

第 1 章 电路基本概念和定律

本章介绍

基本概念：电路、电路模型、电路元件；

基本物理量：电流、电压、电功率；

基本元件：电阻、电压源、电流源、受控源；

基本定律：欧姆定律、基尔霍夫定律。

1.1 电路、电路元件、电路模型

1.1.1 电路

电路是指由若干实际的电气装置和器材，按照一定的规则连接起来，能形成电流通路的物质实体。电路根据它们的自身功能可以分成两大类，一类以传输电能及实现电能的转换为主，这类电路大到全国性的输、配电网络，小到一个手电筒电路；另一类以电作为载体，实现信号的处理为主，这类电路复杂到巨型电子计算机，简单到一个半导体收音机。

虽然各种电路的功能和组成不同，但它们都是由最基本的三部分构成，即电源（或信号源）、负载和中间环节。例如：输、配电网络的电源是各个发电厂的发电机组，而负载是各用户的电气设备，输、配电线路和有关的设备则是中间环节。收音机的信号源是电磁波谐振后的调幅波，而负载是扬声器，检波、放大电路则是中间环节。由此可见，电源或信号源是提供电能或电信号的装置，负载是用电或输出信号的装置，中间环节是对电能进行传输或变换的装置。

1.1.2 电路元件

实际的电路千差万别，其内部电磁关系繁纷复杂。为了对实际的电路进行准确的定量分析和计算，在实际的工程研究中，我们常常采用的方法是突出被研究对象的主要矛盾，忽略一些次要的因素，建立起一组既便于定量研究，又能代表对象特性的物理的或数学的模型，利用一套通用的方法进行分析，从而得到定量分析和计算的结果。电路理论就是对实际的电路进行一定程度的抽象，将它们理想化，建立起一组模型，我们称为电路模型，以便于对实际的电路进行分析研究。

为了建立实际电路的模型，首先要对组成实际电路的电气装置和器材进行抽象，获得理想化的电路元件。为简单起见，我们要求这些电路元件只包含单一的电磁关系，即每个元件仅有一个电磁约束关系，且电磁过程均发生在元件内部，我们称之为集中参数元件，也可称为集总参数元件。实际电气装置根据分析计算精确程度要求的不同，可用一个电路元件或多个电路元件的组合来表示其电磁关系。

下面，我们以一个手电筒电路为例，讨论如何将实际电路的电气装置或器材抽象成电路元件。

手电筒电路的示意图如图 1-1 所示，灯泡是电路中的负载。当电路接通后，电流流过灯丝，消耗电能而产生热量并发光，同时也在其周围产生微弱的磁场。但其主要的作用是消耗电能，所产生的磁场可忽略，故可将灯泡抽象为一个电阻元件，这种元件的电磁特性就是消耗电能。电池是电路中的电源，电路接通后，将电能提供给灯泡，主要的作用是保持电池两个电极之间固定的电压，故可将电池抽象为一个电压源元件，这种元件的电磁特性就是保持恒定电压。开关、导线则是电路的中间环节，闭合后电阻很小，我们只保留其导电特性而忽略电阻，可抽象为理想化的连线。经过以上的抽象，图 1-1 所示的手电筒电路示意图就变成图 1-2 所示的电路模型。

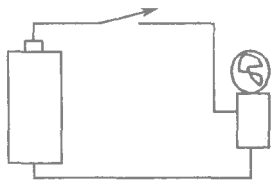


图 1-1 手电筒电路示意图

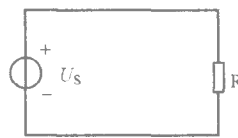


图 1-2 手电筒电路模型

1.1.3 电路模型

电路模型是由若干个电路元件按一定规则用理想化连线联接起来的电流通路，电路模型图由规定的电路元件符号和理想化的连线构成。再次强调，本课程所研究的对象是电路模型（尽管也常简称为电路），而不是实际电路。由于电路元件是从实际电气装置和器材中抽象得出，故组成的电路模型比较准确地表征了实际电路主要的电磁关系。又由于电路元件种类很少，使得我们才有可能建立一套分析计算的方法，从而对电路模型进行研究。因为人们对实际电路的电磁关系认识程度不同和分析计算所要求的精确程度不同，所以同一个实际电路可能会得出不同的电路模型，所以电路模型都有一定的适用条件。不同的使用场合和不同的精度要求，需要相适应的电路模型。关于如何建立电路模型，不属本课程讨论的内容。

训练 与 思考题

1-1-1 观察你周围的电气设备，将所熟悉的几种分析一下，试指出电源（信号源）、负载和中间环节各是什么。

1.2 电路的基本物理量

电流、电压、电功率是电路的基本物理量，电路分析的任务就是求解电路方程，计算电路中的电流、电压、电功率。

1.2.1 电流及其参考方向

物理学中，将电荷有规则地定向运动的现象称为电流。描述这种现象强弱的物理量为电流强度，也常简称为电流，在数值上等于单位时间内通过导体任一截面的电荷量，用符号 I 表示，即

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

当电荷量 q 的单位取库仑 (C)，时间 t 的单位取秒 (s)，则电流 i 的单位为安培，用符号 A 表示。也有较小的单位，如毫安和微安，分别用符号 mA, μ A 表示。

当电流 i 的大小和方向均不变时，称为直流电流，可用大写的 I 表示，相应地有

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

电流是有方向的，习惯上规定正电荷运动的方向或负电荷运动的反方向为电流的实际方向。由于实际电路中的导体主要是金属，而金属导体的导电机构是带负电荷的自由电子，故电流的实际方向是这些自由电子运动的反方向。但是人们无法看到电荷的运动方向，也就无法确定电流的实际方向。为此，我们在计算之前，可任意假定一个方向为电流的正方向，称为电流的参考方向，在电路模型图中用箭头或带下标的变量标出，如图 1-3 所示。

确定参考方向后，电流就成为一个代数量。若电流的参考方向与实际方向一致，则电流为正值，若不一致，则电流为负值。故据预先任意选定的电流参考方向和计算出的带正负号的数值，便可确定电流的实际方向。至于如何得到正确的正负号，是由电路定理、定律、分析方法所保证的。

由于参考方向有箭头和下标两种表示方法，显然，在图 1-3 中有

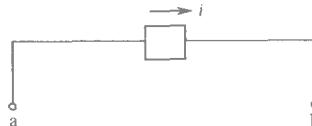
$$i = i_{ab}, \quad i = -i_{ba} \quad (1-3)$$


图 1-3 电流及其参考方向

1.2.2 电压、电动势及其参考方向

电荷在电场力作用下，顺着或逆着电场力的方向运动，电场力做功，将电能转变为其他形式的能量。电压是用来描述电场力做功的物理量。电路中 a, b 两点之间的电压，用符号 u_{ab} 表示，在数值上等于电场力将单位正电荷由 a 点移动到 b 点所做的功，也就是所减少的电势能，即

$$u_{ab} = \frac{dw}{dq} \quad (1-4)$$

电压也有方向，它的实际方向习惯上规定为电势能减少的方向。若 a 点电势能高标“+”号，称为电压正极，则 b 点电势能低，标“-”号，称为电压负极。电压的实际方向为正极指向负极。

所谓电压，一定是两点之间的电压，某一点的电压不存在。但若将一点（例如 b 点）取为参考点，则另一点（例如 a 点）与参考点之间的电压 u_{ab} ，就称为该点的电位 v_a 。电位高的点比电位低的点电势能大，常将参考点本身的电位取为零。取不同的参考点，同一点的电位值将不同，而两点之间的电压与参考点的位置无关。当一个电路有惟一的参考点时，任意两点之间的电压就等于这两点的电位差，即

$$u_{ab}=v_a-v_b \quad (1-5)$$

在电路的分析计算中常取连接元件较多的点作为参考点，实际电路中常取大地、机壳、接地点作为参考点。

要使电荷在电路中连续流动，仅靠电场力是不行的，因为它只能使电荷向着电势能减小的单一方向运动，不能形成电流的闭合路径，故还需要另外一个力，能将被电场力从高电势能点移动到低电势能点的电荷，再移动到高电势能点。即需要反抗电场力做功，将其他形式的能量转换成电能，这个力就是电源力。电场力做功是将电能转化为其他形式的能量，电源力做功是将其他形式的能量转化为电能，故电源力存在于电源之中。描述电源力做功的物理量是电动势，用 e 表示。它在数值上等于电源力将单位正电荷由电源负极经电源内部移动到电源正极所做的功，也即增加的电势能，即

$$e = \frac{dw_S}{dq} \quad (1-6)$$

电动势的实际方向习惯上规定为电势能增大的方向，即电位升高的方向，也即由电源的负极指向正极。对于一个实际电源来说，当内部没有电能消耗时，其电动势和端电压（正负极之间的电压）必定是大小相等，方向相反，例如电源开路时就是如此。

当电压 u 或电动势 e 的大小和方向均不变时，称为直流电压、直流电动势，分别用大写的 U 或 E 表示，相应地有

$$U_{ab} = \frac{W}{Q}, \quad E = \frac{W_S}{Q} \quad (1-7)$$

当电势能 w ， w_S 的单位取焦耳 (J)、电荷量 q 的单位取库仑 (C)，则电压 u 、电动势 e 的单位为伏特，用符号 V 表示。较大的单位有千伏，用符号 kV 表示；较小的单位有毫伏、微伏，分别用符号 mV、 μ V 表示。

同理，人们也无法看到电势能孰高孰低，也就无从确定电压、电动势的实际方向。为此，我们在计算之前，可任意假定一个方向为电压、电动势的正方向，称为电压、电动势的参考方向，在电路模型图中用箭头、下标或正负极性标出，如图 1-4 所示，也称为参考极性。

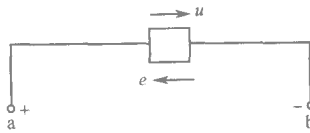


图 1-4 电压、电动势及其参考方向

确定参考方向后，电压、电动势就成为代数量。若参考方向与实际方向一致，则电压、电动势为正值；若不一致，则电压、电动势为负值。故据预先任意选定的电压、电动势参考方向及带正负号的数值，便可确定电压、电动势的实际方向。至于如何得到正确的正负号，也是由电路定理、定律、分析方法所保证的。

由于参考方向有箭头、正负号和下标三种表示方法，显然，在图 1-4 中有

$$\begin{aligned} u &= u_{ab}, \quad u = -u_{ba} \\ e &= e_{ba}, \quad e = -e_{ab} \end{aligned} \quad (1-8)$$

对于同一个开路的电源，当端电压、电动势取相反的参考方向时（如图 1-4 所示），有

$$u = e, \quad u_{ab} = e_{ba}$$

而当端电压、电动势取相同的参考方向时，有

$$u = -e, \quad u_{ab} = -e_{ba} \quad (1-9)$$

对于电流、电压和电动势的关系，可以用一个形象化的比喻（不一定很确切）来说明：幼儿园小朋友玩滑梯，站在上面的小朋友相对于地面有较高的“地势能”。当地球力做功时，可以使小朋友滑下来，在滑梯上形成“人流”。要有连续不断的“人流”，必须源源不断地把滑下来的小朋友送上去，单靠地球力是不可能做到的，必须要有老师的力做功，反抗地球力把小朋友送上去，即要有“地动势”，其方向是向上的，而“地压”的方向是向下的，二者大小相等，方向相反。

1.2.3 电功率及其电能的吸收与释放

电功率是用来表示电路中电能转换快慢的物理量，数值上等于电路中电能转换的速率，用符号 p 表示，即

$$p = \frac{dw}{dt} = \frac{dw}{dq} \cdot \frac{dq}{dt} = u \cdot i \quad (1-10)$$

电功率大意味着电路中电能转换快，在同样时间内电能转换的规模大、数量多。故电功率的按时间累积就是电路吸收或释放的电能，可得出在 $t_0 \sim t_1$ 时间内电路吸收或释放的电能

$$w = \int_{t_0}^{t_1} p dt = \int_{t_0}^{t_1} u \cdot i dt \quad (1-11)$$

当直流电路时，有

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

若电压的单位取伏特（V），电流的单位取安培（A），则电功率的单位为瓦特，用符号 W 表示。较小的单位有毫瓦，用符号 mW 表示，较大的单位有千瓦、兆瓦，分别用符号 kW、MW 表示。若时间的单位取秒，功率的单位取瓦，则电能的单位为焦耳，用符号 J 表示。焦耳等于 1 瓦的用电设备在 1 秒内所消耗的电能。实际中常采用千瓦时（kW·h）作为电能的单位，等于 1 千瓦的用电设备在 1 小时内所消耗的电能。1 千瓦时也就是我们常说的 1 度电。

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

我们在分析电路时不但要知道电功率、电能的大小，还需知道这些电能是被元件所吸收、还是由元件里释放出来。为区别起见，习惯上我们规定：元件吸收电能时功率为正，元件释放电能时功率为负。为此，我们给出电功率的两种计算式。当元件的电压、电流取相同的参考方向时，即关联参考方向，如图 1-5 (a) 所示时，有

$$p = u \cdot i \quad (1-13)$$

当元件的电压、电流取不同的参考方向时，即非关联参考方向如图 1-5 (b) 所示时，有

$$p = -u \cdot i \quad (1-14)$$

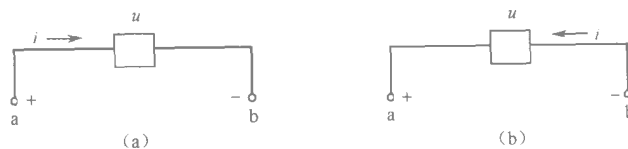


图 1-5 关联和非关联参考方向

无论关联或非关联参考方向，都有：若 $p > 0$ ，则元件吸收功率；若 $p < 0$ ，则元件释放功率。

例 1-1 在图 1-5 (a) 中， $U=2V$ ， $I=-3A$ ，求电功率 P ，并指出该元件是吸收还是释放电能，若在图 1-5 (b) 中情况又会怎么样？

解：图 1-5 (a) 中电压电流为关联参考方向，故

$$P=UI=2 \times (-3) = -6(W)$$

因电功率为负，故该元件释放电能。实际上，因电压为正，说明实际方向为由 a 到 b 而电流为负，说明实际方向为 b 到 a，显然是电源力做功，这是电源的特性，故为释放电能。

图 (b) 中电压电流为非关联参考方向，故

$$P=-UI=-2 \times (-3) = 6(W)$$

因电功率为正，故该元件吸收电能。实际上，因电压为正，说明实际方向为 a 到 b；而电流为负，说明实际方向也为 a 到 b，显然是电场力做功，这是负载的特性，故为吸收电能。

训练 与 思考题

1-2-1 为什么要规定电流与电压的参考方向，参考方向与实际方向有何关系？

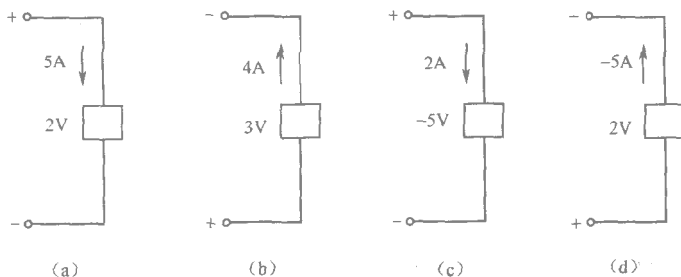
1-2-2 由 a 端流入 b 端流出的一段电路的电荷量为

$$q(t) = 10e^{-2t} \sin \frac{\pi}{4} t (C)$$

试分别求 $t=0s$ ， $2s$ ， $3s$ 时的电流值，并指出电流的实际方向。

1-2-3 电量为 $2C$ 的负电荷由 a 点移到 b 点 若电荷失去 $10J$ 能量或得到 $10J$ 能量 求两种情况下的 U_{ab} 。

1-2-4 计算下图各电路的功率，并指出是吸收功率还是释放功率。



题 1-2-4 图

1.3 电阻元件及欧姆定律

我们将所有实际电气设备或器材消耗电能的特性抽象为电阻元件。电阻元件是电路中最常用的元件之一。欧姆定律反映了电阻元件的特性。

1.3.1 电阻元件

电阻元件的定义：若一个二端元件在任意时刻的电压 u 和电流 i 的关系（我们称为伏安关系）惟一地由 $u-i$ 平面的一族曲线所确定，如图 1-6 (a) 所示，则该元件称为电阻元件。

若一族曲线演变成一条过原点的直线，如图 1-6 (b) 所示，则称为线性时不变电阻，该直线的斜率就是电阻元件的电阻值，用 R 表示。本课程主要研究的就是线性时不变电阻。电阻元件的符号如图 1-6 (c) 所示。

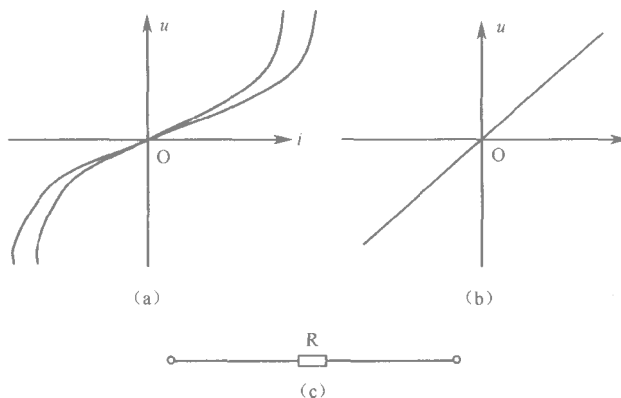


图 1-6 电阻元件的伏安关系及符号

1.3.2 欧姆定律

电阻作为消耗电能的元件，总是电场力做功，故实际的电流总是从高电位端流向低电位端，即电流的方向与电压的方向一致。故在电流电压都为实际方向时，伏安关系曲线总是在 $u-i$ 平面的第一、三象限。欧姆定律正是反映了电阻元件的伏安关系。

当电阻元件的电压、电流取关联参考方向时， u 、 i 之间的关系为

$$u = R \cdot i \quad \text{或} \quad i = \frac{u}{R} \quad (1-15)$$

当电压、电流取非关联参考方向时， u 、 i 之间的关系为

$$u = -R \cdot i \quad \text{或} \quad i = -\frac{u}{R} \quad (1-16)$$

其中 R 为电阻元件的电阻，式 (1-15) 和式 (1-16) 称为欧姆定律。要注意这里的正负号，它正确地表示了电流通过电阻元件时是电场力做功，在两个端钮之间产生电压降的特性。当电流的单位取安培，电压的单位取伏特时，电阻值的单位为欧姆，用符号 Ω 表示，电阻值是电阻元件的参数。

电阻元件的参数除电阻外，还有另一个参数称电导，以 G 表示，数值上为电阻的倒数，单位为西门子。用符号 S 表示，即

$$G = \frac{1}{R} \quad (1-17)$$

当电阻元件的参数用电导表示时，式 (1-15) 和式 (1-16) 变成

$$i = G \cdot u \quad \text{或} \quad u = \frac{i}{G}$$

$$i = -G \cdot u \quad \text{或} \quad u = -\frac{i}{G}$$

下面讨论电阻元件的功率。我们知道，电阻元件总是消耗电能的，而不可能释放电能。

当电阻元件的电压电流取关联参考方向时，电阻元件的功率为

$$p = u \cdot i = R \cdot i^2 = \frac{i^2}{G}$$

$$p = u \cdot i = \frac{u^2}{R} = G \cdot u^2 \quad (1-18)$$

由式(1-18)可见， p 恒正，且这一结果与电阻元件的电压电流是否为关联参考方向无关，故电阻元件总是吸收电能，故被称为耗能元件。实际的电阻器（包括消耗电能的一切电气设备和器材）将所吸收的电能转换为热能，使温度升高，过高的温度下，电阻器有烧坏的危险。所以，通常在电阻器上除了标明电阻值外，还标有额定功率或额定电流，使用时不可超过所规定的额定值。另外，虽然实际的电阻器都有或多或少的非线性特性，但大多数情况下当做线性电阻进行分析计算是可以满足工程需要的。

为简便起见，我们将线性时不变电阻元件简称为电阻。这样电阻就有两个含义，既指元件，也指参数。另外，我们也常将实际电阻器称为电阻，但要注意二者的本质区别

例 1-2 一个标有“220V, 40W”的白炽灯泡，正常发光时通过灯丝的电流是多少？灯丝的电阻是多少？工作 10h 耗电多少？若接到 110V 的电源上，其实际功率是多少？

解：正常工作时的电流，由 $P = U \cdot I$ 可得

$$I = \frac{P}{U} = \frac{40}{220} = 0.1818 \text{ (A)}$$

灯丝电阻 R ，由 $P = \frac{U^2}{R}$ 可得

$$R = \frac{U^2}{P} = \frac{220^2}{40} = 1210 \text{ (}\Omega\text{)}$$

工作 10h 的耗电为

$$W = Pt = 40 \times 10^{-3} \times 10 = 0.4 \text{ (kW} \cdot \text{h)}$$

若接到 110V 的电源上，实际功率为

$$P = \frac{U^2}{R} = \frac{110^2}{1210} = 10 \text{ (W)}$$

额定功率为 40W 的负载，当工作电压为额定电压的一半时，实际功率只有 10W，即额定功率的四分之一。可见，负载只有在额定电压下工作，才能达到额定的功率。

训练 与 思考题

1-3-1 一个 $10\text{k}\Omega$ 的电阻，允许通过的最大电流是 10mA ，求电阻的最大允许功率和电导。

1-3-2 一个标有“ $510\text{k}\Omega$, $1/2\text{W}$ ”的电阻器，使用时允许的最大电压是多少？允许通过的最大电流是多少？

1.4 电压源与电流源

我们将各种实际电源发出电能的特性抽象为电压源元件和电流源元件。有的实际电源需要用电压源元件表示其特性，而有的实际电源需要用电流源元件表示其特性。

1.4.1 电压源元件

在生产和日常生活中，像发电机、蓄电池等电源设备，当其所带负载在额定范围内且变化不大时，输出的电压基本是稳定的。我们把在工作时提供的端电压基本稳定的实际电源，抽象为电压源元件。

电压源元件的定义：若二端元件输出的端电压保持确定的规律，而与流过的电流无关，则称该元件为电压源元件。可分为时变电压源和时不变电压源，时变电压源的伏安关系如图 1-7 (a) 所示，它的端电压与流过的电流无关，但随时间变化，如图中的 t_1, t_2, t_3 时刻，端电压的大小和方向不同。时不变电压源的伏安关系如图 1-7 (b) 所示，它的端电压的大小和方向与流过的电流无关，且是不随时间变化的常数，即直流电压源。电压源的符号如图 1-7 (c) 所示， u_S 为电压源的电压，若直流电压源时用大写字母 U_S 表示，这是电压源的惟一参数。

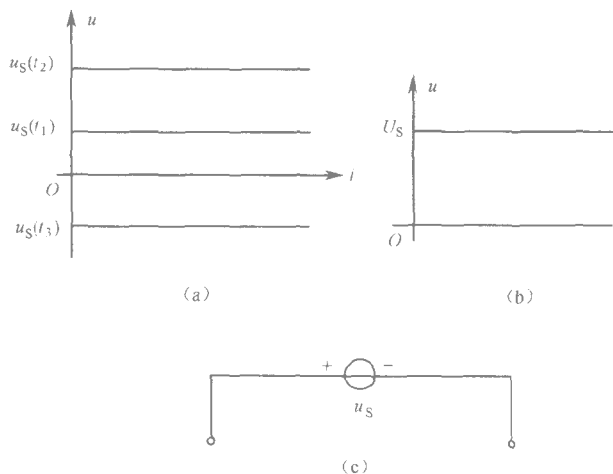


图 1-7 电压源的伏安特性及符号

1.4.2 电流源元件

有些实际电源在工作时提供的电流基本是稳定的，如光电池、电子技术中的恒流源等，我们把这类实际电源抽象为电流源元件。

电流源元件的定义：若二端元件输出的电流保持确定的规律，而与两端的电压无关，则称该元件为电流源元件。也可分为时变电流源和时不变电流源，时变电流源的伏安关系如图 1-8 (a) 所示，输出的电流与两端电压无关，但随着时间变化，如图中的 t_1, t_2, t_3 时刻，输出电流的大小和方向不同。时不变电流源的伏安关系如图 1-8 (b) 所示，输出电流的大小和方向与两端电压无关，且是不随时间变化的常数，即直流电流源。电流源的符号如图 1-8 (c) 所示， i_S 为电流源的电流，若直流电流源时用大写字母 I_S 表示，这是电流源的惟一参数。

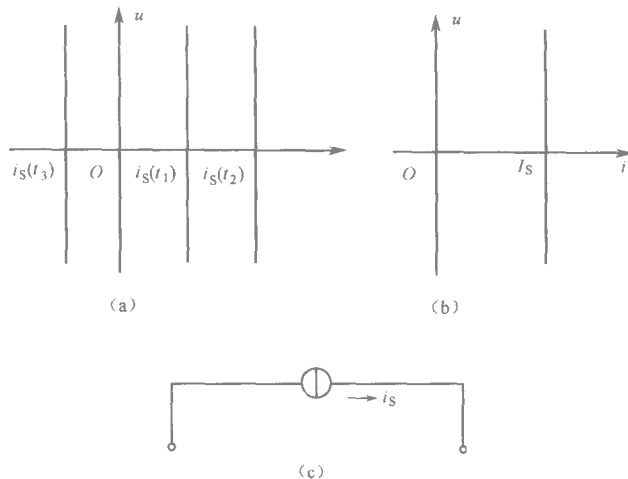


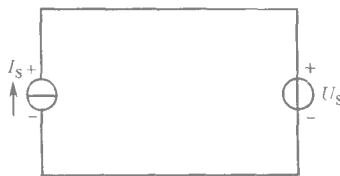
图 1-8 电流源的伏安关系及符号

**训练
与
思考题**

1-4-1 电压源和电流源相串联组成回路，如下图所示，试问哪个电源吸收功率？哪个电源释放功率？为什么电源也可以吸收功率？

1-4-2 生产和日常生活实际中能否采用具有电流源特性的电源供电？为什么？

1-4-3 试从两类电源的定义比较它们的异同。



题 1-4-1 图

1.5 受控源

工程上经常用到的一些电子器件，如晶体管、场效应管等，它们的输出电压或输出电流受另一个电压或电流控制，一般输出与输入成正比。我们将这类器件和各种实际的放大器、控制器等电子装置都抽象为一种受控电源元件，可分为受控电压源和受控电流源两类。有的实际电子装置需要用受控电压源表示其特性，而有的实际电子装置需要用受控电流源表示其特性。受控源的控制量也是电压或电流。各类受控源统称为非独立电源，而 1.4 节所述的电源为独立电源。

受控源在电路中具有与独立源相同的伏安特性，也具有对外部电路做功的能力，区别仅在于提供的电压或电流的大小和方向是不独立的，是由同一电路中的另一个电压或电流来控制的。对于线性受控源，控制关系是线性的，即控制量为零时，受控源输出也为零；控制量增减，则受控源输出也成比例增减。受控源为四端元件，其中两个端钮为控制量端钮，另两个端钮为输出端钮。

根据输出和控制量的不同，受控源可分为四种类型：

(1) 电压控制电压源 (VCVS)

受控电压源的电压 u_S 由电路中另外一个电压 u_C 控制，其控制特性为

$$u_S = \mu \cdot u_C \quad (1-19)$$

其中 μ 为无量纲的常数，称为电压放大系数， u_C 为控制电压。符号如图 1-9 (a) 所示。

(2) 电流控制电压源 (CCVS)

受控电压源的电压 u_S 由电路中另外一个电流 i_C 控制，其控制特性为

$$u_S = r \cdot i_C \quad (1-20)$$

其中 r 为电阻量纲，称为转移电阻， i_C 为控制电流。符号如图 1-9 (b) 所示。

(3) 电压控制电流源 (VCCS)

受控电流源的电流 i_S 由电路中另外一个电压 u_C 控制，其控制特性为

$$i_S = g \cdot u_C \quad (1-21)$$

其中 g 为电导量纲，称为转移电导， u_C 为控制电压。符号如图 1-9 (c) 所示。

(4) 电流控制电流源 (CCCS)

受控电流源的电流 i_S 由电路中另外一个电流 i_C 控制，其控制特性为

$$i_S = \beta \cdot i_C \quad (1-22)$$

其中 β 为无量纲的常数，称为电流放大系数， i_C 为控制电流。符号如图 1-9 (d) 所示。

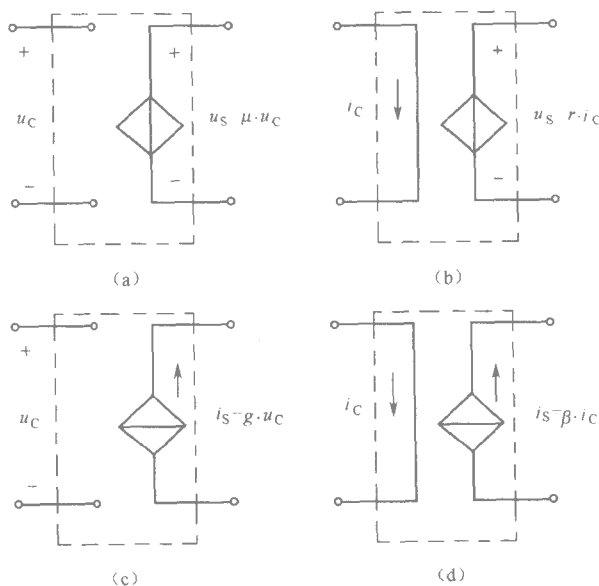


图 1-9 四类受控源的符号

受控源的控制量 u_C 或 i_C 与输出 u_S 或 i_S 必须是在同一电路中成对出现。当没有控制量时，受控源便无意义。受控源的输出随着控制量的变化而变化，控制量为零时，受控源也取零值，这与独立源是不同的。可以作一个比喻：独立源像太阳，受控源像月亮，太阳可以自己发光，而月亮需要借助太阳的光辉而发光。

训
练
与
思
考
题

1-5-1 受控源与独立源有何区别，有何联系？

1-5-2 当受控源的控制量从零开始增加时，各类受控源的伏安特性曲线是如何变化

1-5-3 是否需要定义多个控制量的受控源？为什么？

1.6 基尔霍夫定律

每个电路元件都有自己的伏安关系，但在电流和电压两个物理量中，只有一个是自由的。只有将元件置于电路以后，元件的电压或者电流的具体数值才能被确定。也就是说，元件的电流和电压除了取决于自身的伏安关系之外，还取决于元件外围的电路结构。这就告诉我们，电路中某元件电压或电流的值，需要根据内部的伏安关系和外部电路的制约去确定，即电路的求解需依据内部和外部两类约束条件。我们将元件的伏安关系称为求解电路的内部约束条件，而本节介绍的基尔霍夫定律则是外部约束条件。两类约束条件恰如事物变化的内因和外因，共同决定着电路的求解。

基尔霍夫定律是电路分析的基本定律，分电流定律和电压定律。讨论之前我们先介绍几个名词术语。

支路：一个二端元件或同一电流流过的几个二端元件的联接称为支路，如图 1-10 中有三条支路， $b a d$ 、 $b c d$ 和 $b d$ 。

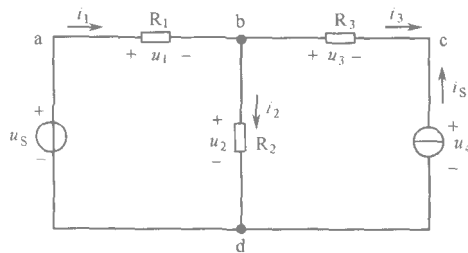


图 1-10 有关名词术语

节点：三条及三条以上支路的联接点称为节点。如图 1-10 中有两个节点， b 和 d 。

回路：由若干条支路围成的闭合路径称为回路。如图 1-10 中有三个回路， $a b c d a$ 、 $a b d a$ 和 $b c d b$ 。

网孔：内部不含有支路的回路称为网孔。如图 1-10 中有两个网孔， $a b d a$ 和 $b c d b$ 。

1.6.1 基尔霍夫电流定律 (KCL)

定律内容：在任意时刻，流入电路任一节点的电流之和等于流出该节点的电流之和。如规定参考方向为流入节点的电流为正、流出节点的电流为负（也可做相反规定），则该定律还可描述为：任一节点的电流代数和为零。定律的一般表达式为

$$\sum_{k=1}^n i_k = 0 \quad (1-23)$$

据式(1-23),对于图 1-10 中的节点 b 有

$$i_1 - i_2 - i_3 = 0$$

我们也可把基尔霍夫电流定律适用的场合,由节点推广到一个封闭的曲面,称为广义节点。例如图 1-11 中,当左右两个电路仅由下面一条连线相连时,电流 i_1 必然为零,当有上下两条连线相连时,必有

$$i_1 + i_2 = 0$$

基尔霍夫电流定律的本质是电荷守恒原理和电流连续性原理,所以它的正确性是显然的。该定律的正确性与构成电路的元件性质无关,也就是说各种类型的元件在电路里都必须服从该定律。

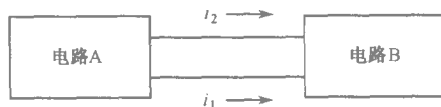


图 1-11 广义节点

1.6.2 基尔霍夫电压定律 (KVL)

定律内容:在任意时刻,从电路任一回路的任一节点出发,沿着任意的方向绕行一周,各元件电压升高之和等于电压降低之和。如规定沿着绕行方向电压降低为正,电压升高为负(也可作相反规定),则该定律还可描述为:任一回路的电压代数和为零。定律的一般表达式为

$$\sum_{k=1}^n u_k = 0 \quad (1-24)$$

据式(1-24),对于图 1-10 中的回路(也是网孔) a b d a 中,选顺时针的绕行方向,从 a 点开始,且电压降为正,电压升为负,有

$$u_1 + u_2 - u_S = 0$$

即

$$R_1 i_1 + R_2 i_2 - u_S = 0$$

我们也可以把基尔霍夫电压定律适用的场合,由回路推广到一个开口电路,称为假想回路。例如图 1-12 中, a、b 为开路的端口,可认为有一个电压源 u_{ab} (但没有电流流过),形成闭合回路,选绕行方向为顺时针,且沿绕行方向电压降为正,列出 KVL 方程为

$$u_{S2} + u_{ab} - u_{S1} - R \cdot i = 0$$

可求出 a b 端口的电压为

$$u_{ab} = u_{S1} + R \cdot i - u_{S2}$$

基尔霍夫电压定律的本质是能量守恒原理,所以它的正确性也是显然的。该定律的正确性与构成电路的元件性质无关,也就是说各种类型的元件在电路里都必须服从该定律。

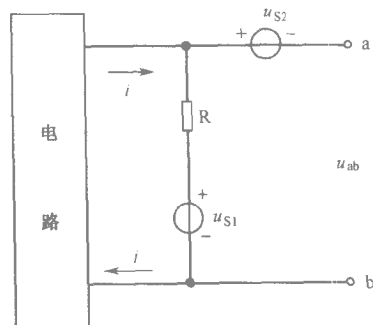


图 1-12 开口电路的电压

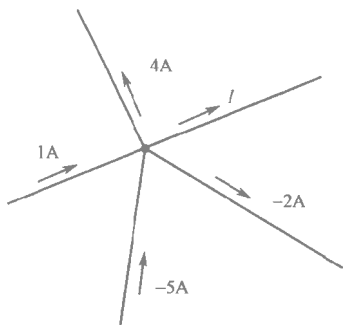


图 1-13 例 1-3 题图

例 1-3 通过某节点 a 的电流如图 1-13 所示, 求电流 I 。

解: 设流入节点的电流为正, 流出节点的电流为负, 据

KCL 有

$$1 + (-5) - I - 4 - (-2) = 0$$

$$I = -6(\text{A})$$

若设流入节点的电流为负, 流出节点的电流为正, 据 KCL

有

$$-1 - (-5) + 4 + (-2) + I = 0$$

$$I = -6(\text{A})$$

由此例可见, 流出为正还是流入为正可任意假设, 不影响计算结果, 但在一个 KCL 方程中只能是一种假设。另外, 在 KCL 方程中有两套符号, 外面的一套符号是由电流参考方向与节点的关系和前面所说的假设确定, 而里面一套符号是由电流参考方向与实际方向的关系确定。

例 1-4 电路如图 1-14 所示, 求电压 U_1 、 U_2 。

解: 对外边回路选顺时针绕行方向, 且电压降为正, 电压升为负, 列写 KVL 方程, 得

$$2 - U_1 - (-5) - 3 = 0$$

$$U_1 = 4(\text{V})$$

对左边网孔选顺时针绕行方向, 且电压降为正, 电压升为负, 列写 KVL 方程, 得

$$2 + U_2 - 3 = 0$$

$$U_2 = 1(\text{V})$$

显然, 绕行方向为顺时针还是逆时针可任意假定, 电压升为正还是电压降为正也可任意假定, 不影响计算结果, 但在一个 KCL 方程中只能是一种假设。另外, 在 KVL 方程中也有两套符号, 外面的一套符号是由绕行方向与电压参考方向的关系和前面所说的假设确定, 而里面一套符号是由电压参考方向与实际方向的关系确定。

例 1-5 电路如图 1-15 所示, 求开路电压 U 。

解: 对于两个电压源和两个电阻连接成的回路, 设电流方向和绕行方向均为顺时针, 且沿着绕行方向电压降为正, 电压升为负, 有

$$5I + 10 + 3I - 2 = 0$$

$$I = -1(\text{A})$$

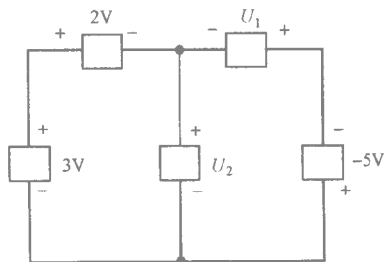


图 1-14 例 1-4 题图

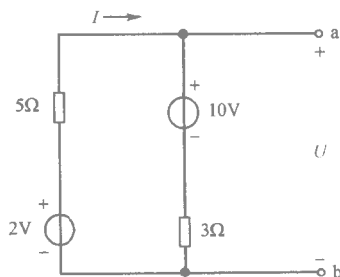


图 1-15 例 1-5 题图

KVL 可扩展用于对开口电路求取开路电压, 设 a、b 端钮之间的开路电压为 U 后, 与 10V 电压源和 3Ω 电阻支路 (或 2V 电压源和 5Ω 电阻支路) 构成为一个假想回路。有

$$U - 3I - 10 = 0$$

将 $I = -1\text{A}$ 代入, 得

$$U = 10 + 3 \times (-1) = 7(\text{V})$$

基尔霍夫两大定律构成的外部约束条件也称为“拓扑”约束, 即只与电路的连接结构有关, 而与元件性质无关; 元件伏安关系构成的内部约束条件也称为元件约束, 只与元件性质有关, 而与电路的连接结构无关。二者的联立就确定了电路的解。故求解电路的任何方法都应该是、也必定是这两类约束条件既必要又充分的体现。

训练 与 思考题

1-6-1 有人说: 实际电源不允许把两极连接在一起(即常说的短路), 因为将有很大电流而烧坏电源, 所以电压源元件也不允许短路, 否则也会烧坏电压源元件。你认为这种说法对吗? 为什么?

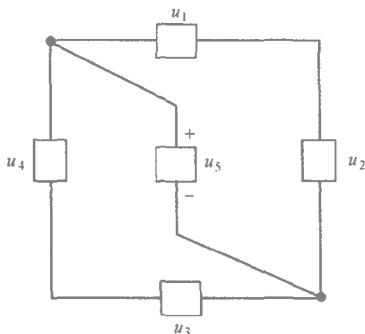
1-6-2 如题 1-6-2 图所示电路的 KVL 方程为

$$u_1 - u_2 + u_5 = 0$$

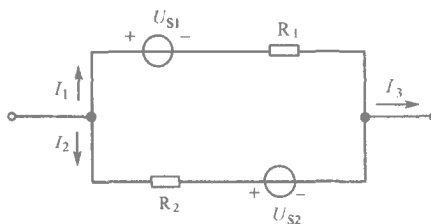
$$-u_3 + u_4 - u_5 = 0$$

请在图上标出各电压的参考极性, 若 $u_1 = 3\text{V}$, $u_2 = -5\text{V}$, $u_3 = 2\text{V}$, 求 u_4 和 u_5 。

1-6-3 如题 1-6-3 图所示的部分电路, 已知 $U_{S1} = 10\text{V}$, $U_{S2} = 5\text{V}$, $R_1 = 6\Omega$, $R_2 = 3\Omega$, $I_3 = 4\text{A}$, 求 I_1 和 I_2 。



题 1-6-2 图



题 1-6-3 图

1.7 简单电路的求解

简单电路是指单回路和单节点偶电路。单回路电路求解的外部约束条件仅用 KVL, 单节点偶电路求解的外部约束条件仅用 KCL。前者实际是应用全电路欧姆定律, 后者实际是应用弥尔曼定理。现举例说明求解方法。

例 1-6 如图 1-16 为两个电压源和三个电阻串联的单回路电路, 已知 $U_{S1} = 20\text{V}$, $U_{S2} = 10\text{V}$, $R_1 = 5\Omega$, $R_2 = 3\Omega$, $R_3 = 2\Omega$ 。求出各元件电压及功率, 并计算总功率。

解: 因各元件流过同一个电流, 故为单回路电路。设回路电流 I 及其参考方向如图所示, 且设各电阻元件电压电流为关联参考方向, 分别为 U_1 , U_2 , U_3 , 并选顺时针绕行方向, 沿着绕行方向电压降取正, 电压升取负, 则 KVL 为

$$U_{S1} + U_1 + U_2 - U_{S2} + U_3 = 0$$

又据各电阻元件的伏安关系, 有

$$U_1 = R_1 I, \quad U_2 = R_2 I, \quad U_3 = R_3 I$$

代入 KVL, 得

$$U_{S1} + R_1 I + R_2 I - U_{S2} + R_3 I = 0$$

将已知的条件代入, 得

$$20 + 5I + 3I - 10 + 2I = 0$$

解出

$$I = \frac{-20 + 10}{5 + 3 + 2} = -1 \text{ (A)}$$

可得出

$$U_1 = R_1 I = 5 \times (-1) = -5 \text{ (V)}$$

$$U_2 = R_2 I = 3 \times (-1) = -3 \text{ (V)}$$

$$U_3 = R_3 I = 2 \times (-1) = -2 \text{ (V)}$$

据 $P = I^2 R$ 计算电阻功率

$$P_1 = I^2 R_1 = (-1)^2 \times 5 = 5 \text{ (W)} \quad (\text{吸收功率})$$

$$P_2 = I^2 R_2 = (-1)^2 \times 3 = 3 \text{ (W)} \quad (\text{吸收功率})$$

$$P_3 = I^2 R_3 = (-1)^2 \times 2 = 2 \text{ (W)} \quad (\text{吸收功率})$$

因 U_{S1} 电压源的电压电流为关联参考方向, 故有

$$P_{S1} = U_{S1} I = 20 \times (-1) = -20 \text{ (W)} \quad (\text{释放功率})$$

而 U_{S2} 电压源的电压电流为非关联参考方向, 故有

$$P_{S2} = -U_{S1} I = -10 \times (-1) = 10 \text{ (W)} \quad (\text{吸收功率})$$

电路总功率为

$$P_1 + P_2 + P_3 + P_{S1} + P_{S2} = 5 + 3 + 2 + (-20) + 10 = 0$$

释放的功率等于吸收的功率, 总功率为 0, 称为功率平衡。我们可以用这种方法对计算结果进行校验。

例 1-7 电路如图 1-17 所示, 已知 $I_{S1}=6\text{A}$, $I_{S2}=2\text{A}$, $G_1=0.5\text{S}$, $G_2=1.5\text{S}$, 求各元件电压、电流和功率。

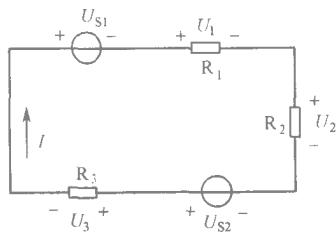


图 1-16 例 1-6 题

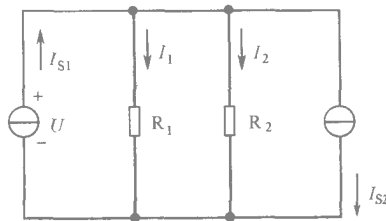


图 1-17 例 1-7 题图

解: 因电路只有两个节点, 故为单节点偶电路。各元件两端为同一个电压, 设两节点间电压 U 及其参考方向如图, 电阻电流的参考方向与电压参考方向相关联, 分别为 I_1 和 I_2 。选上面的节点列写 KCL 方程, 并确定电流流入节点取正, 流出节点取负, 则 KCL 方程为

$$I_{S1} - I_1 - I_2 - I_{S2} = 0$$

又据各电阻元件的伏安关系, 有

$$I_1 = G_1 U, \quad I_2 = G_2 U$$

代入 KCL, 得

$$I_{S1} - G_1 U - G_2 U - I_{S2} = 0$$

将已知条件代入, 得

$$6 - 0.5U - 1.5U - 2 = 0$$

解出

$$U = \frac{6 - 2}{0.5 + 1.5} = 2 \text{ (V)}$$

可得出

$$I_1 = G_1 U = 0.5 \times 2 = 1 \text{ (A)}$$

$$I_2 = G_2 U = 1.5 \times 2 = 3 \text{ (A)}$$

据 $P = U^2 G$ 计算电阻功率

$$P_1 = U^2 G_1 = 2^2 \times 0.5 = 2 \text{ (W)} \quad (\text{吸收功率})$$

$$P_2 = U^2 G_2 = 2^2 \times 1.5 = 6 \text{ (W)} \quad (\text{吸收功率})$$

因 I_{S1} 电流源的电压电流为非关联参考方向, 故有

$$P_{S1} = -I_{S1} U = -6 \times 2 = -12 \text{ (W)} \quad (\text{释放功率})$$

而 I_{S2} 电流源的电压电流为关联参考方向, 故有

$$P_{S2} = I_{S2} U = 2 \times 2 = 4 \text{ (W)} \quad (\text{吸收功率})$$

总功率为

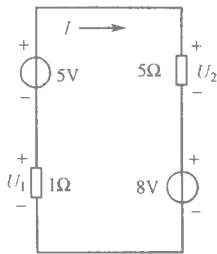
$$P_1 + P_2 + P_{S1} + P_{S2} = 2 + 6 - 12 + 4 = 0$$

释放的功率等于吸收的功率, 电路总功率为 0, 功率平衡。

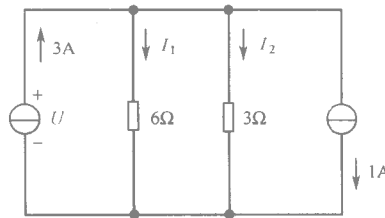
训练
与
思考题

1-7-1 求题 1-7-1 图中的电流 I 及各元件的电压及功率, 并进行功率平衡校验。

1-7-2 求题 1-7-2 图中的电压 U 及各元件的电流及功率, 并进行功率平衡校验。



题 1-7-1 图



题 1-7-2 图

本章小结

1. 电路分析的对象不是实际电路, 而是电路模型; 电路模型由电路元件构成, 电路元件是对实际电气装置和器材的抽象, 即突出主要电磁特性后的理想化元件。

2. 电路分析的基本物理量是电流、电压、电功率, 电路分析的过程就是对电路模型计算这些基本物理量的过程。