

第2章 电路元件、电路变量和电路定律

【内容提要】 本章介绍电路的基本变量及电压、电流参考方向的概念,功率的计算方法,电阻、独立电源和受控电源等电路元件及基尔霍夫定律。

集总参数电路的各支路电压和支路电流既要受到元件特性造成的约束——元件约束,又要受到由基尔霍夫定律体现出来的结构约束——拓扑约束。两种约束关系是编写电路方程的基本依据。只有深刻理解和掌握两种约束关系,才会正确编写方程和求解响应。

引例 用电安全和静电危害

对人体造成电击伤害的原因主要是取决于电压还是电流呢?如图2-1所示“高压危险!”这种常见的警告容易给人们造成误解:似乎是否造成伤害及伤害的程度完全取决于电压的大小。

我们会经常遭遇静电电击。最常见的产生静电的情况是干燥气候下的摩擦起电。例如我们穿的化纤衣服,在黑暗中可见电火花并听到放电声。就连没有通电的高压线,也会因为风吹使其带上静电。当我们无意碰到带静电的门把手或化纤制品时,就会遭遇静电电击,但并没有受到伤害。然而,产生这类电击的静电电压却比能够引起伤害的电压高数百甚至上千倍。这是为什么呢?

事实上,电击对人体的危害程度,主要取决于通过人体电流的大小和通电时间长短。通常情况下,物体的静电电压虽然很高,但所带的电荷量却并不多,不会形成大的电流,也就不会对人体造成伤害。但是在某些情况下,静电产生的危害是不容忽视的。例如,人体自身有时所带静电的电压可以达到几百甚至上千伏,若不经放电而去触摸集成电路(CMOS)就有可能造成击穿损坏;行驶的油罐车若不采取中和静电措施就会发生火灾;而雷电是另一种大规模静电放电现象,其放电电流一般可达几十千安,极少情况下可达200千安,具有极大的危害。

确定一个电源是否存在危险电流,以及在什么条件下会存在潜在的危险电流,是非常困难的,这需要懂得一些电气知识,如:电压和电流如何产生,如何度量以及它们之间有何关系;如何确定复杂电路中的电压与电流值;电路中的电现象符合什么规律,如何借助这些规律对电路进行分析和计算;等等。

2.1 电路分析中的基本变量

电流、电压、电荷、磁链、功率和能量是描述电路工作状态和元件工作特性的6个变量,它们一般都是时间的函数。其中电流和电压是电路分析中最常用的2个基本变量,本节着重讨论电流、电压的参考方向问题,以及如何用电流、电压表示电路的功率和能量。

1. 电流及其参考方向

电子和质子都是带电的粒子,电子带负电荷,质子带正电荷。所带电荷的多少叫做电量,



图2-1 用电安全标志

在国际单位制(SI)中,电量的单位是库仑(符号是C, 6.24×10^{18} 个电子所具有电量等于1库仑)。带电粒子的定向运动形成电流,为了表征和描述电流的大小,我们把单位时间内通过导体横截面的电量定义为电流,用符号 $i(t)$ ^①表示,即

$$i(t) = \frac{dq(t)}{dt} \quad (2-1)$$

习惯上把正电荷运动的方向规定为电流的方向。

如果电流的大小和方向都不随时间改变,这种电流称为恒定电流,简称直流,一般用大写字母 I 表示,但通常为了方便起见,也用小写字母 i 表示。在这种情况下,通过导体横截面的电荷量与时间成正比,即

$$i = I = q/t = \text{常数} \quad (2-2)$$

在国际单位制中,电流的单位为安培(简称“安”,符号为A,1安=1库/秒,即1A=1C/s)。在通信和计算机技术中常用毫安(mA)、微安(μA)作为电流单位。它们的关系是

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

电流是一个有方向的物理量,在电路分析中,电流的大小和方向是描述电流变量不可缺少的两个方面。但是对于一个给定的电路,要直接给出某一电路元件中电流的真实方向是十分困难的,如交流电路中电流的真实方向经常在改变,即使在直流电路中,要指出复杂电路中某一电路元件电流的真实方向也不是一件容易的事。在进行电路分析时,为了编写电路方程的需要,我们常常需要预先假设一个电流方向,这个预先假设的电流方向叫做参考方向。如图2-2所示,箭头所表示的方向即电流 i 的参考方向。电流的参考方向可以任意选定,但一经选定,就不再改变。经过计算若求得 $i > 0$,则表示真实方向和参考方向一致; $i < 0$ 则表示真实方向和参考方向相反。

如图2-2所示,当 $i = 5 \text{ A}$ 时,表示电流的真实方向为 $a \rightarrow b$;
当 $i = -5 \text{ A}$ 时,表示电流的真实方向为 $b \rightarrow a$ 。

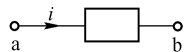


图2-2 电流的参考方向

在进行电路分析时,必须先标出电流的参考方向,方能正确进行方程的编写和求解,题目中给出的电流方向均是参考方向。

只有规定了参考方向,电流的正负值才有意义,离开参考方向谈电流的正负值是无意义的。

2. 电压及其参考方向

电荷在电路中流动,就必然和电路元件进行能量交换,电荷在电路的某些部件(如电源处)获得能量,而在某些部件(如电阻元件处)失去能量。为描述和表征电荷与元件间交换能量的规模、大小,引入“电压”这一物理量。

单位电荷由 a 点移到 b 点,失去或得到的能量(电场力所做的功)称为 a, b 两点间的电位差,即 a, b 间的电压,即

$$u(t) = \frac{dw(t)}{dq} \quad (2-3)$$

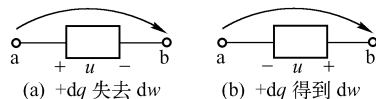


图2-3 电压的定义

电压也是一个有方向的物理量。我们规定: dq 正电荷由 a 移到 b ,若失去 dw 的能量(电场力做正功),则 a 高 b 低,即 a 端为正, b 端为负,如图2-3(a)所示。反之, dq 正电荷由 a 移到 b ,若得到 dw 的能量,则 a 低 b 高,即 a 端为负, b 端为正,如图2-3(b)所示。

^① 本书通常把 $i(t), u(t), p(t)$ 等简写为 i, u, p 等。

习惯上把电位降落的方向(从高电位指向低电位)规定为电压的方向。通常电压的高电位端标为“+”极,低电位端标为“-”极。

如果电压的大小和方向都不随时间改变,则这种电压称为恒定电压或直流电压,一般用大写字母 U 表示,同样为了方便,也用小写字母 u 表示。在这种情况下,电场力所做的功(交换的能量)与电荷量成正比,即

$$u = U = w/q = \text{常数} \quad (2-4)$$

在国际单位制中,电压的单位为伏特(简称“伏”,符号为 V,1 伏 = 1 焦耳/库,即 $1 \text{ V} = 1 \text{ J/C}$)。

同电流一样,为编写电路方程的需要,引入参考方向——预先假设的电压方向(也称参考极性)。

同样,若求解得到的 $u > 0$,则表示真实方向和参考方向相同;若求解得到的 $u < 0$,则表示真实方向和参考方向相反。

在求解电路时,对一个二端元件而言,即要标注电流的参考方向,又要标注电压的参考方向,常显得较为烦琐。为方便起见,我们常常采用关联的参考方向,如图 2-4 所示,即沿着电流的参考方向就是电压从正到负的方向,即电流指向电压降的方向。本书中若无特别说明,均采用关联参考方向,这样在电路就只需标出电流的参考方向或电压的参考极性,如图 2-5 所示。

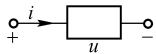


图 2-4 关联参考方向

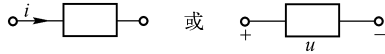


图 2-5 图 2-3 简化

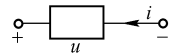


图 2-6 非关联参考方向

与关联参考方向相反的是非关联参考方向,如图 2-6 所示,此时电流指向元件电压升的方向。

对独立电源,我们常习惯采用非关联的参考方向。本书中所推导的公式皆是在 u, i 关联条件下获得的,在今后的计算中,若采用非关联方向,公式中差一个“-”号。需要特别注意的是:电压 u 和电流 i 是关联还是非关联与研究对象有关,计算对象不同,会得到不同结论。

3. 功率

电路的基本功能之一是实现能量传输。为了描述和表征电荷和元件交换能量的快慢(速率),引入功率这个物理量。

单位时间内,电荷失去或得到的能量称为功率,用 p 表示,即

$$p(t) = \frac{dw(t)}{dt} \quad (2-5)$$

由式(2-1)和式(2-3),得

$$p = \frac{dw}{dt} = \frac{dw}{dq} \cdot \frac{dq}{dt} = u(t) \cdot i(t) \quad (2-6)$$

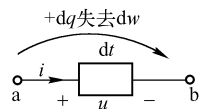


图 2-7 二端元件的功率

对图 2-7 所示的二端元件,可用式(2-6)计算元件吸收的功率。若求出的功率值为正值,表示该二端元件吸收了功率;若求出的功率为负值,表示该二端元件提供了功率。

若二端元件的电压、电流采用图 2-6 所示的非关联参考方向,可把电压或电流视为关联参考方向时的负值,故功率的计算公式应改写为

$$p = -u(t)i(t) \quad (2-7)$$

根据电压、电流是否为关联参考方向,可分别选用相应的功率计算公式,即式(2-6)或式(2-7),若计算出的功率为正值,均表示吸收了功率;若计算出功率为负值,均表示提供了功率。

功率的计算式,即式(2-6)或式(2-7),与元件的性质(线性或非线性、时变或非时变)和类型(电阻、电容、电感、独立电源)无关,因为在推导过程中并未涉及元件的类型和性质。

若二端电路为直流电路,则电路吸收的功率不随时间改变,式(2-6)和式(2-7)可分别改写为

$$p = ui = UI \quad (2-8)$$

$$p = -ui = -UI \quad (2-9)$$

在国际单位制中,功率的单位是瓦特(简称“瓦”,符号为 W,1 瓦 = 1 焦耳/秒 = 1 伏·安,即 $1 \text{ W} = 1 \text{ J/s} = 1 \text{ VA}$)。

【例 2-1】 电路如图 2-8 所示,已知电流 $i = 1 \text{ A}$, $u_1 = 3 \text{ V}$, $u_2 = 7 \text{ V}$, $u_3 = 10 \text{ V}$,求 ab, bc, ca 三部分电路吸收的功率 p_1, p_2, p_3 。

解: $p_1 = u_1 i = 3 \times 1 = 3 \text{ W}$

$p_2 = u_2 i = 7 \times 1 = 7 \text{ W}$

$p_3 = -u_3 i = -10 \times 1 = -10 \text{ W}$

$p_1 + p_2 + p_3 = 0$

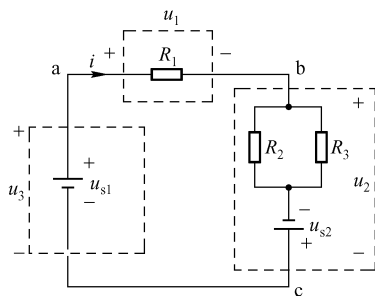


图 2-8 例 2-1 图

思考与练习

2.1-1 为何要对电路中的电流、电压设定参考方向?

2.1-2 什么叫做关联参考方向和非关联参考方向?在 u, i 参考方向关联和非关联条件下,你能总结出计算元件产生(释放)功率的公式吗?(将之与吸收功率公式进行比较)

2.1-3 试判断下列说法是否正确。

(1) 对图示电路所设的电压、电流参考方向是关联的。

(2) 对图示电路所设的电压、电流参考方向是非关联的。

(3) 对图示电路所设的电压、电流参考方向针对于 A 来说是非关联的;对于 B 却是关联的。

(4) 电路中两点间的电压等于该两点间的电位差。因电位是随参考点而改变的,所以两点间的电压亦随参考点不同而改变。

(5) 电路中某点的电位虽然随参考点而改变,但两点间的电位差是不随参考点变化而变化的,因此两点间电压是确定值。

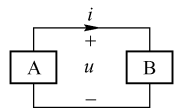
[答案:(3)(5)正确]

2.1-4 若图示元件 A 提供的功率为 5 W,则电流 i 为

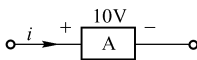
(1) 2 A (2) -2 A (3) 0.5 A (4) -0.5 A

[答案:(4)]

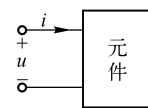
2.1-5 图中元件的端电流为 $i = \begin{cases} 0 \text{ A}, & t < 0 \\ 20e^{-500t} \text{ A}, & t \geq 0 \end{cases}$,试求进入元件上端的全部电荷。 [答案:0.04C]



练习题 2.1-3 图



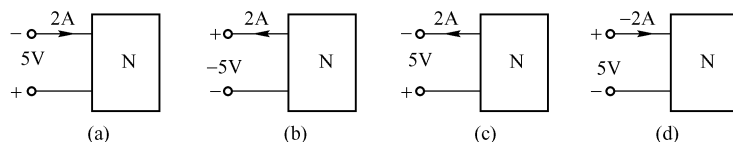
练习题 2.1-4 图



练习题 2.1-5 图

2.1-6 试求图示各网络吸收的功率。

[答案:(a) -10 W (b) 10 W (c) 10 W (d) -10 W]



练习题 2.1-6 图

2.2 基尔霍夫定律

集总参数电路由集总元件相互连接而成,在阐述拓扑约束关系的基尔霍夫定律之前,有必要介绍支路、节点、回路和网孔等概念。

支路: 电路中一个二端元件称为一条支路。

节点: 电路中 2 条或 2 条以上支路的连接点称为节点。如图 2-9 所示电路共有 6 条支路,4 个节点。注意 b, c 是同一个节点。

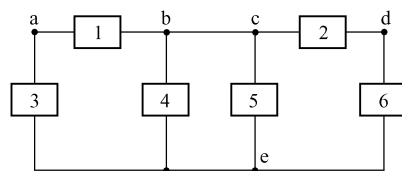


图 2-9 说明支路、节点的电路图

为了方便,也可以把几个串联元件合并在一起定义为一条支路,把几个并联元件合并在一起定义为一条支路;把 3 条或 3 条以上这样支路的连接点定义为节点。按此定义,图 2-9 中只有 3 条支路(1-3,4-5,2-6), 2 个节点(b 或 c, e), 而 a 和 d 就不再是节点。

回路: 电路中任一闭合路径称为回路。如图 2-9 所示电路,共有 6 个回路,元件 1, 3, 4 和元件 1, 3, 6, 2 均构成回路。

网孔: 在平面电路中,内部不含支路的回路称为网孔,如图 2-9 所示共有 3 个网孔。例如,元件 1, 3, 4 构成的回路是网孔,而元件 1, 2, 6, 3 构成的回路就不是网孔,因为内部含有支路 4, 5。

电路的性能取决于本身的几何结构和元件特性,而与支路在空间的位置无关。电路一经给定,各支路电压、支路电流必然受到两种约束。一是元件本身特性对本支路电压和电流的约束,如线性电阻元件的电压和电流必定满足欧姆定律,两者不能同时自由选择,这类约束与电路结构无关,称为元件的伏安关系(VAR)约束,简称元件约束。二是元件连接方式、电路结构给各支路电流和支路电压带来的约束,这类约束与元件性质无关,称为拓扑约束。描述这类约束关系的就是基尔霍夫定律。上述两类约束关系是编写电路方程的基本依据。

1. 基尔霍夫电流定律(KCL)

基尔霍夫电流定律反映了集总参数电路任一节点上的各支路电流的相互约束关系。其表述为:在集总参数电路中,任一时刻流入任一节点的所有支路电流的代数和等于零。

如图 2-10(a) 所示,有

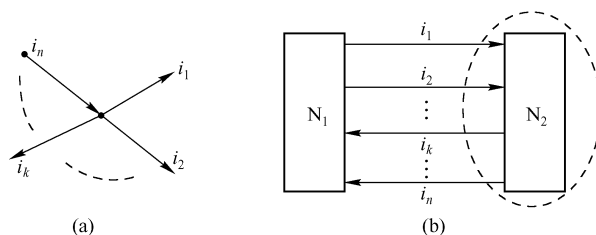


图 2-10 KCL 用图

$$\sum_{k=1}^n i_k = 0 \quad (2-10)$$

KCL 给节点上的支路电流加了一个线性的代数约束关系,它表明各支路电流并不是相互独立的,在与节点连接的 n 条支路中,若知道了其中任意 $n-1$ 条支路电流的大小和方向,则第 n 条支路电流就可由 KCL 求得。KCL 实质上是电荷守恒定律在集总参数电路节点上的一种体现(节点上既不会有电荷的堆积,也不会有新的电荷产生)。可以将 KCL 从节点推广到任意闭合曲面上,如图 2-10(b) 所示,该闭合曲面可看成广义节点。此时,式(2-10)同样成立。

在编写 KCL 方程时,若以流出节点的电流为正,则流入节点的电流就为负;反之,若以流入节点的电流为正,则流出节点的电流就为负。值得注意的是,KCL 方程是以电流参考方向为依据编写的。因此,在 KCL 方程中存在两套符号:其一是方程每项电流系数的正负号(由电流参考方向是流入还是流出节点决定),其二是电流本身的正负号(由电流参考方向是否与真实方向一致决定)。

【例 2-2】 如图 2-11 所示电路,已知 $i_1 = 4 \text{ A}$, $i_2 = 7 \text{ A}$, $i_4 = 10 \text{ A}$, $i_5 = -2 \text{ A}$,求 i_3, i_6 。

解:对节点②有 $-i_1 + i_2 - i_3 = 0$

$$i_3 = -i_1 + i_2 = -4 + 7 = 3 \text{ A}$$

对节点①有

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

$$i_6 = i_4 - i_3 - i_5 = 10 - 3 - (-2) = 9 \text{ A}$$

若作闭合曲面 S ,有

$$-i_1 + i_2 - i_4 + i_5 + i_6 = 0$$

$$i_6 = i_1 - i_2 + i_4 - i_5 = 4 - 7 + 10 - (-2) = 9 \text{ A}$$

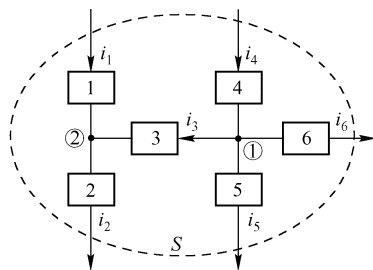


图 2-11 例 2-2 图

2. 基尔霍夫电压定律 (KVL)

基尔霍夫电压定律反映了集总参数电路任一回路中各支路电压的相互约束关系。其表述为:在集总参数电路中,任一时间沿任一回路的所有支路电压降的代数和等于零。

如图 2-12 所示,其数学表达式为

$$\sum_{k=1}^n u_k = 0 \quad (2-11)$$

KVL 是回路中各支路电压间的线性代数约束关系,对任意由 n 条支路构成的回路,若知道了其中 $n-1$ 条支路电压的大小和极性,则第 n 条支路电压就可由 KVL 求得,回路中的支路电压并不相互独立。

KVL 实质上是能量守恒定律在集总参数电路中的一种体现(dq 的电荷沿闭合路径绕行一周,电荷本身既没有产生能量,也没有吸收能量)。

在编写 KVL 方程时,相对于绕行方向,若以支路电压降为正,则升就为负;反之,若以支路电压升为正,则降就为负。同样需要注意的是,KVL 方程也是以电压参考方向为依据编写的。因此,在 KVL 方程中也存在两套符号:其一是方程每项电压系数的正负号(由电压参考方向是降还是升决定),其二是电压本身的正负号(由电压参考极性是否与真实极性一致决定)。如图 2-13 所

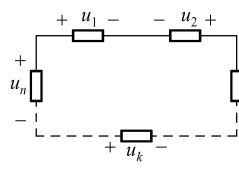


图 2-12 KVL 用图

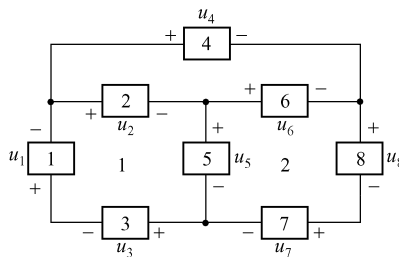


图 2-13 计算两点间电压示意图

示电路,对回路 1 和 2 列 KVL 分别得

$$\begin{aligned} u_1 + u_2 + u_5 + u_3 &= 0 & \text{即} & & u_5 &= -u_1 - u_2 - u_3 \\ u_6 + u_8 + u_7 - u_5 &= 0 & & & u_5 &= +u_6 + u_8 + u_7 \end{aligned}$$

可见,电路中任意两点间的电压,就是由其正极端沿着某条路径绕行至负极端,沿途上所有元件电压降之和。即计算电路中任意两点的电压,与绕行的路径无关,这是电压的单值性体现。

最后指出,KCL 和 KVL 确定了电路中支路电流间和支路电压间的约束关系。这种约束关系只与电路的连接方式有关而与支路元件的性质无关。所以无论电路由什么元件组成,也无论元件是线性还是非线性、时变还是非时变的,只要是集总参数电路,基尔霍夫这两个定律总是成立的。

思考与练习

2.2-1 试判断下列说法是否正确。

- (1) 基尔霍夫电流定律、电压定律对线性非时变电路适用,而对非线性或时变电路不适用。
- (2) 基尔霍夫电流定律、电压定律对集总参数电路适用,而对分布参数电路不适用。
- (3) 基尔霍夫电流定律、电压定律对线性、非线性、时变、非时变的集总参数电路都适用。
- (4) 在节点处,各支路电流的参考方向不能都设为流入(或流出)该节点,否则将只有流入(或流出)节点的电流,而无流出(或流入)节点的电流,不符合电荷守恒定律。
- (5) 利用 KCL 方程求某一支路电流时,若改变接在同一节点的所有其他已知支路电流的参考方向,将使求得的结果有符号的差别。
- (6) 利用 KCL 方程求某一支路电流时,若改变该支路电流的参考方向,将使求得的结果有符号的差别。

[答案:(2)(3)(6)正确]

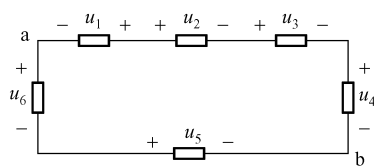
2.2-2 填空

- (1) 三条或三条以上支路的连接点称为_____。
- (2) 电路中的任何一闭合路径称为_____。
- (3) 内部不再含有其他回路或支路的回路称为_____。
- (4) _____只取决于电路的连接方式。
- (5) _____只取决于电路元件本身电流与电压的关系。
- (6) 电路中的两类约束是指_____和_____。
- (7) KCL 指出:对于任一集总电路中的任一节点,在任一时刻,流出(或流进)该节点的所有支路电流的_____为零。
- (8) KCL 只与_____有关,而与元件的性质无关。
- (9) KVL 指出:对于任一集总电路中的任一回路,在任一时刻,沿着该回路的_____代数数和为零。
- (10) 求电路中两点之间的电压与_____无关。

[答案:节点;回路;网孔;拓扑约束;元件约束;拓扑约束、元件约束;代数数;电路连接方式;所有支路电压降的;路径]

2.2-3 如图所示电路,已知 $u_1 = u_6 = 2\text{ V}$, $u_2 = u_3 = 3\text{ V}$, $u_4 = -7\text{ V}$,求 u_5 和 u_{ab} 。

[答案: -5 V , -3 V]



练习题 2.2-3 图

2.3 电阻元件

电路元件是组成电路模型的最小单元,每一种元件反映某种确定的电路性质。集总参数元件假定:在任何时刻流入二端元件一个端钮的电流一定等于从另一端钮流出的电流,两个端钮之间的电压值为单值量。

在电路中电路元件的特性是由其端钮上的电压、电流关系来表征的,通常称为伏安特性。

元件的伏安特性连同基尔霍夫定律共同构成了集总参数电路分析的基础。我们将发现,本书中涉及的所有电路分析方法都是建立在这两种约束基础之上的。本节讨论的电阻元件是由实际电阻器抽象出来的理想化电路模型,只反映电阻器对电流呈现阻力的性能,具有消耗能量的单一电特性。

1. 电阻元件的定义

电阻元件是这样一种二端元件,在任意时刻,其电压和电流可以用 $u-i$ 平面上的一条曲线来描述。即在任意时刻的电压和电流存在代数约束关系

$$u = f(i) \quad (2-12)$$

式(2-12)称为电阻的伏安特性(VAR),其对应 $u-i$ 平面上的曲线称为电阻的伏安特性曲线。

满足定义条件的电阻类型可以是线性的或非线性的,时变的或非时变的。若特性曲线不随时间变化,则称为非时变的,反之称为时变的。若特性曲线为过原点的直线,则称为线性的;凡不是直线的则为非线性的。非线性电阻的阻值随电压或电流的大小甚至方向的改变而改变,不是常数。图 2-14 所示为几种不同性质的电阻元件的伏安特性曲线。

2. 线性非时变电阻元件

通常所说的电阻元件是满足欧姆定律的线性非时变电阻元件,其符号如图 2-15 所示。电压、电流在关联参考方向下,其伏安特性曲线如图 2-14(a)所示。该特性曲线的数学描述为

$$u = Ri \quad \text{或} \quad i = Gu \quad (2-13)$$

式中, R 为该直线的斜率,称为电阻元件的电阻量,单位为欧姆,简称“欧”,符号为 Ω ,1 欧 = 1 伏/安; G 称为电导,单位为西门子,符号为 S,1 西门子 = 1 安/伏。

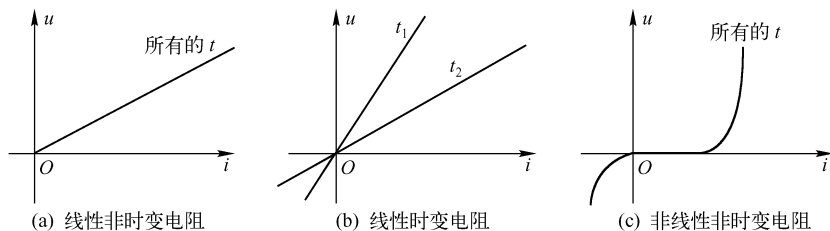


图 2-14 不同性质电阻元件的伏安特性曲线

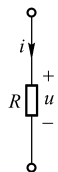


图 2-15 电阻元件符号

由式(2-13)和图 2-14 可知,电阻的一个重要特性是在任一时刻,电阻的端电压(或电流)由同一时刻的电流(或电压)决定,而与过去的电流(或电压)无关。从这个意义上讲,电阻是一种无记忆元件,也称即时元件。电容和电感是另一类型的集总元件,它们具有记忆特征,称为动态元件。

应该指出式(2-13)是在电压、电流采用关联参考方向下得到的。若电压、电流非关联,则欧姆定律应改写为

$$u = -Ri \quad \text{或} \quad i = -Gu \quad (2-14)$$

当电压、电流采用关联参考方向时,线性非时变电阻的瞬时消耗(吸收)功率为

$$p = ui = Ri^2 = u^2/R \geq 0 \quad (2-15)$$

可见,在所有时间和所有 u, i 的可能组合,电阻元件消耗的功率都大于或等于零。因此,电阻元件是一种耗能元件,不向外电路提供能量。具有以上只消耗(吸收)能量,不产生能量特性的元件被称为是“无源的”。电阻消耗能量的结论当然是在正电阻($R > 0$)条件下得出的,根据电阻的一般定义,在 $u-i$ 平面上斜率为负的曲线所表征的元件也属于电阻元件,为负电阻。负电阻向外提供能量。含有受控源的电路有可能等效为负电阻,一般由电子电路来实现。

当 $R = \infty$ ($G = 0$) 和 $R = 0$ ($G = \infty$) 时,电阻的伏安特性如图 2-16(a) 和(b) 所示。

由图 2-16 可知,电阻开路时电流为零,电压可为任意值;而电阻短路时电压为零,电流可为任意值。

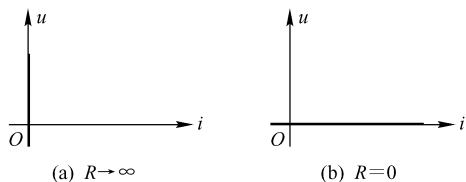


图 2-16 电阻的伏安特性

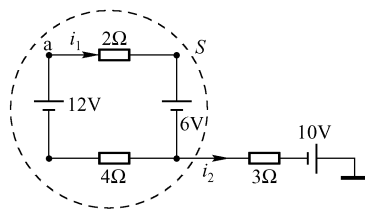


图 2-17 例 2-3 图

【例 2-3】 如图 2-17 所示电路,求 u_a 。

解: 设电流 i_1, i_2 如图中所示。作闭合曲面 S , 由 KCL 易得 $i_2 = 0$ 。

对回路列 KVL 有 $2i_1 + 6 + 4i_1 - 12 = 0$

解得 $i_1 = 1$ A, 故

$$u_a = 2i_1 + 6 + 3i_2 - 10 = -2 \text{ V}$$

思考与练习

2.3-1 一个 $25 \Omega, 1 \text{ W}$ 的电阻应用于电路,则电阻两端电压不能超过多少伏? [答案:(2)]

- (1) 1 V (2) 5 V (3) 25 V

2.3-2 有人说:“对于线性时变电阻,也存在 $u(t) = R(t)i(t)$ 的关系,即欧姆定律也是适用的。”对吗? 试说明理由。

2.3-3 电路如图所示,试求电阻 R 及电路的功率。 [答案: $15 \Omega, 31 \text{ W}$]

2.3-4 试以 u 为横坐标, i 为纵坐标,在同一坐标系中作出下列电阻的伏安特性曲线:

- (1) $R = 0$ (2) $R = 2 \Omega$ (3) $R = 4 \Omega$ (4) $R = \infty$

2.3-5 如图所示电路, u_a 等于

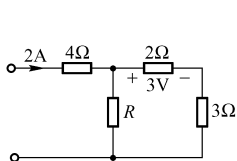
- (1) -5 V (2) 15 V (3) 10 V (4) 以上都不是 [答案:(4)]

2.3-6 如图所示电路,电压 u_{ad} 等于 [答案:(3)]

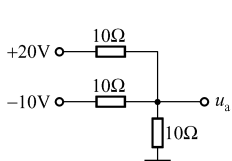
- (1) -4 V (2) 2 V (3) 4 V (4) 6 V (5) 10 V

2.3-7 图示电路中,电压 u_{ab} 等于

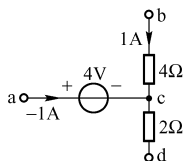
- (1) -1 V (2) 0 V (3) 1 V (4) 以上均不对 [答案:(2)]



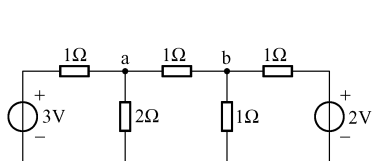
练习题 2.3-3 图



练习题 2.3-5 图



练习题 2.3-6 图



练习题 2.3-7 图

2.4 电 阻 器

1. 电阻器的分类

电阻器是在电子产品中应用最多的一种电子元件。电阻器的种类繁多,分类方法也不同。一般情况下,可按表 2-1 所示进行分类。

表 2-1 电阻器的分类

固定电阻器	包括碳膜电阻器、金属膜电阻器、金属氧化膜电阻器、化学沉积膜电阻器及合成碳膜电阻器等
可变电阻器	包括半可调电阻器和电位器
敏感电阻器	包括热敏电阻器、光敏电阻器、压敏电阻器、磁敏电阻器、气敏电阻器和力敏电阻器

2. 电阻器的主要参数

电阻器的主要参数有电阻器的标称值、允许偏差和额定功率。标称值是指电阻器的标注值,必须根据国家制定的系列标准标注,生产者不能任意标注。在选择电阻器时,必须按国家规定的系列阻值范围去选用,若系列中没有所需的阻值,可选择与系列中相近阻值的电阻器。表 2-2 是国家规定的系列标称值及允许偏差,表中的数值乘以 10^n (n 为任意整数),就是该系列的电阻阻值。

表 2-2 电阻器的标称值系列

阻值系列	允许偏差(%)	等 级	标 称 值
E24	± 5	I	1.0,1.1,1.2,1.3,1.5,1.6,1.8,2.0,2.2,2.4,2.7,3.0,3.3,3.6,3.9,4.3,4.7,5.1,5.6,6.2,6.8,7.5,8.2,9.1
E12	± 10	II	1.0,1.2,1.5,1.8,2.2,2.7,3.3,3.9,4.7,5.6,6.8,8.2
E6	± 20	III	1.0,1.5,2.2,3.3,4.7,6.8

电阻器的额定功率是指在一定气压和温度条件下,长期连续工作所能承受的最大功率。当工作功率超过该功率值时,电阻器可能被烧毁。额定功率按照国家标准标定,有 $1/8\text{ W}$, $1/4\text{ W}$, $1/2\text{ W}$, 1 W , 2 W , 5 W , 10 W 等。一般 $1/8\text{ W}$, $1/4\text{ W}$ 的电阻器使用较多, 1 W 以上的电阻器大多用在电源电路中。

3. 电阻器的标注方式

(1) 直标法

如图 2-18 所示,将电阻器的阻值及允许偏差直接标注在电阻器的表面上。

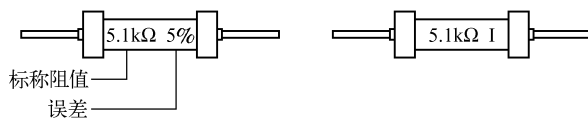


图 2-18 直标法

(2) 符号法

符号法是指将规定了特定意义的符号和数字标注在电阻器的表面上,表示出电阻器的阻值和偏差。这些符号有:R、 Ω 、K、M、G、T。其中, Ω 表示欧姆、K表示千欧、M表示兆欧、G表示吉欧(10^9 欧)、T表示太欧(10^{12} 欧)。符号法中的允许偏差也是用字母表示的,其字母代表的意义如表 2-3 所示。

表 2-3 允许偏差与字母对照表

符 号	W	B	C	D	F	G	J	K	M	N
允许偏差%	± 0.05	± 0.1	± 0.25	± 0.5	± 1	± 2	± 5	± 10	± 20	± 30

例如,R22K表示 0.22Ω ,允许偏差 $\pm 10\%$;2R2表示 2.2Ω ;2K2M表示 $2.2\text{k}\Omega$,允许偏差 $\pm 20\%$;2M2表示 $2.2\text{M}\Omega$ 等。

(3) 色标法

色标法是指将电阻器的标称值和允许偏差用不同的颜色环表示,标注在电阻器的表面上。各色环代表的意义如表 2-4 所示。

表 2-4 色环所代表的意义

颜 色	棕	红	橙	黄	绿	蓝	紫	灰	白	黑	金	银	无
有效数字 第一、二位	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0	—	—	—
乘数	10	10^2	10^3	10^4	10^5	10^6	10^7	10^8	10^9	10^0	10^{-1}	10^{-2}	—
允许偏差%	± 1	± 2	—	—	± 0.5	± 0.25	± 0.1	—	—	—	± 5	± 10	± 20

普通电阻器一般用四条色环表示其阻值和偏差,如图 2-19(a)所示,距离电阻器一端最近的为第一条色环,其余依次为第二、三、四条色环。其中,第一、二条色环分别表示第一、二位有效数字,第三条色环表示乘数,即表示有效数字后应加“0”的个数,第四条色环表示允许偏差。如图 2-19(a)所示电阻器为 $47\text{k}\Omega$,允许偏差 $\pm 5\%$ 。

精密电阻器一般用五条色环表示其阻值和偏差,如图 2-19(b)所示,其中,前三环表示有效数字,第四环表示乘数,第五环表示允许偏差。如图 2-19(b)所示电阻器为 17.8Ω ,允许偏差 $\pm 1\%$ 。

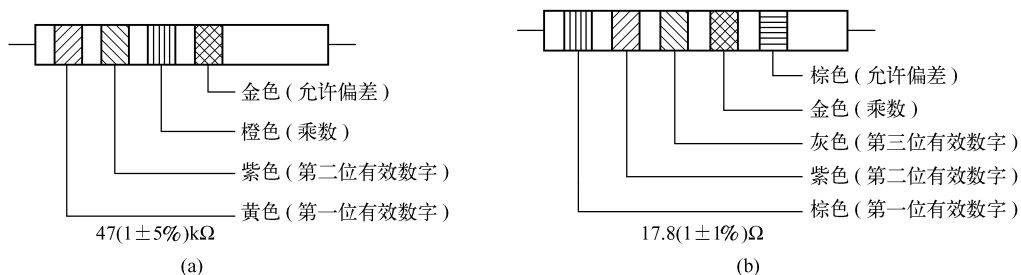


图 2-19 电阻的色环表示

图 2-20(a)是几种常见插件式电阻器的外形图。其中热敏电阻器、压敏电阻器等特殊的电阻器可以作为传感器使用。

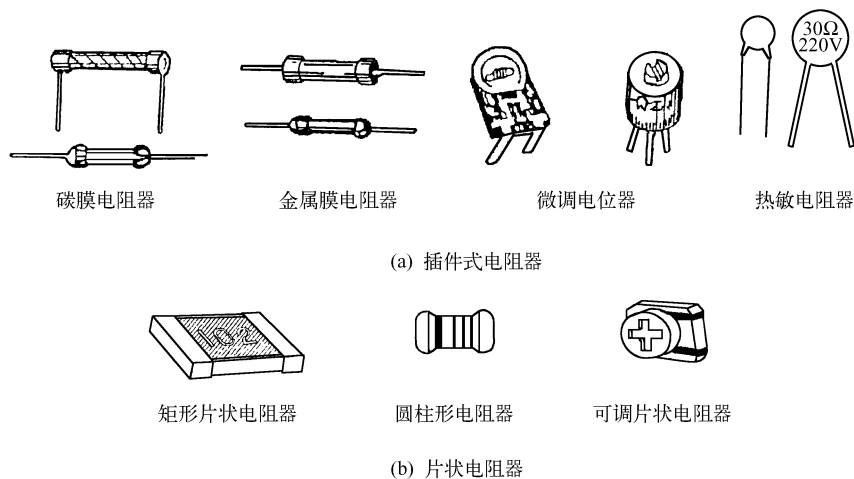


图 2-20 常见电阻器外形

4. 贴片电阻

随着电子元器件由大、重、厚向小、轻、薄发展,出现了片状元器件和表面组装技术。片状元器件(SMC 和 SMD)又称为贴片元器件,是无引线或短引线的新型微小型元器件。它适合于在没有通孔的印制板上贴焊安装,是表面组装技术(SMT)的专用元器件。其特点是将电子元器件直接安装在印制板表面。目前,片状元器件已在计算机、移动通信设备、电子测量仪器、医疗设备以及高档家用电器等产品中得到广泛应用。

与传统的插件式元器件相比,片状元器件尺寸小,安装密度高,引线间的分布电容大大降低,寄生电容和寄生电感明显减小,有较好的高频特性和较强的抗电磁干扰和射频干扰能力。

片状元器件按其形状可分为矩形、圆柱形和异形(翼形、钩形等);按功能可分为无源器件、有源器件和机电元件。下面介绍两种常用的片状电阻器。

矩形片状电阻器的外形如图 2-20(b)所示,它有厚膜片状电阻和薄膜片状电阻两种类型。其阻值一般直接标注在电阻的一面,通常用三位数字表示,前两位表示阻值的有效数字,第三位表示有效数字后零的个数。如 100 表示 $10\ \Omega$,103 表示 $10\ \text{k}\Omega$ 。若阻值小于 $10\ \Omega$,用 *R* 表示,如 6R8 表示 $6.8\ \Omega$ 。阻值为 $0\ \Omega$ 的电阻为跨接片。允许偏差以字母 D、F、G、J、K 表示,分别表示允许偏差为 $\pm 0.5\%$ 、 $\pm 1\%$ 、 $\pm 2\%$ 、 $\pm 5\%$ 、 $\pm 10\%$ 。

圆柱形固定电阻器的外形如图 2-20(b)所示,可分为碳膜和金属膜两类。其标注采用常用的色环表示法。

2.5 独立电源

电路中既然有消耗能量的元件(如电阻),就一定存在产生能量的元件——电源。电池、发电机、信号源等都是日常应用最广泛的实际电源。所谓独立电源是相对受控电源而言的,包括电压源和电流源,它们是由实际电源抽象而得的电路模型,是有源二端元件。

1. 独立电压源

独立电压源(简称电压源)是这样一种二端元件,当其端接任意外电路后,其端电压都能保持规定的电压值不变。即对任意的 i 有

$$u = u_s(t) \quad (2-16)$$

电压源的符号如图 2-21 所示,在任一时刻 t_1 的伏安特性曲线如图 2-22 所示。由电压源的定义可知,电压源的端电压是由其本身确定的,与外电路无关,也与流过它的电流无关。在任何情况下,其端电压总能保持定值 U_s (若电压源为直流电源)或一定的时间函数 $u_s(t)$ (若电压源为交流电源)。流过电压源的电流则可以是任意的(无论大小和方向),其电流的大小和方向由电压源本身和外电路共同确定。因而,电压源既可产生能量也可吸收能量,甚至可以产生或吸收无穷大的能量。这是理想化的结果,实际电压源不可能产生或吸收无穷大的能量。当电压源置零时(即 $u_s = 0$),其 VAR 曲线如图 2-16(b) 所示,它与 $R = 0$ 的 VAR 相同,故电压源置零时等效为短路。注意:电压源置零,指的是令电压源的输出电压为零。此时,其作用相当于短路线。但这只能作为理论分析的依据,对于实际工作中的电压源,是无论如何不可以短路的。

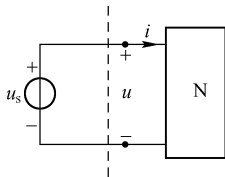


图 2-21 电压源符号

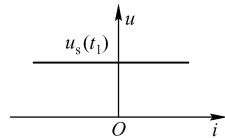
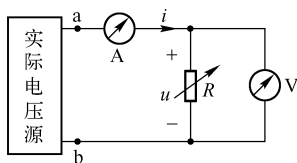


图 2-22 某时刻 t_1 的电压源 VAR

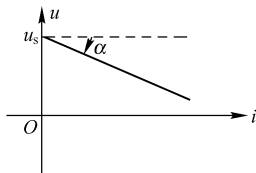
测试实际电压源 VAR 的电路如图 2-23(a) 所示。改变负载电阻 R , 当 $R = \infty$ 时, 得电压表读数 $u = u_s$; 若 $R \downarrow$, 则 $i \uparrow$ 且 $u \downarrow$, 测得 VAR 曲线如图 2-23(b) 所示。故其 VAR 为

$$u = u_s - R_s i \quad (2-17)$$

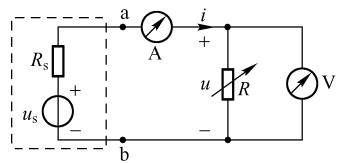
式中, $R_s = \tan\alpha$ 。根据实际电压源的 VAR 可画出其等效电路模型如图 2-23(c) 所示。实际电压源的电路模型为理想电压源与电阻的串联, 该电路也称为戴维南电路。



(a)



(b)



(c)

图 2-23 实际电压源的模型

【例 2-4】 图 2-24 为某电路的一部分, 求 i_x , u_{ab} 。

解: (1) 求 i_x 。对节点①, ②, ③分别编写 KCL 方程, 有

$$i_1 = -(1+2) = -3 \text{ A}, \quad i_2 = i_1 + 4 = 1 \text{ A}, \quad i_x = 5 - i_2 = 4 \text{ A}$$

另一种方法: 作封闭曲面, 有

$$i_x + 4 = 1 + 2 + 5, \quad \text{解得 } i_x = 4 \text{ A}。$$

(2) 求 u_{ab} 。由 KVL 有

$$u_{ab} = -u_s + 10 \times i_1 + 5 \times i_2 = -3 - 30 + 5 = -28 \text{ V}$$

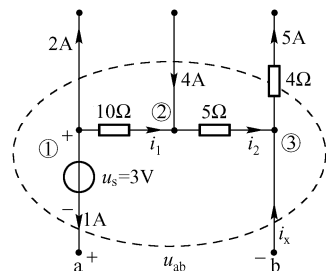


图 2-24 例 2-4 图

【例 2-5】 电路如图 2-25 所示,求 i, u_s, R 。

解: (1) 求 i 。作封闭曲面,有

$$6 = 5 + i, \quad \text{即 } i = 1 \text{ A}。$$

(2) 求 u_s 。因为

$$i_1 = 6 + 12 = 18 \text{ A}, \quad i_2 = 18 - 15 = 3 \text{ A}$$

所以 $u_s = 3 \times i_1 + 12 \times i_2 = 3 \times 18 + 12 \times 3 = 90 \text{ V}$

(3) 求 R 。因为

$$i_R = 15 - i = 14 \text{ A}$$

$$3 \times i_1 + 15 \times 1 + 14R = u_s = 90 \text{ V}$$

所以 $R = 1.5 \Omega$ 。

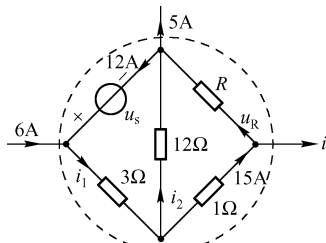


图 2-25 例 2-5 图

2. 独立电流源

电压源是能够产生电压的装置,则电流源就是能够产生电流的装置。例如,电子电路中的恒流源,可以产生恒定的电流。理想电流源是从实际电流源抽象出来的电路模型。

与电压源对应,独立电流源(简称电流源)是这样一种二端元件,当其端接任意外电路后,流过该元件的电流都能保持规定的电流值不变。即对任意的 u ,有

$$i = i_s(t) \quad (2-18)$$

电流源的符号如图 2-26 所示,在任一时刻 t_1 的伏安特性曲线如图 2-27 所示。

对于电流源来说,流过它的电流是由它本身确定的,与外电路无关,也与它两端的电压无关。在任何情况下,流过它的电流总能保持定值 I_s 或为一定的时间函数 $i_s(t)$ 。而其端电压则可以是任意的,端电压的大小和极性由电流源本身和外电路共同确定。因而,电流源既可产生能量也可吸收能量,甚至可以产生或吸收无穷大的能量。这也是理想化的结果,实际电流源不可能产生或吸收无穷大的能量。当电流源置零时(即 $i_s = 0$),其 VAR 曲线如图 2-16(a)所示,它与 $R = \infty$ 的 VAR 相同,故电流源置零时等效为开路。同样,这只能作为理论分析的依据,实际工作中的电流源是不可以开路的。

同理,若测试实际电流源的 VAR,可得

$$i = i_s - \frac{1}{R_s} u \quad (2-19)$$

根据其 VAR 可画出等效电路模型如图 2-28 所示。实际电流源的电路模型为理想电流源与电阻的并联,该电路也称为诺顿电路。

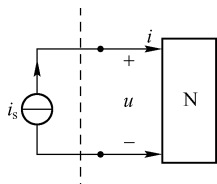


图 2-26 电流源符号

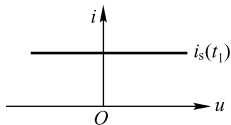


图 2-27 某时刻 t_1 的电流源 VAR

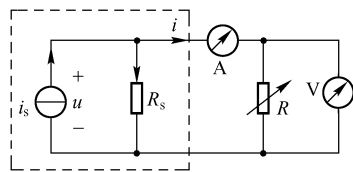


图 2-28 实际电流源的模型

【例 2-6】 如图 2-29 所示电路,已知 $i = 0$,求 a 点的电位 u_a 。

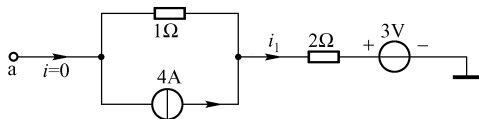


图 2-29 例 2-6 图

解：因为 $i=0$ ，所以 $i_1=0$ ，则 $u_a = -1 \times 4 + 0 + 3 = -1 \text{ V}$ 。

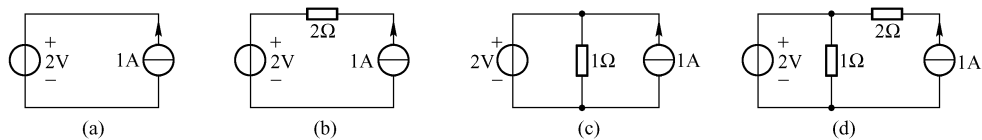
思考与练习

2.5-1 在例 2-6 的电路中，若 a 点接地，电流 i 仍为零吗？为什么？

2.5-2 一个电路中，电流源两端有电压吗？有人说：“电流源两端电压为零”，也有人说：“电流源两端电压为无穷大”，这两种说法对吗？为什么？

2.5-3 实际电源的 VAR 也与外电路无关吗？在什么条件下实际电源等效为理想电压源？什么条件下等效为理想电流源？

2.5-4 求图示各电路中独立源的功率。



练习题 2.5-4 图

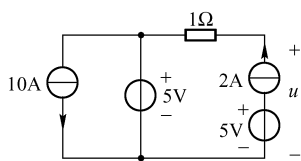
[答案：(a) 电压源释放 2 W 电流源吸收 2 W (b) 电压源吸收 2 W 电流源释放 4 W (c) 电压源释放 2 W 电流源释放 2 W (d) 电压源释放 2 W 电流源释放 4 W]

2.5-5 求图示电路中的 u 。

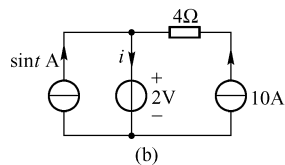
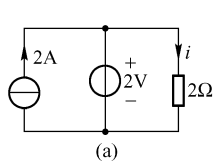
[答案：7 V]

2.5-6 求图示各电路中的 i 。

[答案：(a) 1 A；(b) $10 + \sin t \text{ A}$]



练习题 2.5-5 图



练习题 2.5-6 图

2.5-7 求图示各电路的 u 和 i 。

[答案：(a) $u=0 \text{ V}$, $i=-2 \text{ A}$ ；(b) $i=3 \text{ A}$]

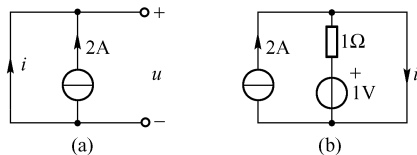
2.5-8 试判断下列说法是否正确。

(1) 实际电压源的端电压与外接电路无关，只由其本身特性决定。

(2) 理想电压源的端电压与外接电路无关，实际电压源的端电压则与外接电路有关。

(3) 实际电压源的端电压与外接电路有关，而其 VAR 却与外接电路无关。

[答案：(2)(3) 正确]



练习题 2.5-7 图

2.6 受控电源

前面讨论的电压源和电流源都是独立电源，电压源的端电压和电流源的电流由电源本身决定，与电源以外的其他电路无关，不依赖于电路别处的电压或电流。但是，在实践中还存在另外一种类型的电源，该种类型电源也可分为电压源和电流源，但其在电路中建立的电压或电流取决于电路别处的电压或电流，如果不知道控制它的电压或电流，就无法确定它的数值。这种电源被认为是

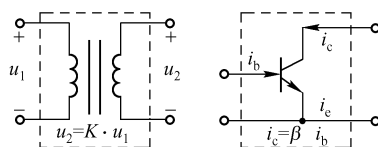


图 2-30 实际的受控源器件

“非独立的”,称为受控电源(简称受控源)。受控源是由电子器件抽象出来的一种模型,日常生活中所接触到的电子器件,如变压器、共射晶体管放大器等,都可用受控源的电路模型来描述。如图2-30所示,变压器的次级电压受到初级电压的控制,晶体管的集电极电流受到基极电流的控制。

受控源可以是电压源也可以是电流源,其控制量可以是电压也可以是电流。因此,受控源是一个四端元件(双口元件),它具有两条支路:其一为输入支路(控制支路),该支路不是开路就是短路;其二为输出支路(受控支路),该支路不是电压源就是电流源。当控制量为电压时,其输入端开路,控制电压为输入支路的开路电压;当控制量为电流时,输入端短路,控制电流为输入支路的短路电流。

根据控制量是电压还是电流,以及输出支路是电压源还是电流源,受控源可分为四种类型。

① 电压控制电压源(VCVS)。电路符号如图2-31(a)所示,图中 μ 为电压放大倍数。变压器、真空五极管放大器属此类型。

② 电压控制电流源(VCCS)。电路符号如图2-31(b)所示,图中 g 为转移电导。场效应管放大器、真空三极管放大器属此类型。

③ 电流控制电压源(CCVS)。电路符号如图2-31(c)所示,图中 r 为转移电阻。直流发电机、热电偶属此类型。

④ 电流控制电流源(CCCS)。电路符号如图2-31(d)所示,图中 α 为电流放大倍数。晶体管放大器属此类型。

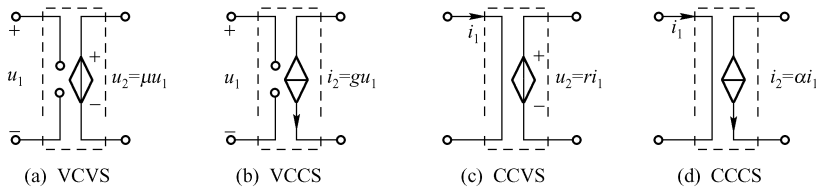


图2-31 受控源类型

在各端口电压、电流采用关联参考方向时,受控源的瞬时吸收功率为

$$p = u_1 i_1 + u_2 i_2$$

由于输入端不是 $u_1 = 0$ 就是 $i_1 = 0$,所以上式可写成

$$p = u_2 i_2 \quad (2-20)$$

即受控支路的功率就是受控源的功率。

一般情况下,电路图中通常不直接画出输入支路,仅标出控制量及参考方向,如图2-32(a)所示电路常简化为图2-32(b)。

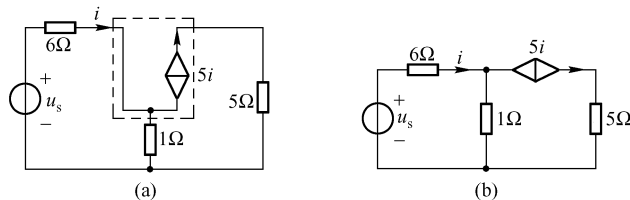


图2-32 含受控源电路的简化画法

受控源是一种线性、时不变的有源元件。这里所指的“有源”,是指可以产生能量的器

件,如独立电压源和电流源都是有源元件。电阻、电感和电容是不能产生能量的,称为无源元件。但是,与独立源有着本质不同的是,在电子电路中,受控源所产生的能量往往是来自于某独立源的,而在受控源模型中一般不标出该独立源。独立电源称为激励源,电路中的电压和电流都是在独立电源的作用下产生的。而受控源却不同,它反映的是电路中某种控制与被控制的关系或耦合关系。在分析电路时,受控源可以如同独立源一样处理,但是,其输出电压或电流取决于控制量。因此,含受控源的电路在列写方程时,往往要增加一辅助方程以消去控制量。

【例 2-7】 电路如图 2-33 所示,求 u_1 、 i_1 及元件的功率。

解: 编写 KVL 方程有

$$30i_1 + 2u_1 - u_1 - 120 = 0 \quad \text{①}$$

辅助方程 $u_1 = -15i_1 \quad \text{②}$

由①、②式解得 $i_1 = 8 \text{ A}$, $u_1 = -120 \text{ V}$,故各元件吸收功率为

$$p_s = -u_s i_1 = -(120 \times 8) = -960 \text{ W}$$

$$p_D = 2u_1 i_1 = 2 \times (-120) \times 8 = -1920 \text{ W}$$

$$p_R = (30 + 15) \times i_1^2 = 45 \times 64 = 2880 \text{ W}$$

显然 $p_s + p_D + p_R = 0$ (功率守恒)

【例 2-8】 求图 2-34 中的 i_1 和 u_s 。

解: 因为 $0.8i_1 = 4/5 = 0.8 \text{ A}$,所以 $i_1 = 1 \text{ A}$ 。

由 KCL 有 $i_2 = i_1 - 0.8i_1 = 0.2i_1 = 0.2 \text{ A}$

所以 $u_s = 6i_1 + 4i_2 = 6 \times 1 + 4 \times 0.2 = 6.8 \text{ V}$

【例 2-9】 求图 2-35 所示电路中的电压放大倍数 $K_v = u_2/u_s$ 。

解: 对节点①编写 KCL 方程有

$$i_e = i_b + i_c = (1 + \beta)i_b$$

故对左边网孔编写 KVL 方程,得

$$u_s = R_1 i_b + R_b i_b + R_e i_e = [R_1 + R_b + (1 + \beta)R_e] i_b$$

又因为 $u_2 = -R_L i_c = -R_L \beta i_b$

$$\text{所以 } K_v = \frac{u_2}{u_s} = \frac{-\beta R_L}{R_1 + R_b + (1 + \beta)R_e}$$

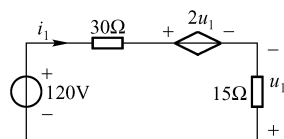


图 2-33 例 2-7 图

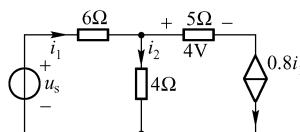


图 2-34 例 2-8 图

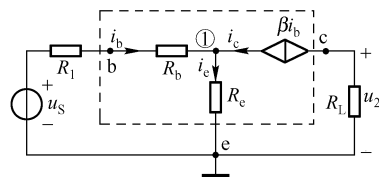


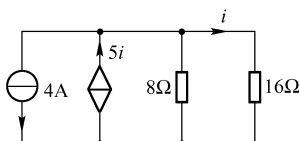
图 2-35 例 2-9 图

思考与练习

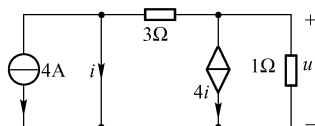
- 2.6-1 何谓受控源? 它与独立源的主要区别是什么?
- 2.6-2 有几种形式的受控源? 它们的控制量和被控制量分别是什么?
- 2.6-3 若电路中含有受控源时,在分析过程中应如何处置?
- 2.6-4 电路如图所示,求电流 i_o 。
- 2.6-5 电路如图所示,求电压 u_o 。

[答案:2 A]

[答案:6 V]



练习题 2.6-4 图



练习题 2.6-5 图

2.6-6 试判断下列说法是否正确。

- (1) 受控源的输出是随输入量而变化的,因而受控源都是时变元件。
- (2) 受控源与独立源一样,能对外电路提供能量。
- (3) 独立源只能产生能量,受控源只能吸收能量。
- (4) 独立源和受控源都能产生能量又能吸收能量。

[答案:(2)(4)正确]

2.7 实践应用

1. 用电安全分析

在本章引例中已经提到,大电流对人体可能造成伤害。电流对人体的伤害有三种:电击伤害、电烧伤以及高频电磁场伤害。其中电击伤害是指电流流过人体,破坏人体心脏、肺及神经系统的正常功能,这种伤害的危险性最大,也最常见。因此限制流过人体电流大小是安全用电、保护人体不受伤害的重要保障。

在有防触电保护装置的情况下,按我国现在使用的漏电保安器,人体允许通过的电流(安全电流)一般按 30 mA 考虑。那么,当我们安装某电力设备时,如何确定是否需要设置安全警示呢?

为了回答上述安全警示设置问题,首先必须建立人体的电路模型。当人体作为电流的导体时,其头、颈、臂、腿和躯干分别等效为不同大小的电阻,如图 2-36 所示。假设某电力设备的电源电压为 220 V,并假设人体躯干电阻:200 Ω,头颈电阻:300 Ω,臂电阻:600 Ω,腿电阻:400 Ω。下面讨论该电力设备是否需要设置安全警示。

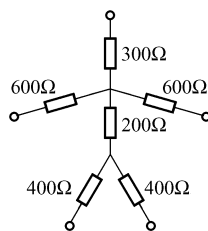


图 2-36 人体电路模型图

会有如下考虑:假设某人头部接触电源正极,则相当于在该人体头及脚之间加入 220V 电压,其间电阻为 900 Ω;若该人两手分别接触电源正负极,则相当于在该人体两手之间加入 220 V 电压,其间电阻为 1200 Ω;若该人单手接触电源正极,则相当于在该人体手及脚之间加入 220 V 电压,其间电阻为 1200 Ω。可见只需考虑电阻最大时电流是否超过安全电流即可。但是,通常情况下,人体单手接触电源正极的可能性最大。在实际工程中,也是按此确定安全标志的。故此时流过人体的电流为

$$I = U/R = 220/1200 \approx 183 \text{ mA}$$

该电流超过人体安全电流,应设置安全警示。

2. 汽车仪表盘照明电路

如图 2-37 所示为汽车仪表盘前灯的照明电路,电路采用 12V 蓄电池(电压源)供电;变阻器 R 为电位器,可通过仪表盘上的旋钮调节,以控制通过灯泡电流的大小,进而控制光线的强弱;保险丝(熔断器)起到保护电路的作用,防止因短路或其他原因导致电流过大而损坏电路。

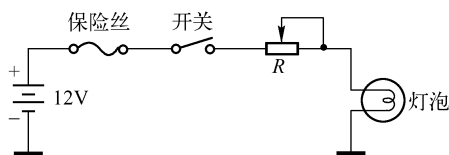


图 2-37 汽车仪表盘照明电路示意图