

第1章 电路基础知识

电路理论分析的对象是电路模型，而不是实际电路。本章先介绍电路模型，然后介绍电路分析中一些基本物理量（电流、电压、电动势和电位）的定义、计算公式和单位，以及实际方向和参考方向的概念，养成用参考方向来分析电路的习惯。介绍电阻元件和电源元件、它们的电压电流关系，以及电功率的计算方法。用参考方向和实际方向两种方法判断电源元件在电路里起电源作用还是负载作用。介绍电路分析的两个基本定律，欧姆定律和基尔霍夫定律，并用它们求解电路。

1.1 电路模型

1.1.1 实际电路

为了实现某种功能，用导线将一些实际电气器件连接起来，构成可供电流流通的通路，称为电路。实际电气器件分为3大类。

(1) 电源或信号源：电路中电能或信号的来源。一类电源的作用是将非电能转换成电能，例如，干电池将化学能转换为电能；发电机将机械能转换为电能。热能、水能、原子能、核能、太阳能等都可以转换为电能。另一类电源又称为信号源，是将非电信号转换为电信号，将交流转换为直流，例如，话筒将声音信号转换为电信号，品种繁多的各种传感器将压力、温度等信号转换为电信号，稳压电源将交流信号转换为直流信号输出，各种信号发生器提供需要波形的信号。

(2) 负载：电路中的用电设备。一种负载的作用是将电能转换成其他形式的能（非电能），例如，灯泡吸收电能转换成光能；电炉将电能转换成热能，电动机把电能转换为机械能；另一类负载是接收和转换信号，如扬声器将电能转换成声音。

(3) 中间环节或信号处理：是指将电源与负载连接成闭合电路的导线、开关设备、保护设备等，起传递和控制电能的作用，如变压器、输电线、开关和一些储能设备（电感器、电容器），处理信号的放大器、程序控制电器（单片机、PLC、计算机）等。

根据需要的功能来设计电路或一个控制系统，由于需求繁多，所以电路的结构形式多种多样。电路主要有两种作用。一种是实现电能的传输、分配与转换，如电力系统传、输、配电；另一种是实现信号的传递和处理，如扩音机、测量系统、控制系统。现代测控系统的各种传感器将压力、温度、距离等非电信号转换为电信号，经过电路把信号传递和处理（调谐、变频、检波、放大），现在一般使用程序控制电器来处理信号，中间环节还需要通过模数转换成数字信号才能进入程序控制电器，程序控制电器输出电信号去控制负载工作，如灯泡发光、电机转动、离合器闭合或断开，有时还需要通过数模转换来控制模拟信号设备。

交流电路简单的例子是日光灯电路，如图 1.1.1(a)所示。它由交流电源、镇流器、启辉器（启动器）、灯管、电容、开关、导线组成。并联电容是为了提高电路的功率因数。

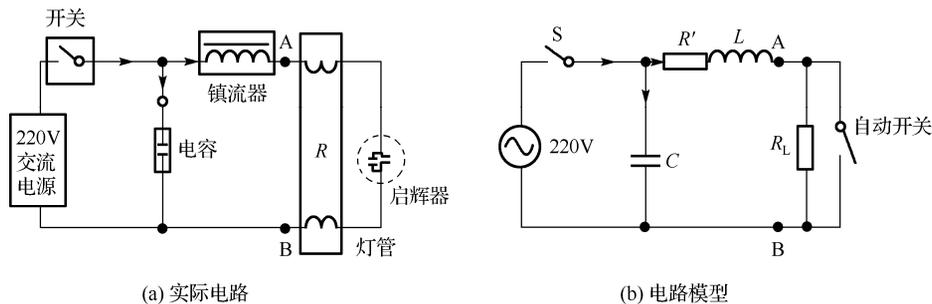


图 1.1.1 日光灯电路示意图

1.1.2 电路模型

电路理论主要研究电路中发生的各种电磁现象，包括电能的产生、消耗、存储。这些现象在电路里同时发生，直接对实际电气器件组成的电路进行分析、计算有一定困难。为了简化分析，对实际电路建立模型，由理想电路元件组成的电路称为电路模型，它是实际电路的科学抽象。

理想电路元件（简称电路元件）是针对一些基本电磁现象，将实际电路元件理想化了的电路元件，一个理想电路元件只表示一种电磁现象或物理现象，用统一的符号标记。表 1.1.1 所示为常用电路元件的电路符号。

表 1.1.1 常用电路元件的电路符号

直流电源 E		电容 C		开关 S	
固定电阻 R		电压源 U_s		熔断器 FU	
可变电阻 R_p		电流源 I_s		电压表	
电感 L		电灯 HL		电流表	

组成电路的实际电气器件是多种多样的，其电磁性能的表现往往是相互交织在一起的。先把实际器件做某种近似和理想化处理，在一定条件下突出其主要的电磁性质，忽略其次要因素，通常采用理想电路元件或其组合来代替实际器件。实际电气器件都可以用理想电路元件来模拟，以后所述的电路均为电路模型，简称电路。

日光灯电路模型如图 1.1.1(b)所示。交流电源是电源元件，为电路提供交流电。镇流器是一个带铁芯的线圈。一般线圈可以用电感元件 L 来模拟，由于绕组有电阻，考虑电阻消耗的能量就要给电感元件串联一个电阻，如果线圈通过高频交流电流，每个绕组匝间有电场，电路模型还要在电感元件串联一个电阻的基础上并联一个电容，通常频率是 50Hz ，线圈的电容效应比较小。开关 S 接通、断开电路。启辉器的作用如一个自动开关，是在电路开关 S 合上瞬间接通电路，电路接通后启辉器自动断开。灯管主要的功能是消耗电能，所以用电阻元件来模拟。电容器用电容元件来模拟。

工频 50Hz 对应的波长为 $\lambda = \frac{c}{f} = \frac{3 \times 10^8}{50} = 6000\text{km}$ ，其中 c 为光速，一般家用电器及控制系统的实际尺寸远小于最高工作频率所对应的电磁波波长，满足集中假设条件，里面的元件可以认为是集中参数元件，电路是集中参数电路，可以用电路模型分析法分析电路。输电线路不满足集中假设条件，不是集中参数电路，必须采用分布参数电路模型进行分析。本书研究的电路均为集中参数电路。

1.2 物理量及其参考方向

电流 I 、电压 U 、电位 V 、电动势 E 和功率 P 是电路的基本物理量，本节将介绍这些基本物理量的概念、实际方向和单位。在分析电路时，不仅要知道物理量的实际方向，还要学会用参考方向来分析电路，有了参考方向，这些物理量就有了正、负之分，搞清楚实际方向与参考方向之间的关系。学会用电压、电流的参考方向来计算功率，并判断某元件在电路中处于电源还是负载的地位。

1.2.1 电流及其参考方向

电荷（带电粒子）有规则地定向运动就形成了电流，正电荷和负电荷的流动都要形成电流。电流的大小等于单位时间内通过某一导体横截面的电荷数

$$i = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta q}{\Delta t} = \frac{dq}{dt} \quad (1.2.1)$$

当电流的大小和方向不随时间变化时， $\frac{dq}{dt}$ 为定值，称为恒定电流或直流电流，简称直流（dc 或 DC），常用大写字母 I 来表示，如图 1.2.1(a)所示，并有

$$I = \frac{q}{t} \quad (1.2.2)$$

大小和方向随时间变化的电流，称为时变电流。大小和方向随着时间按周期性变化且平均值为零的时变电流，称为交流电流（ac 或 AC），常用英文小写字母 i 来表示，如图 1.2.1(b)所示。

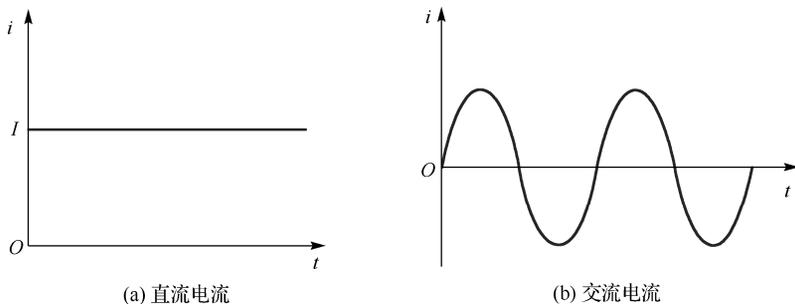


图 1.2.1 直流电流和交流电流图

在 SI（国际单位制）中，电流的单位为安培，简称安，符号为 A。常用的有千安（kA）、毫安（mA）、微安（ μA ）等。它们之间的换算关系是： $1\text{A} = 10^{-3}\text{kA} = 10^3\text{mA} = 10^6\mu\text{A}$ 。

式 (1.2.1) 中， t 的单位是秒（s），电荷量 q 的单位为库（C）， $1\text{C} = 1\text{A} \cdot \text{s}$ 。

电流的方向是客观存在的。习惯上规定电流的实际方向为正电荷的运动方向，也就是负电荷运动的相反方向。在电场力的作用下，正离子顺电场方向运动，负离子逆电场方向运动，无论是在电解液中、电离了的气体中，还是在半导体中，正离子、负离子都形成电流，金属导体中的电流是自由电子定向运动形成的。电流方向都是电场的方向。

在简单电路中很容易知道电流的方向，但在复杂电路分析中，电流的实际方向很难预先判断出来。而且在交流电路分析中，电流的实际方向还会不断改变。

在分析与计算电路时，任意规定某一方向作为电流的参考方向或正方向。规定了参考方向以后，电流则有正、负之分。正的电流表示电流的实际方向与参考方向相同，负的电流表示电流的实际方向

与参考方向相反。在选定了电流的参考方向之后，用各种计算方法和测量方法可得电流有正有负。参考方向表示方法如下。

(1) 箭标法。用实线箭头来表示电流的参考方向。如图 1.2.2(a)所示电流为正值，如图 1.2.2(b)所示电流为负值。

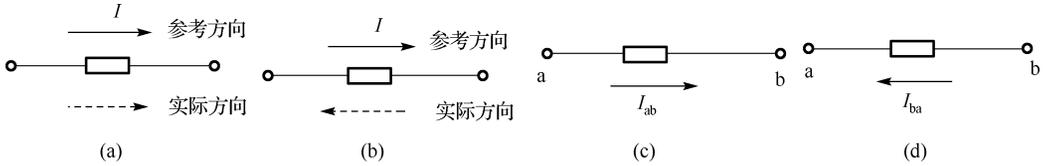


图 1.2.2 电流的参考方向

(2) 双下标法。用双下标来表示电流的参考方向。如对某一电流，用 I_{ab} 表示，其参考方向由 a 指向 b (如图 1.2.2(c)所示)。用 I_{ba} 表示其参考方向由 b 指向 a (如图 1.2.2(d)所示)。显然，两者相差一个负号，即

$$I_{ab} = -I_{ba}$$

1.2.2 电压、电位、电动势及其参考方向

1. 电压及其参考方向

带电粒子的运动要发生能量的转换。如在电源外部，正电荷在电场力的作用下通过导线和负载，从电源的正极性端运动到负极性端，电场力做了功，使正电荷的电位能减少，减少的这些能量转换成其他形式的能量，如热能，电阻消耗掉了，失去的能量是由电源提供的。电荷在电场中从一点移动到另一点，它的能量的改变量只与这两点的位置有关，而与移动的路径无关。**电压**就是用来衡量电场力移动电荷做功的能力的物理量。a、b 两点间的电压 u_{ab} 在数值上等于电场力把单位正电荷从 a 点移到 b 点所做的功，即从 a 点（高电位点）移到 b 点（低电位点）所失去的电能，即

$$u_{ab} = \lim_{\Delta q \rightarrow 0} \frac{\Delta w_{ab}}{\Delta q} = \frac{dw_{ab}}{dq} \quad (1.2.3)$$

式中， Δq 为由 a 点移动到 b 点的电荷量，单位为库仑； Δw_{ab} 为移动过程中电荷所减少的能量，单位为焦耳 (J)。在国际单位制中，电压的单位是伏特（简称伏，用字母 V 表示）。常用的有千伏 (kV)、毫伏 (mV)、微伏 (μV)，它们之间的关系可表示为

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

大小和方向都不随时间变化的电压称为恒定电压或直流电压 (DC)，用字母 U 来表示，如图 1.2.3(a)所示。直流时电压公式可表示为

$$U = \frac{W}{q} \quad (1.2.4)$$

大小和方向随时间变化的电压称为时变电压。大小和方向随时间按周期性变化且平均值为零的时变电压，称为交流电压 (ac 或 AC)，常用字母 u 来表示，如图 1.2.3(b)所示。

电压的实际方向是使正电荷电位能减小的方向，当然也是电场力对正电荷做功的方向，即由高电势端指向低电势端，也即电位降低的方向。

同样，电压的实际方向在复杂电路中也很难确定，与电流的参考方向类似，在电路分析中也要规定电压的参考方向，即正方向。在参考方向选定之后，电压则有正、负之分。

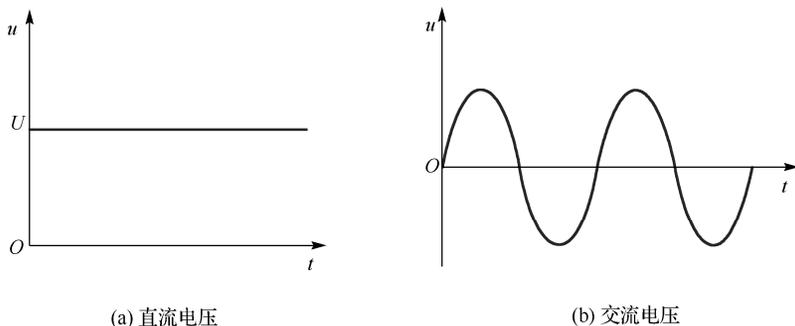


图 1.2.3 直流电压和交流电压

通常用 3 种方式来表示电压的参考方向：

- (1) “+” “-” 极性法，如图 1.2.4(a)所示。从正极性端指向负极性端的方向。
- (2) 箭标法，如图 1.2.4(b)所示。实线箭头标定电压 U 的方向。
- (3) 双下标法，如图 1.2.4(c)所示。如 U_{ab} 表示电压的参考方向由 a 指向 b，显然： $U_{ab} = -U_{ba}$ 。

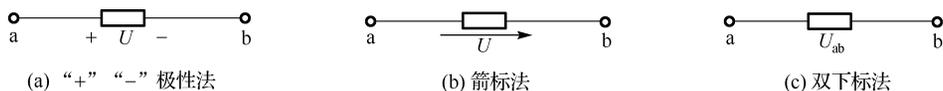


图 1.2.4 电压的参考方向

当电压 U 为正值时，表明 a 端为高电位端，b 端为低电位端，从 a 点到 b 点为电位降落。当 U 为负值时，表明元件的 a 端为低电位端，b 端为高电位端，从 a 点到 b 点为电位升高。

在电路中，一个元件中的电流和两端电压的参考方向可以独立地任意指定，正、负说明它们的实际方向。在计算之前，都要先给定各元件中的电流和电压的参考方向。如果流过某元件电流的参考方向是从电压参考方向的正极性端指向负极性端，如图 1.2.5(a)所示，即电流和电压的参考方向一致，则把这种参考方向称为关联参考方向；如果流过某元件电流的参考方向是从电压参考方向的负极性端指向正极性端，即电流和电压的参考方向不一致，称为非关联参考方向，如图 1.2.5(b)所示。



图 1.2.5 关联参考方向和非关联参考方向

2. 电位及其参考方向

这里多次提到高电位、低电位，那么什么是电位呢？只要讲电位，就要先在电路中任选一点作为参考点，假设 o 点为参考点，参考点就是假设的“零电位点”或“地电位点”，一般在电路图中用 \perp 或 \perp 符号表示。在电路图中，只有选定参考点以后，谈论某点的电位才有意义。

有了参考点以后，电路中某点的电位定义为电场力把单位正电荷从该点移到参考点所做的功，显然电路某点的电位就是这点到参考点的电压。电位用 V 表示，a 点的电位用 V_a 表示。有

$$V_a = U_{ao} \quad (1.2.5)$$

有了电位概念以后，电路中任意两点间的电压等于这两点的电位差。

$$U_{ab} = U_{ao} + U_{ob} = U_{ao} - U_{bo} = V_a - V_b \quad (1.2.6)$$

电位的单位和电压一样，是伏特。

在电路中，电源外部电场力做功，电流应该从高电位点流向低电位点。但在复杂的实际电路中无法知道电路中电位的高低，所以也要用到参考方向的概念，电位的参考方向和电压的参考方向表示方法一样，主要用“+”“-”极性法和箭标法两种。因为已经假设参考点的电位为零，所以，如果某点的电位为正，说明此点的电位比地电位高，如果某点的电位为负，说明此点的电位比地电位低。

【例 1.2.1】 图 1.2.6 所示电路中，已知 $U_1 = -10\text{V}$ ， $U_{ab} = 4\text{V}$ ，试求：(1) U_{ac} ，并说明 U_1 、 U_{ab} 、 U_{ac} 的实际方向；(2) 分别以 a 点和 c 点作为参考点时，b 点的电位和 bc 两点之间的电压 U_{bc} 。

解 (1) $U_{ac} = -U_1 = -(-10) = 10\text{V}$ ， U_{ab} 、 U_{ac} 是正的，说明实际方向与参考方向一致。 U_1 是负的，说明实际方向与参考方向相反。

(2) 以 a 点作为参考点，则 $V_a = 0$ ；以 c 点作为参考点，则 $V_c = 0$ ；

因为 $U_{ab} = V_a - V_b$ ，所以：

$$V_b = V_a - U_{ab} = 0 - 4 = -4\text{V}$$

$$V_c = V_a - U_{ac} = 0 - 10 = -10\text{V}$$

$$U_{bc} = V_b - V_c = -4 - (-10) = 6\text{V}$$

因为 $U_{ac} = V_a - V_c$ ，所以：

$$V_a = V_c + U_{ac} = 0 + 10 = 10\text{V}$$

$$V_b = V_a - U_{ab} = 10 - 4 = 6\text{V}$$

$$U_{bc} = V_b - V_c = 6 - 0 = 6\text{V}$$

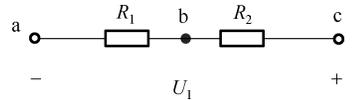


图 1.2.6 例 1.2.1 的电路

由以上计算可以看出，当以 a 点为参考点时， $V_b = -4\text{V}$ ；当以 c 点为参考点时， $V_b = 6\text{V}$ ；但 b 点和 c 点之间的电压 U_{bc} 始终是 6V 。这说明电路中各点的电位值与参考点的选择有关，而任意两点间的电压与参考点的选择无关。

3. 电动势及其参考方向

每个电源都有两个电极，电位高的一端为正极，电位低的一端为负极。在电源外部，电场力把正电荷从高电位点移到低电位点，电场力做功，为了使电路维持一定的电流，电源内部必须有一种力，能持续不断地把正电荷从电源的负极（低电位处）移送到正极（高电位处），以保证电源两极间具有一恒定的电位差。电源内部的这种非电场力，叫做电源力。电池中的电源力是由电解液和极板间的化学作用产生的，一般发动机中的电源力是由电磁作用产生的。在电源内部，电源力将单位正电荷从电源负极移动到电源正极所做的功，称为电源的电动势，用 E 表示，电动势的单位和电压一样，也是伏特（V）。由此可知，电动势的实际方向是在电源内部由低电位指向高电位，即电位升的方向，与电压实际方向规定相反。

同样，通常电动势也用参考方向来描述。参考方向表示方法和电压一样有“+”“-”极性法、箭标法、双下标法。但要注意电动势的实际方向是电位升的方向，所以，图 1.2.7 所示电路中，如果电动势为正，说明 a 点电位高于 b 点电位。

电压电动势的参考方向本来是可以随便假设的方向，但由于电压的实际方向规定为电位降的方向，而电动势的实际方向规定为电位升的方向，所以电压电动势的参考方向选择是否一致决定了它们之间的等量关系。通常将电压电动势参考方向选择为相反方向，便于计算。

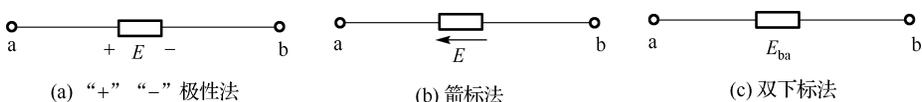


图 1.2.7 电动势的参考方向

当选择电动势的参考方向与电压的参考方向相反时，如图 1.2.8(a)所示，有 $E = U$ 。

当选择电动势的参考方向与电压的参考方向相同时，如图 1.2.8(b)所示，有 $E = -U$ 。

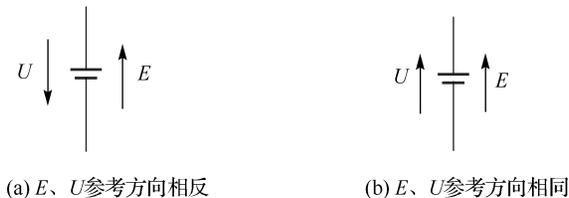


图 1.2.8 电动势与电压之间的关系

电动势与电压的单位虽然相同，但两者是有区别的。

(1) 电动势与电压的物理意义不同。电动势反映了非电场力（电源力）的做功能力，而电压反映了电场力的做功能力。

(2) 电动势与电压的实际方向相反。电动势的实际方向由低电位指向高电位，而电压的实际方向由高电位指向低电位。

(3) 虽然电动势和电压的物理意义不同，但对外效果是一样的。对电源外部支路，具有方向从电源负极到正极的几伏电动势，与方向从电源正极到负极的几伏电压，效果是一样的。所以，现在很多书中已经不讨论电动势这个物理量了。

1.2.3 电功率和电能

电源将其他形式的能转换成电能通过导线发出来，负载接收到这些能量，又把电能转换成其他形式的能，传递转换电能的速率称为电功率，简称功率，用 P （直流时）或 p （交流时）表示。

$$p = \frac{dw}{dt} \quad (1.2.7)$$

功率的单位是瓦[特]，简称瓦（W）， $1W = 1J/s$ 。功率的单位还有千瓦（kW）、毫瓦（mW）、微瓦（ μW ）。 $1W = 10^{-3}kW = 10^3mW = 10^6\mu W$ 。

如果功率的单位是千瓦（kW），时间的单位是小时（h），电能的单位就是千瓦·时（kW·h），1 千瓦·时就是常说的 1 度电。 $1kW \cdot h = 10^3W \times 3600s = 3.6 \times 10^6 J$ 。

如图 1.2.5(a)所示，即电流、电压的参考方向为关联参考方向时，由式（1.2.3）知

$$dw = udq$$

$$p = \frac{dw}{dt} = u \frac{dq}{dt} = ui \quad (1.2.8)$$

式（1.2.8）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乘积。功率的单位又有： $1W = 1V \cdot A$ 。

当电压和电流的参考方向为非关联参考方向时，如图 1.2.5(b)所示，此段电路吸收的功率为

$$P = -UI \quad (1.2.9)$$

因为若图 1.2.5(b)电路改变电压或电流任意一个的参考方向，如改变电压的参考方向，则 $U' = -U$ ，电压、电流就是关联参考方向了， $P = UI$ 。

式（1.2.8）和式（1.2.9）适用于一段电路，也适用于一个元件，计算的功率是以吸收功率为前提的，电压和电流是以参考方向来列方程的，电压、电流本身是有正、负号的。无论用 $P = UI$ ，还是用 $P = -UI$ 计算，若计算结果为 $P > 0$ ，则表明该元件（或一段电路）确实是从外电路吸收能量，即消耗电能，那么该元件应该是负载；若 $P < 0$ ，则表明该元件（或一段电路）实际上是向外电路提供能量，

即发出功率的，这一元件（或一段电路）应该是电源。这是用参考方向来判断元件（或一段电路）是电源还是负载的一种方法。所有元件接收的功率的总和为零，即在电路里面，任何时候电源发出的功率都等于负载得到的功率，这个结论叫做“电路的功率平衡”。

在 t_1 到 t_2 时间段内，电压、电流是关联参考方向时，该段电路或一个元件接收或发出的电能量如下。

交流时，功率、能量用小写字母 p 、 w 表示： $p = ui$ ， $w = \int_{t_1}^{t_2} p(t)dt$ ；

直流时，功率、能量用大写字母 P 、 W 表示： $P = UI$ ， $W = Pt = P(t_2 - t_1)$ 。

【例 1.2.2】图 1.2.9 所示为直流电路， $U_1 = 8V$ ， $U_2 = -4V$ ， $U_3 = 7V$ ， $U_4 = 5V$ ， $I = 2A$ ， $I' = -2A$ 。求：（1）说明电流 I 和 I' 的实际方向；（2）各元件接收或发出的功率 P_1 、 P_2 、 P_3 和 P_4 ，并验证电路是否功率平衡。

解（1） I 为正，说明实际方向和参考方向一致； I' 为负，说明实际方向和参考方向相反。

（2） P_1 的电压、电流参考方向相关联，故

$$P_1 = U_1 I = 8 \times 2 = 16W \quad (\text{为正, 接收功率})$$

P_2 、 P_3 和 P_4 的电压参考方向与电流参考方向非关联，故

$$P_2 = -U_2 I = -(-4) \times 2 = 8W \quad (\text{为正, 接收功率})$$

$$P_3 = -U_3 I = -7 \times 2 = -14W \quad (\text{为负, 发出功率})$$

$$P_4 = -U_4 I = -5 \times 2 = -10W \quad (\text{为负, 发出功率})$$

整个电路的功率为 P

$$P = P_1 + P_2 + P_3 + P_4 = 16 + 8 - 14 - 10 = 0W \quad \text{功率平衡}$$

$$\text{或} \quad P_{\text{发}} = P_{\text{收}} \quad P_1 + P_2 = P_3 + P_4 \quad \text{功率平衡}$$

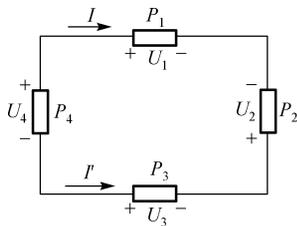


图 1.2.9 例 1.2.2 的电路

1.2.4 电气设备的额定值

电气设备长时间连续工作的温度称为稳定温度，稳定温度正好等于最高允许温度时的电流称为该电气设备的额定电流，也就是电气设备长时间连续工作的最大允许电流，用符号 I_N 表示。因此，当电路中电流达到电源或供电线的额定电流时，工作状态叫做“满载”；超过额定电流时，叫做“过载”；小于额定电流时，叫做“欠载”。在实际电路中，导线和电气设备的温度升高到稳定值要有一个过程，短时间内少量的过载是可以的，长时间的过载是不允许的，否则电气设备会因过度发热而缩短寿命或被烧毁，使用时应当注意。

能使电气设备在给定的工作条件下正常运行而规定的正常容许值称为电气设备的额定值。实际值不一定等于额定值，但一般不超过额定值，最好是接近额定值运行。电气设备的额定电压用符号 U_N 表示，额定功率用符号 P_N 表示。电气设备的额定值都在铭牌上标出，使用时必须遵守。某些只具有电阻的电气设备，它的电流与电压有正比关系，只给出其中的一项就够了，如白炽灯只规定额定电压，而变阻器只规定额定电流。

用电设备实际消耗的功率是由实际使用的条件来决定的，不一定等于额定功率。电源发出的实际功率由负载的大小来决定。通常负载都是并联运行的，负载的功率和电流的实际值取决于加在它上面的电压。如额定电压为 220V，额定功率为 100W 的白炽灯，只有接在 220V 的电源上，它的实际功率才等于额定功率。

练习与思考

1.2.1 进入某元件上的总电荷为 $q(t) = 20e^{-0.2t} \sin\left(\frac{\pi}{4}t\right) \text{C}$ ，求 t 等于 0、2s、-2s 时的 i 。

1.2.2 在 0.004s 内，有一负电荷 0.006C 从 a 向 b 通过面 S，同时有正电荷 0.006C 从 b 向 a 通过 S。试决定通过面 S 的电流的大小和方向。

1.3 电阻元件与欧姆定律

1. 电阻及电阻率

电荷在导体或半导体中运动时，会受到原子的碰撞与摩擦，这就是导体对电流的阻碍作用，这种阻碍作用导致导体消耗电能而发热。导体或半导体对电流的这种阻碍作用称为电阻作用。其电路模型可以用理想电阻元件来模拟，电阻元件简称为电阻，用符号 R 表示。白炽灯、电炉、电阻器等实际元件都可以用电阻元件来模拟。“电阻”的含义一方面表示电阻元件，另一方面表示该电阻元件的参数。

电阻的单位是欧姆 (Ω)，在实际使用时，还会用到千欧 ($\text{k}\Omega$) 和兆欧 ($\text{M}\Omega$) 等较大的单位，它们之间的换算关系是： $1\text{M}\Omega = 10^3\text{k}\Omega = 10^6\Omega$ 。

电阻的倒数称为电导，也是表征材料导电能力的一个参数，用 G 表示。

$$G = \frac{1}{R} \quad (1.3.1)$$

电导的单位为西门子 (Siemens)，简称西，符号为 S。电导表征导体导电的性能，电导大的电阻导电性能好，电阻反映导体对电流的阻碍性能，所以，电阻和电导实际上是同一事物的正反两个方面。

金属导体的电阻与其本身的材料性质、几何尺寸及所处的环境（如温度甚至光照等）有关。当温度一定时，金属导体的电阻由式 (1.3.2) 决定。

$$R = \rho \frac{l}{S} \quad (1.3.2)$$

式中， ρ 为金属导体的电阻率，单位为欧姆·米 ($\Omega \cdot \text{m}$)； l 为金属导体的长度，单位为米 (m)； S 为金属导体的截面积，单位为平方米 (m^2)。电阻率与材料的性质和温度有关，与尺寸无关。不同材料的电阻率是不同的，同一材料在不同温度下的电阻率也是不同的。但是，在一定温度下，对于同一种材料，其电阻率是常数。例如，铜在温度为 20°C 时的 $\rho = 0.0169 \times 10^{-6} \Omega \cdot \text{m}$ 。材料的电阻率越大，表明材料的导电性能越差。导体的电阻率通常小于 $10^{-6} \Omega \cdot \text{m}$ ；绝缘体的电阻率通常大于 $10^7 \Omega \cdot \text{m}$ ；半导体的电阻率通常为 $10^{-6} \sim 10^7 \Omega \cdot \text{m}$ 。

一般金属材料的电阻率随温度变化的规律可利用电阻率温度系数 α 来表示，即温度升高 1°C 时电阻率所变动的数值，单位为 $1/^\circ\text{C}$ 。在温度变化不大的范围内，几乎所有金属的电阻率都随温度线性变化，如式 (1.3.3) 所示。

$$\rho_2 = \rho_1 [1 + \alpha(T_1 - T_2)] \quad (1.3.3)$$

式中， T_1 、 T_2 为环境温度，单位为 $^\circ\text{C}$ ； ρ_1 、 ρ_2 为金属材料在温度 T_1 、 T_2 时的电阻率。一般金属材料的电阻随温度变化的规律可利用电阻温度系数 β 来表示，即温度升高 1°C 时电阻所变动的数值，单位为 $1/^\circ\text{C}$ 。电阻随温度线性变化，如式 (1.3.4) 所示。

$$R_2 = R_1 [1 + \beta(T_2 - T_1)] \quad (1.3.4)$$

式中, R_1 、 R_2 为金属材料在温度 T_1 、 T_2 时的电阻。

【例 1.3.1】 一铜线绕成的线圈, 铜线截面积为 1mm^2 , 铜线长为 2000m 。试求: (1) 线圈在 20°C 时的电阻; (2) 如果其电阻温度系数为 $0.0041/^\circ\text{C}$, 试问 100°C 时此线圈的阻值。

$$\text{解 由式 (1.3.2) 解得 } R = \rho \frac{l}{S} = 0.0169 \times 10^{-6} \times \frac{2000}{1 \times 10^{-6}} = 33.8 \Omega$$

$$\text{由式 (1.3.4) 得 } R_2 = R_1 + R_1 \beta (T_2 - T_1) = 33.8 + 33.8 \times 0.0041 \times (100 - 20) = 44.9 \Omega$$

常常根据实际需要来合理地使用各种导电材料。例如, 铜和铝的电阻很小, 常用来制成导线; 钨丝常用来制作各种灯泡的灯丝; 镍铬合金及铁铬合金在高温下具有足够的抗氧化性, 且加工性能好, 常用来制作电热元件; 锰钢、康铜的电阻受温度的影响很小, 常用来制作标准电阻器; 铂的电阻受温度影响很大, 常用来制作铂电阻温度计; 为了安全, 电工用的绝缘材料常选择塑料、云母、玻璃、陶瓷、木材等。

2. 欧姆定律

图 1.3.1 所示为电路的一部分, 这部分电路的电阻为 R , 在电路的两端施加电压 U , 则流过电路的电流 I 与所加电压 U 成正比, 与这段电路的电阻成反比, 这一规律称为电路的欧姆定律。

欧姆定律是电路的基本定律之一, 在电压和电流的参考方向选择一致的情况下, 即关联参考方向一致时 (如图 1.3.1(a)所示), 欧姆定律可写成

$$U = IR \quad \text{或} \quad I = \frac{U}{R} \quad \text{或} \quad I = GU \quad (1.3.5)$$

若电流和电压的参考方向选择为非关联参考方向时 (如图 1.3.1(b)所示), 则欧姆定律的表达式应为

$$U = -IR \quad (1.3.6)$$

式 (1.3.5) 和式 (1.3.6) 均表明, 电阻元件的电压、电流的变化规律是一样的, 波形相同。欧姆定律中, 电压的单位为伏特 (V), 电流的单位为安培 (A), 电阻的单位为欧姆 (Ω)。

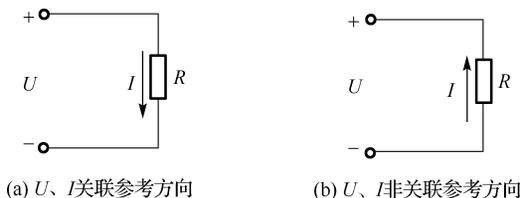


图 1.3.1 欧姆定律示例

由于是用 U 、 I 的参考方向列方程的, 所以在欧姆定律中有两套正、负号。(1) U 、 I 本身与实际方向是否一致有正、负号; (2) 公式中 U 、 I 参考方向是否一致有正、负号。

由欧姆定律可知, 当 U 、 I 是关联参考方向时, $R = \frac{U}{I}$, 当 U 、 I 是非关联参考方向时, $R = -\frac{U}{I}$, 由于 R 始终是正的, UI 是参考方向, 有正、负。在电阻 R 上, 电流的实际方向总是从高电位点流进去, 从低电位点流出来。

如果电阻两端的电压 U 与流过该电阻的电流 I 的比值 R 始终为某一定值, 与电流、电压大小无关, 则这样的电阻称为线性电阻。只有线性电阻上的电压和电流关系才遵守欧姆定律。严格来说, 绝对线性的电阻是不存在的, 通常将在一定的电压、电流范围内阻值基本不变的电阻作为线性电阻处理, 如白炽灯、电炉、电阻等。

元件的电流与电压的关系曲线称为元件的伏安特性曲线, 线性电阻元件的伏安特性为通过坐标原点的直线, 如图 1.3.2(a)所示。线性电阻元件有两种特殊情况值得注意: “开路”时电流为零, 电阻值 R 为无限大; “短路”时电压是零, 电阻为零。

当电阻两端的电压 U 或流过电阻的电流 I 改变时, 电阻的阻值也随之改变, 这样的电阻称为非线性电阻, 如二极管。非线性电阻上的电压和电流关系是不遵守欧姆定律的, 其伏安特性是曲线, 如图 1.3.2(b)所示。

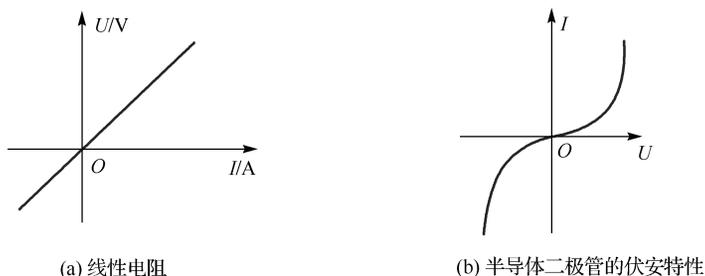


图 1.3.2 电阻的伏安特性

3. 电阻的功率

当 U 、 I 是关联参考方向时, 由功率公式和欧姆定律可知

$$P = UI = U \frac{U}{R} = \frac{U^2}{R} = I^2 R = U^2 G \quad (1.3.7)$$

由此, 不论 U 、 I 参考方向是否相同, 电阻元件的功率始终是正值, 所以电阻元件是耗能元件, 始终是负载。

如果电阻元件把接收的电转换成热能, 在 t_0 到 t 时间内, 电阻元件产生的热(量) Q , 也就是这段时间内接受的电能 W 为

$$\text{交流时} \quad Q = W = \int_{t_0}^t p dt = \int_{t_0}^t Ri^2 dt = \int_{t_0}^t \frac{u^2}{R} dt \quad (1.3.8)$$

$$\text{直流时} \quad Q = W = P(t - t_0) = PT = RI^2 T = \frac{U^2}{R} \cdot T \quad (1.3.9)$$

当电阻的功率大于额定值时, 电阻将变得过热, 导致电阻开路或发生大幅度阻值变化。电阻过热损坏时, 电阻表面会发生变化或有烧焦的痕迹。一般情况下, 电阻额定功率应该为其实际可能消耗功率的两倍。

【例 1.3.2】 有 220V、100W 的一个灯泡, 其灯丝电阻是多少? 每天用 10h, 一个月(按 30 天计算)消耗的电能是多少度?

解 灯泡灯丝电阻为
$$R = \frac{U^2}{P} = \frac{220^2}{100} = 484 \Omega$$

一个月消耗的电能 $W = PT = 100 \times 10^{-3} \times 10 \times 30 = 30 \text{ kW} \cdot \text{h} = 30 \text{ 度}$

练习与思考

1.3.1 有两根相同材质的电阻丝, 它们的长度之比为 $l_1:l_2 = 1:2$, 截面积之比为 $S_1:S_2 = 2:1$, 则它们的电阻值之比 $R_1:R_2$ 是多少?

1.3.2 白炽灯的灯丝烧断后，再将灯丝搭上使用反而更亮，试说明原因。

1.3.3 用截面积为 6mm^2 的铝线 ($\rho = 0.026\Omega \cdot \text{mm}^2 / \text{m}$) 从配电房向 100m 的一个临时住房供电，问线路电阻多少？如果导线中的电流为 15A ，线路压降为多少？

1.4 电源元件

把其他形式的能（非电能）转换成电能的设备称为电源。对于一个实际的电源，常用电压源模型或电流源模型来构建它们的电路模型。图 1.4.1 所示为电源的电压源模型，理想电压源是内阻为零的电压源。图 1.4.5 所示为电源的电流源模型，理想电流源是内阻无穷大的电流源。

电源又分为独立电源和受控源。独立电源是指电压源的电压或电流源的电流不受外电路的控制而独立存在的电源；受控源是指电压源的电压或电流源的电流受电路中其他部分的电流或电压控制的电源。本节先介绍电源的两种电路模型——电压源和电流源，然后介绍受控源。

1.4.1 电压源

用一个电压为 U_S 的理想电压源和内阻 R_0 串联组合来表示一个真实的电源，如图 1.4.1 所示，这就是电源的电压源模型，图(a)是交流电压源的符号，交流电压源的 u_S 随时间做周期性变化；图(b)是直流电压源的符号，直流电压源的 U_S 是不随时间变化的，是常数。

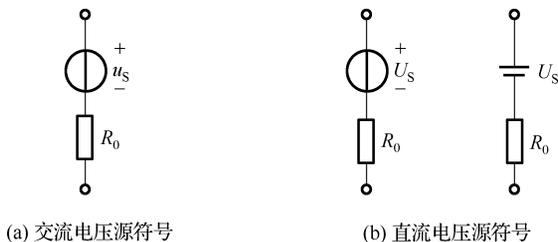


图 1.4.1 电压源模型

1. 电压源有载工作状态

在图 1.4.2(a)所示电路中，当开关合上时就是电压源有载工作状态，其中， R_L 是负载， U_L 是负载端电压，等于电源的输出电压， I 是电源的输出电流。

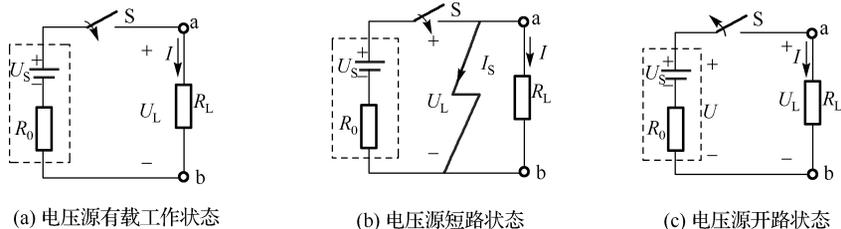


图 1.4.2 电压源 3 种工作状态

对图 1.4.2(a)所示电压源带负载电路，根据欧姆定律，负载电阻 R_L 两端的电流、电压为

$$I = \frac{U_S}{R_0 + R_L}$$

$$U_L = IR_L = \frac{U_S R_L}{R_0 + R_L} \quad (1.4.1)$$

负载端电压 U_L 与负载电阻 R_L 的关系是如图 1.4.3(a)所示的一条曲线。

$$U_L = U_S - IR_0 \quad (1.4.2)$$

由式 (1.4.2) 可以看出电源输出电压 U_L 与 I 的关系, 电源的电压 U_S 是一个恒量, 电源输出的电流由负载确定, IR_0 为电源的内阻压降, 电源向负载提供的输出电压 U_L 等于电源的电压 U_S 扣除其内阻上的压降 IR_0 。由式 (1.4.2) 可以画出 U_L 随 I 变化的曲线, 如图 1.4.3(b)所示一条直线, 电源向负载提供的输出电压随着它向负载提供的输出电流 I 的增大而减小, 其斜率与电源内阻有关。

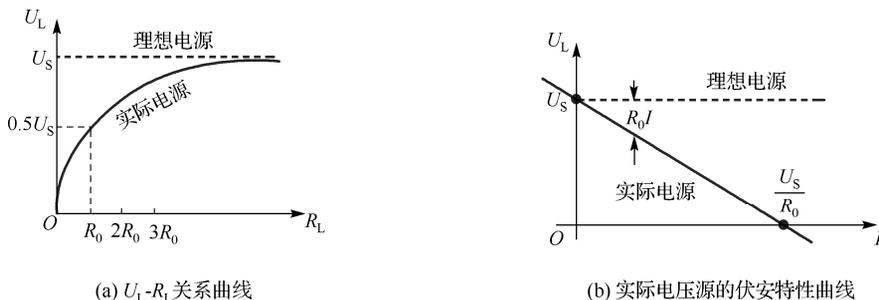


图 1.4.3 U_L - R_L 和 U_L - I 关系曲线

如果式 (1.4.2) 各项都乘以 I , 则得功率平衡式

$$U_L I = U_S I - R_0 I^2$$

或

$$P_{\text{负载}} = P_{\text{电源}} - \Delta P \quad (1.4.3)$$

电源产生的功率 ($P_{\text{电源}} = U_S I$) 等于电源向负载提供的输出功率 (负载取用的功率, $P_{\text{负载}} = U_L I$) 加上电源内阻上损耗的功率 ($\Delta P = R_0 I^2$)。

2. 电压源短路、开路状态

图 1.4.2(b)所示电路中, a、b 两点的导线直接相连, 电压源被短路, 此时, 电流不再流过负载, 而直接经短路线流回电源。由于在整个回路中只有电压源的内阻和部分导线电阻, 电源中电流数值很大, 称为短路电流 $I_S = \frac{U_S}{R_0}$ 。负载两端的电压、电流、功率都为零, 理想电压源发出功率, 电源功率全部被内阻消耗掉了, $P_{\text{电源}} = \Delta P = R_0 I_S^2$ 。

短路是电路中的一种严重故障。短路电流远远超过电源和导线的额定电流, 如不及时切断, 将引起剧烈发热而使电源、导线及电流流过的仪表等设备损坏。为了防止短路引起的事故, 通常在电路中接入熔断器或自动断路器, 一旦发生短路, 它能迅速将事故电路自动切断。

图 1.4.2(c)所示电路中, 开关 S 断开时, 电路处于开路状态。开路时外电路的电阻对电源来说等于无穷大, 负载和电源的电流、功率都为零, 这时电源的开路电压等于电源的电压 $U_{OC} = U_S$ 。

3. 理想电压源

如果电压源的内阻 $R_0 = 0$, 由式 (1.4.1) 或图 1.4.3(b)可知, 此时负载端的电压恒为 $U = U_S$, 与负载电阻 R_L 的大小无关, 这种电压源称为理想电压源或恒压源。理想电压源的伏安特性曲线如图 1.4.3 虚线所示, 它是一条平行于横轴的直线, 表明其输出电压与电流的大小和方向无关。内阻

为零的理想电压源实际中是不存在的, 当负载电阻比电源内阻大得多时可以视为理想电压源, 如稳压电源。

理想电压源具有如下几个性质。

(1) 理想电压源的输出电压是常数 U_S , 或是时间的函数 $u_S(t)$, 与输出电流无关。

(2) 理想电压源的输出电流和输出功率取决于外电路。理想电压源开路时, 输出电压还是等于 U_S , 输出电流和功率均为零。

(3) 端电压不相等的理想电压源并联或端电压不为零的理想电压源短路, 都是没有意义的。

【例 1.4.1】 有一直流电源, 其额定电流 $I_N = 5\text{A}$, 额定电压 $U_N = 50\text{V}$, 开路时测得电源端电压 $U_0 = 54\text{V}$, 负载电阻 R_L 可以调节, 其电路如图 1.4.2(a)所示。试求: (1) 额定工作状态下的负载电阻; (2) 电源短路状态下的电流; (3) 半载时电源输出电压和负载电阻。

解 (1) 额定工作状态下的负载电阻

$$R_L = \frac{U_N}{I_N} = \frac{50}{5}\Omega = 10\Omega$$

(2) 开路状态下电源端电压 U_0 等于电源的电压 U_S , 由式 (1.4.2) 得

$$U_0 = U_S = U_N + I_N \cdot R_0 = 54\text{V}$$

由此得

$$R_0 = 0.8\Omega$$

短路状态下的电流

$$I_S = \frac{U_S}{R_0} = \frac{54}{0.8}\text{A} = 67.5\text{A}$$

(3) 半载时就是输出电流是额定电流的一半, 电源输出电压由式 (1.4.2) 得

$$U_L = U_S - IR_0 = 54 - \frac{5}{2} \times 0.8 = 52\text{V} \quad R_L = \frac{U_L}{\frac{1}{2}I_N} = \frac{52}{2.5}\Omega = 20.8\Omega$$

1.4.2 电流源

由图 1.4.2(a)所示的电路可以计算出流过内电阻 R_0 的电流为

$$I = \frac{U_S - U_L}{R_0} = \frac{U_S}{R_0} - \frac{U_L}{R_0} = I_S - \frac{U_L}{R_0} = I_S - I_{R_0} \quad (1.4.4)$$

由 KCL 定律可知 (1.5 节介绍), 式 (1.4.4) 可以用图 1.4.4(a)来描述。虚线框可以设想为由一恒定电流为 I_S 的理想电流源与一个内电阻并联组合而成的电源, 这就是实际电源的另一种电路模型, 简称为电流源。其中, $I_S = \frac{U_S}{R_0}$ 是电源的短路电流, 其值与负载电阻的大小无关, 箭头表示理想电流源的电流参考方向, I_{R_0} 是电源的内电阻分得的电流, I 、 U_L 是电流源输出的电流和电压, 也是负载上的电流和电压。直流理想电流源用大写的 I_S 表示电流源的电流, 是常数, 如图 1.4.5(a)所示, 交流理想电流源用小写的 i_S 表示电流源的电流, 是时间的函数, 如图 1.4.5(b)所示。

1. 电流源有载工作状态

当电流源接上负载时, 电流源有载工作状态如图 1.4.4(a)所示, a、b 两端电源的内电阻 R_0 和负载电阻 R_L 并联, 其两端的电压相等, 即 $I_{R_0} \cdot R_0 = I \cdot R_L$, 得到

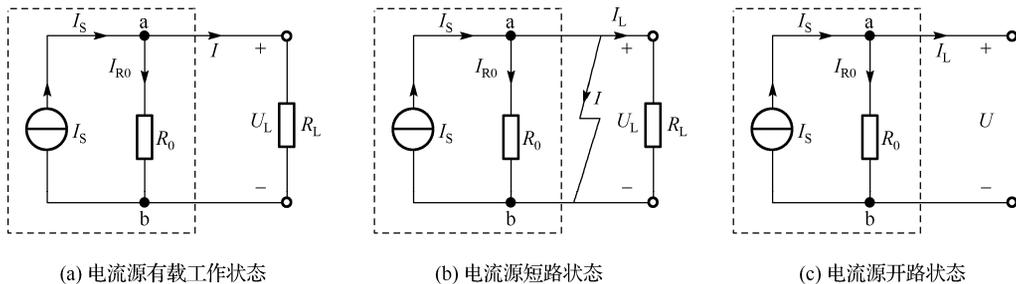


图 1.4.4 电流源 3 种工作状态

$$I = \frac{I_{R_0} \cdot R_0}{R_L} \tag{1.4.5}$$

由式 (1.4.4) 和式 (1.4.5) 联立可得

$$I = \frac{I_{R_0} \cdot R_0}{R_L} = I_S - I_{R_0} \quad I_{R_0} = \frac{I_S R_L}{R_0 + R_L}$$

$$I = I_S - I_{R_0} = \frac{I_S R_0}{R_0 + R_L} \tag{1.4.6}$$

由式 (1.4.6) 知道，电流源的输出电流 I 与负载电阻 R_L 的关系是一曲线，如图 1.4.6(a)所示。由式 (1.4.4) 也可以得到电流源的伏安特性曲线，如图 1.4.6(b)所示， I 随着 U_L 增大是一条减小的直线，当负载 R_L 增大时， U_L 增大，由于 I_S 是恒定的，内阻分得的电流 $I_{R_0} = \frac{U_L}{R_0}$ 增大，故负载电流 I 减小，其斜率与电源内阻有关。

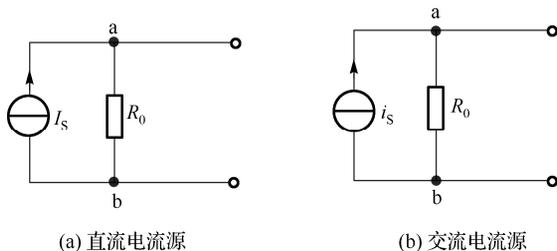


图 1.4.5 电流源模型

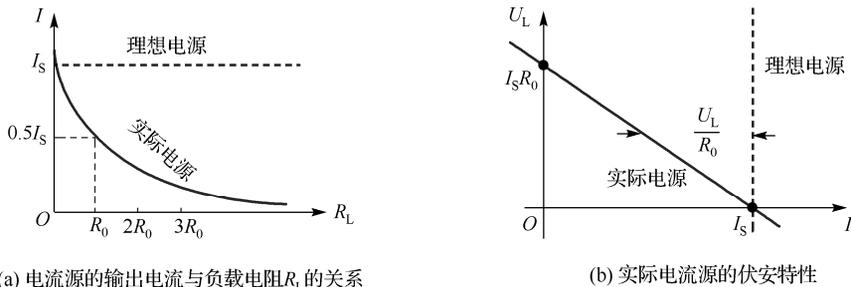


图 1.4.6 电流源的输出电流与负载的关系曲线

将式 (1.4.4) 两边同时乘以 U_L 得

$$I U_L = I_S U_L - I_{R_0} U_L$$

$$\text{即} \quad P_{\text{负载}} = P_{\text{电源}} - \Delta P \quad (1.4.7)$$

电源产生的功率 ($P_{\text{电源}} = U_L I_S$) 等于电源向负载提供的输出功率 (负载取用的功率, $P_{\text{负载}} = U_L I$)

加上电源内阻上损耗的功率 ($\Delta P = U_L I_{R_0} = \frac{U_L^2}{R_0}$)。

2. 电流源短路、开路状态

图 1.4.4(b) 电路中, a、b 两点的导线直接相连, 电流源被短路, 此时, I_S 电流不再流过负载, 而直接经短路线流回电流源。负载、电源的电压、功率都为零。

图 1.4.4(c) 电路中, 电路被断开, 没有电流流过负载, 负载的电压、电流、功率都为零, 理想电流源有功率输出, 电源的功率全部被内阻消耗掉了, $P_{\text{电源}} = \Delta P = U_L I_S = R_0 I_S^2$ 。这时电源的输出电压等于内阻上的电压 $U = R_0 I_S$ 。

3. 理想电流源

若图 1.4.4(a) 中的内电阻 R_0 无穷大 (R_0 支路开路), 此时流过负载 R_L 的电流恒为 I_S , 与 R_L 的大小无关, 则称此电源为理想电流源。由式 (1.4.4) 或图 1.4.6(a) 均可知, 当 R_0 无穷大时, 负载得到的电流接近为理想电流 I_S 。理想电流源的伏安特性曲线如图 1.4.6(b) 虚线所示, 它是一条平行于纵轴的直线, 表明其输出电流与端电压的大小无关。

内阻无穷大的理想电流源实际上也是不存在的, 当电源内阻比负载电阻大得多时可以视为理想电流源。某些电源在一定条件下可以近似地视为一个理想电流源, 如光电池, 在一定强度的光线照射下, 可激发近乎不变的电流。三极管工作在放大区时, 基极电流一定时, 发射极电流基本恒定。

理想电流源具有如下几个性质。

(1) 理想电流源的输出电流是常数 I_S , 或是时间的函数 $i(t)$, 与理想电流源的端电压无关。

(2) 理想电流源的端电压和输出功率取决于外电路。理想电流源短路时, 输出电流还是等于 I_S , 输出电压和功率均为零。

(3) 输出电流不相等的理想电流源串联或输出电流不为零的理想电流源开路, 都是没有意义的。

1.4.3 电源与负载的判断

在电路中, 电源不一定起电源的作用, 有时候也可能起负载的作用。1.2 节介绍了用参考方向来判断一个电源在电路中起电源作用还是负载作用, 这里介绍用电流电压的实际方向来判断一个电源起电源作用还是负载作用。

负载的电流都是从高电位流到低电位的, 所以, 负载的 U 和 I 的实际方向相同, 电流从高电位端 (“+” 端) 流进去, 低电位端 (“-” 端) 流出来, 取用功率, 即 “吞” 进能量。

电源的电流都是从低电位流到高电位的, 所以, 电源的 U 和 I 的实际方向相反, 电流从低电位端 (“-” 端) 流进去, 从高电位端 (“+” 端) 流出来, 产生功率, 即 “吐” 出电能。

【例 1.4.2】 在图 1.4.7 所示的两个电路中。(1) 负载电阻 R_L 中的电流 I 及其两端的电压 U 各为多少? 如果在图(a)中断开与理想电压源并联的两个理想电流源, 在图(b)中短接与理想电流源串联的理想电压源和 1Ω 电阻, 对计算结果有无影响? 为什么? (2) 求每个元件的功率, 判断哪个是电源、哪个是负载, 并求图(a)中的 I_2 和图(b)中的 U_S 。

解 (1) 参考方向如图。

对图 1.4.7(a)

$$I = \frac{U}{R_L} = \frac{10}{2} = 5\text{A}, \quad U = 10\text{V}$$

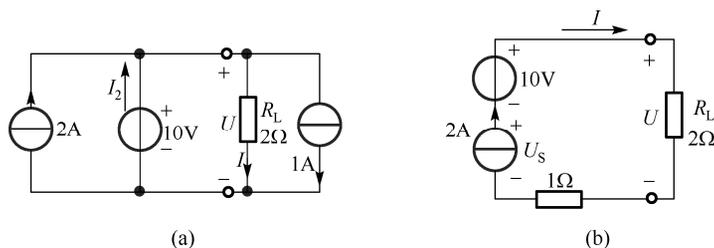


图 1.4.7 例 1.4.2 的电路

对图 1.4.7(b)

$$I = 2\text{A}, \quad U = IR_L = 2 \times 2 = 4\text{V}$$

图(a)断开与理想电压源并联的两个理想电流源,在图(b)中短接与理想电流源串联的理想电压源和 1Ω 电阻,对计算结果没有影响。因为 R_L 上的电压电流不变。

(2) 对图 1.4.7(a) (方法一) 参考方向的方法判断电源还是负载

$$2\text{A 理想电流源功率} \quad P_{S_{2\text{A}}} = -2 \times 10 = -20\text{W} \quad (\text{电源})$$

$$1\text{A 理想电流源功率} \quad P_{S_{1\text{A}}} = 1 \times 10 = 10\text{W} \quad (\text{负载})$$

$$R_L \text{ 电阻的功率} \quad P_{R_L} = IU = 5 \times 10 = 50\text{W} \quad (\text{负载})$$

$$\text{因为电路的功率必须平衡, 即} \quad P_E + P_{S_{2\text{A}}} + P_{R_L} + P_{S_{1\text{A}}} = 0$$

$$\text{所以, } 10\text{V 理想电压源功率} \quad P_E = -P_{R_L} - P_{S_{2\text{A}}} - P_{S_{1\text{A}}} = -10I_2 = -40\text{W} \quad (\text{电源})$$

$$\text{所以} \quad I_2 = 4\text{A}$$

对图 1.4.7(a) (方法二) 实际方向的方法判断电源还是负载

电流从 2A 理想电流源正端流出, 2A 理想电流源处于电源状态, I_2 是正的, I_2 从 10V 理想电压源的正端流出, 10V 理想电压源处于电源状态, 电流从 1A 理想电流源正端流入, 1A 理想电流源处于负载状态。

对图 1.4.7(b)

$$\text{理想电压源功率} \quad P_E = -10 \times 2 = -20\text{W} \quad (\text{电源})$$

$$\text{两个电阻的功率} \quad P_R = 2^2 \times 2 + 2^2 \times 1 = 12\text{W} \quad (\text{负载})$$

$$\text{因为电路的功率必须平衡, 即} \quad P_E + P_R + P_S = 0$$

$$2\text{A 理想电流源功率} \quad P_S = -P_E - P_R = -2U_S = 8\text{W} \quad (\text{负载})$$

$$\text{所以} \quad U_S = -4\text{V}$$

1.4.4* 受控源

随着电子技术的发展, 出现了众多的电子器件, 由独立电源和电阻元件组成的模型远远不能反映这些电子器件工作时的性能, 因此需要引入新的理想元件——受控源。受控源也是一种电源模型, 它们是组成半导体电路模型的主要元件。

独立电源有电压源和电流源模型, 受控源也分为受控电压源和受控电流源。为了与独立源区别, 用菱形符号表示受控源, 如图 1.4.8 所示, 图中的“+”、“-”表示受控电压源电压的参考方向, 箭头表示受控电流源电流的参考方向。

受控源与独立源的不同是, 受控电压源的电压或受控电流源的电流的大小和方向都受电路中其他支路的电流或某元件两端的电压控制, 也就是受控源有个控制量。因此, 受控源有两对端钮: 一对输

出端钮，即对外提供电压或电流的端钮；一对输入端钮，即施加控制量的端钮，用来控制输出端上电压或电流的大小。根据控制量是电压还是电流，受控源是电压源还是电流源，受控源分为 4 种形式：受控电压源有两种，电压控制电压源（Voltage Controlled Voltage Source, VCVS）（控制量为电压）和电流控制电压源（Current Controlled Voltage Source, CCVS）（控制量为电流）；受控电流源有两种，电压控制电流源（Voltage Controlled Current Source, VCCS）（控制量为电压）和电流控制电流源（Current Controlled Current Source, CCCS）（控制量为电流）。

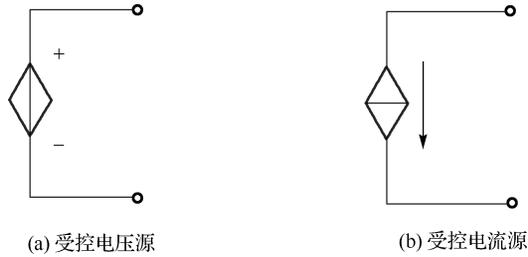


图 1.4.8 受控源的符号

如图 1.4.9 所示为 4 种理想受控源模型。所谓理想受控源，对于控制端来说，电压控制的受控源开路（电阻无穷大），电流控制的受控源短路（电阻很小），对于受控制端来说，受控电压源内阻为零，受控电流源内阻为无穷大。

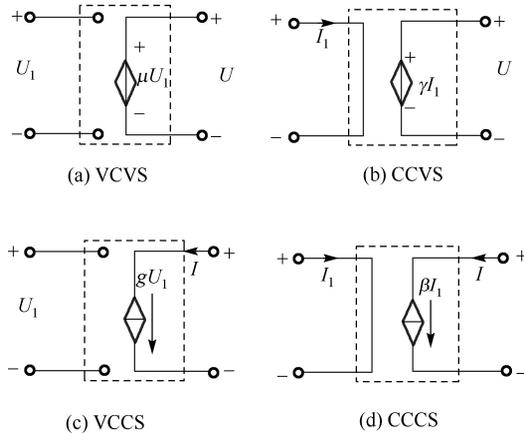


图 1.4.9 理想受控源模型

由图 1.4.9 可知，受控源的特性方程

$$\begin{aligned} \text{VCVS} \quad U &= \mu U_1 & \text{CCVS} \quad U &= \gamma I_1 \\ \text{VCCS} \quad I &= g U_1 & \text{CCCS} \quad I &= \beta I_1 \end{aligned}$$

式中， μ 为电压放大系数， γ 为转移电阻， g 为转移电导， β 为电流放大系数。当这些系数为常数时，被控制量和控制量成正比，这种受控源就是线性受控源。若这些系数不为常数，则相应的受控源是非线性元件。本书只讨论含线性受控源的电路。

受控源和独立源虽然都是电源，都能对电路提供电压或电流，但它们在电路中的作用是不同的。独立源可以独立地对外电路提供能量，作为电路的输入或激励，它为电路提供恒定的（直流）或按给定时间函数变化的（交流）电压和电流，从而在电路中产生相同的电压和电流。

受控源则不能独立地对外电路提供能量，因此，受控源又称为非独立电源。在电路中，受控源与独立源本质的区别在于受控源不是激励，它只是反映电路中某处的电压或电流控制另一处的电压或电流的关系，描述的是电路中两条支路电压和电流间的一种约束关系，它的存在可以改变电路中的电压和电流，使电路特性发生变化。

受控源的电压或电流受电路中别处电压或电流的控制，如果控制量方向或大小发生改变，受控源的电压或电流的方向或大小也要发生改变，如果电路中无独立源，则各处没有电压和电流，于是控制量为零，受控源的电压或电流也就为零。受控源反映的这种控制关系是很多电子器件在工作过程中所发生的物理现象，故很多电子器件都用受控源作为模型。如晶体管的基极电流对集电极电流的控制关系，可用一个电流控制电流源的模型来表征；如场效应晶体管的栅极电压对漏极电流的控制关系，可用一个电压控制电流源的模型来表征；一个电压放大器则可用一个电压控制电压源的模型来表征等。

练习与思考

1.4.1 在图 1.4.2(a)所示的理想电压源带负载的电路中，已知电源的电压 $U_S = 32\text{V}$ ，电源内阻 $R_0 = 2\Omega$ ，负载电阻 $R_L = 6\Omega$ ，求电路中的电流、负载上的电压和电源内阻的分压；当负载断开时，电源的端电压；当负载短路时，电源中的电流。

1.4.2 图 1.4.10 所示电路中， $I_S = 2\text{A}$ ， $R_0 = 3\Omega$ ， $R_1 = 5\Omega$ ，当开关 S 闭合后，安培表的读数将怎样改变？求闭合前后理想电流源的功率和电压。

1.4.3 图 1.4.11 所示电路中， $U_S = 10\text{V}$ ， $R_0 = 5\Omega$ ， $R = 3\Omega$ ， $R_1 = 4\Omega$ ，当开关 S 打开后，电压表的读数将怎样改变？求闭合前后理想电压源的功率和电流。

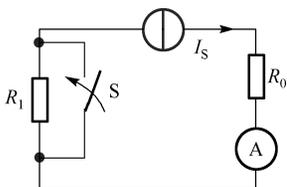


图 1.4.10 练习与思考 1.4.2 电路

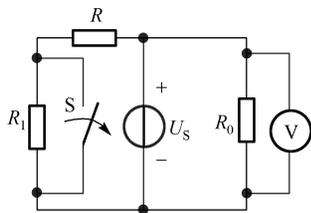


图 1.4.11 练习与思考 1.4.3 电路

1.4.4 图 1.4.12 所示电路中，一个电压为 20V 的理想电压源和一个电流为 3A 的理想电流源相连，试求两电源的功率，并讨论哪个是电源，哪个是负载。

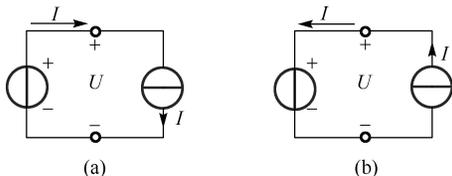


图 1.4.12 练习与思考 1.4.4 电路

1.5 基尔霍夫定律

1847 年，德国物理学家基尔霍夫阐述了复杂电路中电流和电压的关系，即基尔霍夫定律，是集中参数电路的基本定律，它包括基尔霍夫电流定律 (Kirchhoff's Current Law, KCL) 和基尔霍夫电压定

律 (Kirchhoff's Voltage Law, KVL), 基尔霍夫定律与元件的电压、电流关系 (Voltage Current Relation, VCR) 是电路分析的基础。为了便于讨论, 先介绍几个名词。

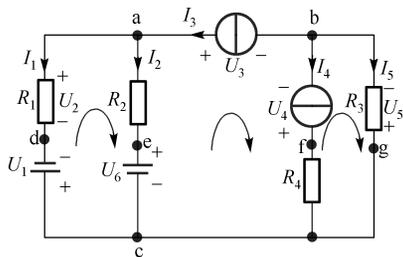
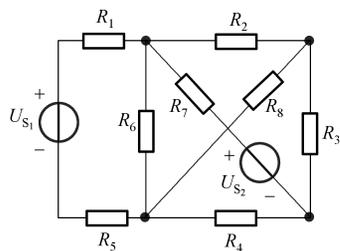


图 1.5.1 电路图举例

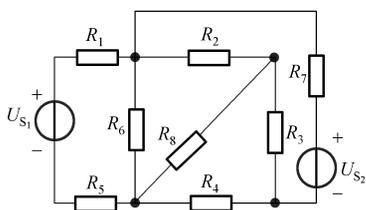
(4) 回路: 由一条或多条支路组成的闭合路径, 其中每个节点只经过一次, 这条闭合路径称为一个回路。图 1.5.1 中有 aecda、abfcea、bgcfb、abfcda、abgcea、abgcda 这 6 个回路。

(5) 网孔回路: 网孔是回路的一种, 将电路画在平面上, 在回路内部不另含有支路的回路称为网孔回路。在图 1.5.1 中有 aecda、abfcea、bgcfb 这 3 个网孔回路。

(6) 平面电路和非平面电路: 画在一个平面上没有任何两条支路交叉的电路, 叫做平面电路。如图 1.5.2(a) 所示电路有交叉重新画为图(b) 的形式, 因此图 1.5.2(a) 电路是平面电路。图 1.5.3 若把电路画在一个平面上, 怎么画都是有交叉支路, 所以是非平面电路。



(a) 平面电路



(b) 电路重画

图 1.5.2 平面电路

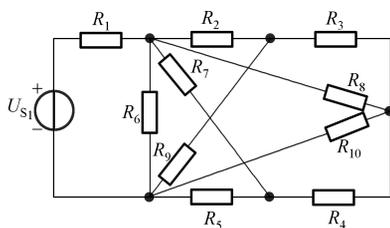


图 1.5.3 非平面电路

1.5.1 基尔霍夫电流定律

基尔霍夫电流定律是用来确定节点电流关系的定律。在电路中, 由于电流的连续性, 电路中任何一点 (包括节点) 都不能堆积电荷, 流进这点 (包括节点) 多少电荷, 必定同时从这一点 (包括节点) 流出同样多的电荷, 这一结论叫做电流连续性原理。

基尔霍夫电流定律就是电流连续性原理在电路中的体现。对电路中的任一节点, 在任一瞬间, 流进的电流之和等于流出的电流之和。例如, 图 1.5.4 电路为某电路中的节点 a, 连接在 a 的支路共有 5 条, 所选参考方向下的 5 个支路电流具有如下的关系

$$I_2 + I_5 = I_1 + I_3 + I_4$$

改写成

$$-I_1 + I_2 - I_3 - I_4 + I_5 = 0$$

即

$$\sum I = 0 \quad (1.5.1)$$

式 (1.5.1) 就是 KCL 的表达式, 其中的“ \sum ”是“求和”的意思。KCL 的内容是: 电路的任一瞬间, 各节点的电流的代数和为零。如果流进节点的电流为正, 流出就为负。反之也成立。