

# 第 1 章 电工电子技术基础知识

## 本章要点

- 了解电路的基本概念及电路模型。
- 理解电流、电压的参考方向及关联方向的概念。
- 掌握欧姆定律、基尔霍夫定律的内容及应用。
- 理解电压源和电流源之间的等效变换。
- 掌握戴维南定理和诺顿定理。
- 熟悉电路的三种工作状态。

## 技能目标

- 会测量直流电路中的电流和电压。
- 能够对有源二端网络等效参数进行测量。
- 掌握电源外特性的测试方法，能够对电压源和电流源进行等效变换。

## 主要理论及工程应用导航

本章主要讲述了电路的基本概念、基本定律及电路分析方法，介绍了电路的工作状态，为后面分析各种电工电子电路奠定了必要的基础。

众所周知，现代生活离不开电，电灯、电视、电话、电冰箱、电梯等都要用电。现代工农业生产少不了电，现代科学技术更离不开电。电的作用变得越来越大，它渗透到人类生活的每一个角落。对于人类来说，电是如此的重要，又是如此的神奇。因此，作为 21 世纪的大学生，更有必要学习电的相关概念和知识。

## 1.1 太阳能水箱加热显示电路设计说明

### 1. 设计目的

掌握电路基本定律的应用。

### 2. 设计内容

太阳能晒水箱中的水在冬天往往温度不够高，要在水箱中加装一个“220V，2000W”的电热管，并利用一个“6V，1W”的小灯泡和一段  $10\Omega/m$  的电阻丝，为电热管安装一个指示灯，如果小灯泡两端的电压按 5V 设计，请你设计能够满足以上要求的电路图，电阻丝足够长并可按需进行截取。



## 1.2 电路的基本概念及基本定律

电路也称为电网络,是各种电器设备按照一定方式连接起来的整体。现代工程技术领域中存在着种类繁多、形式和结构各不相同的电路,但就其作用而言,主要包括两个方面:一是进行能量转换、传输和分配,如电力系统电路,发电机组将其他形式的能量转换成电能,经变压器、输电线传输到各用电部门后,用电部门再把电能转换成光能、热能、机械能等其他形式的能而加以利用;二是对信号的处理和传递,如收音机或电视机把电信号经过调频、滤波、放大等环节的处理,使其成为人们所需要的其他信号。电路的这两种作用在自动控制、通信、计算机技术等方面得到了广泛应用。

**思考:**什么是电路?如何求取电路中的电压和电流呢?

### 1.2.1 电路模型

实际的电路器件在工作时的电磁性质比较复杂,绝大多数器件具备多种电磁效应,给分析问题带来困难。为了使问题得以简化,便于探讨电路的普遍规律,在分析和研究具体电路时,对实际的电路器件,一般取其起主要作用的方面,并用一些理想电路元件来替代。所谓理想电路元件,是指在理论上具有某种确定的电磁性质的假想元件,它们以及它们的组合可以反映出实际电器元件的电磁性质和实际电路的电磁现象。因为实际电路元件虽然种类繁多,但在电磁性能方面可以把它们归类。例如,有的元件主要是供给能量的,它们能将非电能转化成电能,像干电池、发电机等就可用“电压源”这样一个理想元件来表示;有的元件主要是消耗电能的,当电流通过它们时就把电能转化成其他形式的能,像各种电炉、白炽灯等就可用“电阻元件”这样一个理想元件来表示;另外,还有的元件主要是储存磁场能量或储存电场能量的,就可用“电感元件”或“电容元件”来表示等。

用抽象的理想元件及其组合近似地替代实际电路元件,即把实际电路的本质特征抽象出来所形成的理想化了的电路就可构成与实际电路相对应的电路模型。以后所讨论的电路都是电路模型,通过对它们的基本规律进行研究,达到分析实际电路的目的。

### 1.2.2 参考方向

#### 1. 电流电压及其参考方向

带电粒子的定向移动形成电流。单位时间内通过导体截面的电荷量定义为电流强度,用它来衡量电流的大小。电流强度简称为电流,用*i*表示,根据定义有

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

式中:*dq*为导体截面中在*dt*时间内通过的电荷量。国际单位制中,电荷量的单位为库仑(C);时间单位为秒(s);电流单位为安培,简称安(A),有时还用千安(kA)、毫安(mA)、微安( $\mu$ A)等单位。

习惯上将正电荷移动的方向规定为电流的方向。

当电流的大小和方向不随时间而变化时,就称其为直流电流,简称直流(Direct Current, DC)。对不随时间变化的物理量一般都用大写字母来表示,即直流时,式(1-1)可以改写为

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

电荷在电路中运动,必定受到力的作用,也就是说力对电荷做了功。为了衡量其做功的能力,引入“电压”这一物理量,并定义电场力把单位正电荷从A点移动到B点所做的功称为A点到B点间的电压,用 $u_{AB}$ 表示。即

$$u_{AB} = \frac{dw_{AB}}{dq} \quad (1-3)$$

式中: $dw_{AB}$ 表示电场力将 $dq$ 的正电荷从A点移动到B点所做的功,单位为焦耳(J);电压单位为伏特,简称伏(V),有时还用千伏(kV)、毫伏(mV)、微伏( $\mu$ V)等单位。

直流时,式(1-3)应写成

$$U_{AB} = \frac{W_{AB}}{Q} \quad (1-4)$$

由电压的定义可知,如果正电荷从A点移动到B点是电场力做功,那么正电荷从B点移动到A点必定有一种外力在克服电场力做功,或者说电场力做了负功,即 $dw_{AB} = -dw_{BA}$ ,则 $u_{AB} = -u_{BA}$ 。这说明,电压是有方向的。电压的方向是电场力移动正电荷的方向。

以上对电流、电压规定的方向,是电路中客观存在的,称为实际方向,对于一些十分简单的电路可以直观地确定。但在分析计算较复杂一些的电路时,往往很难判断出某一元件或某一段电路上电流或电压的实际方向,而对那些大小和方向都随时间变化的电流或电压,要在电路中标出它们的实际方向就更不方便了。为此,在分析计算电路时采用标定“参考方向”的方法。

参考方向是人们任意选定的一个方向。例如,图1-1(a)和图1-1(b)所示的某电路中的一个元件,其电流的实际方向虽然事先不知,但它只有两种可能,不是从A流向B,就是从B流向A,可以任意选定一个作为参考方向并用箭头标出。图1-1中选定的参考方向是从A指向B,该方向与实际方向不一定一致。将电流用一个代数量来表示,若 $i > 0$ ,则表明电流的实际方向与参考方向是一致的,如图1-1(a)所示;若 $i < 0$ ,则表明电流的实际方向与参考方向是不一致的,如图1-1(b)所示。于是在选定的参考方向下,电流值的正、负就反映了它们的实际方向。

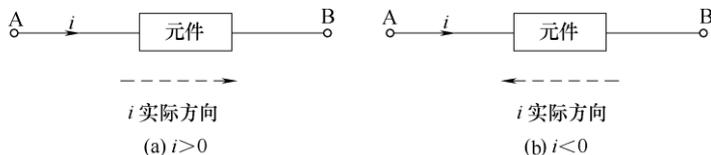


图 1-1 电流的参考方向与实际方向的关系

同样道理,电路中两点间的电压也可任意选定一个参考方向,并由参考方向和电压值



的符号反映该电压的实际方向。

电压的参考方向可以用一个箭头表示,如图 1-2(a)所示;也可以用正(+)、负(-)极性表示,称为参考极性,如图 1-2(b)所示;另外,还可以用双下标表示,如 $u_{AB}$ 表示 A、B 两点间电压的参考方向是从 A 指向 B 的。以上几种表示方法只需任选一种标出即可。

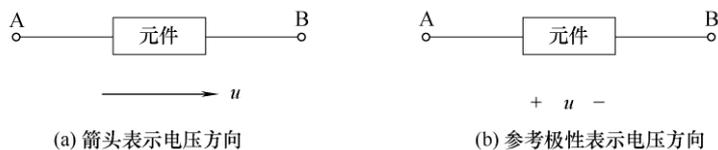


图 1-2 电压的参考方向与参考极性的表示方法

在以后的电路分析中,完全不必先去考虑各电流、电压的实际方向如何,而应首先在电路图中标定它们的参考方向,然后根据参考方向列写有关电路方程,计算结果的符号与标定的参考方向就反映了它们的实际方向。参考方向一经选定,在分析电路的过程中就不再变动。

对于同一个元件或同一段电路上的电压和电流的参考方向,彼此原是可以独立无关任意选定的,但为方便起见,习惯上常将电压和电流的参考方向选得一致,称其为关联的参考方向。为了简单明了,一般情况下,只需标出电压或电流中的某一个参考方向,这就意味着另一个选定的是与之相关联的参考方向。

## 2. 电位

在电路中任选一点 O 作为参考点,则该电路中某一点 A 到参考点的电压就叫作 A 点的电位,用 $u_A$ 表示。根据定义有

$$u_A = u_{AO} \quad (1-5)$$

电位实际上就是电压,其单位也是伏特(V)。

电路参考点本身的电位为零,即 $u_O = 0$ ,所以参考点也称零电位点。

电路中除参考点外的其他各点的电位可能是正值,也可能是负值,某点电位比参考点高,则该点电位就是正值,反之则为负值。

以电路中的 O 点为参考点,则另两点 A、B 的电位分别为 $u_A = u_{AO}$ 、 $u_B = u_{BO}$ ,它们分别表示电场力把单位正电荷从 A 点或 B 点移到 O 点所做的功,那么电场力把单位正电荷从 A 点移到 B 点所做的功 $u_{AB}$ 就等于电场力把单位正电荷从 A 点移到 O 点,再从 O 点移到 B 点所做的功的和,即

$$u_{AB} = u_{AO} + u_{OB} = u_{AO} - u_{BO} \text{ 或 } u_{AB} = u_A - u_B \quad (1-6)$$

式(1-6)说明,电路中 A 点到 B 点的电压等于 A 点电位与 B 点电位的差,因此,电压又称为电位差。

参考点是可以任意选定的,一经选定,电路中其他各点电位也就确定了。参考点选择不同,电路中同一点的电位会随之而变,但任意两点的电位差即电压是不变的。在电路中不指明参考点而谈某点的电位是没有意义的。在一个电路系统中只能选一个参考点。至于选哪点作为参考点要根据分析问题的方便而定。

### 3. 电动势

如图 1-3 所示的两个电极 A 和 B, A 带正电称正极, B 带负电称负极, 用导线把 A、B 两极连接起来, 在电场力的作用下, 正电荷沿着导线从 A 移动到 B(实质上是导体中的自由电子在电场力作用下从 B 移到了 A), 形成了电流  $i$ 。随着正电荷不断从 A 移到 B, A、B 两极间的电场逐渐减弱, 以至消失, 这样导线中的电流也会减至零。为了维持连续不断的电流, 必须保持 A、B 间有一定的电位差, 即保持一定的电场。这就需要有一种力来克服电场力, 把正电荷不断地从 B 极移到 A 极去。电源就是能产生这种力的装置, 这种力称为电源力。例如, 在发电机中, 导体在磁场中运动时, 就有磁场能转换为电源力; 在电池中, 就有化学能转换为电源力。

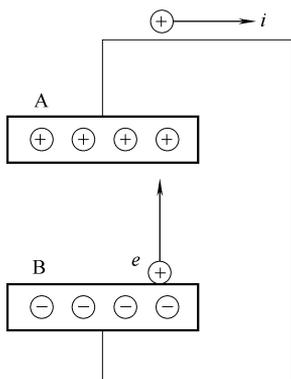


图 1-3 电源力做功示意图

电源力把单位正电荷从电源的负极移到正极所做的功称为电源的电动势, 用  $e$  表示, 即

$$e = \frac{dw_{BA}}{dq} \quad (1-7)$$

式中:  $dw_{BA}$  表示电源力将  $dq$  的正电荷从 B 移到 A 所做的功。显然, 电动势与电压有相同的单位——伏特(V)。

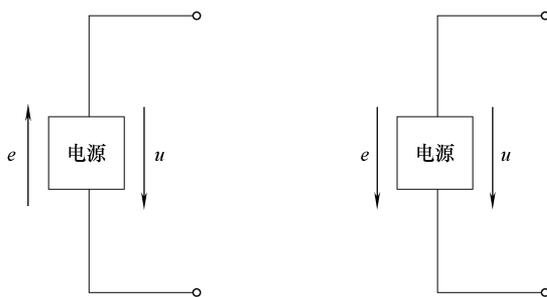
按照定义, 电动势的方向是电源力克服电场力移动正电荷的方向, 是从低电位到高电位的方向。对于一个电源设备, 如干电池, 其电动势  $e$  与电压  $u$  的参考方向选择相反, 如图 1-4(a)所示。当电源内部没有其他能量转换时, 根据能量守恒原理, 应有  $u = e$ ; 如果  $u$  和  $e$  的参考方向选择相同, 如图 1-4(b)所示, 则  $u = -e$  或  $e = -u$ 。

**【例 1-1】** 在图 1-5 所示电路中, O 为零电位点, 已知  $U_A = 50V$ ,  $U_B = -40V$ ,  $U_C = 30V$ 。①求  $U_{BA}$  和  $U_{AC}$ ; ②如果元件 4 为具有电动势  $E$  的电源装置, 在图 1-5 中所标的参考方向下求  $E$  的值。

**解:**

① 因为电压就是电位差, 所以

$$\begin{aligned} U_{BA} &= U_B - U_A = -40V - 50V = -90V \\ U_{AC} &= U_A - U_C = 50V - 30V = 20V \end{aligned}$$



(a)  $u$  和  $e$  的参考方向选择相反

(b)  $u$  和  $e$  的参考方向选择相同

图 1-4 电源的电动势  $e$  与端电压  $u$

② 根据电位的定义有  $U_B = U_{BO}$ 。在图 1-5 中, 电动势  $E$  的参考方向与电压  $U_{BO}$  的参考方向相同, 则有

$$E = -U_{BO} = -U_B = 40V$$

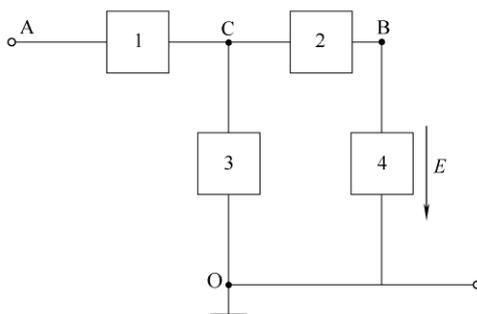


图 1-5 例 1-1 的电路图

#### 4. 功率与电能

正电荷从电路的高电位端移到低电位端是电场力对正电荷做了功, 该段电路吸收了电能; 正电荷从电路的低电位端移到高电位端是外力克服电场力做了功, 即这段电路将其他形式的能量转化成电能释放了出来。把单位时间内电路吸收或释放的电能定义为该电路的功率, 用  $P$  表示。设在  $dt$  时间内电路转化的电能为  $dw$ , 则

$$P = \frac{dw}{dt} \quad (1-8)$$

国际单位制中, 功率的单位为瓦特, 简称瓦(W)。此外还常用千瓦(kW)、毫瓦(mW)等单位。

对式(1-8)进一步推导, 可得

$$P = \frac{dw}{dt} = \frac{dw}{dq} \frac{dq}{dt} = ui \quad (1-9)$$

即电路的功率等于该段电路的电压与电流的乘积。直流时, 式(1-9)应写为

$$P = UI \quad (1-10)$$

在  $u$  和  $i$  的关联参考方向下, 若  $P > 0$ , 说明这段电路上电压和电流的实际方向是一致的, 电场力对正电荷做了功, 电路吸收了功率; 若  $P < 0$ , 则说明这段电路上电压和电流实际方向不一致, 一定是外力克服电场力做了功, 电路发出功率。在使用式(1-9)及式(1-10)时, 必须注意  $u$  和  $i$  的关联参考方向及各数值正、负号的含义。

根据能量守恒原理, 一部分元件或电路发出的功率一定等于其他部分元件或电路吸收的功率。或者说, 整个电路的功率是平衡的。

式(1-8)可写为  $dw = Pdt$ , 则在  $t_0$  到  $t_1$  的一段时间内, 电路消耗的电能为

$$W = \int_{t_0}^{t_1} P dt \quad (1-11)$$

直流时,  $P$  为常量, 则

$$W = P(t_1 - t_0) \quad (1-12)$$

国际单位制中, 电能  $W$  单位为焦耳(J), 它表示功率为 1W 的用电设备在 1s 内所消耗的电能。使用中还常采用千瓦时(kW·h)或度, 即

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

**【例 1-2】** 图 1-6 所示为某电路中的一部分, 三个元件中流过相同的电流  $I = -2\text{A}$ ,  $U_1 = -2\text{V}$ 。①求元件 a 的功率  $P_1$ , 并说明它是吸收还是发出功率; ②若已知元件 b 发出功率为 10W, 元件 c 的吸收功率为 12W, 求  $U_2$ 、 $U_3$ 。

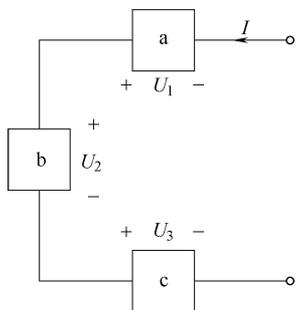


图 1-6 例 1-2 的电路图

解:

① 对于元件 a, 电压与电流是非关联参考方向, 计算功率的公式为

$$P_1 = -U_1 I$$

代入数据得  $P_1 = (-2\text{V}) \times (-2\text{A}) = 4\text{W}$ , 所以元件 a 吸收功率。

② 元件 b 的电压  $U_2$  与电流  $I$  是关联参考方向, 且发出功率, 则  $P_2$  为负值, 即

$$U_2 I = -10\text{W}$$

$$U_2 = \frac{-10\text{W}}{-2\text{A}} = 5\text{V}$$

同样道理, 对于元件 c 有

$$U_3 I = 12\text{W}$$

$$U_3 = \frac{12\text{W}}{-2\text{A}} = -6\text{V}$$



### 1.2.3 电路的基本定律

#### 1. 欧姆定律

电阻元件是反映电路器件消耗电能这一物理性能的一种理想元件。它有两个端钮与外电路相连接, 这样的元件都称为二端元件。在讨论各种理想元件的性能时, 重要的是要确定其端电压与电流之间的关系, 这种关系称为元件约束, 简称 VCR。欧姆定律反映了任一时刻电阻元件的这种约束关系。在电压与电流的关联参考方向下, 欧姆定律表达式为

$$u = iR \quad (1-13)$$

式中:  $R$  为电阻元件的电阻值, 单位为欧姆, 简称欧( $\Omega$ )。常用的单位还有千欧( $k\Omega$ )、兆欧( $M\Omega$ )等。

应用欧姆定律时要注意电压和电流的参考方向, 在电阻元件的电压及电流参考方向选择不关联时, 欧姆定律表示为

$$u = -iR \quad (1-14)$$

电阻  $R$  的倒数称为电导, 用  $G$  表示, 即

$$G = \frac{1}{R} \quad (1-15)$$

式中: 电导的单位为西门子(S)。

同一个电阻元件, 既可以用电阻  $R$  表示, 也可以用电导  $G$  表示。引用电导后, 欧姆定律可表示为

$$i = uG \quad (1-16)$$

#### 2. 基尔霍夫定律

电阻元件的性能是由元件的约束关系来表征的, 那么若干元件按一定方式连接后构成的电路整体, 它们相互间的电流和电压又有什么联系呢? 是如何相互制约的呢? 基尔霍夫定律反映了这类约束关系, 称为“拓扑约束”。

##### 1) 几个名词

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: 电路中的每个分支都叫支路。在图 1-7 所示电路中, ABE、ACE、ADE 这 3 个分支都是支路。一条支路中流过的电流, 称为支路电流, 如图 1-7 中的  $i_1$ 、 $i_2$ 、 $i_3$ 。ABE、ACE 两支路中含有有源元件, 称为有源支路; ADE 支路不含有源元件, 称为无源支路。

(2) 节点: 3 个或 3 个以上支路的连接点叫作节点。在如图 1-7 所示电路中, A、E 两点都是节点, 而 B、C、D 不能称为节点。这样, 支路也可看作是连接两个节点的一段分支。

(3) 回路: 电路中任一闭合路径都称为回路。在如图 1-7 所示的电路中, ABECA、ACEDA、ABEDA 都是回路, 此电路只有 3 个回路。

(4) 网孔: 回路平面内不含其他支路的回路就叫作网孔。在图 1-7 所示的电路中, 回

路 ABECA 和 ACEDA 就是网孔，而回路 ABEDA 平面内含有 ACE 支路，所以它就不是网孔。

网孔只有在平面电路中才有意义。所谓平面电路，就是将该电路画在一个平面上时，不会出现互相交叉的支路。

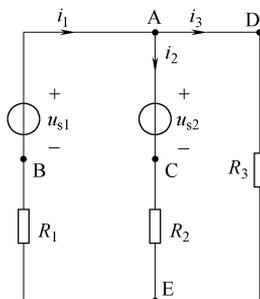


图 1-7 电路举例

## 2) 基尔霍夫电流定律

基尔霍夫电流定律也称基尔霍夫第一定律，可简称为 KCL(Kirchhoff's Current Law)。其内容是：任一时刻，流入(或流出)任一节点的所有支路电流的代数和恒等于零。数学表达式为

$$\sum i = 0 \quad (1-17)$$

电路的分析计算都是在事先指定参考方向的情况下进行的，在运用基尔霍夫电流定律数学表达式列写 KCL 方程时，应根据各支路电流的参考方向是流入还是流出来判断其在代数和中是取正号还是取负号。若流入节点的电流取正号，则流出的就应取负号。例如，对于图 1-7 所示电路中的节点 A，其 KCL 方程为

$$i_1 - i_2 - i_3 = 0$$

即

$$i_1 = i_2 + i_3$$

所以基尔霍夫电流定律可以表述为：任何时刻流入任一节点的电流必定等于流出该节点的电流。

KCL 方程中采用了参考方向，同时各电流本身的值还有正有负，所以在使用基尔霍夫电流定律时，必须注意两套正负号。

基尔霍夫电流定律通常用于节点，但也可以推广应用于电路中包围着几个节点的封闭面，在图 1-8 中，虚线框内画出的封闭面 S 包围了 3 个节点 A、B、C，下面分别写出这些节点的 KCL 方程。

节点 A 的 KCL 方程为

$$i_1 - i_4 + i_6 = 0$$

节点 B 的 KCL 方程为

$$i_2 + i_4 - i_5 = 0$$

节点 C 的 KCL 方程为

$$i_3 + i_5 - i_6 = 0$$

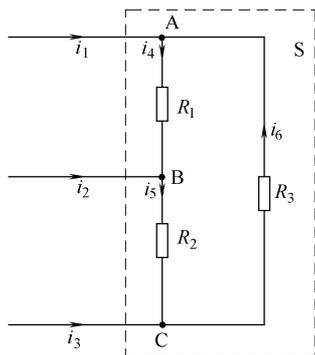


图 1-8 基尔霍夫电流定律的推广

以上三式相加, 得

$$i_1 + i_2 + i_3 = 0$$

可见, 流入电路中任一封闭面的电流的代数和恒等于零。

基尔霍夫电流定律体现了电流的连续性原理, 也即电荷守恒原理。在电路中进入某一地方多少电荷, 必定同时从该地方出去多少电荷。这就是在电路的同一条支路中各处电流都相等的道理。同时, 由 KCL 可知, 对于电路中不同支路, 一般情况下有着各不相同的支路电流。

**【例 1-3】** 如图 1-9 所示, 某电路 4 条支路汇集的一个节点 A, 指定的电流参考方向如图 1-9 所示。①列出节点电流方程; ②若已知  $I_1 = 5\text{A}$ ,  $I_2 = 2\text{A}$ ,  $I_3 = -3\text{A}$ , 求  $I_4$ 。

解:

① 根据基尔霍夫电流定律, 以流入节点电流为正, 流出为负, 对于节点 A 有

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

② 将已知电流代入节点电流方程:  $5\text{A} - 2\text{A} - (-3\text{A}) + I_4 = 0$ , 可得  $I_4 = -6\text{A}$ 。

注意  $I_2$  前的负号是因为它的参考方向是自节点流出的, 而  $I_3$  中的负号是由于它的实际方向与参考方向相反。计算这类问题时, 只需按参考方向列方程, 再将数值代入。不要去任意改动参考方向, 以免引起混乱。

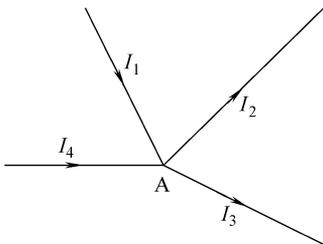


图 1-9 例 1-3 的示意图

### 3) 基尔霍夫电压定律

基尔霍夫电压定律也称基尔霍夫第二定律, 可简称为 KVL(Kirchhoff's Voltage Law)。其内容是: 任一回路各段(或各元件)电压在任一时刻的代数和恒等于零。数学表达式为

$$\sum u = 0 \quad (1-18)$$

应用式(1-18)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。各段(或各元件)的电压参考方向也应选定,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,反之则取负。同时,各电压本身的价值也还有正负之分,所以应用基尔霍夫电压定律时也必须注意两套正负号。例如,对于如图 1-10 所示的回路,选择顺时针绕行方向(按 ABCD 顺序绕行),按各元件上电压的参考极性,可列出的 KVL 方程式为

$$u_{R1} + u_{S1} + u_{R2} + u_{R3} - u_{R4} - u_{S2} = 0$$

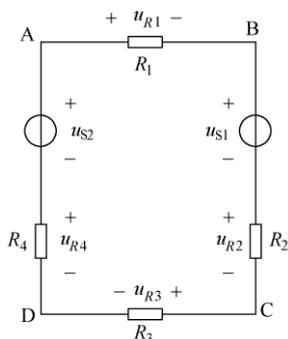


图 1-10 基尔霍夫电压定律的示意图

基尔霍夫电压定律实质上是电路中两点间的电压与路径选择无关这一性质的体现。从电路中的一点出发,经任意路径绕行一周回到原点,那么所经回路中所有电位升必定等于所有电位降。KVL 不仅适用于实际回路,也可推广应用于假想回路,如图 1-10 中假想回路 ACDA,可列出的 KVL 方程为

$$u_{AC} + u_{R3} - u_{R4} - u_{S2} = 0$$

即

$$u_{AC} = -u_{R3} + u_{R4} + u_{S2}$$

基尔霍夫电流定律和基尔霍夫电压定律从电路的整体上,分别阐明了各支路电流之间和各支路电压之间的约束关系。从以上讨论中可以看出,这种关系仅与电路的结构和连接方式有关,而与电路元件的性质无关。电路的这种拓扑约束和表征元件性能的元件约束共同统一了电路整体,支配着电路中各处的电压和电流,它们是分析电路的基本依据。

**【例 1-4】**如图 1-11 所示的电路是某电路的一部分,已知  $I_2 = 2\text{A}$ ,  $I_3 = 2\text{A}$ ,  $U_{S1} = 100\text{V}$ ,  $U_{S2} = 48\text{V}$ ,  $R_2 = 6\Omega$ 。求①  $U_{AC}$ ; ②  $R_1$ 。

解:

① 对假想回路 ACDEA,根据基尔霍夫电压定律(KVL)有

$$U_{AC} + R_2 I_2 - U_{S1} = 0$$

所以

$$U_{AC} = 100\text{V} - 2\text{A} \times 6\Omega = 88\text{V}$$

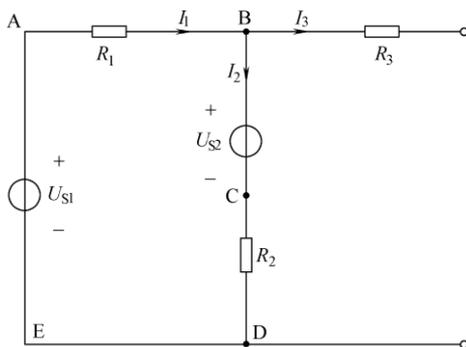


图 1-11 例 1-4 的电路图

② 根据基尔霍夫电流定律(KCL)有

$$I_1 = I_2 + I_3 = 4\text{A}$$

根据基尔霍夫电压定律(KVL)有

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

即  $4R_1 + 12 = 100 - 48$ , 可得  $R_1 = 10\Omega$ 。

## 1.3 电路的分析方法

### 1.3.1 电压源和电流源的等效变换

电源是将其他形式的能量转换为电能的装置。实际电源可以用两种不同的电路模型来表示；一种是以电压的形式向电路供电，称为电压源模型；另一种是以电流的形式向电路供电，称为电流源模型。

#### 1. 电压源

理想电压源如图 1-12(a)所示。 $U_s$  是电压源的电压， $R$  是外接负载电阻，电路中电压源  $U_s$  与电流  $I$  为非关联参考方向，电压源向外提供一个恒定的或按某一特定规律随时间变化的端电压。

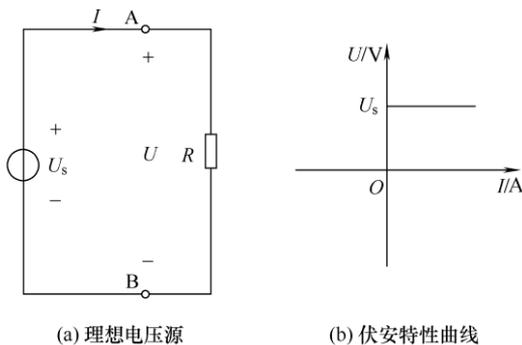


图 1-12 理想电压源及伏安特性曲线

如一个电压源向外提供一个恒定的端电压  $U_s$ ，接上负载  $R$  以后，电路中便有电流  $I$ ，其大小仅取决于负载  $R$  的大小，但不管负载如何变化，其端电压  $U = U_s$  始终是恒定的。电压源的电压电流关系曲线称为伏安特性曲线，是一根平行于电流轴的直线，如图 1-12(b) 所示。

实际电源不具备上述电压源的特性，即当外接电阻  $R$  变化时电源提供的端电压会发生变化，所以，实际电源的电压源模型可以用一个内阻  $R_0$  和电压源  $U_s$  的串联来表示，如图 1-13(a) 所示。电路中的电流  $I$  和电压  $U$  分别为

$$I = \frac{U_s}{R_0 + R} \quad (1-19)$$

$$U = U_s - R_0 I \quad (1-20)$$

由式(1-19)和式(1-20)可见，当负载  $R$  减小时，其输出电流  $I$  增大，在电源内阻  $R_0$  上的电压就增大，电源的端电压  $U$  就减小。其伏安特性曲线如图 1-13(b) 所示，显然，内阻  $R_0$  越小，伏安特性曲线越平坦，其输出电压越稳定，越接近电压源的开路电压  $U_s$ 。



图 1-13 实际电压源模型及伏安特性曲线

## 2. 电流源

理想电流源如图 1-14(a) 所示， $I_s$  是电流源的电流， $R$  是外接负载电阻，电路中的电流源  $I_s$  与电压  $U$  为非关联参考方向。电流源向外提供了一个恒定的电流  $I_s$ ，且电流  $I_s$  的大小与它的端电压大小无关，它的端电压大小仅仅取决于外电路负载  $R$  的数值，即  $U = I_s R$ 。

理想电流源的伏安特性曲线如图 1-14(b) 所示，它是一根垂直于电流轴的直线。

实际电源的电流源模型可以用一个内阻  $R_0$  与电流源  $I_s$  的并联来表示，如图 1-15(a) 所示，实际电源一般不具备电流源的特性。当外接电阻  $R$  发生变化时，输出电流会有波动。

由图 1-15(a) 可知，输出电流  $I = I_s - \frac{U}{R_0}$ 。显然，输出电流  $I$  的数值不是恒定的。当负载  $R$  短路时，输出电压  $U = 0$ ，输出电流  $I = I_s$ ；当负载  $R$  开路时，则输出电压  $U = I_s R_0$ ，输出电流  $I = 0$ ，其伏安特性曲线如图 1-15(b) 所示。

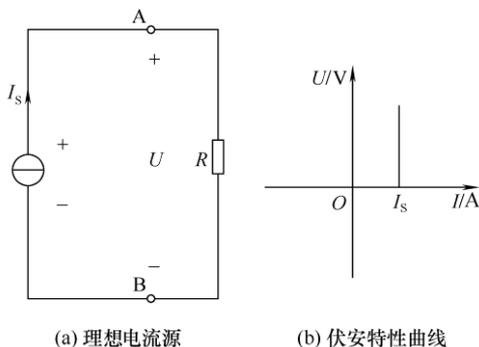


图 1-14 理想电流源及伏安特性曲线

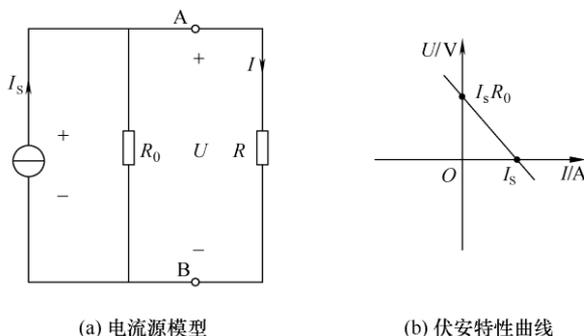


图 1-15 实际电流源模型及伏安特性曲线

### 3. 两种实际电源模型间的等效变换

从图 1-13(b)和图 1-15(b)中可以发现, 两者的伏安特性曲线是相同的, 在一定的条件下, 这两个外特性可以重合。这说明一个实际电源既可以用电压源模型表示, 也可以用电流源模型来表示。也就是说, 电压源模型和电流源模型对同一外部电路而言, 相互之间可以等效变换。变换后保持输出电压和输出电流不变(如图 1-16 所示), 从图 1-16 中可知, 在  $U$ 、 $I$  均保持不变的情况下, 等效变换的条件为

$$I_s = \frac{U_s}{R_0} \text{ 或 } U_s = I_s R_0 \quad (1-21)$$

$R_0$  保持不变, 但接法改变。特别要指出的是, 电压源模型与电流源模型在等效变换时  $U_s$  与  $I_s$  的方向必须保持一致, 即电流源流出电流的一端与电压源的正极性端相对应。

在电压源模型与电流源模型做等效变换时, 还应注意以下几个问题。

(1) 电压源模型与电流源模型的等效关系只是对相同的外部电路而言, 其内部并不等效。

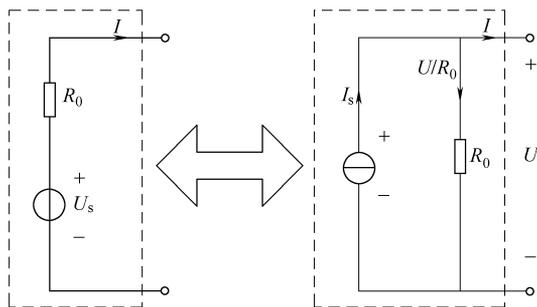


图 1-16 电压源模型与电流源模型的等效变换

(2) 理想电压源与理想电流源之间不能相互等效变换，这是因为理想电压源内阻  $R_0 = 0$ ，若能等效变换，则短路电流  $I_s = \frac{U_s}{R_0} = \infty$ ，这是没有意义的。同样，理想电流源内阻  $R_0 = \infty$ ，若能等效变换则开路电压  $U_s = I_s R_0 = \infty$ ，这也是没有意义的。

(3) 任何与电压源并联的两端元件不影响电压源电压的大小，在分析电路时可以舍去；任何与电流源串联的两端元件不影响电流源电流的大小，在分析时同样可以舍去(但在计算由电源提供的总电流、总电压和总功率时，两端元件不能舍去)。

在分析电路时，利用电源等效变换的方法可以简化电路，以方便计算。

**【例 1-5】** 求图 1-17 所示电路中的电流  $I$ 。

**解：**

根据电压源模型和电流源模型之间的等效变换，图 1-17 所示电路可简化为图 1-18(d) 的形式，简化过程如图 1-18(b)、(c)和(d)所示。则利用 KVL 列方程得

$$9 - 1I - 2I - 4 - 7I = 0$$

所以  $I = 0.5\text{A}$ 。

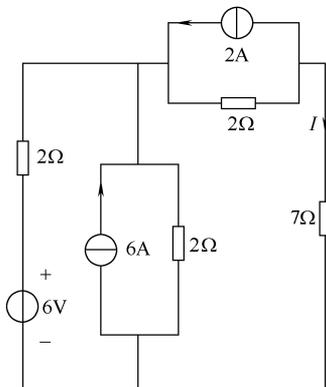


图 1-17 例 1-5 的电路图

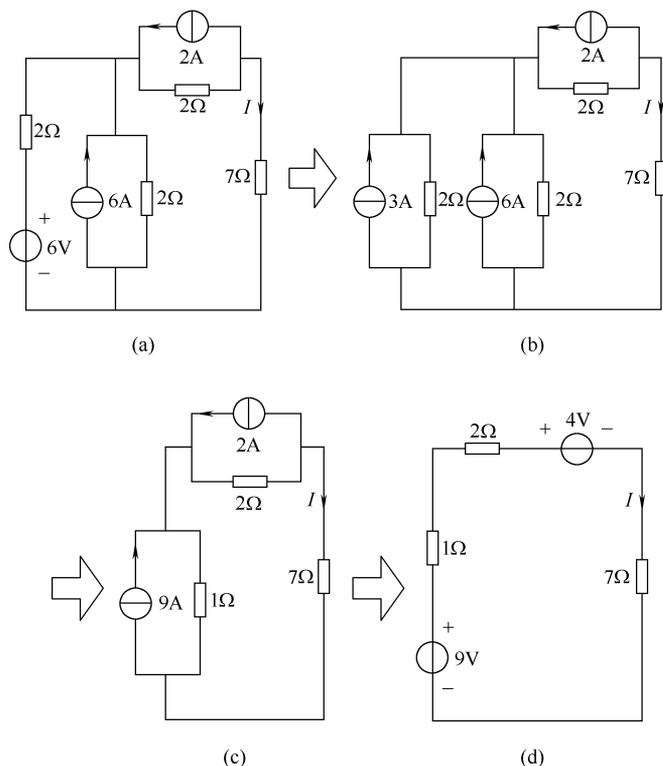


图 1-18 例 1-5 电路的简化过程图

根据基尔霍夫定律，串联的恒压源和并联的恒流源可以合并，所以较为复杂的电路中存在着多个电源时，可通过将电源变换、合并的方法使电路简化，便于分析计算。使用电压源、电流源等效变换的方法分析电路时，应注意所求支路不得参与变换。

### 1.3.2 戴维南定理与诺顿定理

戴维南定理和诺顿定理是分析线性电路非常有利的工具。

#### 1. 戴维南定理

定理内容：任何一个线性含源单口网络，就端口特性而言，可以等效为一个电压源和电阻串联的单口网络，电压源的电压等于单口网络端口处的开路电压  $U_{oc}$ ；串联电阻  $R_0$  等于单口网络中所有独立源为零值时所得无源网络  $N_0$  的等效电阻，如图 1-19 所示。

在图 1-19(a)中，电压源与电阻串联支路称为戴维南等效电路，其中电阻串联在电路中，当单口网络视为电源时，常称为输出电阻，用  $R_0$  表示；当单口网络视为负载时，则称为输入电阻，用  $R_i$  表示。

应用戴维南定理，可以简化线性含源单口网络，进而使电路分析变得简便。

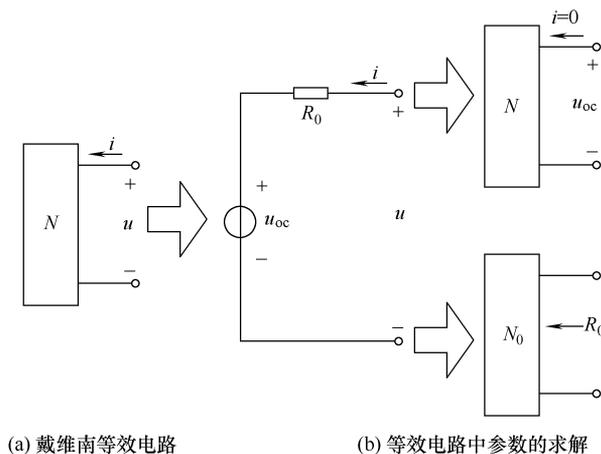


图 1-19 戴维南等效电路

**【例 1-6】** 求如图 1-20(a)所示的含源单口网络的戴维南等效电路。

**解:**

首先求含源单口网络的开路电压  $U_{oc}$ 。

将 2A 电流源和 4Ω 电阻的并联电路等效变换为 8V 电压源和 4Ω 电阻的串联，如图 1-20(b)所示，由于 A、B 两点间开路，所以左边回路是一个单回路(串联回路)，则回路电流为

$$I = \frac{36V}{6\Omega + 3\Omega} = 4A$$

所以  $U_{oc} = U_{AB} = -8V + 3I = -8V + 3\Omega \times 4A = 4V$ 。

再求等效电阻  $R_0$ 。电压源用短路线代替，电流源用开路线代替，如图 1-20(c)所示。

$$R_0 = 4\Omega + \frac{3 \times 6}{3 + 6}\Omega = 6\Omega$$

则所求戴维南等效电路如图 1-20(d)所示。

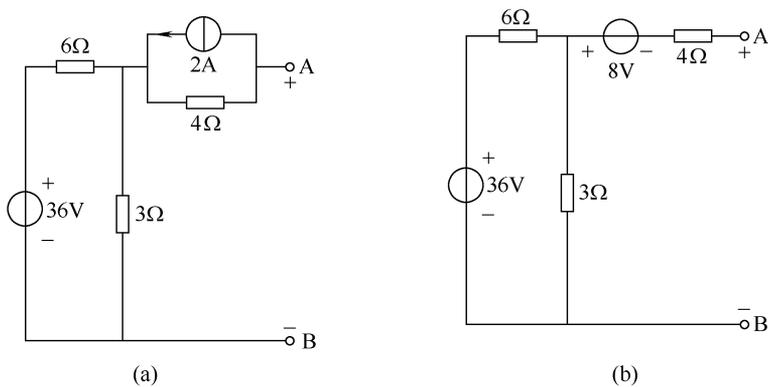


图 1-20 例 1-6 的电路图

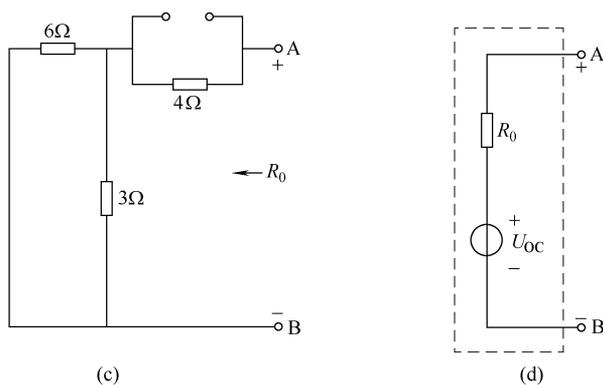


图 1-20 (续)

**【例 1-7】** 电桥电路如图 1-21(a)所示, 当  $R = 2\Omega$  和  $R = 20\Omega$  时, 求通过电阻  $R$  的电流  $I$ 。

**解:**

这是一个复杂电路, 如果用前面学过的知识求解比较复杂, 而用戴维南定理分析, 就比较方便了。

将图 1-21(a)中电路待求支路断开, 得到如图 1-21(b)所示的含源单口网络。求这个含源单口网络的戴维南等效电路。

在图 1-21(b)中选定支路电流  $I_1$ ,  $I_2$ , 参考方向如图 1-21(b)所示。

$$I_1 = \frac{36\text{V}}{4\Omega + 8\Omega} = 3\text{A} \quad I_2 = \frac{36\text{V}}{4\Omega + 2\Omega} = 6\text{A}$$

所以 AB 端的开路电压  $U_{oc} = U_{AB} = 8I_1 - 2I_2 = (8 \times 3 - 2 \times 6)\text{V} = 12\text{V}$ 。

求等效电阻  $R_0$ 。电压源用短路线代替, 如图 1-21(c)所示。

$$R_0 = \frac{4 \times 8}{4 + 8}\Omega + \frac{4 \times 2}{4 + 2}\Omega = 4\Omega$$

图 1-21(b)所示的含源单口网络的戴维南等效电路如图 1-21(d)所示, 接上电阻  $R$  即可求出电流  $I$ 。

$$\text{当 } R = 2\Omega \text{ 时, } I = \frac{U_{oc}}{R_0 + R} = \frac{12\text{V}}{4\Omega + 2\Omega} = 2\text{A}。$$

$$\text{当 } R = 20\Omega \text{ 时, } I = \frac{U_{oc}}{R_0 + R} = \frac{12\text{V}}{4\Omega + 20\Omega} = 0.5\text{A}。$$

用戴维南定理分析电路中某一条支路电流或电压的一般步骤总结如下。

- (1) 把待求支路从电路中断开, 电路的其余部分就是一个(或几个)含源单口网络。
- (2) 求含源单口网络的戴维南等效电路, 即求  $U_{oc}$  和  $R_0$ 。
- (3) 用戴维南等效电路代替原电路中的含源单口网络, 求出待求支路的电流或电压。

## 2. 诺顿定理

诺顿定理研究的对象也是线性含源单口网络。其内容表述为: 任何一个线性含源单口网络, 就其端口特性而言, 可以等效为一个电流源和电阻并联的单口网络, 如图 1-22(a)所示。电流源的电流等于单口网络端口处的短路电流  $I_{sc}$ ; 并联电阻  $R_0$  等于单口网络中所有

独立源为零值时所得无源网络  $N_0$  的等效电阻, 如图 1-22(b)所示。

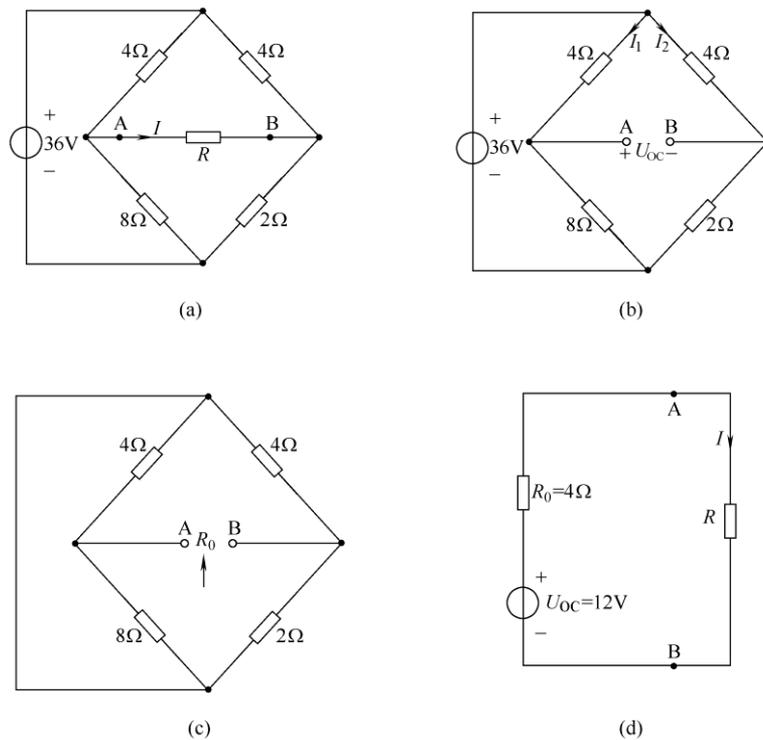


图 1-21 例 1-7 的电路图

如图 1-22(a)所示, 电流源与电阻的并联模型称为诺顿等效电路。应用诺顿定理, 同样可以简化线性含源单口网络。

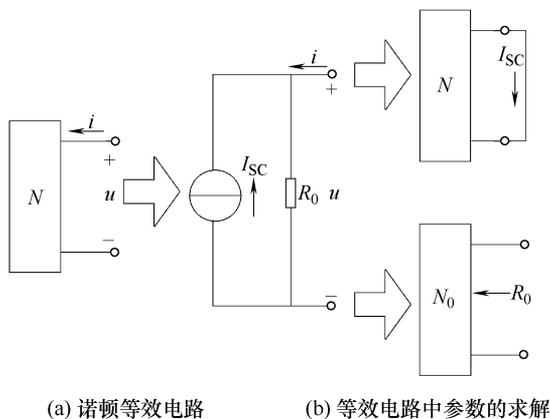


图 1-22 诺顿等效电路

**【例 1-8】** 求图 1-23(a)所示含源单口网络的诺顿等效电路。

解:

首先求 AB 两点间的短路电流  $I_{sc}$ ，如图 1-23(b)所示。选定电流  $I_1$ 、 $I_2$  的参考方向如图 1-23(b)所示。

$$I_1 = \frac{8V}{2\Omega} = 4A, \quad I_2 = \frac{12V}{6\Omega} = 2A$$

由 KCL 得

$$I_1 = I_2 + I_{sc}$$

所以短路电流  $I_{sc} = I_1 - I_2 = 4A - 2A = 2A$ 。

求等效电阻  $R_0$ 。电压源用短路线代替，得无源单口网络 AB，如图 1-23(c)所示。

$$R_0 = \frac{2 \times 6}{2 + 6} \Omega = 1.5\Omega$$

求得诺顿等效电路如图 1-23(d)所示。

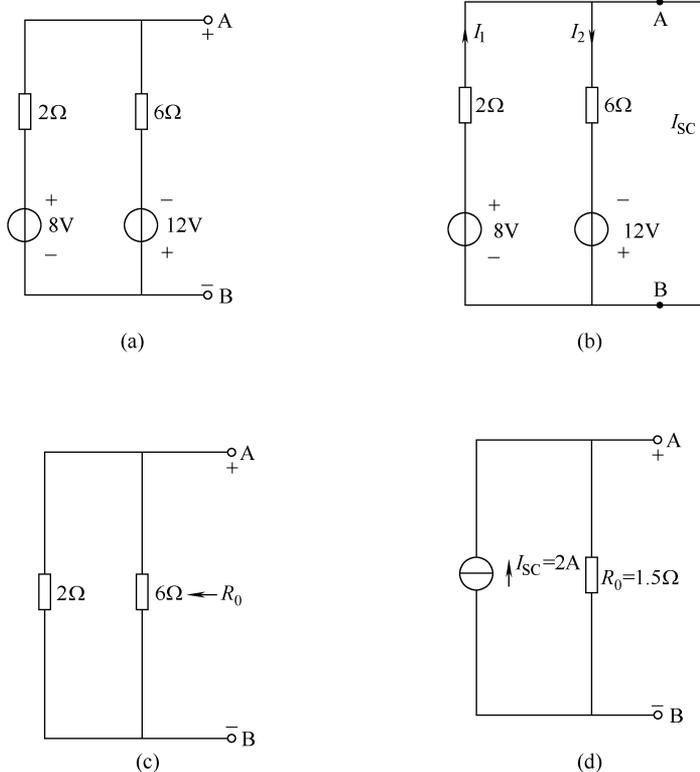


图 1-23 例 1-8 的电路图

**【例 1-9】**一直流发电机的  $E = 230V$ ， $R_0 = 1\Omega$ ，当负载电阻  $R_L = 22\Omega$ 时，用电源的两种模型分别求负载的电压和电流，并计算电源内部的内阻压降，判断是否相等。

解:

① 计算负载上的电压  $U$  和电流  $I$ 。

在电压源电路中，有

$$I = \frac{E}{R_L + R_0} = \frac{230\text{V}}{22\Omega + 1\Omega} = 10\text{A}$$

$$U = R_L \times I = 22\Omega \times 10\text{A} = 220\text{V}$$

在电流源电路中, 有

$$I = \frac{R_0}{R_0 + R_L} I_s = \frac{1}{22+1} \times \frac{230}{1} \text{A} = 10\text{A}$$

$$U = R_L I = 22\Omega \times 10\text{A} = 220\text{V}$$

② 计算内阻压降。

在电压源电路中, 有

$$U_{R_0} = R I_0 = 1\Omega \times 10\text{A} = 10\text{V}$$

在电流源电路中, 有

$$U_{R_0} = \frac{U}{R_0} R_0 = U = 220\text{V}$$

由此可见, 电压源和电流源对外电路是等效的, 对电源内部是不等效的。

## 1.4 电路的工作状态

电源与负载相连接, 根据所接负载的情况, 电路有几种不同的工作状态。本节以简单直流电路为例分别讨论电路在有载、开路和短路工作状态时的一些特性。

### 1.4.1 电路的有载工作

电源接有一定负载时, 将输出一定大小的电流和功率。通常, 电路负载并联在电源上, 如图 1-24 所示。因电源输出电压基本不变, 所以负载的端电压也基本不变, 那么, 负载并联得越多, 电源输出的电流就越大, 输出功率也越大。

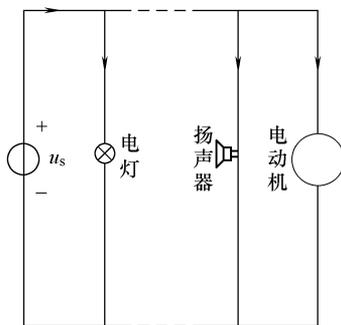


图 1-24 负载并联在电源上

任何电气设备都有一定的电压、电流和功率的限额。额定值就是电气设备制造厂对产品规定的使用限额, 通常都标在产品的铭牌或说明书上。电气设备在额定值的情况下工作, 就称为额定工作状态。

电源设备的额定值一般包括额定电压  $U_N$ 、额定电流  $I_N$  和额定容量  $S_N$ 。其中额定电压



$U_N$  和额定电流  $I_N$  是指电源设备安全运行所规定的电压和电流限额；额定容量  $S_N = U_N I_N$ ，表示电源允许的最大输出功率，但电源设备工作时不一定总是输出规定的最大允许电流和功率，究竟输出多大还取决于所连接的负载。

负载的额定值一般包括额定电压  $U_N$ 、额定电流  $I_N$  和额定功率  $P_N$ 。对于电阻性负载，由于这三者与电阻  $R$  之间具有一定的关系式，所以它的额定值不一定全部标出。例如，某些白炽灯只标出额定电压和额定功率；碳膜电阻、金属膜电阻等只给出电阻值和额定功率，其他额定值可以由相应公式算得。

合理使用电气设备，要尽可能使它们工作在额定状态下，这样既安全可靠又能充分发挥设备的作用。这种工作状态也称“满载”，电气设备超过额定值工作时称为“过载”。如果过载时间较长，则会大大缩短电气设备的使用寿命，在严重的情况下甚至会使电气设备损坏。如果使用时的电压值、电流值比额定值小得多，那么设备就不能正常合理地工作或者不能充分发挥其工作能力，这都是应该避免的。

## 1.4.2 电路的开路

开路状态也称断路状态，这时电源和负载未构成通路，负载上电流为零，电源空载，不输出功率。这时电源的端电压称为开路电压，用  $U_{oc}$  表示。

如图 1-13(a)所示的电压源模型，开路时  $I=0$ ，内阻  $R_0$  上的压降为零，其开路电压即为电源电压  $U_{oc} = U_s$ ；如图 1-15(a)所示的电流源模型，开路时端电压为  $U_{oc} = I_s R_0$ ，因为实际电流源的内阻一般都较大，其开路电压也将很大，会损害电源设备，所以电流源不应处于开路状态。

根据电压源在开路时  $I=0$ ， $U_{oc} = U_s$  的特点，在实际工作中，可以很方便地借助于电压表来寻求一个电路的断开点。在如图 1-25 所示的电路中，当电流表的电流为零时，说明电路中有断路点。用电压表接在电源两端，即图 1-25 中的 A、E 两点(直流时要注意电压表的极性)，电压表有读数为  $U_s$ ，然后把表的一端从 A 点移开，分别去测量 B、C、D 各点与 E 点间的电压，如果 B、E 两点间有电压  $U_s$ ，说明 AB 段是连通的，无断开点，这是因为只有在 AB 段连通的情况下，当电路中的电流为零时才可能存在  $U_{BE} = U_s$ 。若 C、E 两点间电压为零，则可判定断路点在 B、C 之间，因为只有当 B、C 间断开时，C 与 E 的电位才相等，即  $U_{CE} = 0$ ，电压表读数为零。若  $U_{CE}$  仍为  $U_s$ ，则表明 BC 段是连通的，再依次测量下去，便可找出断路点。

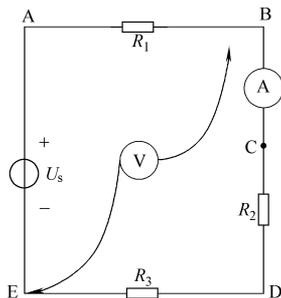


图 1-25 用电压表确定电路的断路点

### 1.4.3 电路的短路

短路状态是指电源两端由于某种原因而短接在一起的情况，相当于负载电阻为零，电源的端电压为零，不输出电功率。

短路时电源的输出电流称为短路电流，用  $I_{sc}$  表示。显然，实际电流源的短路电流  $I_{sc} = I_s$ 。对于实际电压源，因为内阻  $R_0$  一般都很小，其短路电流  $I_{sc} = \frac{U_s}{R_0}$  将很大，会使电源发热以致损坏。所以在实际工作中，应该经常检查电气设备和线路的绝缘情况，以防止电压源被短路事故的发生。此外，通常还在电路中接入熔断器等保护装置，以便在发生短路时能迅速切断电路，达到保护电源及电路器件的目的。

**【例 1-10】**某直流电源串联一个  $R=11\Omega$  的电阻后，进行开路、短路实验，如图 1-26(a)和图 1-26(b)所示，分别测得  $U_{oc}=18V$ ， $I_{sc}=1.5A$ ，若用实际电压源模型表示该电源，求  $U_s$  和  $R_0$  的值。

**解：**

电源开路时  $U_s = U_{oc} = 18V$ 。

电源短路时  $I_{sc} = \frac{U_s}{R_0 + R}$ 。

所以  $R_0 = \frac{U_s}{I_{sc}} - R = \frac{18V}{1.5A} - 11\Omega = 1\Omega$ 。

本例是一种求解实际电压源的电动势和内阻的实验方法。

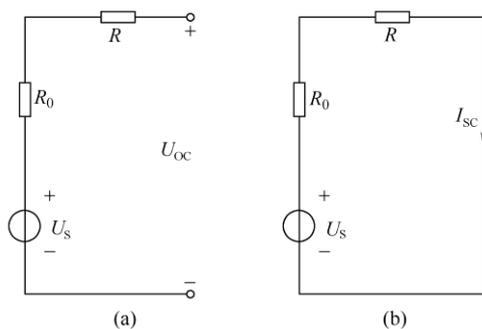


图 1-26 例 1-10 的电路图

## 1.5 太阳能水箱加热显示电路的设计过程

本节要求在给定器材的情况下设计一个简单显示电路，在太阳能水箱(电热管的额定功率为  $2kW$ ，额定电压为  $220V$ )加热时小灯泡(额定功率为  $1W$ ，额定电压为  $6V$ )亮，并且此时小灯泡两端的电压为  $5V$ 。

### 1. 思路分析

小灯泡作为电热管的指示灯, 应该是电热管工作(电热管中有电流通过)时, 小灯泡发光(有电流), 电热管不工作(电热管中没有电流)时, 小灯泡不发光(无电流)。为满足这一要求, 应将小灯泡和电热管串联。

另外, 还应该注意一下电热管和小灯泡正常工作时通过各自的电流大小。电热管正常工作时, 通过它的电流大小为

$$I_1 = \frac{P_1}{U_1} = \frac{2000\text{W}}{220\text{V}} \approx 9\text{A}$$

小灯泡正常工作时通过它的电流大小为

$$I_2 = \frac{P_2}{U_2} = \frac{1\text{W}}{6\text{V}} \approx 0.17\text{A}$$

比较上述的  $I_1$  和  $I_2$  可知, 不可以将小灯泡和电热管简单地串起来就接在 220V 的电路中(如果这样, 通过小灯泡的电流必超过其额定电流而使小灯泡烧毁), 为使上述的串联关系成立而又不致使通过小灯泡的电流过大, 可以设法取另一电阻与小灯泡并联, 只要这一电阻的大小取值恰当, 便可将由电热管流来的电流分出一部分而使通过小灯泡的电流不超过其额定电流。

### 2. 设计步骤

(1) 电热管及指示灯的原理图如图 1-27 所示。

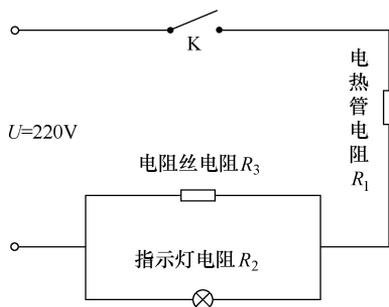


图 1-27 太阳能水箱加热显示电路的设计电路图

(2) 指示灯两端的电压按 5V 设计, 则实际工作时通过小灯泡的电流略小于小灯泡的额定电流, 这样可以延长指示灯的使用寿命。

(3) 由公式  $P = \frac{U^2}{R}$  得电热管的电阻为:  $R_1 = \frac{U_1^2}{P_1} = \frac{220 \times 220}{2000} \Omega = 24.2\Omega$ 。

电热管两端的实际电压为:  $220\text{V} - 5\text{V} = 215\text{V}$ 。

通过电热管的实际电流为:  $\frac{215\text{V}}{24.2\Omega} = 8.884\text{A}$ 。

小灯泡的电阻为:  $R_2 = \frac{U_2^2}{P_2} = \frac{6 \times 6}{1} \Omega = 36\Omega$ 。

通过小灯泡的实际电流为： $\frac{5\text{V}}{36\Omega} = 0.139\text{A}$ 。

通过电阻丝的电流为： $8.884\text{A} - 0.139\text{A} = 8.745\text{A}$ 。

电阻丝的电阻值为： $R_3 = \frac{U_3}{I_3} = \frac{5\text{V}}{8.745\text{A}} = 0.572\Omega$ 。

设单位长度的电阻丝阻值为  $10\Omega/\text{m}$ ，则所用电阻丝的长度应为： $L = \frac{0.572}{10}\text{m} = 0.057\text{m}$ 。

## 1.6 拓展实训

### 1.6.1 基尔霍夫定律验证实训

#### 1. 实训目的

- (1) 通过实训验证基尔霍夫电流定律和电压定律，巩固所学理论知识。
- (2) 加深对参考方向概念的理解。

#### 2. 实训设备与器材

双路可调直流稳压电源一台，直流毫安电流表三块，直流电压表一块，带插头导线若干，电阻若干，计算器一个。

#### 3. 实训内容

- (1) 按图 1-28 所示连接好电路。
- (2) 检查电路连接无误后，打开电源开关，开始测量。
- (3) 分别调整电源电压  $U_1$ 、 $U_2$  为 12V、12V、9V、12V、12V、10V 时读出三只电流表的数值  $I_1$ 、 $I_2$ 、 $I_3$ ；同时用万用表分别测量三个电阻两端电压  $U_{AB}$ 、 $U_{BD}$ 、 $U_{CB}$ ，将测量结果填入表 1-1 中，并进行计算比较。

**注意：**(1) 接通电源后，若发现电流表反转，应立即切断电源，调换电流表极性后重复通电。

(2) 测量某节点各支路电流时，可以设流入该节点的电流方向为参考方向(反之亦可)。将电流表负极接到该节点上，而将电流表的正极分别串入各条支路，当电流表指针正向偏转时，说明该支路电流是流入节点的，与参考方向相同，其值取正。若指针反向偏转，说明该支路电流是流出节点的，与参考方向相反，调换电流表极性，再测量，取其值为负。

(3) 测量电压时，用黑表笔接参考点，红表笔接被测点。若红表笔接高电位点，表针正向偏转，则电压值为正值；若发现表针反向偏转时，应调换表针，此时电压值为负值。



表 1-1 基尔霍夫定律中电流、电压测量值与计算值对照表

	$U_1 = U_2 = 12V$			$U_1 = 9V \quad U_2 = 12V$			$U_1 = 12V \quad U_2 = 10V$		
	计算值	测量值	误差	计算值	测量值	误差	计算值	测量值	误差
$I_1$									
$I_2$									
$I_3$									
$\sum I$									
$U_{AB}$									
$U_{BD}$									
$U_{CB}$									
$\sum U$									

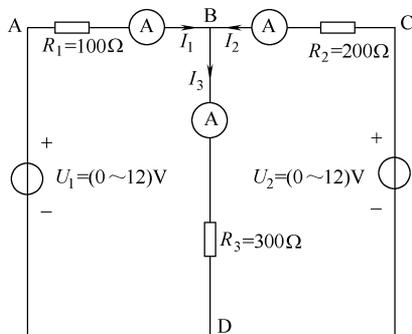


图 1-28 基尔霍夫电流定律和电压定律实验电路图

#### 4. 实训总结

- (1) 利用表 1-1 中的计算结果和测量结果验证基尔霍夫电流定律和电压定律。
- (2) 将通过计算得到的各支路电流和电压值与测量得到的各支路电流和电压值进行比较, 计算误差, 并分析误差产生的原因。
- (3) 已知某支路电流约为 3mA, 现有量程分别为 5mA 和 10mA 的两块电流表, 你将使用哪块电流表进行测量? 为什么?
- (4) 改变电流或电压的参考方向, 对验证基尔霍夫定律有影响吗? 为什么?

### 1.6.2 戴维南定理的验证实训

#### 1. 实训目的

- (1) 验证戴维南定理的正确性, 加深对戴维南定理的理解。
- (2) 掌握测量有源二端网络等效参数的一般方法。

## 2. 实训设备与器材

可调直流稳压电源一台，直流毫安电流表一块，直流电压表一块，带插头导线若干，万用表一只，开关一个，电阻若干。

## 3. 实训原理

### 1) 直接测量法测 $U_{oc}$ 和 $R_0$

将有源二端网络内的独立源置零，有源二端网络输出端开路，用电压表直接测量输出端开路电压，即  $U_{oc}$ 。然后利用万用表测量端口处电阻，此时电阻值的大小即为有源二端网络的等效内阻值  $R_0$ 。

### 2) 零示法测 $U_{oc}$

在测量具有高内阻有源二端网络的开路电压时，用电压表直接测量会造成较大的误差。为了消除电压表内阻的影响，往往采用零示测量法，如图 1-29(a)所示。

零示法的测量原理是用一低内阻的稳压电源与被测有源二端网络进行比较，当稳压电源的输出电压与有源二端网络的开路电压相等时，电压表的读数将为“0”。然后将电路断开，测量此时稳压电源的输出电压，即为被测有源二端网络的开路电压。

### 3) 开路电压、短路电流法测 $R_0$

在有源二端网络输出端开路时，用电压表直接测其输出端的开路电压  $U_{oc}$ ，然后再将其输出端短路，用电流表测其短路电流  $I_{sc}$ ，则等效内阻为

$$R_0 = \frac{U_{oc}}{I_{sc}}$$

如果二端网络的内阻很小，若将其输出端口短路则易损坏其内部元件，因此不宜用此法。

### 4) 伏安法测 $R_0$

用电压表、电流表测出有源二端网络的外特性曲线，如图 1-29(b)所示。根据外特性曲线求出斜率  $\tan \alpha$ ，则内阻为

$$R_0 = \tan \alpha = \frac{\Delta U}{\Delta I} = \frac{U_{oc}}{I_{sc}}$$

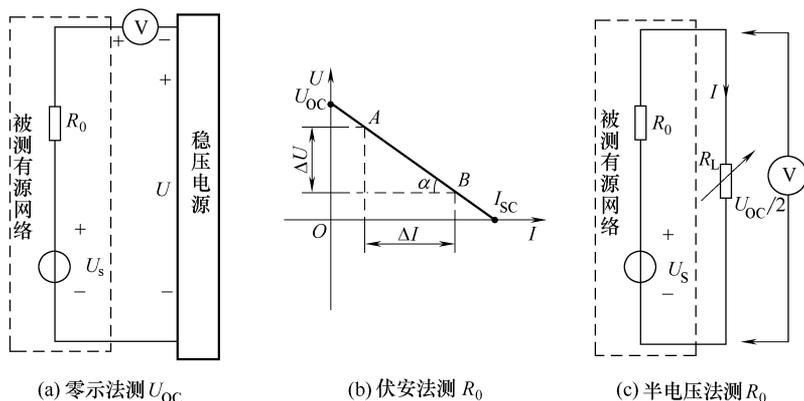


图 1-29 戴维南等效参数的测量方法

5) 半电压法测  $R_0$

如图 1-29(c)所示, 当负载电压为被测网络开路电压的一半时, 负载电阻(由电阻箱的读数确定)即为被测有源二端网络的等效内阻值。

4. 实训内容

用开路电压法、短路电流法验证戴维南等效电路。

(1) 在实验台上, 按图 1-30(a)所示连接好电路。

(2) 在图 1-30(a)中,  $U_{S1} = 10V$ ,  $U_{S2} = 6V$ ,  $R_1 = 500\Omega$ ,  $R_2 = 300\Omega$ ,  $R_L = 100\Omega$ , 电表选用 50mA 的电流表。

(3) 把  $R_L$  调至最大值, 检查电路连接无误后, 打开电源开关, 开始测量。

(4) 当开关 S 断开时, 测量 A、B 端电压, 即为开路电压  $U_{OC}$ 。将测量数据填入表 1-2 中。

(5) 将  $R_L$  的阻值调到  $0\Omega$ , 闭合开关 S, 此时电流表指示数即为短路电流  $I_{SC}$ 。将测量数据填入表 1-2 中。

(6) 根据开路电压  $U_{OC}$  和短路电流  $I_{SC}$  计算等效电源内阻  $R_0$ 。将计算数据结果填入表 1-2 中。

(7) 负载实验。按图 1-30(a)所示接入  $R_L$ 。改变  $R_L$  阻值, 分别测量  $U_{AB}$  和  $I_3$  的数值, 填入表 1-3 中, 并利用测量的数值绘制有源二端网络的外特性曲线。

(8) 将图 1-30(a)所示的虚线框内线路用一个电压源和一个电阻代替, 电源即为开路电压  $U_{OC}$ , 电阻为等效内阻  $R_0$ ,  $R_L$  的数值保持不变, 如图 1-30(b)所示, 改变  $R_L$ , 分别测量  $U_{AB}$  和  $I_3'$  的数值, 填入表 1-4 中, 利用测量的数值绘制伏安特性曲线, 并与表 1-3 中的  $U_{AB}$  和  $I_3$  进行比较, 从而验证戴维南定理。

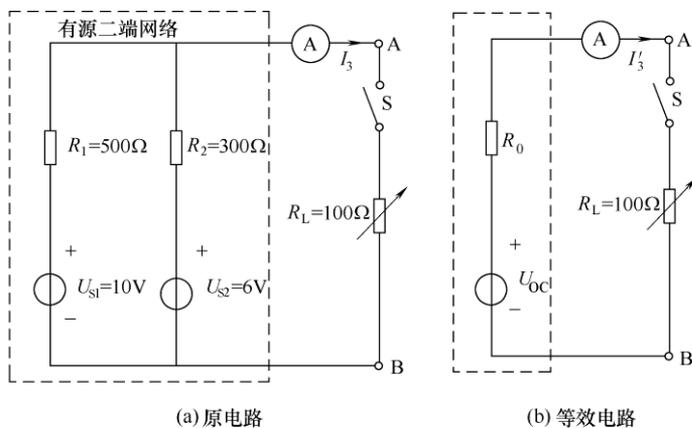


图 1-30 戴维南定理实验电路图

表 1-2 验证戴维南定理实验数据记录表(一)

$U_{OC}$	$I_{SC}$	$R_0$

表 1-3 验证戴维南定理实验数据记录表(二)

$R_L$	100 $\Omega$	80 $\Omega$	60 $\Omega$	40 $\Omega$	20 $\Omega$	0 $\Omega$
$U_{AB}$						
$I_3$						

表 1-4 验证戴维南定理实验数据记录表(三)

$R_L$	100 $\Omega$	80 $\Omega$	60 $\Omega$	40 $\Omega$	20 $\Omega$	0 $\Omega$
$U_{AB}$						
$I_3$						

### 5. 实训总结

(1) 根据实训内容中的步骤(7)、(8), 分别绘出曲线, 验证戴维南定理的正确性, 并分析产生误差的原因。

(2) 在求戴维南等效电路时, 做短路实验, 测  $I_{sc}$  的条件是什么? 请实验前对线路图 1-30(a)预先做好计算, 以便调整实验线路及测量时可准确地选取电表的量程。

(3) 说明测有源二端网络开路电压及等效内阻的几种方法, 并比较其优缺点。

(4) 设计一个简单电路用来测量一节电池的内阻。

## 1.6.3 电压源与电流源的等效变换实训

### 1. 实训目的

- (1) 掌握电源外特性的测试方法。
- (2) 验证电压源与电流源等效变换的条件。

### 2. 实训设备与器材

可调直流稳压电源一台, 可调直流恒流源一台, 直流电压表一块, 直流电流表一块, 万用表一只, 电阻若干。

### 3. 实训内容

1) 测定直流稳压电源(理想电压源)与实际电压源的外特性

(1) 按图 1-31(a)所示连接好电路。

(2) 在图 1-31 中,  $U_s = 12V$  为直流稳压电源,  $R_1 = 200\Omega$ ,  $R_L = 1k\Omega$ 。

(3) 把  $R_L$  调至最大值, 检查电路连接无误后, 打开电源开关, 开始测量。调节  $R_L$ , 令其阻值由大至小变化, 测量 A、B 间电压  $U_{AB}$  和电路中电流  $I$ , 将测量数据填入表 1-5 中。

(4) 按图 1-31(b)所示的线路接线,  $R_0 = 120\Omega$ , 虚线框可模拟为一个实际的电压源。调节  $R_L$ , 令其阻值由大至小变化, 测量 A、B 间电压  $U_{AB}$  和电路中电流  $I$ , 将测量数据填入表 1-6 中。

(5) 根据表 1-5 和表 1-6 中的数据绘出  $U_{AB} - I$  曲线。



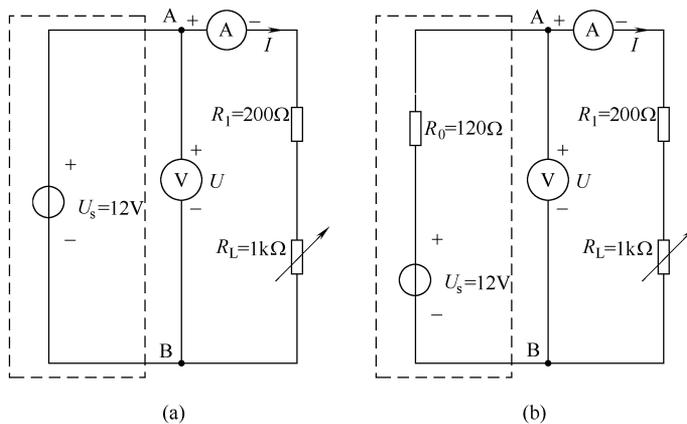


图 1-31 测定直流稳压电源(理想电压源)与实际电压源的外特性电路图

表 1-5 电压源与电流源的等效变换测试记录表(一)

$R_l$	1kΩ	0.8kΩ	0.6kΩ	0.4kΩ	0.2kΩ	0
$U_{AB}$						
$I$						

表 1-6 电压源与电流源的等效变换测试记录表(二)

$R_l$	1kΩ	0.8kΩ	0.6kΩ	0.4kΩ	0.2kΩ	0
$U_{AB}$						
$I$						

2) 测定电流源的外特性

按图 1-32 所示的线路接线,  $I_s$  为直流恒流源, 调节其输出为 10mA, 令  $R_0$  分别为 1kΩ 和 ∞(即接入和断开), 调节电位器  $R_L$  (从 1kΩ 至 0), 测出这两种情况下的电压表和电流表的读数。自拟数据表格, 记录实验数据。

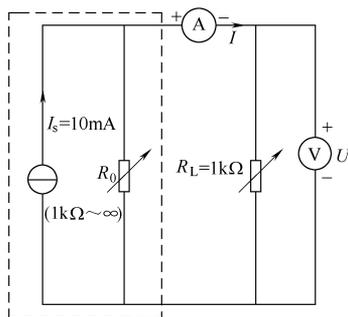


图 1-32 测定电流源的外特性电路图

## 3) 测定电源等效变换的条件

先按图 1-33(a)所示的线路接线,记录线路中两表的读数。然后利用图 1-33(a)中左侧虚线框外的元件和仪表,按图 1-33(b)所示的线路接线。调节恒流源的输出电流  $I_s$ ,使两表的读数与图 1-33(a)时的数值相等,记录  $I_s$  数值,填于表 1-7 中,验证等效变换条件的正确性。

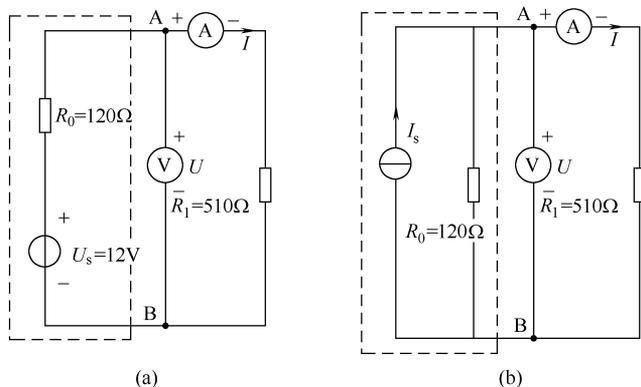


图 1-33 测定电源等效变换的条件电路图

表 1-7 电压源与电流源的等效变换测试记录表

	图 1-33(a)所示线路	图 1-33(b)所示线路
$U_{AB}$		
$I$		
$I_s$		

## 4. 实训总结

- (1) 根据实验数据绘出电源的 4 条外特性曲线,并总结、归纳各类电源的特性。
- (2) 根据实验结果,验证电源等效变换的条件。
- (3) 直流稳压电源的输出端为什么不允许短路? 直流恒流源的输出端为什么不允许开路?
- (4) 电压源与电流源的外特性为什么呈下降变化趋势? 稳压源和恒流源的输出在任何负载下是否保持恒值?

## 本章小结

(1) 由于电流、电压的实际方向只有两种可能性,且在电路的分析、计算之前很难事先知道,因而必须引入电流、电压参考方向的概念,这样,既可对电路进行计算,又可以由计算结果得到电流、电压的实际方向。

(2) 基尔霍夫电流定律(KCL)来自电流连续性原理,基尔霍夫电压定律(KVL)是能量守恒原理的一种表现形式。



(3) 实际电源的电压源模型与电流源模型可进行等效变换, 电源变换是简化电路的一个十分有用的工具。

(4) 戴维南定理和诺顿定理表明任一线性含独立电源的单口网络就端口特性而言, 可简化为一个实际电源。

(5) 电源有三种工作状态: 有载、开路和短路, 合理使用电气设备, 应尽可能使它们工作在额定状态下。

## 思考题与习题

1. 电路如图 1-34 所示, 应用欧姆定律求电阻  $R$ 。

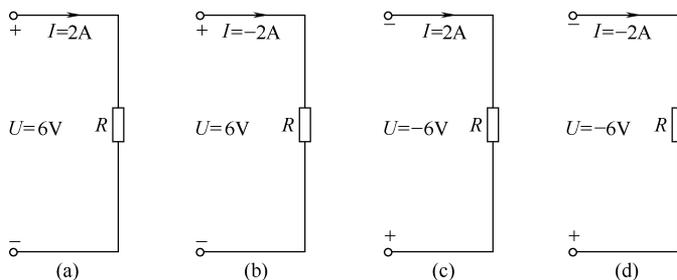


图 1-34 题 1 图

2. 电路如图 1-35 所示, 用方框代表某一电路元件, 其电压、电流如图 1-35 所示, 求图中各元件的功率, 并说明该元件实际上是吸收功率还是发出功率。

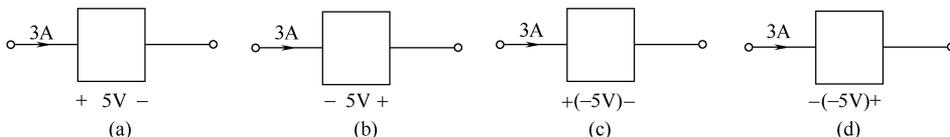


图 1-35 题 2 图

3. 在如图 1-36 所示的电路中, 方框表示电源或电阻, 各元件的电压和电流的参考方向如图 1-36 所示。通过测量得知:  $I_1 = 2\text{A}$ ,  $I_2 = 1\text{A}$ ,  $I_3 = 1\text{A}$ ,  $U_1 = 4\text{V}$ ,  $U_2 = -4\text{V}$ ,  $U_3 = 7\text{V}$ ,  $U_4 = -3\text{V}$ 。

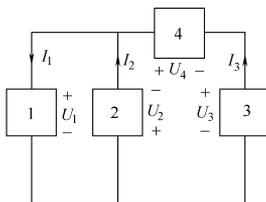


图 1-36 题 3 图

(1) 试标出各电流和电压的实际方向。

- (2) 试求每个元件的功率，并判断其是电源还是负载。
4. 如图 1-37 所示电路，直流电压源的电压  $U_S = 10V$ 。求：
- (1)  $R = \infty$  时的电压  $U$ ，电流  $I$ 。
  - (2)  $R = 10\Omega$  时的电压  $U$ ，电流  $I$ 。
  - (3)  $R \rightarrow 0\Omega$  时的电压  $U$ ，电流  $I$ 。
5. 如图 1-38 所示电路，直流电流源的电流  $I_S = 1A$ 。求：
- (1)  $R \rightarrow \infty$  时的电流  $I$ ，电压  $U$ 。
  - (2)  $R = 10\Omega$  时的电流  $I$ ，电压  $U$ 。
  - (3)  $R = 0\Omega$  时的电流  $I$ ，电压  $U$ 。

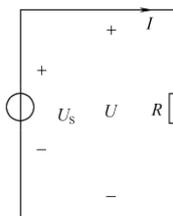


图 1-37 题 4 图

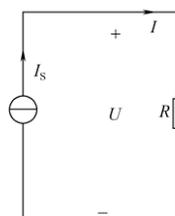


图 1-38 题 5 图

6. 已知  $U_{S1} = 4V$ ， $I_{S2} = 2A$ ， $R_2 = 1.2\Omega$ ，试等效化简图 1-39 所示的电路。
7. 在如图 1-40 所示的电路中，已知  $U_{S1} = 10V$ ， $I_{S1} = 15A$ ， $I_{S2} = 5A$ ， $R = 30\Omega$ ， $R_2 = 20\Omega$ ，求电流  $I$ 。

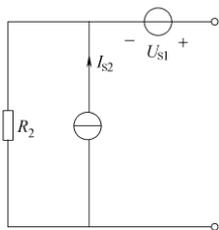


图 1-39 题 6 图

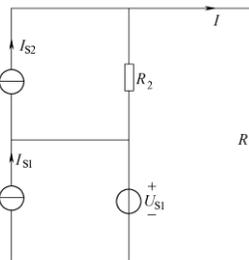


图 1-40 题 7 图

8. 已知  $I_1 = 3A$ 、 $I_2 = 5A$ 、 $I_3 = -18A$ 、 $I_5 = 9A$ ，计算如图 1-41 所示电路中的电流  $I_6$  及  $I_4$ 。

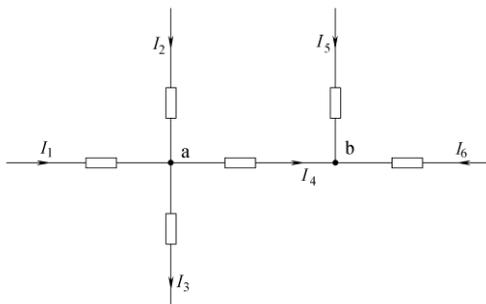


图 1-41 题 8 图



9. 已知  $I_1 = 5\text{A}$ 、 $I_6 = 3\text{A}$ 、 $I_7 = -8\text{A}$ 、 $I_5 = 9\text{A}$ , 试计算如图 1-42 所示电路中的电流  $I_8$ 。

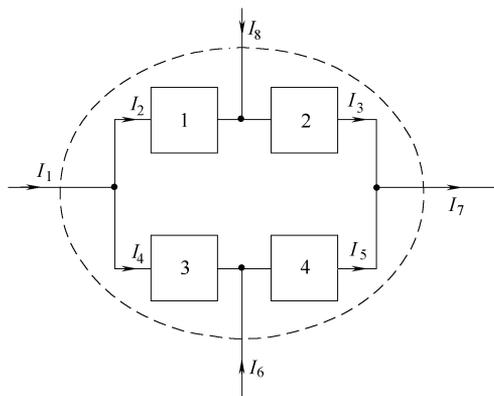


图 1-42 题 9 图

10. 试求如图 1-43 所示电路中元件 3、4、5、6 的电压。

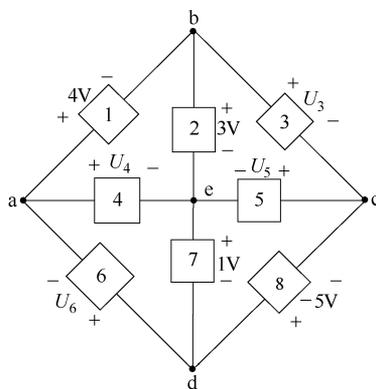


图 1-43 题 10 图

11. 试求如图 1-44(a)、图 1-44(b)所示电路的戴维南等效电路。

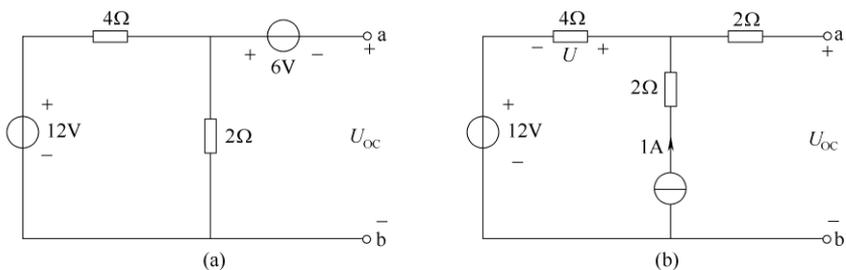


图 1-44 题 11 图

12. 试用戴维南定理求如图 1-45 所示分压器电路中负载电阻  $R$  分别为  $100\Omega$ 、 $200\Omega$  的电压和电流。

13. 在如图 1-46 所示的电路中, 已知电阻  $R_1 = 4\Omega$ ,  $R_2 = R_3 = 2\Omega$ ,  $R_4 = R_5 = R_6 = 1\Omega$ ,

电压  $U_{S1} = U_{S2} = 40V$ ，试用诺顿定律求电流  $I_3$ 。

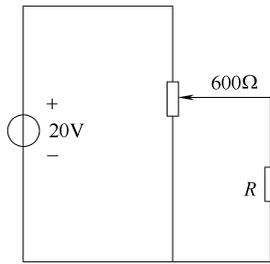


图 1-45 题 12 图

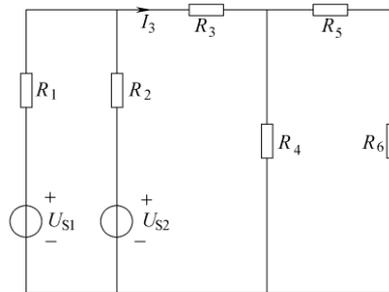


图 1-46 题 13 图

14. 在如图 1-47 所示的电路中，已知电阻  $R_1 = R_2 = 1\Omega$ ， $R_3 = 5\Omega$ ，电压  $U_s = 10V$ ， $I_s = 2A$ ，求诺顿等效电路。

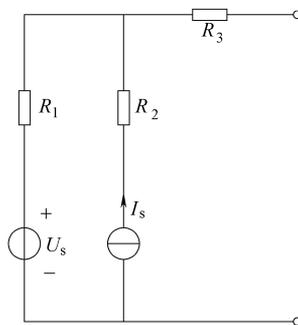


图 1-47 题 14 图