第一章　电路的基本概念和基本定律

学习目的和任务

本章的基本任务是学习电路的基本概念和基本定律，为以后各章研究电路基本理论和基本分析方法奠定必要的基础。

理解（掌握）：四种理想化电路元件的电路模型。独立源与受控源及其区别。电流、电压、电位、电功率和电能的物理概念，恒压源、恒流源、受控源的特点；电阻元件、电容元件、电感元件的伏安特性；电流、电压参考方向（极性）的含义及其在电路分析中的重要作用；基尔霍夫电流定律（KCL）、基尔霍夫电压定律（KVL）。

应用：会熟练地应用欧姆定律和基符霍夫定律分析计算电路。

在1999年8月颁布的《天津市高等教育自学考试电工基础课程（应用电子技术专业）自学考试大纲》（试行本）中，提出了“了解”、“理解（掌握）”、“简单应用”、“综合应用”等四个能力层次，它们之间是递进的关系，后者必须建立在前者基础上。它们的含义是：

了解——能知道有关的名词、概念、知识、定律、原理的意义，并能正确认识和表达。

理解（掌握）——在了解的基础上，能全面把握基本概念和原理的区别与联系。

简单应用——在理解的基础上，能用学过的一、两个知识点，分析和解决简单的问题。

需要全本请访问 www.ertongbook.com

综合应用——在简单应用的基础上，能用学过的多个知识点综合分析和解决较复杂的问题。

教材阅读提示

电路分析是电工技术课程的基础。电路具有传输和转换电能以及传递和处理信号两种主要作用，电路由电源（或信号源）、负载和中间环节三部分组成。

将实际电路元件理想化，即在一定条件下突出其主要的电磁性质，而忽略其次要因素。由一些理想电路元件所组成的电路，就是实际电路的电路模型。

理想电路元件（如电阻元件、电感元件、电容元件和电源元件等）分别由相应的参数来表征，用规定的图形符号来表示。

本课程中所涉及的电路都是指电路模型（简称电路）。

电工技术课程具体分析的是电路的两类基本依据（KCL，KVL和各种元件的伏安关系）和三大基本方法（分解方法、叠加方法及相量方法）。其中：

两类基本依据及功率、能量的一般概念——足以解决所有的电路分析问题；

分解方法——使“大”电路问题化为“小”电路问题；

叠加方法——使复杂激励问题化为简单激励问题；

相量方法——基本的任务是学习正弦交流电路的基本概念、规律和相量分析法。

1.1 电流、电压及其关联方向

要分析电路，首先要讨论电路的两个基本物理量：电流和电压。

1．电流

电流：电流的大小用电流强度来表示。电流强度定义为单位时间内通过导体横截面的电荷量，用符号 i 表示，即

$$i = \frac{\mathrm{d}q}{\mathrm{d}t} \tag{1.1}$$

式中 q 为通过某截面的电荷量，单位为库仑（C）；t 为时间，单位为秒(s)。电流的方向规定为正电荷运动的方向。不随时间变化的电流一般用大写字母 I 表示。

电路中某一时刻的电流方向在求解前是很难判断的。但描述电路元件性质和连接方式规律的公式的列写都与电流的方向有关。为此，在进行分析之前，必须给电流一个假定的正方向，用箭头表示，称为电流的参考方向。这样，电流的实际方向便由电流的参考方向和电流数值的正、负来表明；电流的大小由电流数值的绝对值来表明。

[例 1.1] 进入元件的电流为 $i(t) = 30t^2 - 4t(\mathrm{A})$，求 $t =$ 1s 到 3s 之间通过该元件的电荷。

解 由式 1.1 知 $q = \int i\mathrm{d}t$，

$$q = \int_1^3 i\mathrm{d}t$$

$$= \int_1^3 (30t^2 - 4t)\,\mathrm{d}t = \left(\frac{1}{3} \times 30t^3 - \frac{4}{2}t^2\right)\Big|_1^3 = 244(\mathrm{C})$$

2. 电压

电压：单位正电荷从电路中的一点移至另一点时电路所吸收或放出的能量。若为吸收能量则称为电压降；若为放出能量则称为电压升，电压升就是负的电压降。电压的符号用 u 表示，即

$$u = \frac{\mathrm{d}W}{\mathrm{d}q} \tag{1.2}$$

式中 $\mathrm{d}W$ 为电路吸收的能量；$\mathrm{d}q$ 为通过的电荷。

同电流类似，电路中某两点间，在某一时刻的电压可能是电压降（也可能是电压升）。在求解之前这是不知道的，但描述电路元件性质和连接方式的公式的列写也是与这个电压的极性有关

的，所以，在作电路分析之前，也必须给出一个假定的电压降方向，用“＋”、“－”号表示，“＋”号表示高电位端，“－”号表示低电位端，称为电压的参考极性。

3．关联方向

一个元件的电流参考方向和电压参考极性的假定都是任意的。但是为了方便起见，常采用关联的参考方向的表示方法。所谓关联的参考方向是指：一个元件当它的电流参考方向假定以后，其电压的参考极性就不再任意假定了，而一定是把电压降的方向定为电流的参考方向；或当它的电压的参考极性被假定以后，其电流的参考方向就不再任意假定了，而是一定把电流的参考方向假定为电压降的方向。

电压与电流的参考方向是否为关联的，是对某一个元件而言的。如图 1－1 中所示的两个元件在图中表示的 u 和 i 的参考方向下，对元件 B 而言，其电压、电流参考方向是关联的；而对元件 A 而言，其电压、电流的参考方向是非关联的。

4．电位

电位也是两点间的电压。在电路中，特别是在电子电路中，常常选择一个点作为参考点（在电子仪器中通常选取公共接地点或仪器的外壳作为参考点，在图形中常用 $\perp$ 表示），而电路中其他各点对该点的电压就称为相应点的电位。参考点的电位规定为零。如在图 1－2 中若选 d 为参考点，则 a，b，c 各点的电位为

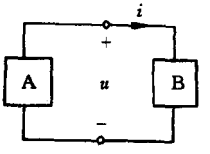


图 1－1　关联方向

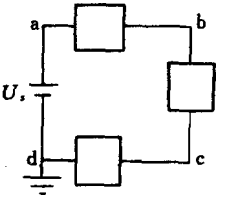


图 1－2　电位

$$u_a = u_{ad}$$

$$u_b = u_{bd}$$

$$u_c = u_{cd}$$

由电压和电位的概念可知，电路中某两点的电压一定等于该两点间的电位之差，如在图 1－2 中，a，b 两点间和 a，c 两点间的电压分别为

$$u_{ab} = u_a - u_b$$

$$u_{ac} = u_a - u_c$$

1.2 电 功 率

电功率：单位时间某段电路所吸收或放出的能量称为该段电路的电功率。

$$p = \frac{dW}{dt} \tag{1.3}$$

若 dW 为吸收的能量，则称之为这段电路吸收的功率；若 dW 为放出的能量，则称之为这段电路放出的功率。

一个二端网络所吸收的功率 p 与端钮电压 u、电流 i 的关系为：

$$p = \frac{dW}{dt} = \frac{dW}{dq} \cdot \frac{dq}{dt} = ui \tag{1.4}$$

式中 u 和 i 为具有关联参考方向的电压和电流。用此式计算的结果，若 $p>0$，则表明此一端网络是吸收功率 p 瓦；若 $p<0$，则表示此二端网络放出功率 $|p|$ 瓦。

同理可得，一个二端网络所放出的（或说产生的）功率 p' 等于在非关联参考方向下的端钮电压 u 与电流 i 的乘积

$$p' = -ui \tag{1.5}$$

式中 u 和 i 分别为端钮的电压和电流，并且 u 和 i 的参考方向是

需要全本请访问 www.ertongbook.com

非关联的。用这个式子计算的结果，若 $p'>0$，则表示此二端网络放出功率 p'瓦；若 $p'<0$，则表示此二端网络吸收功率 $|p'|$瓦。

[例 1.2] 求图 1－1 中元件 A 和元件 B 吸收的功率。

解 元件 A 吸收的功率为

$$p_A = -ui$$

元件 B 吸收的功率为

$$p_B = ui$$

欲求某个元件的功率，须用该元件端钮的电压和电流及其参考方向的关系。A，B 两元件上的电压、电流的符号皆为 u 和 i，但它们的参考方向关系不同。对元件 A 而言，其电压、电流参考方向是非关联的，所以其吸收功率的公式中乘积 ui 前有一负号；对元件 B 而言，其电压、电流参考方向是关联的，所以其吸收功率的公式中乘积 ui 前没有负号。

1.3 电阻元件、电容元件与电感元件

1. 电阻元件

电阻元件的符号如图 1－3所示。它的端钮电压 u 和电流 i 的关系（即伏安关系）在电压和电流为关联参考方向时为

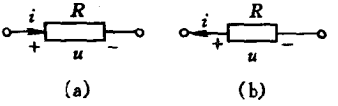


图 1－3 电阻

$$u = Ri \tag{1.6}$$

上式即为欧姆定律的表达形式。欧姆定律指出：一个电阻在其电流流动的方向上一定产生电压降，其电压降的大小等于此电流与其电阻值的乘积。

电阻元件的性质也可以用参数电导来表示，电导定义为电阻

的倒数，用符号 G 表示，即

$$G=\frac{1}{R} \tag{1.7}$$

电阻元件吸收的功率为

$$p=ui=Ri^2=Gu^2 \tag{1.8}$$

由式(1.8)知，电阻元件吸收的功率总是大于或等于零，其吸收的能量常以热的形式消耗掉，所以电阻元件是耗能元件。

电阻元件在 $0\sim t$ 时间内所消耗的能量为

$$W_R=\int_0^t p_R\mathrm{d}t \tag{1.9}$$

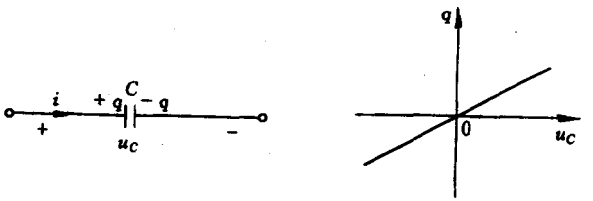
若 p_R 为不随时间变化的常数，则有

$$W_R=p_Rt=UIt=RI^2t=\frac{U^2}{R}t \tag{1.10}$$

2. 电容元件

电容器是由两块金属薄板中间隔以绝缘介质组成。当电压加于电容器的两极板间时，两极板上就聚集起等量异性电荷，建立起电场，储存电场能量。当电源去掉后，电荷可继续存在。因此，电容器是一个能储存电荷的元件。

线性电容元件是一个理想二端元件，它在电路中的图形符号如图 1－4 所示，$+q$ 和 $-q$ 是两极板上的电荷。若电压的参考方向如图中所示，则任何时刻电容器极板上的电荷 q 与其端电压 u 间的关系为



(a)　　(b)

图 1－4　电容

$$q = Cu_C \tag{1.11}$$

C称作该电容元件的电容。线性电容元件的电容 C 是一个与 q、u_C无关的常量，单位为微法(μF)或皮法(pF)。

当电容电压 u_C 随时间变化时，储存在电容元件极板上的电荷随之变化，出现充电或放电现象，连接电容的导线中就有电流流过，其电流

$$i_C = \frac{\mathrm{d}q}{\mathrm{d}t} = C\frac{\mathrm{d}u_C}{\mathrm{d}t} \tag{1.12}$$

上式中 i_C 和 u_C 为关联参考方向。若 i_C 和 u_C 为非关联参考方向，上式右侧应冠以负号。

(1)电容元件上任一时刻的电流取决于同一时刻电容电压的变化率，而与该时刻电容电压数值无关。

(2)电压变化越快，电流越大，即使某时刻电压为零，也可能有电流。

(3)当电压为恒定值时，由于电压不随时间而变，因此即使电压可能很大，但也没有电流，电容相当于开路，所以称电容有隔直流作用。

如果激励是电流，响应是电压，将式（1.12）等号两边积分后可得

$$\begin{aligned} u_C(t) &= \frac{1}{C}\int_{-\infty}^{t} i_C(\xi)\mathrm{d}\xi \\ &= \frac{1}{C}\int_{-\infty}^{0^-} i_C(\xi)\mathrm{d}\xi + \frac{1}{C}\int_{0^-}^{t} i_C(\xi)\mathrm{d}\xi \\ &= u_C(0^-) + \frac{1}{C}\int_{0^-}^{t} i_C(\xi)\mathrm{d}\xi \end{aligned} \tag{1.13}$$

$u_C(0^-)$是在 $t=0^-$时刻电容上已经积累的电压。此电压总结了电容元件过去的历史状况，称作初始电压，而$\frac{1}{C}\int_{0^-}^{t} i_C(\xi)\mathrm{d}\xi$ 是 $t=0^-$以后在电容元件中形成的电压。任一时刻 t 的电容电压，

不仅取决于 t 时刻的电流值，而且取决于（$-\infty \to t$）所有时刻的电流值，即与电流过去的全部历史有关。由此可见，电容元件有记忆电流的作用，所以，电容元件又是一种记忆元件。

由于电容电压与电流间是微分关系，因此，u_C 与 i_C 的波形不同，波形的最大值、最小值一般也不同时出现。

当电容电压与电容电流取关联方向时，电容元件吸收的瞬时功率为

$$p_C(t) = u_C(t) i_C(t)$$

当电路从初始时刻 t_0 到任意时刻 t 给电容充电时，这期间电容元件吸收的能量为

$$W_C(t) = \int_{t_0}^{t} p_C(\xi) \mathrm{d}\xi$$

$$= \frac{1}{2} C[u_C^2(t) - u_C^2(t_0)]$$

如果在 t_0 时刻电容的初始电压 $u_C(t_0) = 0$，则在任意时刻 t 电容元件储存的电场能量为：

$$W_C(t) = \frac{1}{2} C u_C^2(t) \qquad (1.14)$$

可见，电容元件在某一时刻 t 的储能仅取决于此时刻的电压值，而与电流值无关。电容元件在充电时吸收的能量全部转换为电场能量，放电时又将储存的电场能量释放回电路，它本身不消耗能量。电容的瞬时功率可能为正或为负，但它的储能总是正值，所以称电容元件为储能元件。

[例 1.3]　图 1-5 (a)为电容电流 $i_C(t)$ 的波形，试求电容电压 $u_C(t)$。设 $C = 1\mu\mathrm{F}$，$u_C(0) = 0$。

解　$i_C(t)$ 的表达式为

$$i_C(t) = \begin{cases} 0, & (0 < t < 1\mathrm{s}) \\ 2\ (\mu\mathrm{A}), & (1\mathrm{s} < t < 2\mathrm{s}) \\ -3\ (\mu\mathrm{A}), & (2\mathrm{s} < t < 3\mathrm{s}) \end{cases}$$

当 $0<t<1\text{s}$ 时，$u_C(t)=0$，$u_C(1)=0$。

当 $1\text{s}<t<2\text{s}$ 时，$u_C(t)=u_C(1)+\frac{1}{C}\int_1^t i\,\mathrm{d}\xi=0+2\xi\Big|_1^t=2t-2\ (\text{V})$。

当 $2\text{s}<t<3\text{s}$ 时，$u_C(t)=u_C(2)+\frac{1}{C}\int_2^t i\,\mathrm{d}\xi=2-3\xi\Big|_2^t=2-3t+6=-3t+8(\text{V})$，$u_C(3)=-1(\text{V})$。

波形如图 1－5（b）所示。

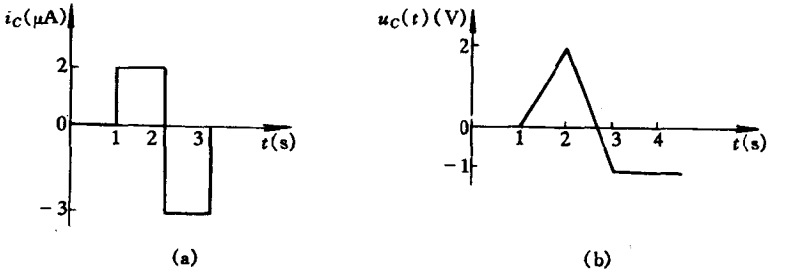


图 1－5

3．电感元件

当电流通过电感线圈时，如图 1－6 所示，线圈内部及其周围会产生磁场，并储存磁场能量。线圈由导线绕制，会有一定的

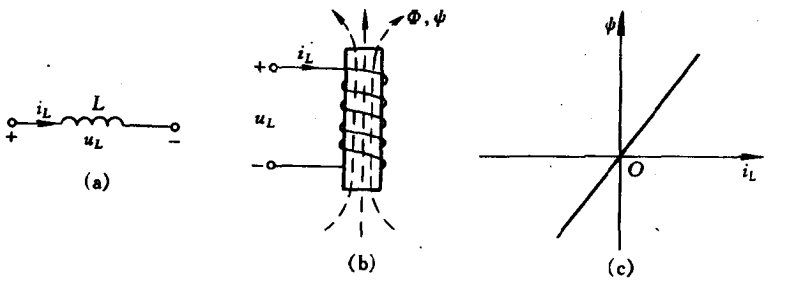


图 1－6　电感

电阻，如忽略电阻等引起的次要效应，电感线圈就成为理想化的电感元件。

当电流通过线圈时，有磁通 Φ 穿过线圈。若线圈有 N 匝，则与线圈交链的总 $N\Phi$，称作磁链 Ψ，即 $\Psi = N\Phi$。磁通 Φ、磁链 Ψ 都是由线圈本身的电流所产生的。磁链是电流 i_L 的函数，Ψ 与 i_L 的关系可以用 $\Psi - i_L$ 曲线表示。若 $\Psi - i_L$ 曲线是一条通过坐标原点的直线，则此电感元件称作线性电感元件。磁链 Ψ 与电感的关系为

$$\Psi = Li_L \tag{1.15}$$

其中 L 称作自感系数（简称电感）。L 的单位为亨利（H），常用单位是毫亨（$1\text{mH} = 10^{-3}\text{H}$）、微亨（$1\mu\text{H} = 10^{-6}\text{H}$）。

当变化的电流通过电感线圈时，在线圈周围产生变化的磁通。变化的磁通在线圈两端引起感应电压 u_L，感应电压的大小等于磁链的变化率。u_L 与 i_L 为关联方向时有

$$u_L = L\frac{\mathrm{d}i_L}{\mathrm{d}t} \tag{1.16}$$

电感元件的伏安关系有如下特点：

(1) 电感元件上任一时刻的自感电压 u_L 取决于同一时刻电感电流 i_L 的变化率，而与该时刻电感电流的数值无关。

(2) 电感电流 i_L 变化越快（$\frac{\mathrm{d}i_L}{\mathrm{d}t}$越大），$u_L$ 也越大。即使某时刻 $i_L = 0$，也可能有电压。

(3) 当电流 i_L 为恒定值时，由于电流不随时间而变，而自感电压 $u_L = 0$，因此电感相当于短路。

如果给定激励电压 u_L，响应为电流 i_L 时，式(1.16) 又可写为

$$i_L(t) = \frac{1}{L}\int_{-\infty}^{t} u_L(\xi)\mathrm{d}\xi = \frac{1}{L}\int_{-\infty}^{0_-} u_L(\xi)\mathrm{d}\xi + \frac{1}{L}\int_{0_-}^{t} u_L(\xi)\mathrm{d}\xi$$

$$= i_L(0_-) + \frac{1}{L}\int_{0_-}^{t} u_L(\xi)\mathrm{d}\xi \tag{1.17}$$

需要全本请访问 www.ertongbook.com

$i_L(0_-)$是 $t=0_-$时刻电感元件中已积累的电流，此电流总结了电感元件过去的历史状况，称作初始电流。$\frac{1}{L}\int_{0_-}^{t} u_L(\xi)\mathrm{d}\xi$ 是 $t=0_-$以后在电感元件中形成的电流。电感电压有 $t=0_-$以前的全部历史，可以用 $u_L(0_-)$ 表达。电感元件有记忆电压的作用，也是一种记忆元件。

电感电压与电流间是微分关系，二者不具有相同波形。

电感电压与电感电流取关联方向时，任一瞬间电感元件的功率为

$$p_L = u_L(t)i_L(t)$$

从初始时刻 t_0到任意时刻 t 期间，电感吸收的能量为

$$W_L(t)=\int_{t_0}^{t} p_L(\xi)\mathrm{d}\xi=\frac{1}{2}L[i_L^2(t)-i_L^2(t_0)]$$

如果在 t_0时刻电感的初始电流 $i_L(t_0)=0$，这时的磁场能量为零，则电感元件在任意时刻 t 储存的磁场能量为

$$W_L(t)=\frac{1}{2}Li_L^2(t) \qquad (1.18)$$

电感元件在某一时刻 t 的储能仅取决于此时刻的电流值 而与电压值无关。只要有电流存在，就有储能。

[例 1.4] 图 1－7 (a)中，$L=2\mathrm{H}$，$i_L(t)$ 的波形图如图 1－7 (b)所示，试计算并绘出 $t>0$ 时电感电压$u_L(t)$、瞬时功率$p_L(t)$的波形。

解 $I_L(t)$的表达式为

$$I_L(t)=\begin{cases} 5t & ,(0\leqslant t\leqslant 1) \\ -5t+10, & (1<t\leqslant 3) \\ 5t-20 & ,(3<t\leqslant 4) \end{cases}$$

(1) 求$u_L(t)$

在 $0\leqslant t\leqslant 1$期间：$i_L=5t(\mathrm{A})$，于是有

$$u_L = L\frac{\mathrm{d}i_L}{\mathrm{d}t} = 2\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t}(5t) = 2\times 5 = 10(\mathrm{V})$$

在 $1 < t \leqslant 3$ 期间：$i_L = -5t + 10(\mathrm{A})$，于是有

$$u_L = 2\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t}(-5t + 10) = 2\times(-5) = -10(\mathrm{V})$$

在 $3 < t \leqslant 4$ 期间：$i_L = 5t - 20(\mathrm{A})$，于是有

$$u_L = 2\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t}(5t - 20) = 2\times 5 = 10(\mathrm{V})$$

电压 $u_L(t)$ 的波形如图 1－7 (c)所示。

(2) 求 $p_L(t)$

$$p_L = u_L i_L$$

$$p_L = \begin{cases} 50t\ , & (0 \leqslant t \leqslant 1) \\ 50(t-2), & (1 < t \leqslant 3) \\ 50(t-4), & (3 < t \leqslant 4) \end{cases}$$

其波形如图 1－7 (d)所示。

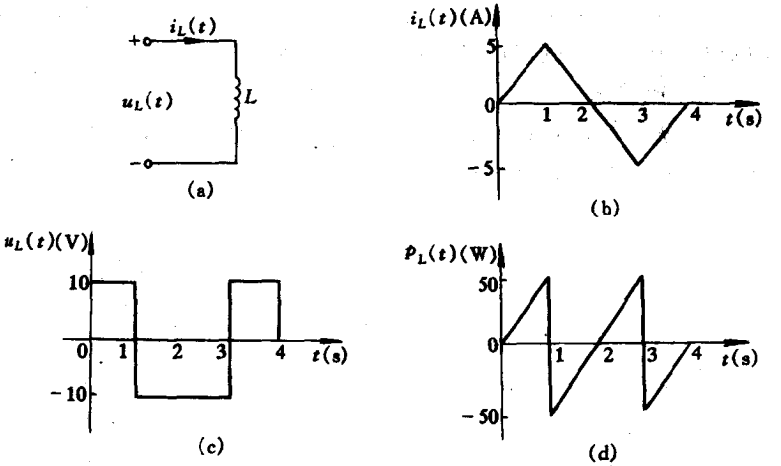


图 1－7

1.4 独 立 源

独立源包括电压源和电流源。

1. 电压源

电压源的电路符号如图 1－8 所示。其中(a)是用电池的符号专门表示直流电压源，(b)表示一般电压源，它既可以表示随时间变化的电压源，也可以表示直流电压源。直流电压源的电压符号常用大写字母 U_S 表示。

电压源端钮的伏安关系是

$$\begin{cases} u = U_S \\ i \text{ 为任意值} \end{cases} \tag{1.19}$$

或

$$\begin{cases} u = u_S(t) \\ i \text{ 为任意值} \end{cases} \tag{1.20}$$

电压源是对实际的蓄电池、干电池、直流发电机、交流发电机和电子稳压器等器件或设备的一种抽象。

2. 电流源

电流源的电路符号如图 1－9 所示。它既可以代表直流电流源，又可以代表随时间变化的电流源。

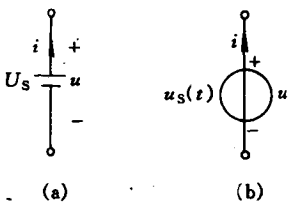


图 1－8 电压源

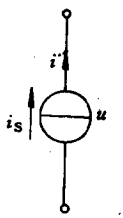


图 1－9 电流源

电流源端钮的伏安关系是：

$$\begin{cases} i = i_S \\ u \text{ 为任意值} \end{cases} \tag{1.21}$$

直流电流源常用大写字母 I_S 表示。

电流源是对光电池、电子稳流器等实际电源的一种抽象。它的端钮电流或为一个常数，或为一定的时间函数，而与端钮的电压无关。即此元件的电压可以为任意值，其具体的电压值取决于外电路的情况。

1.5 基尔霍夫定律

基尔霍夫定律是表明电路连接方式方面的规律，是电路分析的基本依据之一。

描述电路连接状况的几个基本术语是：

(1) 支路　有两种定义：

①电路中每个元件称为一个支路；

②电路中流有同一个电流的部分称为一个支路。

(2) 节点　也有两种定义，并且与支路的两种定义相对应，即：

①元件的端点称为节点；

②三个或三个以上支路的交点称为节点。

(3) 回路由支路组成的闭合路径称为回路。

(4) 网孔　其中不含有任何支路的回路称为网孔。

1. 基尔霍夫电流定律 (KCL)

对于任一电路中的任一节点，在任一时刻，流入或流出该节点的电流之和恒等于零。用数学公式可表达为

$$\sum i = 0 \tag{1.22}$$

运用 KCL 列写 KCL 方程的步骤如下：

(1) 首先标出各支路电流的参考方向；

(2) 规定以流出节点的电流为正，还是以流入节点的电流为正。这个规定是任意的，但一旦规定，各节点的电流皆应以此为准；

(3) 若规定流出节点的电流为正，则 $\sum i=0$ 式中左侧各项，其参考方向为：流出节点的取正号，流入节点的取负号；若规定以流入节点的电流为正时，则其情况与上相反。

基尔霍夫电流定律推论 *1*：流出某节点电流之和一定等于流入该节点的电流之和。

基尔霍夫电流定律推论 *2*：任一支路的电流都可以由与该支路汇集于同一个节点的其他所有支路的电流求出。

[例 **1.5**] 在图 1－10 中，已知 $i_1=3\text{A}$，$i_2=2\text{A}$，$i_3=8\text{A}$，求电流 i_4。

解法一 对节点 A：

$$i_5=i_1-i_2=3-2=1(\text{A})$$

对节点 B：

$$i_4=i_5-i_3=1-8=-7(\text{A})$$

解法二 基尔霍夫电流定律本质上是电荷守恒定律，亦称电流连续性原理。因此，对电路中的任一包围面，在任一时刻流入该包围面的电流之和，一定等于流出该包围面的电流之和。对本例，作一包围面（如图中的虚线所示），则有

$$i_4=i_1-i_2-i_3=3-2-8=-7(\text{A})$$

2. 基尔霍夫电压定律（KVL）

对电路中的任一回路，任一时刻回路中所有元件的电压降之和恒等于零。用数学表达式可写作

$$\sum u=0 \tag{1.23}$$

运用 KVL 列写 KVL 方程的步骤如下：

(1) 首先标出各元件电压的参考极性；

(2) 规定沿该回路以顺时针循行方向为正，还是以逆时针循行方向为正；

(3) 根据各元件上电压的参考极性，决定 $\sum u = 0$ 式中左侧各项电压的正负号。若与规定的循行方向一致则取正号，与其相反者取负号。

基尔霍夫电压定律推论 1 ：对任一回路，在任一时刻，沿其回路所有电压降之和一定等于所有电压升之和。

基尔霍夫电压定律推论 2 ：电路中任一元件上的电压降或任意两点的电压降总可以由与该元件或该两点构成一个回路的其他元件上的电压来表示。即电路中任意两点的电压降一定等于由其假定的高电位端沿任一路径（亦即循行方向）到其低电位端的途径中所有元件的电压降之和。

[例 1.6] 已知图 1－11 中 $U_1 = 3\text{V}$，$U_2 = 2\text{V}$，$U_3 = 8\text{V}$，求 U_4。

解 选路径，经元件 B，A，C，有 $U_4 = -U_2 + U_1 - U_3 = -2 + 3 - 8 = -7(\text{V})$。

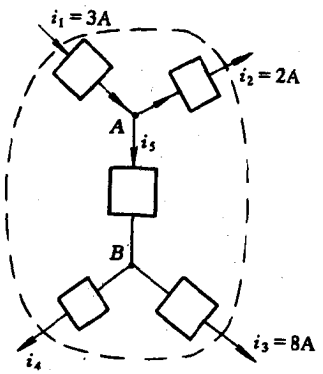


图 1－10

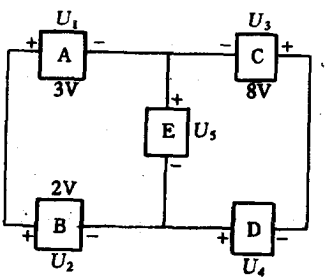


图 1－11

需要全本请访问 www.ertongbook.com