

# 第 1 章 电路模型和电路定律

本章介绍电路与电路模型的基本概念和基本的电路定律。主要内容有：电路模型的基本概念；描述电路的基本物理量电流、电压及其参考方向；电路的功率和能量；构成电路的基本电路元件及其伏安关系；描述电路中电流、电压约束关系的基尔霍夫定律。

## 1.1 电路与电路模型

实际电路(electric circuit)是为实现某种功能,由用电设备和器件相互连接组成的总体。如图 1-1 (a)所示,干电池(cell)和灯泡由两根导线(wire)连接起来便构成一个简单的照明电路。

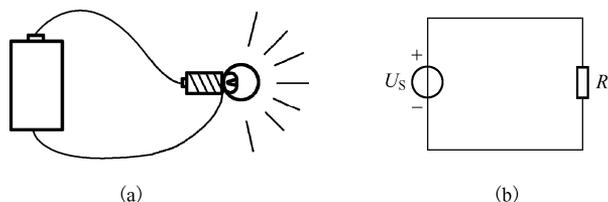


图 1-1 实际电路与电路模型

实际电路的作用可分为两方面:一方面完成电能的传输、分配以及电能与其他各种形式的能量(energy)之间的相互转换,如电力系统、照明系统等;另一方面可以产生、变换和处理某种电信号(signal),如电子技术中振荡、扫描、放大、调谐等。

实际电路的组成可能非常简单,也可能十分复杂。无论简单还是复杂,总要包含以下三个基本部分:

- (1) 电源(source):产生并提供电能的设备或器件,其功能是将其他形式的能量转变为电能,为电路提供能源,如电池、发电机等;
- (2) 负载(load):吸收或消耗电能的设备或器件,如灯泡、电炉、扬声器等,又称用电器或换能器,其功能是将电能转变为其他所需形式的能量;
- (3) 导线:用来连接各种用电设备或器件,使之形成完整的电路,并在其中引导电流(current),传输能量。

此外,电路中还会有各种控制和保护设备或装置,如开关、继电器和熔断器等。

研究和分析电路问题就是研究和分析发生在电路中的各种物理过程和电磁现象(electromagnetic phenomena)。每种实际电路的设备或器件都可能同时发生几种电磁现象。为便于研究和分析,通常用理想电路元件及其组合来代替实际电路的设备或器件,构成与实际电路对应的电路模型(circuit model)。理想电路元件是实际电路器件在一定条件下的理想化模型,是具有某种单一电磁性质的假想元件。例如,理想电阻元件(resistor)表示将电能转换成其他形式的能量且不可逆消耗的物理过程。电炉、电灯等实际电路器件都可以用理想电阻元件来代替。理想电压源(voltage source)元件表示将其他形式的能量转换成电能并可对外提供确定电压(voltage)的电路器件。干电池、蓄电池等实际电路器件在不考虑

电池内部对电能的消耗的条件下，可以用理想电压源元件代替；否则，用理想电压源元件和理想电阻元件的串联组合来代替。

当实际电路的尺寸远小于其工作频率下电磁波的波长时，电路的电磁过程可视为集中在元器件内部进行。在任一时刻，流入二端元件一端的电流恒等于流出元件另一端的电流，即电流通过元件的时间相对于电流的变化周期可以忽略不计。我们把这样的元件称为集中参数元件(lumped element)。由集中参数元件构成的电路称为集中参数电路(lumped circuit)。本书讨论的均为集中参数电路。

对图 1-1(a)所示的实际电路，用理想电阻元件  $R$  代替小灯泡，用理想电压源元件  $U_S$  代替干电池(电池内部对电能的消耗忽略不计)，用线段代替连接导线(导线电阻忽略不计)，就可以得到与之对应的电路模型，如图 1-1(b)所示。这种由理想电路元件组成、反映实际电路连接关系的电路模型图，又称电路图(circuit diagram)，通常简称为电路(circuit)。

本书所提及的电路均指由理想电路元件构成的电路模型，而不是实际电路。同时，将理想电路元件简称为电路元件。

结构比较复杂的电路又称(电)网络(network)。电路和网络在本书中没有严格的区别，可以通用。描述电路或网络有一些常用的概念或术语，以图 1-2 所示网络为例，介绍如下。

(1) 支路(branch)：网络中没有分岔的一段电路。

(2) 节点(node)：3 条或 3 条以上支路的连接点。

在图 1-2 中，有  $R_1, u_{S1}, R_2, u_{S2}, R_3, u_{S3}, R_4, R_5, R_6$  共 6 条支路和  $A, B, C, D$  共 4 个节点。支路  $R_4, R_5, R_6$  不含电源，称为无源支路；其余 3 条支路均含有电源，称为含源支路。

应该指出，支路和节点的定义不是唯一的。本书采用上述的支路和节点的定义。有时为了方便，也可以定义一个二端元件为一条支路，支路之间的连接点即为一个节点。若按这种定义，则图 1-2 中有 9 条支路和 7 个节点(除  $A, B, C, D$  4 点外，还有  $A', B', C'$  3 点亦为节点)。

(3) 回路(loop)：网络中由若干条支路组成的闭合路径(path)。图 1-2 中共有 7 个回路，分别是  $AA'BDA, BB'CDB, CC'ADC, AA'BB'CDA, BB'CC'ADB, CC'AA'BDC$  和  $AA'BB'CC'A$ 。

(4) 平面网络(planar network)：如果将一个网络展开在平面上，经过适当的调整可以使其所有支路均互不交叉，则称该网络为平面网络；否则称为非平面网络。

可以证明，4 个及少于 4 个节点(节点为本书定义)的网络均为平面网络。显然，图 1-2 是一个平面网络。

(5) 网孔(mesh)：在平面网络中，没有被支路穿过的回路，称为网孔。网孔是一种特殊的回路。在图 1-2 中的 7 个回路中，只有回路  $AA'BDA, BB'CDB, CC'ADC$  是网孔。

应该指出，只有对平面网络才有网孔的概念；对非平面网络，只有回路的概念而没有网孔的概念。

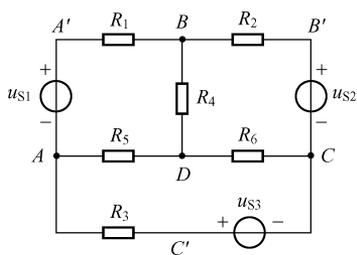


图 1-2 网络常用概念示例

## 1.2 电流、电压及其参考方向

描述电路性能的物理量统称为电路的变量(variable)，如电流、电压、电荷(charge)、磁链(fluxlinkage)等。其中常用的是电流和电压。

## 1.2.1 电流

电荷有规则的运动形成电流。习惯上把正电荷运动的方向规定为电流的方向。电流的大小用电流强度来表示。电流强度指单位时间内通过载流体横截面积的电荷量，即：

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

式中，电荷  $q$  的单位为库仑(C)；时间  $t$  的单位为秒(s)；电流强度  $i(t)$  (简记  $i$ ) 的单位为安培(Ampere)，简称安(A)，也可以用千安(kA)、毫安(mA)、微安( $\mu\text{A}$ )作为电流单位，其换算关系如下：

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

电流是矢量，因此其大小和方向要同时给出或同时确定。流经电路中某一具体支路的电流，其实际方向只有两种可能，非此即彼；但在实际的电路分析中，有时很难准确判别电流的实际方向。为了便于分析，我们事先指定一个电流方向，当然这一方向不一定是电流的实际方向。这一事先任意指定的电流方向称为电流的参考方向(reference direction)。

电流的参考方向指定后，电流的数值将有正负之分。当电流的实际方向与参考方向一致时，把电流表示为正值；反之，把电流表示为负值。电流的参考方向一般直接标在其所在的支路上，像图 1-3 所示的一段电路，电流的实际方向如虚线箭头所示，由  $A$  流向  $B$ ，大小为  $2 \text{ A}$ 。若指定的参考方向如图 1-3(a) 所示，则电流  $i = 2 \text{ A}$ ；若指定的参考方向如图 1-3(b) 所示，则电流  $i = -2 \text{ A}$ 。

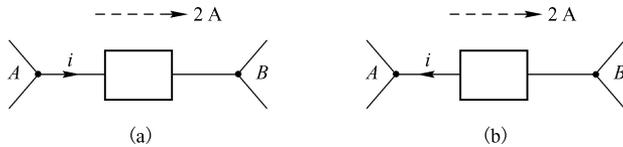


图 1-3 电流参考方向示意图

用电设备和器件工作时电流不应超过它的额定电流(rated current)。额定电流是指用电器在额定环境条件(环境温度、日照、海拔、安装条件等)下，长期连续工作时的允许电流。

## 1.2.2 电压、电动势、电位

电路的电压、电动势、电位是既彼此关联又有区别的物理量。

### 1. 电位(potential)

单位正电荷在电路中某点所具有的电位能，称为该点的电位。

电位的数值是相对于所选定的参考点的。电位参考点是规定其电位能为零的点，可以任意指定，通常都是选取电路中接地或接机壳的公共端为参考点。电位用字母  $v$  表示，如  $A$  点的电位用  $v_A$  来表示。当  $A$  点的电位高于参考点时， $v_A > 0$ ；反之， $v_A < 0$ 。电路中某点的电位将随参考点的不同而不同。但参考点一旦确定，电路中各点的电位便都有了唯一的确定值。电位的这一性质称为电位的单值性。

### 2. 电压

电路中某两点之间的电位之差，称为这两点之间的电压。

习惯上把电场力的方向，即由高电位端指向低电位端的方向称为电压方向。所以电压也是

矢量, 用字母  $u$  表示。习惯上用“+”、“-”极性表示电压的方向, 且规定电压方向由“+”指向“-”。如图 1-4(a)中表示  $A$  点的电位高于  $B$  点的电位, 电压方向由  $A$  点指向  $B$  点, 数值为  $u = v_A - v_B$ 。随着电荷的移动, 正电荷所具有的电位能在减少, 减少的能量被这段电路所吸收。因此, 电路中某两点之间的电压也可以说成是单位正电荷在电场力的作用下由一点移到另一点的过程中所失去的电位能, 即:

$$u = v_A - v_B = \frac{dw}{dq} \quad (1-2)$$

式中,  $dw$  为电荷  $dq$  在由  $A$  点移到  $B$  点的过程中所失去的总电位能。电位能的单位为焦耳(J), 电荷量的单位为库仑(C), 电压的单位为伏特(Volt), 简称伏(V)。电位和电压的单位相同。

实际计算中, 也可以用千伏(kV)、毫伏(mV)、微伏( $\mu$ V)作为电压的单位, 其换算关系如下:

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

电位和电压是两个既有联系又有区别的概念。电位是对电路中某点而言的, 其值与参考点的选取有关。电压则是对电路中某两点而言的, 其值与参考点的选取无关。有时提到电路中某点的电压, 实际上是指该点与参考点之间的电压, 此时它与该点的电位是一致的。

与电流相似, 电路中某两点间电压的实际方向有时也很难判别。为分析方便, 可以指定任一方为电压的参考方向: 当电压的实际方向与参考方向一致时, 电压值为正; 反之, 电压值为负。在指定参考方向下, 根据电压数值的正或负, 就可以确定电压的实际方向。

电压的参考方向可用参考极性(reference polarity)即“+”、“-”极性来标示; 也可以如图 1-4(b)所示, 在两点间的电路旁用箭头标示; 还可以用符号双下标来表示, 如  $u_{AB}$  表示该电压的参考方向为由  $A$  指向  $B$ 。显然  $u_{AB}$  与  $u_{BA}$  是不同的, 虽然它们都表示  $A$ 、 $B$  两点间的电压, 但由于参考方向不同, 两者之间相差一个负号, 即  $u_{AB} = -u_{BA}$ 。

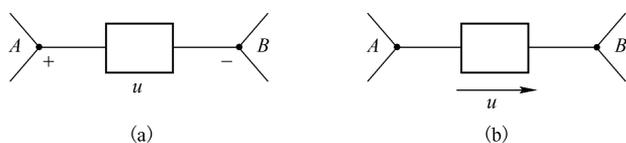


图 1-4 电压参考方向示意图

同额定电流一样, 实际用电设备和器件工作时有额定电压(rated voltage)的限制。额定电压是指用电器正常工作时的电压。超过额定电压会造成设备过流, 导致设备过热或损坏; 而低于额定电压时, 设备无法正常工作或不工作。

### 3. 电动势(electromotive force)

电动势只存在于电源内部, 其数值等于将单位正电荷由低电位端经电源内部移动到高电位端时电源所做的功, 方向由低电位指向高电位。

电动势用字母  $e$  表示。与电压用来描述电源之外的电路中正电荷的电位降落相反, 电动势一般用来描述电源内部正电荷电位的升高。对电源来讲, 其外部的电压和内部的电动势大小相等而方向相反。例如, 图 1-4(a)的方框中的元件若为电源元件, 则  $A$ 、 $B$  两点之间的电动势为  $e_{AB} = v_B - v_A = -u_{AB}$ 。电动势和电压的单位相同。

### 1.2.3 关联参考方向与非关联参考方向

电流和电压的参考方向在电路分析中起着十分重要的作用。在对任何具体电路进行实际分

析之前，都应先指定各有关电流和电压的参考方向，否则分析将无法进行。原则上，电流与电压的参考方向可以各自独立地任意指定。习惯上，同一段电路的电流和电压常常选取相互一致的参考方向，如图 1-5 所示，我们称这样选取的参考方向为关联参考方向。若两者方向选取不一致，则称为非关联参考方向，如图 1-6 所示。

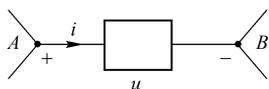


图 1-5 关联参考方向

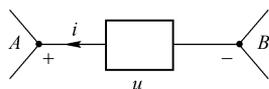


图 1-6 非关联参考方向

这里需强调一下，今后我们在谈到电流和电压的方向时，如无特别声明，一般指的都是图中标示的参考方向，而不是其实际方向。初学者必须特别注意并逐步适应这一点。

### 1.3 电功率和能量

在电路分析和研究中，除了关注电压、电流的情况，电路能量的流动以及电能与其他形式能量的相互交换也是十分重要的。(电)功率(power)是量度电路中能量转换速率的一个物理量。电功率与电压、电流密切相关。

一段电路上电压、电流取关联参考方向时(如图 1-5 所示)，正电荷在电场力的作用下由高电位端移动到低电位端，通过这段电路将失去一部分电位能，这部分能量被这段电路所吸收。由式(1-2)可知，这段电路吸收的能量为

$$dw = udq$$

则单位时间内这段电路吸收的能量即电功率(简称功率)为

$$p = \frac{dw}{dt} = u \frac{dq}{dt} = ui \quad (1-3)$$

式(1-3)说明，在关联参考方向下，一段电路所吸收的功率为其电压和电流的直接乘积。

当电压和电流为非关联参考方向时(如图 1-6 所示)，则这段电路吸收的功率为

$$p = -ui$$

以上所计算的功率是以吸收为前提的。若计算结果为  $p > 0$ ，表明这段电路的确是吸收功率的；若  $p < 0$ ，则表明这段电路实际上是发出功率的。

一段电路功率的计算也可以发出为前提，即非关联参考方向下，正电荷由低电位端移动到高电位端，通过这段电路将获得一部分电位能，获得的这部分能量由这段电路所发出。这段电路所发出的功率为

$$p' = \begin{cases} ui & (\text{非关联方向}) \\ -ui & (\text{关联方向}) \end{cases}$$

若计算结果为  $p' > 0$ ，表明这段电路的确是发出功率的；若  $p' < 0$ ，则表明这段电路实际是吸收功率的。

功率的单位为瓦特(Watt)，简称瓦(W)。1瓦特相当于1焦耳/秒(J/s)。

实际计算中，也可以用千瓦(kW)、毫瓦(mW)为功率单位，其换算关系如下：

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

用电设备和器件本身都有额定功率(rated power)的限制。额定功率是指用电器在额定电压与额定电流的条件下工作时的功率。若用电器的实际功率大于额定功率，则用电器可能会损坏；反之，用电器无法正常运行。

图 1-5 所示的一段电路在时间区间  $t_0 \sim t$  内从外界吸收的电能为

$$w = \int_{t_0}^t p(\xi) d\xi = \int_{t_0}^t u(\xi) i(\xi) d\xi \quad (1-4)$$

若  $w > 0$ ，表明这段电路的确是吸收电能的；若  $w < 0$ ，则表明该段电路实际是发出电能的。电能的单位为焦耳(J)。工程上常用瓦秒或千瓦时(kW·h)做电能的单位，千瓦时又称度。

**例 1-1** 求图 1-7 所示各元件或电路的功率。图中  $u_1 = 4 \text{ V}$ ， $i_1 = 0.2 \text{ A}$ ， $u_2 = 6 \text{ V}$ ， $i_2 = -0.5 \text{ A}$ ， $u_s = 3 \text{ V}$ ， $i = 2 \text{ mA}$ 。

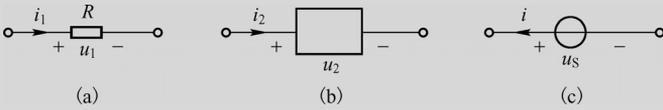


图 1-7 例 1-1 电路

说明：在求各功率之前应先明确所求功率是吸收还是发出的。在关联参考方向下， $p = ui$  是吸收的功率；反之，则为发出的功率。

**解** 图 (a) 中电阻吸收的功率为

$$p_1 = u_1 i_1 = 4 \times 0.2 = 0.8 \text{ W}$$

图 (b) 中该段电路吸收的功率为

$$p_2 = u_2 i_2 = 6 \times (-0.5) = -3 \text{ W}$$

由于  $p_2 < 0$ ，说明这段电路实际发出 3W 的功率。

图 (c) 中电压源发出的功率为

$$p_{u_s} = u_s i = 3 \times (2 \times 10^{-3}) = 6 \text{ mW}$$

## 1.4 电阻元件

电路元件是电路最基本的组成单元。每种元件都有其精确的数学定义和特定的表示符号，以及不同于其他元件的独有特性，正是这些特性构成了建立完整的电路方程的两种约束关系之一，即元件本身的特性所形成的电压电流关系 (Voltage Current Relation, VCR)，简称伏安关系。

电阻元件是电路中应用最广泛的元件。许多实际的电路器件 (如电阻器、电热器、电灯泡、扬声器等) 都可以用电阻元件来表示。

电阻元件是其特性可以用  $u-i$  平面上的一条曲线来表示的二端电路元件。在  $u-i$  平面上表示电阻元件特性的曲线称为电阻元件的伏安特性曲线，简称伏安特性 (Volt-Ampere characteristic)。如果伏安特性是一条通过  $u-i$  平面坐标原点的直线，则称其对应的电阻元件为线性电阻元件 (linear resistor)；否则，为非线性电阻元件 (non-linear resistor)。图 1-8 (a) 所示特性曲线对应的是线性电阻元件，图 1-8 (b) 所示的两条特性曲线对应的都是非线性电阻元件。

线性电阻元件的电路符号如图 1-9 所示。在关联参考方向下，线性电阻元件的 VCR 满足欧姆定律 (Ohm's Law)

$$u = Ri \quad \text{或} \quad i = Gu \quad (1-5)$$

式中， $R$ 、 $G$  在一般情况下均为不变的正实常数，与  $u$ 、 $i$  无关，且  $G = 1/R$ 。 $R$  反映了元件对电流的阻碍能力，称为元件的电阻 (resistance)，单位为欧姆 (Ohm)，用字母  $\Omega$  表示；电压一定时， $R$  越大，电流越小。 $G$  反映了元件对电流的传导能力，称为元件的电导

(conductance), 单位为西门子(Siemens), 用字母  $S$  表示; 电压一定时,  $G$  越大, 电流越大。 $R$  和  $G$  都是电阻元件的参数, 它们从不同的角度反映了电阻元件的特性。

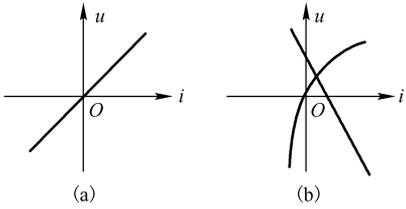


图 1-8 电阻元件的伏安特性曲线

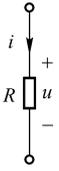


图 1-9 电阻元件的电路符号

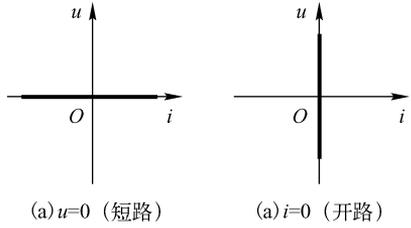


图 1-10 极端情况下电阻元件的伏安特性

当  $R=0$  或  $G \rightarrow \infty$  时, 由式(1-5)可知, 无论  $i$  为何值(只要为有限值), 将恒有  $u=0$ 。此时电阻元件的伏安特性将与  $i$  轴重合, 如图 1-10(a)所示, 这种情况下电阻元件的作用相当于短路(short circuit)。任何一个元件或一段电路只要其两端电压为零, 便可视为短路。

同理, 当  $R \rightarrow \infty$  或  $G=0$  时, 由式(1-5)可知, 无论  $u$  为何值(只要为有限值), 将恒有  $i=0$ 。此时电阻元件的伏安特性将与  $u$  轴重合, 如图 1-10(b)所示, 这种情况下电阻元件的作用相当于断路或开路(open circuit)。任何元件或一段电路, 只要流经其中的电流为零, 便可视为开路。短路和开路是以后经常用到的两个重要概念。

由线性电阻元件的伏安关系可知, 任何时刻线性电阻元件的电压(或电流)完全由同一时刻的电流(或电压)所决定, 而与该时刻以前的电流(或电压)无关。因此, 电阻元件是一种瞬时元件。

当电压、电流取关联参考方向时, 线性电阻元件吸收的瞬时功率为

$$p = ui = Ri^2 = u^2 / R = Gu^2 = i^2 / G \tag{1-6}$$

即电阻元件吸收的功率与电流或电压的平方成正比。因此, 当  $R$  或  $G$  为正值时, 将恒有  $p \geq 0$ 。这说明正值电阻是纯粹的耗能元件(dissipative element)。此外, 由式(1-6)还可以看出: 当电流一定时, 阻值越大, 电阻吸收的功率越大; 当电压一定时, 阻值越大, 电阻吸收的功率越小。

线性电阻元件在时间区间  $t_0 \sim t$  内吸收的电能为

$$w = \int_{t_0}^t u(\xi)i(\xi)d\xi = \int_{t_0}^t Ri^2(\xi)d\xi = \int_{t_0}^t Gu^2(\xi)d\xi$$

这些电能将被转换成热能消耗掉。

在关联参考方向下, 正值电阻元件的伏安特性在  $u-i$  平面的一、三象限。如果一个线性电阻元件的伏安特性在  $u-i$  平面的二、四象限, 则此元件的电阻将为负值, 负值电阻元件吸收的功率由式(1-6)知将小于零, 说明它实际上是发出电能的。负值电阻元件一般需经过特殊的设计。为了叙述方便, 把线性电阻元件简称为电阻。

## 1.5 电 容 元 件

电容元件(capacitor)是实际电容器的理想化模型, 它反映了电压引起电荷聚集和电场能量储存这一物理过程和电磁现象。

电容元件是其特性可以用  $q-u$  平面上的一条曲线来表示的二端电路元件。在  $q-u$  平面上

表示电容元件特性的曲线称为电容元件的库伏特性曲线，简称库伏特性 (Coulomb-Volt characteristic)。如果库伏特性是一条通过  $q-u$  平面坐标原点的直线，如图 1-11 所示，则称其对应的电容元件为线性电容元件，否则为非线性电容元件。

线性电容元件的电路符号如图 1-12 所示。

两个极板上的电荷与电压成线性关系，即

$$q = Cu \quad (1-7)$$

式(1-7)中， $C$ 在一般情况下为一个不变的正常数，与  $q$ 、 $u$  无关，称为电容元件的电容 (capacitance)。电荷的单位为库仑 (C)，电压的单位为伏特 (V)；电容的单位为法拉 (Farad)，简称法 (F)。工程中也可以用微法 ( $\mu\text{F}$ ) 和皮法 ( $\text{pF}$ ) 做电容的单位，它们之间的换算关系为

$$1 \mu\text{F} = 10^{-6} \text{ F}$$

$$1 \text{ pF} = 10^{-12} \text{ F}$$

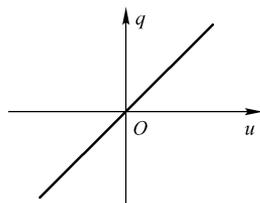


图 1-11 电容元件的库伏特性曲线

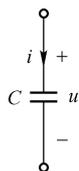


图 1-12 电容元件的电路符号

随着加在电容两端的电压的变化，电容两极板上存储的电荷也随之变化。电荷增加的过程称为充电，电荷减少的过程称为放电。在充放电的过程中，必有电流产生。当电压电流为关联参考方向时，将有

$$i = \frac{dq}{dt} = \frac{d(Cu)}{dt}$$

即

$$i = C \frac{du}{dt} \quad (1-8)$$

这就是线性电容元件的伏安关系。式(1-8)说明，线性电容元件的电流与其电压的变化率成正比，而与电压的大小无关。电压变化越快，电流越大；当电压恒定不变时，电流为零，此时电容元件相当于开路。由于电容元件的电流和电压之间所具有的上述动态关系，称电容元件是一种动态元件 (dynamic element)。

式(1-8)是用电压来表示电流的，是一种导数关系。如果用电流来表示电压，则电容元件的伏安关系又可以写成式(1-9)的积分形式：

$$u(t) = \frac{1}{C} \int_{-\infty}^t i(\xi) d\xi = \frac{1}{C} \int_{-\infty}^{t_0} i(\xi) d\xi + \frac{1}{C} \int_{t_0}^t i(\xi) d\xi = u(t_0) + \frac{1}{C} \int_{t_0}^t i(\xi) d\xi \quad (1-9)$$

式中， $t_0$  为积分过程中的某个指定时刻，称为初始时刻；而

$$u(t_0) = \frac{1}{C} \int_{-\infty}^{t_0} i(\xi) d\xi$$

是  $t_0$  时刻的电容电压，称为电容的初始电压 (initial voltage)。

式(1-9)表明，任一时刻电容的电压不仅与该时刻的电流有关，而且与该时刻以前所有时刻的电流均有关。这说明，电容元件对其电流的全部“历史”具有记忆功能，所以电容元件是一种记忆元件 (memory element)。相比之下，电阻元件就不具有记忆功能，故电阻元件是一种无记忆元件。

如果取初始时刻  $t_0 = 0$ ，则式(1-9)可以写成

$$u(t) = u(0) + \frac{1}{C} \int_0^t i(\xi) d\xi$$

若  $u(0) = 0$ ，则上式可简化为

$$u(t) = \frac{1}{C} \int_0^t i(\xi) d\xi$$

电容元件还是一种储能元件 (energy storing element)。它能把从电路中吸收的能量以电场

能的形式储存在元件的电场之中，而不是消耗掉。在适当的时候，储存的电场能会以某种方式释放出来；但释放的能量不会超过它所吸收并储存的能量，即电容元件本身既不消耗能量，也不会产生新的能量。

在关联参考方向下，电容元件吸收的功率为

$$p = ui = uC \frac{du}{dt}$$

电容元件在某时刻所储有的电场能，也就是它在过去所有时刻从外界吸收的能量为

$$w_C(t) = \int_{-\infty}^t u(\xi)i(\xi)d\xi = C \int_{u(-\infty)}^{u(t)} u(\xi)du(\xi) = \frac{1}{2}Cu^2(t) - \frac{1}{2}Cu^2(-\infty)$$

因  $u(-\infty)$  为储能之初的电容电压，故应有  $u(-\infty) = 0$ 。于是，电容元件在某时刻所储有的电场能为

$$w_C(t) = \frac{1}{2}Cu^2(t) \quad (1-10)$$

式(1-10)说明，电容元件在某时刻所储有的电场能与该时刻电压的平方成正比。它仅与该时刻的电压有关，而和以往电压的变化情况以及此时电流的大小甚至有无均无关。电容元件储存或释放能量的过程往往体现在电容元件两端电压的升高或降低，由于能量一般是不能突变的，所以电容元件两端的电压一般情况下是不能突变的。

为了叙述方便，把线性电容元件简称为电容。

**例 1-2** 已知电容元件的电容  $C = 2\text{F}$ ，加在其上的电压  $u$  的波形如图 1-13(a) 所示，电压、电流取关联参考方向，试画出其电流  $i$ 、功率  $p$  和储能  $w_C$  的波形。

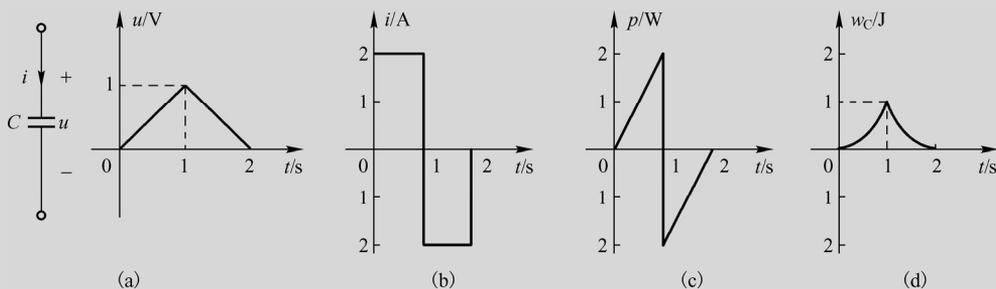


图 1-13 例 1-2 图

**解** 电容电压的表达式为

$$u(t) = \begin{cases} t \text{ V} & (0 \leq t \leq 1 \text{ s}) \\ -(t-2) \text{ V} & (1 \leq t \leq 2 \text{ s}) \\ 0 \text{ V} & (t > 2 \text{ s}) \end{cases}$$

电容的电流为

$$i(t) = C \frac{du}{dt} = \begin{cases} 2 \text{ A} & (0 < t < 1 \text{ s}) \\ -2 \text{ A} & (1 \text{ s} < t < 2 \text{ s}) \\ 0 \text{ A} & (t > 2 \text{ s}) \end{cases}$$

电流波形如图 1-13(b) 所示。

电容的功率为

$$p(t) = u(t)i(t) = \begin{cases} 2t \text{ W} & (0 < t < 1 \text{ s}) \\ 2(t-2) \text{ W} & (1 \text{ s} < t < 2 \text{ s}) \\ 0 \text{ W} & (t > 2 \text{ s}) \end{cases}$$

功率波形如图 1-13 (c) 所示。

电容的储能为

$$w_c(t) = \frac{1}{2} C u^2(t) = \begin{cases} t^2 \text{ J} & (0 \leq t \leq 1 \text{ s}) \\ (t-2)^2 \text{ J} & (1 \leq t \leq 2 \text{ s}) \\ 0 \text{ J} & (t > 2 \text{ s}) \end{cases}$$

储能随时间变化的波形如图 1-13 (d) 所示。

## 1.6 电感元件

电感元件 (inductor) 是实际电感线圈的理想化模型。它反映了电流产生磁场和磁场能量储存这一物理过程和电磁现象。

电感元件是其特性可以用  $\psi - i$  平面上的一条曲线来表示的二端电路元件。在  $\psi - i$  平面上表示电感元件特性的曲线称为电感元件的韦安特性曲线, 简称韦安特性 (Weber-Ampere characteristic)。如果韦安特性是一条通过  $\psi - i$  平面坐标原点的直线, 如图 1-14 所示, 则称其对应的电感元件为线性电感元件, 否则为非线性电感元件。

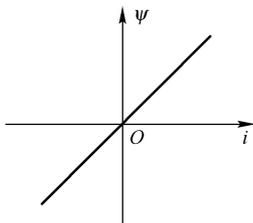


图 1-14 电感元件的韦安特性曲线

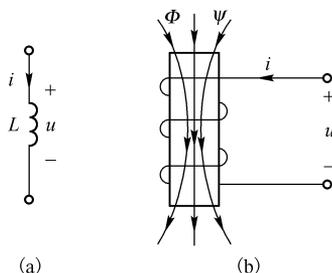


图 1-15 电感元件的电路符号及原理示意图

线性电感元件的电路符号如图 1-15 (a) 所示, 通过其中的电流与其产生的磁链成线性关系, 即

$$\psi = Li \quad (1-11)$$

式中,  $L$  在一般情况下为一个不变的正实常数, 与  $\psi$ 、 $i$  无关, 称为电感元件的电感 (inductance)。磁链的单位为韦伯 (Wb); 电流的单位为安培 (A); 电感的单位为亨利 (Henry), 简称亨 (H)。工程中也可以用毫亨 (mH) 和微亨 ( $\mu\text{H}$ ) 做电感的单位, 它们之间的换算关系为

$$1 \text{ mH} = 10^{-3} \text{ H} \quad 1 \mu\text{H} = 10^{-6} \text{ H}$$

可以把电感元件看作由无阻导线绕制而成的空芯线圈, 如图 1-15 (b) 所示。当在线圈中通以电流  $i$  时, 线圈中产生磁通  $\Phi$  并形成磁链  $\psi$ 。如果电流是变化的, 磁链  $\psi = Li$  也将随着变化。根据法拉第电磁感应定律 (Law of Electromagnetic Induction), 磁链的变化将在线圈两端引起感应电压 (induced voltage), 而且在电流与磁通或磁链的方向满足右手螺旋关系, 感应电压和电流方向一致的前提下, 将有

$$u = \frac{d\psi}{dt} = \frac{d(Li)}{dt}$$

即

$$u = L \frac{di}{dt} \quad (1-12)$$

这就是线性电感元件的伏安关系。式 (1-12) 说明, 线性电感元件的电压与其电流的变化率成正比, 而与电流的大小无关。电流变化越快, 电压越高; 当电流恒定不变时, 电压为零, 此时电感元件相

当于短路。同样，由于电感元件的电压和电流之间具有动态关系，故电感元件是一种动态元件。

式(1-12)是用电流来表示电压的，是一种导数关系。如果用电压来表示电流，则电感元件的伏安关系又可以写成式(1-13)的积分形式：

$$i(t) = \frac{1}{L} \int_{-\infty}^t u(\xi) d\xi = \frac{1}{L} \int_{-\infty}^{t_0} u(\xi) d\xi + \frac{1}{L} \int_{t_0}^t u(\xi) d\xi = i(t_0) + \frac{1}{L} \int_{t_0}^t u(\xi) d\xi \quad (1-13)$$

式中， $t_0$  是积分过程中的某个指定时刻，称为初始时刻；而

$$i(t_0) = \frac{1}{L} \int_{-\infty}^{t_0} u(\xi) d\xi$$

是  $t_0$  时刻的电感电流，称为电感的初始电流 (initial current)。

式(1-13)表明，任一时刻电感的电流不仅与该时刻的电压有关，而且与该时刻以前所有时刻的电压均有关。这说明，电感元件对其电压的全部“历史”具有记忆功能，所以电感元件是一种记忆元件。

如果取初始时刻  $t_0 = 0$ ，则式(1-13)可以写成

$$i(t) = i(0) + \frac{1}{L} \int_0^t u(\xi) d\xi$$

若  $i(0) = 0$ ，则上式可简化为

$$i(t) = \frac{1}{L} \int_0^t u(\xi) d\xi$$

电感元件还是一种储能元件。它能把从电路中吸收的能量以磁场能的形式储存在元件的磁场之中，而不是消耗掉。在适当的时候，储存的磁场能会以某种方式释放出来；但释放的能量不会超过它所吸收并储存的能量，即电感元件本身既不消耗能量，也不会产生新的能量。

在关联参考方向下，电感元件吸收的功率为

$$p = ui = Li \frac{di}{dt}$$

电感元件在某时刻所储存的磁场能，也就是它在过去所有时刻从外界吸收的能量为

$$w_L(t) = \int_{-\infty}^t u(\xi) i(\xi) d\xi = L \int_{i(-\infty)}^{i(t)} i(\xi) di(\xi) = \frac{1}{2} Li^2(t) - \frac{1}{2} Li^2(-\infty)$$

因  $i(-\infty)$  为储能之初的电感电流，故应有  $i(-\infty) = 0$ 。于是，电感元件在某时刻所储有的磁场能为

$$w_L(t) = \frac{1}{2} Li^2(t) \quad (1-14)$$

式(1-14)说明，电感元件在某时刻所储有的磁场能与该时刻电流的平方成正比，它仅与该时刻的电流有关，而和以往电流的变化情况以及此时电压的大小甚至有无均无关。电感元件储存或释放能量的过程往往体现在流过电感元件的电流的增加或减少，由于能量一般是不能突变的，所以流过电感元件的电流一般情况下是不能突变的。

为了叙述方便，把线性电感元件简称为电感。

**例 1-3** 已知电感元件的电感  $L = 2 \text{ H}$ ，其两端电压  $u$  的波形如图 1-16(a) 所示，电压、电流取关联参考方向，试画出电流  $i$ 、功率  $p$  和储能  $w_L$  的波形。

**解** 电感电压的表达式为

$$u(t) = \begin{cases} 2 \text{ V} & (0 \leq t \leq 1 \text{ s}) \\ 0 \text{ V} & (t > 1 \text{ s}) \end{cases}$$

当  $0 \leq t \leq 1$  s 时

$$i(t) = i(0) + \frac{1}{L} \int_0^t u(\xi) d\xi = 0 + \frac{1}{2} \int_0^t 2 d\xi = t \text{ A}$$

当  $t > 1$  s 时

$$i(t) = i(1) + \frac{1}{L} \int_1^t u(\xi) d\xi = 1 + \frac{1}{2} \int_1^t 0 d\xi = 1 \text{ A}$$

即电感的电流为

$$i(t) = \begin{cases} t \text{ A} & (0 \leq t \leq 1 \text{ s}) \\ 1 \text{ A} & (t > 1 \text{ s}) \end{cases}$$

电流波形如图 1-16(b) 所示。

电感的功率为

$$p(t) = u(t)i(t) = \begin{cases} 2t \text{ W} & (0 \leq t \leq 1 \text{ s}) \\ 0 \text{ W} & (t > 1 \text{ s}) \end{cases}$$

功率波形如图 1-16(c) 所示。

电感的储能为

$$w_L(t) = \frac{1}{2} Li^2(t) = \begin{cases} t^2 \text{ J} & (0 \leq t \leq 1 \text{ s}) \\ 1 \text{ J} & (t > 1 \text{ s}) \end{cases}$$

储能随时间变换的波形如图 1-16(d) 所示。

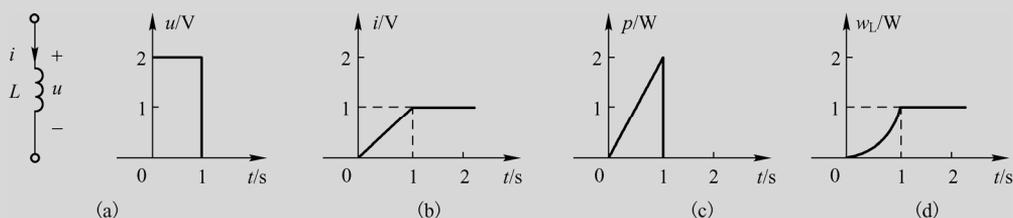


图 1-16 例 1-3 图

## 1.7 电压源和电流源

独立电压源 (independent voltage source) 和独立电流源 (independent current source) 分别是实际电压源和实际电流源的理想化模型。

独立电压源是能够对外提供按给定规律变化的确定电压的二端电路元件，简称电压源。

电压源的电路符号如图 1-17 所示，其端电压用  $u_S(t)$  表示，电压源与外电路的连接如图 1-18(a) 所示。

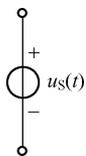


图 1-17 电压源的电路符号

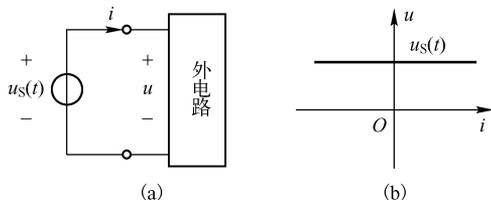


图 1-18 电压源与外电路连接及特性曲线

若电压源的端电压  $u_S(t)$  为恒定值，则称其为恒定电压源或直流 (Direct Current, DC) 电压源；若电压源的端电压  $u_S(t)$  随时间按正弦规律变动，则称其为正弦电压源 (sinusoidal voltage source)，又称交流 (Alternating Current, AC) 电压源；若电压源的端电压  $u_S(t) = 0$ ，则称其为零值电压源，零值电压源相当于短路。

电压源最显著的特点是其端电压  $u_S(t)$  按给定规律变化，与外电路无关。这意味着，电压源的电流是任意的，由外电路来确定。电压源的上述特性可以用  $u-i$  平面上的一条平行于  $i$  轴

的直线来表示，如图 1-18 (b) 所示。

若取电压源的电压和电流为非关联参考方向，如图 1-18 (a) 所示，则电压源发出的功率为

$$p' = u_S i$$

这也是外电路吸收的功率。

独立电流源是能够对外提供按给定规律变化的确定电流的二端电路元件，简称电流源。

电流源的电路符号如图 1-19 所示，其电流用  $i_S(t)$  表示，电流源与外电路的连接如图 1-20 (a) 所示。

若电流源的电流  $i_S(t)$  为恒定值，则称其为恒定电流源或直流电流源；若电流源的电流  $i_S(t)$  随时间按正弦规律变动，则称其为正弦电流源 (sinusoidal current source)，又称交流电流源；若电流源的电流  $i_S(t) = 0$ ，则称其为零值电流源，零值电流源相当于开路。

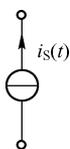


图 1-19 电流源的电路符号

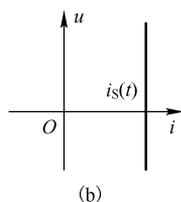
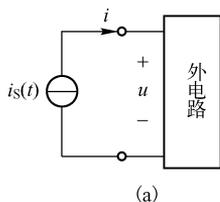


图 1-20 电流源与外电路连接及特性曲线

电流源最显著的特点是，其电流  $i_S(t)$  按给定规律变化，与外电路无关。这意味着，电流源的电压是任意的，由外电路来确定。电流源的上述特性可以用  $u-i$  平面上的一条平行于  $u$  轴的直线来表示，如图 1-20 (b) 所示。

若取电流源的电压和电流为非关联参考方向，如图 1-20 (a) 所示，则电流源发出的功率为

$$p' = u i_S$$

这也是外电路吸收的功率。

电压源和电流源这两种独立源通常都是为电路正常工作提供能量的，也统称为电路的激励 (excitation)。与激励相对应，由独立源引起的电路各处的电压和电流统称为电路的响应 (response)。

## 1.8 受控源

受控电源 (controlled source) 是某些电子器件的理想化模型，简称受控源。它是具有两条支路的四端电路元件，其中一条为受控源所在支路，另一条为控制量所在支路。

受控源可以是电压源或电流源，控制量可能是电路某处的电压或电流，因此受控源有四种类型，即电压控制电压源 (voltage controlled voltage source, 简记为 VCVS)、电流控制电压源 (current-controlled voltage source, 简记为 CCVS)、电压控制电流源 (voltage-controlled current source, 简记为 VCCS) 和电流控制电流源 (current-controlled current source, 简记为 CCCS)。受控源的电路符号如图 1-21 所示，为区别于独立电源，用菱形表示受控源。图中的  $u_1$  和  $i_1$  分别表示控制电压和电流， $\mu$ 、 $r$ 、 $g$  和  $\beta$  分别是受控源的控制系数，其中  $\mu$  和  $\beta$  均无量纲，分别称为转移电

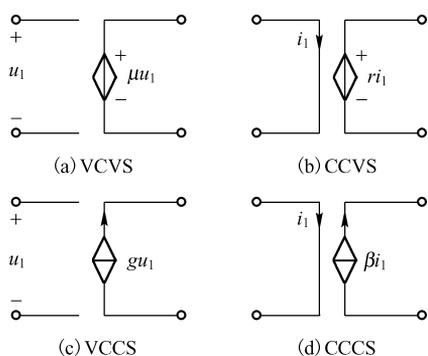


图 1-21 受控源的电路符号

压比和转移电流比,  $r$  和  $g$  分别称为转移电阻和转移电导。当受控源的控制系数为常数时, 称为线性受控源。本书仅考虑线性受控源, 故省略“线性”二字而直接称之为受控源。

受控源作为一种电源元件, 除受控性质即不能脱离控制支路而独立存在之外, 其他特性与独立电源没有区别。但受控源毕竟不是独立电源, 它在电路中并不能单独起激励的作用, 在一个没有独立电源存在的电路中受控源是不能工作的。此外, 受控源两条支路间是一种耦合 (coupling) 关系, 应视为一个元件, 即受控源支路与控制量支路是一个不可分割的整体。

按照能否产生并对外提供能量可将电路元件分为有源元件和无源元件。独立源和受控源均为有源元件, 而电阻、电容、电感元件均为无源元件。

以上几节介绍的电阻元件、电容元件、电感元件及受控源元件均为线性元件。由线性元件和独立源构成的电路称为线性电路 (linear circuit)。若电路中除独立源外还含有非线性元件, 则称为非线性电路。本书所讨论的电路均为集中参数电路, 而且都是线性电路。

## 1.9 基尔霍夫定律

在集中参数电路中, 各元件的电流和电压受到两个方面的约束: 一是元件本身的特性所形成的约束, 即元件特有的电压电流关系 (VCR); 二是元件相互之间的连接所构成的约束, 基尔霍夫定律 (Kirchhoff's Laws) 就反映了这方面的约束关系。

基尔霍夫定律是集中参数电路的基本定律, 是分析各种电路问题的基础。基尔霍夫定律包括电流定律和电压定律两部分。

### 1.9.1 基尔霍夫电流定律

基尔霍夫电流定律 (Kirchhoff's Current Law, KCL) 又称基尔霍夫第一定律, 是描述电路中各支路电流约束关系的定律。该定律指出: 对于任一电路中的任一节点, 在任一时刻, 流出该节点的所有支路电流的代数和等于零。其数学表达式为

$$\sum i = 0$$

在具体应用 KCL 之前, 要先指定各电流的参考方向, 根据其参考方向决定求和过程中的正和负。若规定流出节点的电流为正, 则流入节点的电流为负 (也可以做相反的规定)。例如对于图 1-22 所示的电路, 各支路电流的参考方向已经设定, 将 KCL 应用于节点⑤得到节点电流方程

$$-i_3 - i_4 + i_5 + i_6 = 0 \quad (1-15)$$

它反映了汇集于节点⑤的各支路电流之间的约束关系。给定其中任意 3 个电流, 第 4 个电流便可随之确定。这说明, 汇集于某节点的所有支路电流中有一个是不独立的, 可由其余的电流来决定。

如果把流出和流入节点的电流分别写在方程的两边, 则式 (1-15) 可以改写成

$$i_5 + i_6 = i_3 + i_4 \quad (1-16)$$

式 (1-16) 表明, 流出节点⑤的电流之和等于流入该节点的电流之和。因此, KCL 也可以理解为在任一时刻, 流出电路某节点的电流之和等于流入该节点的电流之和, 即有

$$\sum i_{\text{出}} = \sum i_{\text{入}}$$

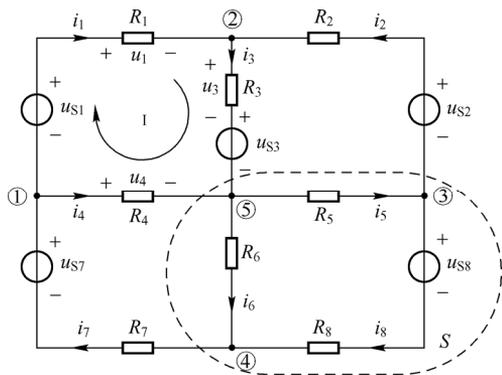


图 1-22 KCL 示例

可见, KCL 反映了电流的连续性, 是电荷守恒原理的体现。

KCL 通常应用于节点, 但对包围若干节点的闭合面也是适用的。例如对图 1-22 中虚线所示的闭合面  $S$ , 若设穿出闭合面的电流为正, 穿入闭合面的电流为负(也可以做相反的规定), 则应用 KCL 可得

$$i_2 - i_3 - i_4 + i_7 = 0 \quad (1-17)$$

事实上, 只要将闭合面内包围的③、④、⑤三个节点处的节点电流方程

$$i_2 - i_5 + i_8 = 0$$

$$-i_6 + i_7 - i_8 = 0$$

$$-i_3 - i_4 + i_5 + i_6 = 0$$

相加, 便可得到式(1-17)的结果。这说明, 穿过一个闭合面的各支路电流的代数和等于零, 也可以说成穿出某闭合面的电流之和等于穿入同一闭合面的电流之和, 即对上述闭合面  $S$  应用 KCL 也可以写成

$$i_2 + i_7 = i_3 + i_4$$

**例 1-4** 电路如图 1-23 所示, 已知  $i_1 = -2 \text{ A}$ ,  $i_4 = 3 \text{ A}$ ,  $i_5 = -4 \text{ A}$ , 求流经电阻  $R_2$ 、 $R_3$  的电流。

**解** 在应用 KCL 之前, 应先设定  $R_2$ 、 $R_3$  两支路电流的参考方向, 如图 1-23 所示。将 KCL 应用于节点  $B$ , 可得

$$i_3 = i_4 + i_5 = 3 + (-4) = -1 \text{ A}$$

再将 KCL 应用于节点  $A$ , 可得

$$i_1 + i_2 = i_3$$

即

$$i_2 = i_3 - i_1 = (-1) - (-2) = 1 \text{ A}$$

$i_2$  也可以通过将 KCL 应用于虚线所示的闭合面来求, 即由

$$i_1 + i_2 = i_4 + i_5$$

得

$$i_2 = i_4 + i_5 - i_1 = 3 + (-4) - (-2) = 1 \text{ A}$$

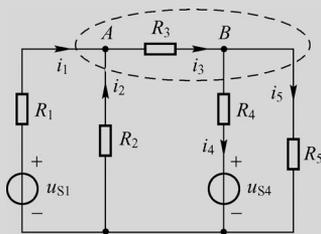


图 1-23 例 1-4 图

**例 1-5** 电路如图 1-24 所示, 求  $3 \Omega$  电阻上的电压  $u_1$ 。

**解** 将 KCL 应用于节点  $B$ , 可得

$$\frac{u_1}{3} = i + 0.5i$$

由 VCR 可知  $u = 5 \times 2 = 10 \text{ V}$

将 KCL 应用于虚线所示的闭合面, 可得

$$2 + 0.5i = i + 0.5u$$

即

$$i = 2 \times (2 - 0.5u) = 2 \times (2 - 0.5 \times 10) = -6 \text{ A}$$

则

$$u_1 = 3 \times (i + 0.5u) = 3 \times (-6 + 0.5 \times 10) = -3 \text{ V}$$

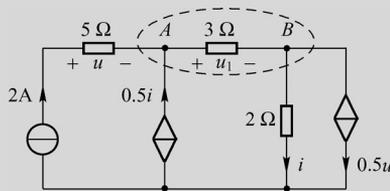


图 1-24 例 1-5 图

需要指出, 基尔霍夫电流定律与支路构成和元件的性质无关, 即 KCL 方程的具体形式仅与节点和支路的连接关系以及支路电流的参考方向有关。

## 1.9.2 基尔霍夫电压定律

基尔霍夫电压定律(Kirchhoff's Voltage Law, KVL)又称基尔霍夫第二定律, 是描述电路中

各支路电压约束关系的定律。该定律指出：对于任一电路中的任一回路，在任一时刻，沿该回路绕行一周途经各元件或支路电压的代数和等于零。其数学表达式为

$$\sum u = 0$$

在具体应用 KVL 之前，需先任意指定一个回路的绕行方向，并要指定各电压的参考方向，然后根据各电压方向与回路方向是否一致来决定求和过程中的正和负。若元件或支路电压参考方向与回路绕行方向相同取正号，相反则取负号。例如，对图 1-22 中的回路 I 应用 KVL，可得回路电压方程

$$u_1 + u_3 + u_{S3} - u_4 - u_{S1} = 0 \quad (1-18)$$

它反映了构成回路 I 的各元件电压之间的约束关系。给定其中的任意 4 个电压，第 5 个电压便可随之确定。这说明，构成回路的所有元件电压中有一个是不独立的，可由其余的电压来确定。

如果把与回路绕行方向相同和相反的电压分别写在方程的两边，则式 (1-18) 可以改写成

$$u_1 + u_3 + u_{S3} = u_4 + u_{S1} \quad (1-19)$$

式 (1-19) 表明，与回路绕行方向相同的电压降之和等于与回路绕行方向相反的电压升之和，即有

$$\sum u_{\text{降}} = \sum u_{\text{升}}$$

可见，KVL 实质上是能量守恒定律的体现。

KVL 通常应用于回路，但对于一段不闭合回路或称一条路径也可以应用。例如对图 1-25 所示的一段电路，由于在节点①、②之间并无支路相连而没有形成回路。但可以设想在①、②之间有一条支路，如图中虚线所示，该支路实际上是开路的，并设其电压为  $u_{12}$ ，于是按图中所示的回路方向应用 KVL，可得

$$u_{12} + u_3 + u_{S3} - u_4 = 0$$

由此可进一步求得①、②两点之间的电压为

$$u_{12} = u_4 - u_{S3} - u_3 \quad (1-20)$$

式 (1-20) 表明，电路中任意两点之间的电压等于由起点到终点沿途各电压的代数和，电压方向与路径方向（由起点到终点的方向）一致时为正，相反为负。

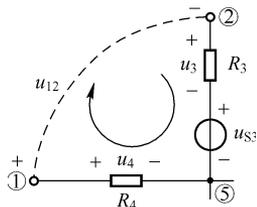


图 1-25 KVL 示例

**例 1-6** 电路如图 1-26 所示，已知  $i_1 = 0.5 \text{ A}$ ，求  $u_{ab}$ 、 $i_2$  和  $u_{ac}$ 。

**解** 将 KVL 应用于不闭合回路 I，可直接求得

$$u_{ab} = 20i_1 + 5 - 6 = 20 \times 0.5 + 5 - 6 = 9 \text{ V}$$

将 KVL 应用于回路 II，得

$$10i_2 = 5 - 10 = -5 \text{ V}$$

$$i_2 = -0.5 \text{ A}$$

将 KVL 应用于  $20 \Omega$ 、 $10 \Omega$  电阻组成的路径  $ac$ ，得

$$u_{ac} = 20i_1 + 10i_2 = 20 \times 0.5 + 10 \times (-0.5) = 5 \text{ V}$$

如果不求  $i_2$ ，电压  $u_{ac}$  也可经由  $20 \Omega$  电阻、 $5 \text{ V}$  及  $10 \text{ V}$  电压源组成的路径直接求得

$$u_{ac} = 20i_1 + 5 - 10 = 20 \times 0.5 + 5 - 10 = 5 \text{ V}$$

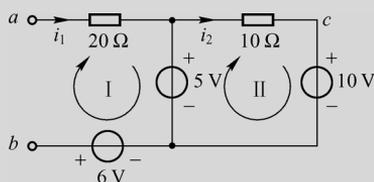


图 1-26 例 1-6 图

由例 1-6 可知，电压的计算结果与路径选择无关。

**例 1-7** 电路如图 1-27 所示, 求压控电压源的功率。

**解** 将 KVL 应用于回路 I 和 II, 可得

$$10 + u = 10i$$

$$10i = 3u + 6 + 20i$$

解联立方程组可得  $u = -4 \text{ V}$ ,  $i = 0.6 \text{ A}$ 。则压控电压源的功率为

$$p = 3ui = 3 \times (-4) \times 0.6 = -7.2 \text{ W}$$

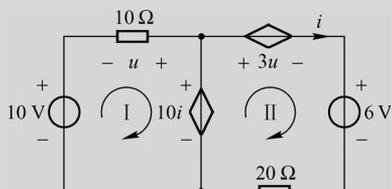


图 1-27 例 1-7 图

由于压控电压源两端电压电流为关联方向, 所以其实际是发出 7.2 W 功率。

## 本章内容延展与工程应用实例

### 电压、电流与电击

电以及各种用电设备给人们的日常生产和生活带来了极大的便利, 是现代生活不可或缺的重要资源和内容。但是, 用电设备使用不当对人身和财产所造成的危险和损害也时有发生, 比如触电事故造成的电烧伤、肢体残疾甚至死亡, 电器设备存在安全隐患或使用不当造成的火灾等。因此, 对电的危险性要有正确的认识。

用电设备附近或标签上常用如图 1-28 所示的警示标志来提醒电的潜在危险性, 但也容易使人对触电或电击的危险造成片面的理解。觉得高压危险性大, 而低压危险性小或没有危险。

实际上, 在干燥环境下, 常遇到衣服因起静电, 穿脱时会噼啪地发出响声的静电电压的大小常高达上千伏, 但我们并没有觉得受到什么伤害。电击能否造成实际的伤害取决于通过人体的电流的大小、频率、通电时间和通过人体的路径等因素。一般地说, 电流越大, 通电时间越长, 其损伤越严重; 如果电压相同, 则工频(50Hz)交流电要比直流电的危害大。电流通过人体的路径如图 1-29 所示, 其中从手到脚的路径是最危险的, 其次是从手到手, 危险最小的是从脚到脚。



图 1-28 警示标志

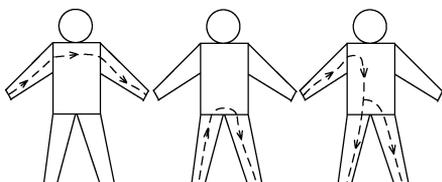


图 1-29 电击时人体电流路径

人体对不同电流的生理反应情况如表 1-1 所示(以工频电流为例)。因受到电击时实际流过人体的电流情况是难以确定的, 所以实际中一般采用容易确定的电压值来警示危险性。

表 1-1 人体对电流的生理反应

电流/mA	生理反应
0.5~1	有手指、手腕麻或痛的感觉
8~10	针刺感、疼痛感增强发生痉挛而抓紧带电体, 但终能摆脱带电体
20~30	会使人迅速麻痹不能摆脱带电体, 而且血压升高, 呼吸困难
50	会使人呼吸麻痹, 心脏开始颤动, 数秒钟后就致命

# 历史人物

**基尔霍夫** (Gustav Robert Kirchhoff, 1824~1887), 德国物理学家。

对电路理论和光谱学基本原理有重要贡献, 两个领域中各有根据其名字命名的基尔霍夫定律。

1845 年, 在哥尼斯堡大学物理专业学习期间, 提出了基尔霍夫电路定律, 发展了欧姆定律。1847 年, 运用图论的有关概念和方法解决了电路理论中求解联立方程的问题。1859 年, 与化学家罗伯特·威廉·本生合作, 制造了第一台光谱分析仪, 创立了光谱化学分析法。同年, 提出的基尔霍夫热辐射定律, 是辐射理论的重要基础。1860 年和 1861 年, 与本生合作相继发现了铯和铷这两种元素。1862 年, 提出绝对黑体的概念。基尔霍夫热辐射定律和绝对黑体概念是开辟 20 世纪物理学新纪元的关键之一。



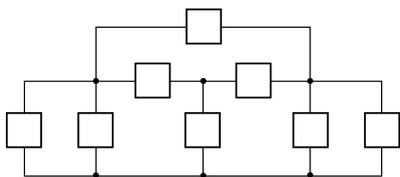
## 习题 1

1-1 题 1-1 图中各方框代表某一电路元件, 问此电路共有几条支路? 几个节点? 几个网孔?

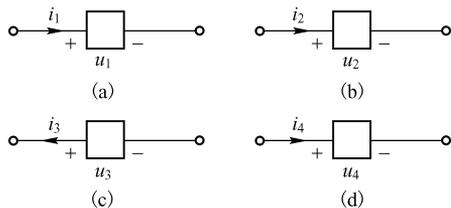
1-2 题 1-2 图中各方框代表一段电路, 在图示参考方向下, 已知各电压、电流的数值分别为  $u_1 = 6 \text{ V}$ ,  $i_1 = 2 \text{ A}$ ;  $u_2 = 6 \text{ V}$ ,  $i_2 = -20 \text{ mA}$ ;  $u_3 = -6 \text{ V}$ ,  $i_3 = 3 \text{ A}$ ;  $u_4 = -6 \text{ V}$ ,  $i_4 = -0.5 \text{ A}$ 。

(1) 指出各段电路电压、电流的实际方向;

(2) 计算各段电路吸收的功率, 并说明实际是吸收还是发出。



题 1-1 图



题 1-2 图

1-3 题 1-3 图中各方框代表某一电路元件, 在图示参考方向下求得各元件电流、电压分别为  $i_1 = 5 \text{ A}$ ,  $i_2 = 3 \text{ A}$ ,  $i_3 = -2 \text{ A}$ ;  $u_1 = 6 \text{ V}$ ,  $u_2 = 1 \text{ V}$ ,  $u_3 = 5 \text{ V}$ ,  $u_4 = -8 \text{ V}$ ,  $u_5 = -3 \text{ V}$ 。

(1) 指出各电流、电压的实际方向;

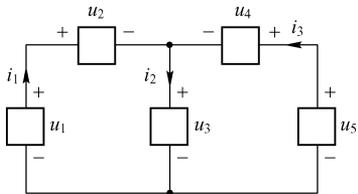
(2) 计算各元件吸收的功率, 并验证所得解答是否满足功率守恒。

1-4 题 1-4 图中已知电导  $G = 0.2 \text{ S}$ , 电压  $u = 10 \cos 100t \text{ V}$ , 求电流  $i$  和功率  $p$ 。

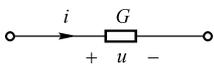
1-5 题 1-5 图中已知电容  $C = 1 \mu\text{F}$ , 电压  $u = 10 \cos 1000t \text{ V}$ , 求电

流  $i$ 。

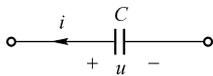
1-6 题 1-6 图中已知电感  $L = 0.1 \text{ H}$ , 电流  $i = 0.1 \cos 1000t \text{ A}$ , 求电压  $u$ 。



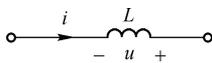
题 1-3 图



题 1-4 图



题 1-5 图



题 1-6 图

1-7 题 1-7 图中已知电容  $C = 10 \mu\text{F}$ , 电压  $u$ 、电流  $i$  参考方向如图(a)所示, 电压  $u$  的波形如图(b)所示, 求电流  $i$  及吸收的功率  $p$  的波形。