率有一定的要求，可分别用图 1.20 中 (e)、(f)、(g)、(h) 所示符号来表示。

还有几种特殊电阻器的符号，第 1 种是热敏电阻符号，热敏电阻器的电阻值是随外界温度而变化的。有的是负温度系数的，用  $NTC$  来表示。它的符号见图 1.20 (i)，用  $\theta$  或  $t$  来表示温度。它的文字符号是“ $RT$ ”。第 2 种是光敏电阻器符号，见图 1.20 (j) 所示，有两个斜向的箭头表示光线。它的文字符号是“ $RL$ ”。第 3 种是压敏电阻器的符号。压敏电阻阻值是随电阻器两端所加电压而变化的。符号见图 1.20 (k)，用字符  $U$  表示电压，它的文字符号是“ $RV$ ”。这三种电阻器实际上都是半导体器件，但习惯上我们仍把它们当作电阻器。第 4 种是特殊电阻器符号，是表示新近出现的保险电阻，它兼有电阻器和熔丝的作用。当温度超过  $500^\circ\text{C}$  时，电阻层迅速剥落熔断，把被保护的电路切断，能起到熔断器的作用。它的电阻值很小，目前在彩电中用的很多。它的图形符号见图 1.20 (l)，文字符号是“ $RF$ ”。

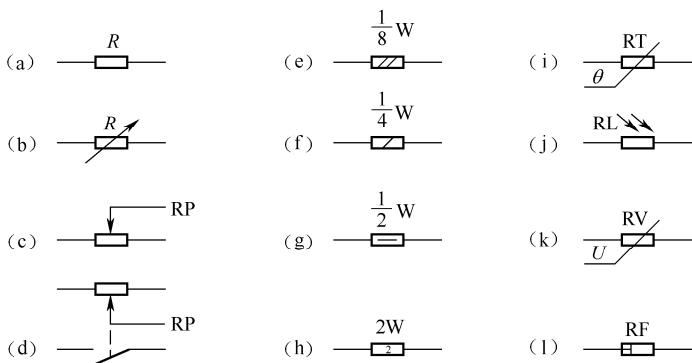


图 1.20 电阻器符号



# 1.7 电压源和电流源

## 学习目标

通过本节学习，学生应能：

- 描述理想电流源和理想电压源的电流、电压关系曲线。
- 描述实际电流源和实际电压源概念。
- 解释两种实际电源的等效变换。
- 运用等效变换求解电路参数。

### 1.7.1 理想电压源和理想电流源

理想电流源和理想电压源是输出电压或电流与它连接的负载无关的电源，也就是说，无论在这种电源端口上连接什么负载，理想电压源输出的电压或理想电流源输出的电流都是恒定的。这种理想电源也称为独立电源。要特别提醒注意的是，严格地说，理想电源是不存在的。

换句话说，如果把电源也看成一个元件的话，理想电源元件是从实际电源元件中抽象出来的。不过在实际电源本身消耗的功率可以忽略不计，而只起产生电能的作用时，这种电源便可以用一个理想电源元件来表示。理想电源元件分为理想电流源和理想电压源两种。

#### 1. 理想电压源

理想电压源简称电压源（也称恒压源），它是一个能够提供恒定电压  $U_S$  的电源。图 1.21 (a) 所示为理想电压源与负载的连接，图 1.21 (b) 为其电压、电流关系曲线。

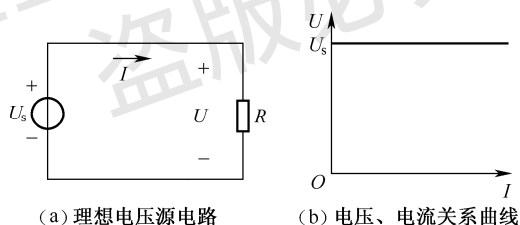


图 1.21 理想电压源

在图 1.21 (a) 所示电路中，当外接电阻  $R$  变化时，流过理想电压源的电流  $I$  将会发生变化，但电压  $U_S$  不变。显然，这是有条件的，超出这个条件就不能作出这样的结论。例如，将一个阻值为零的电阻接入理想电压源，从理论上讲，负载中的电流将会变得无穷大。

对于理想电压源，它具有两个重要特性。其一是端电压在任何时刻都和流过电源的电流大小无关；其二是输出电流取决于外电路，由外部负载电阻值决定。

#### 2. 理想电流源

理想电流源简称电流源（也称恒流源），它是一个能够提供恒定电流  $I_S$  的电源，图 1.22 (a) 所示为电流源与负载的连接，图 1.22 (b) 为其电压、电流关系曲线。

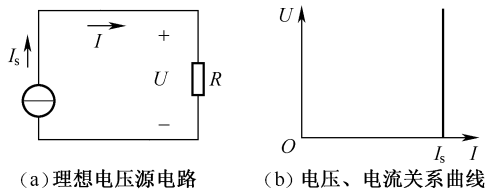


图 1.22 理想电流源

在图 1.22 (a) 所示电路中, 当外接电阻  $R$  变化时, 理想电流源两端的电压  $U$  将会发生变化, 但电流  $I_s$  不变。显然, 与理想电压源一样, 这也是有条件的, 否则将一个电阻为无穷大的负载接入理想电流源, 从理论上讲, 负载两端的电压将会变得无穷大。

对于理想电流源, 它具有两个重要特性。其一输出电流在任何时刻都和它的两端电压大小无关; 其二是它的端电压取决于外电路, 由外部负载电阻值决定。

### 1.7.2 实际电压源和实际电流源

实际应用中的电源一般不会具有理想电源的特性, 当外接电阻  $R$  变化时, 电源提供的电压和电流都会随之发生变化。当然, 有的电源在外接负载电阻变化时, 输出电压波动很小, 比较接近理想电压源的特性; 也有一些电源当外接负载电阻变化时, 输出电流波动很小, 比较接近理想电流源的特性。

电气工程技术中, 不仅元件用模型表示, 电源也可以用不同形式的模型表示。常见的实际电源多是以电压源的形式表现, 如图 1.23 (a) 所示, 它是由一个电压为  $U_s$  的理想电压源和内阻为  $R_0$  的电阻元件串联而成, 该组合称为电压源模型。这种模型等效的电源当外部负载电阻发生变化时, 其输出电压波动不大。我们常用的电池、收音机使用的稳压电源都属于这类电源。

实际的电源也可以以电流源的形式表现, 如图 1.23 (b) 所示, 它是由一恒定的电流为  $I_s$  的理想电流源和代表内阻为  $R_0$  的电阻元件并联而成, 这种组合称为电流源模型。这种模型等效的电源当外部负载电阻发生变化时, 输出电流波动很少。光电池在一定光照情况下产生的电流就是属于这类电源。

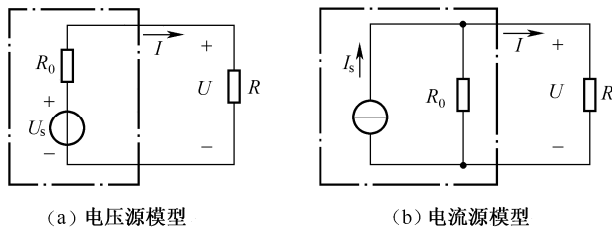


图 1.23 电源的模型

### 1.7.3 两种实际电源模型的等效变换

我们使用电压源模型或电流源模型来描述不同的电源是为了更符合这些电源的外部特性, 并便于对其进行分析。实际电源可以用电压源模型表示, 也可以用电流源模型表示。如果实际电源可以由不同的模型来表示, 那么二者之间就应有对应的转换关系, 我们可以从下面分析中得出结论。

在图 1.23 (a) 所示电压源模型中

$$I = \frac{U_s - U}{R_0} = \frac{U_s}{R_0} - \frac{U}{R_0}$$

在图 1.23 (b) 所示电流源模型中

$$I = I_s - \frac{U}{R_0}$$

比较上述两式，可得实际电压源与实际电流源等效变换条件是：

$$I_s = \frac{U_s}{R_0}$$

$$R_0 = R_0$$

可见，实际电压源转换成实际电流源时，已知理想电压源  $U_s$  和其内阻  $R_0$ ，则等效的理想电流源电流  $I_s = \frac{U_s}{R_0}$ ，内阻  $R_0$  保持不变；实际电流源转换成实际电压源时，已知理想电流源  $I_s$  和其内阻  $R_0$ ，则等效的理想电压源电动势  $U_s = I_s R_0$ ，内阻  $R_0$  保持不变。实际电压源和实际电流源之间相互转换如图 1.24 所示。

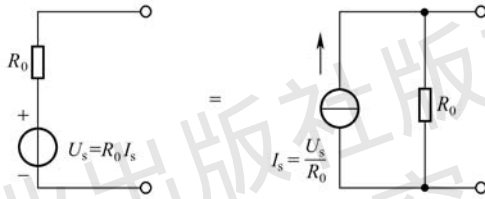


图 1.24 实际电压源和实际电流源的转换

注意，等效转换时，电压源中电压  $U_s$  的正极性端与电流源  $I_s$  的流出端相对应；理想电压源和理想电流源所串联或并联的电阻也不仅局限于电源的内阻。

**例 1.7** 电路如图 1.25 (a) 所示， $U_{s1}=10\text{V}$ ， $U_{s2}=8\text{V}$ ， $R_1=2\Omega$ ， $R_2=2\Omega$ ， $R_3=2\Omega$ ，求电阻  $R_3$  中的电流  $I_3$ （参考方向已标在图中）。

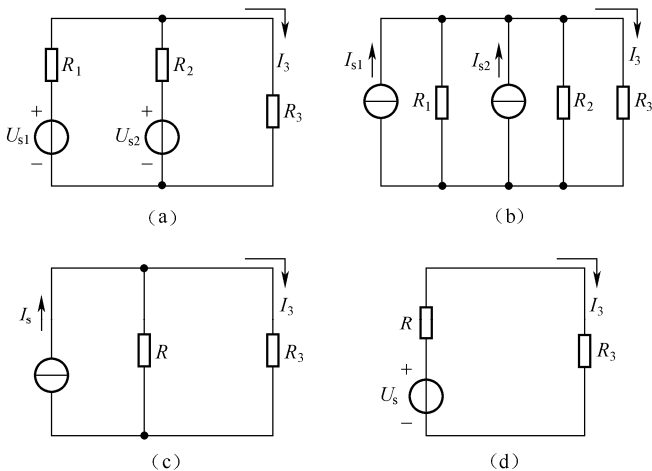


图 1.25 例 1.7 图

**解：**利用电源等效变换方法，将图 1.25 (a) 所示电路经几次变换，化简为简单电路，其过程如图 1.25 (b)、(c)、(d)，最后利用全电路欧姆定律求解电阻  $R_3$  中的电流  $I_3$ 。求解步骤如下：

(1)  $U_{s1}$ 、 $R_1$  和  $U_{s2}$ 、 $R_2$  两个电压源支路等效转换成  $I_{s1}$ 、 $R_1$  和  $I_{s2}$ 、 $R_2$  两个电流源，如图 1.25 (b) 所示。

$$I_{s1} = \frac{U_{s1}}{R_1} = \frac{10}{2} = 5 \text{ (A)}, \quad R_1 = R_1 = 2\Omega$$

$$I_{s2} = \frac{U_{s2}}{R_2} = \frac{8}{2} = 4 \text{ (A)}, \quad R_2 = R_2 = 2\Omega$$

(2) 电流源  $I_{s1}$ 、 $I_{s2}$  合并为一个电流源  $I_s$ ；两个电阻  $R_1$ 、 $R_2$  并联等效为一个电阻  $R$ ，如图 1.25 (c) 所示。

$$I_s = I_{s1} + I_{s2} = 5 + 4 = 9 \text{ (A)}$$

$$R = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} = \frac{2 \times 2}{2 + 2} = 1 \text{ (}\Omega\text{)}$$

(3) 电流源  $I_s$ 、 $R$  等效转换成电压源  $U_s$ 、 $R$ ，如图 1.25 (d) 所示。

$$U_s = R I_s = 1 \times 9 = 9 \text{ (V)}, \quad R = R = 1\Omega$$

(4) 利用全电路欧姆定律，求电阻  $R_3$  中的电流

$$I_3 = \frac{U_s}{R + R_3} = \frac{9}{1 + 2} = 3 \text{ (A)}$$

计算结果  $I_3$  为正值，说明设定的参考方向与实际方向一致。

## 1.8 基尔霍夫定律

### 学习目标

通过本节学习，学生应能：

- 描述支路、节点、回路及网孔概念。
- 解释基尔霍夫电流和电压定律。
- 应用基尔霍夫定律求解电路参数。

基尔霍夫定律是电路最基本，也是最重要的定律之一。基尔霍夫定律是由两个定律组成，在研究它们之前，先要学习几个有关的专业名词。

### 1.8.1 名词介绍

#### 1. 支路

由一个或几个元件首尾相接构成的无分支电路称为支路。在一条支路中流过同一个电流。如图 1.26 所示电路中有三条支路，即 AB、ED 和 FC。

#### 2. 节点

三个或三个以上支路的连接点叫做节点。图 1.26 电路中，只有 A、B 两点是节点。

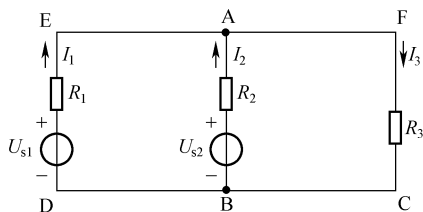


图 1.26 电路实例

### 3. 回路

电路中任一闭合路径都称为回路。图 1.26 电路中，有 ABDEA、ABCFA 和 EDCFE 三个回路。

### 4. 网孔

回路平面内不含有其他支路的回路称为网孔。图 1.26 电路中，回路 ABDEA 和 ABCFA 是网孔，而回路 EDCFE 平面内含有 AB 支路，所以它就不是网孔。

## 1.8.2 基尔霍夫定律

### 1. 基尔霍夫第一定律 (KCL)

基尔霍夫第一定律也称为基尔霍夫电流定律 (简称 KCL)。对于图 1.26 所示电路，其具体描述为：在电路中流入节点的总电流等于流出该节点的总电流。对于节点 A 有

$$I_1 + I_2 = I_3$$

也可以说对节点 A 流入和流出节点电流的代数和为零 (设流入节点的电流为正，流出节点的电流为负)。即

$$I_1 + I_2 - I_3 = 0$$

即

$$\sum I = 0$$

### 2. 基尔霍夫第二定律 (KVL)

基尔霍夫第二定律也称为基尔霍夫电压定律 (简称 KVL)。其具体描述为：沿任一闭合回路，电路中所有的电位升等于电路中所有的电位降。对于图 1.27 所示电路中的回路 II 有

$$U_{s2} = R_2 I_2 + R_3 I_3$$

由上式可得

$$-U_{s2} + R_2 I_2 + R_3 I_3 = 0$$

即

$$\sum U = 0$$

应用基尔霍夫电压定律时，必须先选定回路的绕行方向，可以是顺时针，也可以是逆时针。各元件的参考方向也应选定。若电压的参考方向与回路的绕行方向一致，则该项电压取正，反之取负。

对于图 1.27 所示电路，按回路 I 绕行方向，由于  $R_1 I_1$ 、 $U_{s2}$  的参考方向与绕行方向一致取正号，而  $U_{s1}$ 、 $R_2 I_2$  的参考方向与绕行方向相反取负号，即

$$R_1 I_1 - R_2 I_2 + U_{s2} - U_{s1} = 0$$

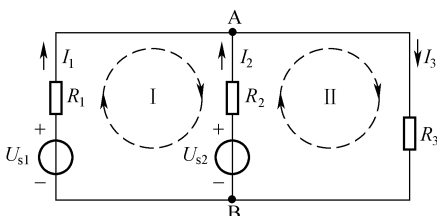


图 1.27 基尔霍夫定律举例电路图

**例 1.8** 在图 1.27 所示电路中, 若已知  $U_{s1}=10\text{V}$ ,  $I_1=3\text{A}$ ,  $I_3=2\text{A}$ ,  $R_1=2\Omega$ 。试求电阻  $R_3$  的值。

**解:** 根据 KVL 对  $U_{s1}$ 、 $R_1$ 、 $R_3$  回路列方程为:

$$-U_{s1} + R_1 I_1 + R_3 I_3 = 0$$

$$R_3 = \frac{U_{s1} - R_1 I_1}{I_3} = \frac{10 - 2 \times 3}{2} = 2 \text{ (}\Omega\text{)}$$

## 1.9 支路电流法

### 学习目标

通过本节学习, 学生应能:

- 解释复杂电路。
- 描述支路电流法的解题步骤。
- 运用支路电流法求解电路参数。

利用基尔霍夫定律, 列写求解方程, 可以解决复杂电路的未知量计算。所谓复杂电路是指如图 1.27 所示的这种无法用电阻串、并联等效后直接应用欧姆定律求解的电路。

支路电流法应用基尔霍夫第一定律、第二定律对节点和回路列出所需要的方程组, 然后求解各支路电流, 其步骤为 (以求解图 1.27 所示电路为例):

(1) 选择各支路电流参考方向。选取支路电流  $I_1$ 、 $I_2$  和  $I_3$  参考方向如图 1.27 所示。支路电流  $I_1$  和  $I_2$  方向向上, 支路电流  $I_3$  方向向下。电流的实际方向由计算结果决定, 计算结果为正, 说明选取的参考方向与实际方向一致, 反之则相反。

(2) 根据节点数列写独立的节点电流方程式。在图 1.27 所示电路中, 有 A 和 B 两个节点, 利用 KCL 列出节点方程式如下:

$$\text{节点 A: } I_1 + I_2 - I_3 = 0$$

$$\text{节点 B: } -I_1 - I_2 + I_3 = 0$$

显然这是 2 个相同的方程式, 说明只有 1 个方程式是独立的。一般来说, 电路中有  $n$  个节点, 那么它只能列出  $(n-1)$  个独立方程, 求解电路时, 可以在  $n$  个节点中任选其中  $(n-1)$  个方程。

(3) 根据自然网孔, 利用 KVL 列写回路电压方程式, 补齐不足的方程数。图 1.27 所示电路有 3 条支路, 但只有两个节点, 能列写出 1 个独立的电流方程, 因此必须再列写 2 个电

压方程补齐 3 个方程，以便求解 3 个未知电流。一般情况下以自然网孔为对象列写电压方程为宜，这样可以防止列写的电压方程不独立。利用 KVL 对回路 I 和回路 II 列写电压方程式如下：

$$\text{回路 I: } R_1 I_1 - R_2 I_2 + U_{S2} - U_{S1} = 0$$

$$\text{回路 II: } R_2 I_2 + R_3 I_3 - U_{S2} = 0$$

(4) 求解联立方程组，求出各支路电流数值。

$$\begin{cases} I_1 + I_2 - I_3 = 0 \\ R_1 I_1 - R_2 I_2 + U_{S2} - U_{S1} = 0 \\ R_2 I_2 + R_3 I_3 - U_{S2} = 0 \end{cases}$$

代入已知数值  $R_1$ 、 $R_2$ 、 $R_3$ 、 $U_{S1}$ 、 $U_{S2}$ ，可求得电流  $I_1$ 、 $I_2$ 、 $I_3$ 。

**例 1.9** 在图 1.27 所示电路中，已知  $R_1=5\Omega$ ， $R_2=10\Omega$ ， $R_3=15\Omega$ ， $U_{S1}=180\text{V}$ ， $U_{S2}=80\text{V}$ ，求各支路中的电流。

**解：**应用支路电流法求解该电路，因待求支路有 3 条，所以必须列出 3 个独立方程才能求解 3 个未知电流  $I_1$ 、 $I_2$  和  $I_3$ 。

设各支路电流参考方向及回路的绕行方向如图 1.27 所示。

由 KCL 得如下方程：

$$\text{节点 A: } I_1 + I_2 - I_3 = 0$$

由 KVL 得如下方程：

$$\text{回路 I: } R_1 I_1 - R_2 I_2 + U_{S2} - U_{S1} = 0$$

$$\text{回路 II: } R_2 I_2 + R_3 I_3 - U_{S2} = 0$$

求解联立方程组并代入参数得：

$$\begin{cases} I_1 + I_2 - I_3 = 0 \\ 5I_1 - 15I_2 + 80 - 180 = 0 \\ 10I_2 + 15I_3 - 80 = 0 \end{cases}$$

解联立方程可得：

$$I_1 = 12\text{A}, I_2 = -4\text{A}, I_3 = 8\text{A}$$

结果中的  $I_1$  和  $I_3$  为正值，说明电流的实际方向与参考方向一致； $I_2$  为负值，说明电流的实际方向与参考方向相反，即电流  $I_2$  是流入电动势  $U_{S2}$  的，此时电动势  $U_{S2}$  作为负载，也称为反电动势。蓄电池被充电就是这种情况。

**例 1.10** 在图 1.28 (a) 所示电路中，若已知  $U_S=2\text{V}$ ， $I_S=1\text{A}$ ， $R_1=1\Omega$ ， $R_2=3\Omega$ 。求  $V_a$ 。

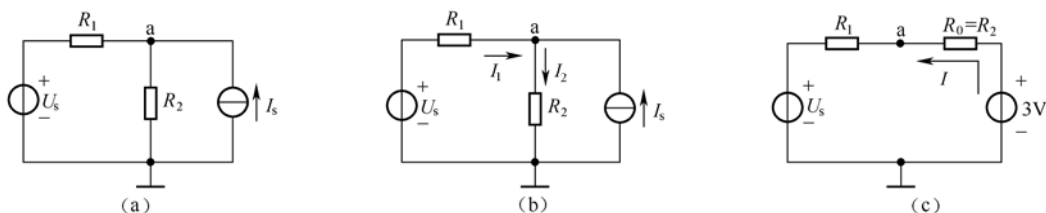


图 1.28 例 1.10 图

**解法 1：**由于  $V_a = U_2$ ，所以求  $V_a$  只要求出电阻  $R_2$  上的电压  $U_2$  即可。设流过电阻  $R_1$  和  $R_2$  的电流如图 1.28 (b) 所示。由基尔霍夫第一定律及第二定律分别得：

$$\begin{cases} I_1 - I_2 + I_s = 0 \\ -U_s + R_1 I_1 + R_2 I_2 = 0 \end{cases}$$

代入参数得:

$$\begin{cases} I_1 - I_2 + 1 = 0 \\ -2 + I_1 + 3I_2 = 0 \end{cases}$$

解联立方程可得:

$$I_2 = 0.75\text{A}$$

则

$$V_a = U_2 = 3 \times 0.75 = 2.25\text{V}$$

**解法 2:** 将电流源转换成电压源, 如图 1.28 (c) 所示。由全电路欧姆定律得:

$$I = \frac{R_0 I_s - U_s}{R_1 + R_0} = \frac{3 \times 1 - 2}{1 + 3} = 0.25 \text{ (A)}$$

$$V_a = -R_0 I + R_0 I_s = -3 \times 0.25 + 3 \times 1 = 2.25 \text{ (V)}$$

或

$$V_a = R_1 I + U_s = 1 \times 0.25 + 2 = 2.25 \text{ (V)}$$

## 习 题 1

### 一、判断题 (正确的打√, 错误的打×)

- 1.1 蓄电池在电路中必是电源, 总是把化学能转换成电能。( )
- 1.2 电流的参考方向, 可能是电流的实际方向, 也可能与实际方向相反。( )
- 1.3 判断一个元件是负载还是电源, 应根据电压实际极性和电流的实际方向来确定。当电压实际极性和电流的实际方向一致时, 该元件是负载, 消耗电能。( )
- 1.4 电路中某一点的电位具有相对性, 只有参考点确定后, 该点的电位值才能确定。( )
- 1.5 电路中两点间的电压具有相对性, 当参考点变化时, 两点间的电压将随之发生变化。( )
- 1.6 如果电路中某两点的电位都很高, 则该两点间的电压也很大。( )
- 1.7 当电路中的参考点改变时, 某两点间的电压也将随之改变。( )
- 1.8 额定电压为 220V, 额定功率为 100W 的用电设备, 当实际电压为 110V 时, 负载实际功率是 50W。( )
- 1.9 电阻值不随电压、电流的变化而变化的电阻, 即电阻值是常数的电阻称为线性电阻。( )
- 1.10 电灯泡的灯丝断裂后再搭上使用, 灯泡反而更亮, 其原因是灯丝电阻变小而功率增大了。( )
- 1.11 在公式  $R_2 = R_1 [1 + \alpha (t_2 - t_1)]$  中,  $\alpha$  称为导体的温度系数。 $\alpha$  的值必须大于零。( )
- 1.12 在工程上, 用公式  $R_2 = R_1 [1 + \alpha (t_2 - t_1)]$ , 测得  $R_1$  和  $R_2$  的阻值, 则可间接推算出电机、变压器的温升。( )
- 1.13 一根粗细均匀的电阻丝, 其阻值为  $4\Omega$ , 将其等分为两段, 再并联使用, 等效电阻是  $2\Omega$ 。( )
- 1.14 通过电阻的并联可以达到分流的目的, 电阻越大, 分流作用越显著。( )
- 1.15 在直流电路中, 电流相等的两个元件必属串联, 电压相等的两个元件必属并联。( )
- 1.16 电路中用短路线连接的两点电位相等, 所以可以把短路线断开而对电路其他部分没有影响。( )
- 1.17 理想电压源的内阻为无穷大, 理想电流源的内阻为零。( )
- 1.18 理想电压源 (恒压源), 它的外特性是一条平行于横坐标的直线。电子稳压电源可近似看作恒压



源。( )

- 1.19 理想电压源与理想电流源之间也可以进行等效变换。( )
- 1.20 实际电压源与实际电流源之间的等效变换, 不论对内电路还是对外电路都是等效的。( )
- 1.21 电流源  $I_s=5A$ ,  $R_0=1\Omega$ , 可以与  $U_s=10V$ ,  $R_0=1\Omega$  的电压源进行等效变换。( )
- 1.22 无法用串并联电路方法及欧姆定律求解的电路称为复杂电路。( )
- 1.23 利用基尔霍夫第一定律列写节点电流方程时, 必须已知支路电流的实际方向。( )
- 1.24 利用基尔霍夫第二定律列写回路电压方程时, 所设的回路绕行方向不同会影响计算结果的大小。( )
- 1.25 根据基尔霍夫定律, 与某节点相连各支路的电流实际方向不可能都同时流出该节点。( )

## 二、选择题

- 1.26 下列设备中, 其中( )是电源。  
A. 发电机      B. 蓄电池      C. 电视机      D. 电炉

- 1.27 如图 1.29 所示电路中, A 点的电位  $V_A$  是( )。  
A.  $V_A = IR - U_s$       B.  $V_A = IR + U_s$       C.  $V_A = -IR - U_s$       D.  $V_A = -IR + U_s$

- 1.28 下列说法正确的是( )。  
A. 电位随着参考点(零电位点)的选取不同而变化  
B. 电位差随着参考点的选取不同而变化  
C. 电路上两点的电位很高, 则其间电压也很大  
D. 电路上两点的电位很低, 则其间电压也很小

- 1.29 普遍适用的电功率计算公式是( )。

- A.  $P=IU$       B.  $P=I^2R$       C.  $P=U^2/R$

- 1.30 额定功率为 10W,  $500\Omega$  的电阻  $R_1$  与 15W,  $500\Omega$  的电阻  $R_2$  相串联后的等效电阻值及等效电阻的额定功率分别为( )。

- A.  $500\Omega$ , 10W      B.  $1k\Omega$ , 20W      C.  $1k\Omega$ , 25W      D.  $1k\Omega$ , 15W

- 1.31 现有额定值为 220V, 25W 的白炽灯一只, 准备串联一个小灯泡放在另一房间作为它的信号灯, 应选择的小灯泡规格为( )。

- A. 6V, 0.15A      B. 6V, 0.1A      C. 1.5V, 0.5A      D. 1.5V, 0.3A      E. 都不可以

- 1.32 通常电工术语“负载大小”是指( )的大小。

- A. 等效电阻      B. 总电流      C. 实际电压      D. 实际电功率

- 1.33 电阻器反映导体对电流起阻碍作用的大小, 简称( )。

- A. 电动势      B. 功率      C. 电阻率      D. 电阻

- 1.34 电路如图 1.30 所示, 图中  $R_1=R_2=R_3=1\Omega$ , 该电路的等效电阻  $R_{ab}$  为( )。

- A.  $3\Omega$       B.  $2\Omega$       C.  $1.5\Omega$       D.  $1\Omega$

- 1.35 对于全电路, 下列情况正确的是( )。

- A. 电源内阻压降与电源端电压之和等于电源电动势  
B. 外电路开路时, 电源端电压为无穷大  
C. 外电路开路时, 电源端电压为零  
D. 外电路短路时, 电源端电压等于电动势

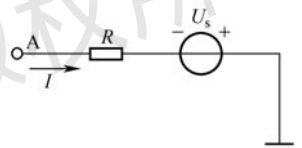


图 1.29

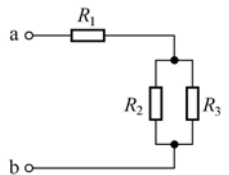


图 1.30

### 三、填空题

1.36 电源电动势的方向规定为从\_\_\_\_\_极指向\_\_\_\_\_极。

1.37 电压的方向规定由\_\_\_\_\_端指向\_\_\_\_\_端,是\_\_\_\_\_力移动电荷做功,通过负载把电能转换成其他形式的能。

1.38 在一个完整的电路中,\_\_\_\_\_的电路称为内电路;\_\_\_\_\_的电路称为外电路。

1.39 任何具有两个接线端的电路称为\_\_\_\_\_。若电路中有电源存在的称为\_\_\_\_\_。它可以简化成一个具有\_\_\_\_\_和\_\_\_\_\_串联的等效电源。

### 四、计算题

1.40 一台电动机的绕组用铜线绕制。在  $26^{\circ}\text{C}$  时,测得它的电阻为  $1.25\Omega$ ,运行一小时后,测得电阻为  $1.5\Omega$ 。求此时电动机线圈的温度。

1.41 某电源电动势为  $E=12\text{V}$ ,内阻  $R_0=0.1\Omega$ 。满载时的负载电阻  $R=1.9\Omega$ ,求该电路的额定工作电流  $I_N$  及短路电流  $I_{SC}$ 。

1.42 在电压  $U=220\text{V}$  的电源上并联接入一盏  $220\text{V}$ ,  $100\text{W}$  的白炽灯和一只  $220\text{V}$ ,  $500\text{W}$  的电炉。求该并联电路的总电阻及总电流。

1.43 利用串联电路电阻分压原理,可以组成图 1.31 所示分压器调节输出电压  $U_o$  的大小,设输入电压  $U_i=1\text{V}$ ,电位器的标称值  $RP=4.7\text{k}\Omega$ ,电阻  $R=0.3\text{k}\Omega$ ,求输出电压  $U_o$  的变化范围。

1.44 求如图 1.32 所示电路中各元件的电流、电压和功率。

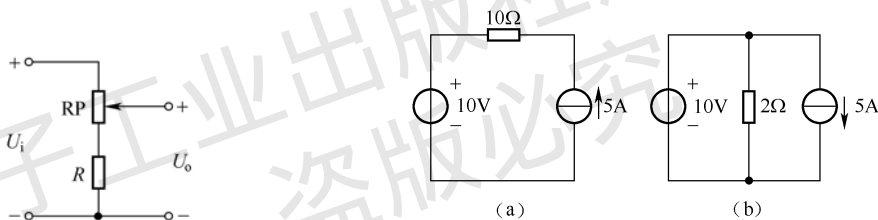


图 1.31

图 1.32

1.45 求图 1.33 所示电路中的  $U_{AB}$ 。

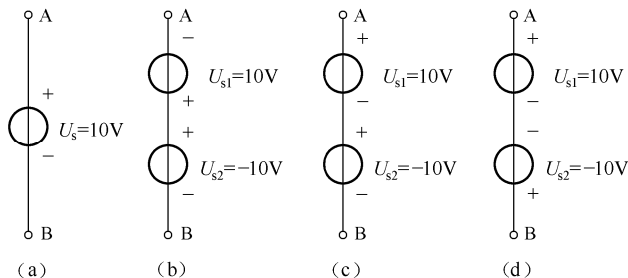


图 1.33

1.46 如图 1.34 所示电路,已知  $U_{AB}=110\text{V}$ ,求  $I$  和  $R$ 。

1.47 如图 1.35 所示电路,已知  $R_1=R_2=1\Omega$ ,  $R_3=4\Omega$ ,  $U_{s1}=18\text{V}$ ,  $U_{s2}=9\text{V}$ 。试用电压源与电流源等效变换的方法求电流  $I_3$ 。

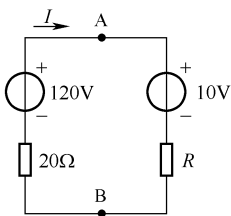


图 1.34

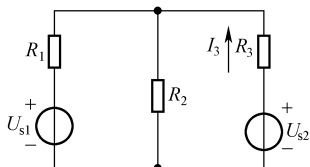


图 1.35

1.48 在图 1.36 所示电路中，每个线段表示一个二端网络，试求电路中的未知电流  $I$ 。

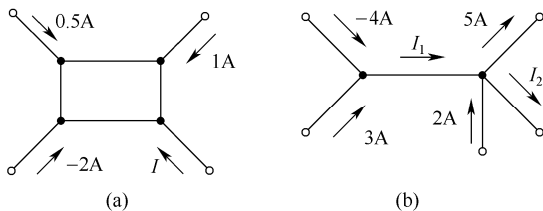


图 1.36

1.49 如图 1.37 所示电路。根据所标出的电流参考方向，用 KVL 定律列出回路电压方程。

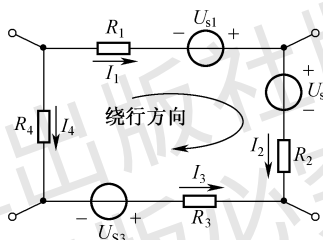


图 1.37

1.50 如图 1.38 所示电路，已知  $R_1=R_2=R_3=1\Omega$ ， $U_{s1}=2V$ ， $U_{s2}=4V$ 。试用支路电流法求支路电流  $I_1$ 、 $I_2$ 、 $I_3$ 。

1.51 用支路电流法求图 1.39 所示支路电流及电流源的电压  $U$ 。

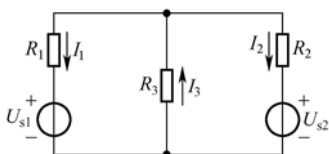


图 1.38

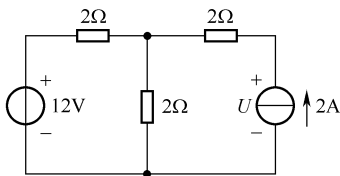


图 1.39