

# 2

## 单元 // // 直流电路的分析

### 单元目标

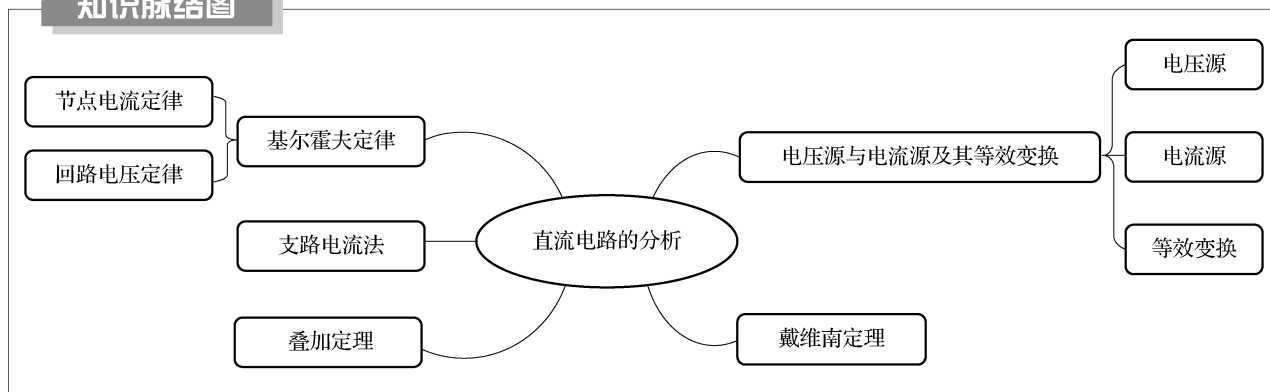
#### 知识目标

了解支路、节点、回路、网孔的概念；掌握基尔霍夫电流定律及其应用；掌握基尔霍夫电压定律及其应用；掌握支路电流法；掌握叠加原理；掌握多支路、多网孔电路的分析方法；了解理想电压源、理想电流源的特点及图形符号；掌握电压源与电流源相互转换的方法；掌握戴维南定理及其应用。

#### 能力目标

能正确搭建电路；能使用仪器、仪表和电子元器件对基尔霍夫电压定律进行验证；能使用仪器、仪表和电子元器件对基尔霍夫电流定律进行验证。

### 知识脉络图



## 任务

## 2.1

## 基尔霍夫定律

基尔霍夫定律包括基尔霍夫电流定律（KCL）和基尔霍夫电压定律（KVL），它们是计算和分析电路的基本定律，反映了电路中各电流、电压之间的约束关系。

在介绍基尔霍夫定律之前，以图 2-1 为例，首先介绍几个名词和术语。

### 1. 支路

没有分支的电路称为支路。如图 2-1 所示，电路有  $ABE$ 、 $ACE$ 、 $ADE$  三条支路。

### 2. 节点

三条或三条以上支路的交点称为节点。如图 2-1 所示，电路中  $A$ 、 $E$  都是节点， $B$ 、 $C$ 、 $D$  则不是节点。

### 3. 回路

电路中任意一个闭合路径称为回路，回路由一条或多条支路组成。如图 2-1 所示，此电路只有三个回路，分别是  $ABECA$ ， $ACEDA$ ， $ABEDA$ 。

### 4. 网孔

回路平面上不含支路的回路称为网孔。如图 2-1 所示电路中，回路  $ABECA$  和  $ACEDA$  就是网孔，而回路  $ABEDA$  平面内含有  $ACE$  支路，所以它不是网孔。

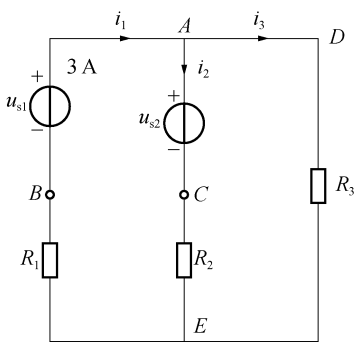


图 2-1 电路的名词和术语

#### 2.1.1 基尔霍夫电流定律

基尔霍夫电流定律（Kirchhoff Current Law, KCL）指出：“在集总电路中，任何时刻，对任一节点，所有流出节点的支路电流的代数和恒等于零。”此处，电流的“代数和”是根据电流是流出节点还

是流入节点判断的。若流出节点的电流前面取“+”号，则流入节点的电流前面取“-”号；电流是流出节点还是流入节点，均根据电流的参考方向判断。所以对任一节点有

$$\sum i = 0 \quad (2-1)$$

式(2-1)取和是对连接于该节点的所有支路电流进行。

在实际应用中，也可按这样的方法列写 KCL 方程：流出节点的电流总和等于流入节点的电流总和，即

$$\sum i_{\text{出}} = \sum i_{\text{入}} \quad (2-2)$$

这就是基尔霍夫电流定律的另一种表示形式，如图 2-2 所示。

若设流入电流为正，可写出 KCL 方程为

$$i_1 + i_4 - i_2 - i_3 - i_5 = 0 \text{ 或 } i_1 + i_4 = i_2 + i_3 + i_5$$

应注意的问题：

对于含有  $n$  个节点的电路，只能列出  $n-1$  个独立的电流方程。

列节点电流方程时，只需考虑电流的参考方向，而无须考虑电流的实际方向，当所计算的电流的数值为负值时，说明实际的电流方向与所选定的电流的参考方向相反，当所计算的电流的数值为正值时，说明实际的电流方向与所选定的电流的参考方向相同。

**【例 2-1】** 列写出图 2-3 所示电路中节点 A 的基尔霍夫电流定律表达式。

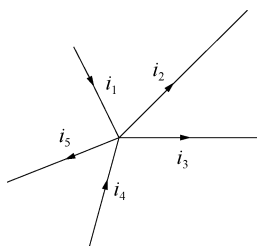


图 2-2 基尔霍夫电流节点表示方法

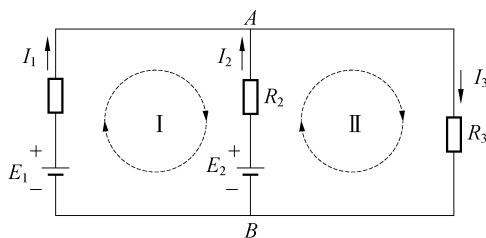


图 2-3 例 2-1 图

**【解】** 对于节点 A 上的电流，假设流入节点电流为正，流出节点电流为负，那么，根据式(2-1)可得

$$I_1 + I_2 + (-I_3) = 0$$

$$I_1 + I_2 = I_3$$

可见，基尔霍夫电流定律也可描述为流入节点的电流之和等于流出节点的电流之和。

**【例 2-2】** 列写出图 2-4 中电路基尔霍夫电流定律表达式。

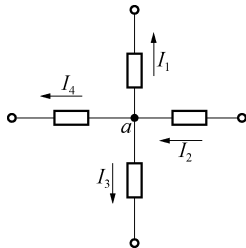


图 2-4 例 2-2 图

【解】若设流向节点  $a$  的电流为负，流出节点  $a$  的电流为正，根据 KCL 节点电流方程为

$$I_1 - I_2 + I_3 + I_4 = 0$$

若  $I_1 = 9 \text{ A}$ ,  $I_2 = -2 \text{ A}$ ,  $I_4 = 8 \text{ A}$ , 求  $I_3$ 。

有  $9 - (-2) + I_3 + 8 = 0$ ,

所以  $I_3 = -19 \text{ A}$ 。

$I_3$  电流为负值，是由于电流参考方向与实际方向相反所致。

### 2.1.2 KCL 的推广应用

KCL 不仅适用于节点，也可推广应用于包括数个节点的闭合面（可称为广义节点），即通过任一封闭面的所有支路电流的代数和恒等于零。

对于图 2-5 所示电路，应用 KCL 可得

$$i_1 + i_4 + i_6 = 0$$

$$-i_2 - i_4 + i_5 = 0$$

$$i_3 - i_5 - i_6 = 0$$

三式相加得：

$$i_1 - i_2 + i_3 = 0$$

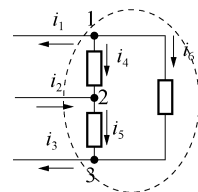


图 2-5 具有闭合面的基尔霍夫电流定律

结论：

(1) KCL 是电荷守恒和电流连续性原理在电路中任意节点处的反映。

(2) KCL 是对节点处支路电流施加的约束，与支路上接的是什么元件无关，与电路是线性还是非线性无关。

(3) KCL 方程是按电流参考方向列写的，与电流实际方向无关。

下面是对于 KCL 的推广应用的另外两个典型例子：

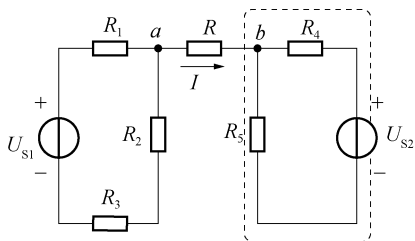


图 2-6 基尔霍夫电流定律推广电路之一

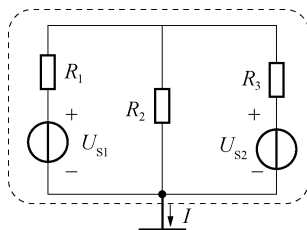


图 2-7 基尔霍夫电流定律推广电路之二

在图 2-6 和图 2-7 中， $I$  均为 0。

### 2.1.3 基尔霍夫电压定律

基尔霍夫电压定律（Kirchhoff Voltage Law, KVL）指出：“在集总电路中，任何时刻，沿任一回路，所有支路电压的代数和恒等于零。”

所以，沿任一回路有

$$\sum u = 0 \quad (2-3)$$

式(2-3)取和时，需要任意指定一个回路的绕行方向，凡支路电压的参考方向与回路的绕行方向一致者，该电压前面取“+”号；支路电压参考方向与回路绕行方向相反者，前面取“-”号。

图2-8中电路选逆时针为绕行方向，则

$$-E_2 + E_1 + U_4 - U_3 = 0$$

式中各电压和电动势的正、负符号的确定方法如下：

(1) 首先选定各支路电流的方向。

(2) 选择回路的绕行方向（既可沿着顺时针方向绕行，也可沿着逆时针方向绕行）。

(3) 电阻元件的端电压为 $\pm IR$ ，当通过电阻的电流方向与绕行方向一致时，该电阻上的电压取正号；否则取负号。

(4) 电源电压为 $\pm U$ ，当电源电压方向与回路绕行方向一致时，选取正号；否则取负号。

在图2-9中，各电压、电流参考方向已标出，选取回路绕行方向如图所示。根据KVL，可得

$$-U_1 - U_{S1} + U_2 + U_3 + U_4 + U_{S4} = 0$$

即

$$-R_1 I_1 + R_2 I_2 + R_3 I_3 + R_4 I_4 = U_{S1} - U_{S4}$$

**【例2-3】** 图2-10为某电路中的一个回路，通过A，B，C，D四个节点与电路的其他部分相连接，求电阻R的大小。

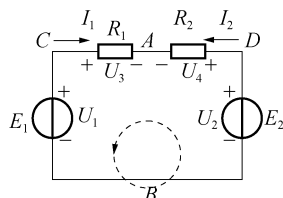


图2-8 基尔霍夫电压定律表达式

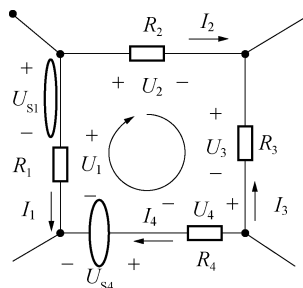


图2-9 基尔霍夫电压定律电压的参考方向

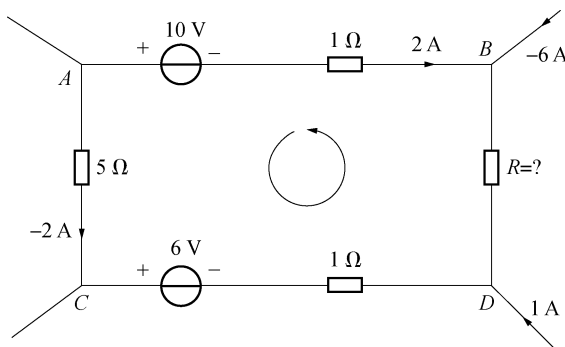


图2-10 例2-3图

**【解】** 先按KCL求出图中的未知电流：

$$I_{BD} = [2 + (-6)] \text{ A} = -4 \text{ A}; I_{DC} = (I_{BD} + 1) \text{ A} = (-4 + 1) \text{ A} = -3 \text{ A}$$

再按KVL求出电阻R上的电压：

$$U_{BD} = [-1 \times 2 - 10 + 5 \times (-2) + 6 - 1 \times I_{DC}] \text{ V} = -13 \text{ V}$$

从而求出电阻R为

$$R = \frac{U_{BD}}{I_{BD}} = \frac{13}{3} \Omega$$

### 2.1.4 KVL 的推广应用

KVL 不仅适用于电路中任一闭合回路，还可推广应用于任一不闭合回路。

如图 2-11 所示电路中，由 KVL 可得：

$$U_{ab} - R_3 I_3 + R_2 I_2 - U_{S2} - R_1 I_1 + U_{S1} = 0$$

所以

$$U_{ab} = -U_{S1} + R_1 I_1 + U_{S2} - R_2 I_2 + R_3 I_3$$

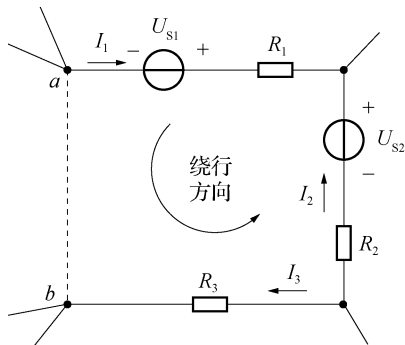


图 2-11 非闭合回路基尔霍夫电压定律

电路中任意两点间的电压  $U_{ab}$  等于从  $a$  点到  $b$  点的任一路径上各段电压的代数和。此即求解电路中任意两点间电压的方法。

结论：

- (1) KVL 的实质反映了电路遵从能量守恒定律。
- (2) KVL 是对回路中的各支路电压施加的线性约束，与回路各支路上接的是什么元件无关，与电路是线性还是非线性无关。
- (3) KVL 方程是按电压参考方向列写，与电压实际方向无关。

**【例 2-4】** 图 2-12 所示电路，电阻  $R$  有无电流？求电压  $u_1$  和  $u_2$ 。

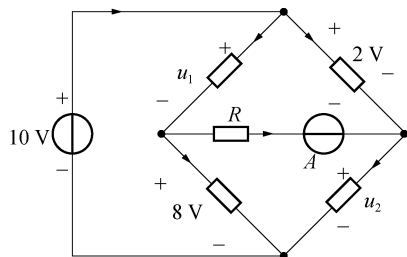


图 2-12 例 2-4 图

**【解】**  $u_1 = 2\text{ V}$ ， $u_2 = 8\text{ V}$ ， $R$  中无电流。



## 常见问题解析

### 1. 基尔霍夫电流定律中的节点电流的方向如何选择?

答: 从理论上讲, 基尔霍夫电流定律中节点电流的方向选择是任意的, 如果选择流入为正, 那流出就为负, 如果选择流出为正, 那么流入就为负, 所以节点电流的选择以方便计算为原则, 在同一道题里面方向统一就行。

### 2. 基尔霍夫电压定律中绕行方向如何选择?

答: 从理论上讲, 基尔霍夫电压定律中绕行方向选择是任意的, 如果选择逆时针为绕行方向, 那么顺时针就为负, 如果选择顺时针为绕行方向, 那么逆时针就为负, 在同一道题里面方向保持一致。

## 任务

## 2.2

## 支路电流法

### 2.2.1 支路电流法的解题方法

支路电流法是根据 KCL 和 KVL 及元器件的电压、电流关系 (Voltage Current Relation, VCR) 建立电路方程和求解方程的方法。对于线性电阻电路, 电路方程是一组线性代数方程。列写电路方程的最基本方法是支路分析法, 由支路分析法为基础得到的网孔分析法和节点分析法具有较少的方程数和变量数, 易于求解。

支路电流法的解题步骤如下:

- (1) 标出各支路电流的参考方向及回路的绕行方向。
- (2) 根据基尔霍夫电流定律列出各节点的电流方程。如果电路中有  $n$  个节点, 则可以列出  $n-1$  个独立电流方程。
- (3) 根据基尔霍夫电压定律列出回路的电压方程。如果电路中有  $b$  个支路电流是未知量, 则需要列出  $b$  个独立方程, 才能解出各支路电流。而根据 KCL 已经列出了  $n-1$  个独立的电流方程, 所以根据 KVL 应当再列出  $b-(n-1)$  个回路电压方程。
- (4) 求解联立的方程组, 得出各支路电流。

### 2.2.2 支路电流法的应用实例

【例 2-5】 图 2-13 电路中, 若  $R_1=5\ \Omega$ ,  $R_2=10\ \Omega$ ,  $R_3=15\ \Omega$ ,  $E_1=180\ \text{V}$ ,  $E_2=80\ \text{V}$ , 求各支路电流。

【解】待求支路电流有三个。

(1) 设电流参考方向。

(2) 对节点 A 列 KCL 方程：

$$I_1 + I_2 - I_3 = 0$$

(3) 选网孔绕行方向列 KVL 方程：

$$E_1 = R_1 I_1 + R_3 I_3$$

$$E_2 = R_2 I_2 + R_3 I_3$$

(4) 解联立方程组：

$$I_1 + I_2 - I_3 = 0$$

$$180 = 5I_1 + 15I_3$$

$$80 = 10I_2 + 15I_3$$

可得：

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

【例 2-6】如图 2-14 所示电路，已知  $E_1 = 42 \text{ V}$ ， $E_2 = 21 \text{ V}$ ， $R_1 = 12 \Omega$ ， $R_2 = 3 \Omega$ ， $R_3 = 6 \Omega$ ，试求：各支路电流  $I_1$ ， $I_2$ ， $I_3$ 。

【解】该电路支路数  $b=3$ 、节点数  $n=2$ ，所以应列出 1 个节点电流方程和 2 个回路电压方程。

(1)  $I_1 = I_2 + I_3$  (任一节点)

(2)  $R_1 I_1 + R_2 I_2 = E_1 + E_2$  (网孔 1)

(3)  $R_3 I_3 - R_2 I_2 = -E_2$  (网孔 2)

代入已知数据，解得： $I_1 = 4 \text{ A}$ ， $I_2 = 5 \text{ A}$ ， $I_3 = -1 \text{ A}$ 。

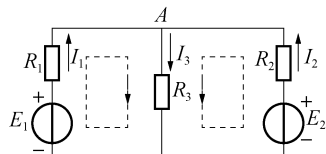


图 2-13 例 2-5 图

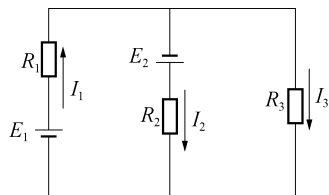


图 2-14 例 2-6 图



## 常见问题解析

1. 对于不同的网孔，它们的绕行方向必须一致吗？

答：不需要一致，每一个网孔都可以有自己的绕行方向。在网孔内部，根据网孔绕行方向列写基尔霍夫电压定律的方程。

2. 对于有  $n$  个节点的电路，可以列多少个独立方程？

答：可以列  $n-1$  个独立的方程。



任务

2.3

叠加定理

2.3.1 叠加定理的解题方法

叠加定理可表示为：在线性电路中当有多个电源作用时，电路中任意一个支路的电流或电压等于电路中每个电源分别单独作用时在该支路产生的电流或电压的代数和。

应用叠加定理分析电路时，应注意以下几个问题：

(1) 定理的表述中所谓某个电源单独作用于电路是指其他电源应对电路不起作用，也就是将其他电源看作零值，为此，应将其他的电压源短路，电流源开路。

(2) 叠加定理只适用于线性电路。从数学上看，叠加定理就是线性方程的可加性。前面支路电流法和节点分析法列出的都是线性方程，所以支路电流或电压都可以用叠加定理来求解。但功率的计算不能用叠加定理，因为功率不是电源电压或电流的一次函数。

2.3.2 叠加定理应用实例

**【例 2-7】** 电路如图 2-15 所示，已知  $U_{S1}=12\text{ V}$ ， $U_{S2}=6\text{ V}$ ， $R_1=2\ \Omega$ ， $R_2=2\ \Omega$ ， $R_3=2\ \Omega$ ，利用叠加定理求各支路中的电流  $I_1$ ， $I_2$ ， $I_3$ 。

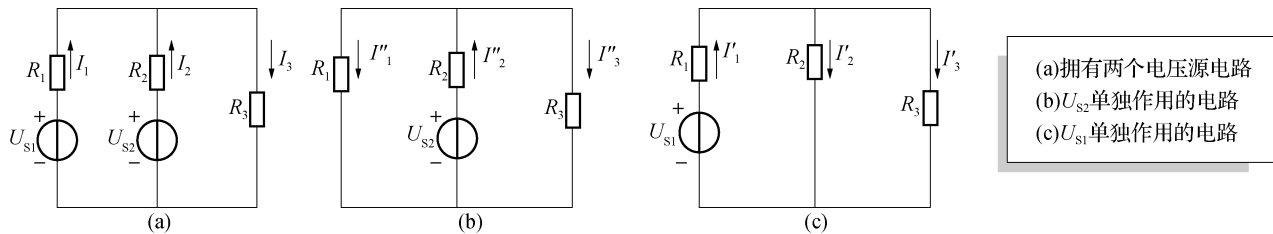


图 2-15 例 2-7 图

**【解】** 根据叠加定理，将图 2-15 (a) 分解成图 2-15 (c) (b)，并分别设定各图中电流参考方向。

$U_{S1}$  单独作用时，如图 2-15 (c) 所示有

$$I'_1 = \frac{U_{S1}}{R_1 + \frac{R_2 R_3}{R_2 + R_3}} = \left( \frac{12}{2 + \frac{2 \times 2}{2 + 2}} \right) \text{ A} = 4 \text{ A}$$

$$I'_2 = \frac{R_3}{R_2 + R_3} I'_1 = \left( \frac{2}{2 + 2} \times 4 \right) \text{ A} = 2 \text{ A}$$

$$I'_3 = \frac{R_2}{R_2 + R_3} I'_1 = \left( \frac{2}{2+2} \times 4 \right) \text{ A} = 2 \text{ A}$$

或

$$I'_3 = I'_1 - I'_2 = (4 - 2) \text{ A} = 2 \text{ A}$$

$U_{S2}$  单独作用时, 如图 2-15 (b) 所示有

$$I''_2 = \frac{U_{S2}}{R_2 + \frac{R_1 R_3}{R_1 + R_3}} = \left( \frac{6}{2 + \frac{2 \times 2}{2+2}} \right) \text{ A} = 2 \text{ A}$$

$$I''_1 = \frac{R_3}{R_1 + R_3} I''_2 = \left( \frac{2}{2+2} \times 2 \right) \text{ A} = 1 \text{ A}$$

$$I''_3 = \frac{R_1}{R_1 + R_3} I''_2 = \left( \frac{2}{2+2} \times 2 \right) \text{ A} = 1 \text{ A}$$

或

$$I''_3 = I''_2 - I''_1 = (2 - 1) \text{ A} = 1 \text{ A}$$

将  $U_{S1}$  和  $U_{S2}$  分别作用时产生的电流叠加, 也即求其代数和, 各电源分别作用时的电流方向与原电路电流方向一致时取“+”, 反之取“-”。

$$I_1 = I'_1 - I''_1 = (4 - 1) \text{ A} = 3 \text{ A}$$

$$I_2 = -I'_2 + I''_2 = (-2 + 2) \text{ A} = 0 \text{ A}$$

$$I_3 = I'_3 + I''_3 = (2 + 1) \text{ A} = 3 \text{ A}$$

计算结果  $I_2 = 0$ , 说明此时电压源  $U_{S2}$ 、 $R_2$  支路既没有释放功率, 也没有吸收功率, 电池充电达到额定值就是处于这种状态。



### 常见问题解析

#### 1. 什么是线性电路?

答: 简单来讲, 根据电路的电压, 电流等变量所列写的方程为一元一次方程的电路就是线性电路, 不包含有功功率的电路, 因为功率是电压或电流的二次方, 所以不是线性电路。

#### 2. 在应用叠加定理时, 暂时不用的电压源与电流源该如何处理?

答: 电压源短路, 电流源开路。

## 任务

### 2.4

## 电压源与电流源及其等效变换

电源是电路中提供能量的元件, 只有电阻而没有电源的电路中不可能有电流存在, 也就没有能量的转换发生。在实际生活中电源有电池、发电机、直流稳压电源等, 本书从实际电源抽象得到两种类型的

电路模型，即电压源和电流源，它们都是二端有源元件。

## 2.4.1 电压源

电压源是由电动势  $E$  和内阻  $R_0$  串联的电源的电路模型。

由图 2-16 电路可得： $U = E - IR_0$

若  $R_0 = 0$ ，理想电压源： $U = E$ 。

若  $R_0$  远小于  $R_L$ ，可近似认为是理想电压源，如图 2-17 所示。

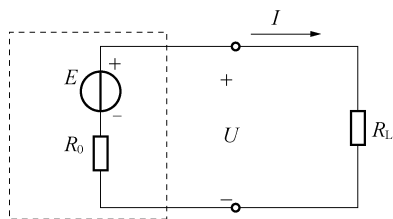


图 2-16 电压源模型

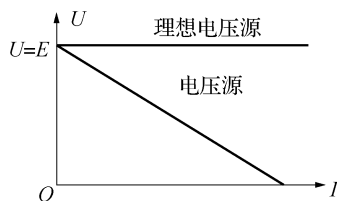


图 2-17 电压源的外特性

### 1. 电压源实际方向

电流从电压源的低电位流向高电位，外力克服电场力移动正电荷做功；电压源发出功率起电源作用。

常见的电压源有干电池、蓄电池、发电机等。

### 2. 理想电压源

如果一个二端元件接入任一电路后，其两端电压总能保持给定的值或一定的时间函数，其值与流过它的电流  $i$  无关，则该元件称为理想电压源，其电路模型如图 2-18 所示，外特性曲线如图 2-19 所示。

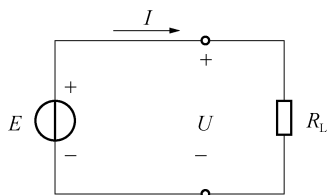


图 2-18 理想电压源电路模型

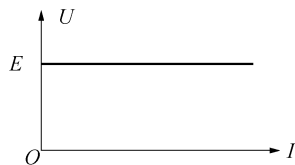


图 2-19 理想电压源外特性曲线

在理想电压源电路模型当中有：

- (1) 内阻  $R_0 = 0$ 。
- (2) 输出电压为一定值，恒等于电动势。对直流电压，有  $U \equiv E$ 。
- (3) 恒压源中的电流由外电路决定。

**【例 2-8】** 设  $E = 10 \text{ V}$ ，接上  $R_L$  后，求恒压源对外输出电压。

**【解】** 当  $R_L = 1 \Omega$  时， $U = 10 \text{ V}$ ， $I = 10 \text{ A}$ 。

当  $R_L = 10 \Omega$  时， $U = 10 \text{ V}$ ， $I = 1 \text{ A}$ 。

由此我们可以总结得到理想电压源特点（恒压源）：

- (1) 端电压固定不变或是时间  $t$  的函数  $U_S(t)$ ，与外电路无关。
- (2) 通过理想电压源的电流取决于它所连接的外电路。
- (3) 理想电压源内阻趋近于 0。

实际电压源，其端电压随电流的变化而变化，因为它有内阻。

## 2.4.2 电流源

电流源是由电流  $I_s$  和内阻  $R_0$  并联的电源的电路模型。

由图 2-20 电路可得：

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

电流源的外特性如图 2-21 所示，若  $R_0 = \infty$ ，则为理想电流源： $I \equiv I_s$ 。

若  $R_0$  远大于  $R_L$ ，可近似认为是理想电流源。

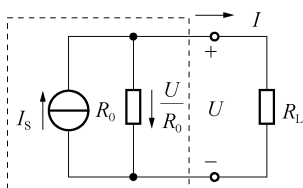


图 2-20 电流源模型

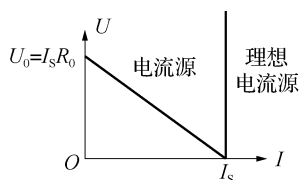


图 2-21 电流源的外特性

理想电流源：

其输出电流总能保持定值或一定的时间函数，其值与它的两端电压  $U$  无关的元件叫理想电流源。其电路模型如图 2-22 所示，理想电流源的外特曲线如图 2-23 所示。

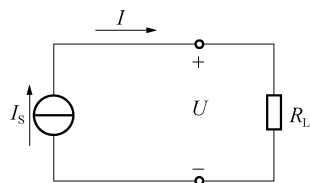


图 2-22 理想电流源电路模型

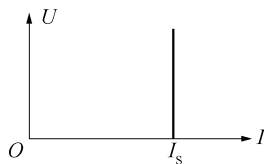


图 2-23 理想电流源外特性曲线

在理想电流源模型当中有：

- (1) 内阻  $R_0 = \infty$ 。
- (2) 输出电流是一定值，恒等于电流  $I_s$ 。
- (3) 恒流源两端的电压  $U$  由外电路决定。

**【例 2-9】** 设  $I_s = 10 \text{ A}$ ，接上  $R_L$  后，恒流源对外输出电流。

**【解】** 当  $R_L = 1 \Omega$  时， $I = 10 \text{ A}$ ， $U = 10 \text{ V}$ 。

当  $R_L = 10 \Omega$  时， $I = 10 \text{ A}$ ， $U = 100 \text{ V}$ 。

由此我们可以总结得到理想电流源的特点（恒流源）：

- (1) 输出的电流恒定不变。
- (2) 直流等效电阻无穷大。
- (3) 交流等效电阻无穷大。

实际上，如果一个电流源在电压变化时，电流的波动不明显，我们通常就假定它是一个理想电流源。

### 2.4.3 电压源与电流源的等效变换

电压源与电流源作为两种不同形式的电路模型，是可以相互转换的，如图 2-24 和图 2-25 所示。

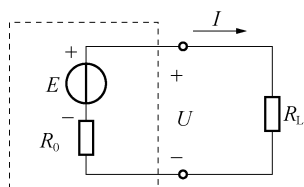


图 2-24 电压源

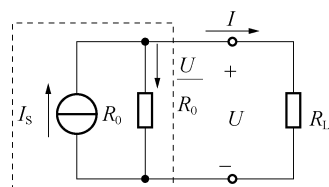


图 2-25 电流源

由图 2-24 有： $U = E - IR_0$ 。

由图 2-25 有： $U = I_s R_0 - IR_0$ 。

等效变换条件：

$$E = I_s R_0, I_s = \frac{E}{R_0}$$

电压源与电流源进行等效变换时应注意以下几点：

- (1) 电压源和电流源的等效关系只对外电路而言，对电源内部则是不等效的。
- (2) 等效变换时，两电源的参考方向要一一对应，如图 2-26 所示。

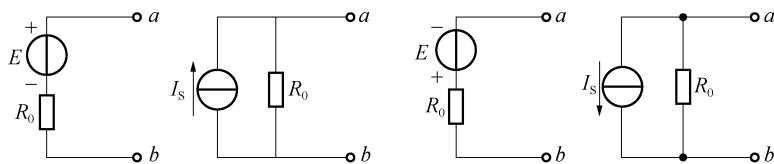


图 2-26 电压源与电流源变换时方向的对应关系

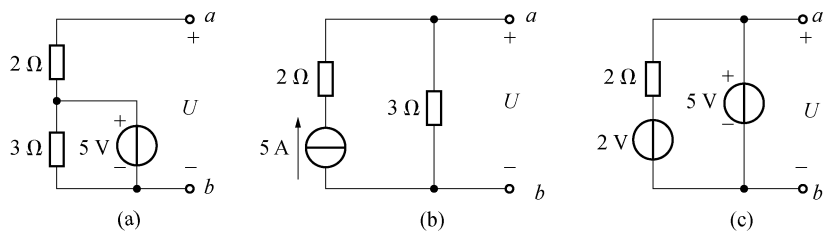
- (3) 理想电压源与理想电流源之间无等效关系。
- (4) 任何一个电动势  $E$  和某个电阻  $R$  串联的电路，都可化为一个电流为  $I_s$  和这个电阻并联的电路。

**【例 2-10】** 求图 2-27 各电路的等效电源。

**【解】** 根据电压源和电流源的特点可得它们对应的化简电源模型，如图 2-28 所示。

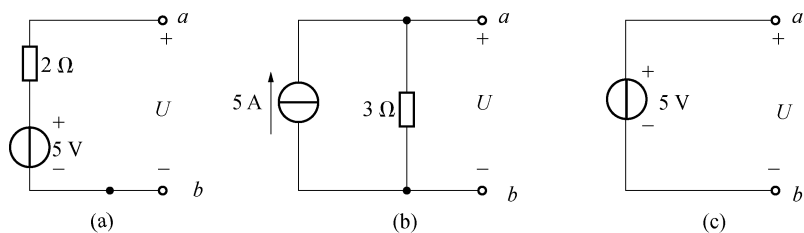
**【例 2-11】** 试用电压源与电流源等效变换的方法，计算  $2\ \Omega$  电阻中的电流，如图 2-29 所示。

**【解】** 应用电压源与电流源等效互换的原则，可以将图 2-29 依次等效为图 2-30 (a) ~ (c)。



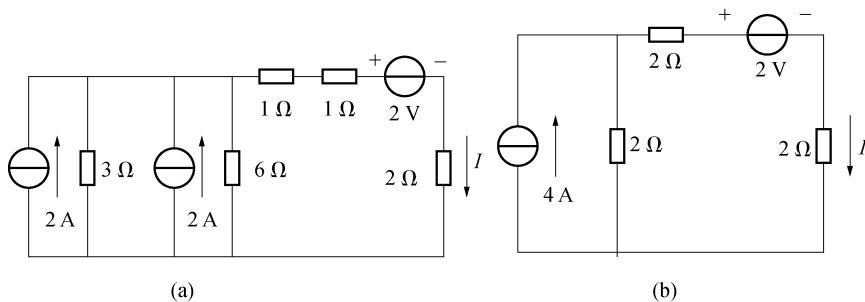
(a)电压源电路  
(b)电流源电路  
(c)电压源并联电路

图 2-27 例 2-10 电路图



(a)化简后电压源电路  
(b)化简后电流源电路  
(c)化简后电压源并联电路

图 2-28 例 2-10 化简后电路图



(a)电压源转换为电流源  
(b)电流源的合并  
(c)电流源转换成电压源

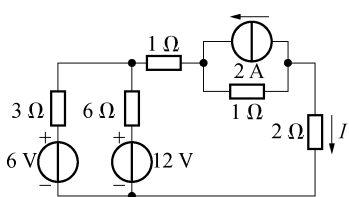


图 2-29 例 2-11 电路图

图 2-30 例 2-11 逐级化简电路图

由图 2-30 (c) 可得:

$$I = \left( \frac{8-2}{2+2+2} \right) \text{ A} = 1 \text{ A}$$

**【例 2-12】** 试用电压源与电流源等效变换的方法计算图 2-31 所示电路中  $1 \Omega$  电阻中的电流。

**【解】** 根据电压源与电流源等效互换的原则, 可以将图 2-31 依次等效为图 2-32 (a) ~ (d)。

由图 2-31 (e) 可得

$$I = \left( \frac{2}{2+1} \times 3 \right) \text{ A} = 2 \text{ A}$$

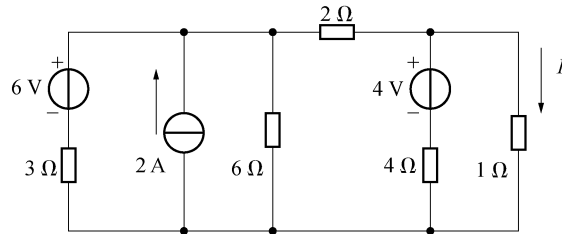


图 2-31 例 2-12 电路图

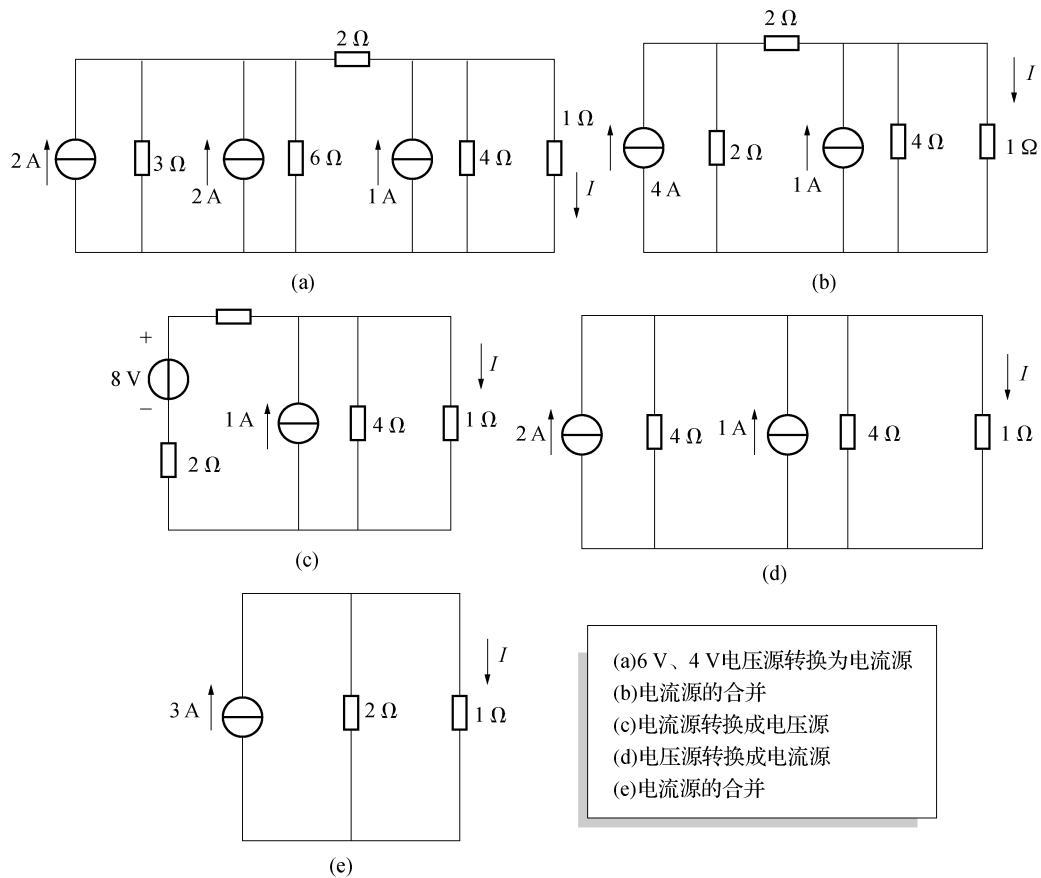


图 2-32 例 2-12 电路图化简步骤



### 常见问题解析

#### 1. 理想电压源与实际电压源的区别与联系？

答：理想电压源可以看成内阻为零的实际电压源，内阻与电压源串联。

#### 2. 理想电流源与实际电流源的区别与联系？

答：理想电流源可以看成内阻为无穷大的实际电流源，内阻与电流源并联。

## 任务

## 2.5

## 戴维南定理

## 2.5.1 有源二端网络定义

凡是具有两个端子的电路，不管其复杂程度如何，均称为二端网络。如果线性二端网络内部含有电源就称其为线性有源二端网络，如图 2-33 所示。

## 2.5.2 戴维南定理定义

任何一个线性有源二端网络的对外作用，总可以用一个电压源与一个电阻相串联的电路（即电压源模型）来等效代替。这个电压源的电压等于线性有源网络的开路电压，串联的电阻等于该网络内部电源均为零时的等效电阻。应用戴维南定理得到的化简电阻称为戴维南等效电路。

在图 2-34 中， $U_{OC}$  为有源二端网络的开路电压， $R_0$  为有源二端网络所有电源都不作用，从  $a$ 、 $b$  两点看进去的等效电阻。

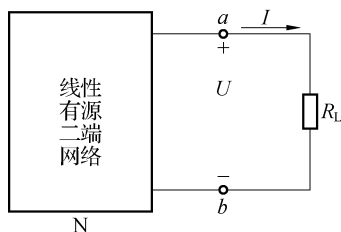


图 2-33 有源二端网络

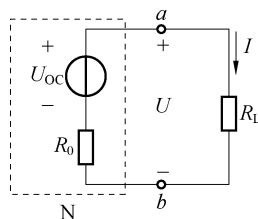


图 2-34 有源二端网络等效电路

**【例 2-13】** 求出下列有源二端网络的开路电压和等效电阻。

**【解】** 根据戴维南定理，图 2-35 中的图 (a) 可以等效为图 (c)，图 (b) 可以等效为图 (d)。

由图 2-35 (c)，有

$$U_s = \left( \frac{3}{2+3} \times 4 \right) \text{ V} = 2.4 \text{ V}$$

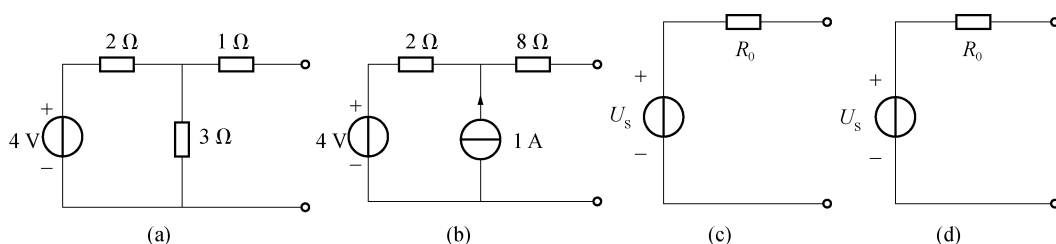
$$R_0 = \left( \frac{2 \times 3}{2+3} + 1 \right) \Omega = 2.2 \Omega$$

由图 2-35 (d)，有

$$U_s = (4 + 1 \times 2) \text{ V} = 6 \text{ V}$$



$$R_0 = (2+8) \Omega = 10 \Omega$$



(a)带电压源的二端网络 (b)带电压源与电流源的二端网络  
(c)带电压源的二端网络等效模型 (d)带电压源与电流源的二端网络等效模型

图 2-35 例 2-13 电路图



### 常见问题解析

#### 1. 如何除去独立电源?

答: 理想电压源用短接线代替; 理想电流源用开路代替。

#### 2. 二端口电路如何等效?

答: 任何一个两个端口的电路, 我们都可以把它看作一个“黑匣子”, 把它等效为一个电压源或者一个电流源的形式, 等效为电压源时需要串联内阻, 等效为电流源时需要并联内阻。



### 应用拓展

#### 一、受控电源 (非独立源)

电压或电流的大小和方向不是给定的时间函数, 而是受电路中某个地方的电压 (或电流) 控制的电源, 称为受控源。两种受控源的符号如图 2-36、图 2-37 所示。

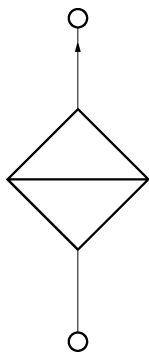


图 2-36 受控电流源

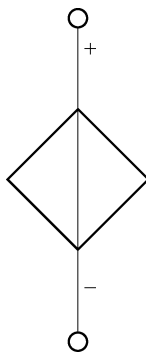


图 2-37 受控电压源

## 二、诺顿定理

任何一个含源线性二端口电路，对外电路来说，可以用一个电流源和电阻的并联组合来等效置换。电流源的电流等于该二端口的短路电流，电阻等于该二端口的输入电阻，如图 2-38、图 2-39 所示。

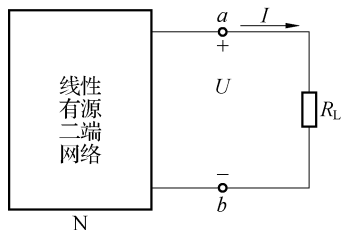


图 2-38 有源二端网络

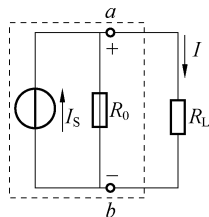


图 2-39 诺顿定理有源二端网络等效电路



### 思考与练习

#### 一、填空题

- 基尔霍夫定律包括\_\_\_\_\_，\_\_\_\_\_。
- 理想电压源的元件符号\_\_\_\_\_。
- 三个电阻分别为  $12\ \Omega$ ， $6\ \Omega$ ， $4\ \Omega$ ，并联时的阻值是\_\_\_\_\_  $\Omega$ 。
- 理想电压源输出的\_\_\_\_\_值恒定，输出的\_\_\_\_\_值由它本身和外电路共同决定；理想电流源输出的\_\_\_\_\_值恒定，输出的\_\_\_\_\_值由它本身和外电路共同决定。
- 应用叠加定理时：理想电压源不作用时视为\_\_\_\_\_，理想电流源不作用时视为\_\_\_\_\_。
- 实际电压源模型“ $20\ \text{V}$ ， $1\ \Omega$ ”等效为电流源模型时，其电流源  $I_s =$ \_\_\_  $\text{A}$ ，内阻  $R_i =$ \_\_\_  $\Omega$ 。

#### 二、判断题

- 集总参数元件的电磁过程都分别集中在各元件内部进行。 ( )
- 电压、点位和电动势定义形式相同，所以它们的单位一样。 ( )
- 电流由元件的低电位端流向高电位端的参考方向称为关联方向。 ( )
- 电路分析中一个电流得负值，说明它小于零。 ( )
- 电路中任意两个节点之间连接的电路统称为支路。 ( )
- 应用基尔霍夫定律列写方程式时，可以不参照参考方向。 ( )
- 电压电流计算得负值，说明它们的参考方向假设反了。 ( )



### 思考与练习

- 8. 理想电压源和理想电流源可以等效互换。 ( )
- 9. 两个电路等效, 即它们无论其内部还是外部都相同。 ( )
- 10. 电路等效变换时, 如果一条支路的电流为零, 可按短路处理。 ( )

### 三、计算题

1. 求图 2-40 所示的有源二端网络的戴维南等效电路。

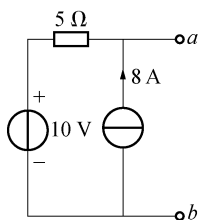


图 2-40 计算题第 1 题的图

2. 试用叠加定理求图 2-41 所示电路中的电流  $I$ 。

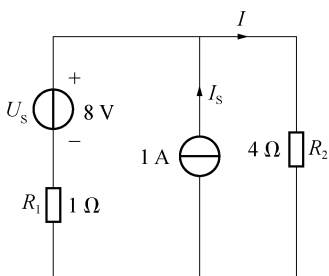


图 2-41 计算题第 2 题的图

3. 如图 2-42 所示电路, 若 (1)  $R_1, R_2, R_3$  不定; (2)  $R_1=R_2=R_3$ 。在以上两种情况下, 尽可能多地确定各电阻中各未知电流。

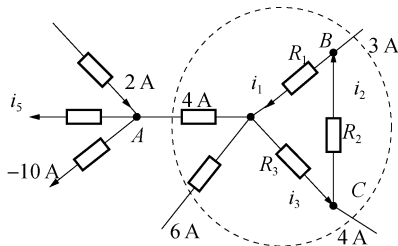


图 2-42 计算题第 3 题的图