

第一章

电路的基本概念

本章从引入电路模型的概念出发，讨论电路分析中的基本变量。重点讲述电阻元件、独立电源和基尔霍夫定律，并阐明电路的等效变换等重要概念和有关的定律。

§ 1.1 电路模型和电路变量

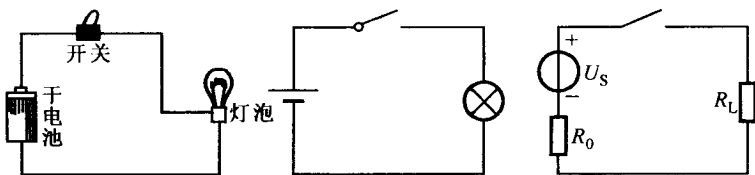
一、电路模型

各种实际电路都是由电器件（如电阻器、电容器、线圈、开关、晶体管、电源等）按一定方式相互连接组成的。实际电路的功能是多种多样的，概括地说，电路的基本功能是能量的传输和信号的处理。例如，电力系统的发电机将热能（或水位能、原子能等）转换为电能，经输电线、变压器等传送给各用电设备（如电灯、电炉，电动机等），这些设备将电能转换为光、热、机械能等。我们把供给电能的设备统称为电源，把用电设备统称为负载。电路的另一个重要作用是对信号的处理、加工，例如电视机是将接收到的高频电信号经过变换、处理（如选频、放大、解调等）将分离出的图像信号和伴音信号分别传送到显像管和扬声器。

“理想化模型”是现代自然科学和社会科学分析研究中普遍使用的重要概念。几何尺寸为零却有一定质量的质点是物理学科中的一种理想化模型。在分析实际电路的物理过程时，也需要建立反映实际电路主要物理性质的电路模型。在电路理论中，引人

一些理想化元件来构成实际电路的理想化模型。这些理想元件能够反映实际电路的主要电磁特性而忽略其次要的电磁特性：例如理想电阻元件只消耗电能，理想电容元件只储存电能，理想电感元件只储存磁能，理想电源元件表示该元件将其他形式的能量转换为电能。将这些理想元件适当地连接起来，便可构成实际电路的理想化模型。

图 1.1-1(a)所示为手电筒电路，它是由干电池、灯泡和手电筒外壳（连接导体）组成。干电池是一种电源，它将化学能转变为电能，为电路提供能量；灯泡是用电器件，它将电能转变为光能，连接导体使电流构成通路。图 1.1-1(b)为手电筒的电气原理图，它是采用图形符号表示实际电器件之间的相互连接关系的。表 1-1 列举了一些我国国家标准规定的电气图形符号。图 1.1-1(c)为手电筒的电路模型，其中电阻 R_0 为电源的内阻。



(a) 实际电路

(b) 电气图

(c) 电路模型(电路图)

图 1.1-1 手电筒电路

需要指出，一般实际电路器件在运行时，电能的消耗和电磁能的储存同时存在，且交织在一起发生在整个器件之中。所谓“理想化”指的是：假定这些现象可以分别研究，且每一种元件只表征一种电磁现象，这样的元件（电阻元件、电容元件、电感元件）称为集总参数元件，简称集总元件。由集总元件构成的电路称为集总参数电路，简称集总电路。

用集总参数电路模型近似描述实际电路是有条件的，它要求实际电路的尺寸 l （长度）要远小于电路工作时电磁波的波长 λ ，

表 1-1 部分电气图用图形符号
(根据国家标准 GB 4728)

名称	符号	名称	符号	名称	符号
导线		传声器		电阻器	
连接的导线		扬声器		可变电阻器	
接地		二极管		电容器	
接机壳		稳压二极管		电感器、绕组	
开关		隧道二极管		变压器	
熔断器		晶体管		铁心变压器	
灯		电池		直流发电机	
电压表				直流电动机	

即

$$l \ll \lambda \quad (1.1-1)$$

否则，实际电路便不能按集总参数电路模型来处理。本书只讨论集总参数电路，因此，以后将省略“集总”二字。理想电路元件也将省略“理想”二字，元件均系指理想电路元件而言。

应当注意电路元件与实际器件的区别。在一定工作条件下，各种电子设备使用的电阻器、电容器、线圈、晶体管等可用模型

表示，如前所述。但需注意对同一器件，由于工作条件不同或精度要求不同，它的模型也不相同。譬如，一个线圈可用电感元件作它的模型；在需要考虑其能量损耗时，可以用电阻元件与电感元件相串联构成的模型来描述；在高频时，需要考虑线圈之间的分布电容，这时描述该线圈的模型还应包含电容元件。图 1.1-2 表示一个线圈在不同条件下的模型。

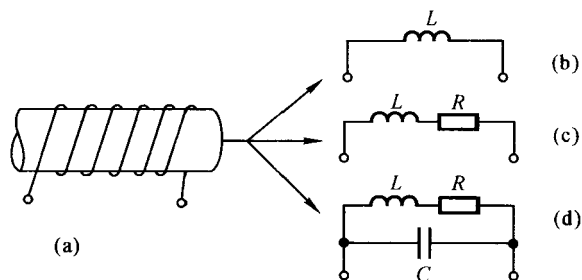


图 1.1-2 线圈在不同应用条件下的模型

根据实际电路的电特性，用各种器件的模型构成相应的电路模型称为建模。若建模恰当，则按电路模型分析计算可得到满足工程技术需要的结果。

电路理论的内容十分广泛，它是电工和电子科学技术的重要理论基础之一。在通信、控制、计算机、电力等众多的科学技术领域，广泛使用各种类型的电路；线性与非线性，时变与时不变，模拟的与数字的等等，种类繁多，功能各异。电路理论的任务是研讨各种电路共有的基本规律和基本分析方法。

本书主要讨论电路分析的基本规律和基本分析方法，为学习后续课程打下基础。

二、电流

电流是描述电路性能的基本变量之一。

带电粒子有规则的定向运动就形成电流。单位时间内通过导

体横截面的电 [荷] 量定义为电流，用符号 i 表示，即

$$i \stackrel{\text{def}}{=} \frac{dq}{dt} \quad (1.1-2)$$

称式中 q 为通过导体横截面的电 [荷] 量。若 $\frac{dq}{dt}$ 为常数，则该电流称为直流，可用大写字母 I 表示。若电 [荷] 量的单位是库 [仑] (C)^[2]，时间单位是秒 (s)，那么电流的单位是安 [培] (A)。这样，“电流”一词既代表一种物理现象，也代表一种物理量。

习惯上把正电荷运动的方向规定为电流的实际方向。在一些简单电路中，可以判断出电流的实际方向。但在较复杂的电路中，有时很难预先判断出电流的实际方向（例如图 1.1-3 所示桥形电路中流过电阻 R_5 的电流），因此，引入电流“参考方向”的概念。

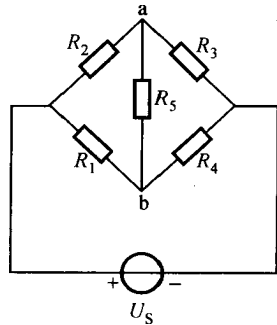


图 1.1-3 桥形电路

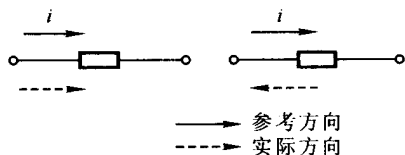
在分析电路问题时，先假设某一方向作为电流的方向，这个假设的方向称为电流的参考方向，如图 1.1-4

中实线箭头所示。如果电流的实际方向（虚线箭头）与参考方向一致，如图 1.1-4(a)所示，则电流 i 为正值 ($i > 0$)；如果电流的实际方向与参考方向相反，如图 1.1-4(b)所示，则电流 i 为负值 ($i < 0$)。这样，在电流参考方向确定的情况下，根据电流值的正或负就可以确定电流的实际方向。显然，在未指定参考方向的情况下，电流值的正或负没有任何意义。

电流的参考方向是任意假设的，一般用箭头表示在电路图上；有时也可用双下标表示，如电流 i_{ab} 表示其参考方向由 a 指

[1] 符号 $\stackrel{\text{def}}{=}$ 表示按定义等于。

[2] 本教材中各物理量均采用国际单位制。



(a) $i > 0$

(b) $i < 0$

图 1.1-4 电流的参考方向

向 b。需要指出，今后电路图中标明的电流方向均为参考方向。

测量电路中的电流时，要将电流表串接在待测电流的支路中。在直流电路中，电流的实际方向应从电流表的“+”端流入如图 1.1-5 所示，图中符号 \textcircled{A} 表示电流表。

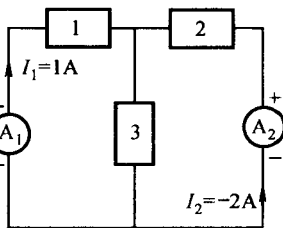


图 1.1-5 直流电流的测量

三、电压

电压是描述电路性能的另一个基本变量。

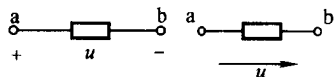
在电路中，电场力将单位正电荷从某点移动到另一点所作的功定义为该两点之间的电压，用 u 或 $u(t)$ 表示，即

$$u \stackrel{\text{def}}{=} \frac{dW}{dq} \quad (1.1-3)$$

式中 dq 为从某点移动到另一点的电量，单位为库仑 (C)；电场力所作的功为 dW ，单位是焦 [耳] (J)；电压的单位是伏 [特] (V)。

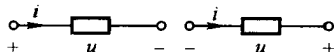
两点之间的电压也称电位差，用“+”号表示高电位端，“-”号表示低电位端。两点之间的电压实际方向一般均规定为高电位点指向低电位点的方向。与需要为电流指定参考方向一样，也需要为电压指定参考极性（也称为参考方向），如图 1.1-6(a) 所示。该电压参考极性是任意指定的。如果电压的实际极性

与参考极性一致，电压 $u > 0$ ；如果电压的实际极性与参考极性相反，电压 $u < 0$ 。电压的参考极性也可用箭头表示，如图 1.1-6(b)所示，箭头由“+”极指向“-”极；也可用双下标表示，如 u_{ab} 表示 a 点为参考极性的“+”极，b 点为“-”极。同样，今后电路图上标明的电压极性均为参考极性。



(a) (b)

图 1.1-6 电压的参考极性



(a) (b)

图 1.1-7 关联与非关联参考方向

显然，对一段电路或一个电路元件而言，需要同时标明电流的参考方向和电压的参考极性，它们可以分别独立地指定。但为了方便，常常采用关联参考方向，即电流的参考方向与电压的参考极性方向（由“+”极指向“-”极）一致，如图 1.1-7(a)所示。这时在电路图上只需标明电流参考方向或电压参考极性中的任何一种即可。若电流的参考方向与电压的参考极性相反，称为非关联参考方向，如图 1.1-7(b)所示。

在电路分析中，可以任意假设电路中的某一结点的电位为零，该结点称为参考点。在电力工程中，常选大地为参考点；在电子线路中，常选与金属外壳相连接的公共导线作为参考点，称为地线。元件的一端若与地线相接，称为接地。图 1.1-8(a)表示接地符号，图 (b) 的电路中 5 V 电压源的“-”极接地。电路中其他各结点对参考点的电压称为各结点的电位（或结点电压），即某点的电位就是将单位正电荷从该点移动到参考点电场力所作的功。

今后，在任意瞬间 t 的电流、电压分别用 $i(t)$ ， $u(t)$ 表示，也常简写为 i ， u 。与直流电流类似，如果电压的大小和方向都不随时间变化，则称为直流电压，可用大写字母 U 表示。用符

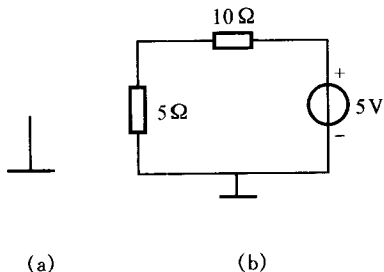


图 1.1-8 接地符号

号 v 或 V (直流) 表示电位, 例如 a 点的电位用 v_a 或 V_a (直流) 表示。

测量电路中的电压, 需要将电压表并接在被测元件两端, 如图 1.1-9 所示, 图中 V 表示电压表。测量中应注意电压表的“+”极与被测电压实际极性的高电位端相连接, “-”极接被测电压实际极性的低电位端。

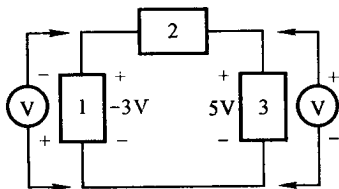


图 1.1-9 电压的测量

例 1.1-1 如图 1.1-10 所示电路, 若已知 2 s 内有 6 C 正电荷均匀地由 a 点经 b 点移动至 c 点, 且已知由 a 点移动至 b 点电场力做功为 12 J , 由 b 点移动到 c 点电场力做功为 6 J 。

(1) 标出电路中电流的参考方向并求出其值, 若以 b 点作为参考点, 如图 (a) 所示, 求 a, b, c 各点的电位 V_a, V_b, V_c 和电压 U_{ab}, U_{bc} 。

(2) 假设电流的参考方向与 (1) 相反, 并求出其值。若以 c

点作为参考点，如图 (b) 所示，再求电位 V_a 、 V_b 、 V_c 和电压 U_{ab} 、 U_{bc} 。

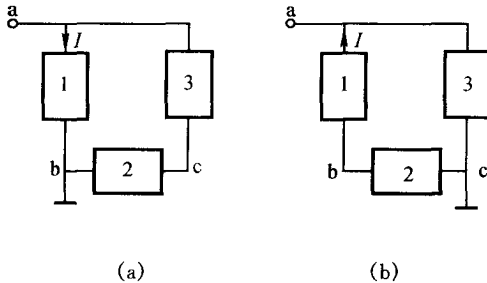


图 1.1-10 例 1.1-1 用图

解 (1) 设电流的参考方向如图 (a) 所示。由于电流的参考方向与正电荷的运动方向一致，即电流的参考方向与实际方向相同，故

$$I = \frac{q}{t} = \frac{6}{2} \text{ A} = 3 \text{ A}$$

根据电位的定义，得：

$$V_a = \frac{w_{ab}}{q} = \frac{12}{6} \text{ V} = 2 \text{ V}$$

$$V_b = 0$$

由题意可知，6 C 的正电荷由 b 移动到 c 电场力做功为 6 J，那么 6 C 的正电荷由 c 移动到 b 要由外力克服电场力做功，或者说电场力做功为 -6 J，即

$$V_c = \frac{w_{cb}}{q} = -\frac{w_{bc}}{q} = -\frac{6}{6} \text{ V} = -1 \text{ V}$$

由于电压等于两点电位之差，故：

$$U_{ab} = V_a - V_b = 2 \text{ V}$$

$$U_{bc} = V_b - V_c = 1 \text{ V}$$

(2) 设电流的参考方向如图 (b) 所示，结点 c 为参考点。由于电流的实际方向与参考方向相反，故

$$I = -\frac{q}{t} = -\frac{6}{2} \text{ A} = -3 \text{ A}$$

各点的电位分别为：

$$V_a = \frac{w_{ac}}{q} = \frac{12+6}{6} \text{ V} = 3 \text{ V}$$

$$V_b = \frac{w_{bc}}{q} = \frac{6}{6} \text{ V} = 1 \text{ V}$$

$$V_c = 0 \text{ V}$$

各电压分别为：

$$U_{ab} = V_a - V_b = (3 - 1) \text{ V} = 2 \text{ V}$$

$$U_{bc} = V_b - V_c = (1 - 0) \text{ V} = 1 \text{ V}$$

从例 1.1-1 可以看出，在同一电路中，若选择不同的结点作为参考点，则各结点的电位将发生变化，但电路中任意两点之间的电压是不变的。因此，若单位正电荷由 a 点经 b 点移动到 c 点，电场力所作的功等于单位正电荷由 a 点经电路元件 3 移动到 c 点电场力所作的功。这是因为静电场是位场，电场力做功的大小仅与电荷的起、止位置有关，而与电荷运动的路径无关。

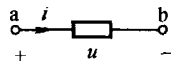
四、电功率

单位时间内作功的大小称为功率。假设在 dt 时间内电场力所作的功为 $d\omega$ ，则功率可表示为

$$p = \frac{d\omega}{dt} \quad (1.1-4)$$

在分析电路问题时，人们更关注的是功率与电流、电压之间的关系。当正电荷经电路元件由高电位处移动到低电位处，电路元件吸收功率，将电能转换为其他形式的能量，如热能、光能、机械能等；若正电荷从电路元件的低电位移动到高电位，则必须由外力（化学力，电磁力等）作功，电荷获得能量，这时电路元件供出功率。若电路元件两端电压 u 与流过的电流 i 采用关联参

考方向，如图 1.1-11 所示，在 dt 时间内流过该元件的正电荷量为 dq ，根据电压的定义式 (1.1-3)，电场力做功为



$$dw = u dq \quad (1.1-5)$$

这时该电路元件吸收功率。将 $dq = i dt$ 代入式 (1.1-5)，得

$$dw = u i dt \quad (1.1-6)$$

上式为 dt 时间内该电路元件吸收的能量。根据功率的定义式 (1.1-4)，得该电路元件吸收的功率为

$$p = \frac{dw}{dt} = ui \quad (1.1-7)$$

在国际单位制中，电压的单位为伏特 (V)，电流的单位为安培 (A)，则功率的单位为瓦特 (W)，简称瓦。需要注意的是：式 (1.1-7) 是在电压、电流采用关联参考方向条件下推得的。如果 $p > 0$ ，表示该电路元件吸收功率；如果 $p < 0$ ，表示该电路元件吸收功率为负值，即该电路元件实际上是供出功率。例如图 1.1-11 所示电路，若电流 $i = -1$ A，电压 $u = 5$ V，那么该电路元件吸收功率为 $p = ui = 5 \times (-1) \text{ W} = -5 \text{ W}$ ，或者说该电路元件供出功率为 5 W。

若电路元件两端的电压 u 与流过的电流 i 为非关联参考方向，此时该电路元件供出的功率为

$$p = ui \quad (1.1-8)$$

若 $p > 0$ ，则该电路元件为供出功率；若 $p < 0$ ，则该电路元件吸收功率。在直流电路中，功率也可用大写字母 P 表示。

在电压、电流采用关联参考方向情况下，从 t_0 到 t 时刻内该电路元件吸收的能量为

$$W = \int_{t_0}^t p(\zeta) d\zeta = \int_{t_0}^t u(\zeta) i(\zeta) d\zeta \quad (1.1-9)$$

在国际单位制中，能量的单位是焦 [耳] (J)。

例 1.1-2 图 1.1-12 所示电路，已知电流 $I=2\text{ A}$ ，电压 $U_1=2\text{ V}$ ， $U_2=-4\text{ V}$ ， $U_3=6\text{ V}$ 。求电路中各元件吸收的功率。

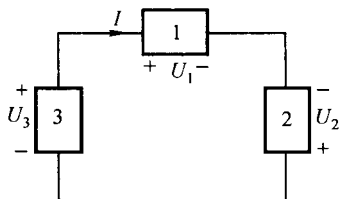


图 1.1-12 例 1.1-2 图

解 电路元件 1 的电压 U_1 与电流 I 为关联参考方向，其吸收功率为

$$P_1 = U_1 I = 2 \times 2\text{ W} = 4\text{ W}$$

电路元件 2 和 3 的电压、电流均为非关联参考方向，其供出功率分别为：

$$P_2 = U_2 I = (-4) \times 2\text{ W} = -8\text{ W}$$

$$P_3 = U_3 I = 6 \times 2\text{ W} = 12\text{ W}$$

电路元件 2 实际吸收功率 8 W。

以上阐述了电路分析中常用的电流、电压和功率的基本概念。由于这些物理量可以取不同的时间函数，故又称它们为变量。这里需要强调指出：今后电路中标明的电流和电压的方向均为参考方向。

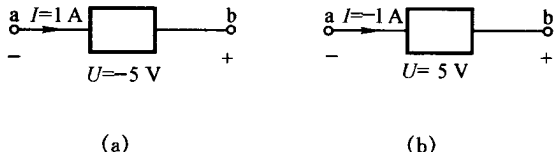
最后，简要介绍一下有关单位制的问题。前面已经介绍了电流、电压和功率的 SI 单位为 A，V 和 W，在实际应用中，这些单位有时嫌小，有时又嫌太大，使用不便。所以常常在这些单位前加上表 1-2 所示词头，用以表示这些单位被一个以 10 为底的正次幂或负次幂相乘后得到的辅助单位。如 $1\ \mu\text{A} = 1 \times 10^{-6}\text{ A}$ ， $2\ \text{kV} = 2 \times 10^3\text{ V}$ ， $1\ \text{GW} = 1 \times 10^9\text{ W}$ 等。

表 1-2 部分 SI 词头

因 数	词 头 名 称		符 号
	英 文	中 文	
10^9	giga	吉[咖]	G
10^6	mega	兆	M
10^3	kilo	千	k
10^{-3}	milli	毫	m
10^{-6}	micro	微	μ
10^{-9}	nano	纳[诺]	n
10^{-12}	pico	皮[可]	p

思考与练习

1.1-1 试确定图示电路中的电压、电流是否采用关联参考方向？判断每个电路中的电压、电流的实际方向。



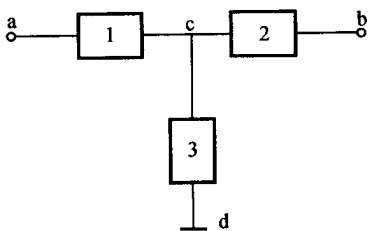
练习题 1.1-1 图

1.1-2 已知图示电路中各点的电位分别为 $V_a = 10 \text{ V}$, $V_b = 6 \text{ V}$, $V_c = 15 \text{ V}$ 。

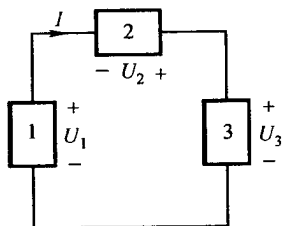
- (1) 若参考点选择在结点 c 处，试求结点电位 V_a , V_b 和 V_d 。
- (2) 分别求出选择 c, d 结点作为参考点时的电压 U_{ab} , U_{cb} 和 U_{cd} 。

1.1-3 图示电路中各方框代表电路元件。已知电流 $I = 2 \text{ A}$ ，各元件电压分别为 $U_1 = 10 \text{ V}$, $U_2 = -15 \text{ V}$, $U_3 = -5 \text{ V}$ 。

- (1) 试求各电路元件吸收的功率；
- (2) 若要测量电流 I 和电压 U_3 ，应如何接入电流表和电压表？



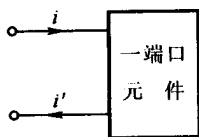
练习题 1.1-2 图



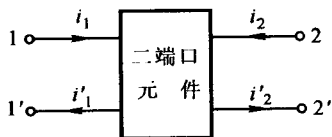
练习题 1.1-3 图

§ 1.2 电阻元件

电路元件是通过端子与外部相连接的，根据端子的数目可分为二端、三端、四端元件等。在集总假设条件下，通常只关心元件端子上的特性（称为外部特性），而不关注其内部情况。假如流入二端元件某端子的电流 i 等于从另一端子流出的电流 i' ，如图 1.2-1(a) 所示，则称这一对端子为端口（或简称口），该条件（即 $i' = i$ ）也称为端口条件。这样，二端元件也可称为一端口元件，端口的电压和电流称为端电压和端电流。相应地，对图 1.2-1(b) 所示四端元件，若端电流满足 $i'_1 = i_1$ ， $i'_2 = i_2$ ，则该四端元件称为二端口元件。如果图 1.2-1 的方框中是电路，则相应地称为一端口电路、二端口电路。



(a)



(b)

图 1.2-1 一端口和二端口元件

一、电阻元件

一个二端元件，如果在任何时刻它两端的电压与流经它的电流成正比，则称其为线性电阻元件。线性电阻元件的符号如图 1.2-2(a) 所示。在采用关联参考方向的条件下，其电压与电流的关系为

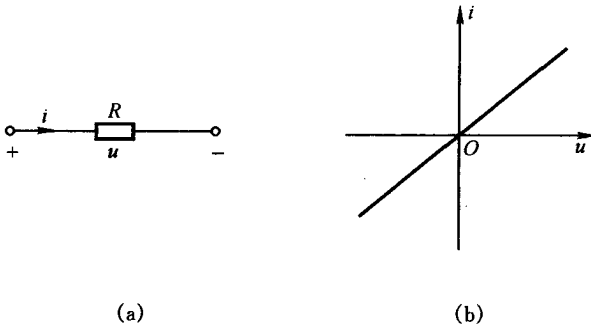


图 1.2-2 线性电阻的符号及其电压电流关系曲线

$$u = Ri \quad (1.2-1)$$

上式即为欧姆定律，式中 R 为元件的电阻，其单位为欧 [姆] (Ω)。这样电阻这一名词，不仅是指电阻元件，而且也指电阻元件的参数。如果以电压 u 为横坐标（或纵坐标），电流 i 为纵坐标（或横坐标），画出电压与电流的关系曲线，则该曲线称为元件的电压电流关系曲线（习惯上常称为伏安特性曲线）。线性电阻元件的电压电流关系曲线是在 $i-u$ （或 $u-i$ ）平面上通过坐标原点的直线，如图 1.2-2(b) 所示。

电阻的倒数称为电导，用符号 G 表示，即

$$G = \frac{1}{R} \quad (1.2-2)$$

电导的单位是西 [门子] (S)。将式 (1.2-1) 可写为

$$i = Gu \quad (1.2-3)$$

上式为欧姆定律的另一种表示形式，电导 G 即为图 1.2-2(b)

所示电阻元件电压电流关系曲线的斜率。

需要指出，式 1.2-1)和(1.2-3)所表示的欧姆定律，是在电阻元件两端的电压与流经它的电流采用关联参考方向前提下得出的。若采用非关联参考方向，则欧姆定律的表示式应改为：

$$u = - Ri \quad (1.2-4)$$

$$i = - Gu \quad (1.2-5)$$

如果电阻元件的电压电流关系曲线不是 $i - u$ (或 $u - i$)平面上通过原点的直线，如图 1.2-3 所示，则称其为非线性电阻元件。如果电阻元件的电压电流关系曲线不随时间改变，则称其为时不变电阻，否则称为时变电阻。

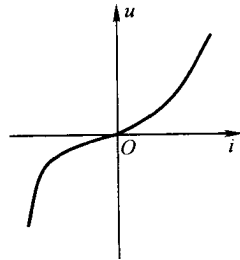


图 1.2-3 非线性电阻元件的电压电流关系曲线

由式 1.2-1)和(1.2-3)可见，若电阻 R 确定， t 时刻的电压（或电流）只取决于同一时刻的电流（或电压），故电阻元件称为即时元件，或无记忆元件。

线性电阻元件有两种特殊情况——开路和短路。

一个二端元件（或电路），无论其端电压为何值，其端电流恒为零，即其端口电压电流关系（VCR）^[1]为

$$\left. \begin{aligned} u(t) &= \text{任意值} \\ i(t) &= 0 \end{aligned} \right\} \forall t^{[2]} \quad (1.2-6)$$

其电压电流关系曲线是与电压轴相重合的直线，如图 1.2-4(a)所示，称为开路。二端元件开路时，相当于 $R = \infty$ 或 $G = 0$ 。

一个二端元件（或电路），无论其电流为何值，其端电压恒为零，即其端口电压电流关系为

[1] VCR 为 Voltage Current Relation的缩写。

[2] \forall 为全称量词。

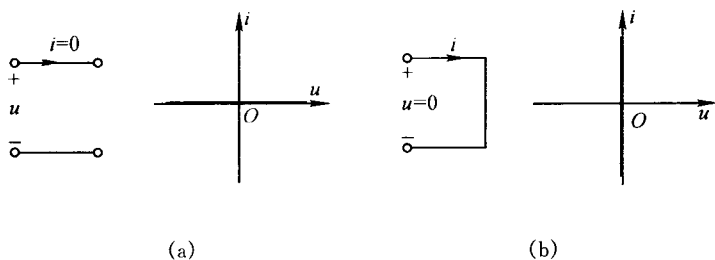


图 1.2-4 开路特性和短路特性

$$\left. \begin{aligned} u(t) &= 0 \\ i(t) &= \text{任意值} \end{aligned} \right\} \forall t \quad (1.2-7)$$

其电压电流关系曲线是与电流轴相重合的直线，如图 1.2-4(b) 所示，称为短路。二端元件短路时，相当于 $R=0$ 或 $G=\infty$ 。

二、电阻元件的功率

电阻是消耗电能的元件，它将电能转换为热能。将式 (1.2-1) 代入到计算电路元件功率的表示式 (1.1-7)，可得电阻 R 吸收的功率为

$$p = Ri^2 = \frac{u^2}{R} = Gu^2 = \frac{i^2}{G} \quad (1.2-8)$$

上式是计算电阻元件功率的表示式。

由式 (1.1-9) 可知，从 $-\infty$ 直到 t 时刻，电阻元件吸收的能量为

$$W = \int_{-\infty}^t p(\zeta) d\zeta = R \int_{-\infty}^t i^2(\zeta) d\zeta = G \int_{-\infty}^t u^2(\zeta) d\zeta \quad (1.2-9)$$

在电子设备中常用的金属膜电阻、线绕电阻和碳膜电阻等在一定的条件可近似地看作线性电阻，其阻值为正实常数，即 $R>0, G>0$ 。因此，由式 (1.2-8) 和 (1.2-9) 可得

$$\left. \begin{aligned} p(t) &\geq 0 \\ W(t) &\geq 0 \end{aligned} \right\} \forall t \quad (1.2-10)$$