

第一部分 电工技术

第1章 电路的基本概念与基本定律

【本章主要内容】本章主要介绍电路的概念，电路定律和电路功率，电阻电路的等效变换，电源及其等效变换，电桥电路的平衡条件。

【引例】提起电路，人们既熟悉又陌生。熟悉的是电路的应用在日常生活中随处可见，例如人们使用的计算机、手机、电话、各种家用电器、房间的照明装置等，以及人们乘坐的电梯、汽车、火车、飞机等，都离不开电路。那么电路是由什么组成的呢？这就是我们要在这里讨论的问题。例如，某电子门铃如图 1.0-1 所示，其中，图(a)是一种电子门铃的外形，图(b)是电子门铃内部的电路板，图(c)是电子门铃的电路图。那么电子门铃的电路是由哪些电子元件组成的呢？电路是怎么工作的呢？学完本课程，读者应能初步分析和设计各种电子电路和电子产品了。

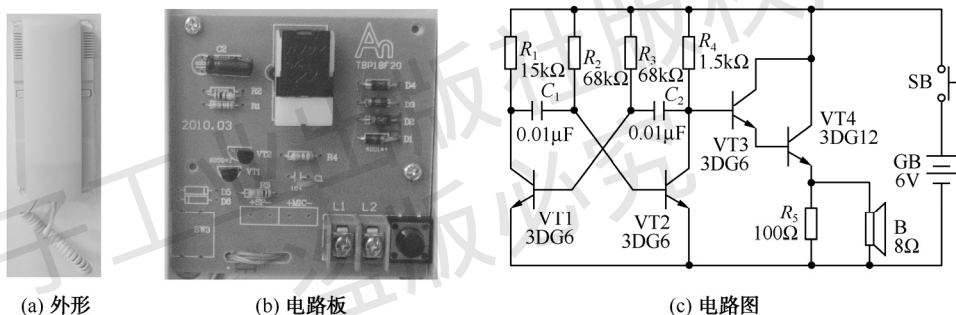


图 1.0-1 电子门铃

1.1 电路作用与电路模型

1. 电路的作用与组成

电路是由电源和一些电气电子元部件通过导线连接而成的为实现某种预期目的的电流通路。电路的作用分为两类，一类是实现电能的传输与转换，另一类是实现信号的传递和处理。

图 1.1-1(a)是电力系统输送电能的电路示意图。其中发电机发出电能，经升压变压器升压、输电线路传输、降压变压器降压等过程，最后到达用户，将电能转换为光能、机械能、热能等。图 1.1-1(b)是扩音机电路的示意图。其中话筒将声音信号转换为电信号，然后经过放大器放大和处理后传递给扬声器，再由扬声器将电信号还原为原来的声音信号。

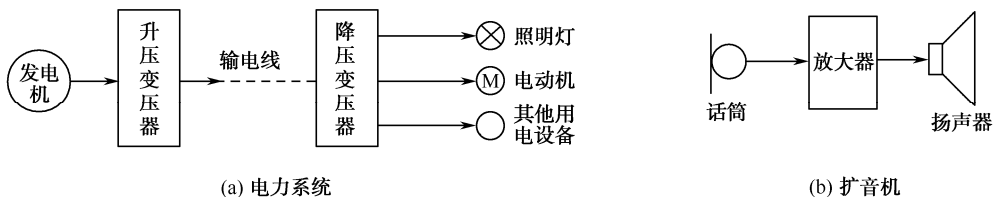


图 1.1-1 电路的作用

由以上分析可见,不论是电力系统还是扩音机,其电路都是由三部分组成的,即电源、负载和中间环节。在图 1.1-1(a)中,发电机是电源,照明灯、电动机和其他用电设备是负载,变压器和输电线是中间环节。在图 1.1-1(b)中,话筒是电源(信号源),扬声器是负载,放大器是中间环节。

电源是发电设备,其作用是将其其他形式的能量转换为电能,向负载提供电压或电流;负载是用电设备,其作用是将电能转换为其他形式的能量消耗掉;中间环节为连接电源和负载的部分,起传输、分配电能和控制保护电路的作用,如导线、开关、变压器、控制保护设备等。

2. 电路模型

由前面的两个例子可知,实际电路是由电源、负载和各种电子元器件组成的,如发电机、变压器、信号源、电池、电动机、照明灯、电阻、电感、电容、二极管、三极管等。这些实际设备和元器件的电磁性质一般比较复杂,若全部考虑这些电磁现象,难以用简单的数学关系式表示它们的工作特性。所以在工程实际应用中,常将电路中的元器件进行理想化处理,即突出元器件的主要电磁特性,忽略其次要电磁特性。例如手电筒中的小灯泡,当它点亮时,除了消耗电能外,其周围还会有磁场,但是其磁场很弱,不影响小灯泡的亮度,所以在电路分析中,可将磁场的作用忽略不计。因此可认为小灯泡是一个电阻元件,即小灯泡是理想元件,小灯泡的电路模型就是一个电阻,可用简单的数学关系式表示小灯泡的工作特性。

综上所述,为便于对实际电路进行分析,需将实际电路元器件用能够代表其主要电磁特性的理想元件来表示。由理想元件所组成的电路称为实际电路的电路模型,简称电路。图 1.1-2 是手电筒的电路模型。其中,手电筒的电池用电压源 U_S 和内阻 R_S 的串联模型表示,小灯泡用电阻元件 R_L 表示,手电筒的开关用 S 表示。

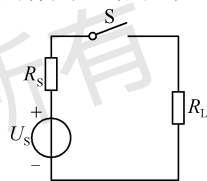


图 1.1-2 手电筒的电路模型

实际电路元件在不同的条件下其电路模型也不同。例如一个电感线圈,在外加直流电源的电路中,可视为一个小电阻;在外加低频交流电源的电路中,可视为一个电感和这个小电阻的串联;在外加高频交流电源的电路中,电感线圈绕线之间的电容效应就不能忽略。因此,要建立合适的电路模型,才能保证电路模型分析的结果与实际电路的测量结果基本一致。

本教材所讨论的电阻、电感、电容元件和电源器件都是理想元器件,所讨论的电路都是电路模型。

思考题

1.1-1 实际电路和电路模型有何不同?理论分析的电路是什么电路?

1.2 电路的物理量

电路中的基本物理量是电流、电压(电位差)和电位。下面分别讨论它们的定义及参考方向。

1.2.1 电流、电压和电位的概念

1. 电流

当闭合电源开关时,照明灯就会发光,电风扇就会转动,电热器就会发热,这是因为在照明灯、电风扇、电热器中有电流流过。若在电路中接入电流表,电流表就能测出电流的数值。那么什么是电流呢?物理学中定义,电流是正电荷有规则的定向运动。电流的大小为单位时间内通过导体横截面的电量,即

$$i = \frac{dq}{dt} \quad (1.2-1)$$

式中, i 表示电流, q 表示电荷量(电量), t 表示时间, 单位为秒(s)。在国际单位制中, q 的单位为库仑(C), 电流的单位为安培, 简称安, 用符号 A 表示。如果 1 秒时间内有 1 库仑的电量通过导体的横截面, 这时的电流就是 1 安培。对于较小的电流, 可以用毫安(mA)和微安(μA)为单位, 其换算关系为

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

当电流的大小和方向不随时间变化时, 称其为恒定直流电流(Direct Current, 简称 DC)。恒定直流电流用大写字母 I 表示, 而随时间变化的电流用小写字母 i 表示。

2. 电压和电位

在图 1.1-2 中, 当开关 S 闭合后, 手电筒的小灯泡发光, 若将电压表接在小灯泡两端, 电压表就有读数, 我们称其读数为电压。那么电压的定义是什么呢? 物理学中定义, 电场力将单位正电荷 q 由电场中的 a 点通过电源以外的某条路径移动到 b 点所做的功, 就称之为这两点之间的电压, 即

$$u = \frac{dw}{dq} \quad (1.2-2)$$

式中, u 表示电压, w 为电场力所做的功, 单位为焦耳(J); q 的单位为库仑(C); 电压的单位为伏特(V)。对于较高的电压, 可用千伏(kV)为单位, 对于较低的电压, 可用毫伏(mV)和微伏(μV)为单位, 其换算关系为

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

当电压的大小和方向不随时间变化时, 称其为恒定直流电压。恒定直流电压用大写字母 U 表示, 而随时间变化的电压用小写字母 u 表示。

由电压的定义可知, 电压数值的大小与电场中 a 点和 b 点的位置有关, 而与所选取的路径无关。为了方便比较电场中 a 点和 b 点位能的差别, 我们引出电位的概念。那么什么叫电位呢? 根据物理学中的定义, 设电场中的某点 o 为参考点, 电场力将单位正电荷 q 由电场中的 a 点移动到参考点所做的功, 就称为 a 点的电位, 用 V_{ao} 表示; 同理, 电场力将单位正电荷 q 由电场中的 b 点移动到参考点所做的功, 就称为 b 点的电位, 用 V_{bo} 表示。在此规定下, 参考点本身的电位为零, 即 $V_o = 0$, 则

$$\begin{cases} V_{ao} = V_a \\ V_{bo} = V_b \end{cases} \quad (1.2-3)$$

根据电压的定义有, a、b 两点之间的电位差就是 a、b 两点之间的电压, 即

$$U_{ab} = V_a - V_b \quad (1.2-4)$$

式(1.2-4)说明, 电压也称之为电位差。

1.2.2 电流和电压的实际方向

在直流电路中, 一般电源的电压值和实际极性都是已知的, 因此在只有一个电压源作用的电路中, 电流的实际方向也是已知的。那么电流流过电源和负载时的实际方向是怎么样的呢? 我们来看一个最简单的电路。图 1.2-1 是一个由直流电压源 U_S 和负载电阻 R_L 接通的电路。在电路中, 已知直流电压源 U_S 的实际极性如图所示, a 点为电压源的正极, 用“+”表示, b 点为电压源的负极, 用“-”表示。这种“+”、“-”极性也表示了 a 点的电位比 b 点的电位高。可见, 负载电阻 R_L 两端电压

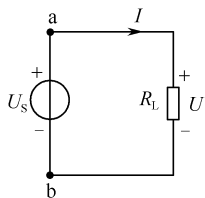


图 1.2-1 电流和电压的实际方向

的实际极性也是上“+”下“-”。

由电流、电压的定义可知，在电场力的作用下，正电荷从电压源的 a 点(电压源的正极)，经过负载电阻 R_L 移动到 b 点(电压源的负极)。所以电流 I 的实际方向就是正电荷的运动方向，即从负载电阻的高电位流到低电位。为了维持负载电流不变，保证负载正常工作，电压源通过其内部的电源力将堆积在负极上的正电荷经过电源内部送回到电源的正极。

可见，电流的实际方向为：电流流过负载时，是从负载的高电位到低电位；电流流过电压源时，是从电压源的负极到正极。

电压的实际方向为：负载两端电压 U 和电压源两端电压 U_S 的实际方向都是从高电位到低电位。

1.2.3 电流和电压的参考方向

1. 电流、电压参考方向的设定

在分析简单电路时，可由电压源的实际极性判断出电路中电流的实际方向，但在分析复杂电路时，一般情况下很难判断出某个元件中的电流和两端电压的实际方向。例如，图 1.2-2 是两个电压源供电的复杂电路，电阻 R_3 中的电流是从 a 点流向 b 点还是从 b 点流向 a 点，是很难判断的。

因此在分析复杂电路时，要先假设各元件的电流或电压的方向，这个假设的方向称为电流或电压的参考方向。在电流或电压的参考方向下，根据电路的基本定律和分析方法求解出各元件中的电流或电压。

若求出的电流或电压为正值，说明电流或电压的参考方向与实际方向相同；若为负值，说明电流或电压的参考方向与实际方向相反。

在图 1.2-3 中，电流的参考方向用箭头表示。在图(a)中， $I=1A$ ，说明电流的参考方向和实际方向相同，即电流的实际方向是从 a 点流向 b 点；在图(b)中， $I=-2A$ ，说明电流的参考方向和实际方向相反，即电流的实际方向是从 b 点流向 a 点。电流的参考方向也可用双下标表示，如 I_{ab} 表示其参考方向由 a 点指向 b 点。

在图 1.2-4 中，电压的参考方向可用箭头或正负极性表示。在图(a)中， $U=3V$ ，说明电压的参考方向和实际方向相同，即电压的实际方向是从 a 点指向 b 点；在图(b)中， $U=-6V$ ，说明电压的参考方向和实际方向相反，即电压的实际方向是从 b 点指向 a 点。电压的参考方向也可用双下标表示，如 U_{ab} 表示其参考方向是由 a 点指向 b 点。

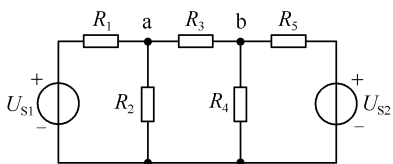


图 1.2-2 判断 R_3 中电流的实际方向

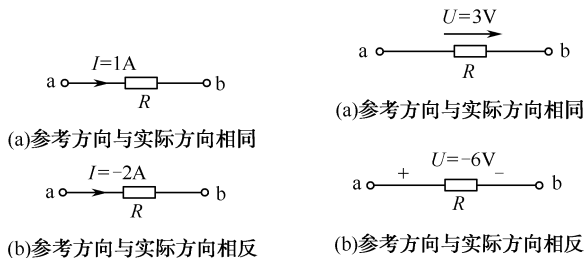


图 1.2-3 电流的参考方向

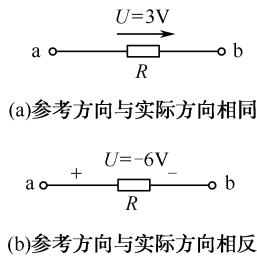


图 1.2-4 电压的参考方向

需要注意的是，(1) 参考方向一旦设定，在计算过程中就不能改变；(2) 电流或电压的数值有正有负，是参考方向所致；(3) 不论参考方向如何，电流或电压的实际方向是不

变的。

有了参考方向的概念后，在以后分析的所有电路中，电压或电流的方向均为参考方向。

2. 电流和电压的关联参考方向

为了分析方便，在假设电压、电流的参考方向时，对于同一电路元件，当其电压和电流的参考方向相同时，称为关联参考方向，如图 1.2-5(a) 所示；电压和电流参考方向相反称为非关联参考方向，如图 1.2-5(b) 所示。为分析方便，一般将电压和电流的参考方向设为关联参考方向。

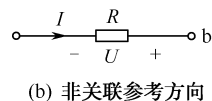
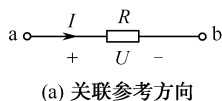


图 1.2-5 关联参考方向与非关联参考方向

【例 1.2-1】 已知元件 A 和 B 的电压、电流的参考方向如图 1.2-6(a) 和 (b) 所示。当 $U=10\text{V}$ ， $I=-1\text{A}$ 时，判断元件 A 和元件 B 在电路中起电源作用还是起负载作用。

【解】 根据电压、电流的实际方向判断元件 A 和元件 B 的性质。

由于 $U=10\text{V}$ ， $I=-1\text{A}$ ，在 1.2-6(a) 和 (b) 中，电压 U 的实际方向与参考方向相同，而电流的实际方向与参考方向相反。在 1.2-6(a) 中，电流的实际方向是从元件 A 的负极流向正极，所以元件 A 起电源作用；在 1.2-6(b) 中，电流的实际方向是从元件 B 的正极流向负极，故元件 B 起负载作用。

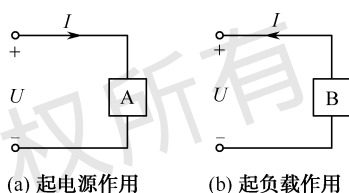


图 1.2-6 例 1.2-1 图

思考题

1.2-1 在电路分析中为什么要设电压、电流的参考方向？如何根据参考方向判断出电压、电流的实际方向？

1.3 欧姆定律

1. 电阻元件

电路中常用的电阻元件分为线性电阻、非线性电阻及热敏电阻等。线性电阻用 R 表示，其阻值不随外加电流、电压改变。线性电阻的阻值由其制作的材料决定，对于长度为 l 、横截面积为 s 的均匀介质，其电阻为

$$R = \rho \frac{l}{s} \quad (1.3-1)$$

其中 ρ 是导体的电阻率，单位为 $\Omega \cdot \text{mm}^2 / \text{m}$ ； l 为导体的长度，单位为 m ； s 为导体的横截面积，单位为 mm^2 。在国际单位制中，电阻的单位是欧姆 (Ω)。此外，电阻的单位还有千欧 ($\text{k}\Omega$)、兆欧 ($\text{M}\Omega$)，其换算关系为 $1\text{k}\Omega = 10^3\Omega$ ， $1\text{M}\Omega = 10^6\Omega$ 。

线性电阻的类型和符号如图 1.3-1 所示。

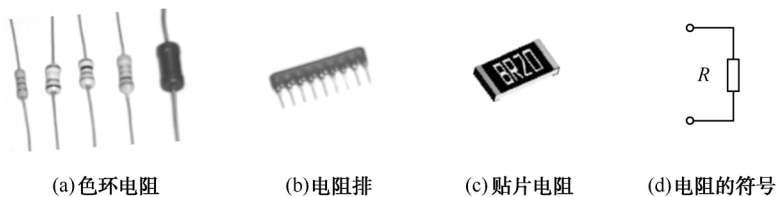


图 1.3-1 线性电阻

图 1.3-1 中的电阻都是阻值固定不变的电阻，实际应用中还常用到可调式的电阻，也称为

电位器。电位器是三个端子的元件，其中的一个端子可以滑动，用来改变其电阻值。电位器及其符号如图 1.3-2 所示。

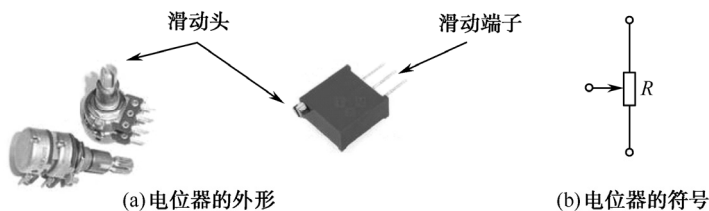


图 1.3-2 电位器

2. 欧姆定律

在图 1.3-3(a)中，当电阻两端外加电压时，其流过电阻的电流与电压成正比。在电压、电流取关联参考方向时，线性电阻的电压与电流之间的关系为

$$U = RI \quad (1.3-2)$$

式(1.3-2)即为欧姆定律。

当电流、电压取非关联参考方向时，如图 1.3-3(b)所示，式(1.3-2)增加一负号，即

$$U = -RI$$

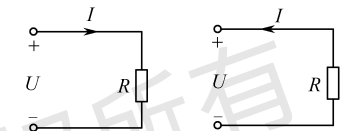


图 1.3-3 欧姆定律

线性电阻元件的伏安特性曲线如图 1.3-4(a)所示，是一条通过原点的直线。

应当注意的是，只有线性电阻的伏安关系满足欧姆定律。非线性电阻的阻值随电压、电流变化，其伏安关系不满足欧姆定律。例如二极管就是非线性电阻，其伏安特性曲线如图 1.3-4(b)所示。

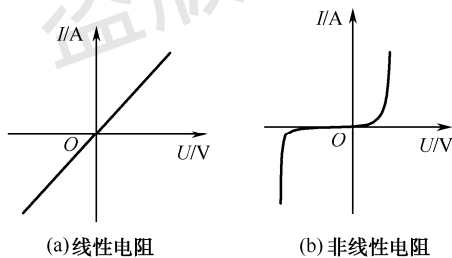


图 1.3-4 电阻的伏安特性曲线

【例 1.3-1】 在图 1.3-3 中，已知 $U = 10\text{V}$ ， $R = 5\Omega$ 。求电流 I 。

【解】 在图 1.3-3(a)中，由欧姆定律，得 $I = U/R = 10/5 = 2\text{A}$

在图 1.3-3(b)中，由欧姆定律，得 $I = -U/R = -10/5 = -2\text{A}$

负号表示电流的参考方向与实际方向相反。

思考题

1.3-1 在图 1.3-3(a)中，若设电压、电流的参考方向与图示相反，写出欧姆定律的关系式。

1.4 电路中的功率

当电路接通电源后，电源向负载发出电能，负载吸收电能。根据能量守恒定律，若不考虑

电源内部和传输导线中的能量损失，那么电源输出的电能就应该等于负载所消耗的电能。电能的定义是在一段时间内，电场力或电源力所做的功。所以对电能的计量，主要是记录发电厂一天或一年能发出多少电能，记录各个用户一个月或一段时间的用电情况。对于日常生活中用户使用的各种电气设备，一般用功率来计算其消耗电能的快慢，如电饭煲、电炒锅等用电设备的铭牌上都标有额定功率：500W 或 800W 或 1000W 等。功率的定义是在单位时间内，电场力或电源力所做的功，其瞬时功率的表达式为

$$p = \frac{dw}{dt} \quad (1.4-1)$$

其中， p 表示瞬时功率，功率的单位为瓦特(W)， w 表示电能，单位为焦耳(J)。

因为 $u = \frac{dw}{dq}$ ， $i = \frac{dq}{dt}$ ，故瞬时功率又可表示为

$$p = \frac{dw}{dt} = ui \quad (1.4-2)$$

上式表明：(1) 电路的功率等于电压与电流的乘积；(2) 功率可正可负。若 $p > 0$ ，表明电路吸收功率，是负载；若 $p < 0$ ，表明电路发出功率，是电源。

注意：式(1.4-2)是在电压、电流参考方向关联情况下得到的；当电压、电流参考方向非关联时，式(1.4-2)需增加一负号，即 $p = -ui$ 。

在图 1.4-1 中，直流电源与负载接通，电源发出功率为 P_1 ，负载吸收功率为 P_2 。由能量守恒定律可知，在电路中，电源发出的功率等于负载吸收的功率，即

$$P_1 = P_2 \quad (1.4-3)$$

在图中的参考方向下，电源的功率为

$$P_1 = -U_S I = -UI \quad (1.4-4)$$

负载的功率为 $P_2 = UI = I^2 R = \frac{U^2}{R}$

$$(1.4-5)$$

【例 1.4-1】 在图 1.4-1 中，已知 $U_S = 10V$ ， $R_L = 5\Omega$ 。计算电源发出的功率与负载吸收的功率。

【解】 由于电源的电压与电流的参考方向为非关联参考方向，则

$$P_1 = -U_S I = -10 \times \frac{10}{5} = -20W$$

由于负载的电压与电流的参考方向为关联参考方向，则

$$P_2 = UI = 10 \times 2 = 20W$$

可见， $P_1 < 0$ ，即电源发出功率； $P_2 > 0$ ，即负载吸收功率。

【例 1.4-2】 用计算功率的方法判断例 1.2-1 中元件 A 和元件 B 是电源还是负载。已知 $U = 10V$ ， $I = -1A$ 。

【解】 在图 1.2-6(a)中，电压 U 的参考方向与电流的参考方向相同，则

$$P_A = UI = 10 \times (-1) = -10W$$

可见， $P_A < 0$ ，即元件 A 发出功率，起电源作用。

在图 1.2-6(b)中，电压 U 的参考方向与电流的参考方向相反，则

$$P_B = -UI = -10 \times (-1) = 10W$$

可见， $P_B > 0$ ，即元件 B 吸收功率，起负载作用。

【例 1.4-3】 为保证某种负载正常工作，在电路中要串入一个分压电阻。已知串入的分压电阻两端电压 $U_R = 20V$ ，流过负载的电流 $I = 100mA$ 。请选择分压电阻的参数。

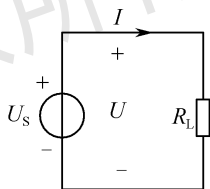


图 1.4-1 电源和负载的功率

【解】 设分压电阻两端电压的参考方向与电流的参考方向相同, 根据欧姆定律, 有

$$R = \frac{U_R}{I} = \frac{20}{100 \times 10^{-3}} = 200 \Omega, \quad P_R = U_R I = 20 \times 100 \times 10^{-3} = 2 \text{ W}$$

选择电阻时, 电阻的功率要留有余量, 所以选 200Ω 、 3 W 的分压电阻。

思考题

1.4-1 如何用功率的计算结果说明一段电路是发出功率还是吸收功率?

1.5 基尔霍夫定律

基尔霍夫定律是电路分析中的重要基本定律, 它包括基尔霍夫电流定律 (Kirchhoff's Current Law, 简称 KCL) 和基尔霍夫电压定律 (Kirchhoff's Voltage Law, 简称 KVL)。基尔霍夫电流定律描述的是电路中任一节点上各支路电流之间的约束关系; 基尔霍夫电压定律描述的是电路中任一回路中各支路电压之间的约束关系。

1.5.1 基尔霍夫电流定律 (KCL)

以图 1.5-1 的电路为例, 首先介绍支路、节点和回路的概念。

(1) 支路是电路中的每一条分支。一条支路流过一个电流, 称为支路电流。图 1.5-1 中有三条支路, 即 acb、ab 和 adb。

(2) 节点是三条支路或三条以上支路连接的点。图 1.5-1 中有两个节点, 即节点 a 和节点 b。

(3) 回路是由支路组成的闭合路径。图 1.5-1 中有三个回路, 即 cabc、adba 和 cadbc。

基尔霍夫电流定律描述的是电路中任一节点上各支路电流之间的约束关系, 其内容为: 对于电路中的任一节点, 任一瞬时流入该节点的电流之和等于流出该节点的电流之和。

在图 1.5-1 中, 对节点 a 可以写出

$$I_1 + I_2 = I_3 \quad (1.5-1)$$

上式也可写成 $I_1 + I_2 - I_3 = 0$, 即

$$\sum I = 0 \quad (1.5-2)$$

KCL 也可这样描述: 对于电路中的任一节点, 任一瞬时流入或流出该节点电流的代数和为零。若流入节点的电流取正号, 那么流出节点的电流就取负号。

KCL 不仅适用于电路中的任一节点, 也可推广应用到包围部分电路的任一闭合面。例如, 在图 1.5-2 中, 若只考虑电流 I_1, I_4, I_8 之间的关系, 不考虑虚线所包围的部分电路时, 可将这部分电路用一个闭合面表示, 这个闭合面就相当于一个节点, 由 KCL, 得

$$I_1 + I_4 + I_8 = 0$$

上式的正确性证明如下: 由于闭合面包围的电路有 4 个节点, 应用 KCL 可列出

$$I_1 = I_2 + I_3 = I_6 - I_5 + I_3$$

$$I_4 = I_5 + I_7 - I_3$$

$$I_8 = -I_6 - I_7$$

将上面的三式相加, 得 $I_1 + I_4 + I_8 = 0$

可见, 在任一瞬时, 流入一闭合面的电流的代数和也为零。

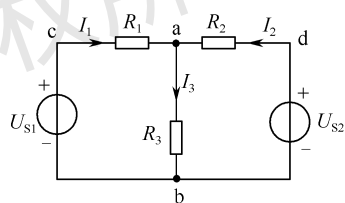


图 1.5-1 电路举例

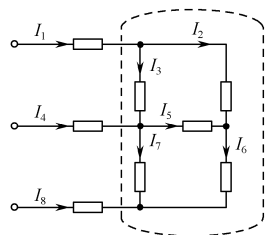


图 1.5-2 KCL 的推广应用

【例 1.5-1】 在图 1.5-2 中, 若 $I_1 = 6\text{A}$, $I_3 = 4\text{A}$, $I_4 = 2\text{A}$, $I_7 = 3\text{A}$ 。求 I_2 、 I_5 、 I_6 、 I_8 。

【解】 根据 KCL, 得

$$I_2 = I_1 - I_3 = 6 - 4 = 2\text{A}, \quad I_5 = I_4 + I_3 - I_7 = 2 + 4 - 3 = 3\text{A}$$

$$I_6 = I_2 + I_5 = 2 + 3 = 5\text{A}, \quad I_8 = -I_6 - I_7 = -5 - 3 = -8\text{A}$$

1.5.2 基尔霍夫电压定律 (KVL)

基尔霍夫电压定律描述的是电路中任一回路中各支路电压之间的约束关系, 其内容为: 对于电路中的任一回路, 在任一瞬时, 沿回路绕行一周, 各支路的电位降之和等于电位升之和。

在图 1.5-3 中, 回路 1 和回路 2 的绕行方向都设为顺时针方向。对于回路 1 和回路 2, 有

$$R_1 I_1 + R_3 I_3 = U_{S1} \quad (1.5-3)$$

$$U_{S2} = R_3 I_3 + R_2 I_2 \quad (1.5-4)$$

对于回路 1 中的 $R_1 I_1$ 、 $R_3 I_3$ 是沿着回路绕行方向上电位是降落的, 而 U_{S1} 是电位升高的; 对于回路 2 中的 $R_2 I_2$ 、 $R_3 I_3$ 是沿着回路绕行方向上电位是升高的, 而 U_{S2} 是电位降落的。

可见, 回路各段电压是电位升还是电位降是相对回路的绕行方向而言的。

式(1.5-3)或式(1.5-4)也可写成

$$\sum (RI) = \sum U_s \quad (1.5-5)$$

式(1.5-5)是 KVL 的另一种表达式。其中, $\sum (RI)$ 表示电阻上的电压降的代数和, 若支路电流的参考方向与回路绕行方向一致, 该支路电流在电阻上所产生的电压降取正号, 相反取负号; $\sum U_s$ 表示电压源电压的代数和, 若电压源的电压参考方向与回路绕行方向相反, 则取正号, 相同则取负号。

设式(1.5-3)中的 $R_1 I_1 = U_1$ 、 $R_3 I_3 = U_3$, 式(1.5-4)中的 $R_2 I_2 = U_2$, 则式(1.5-3)和式(1.5-4)还可写成

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

即

$$\sum U = 0 \quad (1.5-6)$$

KVL 也可这样描述: 对于电路中的任一回路, 在任一瞬时, 沿回路绕行一周, 在回路绕行方向上各支路电压降的代数和恒等于零。

KVL 不仅适用于闭合回路, 也可推广到开口电路, 即可求解电路中任意两点之间的电压。

【例 1.5-2】 在图 1.5-4 中, $U_{S1} = 10\text{V}$, $U_{S2} = 4\text{V}$, $R_1 = 4\Omega$, $R_2 = 6\Omega$ 。求 U_{ab} 。

【解】 此题先根据 KCL 求出电流 I , 然后再由 KVL 求出 U_{ab} 。

由式(1.5-3)列出 cadbc 的回路电压方程, 即

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

由上式求出电流 I , 即

$$I = \frac{U_{S1} - U_{S2}}{R_1 + R_2} = \frac{10 - 4}{10} = 0.6\text{A}$$

然后在 a 点和 b 点之间假想有一个其端电压等于 U_{ab} 的支路, 这样就可以用 KVL 对 cabca 回路或 adba 回路列回路电压方程求出 U_{ab} , 即

$$U_{ab} = U_{S1} - R_1 I = 10 - 4 \times 0.6 = 7.6\text{V}$$

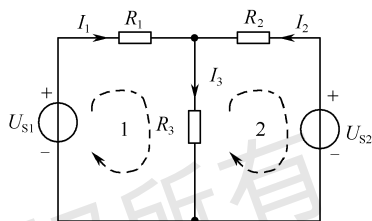


图 1.5-3 回路举例

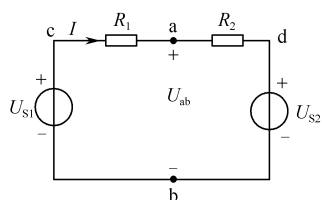


图 1.5-4 例 1.5-2 图

或

$$U_{ab} = R_2 I + U_{S2} = 6 \times 0.6 + 4 = 7.6\text{V}$$

此题也可用电位的概念求 U_{ab} 。设 b 点为参考点，即 $V_b = 0$ ，然后求出 a 点的电位。由电位的概念可知，a 点的电位 V_a 就等于 a 点到参考点之间的电压，即

$$V_a = U_{S1} - R_1 I = 10 - 4 \times 0.6 = 7.6\text{V}$$

所以 $U_{ab} = V_a - V_b = V_a = 7.6\text{V}$ 。

思考题

1.5-1 什么叫电位升高和电位降落？在图 1.5-4 中，若回路的绕行方向为 dacbd，试由 KVL 列出回路电压方程，并说明各段电压的升高和降落情况。

1.6 电阻电路的等效变换

在工程应用中，电路的结构有多种多样。但是不论电路结构多么复杂，最终都可以等效为最基本的连接方式。本节主要讨论电阻的串联、并联、星形连接和三角形连接。

1.6.1 电阻的串联与并联

1. 电阻的串联

在电路中，两个或两个以上的电阻一个接一个地连接起来，流过同一个电流，则称这种连接方式为电阻的串联。

图 1.6-1 (a) 是由两个电阻 R_1 、 R_2 串联组成的电路。电阻串联时，电阻值增大，总电阻为

$$R = R_1 + R_2 \quad (1.6-1)$$

因此，可以用一个 R 的等效电路代替两个电阻串联的电路，其等效电路如图 1.6-1 (b) 所示。

电阻串联起分压作用。在图 1.6-1 (a) 所示的电压、电流参考方向下，由 KVL 得

$$U_1 + U_2 = U \quad (1.6-2)$$

$$\text{其中 } U_1 = R_1 I = \frac{R_1}{R_1 + R_2} U, \quad U_2 = R_2 I = \frac{R_2}{R_1 + R_2} U \quad (1.6-3)$$

式 (1.6-3) 称为两个电阻串联的分压公式。

2. 电阻的并联

在电路中，两个或两个以上的电阻连接在两个公共节点之间，它们的端电压相等，则称这种连接方式为电阻的并联。

图 1.6-2 (a) 是由两个电阻 R_1 、 R_2 并联组成的电路。电阻并联时，电阻值减小，总电阻为

$$I = I_1 + I_2 = \frac{U}{R_1} + \frac{U}{R_2} = \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right) U = \frac{1}{R} U$$

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \quad (1.6-4)$$

或

$$R = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} \quad (1.6-5)$$

因此，可以用一个 R 的等效电路代替两个电阻并联的电路，其等效电路如图 1.6-2 (b) 所示。

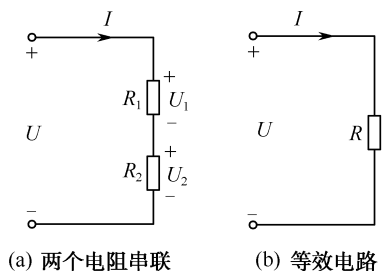


图 1.6-1 串联电路

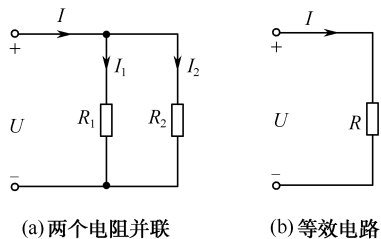


图 1.6-2 并联电路

在并联支路很多的情况下，用式(1.6-4)求等效电阻比较麻烦，因此可以用电导来求其等效电阻。电阻的倒数称为电导，用 G 表示，单位为西门子(S)。电阻与电导的关系为

$$G = 1/R \quad (1.6-6)$$

式(1.6-4)用电导表示为

$$G = G_1 + G_2 \quad (1.6-7)$$

电阻并联起分流作用，在图 1.6-2(a)所示的电压、电流参考方向下，有

$$I_1 = \frac{U}{R_1} = \frac{RI}{R_1} = \frac{R_2}{R_1 + R_2} I, \quad I_2 = \frac{U}{R_2} = \frac{RI}{R_2} = \frac{R_1}{R_1 + R_2} I \quad (1.6-8)$$

式(1.6-8)称为两个电阻并联的分流公式。

并联电路在实际中应用很广泛，工厂里的动力负载、民用照明负载和各种家用电器等都是与电网并联相接的，以保证负载在额定电压下正常工作。

【例 1.6-1】 在图 1.6-3(a)中，已知 $I = 5\text{A}$ ，求 I_1 。

【解】 此题先根据电阻的串联与并联对原电路进行等效，然后利用分流公式求出电流 I_1 。

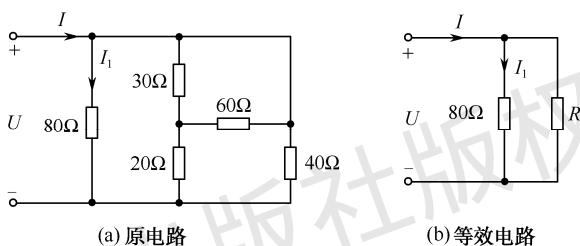


图 1.6-3 例 1.6-1 图

在图 1.6-3(a)中，根据电路结构可知， 30Ω 电阻和 60Ω 电阻并联，再与 20Ω 电阻串联，然后再与 40Ω 电阻并联，其等效电阻为

$$R = [(30 // 60) + 20] // 40 = 20\Omega$$

其等效电路如图 1.6-3(b)所示。由分流公式，得

$$I_1 = \frac{R}{80 + R} I = \frac{20}{80 + 20} \times 5 = 1\text{A}$$

*1.6.2 电阻的星形连接和三角形连接

在实际电路中也会遇到不能用串联、并联化简的电阻电路。例如在图 1.6-4 中，这些电阻的连接既不是串联也不是并联。那么这样的电路应如何等效呢？观察一下这个电路，发现在其结构上也有特点：图中在节点 2 上接的三个电阻为星形(Y)连接，如图 1.6-5(a)所示。图 1.6-4 中 1、2、3 三点之间接的电阻为三角形(Δ)连接，如图 1.6-5(b)所示。若能将星形结构等效为三角形结构，或将三角形结构等效为星形结构，则电阻电路就可以用串联、并联的方法化简了。

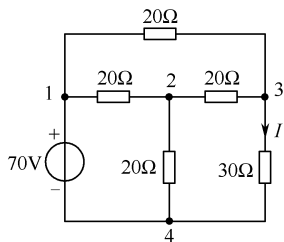


图 1.6-4 电路举例

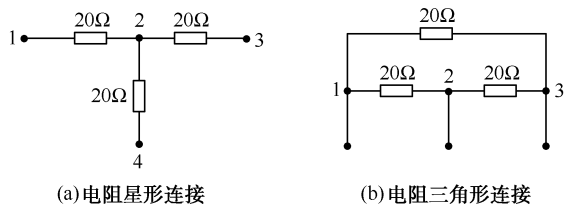


图 1.6-5 电阻的星形、三角形接法

当星形和三角形连接的电阻满足一定条件时，它们之间是可以进行相互等效变换的。以图 1.6-6 中的电阻相等的星形和三角形连接电路为例，说明它们之间的等效变换。星形和三角形连接的等效变换条件是：

(1) 对应端子 a、b、c 流入或流出的电流 I_a 、 I_b 、 I_c 对应相等。

(2) 对应端子 a、b、c 之间的电压 U_{ab} 、 U_{bc} 、 U_{ca} 对应相等。

若满足以上条件，则对应端子 a、b、c 之间的电阻就对应相等。

设图 1.6-6(a) 和 (b) 两个电路中的 c 端开路，则它们的对应端子 a、b 之间的电阻应当对应相等，即

$$R_Y + R_Y = \frac{R_\Delta(R_\Delta + R_\Delta)}{R_\Delta + R_\Delta + R_\Delta} = \frac{2}{3}R_\Delta$$

同理，a 端和 b 端分别开路时，其结果与上式相同，即 $2R_Y = \frac{2}{3}R_\Delta$

也就是

$$\begin{cases} R_Y = \frac{1}{3}R_\Delta \\ R_\Delta = 3R_Y \end{cases} \quad (1.6-9)$$

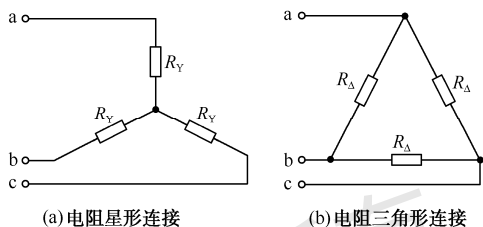


图 1.6-6 电阻的星形、三角形变换

若星形和三角形连接的电阻不相等时，其等效变换公式的推导条件同上，此推导过程略。电阻不相等的星形电路和三角形电路的等效变换公式为

$$\begin{cases} Y\text{形电阻} = \frac{\Delta\text{形相邻电阻的乘积}}{\Delta\text{形电阻之和}} \\ \Delta\text{形电阻} = \frac{Y\text{形电阻两两乘积之和}}{Y\text{形不相邻电阻}} \end{cases} \quad (1.6-10)$$

【例 1.6-2】 求图 1.6-4 电路中的电流 I 。

【解】 将图 1.6-4 中的节点 2 上接的星形连接的电阻变换为三角形连接，如图 1.6-7 所示。

根据式 (1.6-9) 的星形电路变换成三角形电路的等效变换公式，则

$$R_\Delta = 3R_Y = 3 \times 20 = 60\Omega$$

所以

$$I = \frac{70}{(20//60) + (60//30)} \times \frac{60}{60+30} = 1.33A$$

思考题

1.6-1 试推导出 n 个电阻串联或并联时的分压公式和分流公式。

1.6-2 将图 1.6-4 中的 1、2、3 之间的三角形接法的电阻变换成星形接法之后，再求电流 I 。

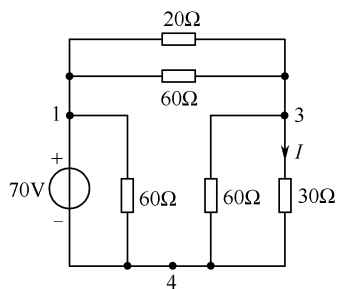


图 1.6-7 图 1.6-4 的等效电路

1.7 电源及其等效变换

在实际应用中，向负载提供能量的电源有两种形式，一种电源能向负载提供稳定的电压，这种电源称为电压源；另一种电源能够向负载提供稳定的电流，这种电源称为电流源。由于这两种电源提供的电压或电流与电路中的电压或电流无关，所以这两种电源又称为独立电源。根据各种负载的需要，电源又分为直流电源和交流电源。几种实际电压源如图 1.7-1 所示。



(a) 蓄电池



(b) 直流稳压电源



(c) 发电机



(d) 交流信号源

图 1.7-1 实际电压源

1.7.1 理想电压源和理想电流源

1. 理想电压源

当实际电压源的内阻远小于负载电阻时，这样的电压源称为理想电压源。理想电压源的特点是，它向负载提供的电压不随负载变化，所以理想电压源也称为恒压源。我们常用的电池和发电机都可以近似为理想电压源。图 1.7-2 为理想电压源的模型及其外特性。其中，电压源的模型符号既表示直流电源又表示交流电源，直流电压源用大写字母 U_S 表示。电源的外特性是指电源对外电路的电压、电流的伏安关系。理想电压源的外特性曲线是一条与 I 轴平行的直线，说明理想电压源提供的电压不随负载电流变化。

2. 理想电流源

当实际电流源的内阻远大于负载电阻时，这样的电流源称为理想电流源。理想电流源的特点是，它向负载提供的电流不随负载变化，所以理想电流源也称为恒流源。图 1.7-3 为理想电流源的模型及外特性。其中，电流源的模型符号既表示直流电源又表示交流电源，直流电流源用大写字母 I_S 表示。理想电流源的外特性曲线是一条与 U 轴平行的直线，说明理想电流源提供的电流不随负载电压变化。

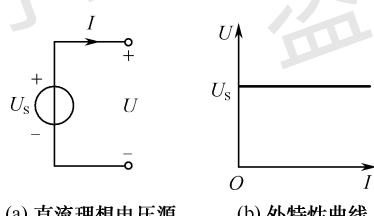


图 1.7-2 理想电压源

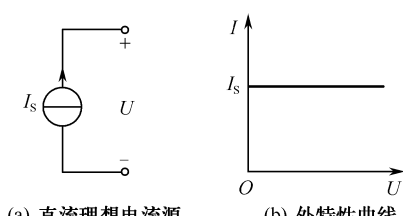


图 1.7-3 理想电流源

【例 1.7-1】 在图 1.7-4 中，已知 $U_S = 2\text{V}$, $I_S = 1\text{A}$, $R = 10\Omega$ 。求电路中的功率。

【解】 $P_R = I_S^2 R = 1^2 \times 10 = 10\text{W}$ 。电压源的电压、电流参考方向关联，所以

$$P_U = U_S I_S = 2 \times 1 = 2\text{W} \text{ (电压源吸收功率)}$$

设电流源端电压 U 的参考极性为上正下负，由 KVL 得

$$U = RI_S + U_S = 10 \times 1 + 2 = 12\text{V}$$

由于电流源的电压、电流参考方向非关联，所以

$$P_{I_S} = -UI_S = -12 \times 1 = -12\text{W} \text{ (电流源发出功率)}$$

由上分析可见，电压源吸收功率，处于负载状态；电流源发出功率，处于电源状态；电路中，电源发出的功率与负载吸收的功率相等，发出功率为负，吸收功率为正。

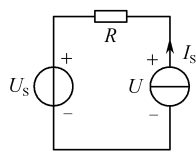


图 1.7-4 例 1.7-1 图

需要注意的是，电压源中的电流和电流源的端电压都由外电路确定。

1.7.2 电压源与电流源的等效变换

前面所分析的理想电压源和理想电流源都是实际电压源和实际电流源的理想模型。实际电压源和实际电流源总是存在内阻的，对于实际电压源来说，当负载电流增大时，电压源的端电压总会有所下降，实际电压源的电路模型及外特性如图 1.7-5 所示。当电压源内阻 R_S 远远小于负载电阻 R_L 时，可以认为实际电压源输出的电压与负载无关，电压源输出的电压 $U = U_S$ 不变，即电压源为理想电压源。对于实际电流源来说，当负载变化时，电流源输出的电流总会有所变化，实际电流源的电路模型及外特性如图 1.7-6 所示。当电流源的内阻 R_S 远远大于负载电阻 R_L 时，可以认为实际电流源输出的电流与负载无关，电流源输出的电流 $I = I_S$ 不变，即电流源为理想电流源。

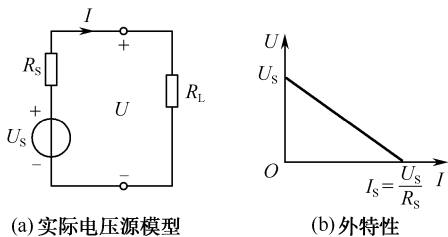


图 1.7-5 实际电压源

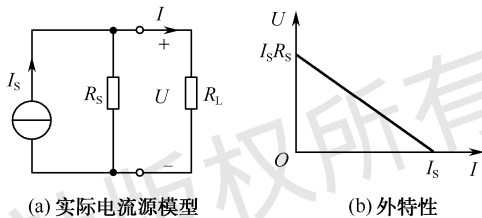


图 1.7-6 实际电流源

从以上两个电源的外特性可见，它们对负载 R_L 的作用结果是相同的。所以在电路分析中，这两种实际电源的电路模型可以等效互换，如图 1.7-7 所示。其中，电压源等效为电流源时，电流源的电流 I_S 为

$$I_S = U_S / R_S \quad (1.7-1)$$

而电流源等效为电压源时，电压源的电压 U_S 为

$$U_S = I_S R_S \quad (1.7-2)$$

等效互换过程中，电压源和电流源的内阻不变。其

实，实际电源应用时，一般情况下不考虑电源内阻，即电源近似认为是理想电源。理想电压源和理想电流源不能等效变换。但是，只要有电阻与理想电压源串联，有电阻与理想电流源并联，那么它们就可以等效互换。

在等效变换时，需要注意的是：(1) 电压源的电压极性和电流源的电流方向的确定，即 I_S 电流从电压源的正极性一端流出，保证负载电流的方向不变；(2) 两个电源只对外电路等效，电源内部不等效；(3) 理想电压源与理想电流源不能等效变换。

【例 1.7-2】 已知电路如图 1.7-8(a) 所示。用电源等效变换的方法求 I 。

【解】 第一步：将图 1.7-8(a) 中的电压源等效为电流源，如图(b)所示。其中等效电流源的电流为 $6/3 = 2\text{A}$ ，其参考方向是从 6V 电压源的正极流出的方向。

第二步：将图(b)中的 3Ω 和 6Ω 的电阻并联，即为 $3\Omega // 6\Omega = 2\Omega$ ；然后将 2A 和 3A 的电流源等效为电压源，如图(c)所示。其中 2A 的电流源等效为电压源的电压为 $2 \times 2 = 4\text{V}$ ，其参考极性与 2A 电流源的电流方向相反，即等效电压源的极性为上正下负。 3A 的电流源等效为电压源的电压为 $3 \times 2 = 6\text{V}$ ，其参考极性同上。

第三步：由图(c)，根据欧姆定律，求得 $I = \frac{4-6}{2+2+2} = -\frac{1}{3}\text{A}$ 。

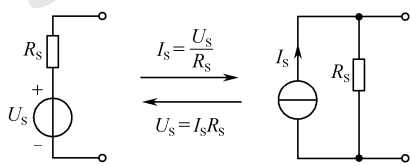


图 1.7-7 电压源与电流源的等效变换

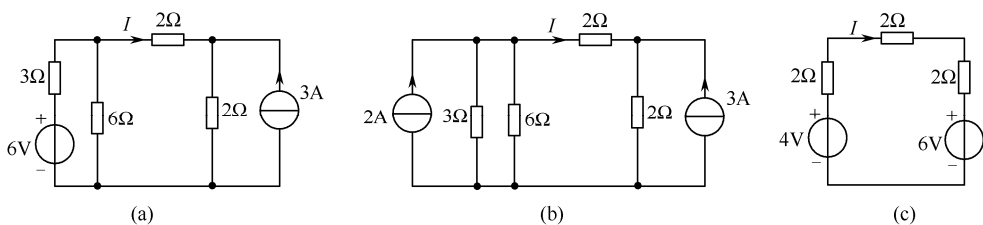


图 1.7-8 例 1.7-2 图

思考题

1.7-1 理想电源和实际电源有何不同？实际电源满足什么条件时可以当做理想电源使用？

1.7-2 两种电源若要等效互换，应满足什么条件？

*1.8 电桥电路

图 1.8-1(a) 所示的电路称为电桥电路，简称电桥。其中， R_1 、 R_2 、 R_3 和 R_4 称为电桥电路的四个桥臂电阻。在 c、d 的对角线上，接入直流电源 U_s ，在 a、b 的对角线上，接入负载电阻 R_L 。

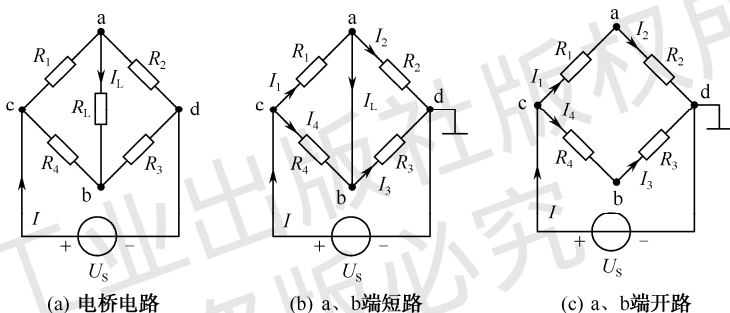


图 1.8-1 电桥电路

1. 电桥平衡条件

由实验发现，当调节四个桥臂中的一个电阻时，例如调节电阻 R_3 的数值，会使负载电流为零，即 $I_L = 0$ ，电桥电路无输出电压， $U_{ab} = 0$ ，这种现象称为电桥平衡。那么电桥平衡的条件是什么呢？我们再进一步讨论。

当电桥平衡时，a、b 之间虽然接有负载 R_L ，但是 R_L 中没有电流流过。说明 a、b 两点之间没有电位差，即 $V_a = V_b$ 。所以，可以将 a、b 两点用短路线连接起来，如图 1.8-1(b) 所示。在图 1.8-1(b) 中，设 d 点为电路的参考点，即 $V_d = 0$ ，用接地符号表示。根据电位的概念，有

$$V_a = I_2 R_2, \quad V_b = I_3 R_3 \quad (1.8-1)$$

因为电桥平衡时， $I_L = 0$ ，则有

$$I_2 = I_1 = \frac{U_s}{R_1 + R_2}, \quad I_3 = I_4 = \frac{U_s}{R_4 + R_3} \quad (1.8-2)$$

将式(1.8-2)代入式(1.8-1)得

$$V_a = \frac{R_2 U_s}{R_1 + R_2}, \quad V_b = \frac{R_3 U_s}{R_4 + R_3} \quad (1.8-3)$$

因为电桥平衡， $V_a = V_b$ ，则得

$$R_1 R_3 = R_2 R_4 \quad (1.8-4)$$

式(1.8-4)就是电桥平衡条件。此式说明，当电桥相对臂电阻的乘积相等时，ab 支路中无电流。

电桥平衡条件也可以由图(c)推导出。因为电桥平衡时, $I_L = 0$, 可以将 ab 支路断开, 如图 1.8-1(c)所示。由分压公式, 得

$$V_a = \frac{R_2}{R_1 + R_2} U_S, \quad V_b = \frac{R_3}{R_3 + R_4} U_S$$

根据 $V_a = V_b$, 得

$$R_1 R_3 = R_2 R_4$$

可见, 当电桥平衡时, 电流为零的支路可以开路处理或者短路处理。所以利用电桥平衡条件可方便地化简电路。

2. 电桥平衡的应用

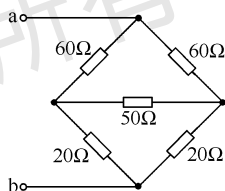
(1) 利用电桥平衡测量元件的参数。例如在图 1.8-1(a)中, 设 R_1 、 R_2 是标准电阻, R_4 是待测电阻, R_3 是可调的标准电阻。测量时, 调节 R_3 使 ab 支路的电流为零, 电桥平衡。应用式(1.8-4)可求出待测电阻 R_4 的数值, 即

$$R_4 = \frac{R_1}{R_2} R_3 \quad (1.8-5)$$

(2) 利用电桥平衡简化电路。例如, 图 1.8-2 就是电桥电路, 此电路满足电桥平衡条件, 50Ω 电阻中的电流为零, 则 a、b 两端的等效电阻为

$$R_{ab} = (60 + 20) // (60 + 20) = (60 // 60) + (20 // 20) = 40\Omega$$

当式(1.8-4)不相等时, 电桥不平衡, 若求 R_{ab} , 要用 Y- Δ 等效变换的方法求解; 若求 50Ω 电阻中的电流, 要用第 2 章的分析方法求解。



思考题

1.8-1 在图 1.8-2 中, 将左下方的 20Ω 电阻改为 30Ω 电阻, 求 R_{ab} 。

图 1.8-2 电桥电路

本章小结

(1) 电路的组成与电路模型

电路是由电源、负载和中间环节组成的。电路主要是针对负载的工作情况对各支路或部分电路进行分析, 其中分析的主要问题是电压与电流的关系、电路中的功率转换关系。

电路是由实际器件组成的, 为了分析方便, 工程上将实际器件理想化, 用理想元件构成电路模型。

(2) 电流、电压的参考方向

电路中的基本物理量是电压、电位和电流。在分析电路时, 要设电压、电流的参考方向。当电流的参考方向和电压的参考方向相同时为关联参考方向。当电压或电流的计算结果为正值时, 说明电压或电流的参考方向与实际方向相同; 当计算结果为负值时, 说明电压或电流的参考方向与实际方向相反。

(3) 功率

当电压、电流参考方向关联时, $p = ui$; 当电压、电流参考方向非关联时, $p = -ui$ 。在电路中, 电源发出的功率与负载吸收的功率相等。起电源作用的电源或器件或部分电路的功率为负值, 即 $p < 0$; 起负载作用的器件或部分电路的功率为正值, 即 $p > 0$ 。

计算电阻元件的功率公式为 $P_R = U_R I = I^2 R = U_R^2 / R$ 。

(4) 电路定律

欧姆定律和 KCL、KVL 是电路分析中的最基本、最重要的定律。它们的关系式为

欧姆定律

$$U = RI$$

KCL、KVL

$$\sum I = 0 \quad \sum U = 0$$

用欧姆定律列方程时，若电压、电流是关联参考方向，则方程式中无负号；若电压、电流是非关联参考方向，则方程式中有负号。

用 KCL、KVL 列方程时，必须要设电压、电流的参考方向和回路的绕行方向。

(5) 电阻的等效变换

电阻的连接有关联、并联和星形、三角形连接。电阻串联或并联时，可以等效成一个电阻。当两个电阻串联或并联时，其等效电阻为

$$R = R_1 + R_2 \quad \text{或} \quad R = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}$$

其分压、分流公式为

$$\begin{cases} U_1 = \frac{R_1}{R_1 + R_2} U \\ U_2 = \frac{R_2}{R_1 + R_2} U \end{cases} \quad \begin{cases} I_1 = \frac{R_2}{R_1 + R_2} I \\ I_2 = \frac{R_1}{R_1 + R_2} I \end{cases}$$

星形、三角形连接的电阻可根据星形、三角形的等效变换公式进行等效。当星形、三角形连接的电阻各自都相等时，其星形、三角形电阻的等效变换公式为

$$\begin{cases} R_Y = \frac{1}{3} R_\Delta \\ R_\Delta = 3R_Y \end{cases}$$

(6) 电源及其等效变换

实际电源有两种，即电压源和电流源。实际电源都是存在内阻的，当实际电压源的内阻远小于负载电阻时，在使用或分析电路时可认为是理想电压源，即电压源输出的电压与负载无关。当实际电流源的内阻远大于负载电阻时，在使用或分析电路时可认为是理想电流源，即电流源输出的电流与负载无关。

实际的电压源和实际的电流源可以等效变换。理想电压源与电阻串联的形式和理想电流源与电阻并联的形式也可以等效变换。

但要注意，理想电压源和理想电流源不能直接等效变换。

(7) 电桥电路

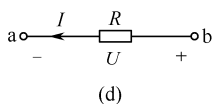
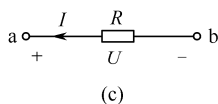
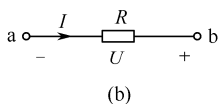
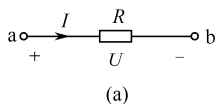
当电桥电路中的电桥相对臂电阻的乘积相等时，电桥平衡，即某一个对角线支路中无电流、无电压。应用电桥平衡可测量电路元件和简化电路。

(8) 电位

为了简化电路的分析，在电路中设某点为参考点，然后应用电位的概念求出其他各点的电位。其他各点的电位在数值上等于该点与参考点之间的电压。计算电位时与所选择的路径无关，参考点选择的位置不同，各点的电位随之改变，但是两点之间的电位差是不变的。注意，参考点的电位为零，在电路中用接地符号表示。

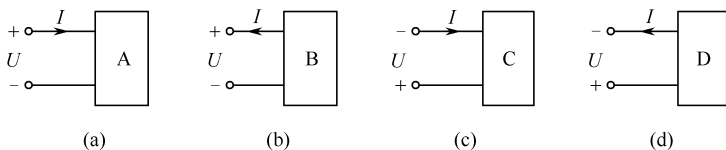
习题

1-1 在题图 1-1 中，已知 $I = -2A$ ， $R = 5\Omega$ 。求各图中的电压 U 。



题图 1-1

1-2 在题图 1-2 中, 已知 $I = -2\text{A}$, $U = 15\text{V}$ 。计算各图元件中的功率, 并说明它们是电源还是负载。



题图 1-2

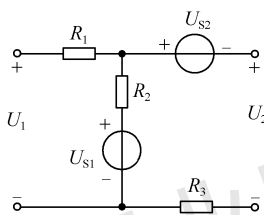
1-3 某电路中需要接入一个限流电阻, 已知接入的电阻两端电压 $U_R = 10\text{V}$, 流过电阻的电流 $I_R = 20\text{mA}$ 。请选择这个电阻的参数。

1-4 一只 15V 、 5W 的白炽灯接在 36V 的电源上。请选择需要串联的电阻。

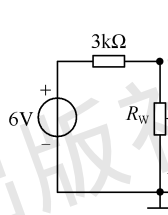
1-5 在题图 1-5 中, 已知 $U_1 = 12\text{V}$, $U_{s1} = 4\text{V}$, $U_{s2} = 6\text{V}$, $R_1 = R_2 = R_3 = 2\Omega$ 。求 U_2 。

1-6 在题图 1-6 中, 已知电位器 $R_w = 6\text{k}\Omega$ 。当电位器的滑动头 c 分别在 a 点、 b 点和中间位置时, 计算输出电压 U_o 。

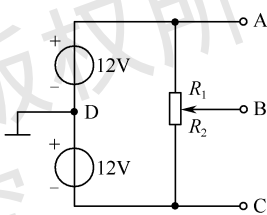
1-7 在题图 1-7 中, 当电位器调到 $R_1 = R_2 = 5\text{k}\Omega$ 时, 求 A 点、 B 点和 C 点的电位。



题图 1-5



题图 1-6

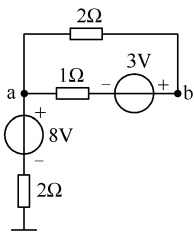


题图 1-7

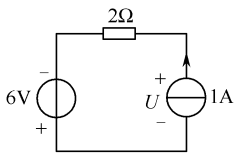
1-8 求题图 1-8 电路中的 U_{ab} 。

1-9 求题图 1-9 电路中电源和电阻的功率, 并验证功率平衡关系。

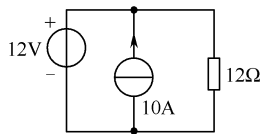
1-10 求题图 1-10 电路中电源和电阻的功率, 并验证功率平衡关系。



题图 1-8



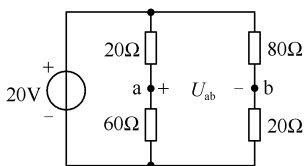
题图 1-9



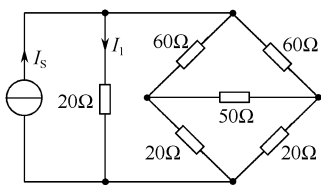
题图 1-10

1-11 求题图 1-11 电路中的 U_{ab} 。

1-12 在题图 1-12 电路中, 已知 $I_s = 2\text{A}$ 。求电流 I_1 。



题图 1-11

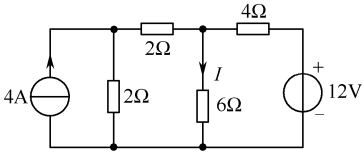


题图 1-12

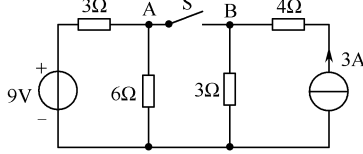
1-13 在题图 1-13 电路中，用电压源与电流源的等效变换求电流 I 。

1-14 已知电路如题图 1-14 所示。(1) 开关 S 打开时，求 A 点和 B 点的电位；(2) 开关 S 闭合时，求 A 点和 B 点的电位。

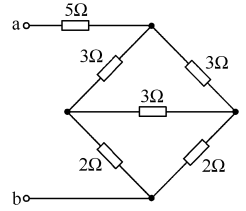
1-15 求题图 1-15 电路中的等效电阻 R_{ab} 。



题图 1-13



题图 1-14



题图 1-15

电子工业出版社版权所有
盗版必究