

第一章 电路的基本概念和基本定律

本章是全书的基础,将介绍电路与电路模型,电路分析与电路分析的基本物理量,以及作为进行电路分析基本依据的基尔霍夫定律和元件伏安关系等概念,并具体介绍四种基本的电路元件。最后还将介绍两种最简单也是最基本的电路——单回路电路和单节偶电路——的分析方法。本章中的基本思想和许多重要结论都是贯穿全书的。

§ 1-1 电路与电路模型

一、电路及其基本功能

电路是指由电路元件以一定的方式连接起来的整体。现今,实际的具有各种各样功能的电路已经遍及国民经济、国防建设、科学技术及人们日常生活的各个领域。电路的发展不仅促进了电力工业、电子工业的发展,也促进了农业、交通、航天、原子能、机械、兵器、石化、轻工、纺织乃至医药卫生等各种事业的发展。如果没有电路,当今的社会将是不可想象的。

电路的类型是多种多样的,不同电路的作用也是各不相同的。但是,从电路的基本功能上来分,它可分为两大类,一类是信号的产生和处理电路,一类是功率(或能量)的产生与处理电路。前者如各种物理量的测量电路、放大电路、声音、图象或文字处理电路等等,后者如各种整流电路、逆变电路、变频电路、直流变换电路等。

为了深入认识现存的电路和创造新的电路,必须了解电路运行、构成、检测等方面的基本规律,电路理论就是研究这种基本规律的学科。电路理论包括电路分析和电路综合两大部分。所谓电路分析是指在已知电路的结构及参数的情况下,求解各部分的电压和电流;所谓电路综合是指在给定电路的输出端钮在已知激励下的响应下,求出能够产生这种响应的电路结构及参数。电路分析是电路综合的基础。本书的任务就是向读者介绍电路分析中的基本内容。重点介绍线性、非时变电路的基本概念、基本规律和基本分析方法。

二、电路模型

应该指出,本书所讨论的电路都是指所谓电路模型,而不是指实际电路。实际电路是由实际的电路元件和实际的联接线组成的。而实际的元件,即使是那些最简单的电路元件,其物理过程也是十分复杂的,很难用一个简单的数学表达式来表达它的性能。例如,大家知道,电阻元件的特性是服从欧姆定律的。但是一个实际的电阻元件,其性质并不完全是由欧姆定律决定的,它的端钮电压、电流关系还与其电感效应有关,甚至与其电容效应有关,此外,其端钮电压、电流关系还与温度有关等。因此很难用一个简单的数学表达式来表达。为了简化分析,我们必须抓住其主要性质,忽略其次要性质,使之能用一个尽可能简单的数学式来表达。因此,在电路理论中,一个

电阻元件,其性质常常就只用欧姆定律来表征。这样,经过简化的元件称为理想元件或元件模型。本书所涉及的理想元件有八种,即电阻元件、电压源元件、电流源元件、受控源元件、电感元件、电容元件、耦合电感元件和理想变压器元件。每种元件都将有自己的数学形式的定义。实际的联接线也是很复杂的,它不但有电阻,也有电感和电容效应,但在多数情况下可以看成是一个既无电感、电容,又无电阻的导线,即理想导线。由理想元件和理想导线组成的电路称为理想电路或电路模型。实际上,任何一个学科都是取其研究对象的模型来进行研究的,如力学中的质点和刚体,就是可以代表某种实际物体的模型。在电路分析中,各种理想元件都用一定的图形符号来表示。图 1-1 为三种基本电路元件的图形符号。图 1-2 中的(a)和(b)所示图形分别为手电筒电路的实际电路和电路模型。

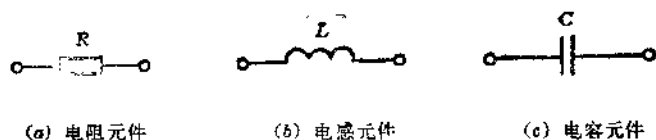


图 1-1 三种基本理想元件的图形符号

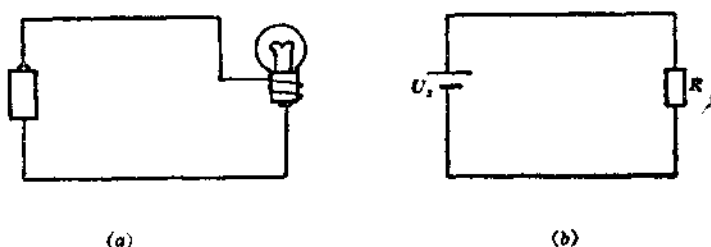


图 1-2 手电筒电路及其电路模型

对于电路模型的概念我们再做几点补充:

1. 电路模型是实际电路的科学抽象,理想化的模型。它反映电路的主要性质,并能用精确的数学式来表达,从而能较方便地通过对电路模型的分析推断出实际电路的主要特性。

2. 对于同一个实际电路可以有不只一种的电路模型。一定的模型,对应于一定的工作条件,如电压、电流和工作频率范围等。一般地讲,模型越复杂,分析的准确度越高,但分析也越繁琐。

应该指出,本书中所讨论的电路的总的条件是假定它们都是所谓“集总”电路。即假定电路的尺寸远小于电路工作频率所对应的波长,也就是说,电路尺寸很小很小,与其工作频率所对应的波长相比,可以看成是一个点。这样,就使得在电路中:电流只在导线和元件中流动,电场只集中在电容元件中,磁场只集中在电感元件中,元件之间的连线上任意点都是等电位的。电路以外空间没有场的存在。只有在这个条件下,作为电路分析基本依据的基尔霍夫定律才能适用。满足这个条件的电路称为集总参数电路。

应该指出,多数电路都满足集总参数的条件。例如,电力用电的频率为 50 Hz,对应的波长

为 6000 km, 显然, 一般电气设备的尺寸都远小于这个尺寸。集成电路更容易满足这个条件。例如, 在长、宽皆为 1mm 的硅片上的集成电路, 即使工作频率达到 10000 MHz, 也满足集总的条件, 因为这个频率对应的波长为 30 mm。当工作频率与电路的尺寸不满足“集总”条件时, 可用“分布参数电路”理论或直接用一般电磁场理论来解决。本书只讨论集总参数电路问题。

3. 实际电路总是有唯一解的, 但电路模型却可能有多个解、无限多个解或无解的情况。这往往是由于电路模型过于简单所致。遇此情况, 应该适当地修改电路模型, 使分析结果尽量接近实际情况。

本书只讨论在给定电路模型情况下的电路分析问题, 至于怎样由实际的物理器件作出其电路模型来已超出了本书的范围。

§ 1-2 电路中的主要物理量

电路中的主要物理量有电流、电压、功率和能量。

一、电流及其参考方向

电流是电路中的一个基本物理量, 它的大小用电流强度来表示, 其定义是单位时间内通过导体横截面的电荷量。或者说, 电流强度 i 就是电荷 q 对时间 t 的变化率, 即

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

电流强度简称为电流, 用字母 i 或 I 表示。大写字母表示不随时间变化的电流, 如恒定电流, 恒定电流也称为直流电流; 小写字母 i 表示随时间变化的电流和直流电流, 它是表示电流的一般符号。

在国际单位制中, 电流的单位为安培(A), 电荷量的单位为库仑(C), 时间的单位为秒(s)。

电荷在电路中流过某一截面是有方向(或称指向)的, 在历史上已规定正电荷运动的方向为电流的方向。电路中常用一个箭头表示该电流假定的正方向, 称为参考方向, 如图1-3所示。该电流的大小由 i 的数值的绝对值来表示, 该电流的真实方向由其参考方向和 i 的数值的正负号来表示。如在图1-3中, 若 $i=5\text{A}$, 即表示在这段电路中的电流大小为 5A, 其真实方向与参考方向一致, 即从左向右; 若 $i=-5\text{A}$, 即表示该段电流的大小为 5A。但其真实方向与参考方向相反, 即从右向左。在电路分析中, 没有规定参考方向的电流的数值的含义是不完整、不确切的。为了确切地表示电流, 必须标明其参考方向。标注电流的参考方向的作用和物理学中为了表示一个物体的位置而引入一个坐标系是类似的。

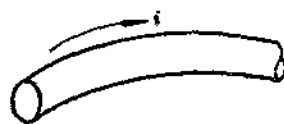


图 1-3 电流的表示

例 1-1 图 1-4 中的方框用来泛指元件, 试分别指出图 1-4(a)、(b)、(c) 中电流的真实方向。

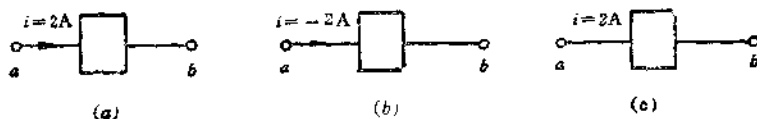


图 1-4 例 1-1 电路图

解 图 1-4 中电流的真实方向分别为:

(a) 由 a 至 b ;

(b) 由 b 至 a ;

(c) 不能确定。因为没有给出电流的参考方向。

例 1-2 分别画出图 1-5(a)和(b)所示元件
电流的参考方向: 已知(a)中电流的真实方向为
由 a 至 b , (b)中电流的真实方向为由 b 至 a 。

解 (a)中电流的参考方向应为由 a 至 b ;

(b)中电流的参考方向也应为由 a 至 b 。

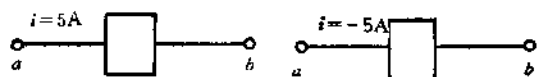


图 1-5 例 1-2 电路图

思考题

1-1 若在图 1-6(a)所示电流 i 的参考方向下测得的 i 的波形如图 1-6(b) 所示。求 $t = t_1$ 和 t_3 时的 i , 并指出 i 的真实方向。若 i 的参考方向与图 1-6(a)中假定的相反, 测得的波形将是怎样的? 试求这种情况下, $t = t_1$ 和 t_3 时的 i , 并指出 i 的真实方向。

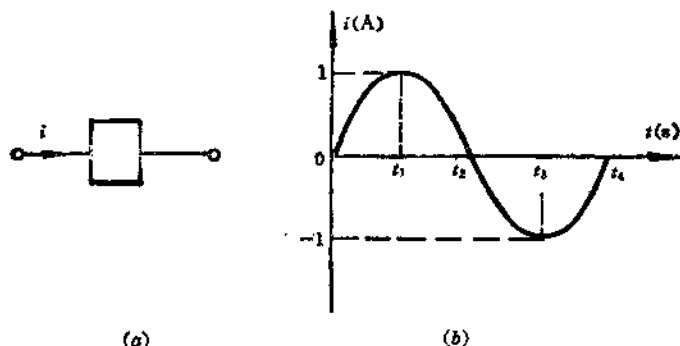


图 1-6 思考题 1-1 电路及电流波形图

二、电压、电位及其参考极性

电压是电路分析中另一个重要的物理量。我们知道, 在电场中, 某点 a 的电位的定义是单位正电荷由该点经任意路径移至无穷远处时电场力所作的功。 a 点到 b 点两点间的电位差的定义为单位正电荷由 a 点经任意路径移至 b 点时电场力所作的功。 a 、 b 两点间的电位差, 等于 a 、 b 两两点的电位之差。 电位差亦称为电压。在电路理论中, 把电压的定义作如下的表达: 即在电路中, a 点到 b 点两点间的电压定义为单位正电荷由 a 点经任意路径运动到 b 点时该电荷所失去的能量(位能)或说该段电路所吸收的能量。一般用字母 u 或 U 表示。大写字母 U 用来表示不随时间变化的电压, 例如恒定电压, 恒定电压亦称为直流电压。小写字母 u 用来表示一般的电压, 包括随时间变化的电压和直流电压。即

$$u = \frac{dw}{dq} \quad (1-2)$$

式中 dq 为通过该段电路的电荷量, dw 为 dq 电荷所失去的能量或该段电路所吸收的能量。在

国际单位制中,电压的单位是伏特(V),能量的单位是焦耳(J)。如果单位正电荷由 a 点运动到 b 点时它确实失去了能量,即该段电路确实吸收了能量时,称 a 、 b 两点间存在电压降,所以,电压也常称为电压降。如果实际上单位正电荷由 a 点运动到 b 点时它获得了能量即该段电路提供了能量,则称 a 、 b 两点间存在电压升。应该指出,电路中电压的定义和电场中电压的定义是一致的。因为在电路中,场都集中在组成电路的各个元件中,电荷由电路元件的一端运动到另一端时电场力所作的功必然通过电荷能量(位能)的减小把能量传送给电路元件,电路元件吸收的这个能量又可能转化为热能、光能、声能,或储存在电路元件中。如果由电路元件的一端 a 到另外一端 b 是电压升,那么,单位正电荷从 a 运动到 b 时一定会在非电场力(如机械力、化学力等)作用下而获得能量(位能)。

在电路分析中,也经常用到电位这个概念,选择电路中某一点(如某个电源的正极或负极)作为参考点,参考点的电位规定为零。电路中其他各点对参考点之间的电压称为相应点的电位。实质上,电位也是两点间的电压。所以,电位的单位也是伏特(V)。显然,在电路中,两点间的电压也是两点间的电位之差。一旦选定了参考点,电路中各点都将有确定的电位值。

电路中任意两点间实际存在的可能是电压降,也可能是电压升。也就是说,电路中任意两点间的电压有极性的不同。为了表示电压的真实极性,常在电路中的两点间标上正(+)、负(-)号或用一个箭头表示该两点间假定的极性或假定的电压降方向,称为两点间电压的参考极性或参考方向,分别如图 1-7 中的(a)和(b)所示。

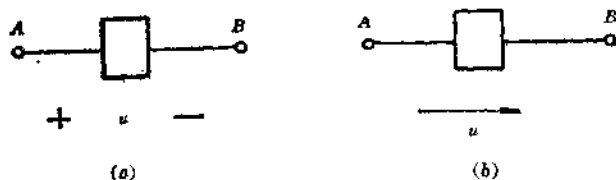


图 1-7 电压的表示方法

图中 A 、 B 两端的电压的大小由 u 的数值的绝对值表示,其真实极性由其参考极性和 u 的数值的正负号来表示。例如,在图 1-7 中,若 $u=5\text{V}$,则表示 A 、 B 两端电压的大小为 5V ,其极性是 A 为高电位端, B 为低电位端。若 $u=-5\text{V}$,则表示 A 、 B 两端电压大小为 5V ,但其实际极性是 B 为高电位端, A 为低电位端。在电路分析中,没有规定参考极性的电压的数值的含义是不完整、不确切的。

例 1-3 图 1-8 中的方框用来泛指元件,试分别指出图 1-8(a)、(b)、(c) 中电压的真实极性。

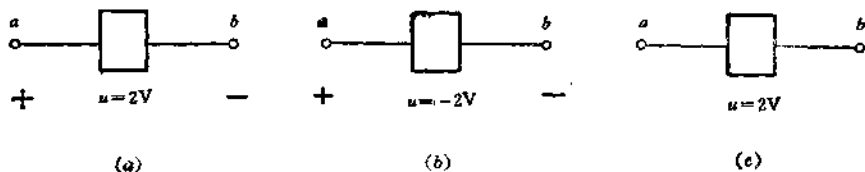


图 1-8 例 1-3 电路图

解 图 1-8 所示电路中电压 u 的真实极性分别为:

- (a) a 点为高电位端;
- (b) b 点为高电位端;
- (c) 不能确定。因为没有给出参考极性。

例 1-4 分别画出图 1-9 (a) 和 (b) 所示元件 a 、 b 两端电压的参考极性; 已知 (a) 中电压的真实极性是 a 点为高电位端, (b) 中电压的真实极性是 b 点为高电位端。



图 1-9 例 1-4 电路图

- 解 (a) 中电压的参考极性应为 $a(+)$, $b(-)$;
 (b) 中电压的参考极性也应为 $a(+)$, $b(-)$ 。

应该指出, 在进行电路分析时, 电路中任一个元件都要标明其电流的参考方向和电压的参考极性, 因为反映任一元件性能的数学表达式的书写都与这些参考方向有关。还应指出, 电路中任一元件电流参考方向和电压参考极性的标注都是任意的。这样一来, 可能使电路图显得比较繁乱。为方便起见, 在电路分析中, 常采用关联参考方向的标注方法。所谓关联参考方向, 是对某一元件而言, 总是假定电压的参考极性与电流的参考方向相一致, 即电流参考方向就是电压降的参考方向。如图 1-10(a) 所示。

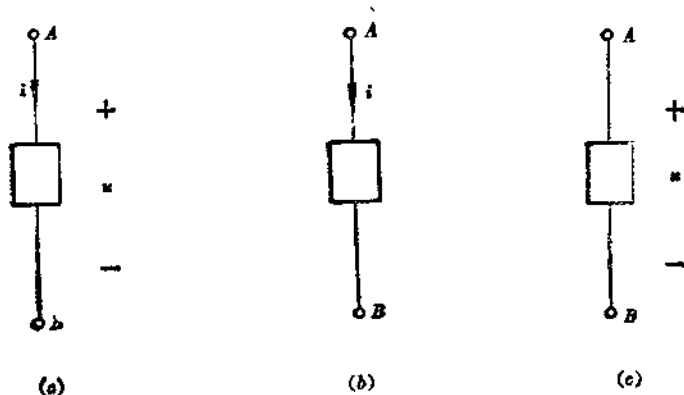


图 1-10 关联参考方向

这样, 一个元件只需标注电流的参考方向或电压的参考极性中任何一个就可以了, 如图 1-10 中 (b) 或 (c) 所示。在图 1-10(b) 中意味着电压的参考极性一定是上正下负, 图 1-10(c) 中意味着电流的参考方向一定是由 A 指向 B 。

三、功率和能量

功率也是电路分析中一个重要的物理量。一个二端元件或二端网络①的功率情况,有吸收功率和放出功率之别。一个二端网络所吸收的功率定义为单位时间该电路所吸收的能量。功率常用字母 p 或 P 表示。大写字母 P 表示不随时间变化的功率,如直流电路的功率,小写字母 p 表示随时间变化的功率和直流功率。即:

$$p = \frac{dw}{dt} \quad (1-3)$$

其中 p 为电路吸收的功率, dw 为电路在 dt 时间内所吸收的能量。一个电路所吸收的功率就是外电路对它放出的功率。功率的单位在国际单位制中是瓦特(W)。二端网络所吸收的功率可以通过其端钮的电压和电流来求出。现推导如下:

在图 1-11 所示的二端网络 N 中,其端钮电压、电流的参考方向为关联参考方向。由式(1-3)有

$$p = \frac{dw}{dt} = \frac{dw}{dq} \cdot \frac{dq}{dt} \quad (1-4)$$

将式(1-1)和式(1-2)代入式(1-4)可得

$$p = ui \quad (1-5)$$

式(1-5)表明,二端网络所吸收的功率等于关联参考方向下的电压与电流的乘积。也就是说,在关联参考方向下电压与电流的乘积为正时,此二端网络是吸收功率,其大小为 u 与 i 乘积的绝对值。当关联参考方向下电压与电流的乘积为负时,此二端网络是放出功率,其大小亦为 u 与 i 乘积的绝对值。

例 1-5 求图 1-12 中各二端网络吸收的功率。

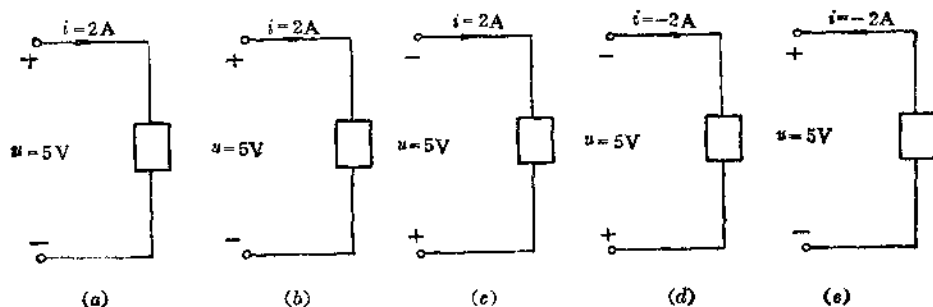


图 1-12 例 1-5 电路图

解

$$(a) \quad p = ui = 5 \times 2 = 10 \text{ W (吸收)}$$

$$(b) \quad p = -ui = -5 \times 2 = -10 \text{ W (放出)}$$

① 电路与网络在电路分析中没有严格区别,可以通用。一般网络指较复杂的电路。我们把其内部的元件无论如何联接,但只有二个端钮与外部联接的电路称为二端网络。

$$(c) \quad p = -ui = -5 \times 2 = -10\text{W (放出)}$$

$$(d) \quad p = ui = 5 \times (-2) = -10\text{W (放出)}$$

$$(e) \quad p = -ui = -5 \times (-2) = 10\text{W (吸收)}$$

括号内注明的是此二端网络功率的真实情况, 即是在吸收, 还是放出。

思考题

1-2 在图 1-13 所示的电压 u 和电流 i 的参考方向下, 对元件 A 而言, 参考方向是关联的还是非关联的? 对元件 B 而言, 参考方向是关联的还是非关联的? 分别写出元件 A 和元件 B 吸收功率的表示式。

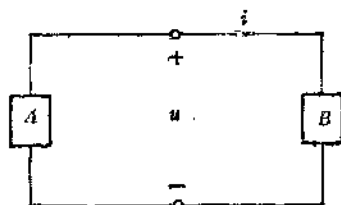


图 1-13 思考题 1-2 电路图

能量也是电路分析中一个重要的物理量。二端网络在某一时间段(t_0, t_1) 内所吸收的能量等于该电路吸收的功率对时间的积分。能量一般用字母 w 或 W 表示, 大写字母 W 表示不随时间变化的能量, 如直流电路的能量, 小写字母 w 表示随时间变化的能量和直流电路的能量。即:

$$w(t_0, t_1) = \int_{t_0}^{t_1} p dt \quad (1-6)$$

式中 $w(t_0, t_1)$ 为该电路在 t_0 至 t_1 时间段内所吸收的能量。 p 为该电路吸收的功率。将式(1-5)代入上式可得

$$w(t_0, t_1) = \int_{t_0}^{t_1} u i dt \quad (1-7)$$

能量的单位在国际单位制中是焦耳(J)。

最后, 讲一下辅助单位。前已指出, 电流、电压、功率和能量的计量单位在国际单位制中分别为安(A), 伏(V), 瓦(W)和焦耳(J)。但实际应用中, 有时感到这些单位太大或太小, 使用不便。为方便起见, 我们还常用到一些较小的或较大的单位, 例如:

$$1 \text{ 毫安 (mA)} = 1 \times 10^{-3} \text{ 安 (A)}$$

$$5 \text{ 微秒 } (\mu s) = 5 \times 10^{-6} \text{ 秒 (s)}$$

$$2 \text{ 千瓦 (kW)} = 2 \times 10^3 \text{ 瓦 (W)}$$

等等。显然, 写成 1mA 要比写成 $1 \times 10^{-3} \text{A}$ 方便、简捷。这些单位都是由在原单位前加一个词

表1-1 部分国际单位制词头

因 数	词 头 名 称		符 号
	原文(法)	中 文	
10^{12}	tera	太	T
10^9	giga	吉	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	n
10^{-12}	pico	皮	p

头而形成的。部分国际单位制词头如表 1-1 所示。

练习题

1-1 分别求出图 1-14(a)、(b)、(c)中的电流 i 。已知: (a)元件 A 吸收功率 60 W, (b)元件 B 吸收功率 30 W, (c)元件 C 产生功率 60 W。
(12 A, -6 A, 12 A)

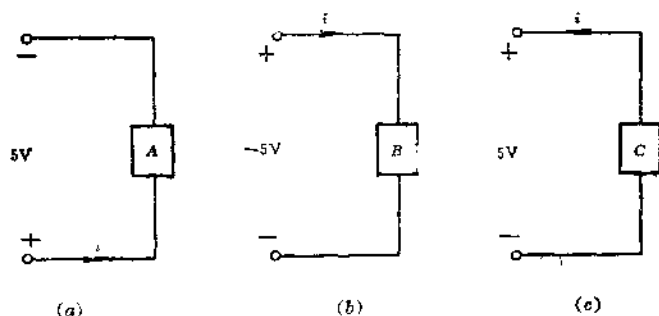


图 1-14 练习题 1-1 电路图

1-2 分别求图 1-15(a)和(b)中的电压 u , 并求 1 分钟内每个元件所放出或吸收的能量, 已知: (a)元件 A 产生功率 10 mW; (b)元件 B 吸收功率 10 mW。

(10V, 0.6 J, 放出; 10V, 0.6 J, 吸收)

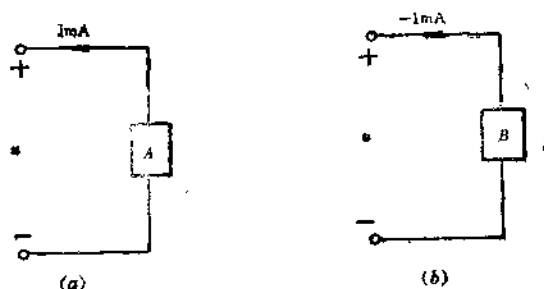


图 1-15 练习题 1-2 电路图

§ 1-3 基尔霍夫定律

前已指出, 所谓电路就是由电路元件以一定的方式联接起来的整体。所谓电路分析就是在已知电路结构及其参数的情况下, 求解各部分的电压和电流。有了电压和电流, 也就可以很容易地求出各部分的功率和能量。那么, 怎样求出各部分电压和电流呢? 有很多种方法。但是, 所有的电路分析的方法的基本依据都来源于关于电路的两个方面的规律: 一个是组成电路的各个元件方面的规律, 即各个元件端钮的电压、电流关系, 这个规律只取决于元件本身的性质, 与它们的联接状况无关。这个规律我们将在以后介绍每个元件时一一讲述; 另一个是与各元件的联接状况有关的规律, 这个规律只与电路的联接状况有关, 与组成电路的各个元件的性质无关, 这个规律就是基尔霍夫定律。

为了说明基尔霍夫定律, 首先我们以图 1-16 为例, 介绍几个与电路的联接状况有关的名词。

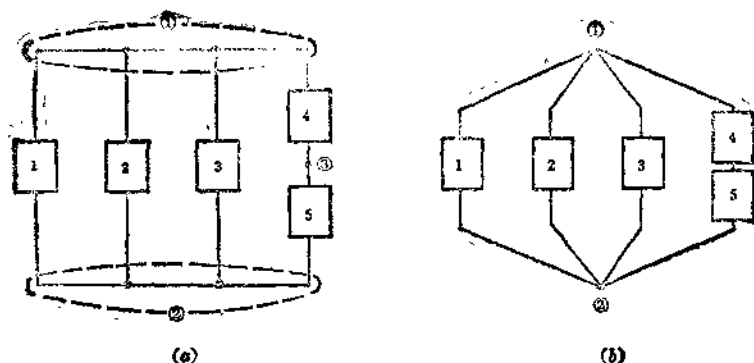


图 1-16 支路、节点、回路和网孔的说明图

1. 支路: 每个二端元件称为一条支路。图 1-16 中有 5 个元件, 所以有 5 条支路。
2. 节点: 元件的联接点称为节点, 即两条或两条以上支路的交点称为节点。图 1-16(a) 中有 3 个节点, 即节点①、节点②和节点③。

应该指出, 为方便起见, 也可把流有同一个电流的部分称为支路。这样, 三个或三个以上支路的交点称为节点。在这样定义下, 图 1-16(a) 所示电路有 4 条支路, 即由元件 1, 2, 3 及 4, 5 形成的支路和两个节点, 即节点①和②。由于电路中的联接线都是理想的。所以, 图 1-16(a) 中上面部分和下面部分分别为一个节点。图 1-16(b) 和 (a) 是同一电路的两种不同的画法。

3. 回路: 电路中由支路组成的闭合路径称为回路。图 1-16 中有 6 个回路。
4. 网孔: 网孔是平面网络中一种特殊的回路, 是一种其内部不含有支路的回路。应该指出, 只有平面网络中才有网孔这一概念。图 1-16 中有 3 个网孔。所谓平面网络是指可以画在一个平面而不出现有支路相交叉情况的电路。本书所涉及的电路绝大多数是平面网络。

基尔霍夫定律是针对电路联接状况的规律, 它包括基尔霍夫电流定律和基尔霍夫电压定律。

一、基尔霍夫电流定律(Kirchhoff's Current Law, 简称为 KCL)

基尔霍夫电流定律是反映电路中汇集于任一节点的各支路的电流之间相互关系的规律, 它的内容是:

对于任一电路中的任一节点, 在任一时刻, 流入(或流出)该节点的电流之和恒等于零。用数学式表达为:

$$\sum i = 0 \quad (1-8)$$

基尔霍夫电流定律来源于电荷守恒定律, 是电荷守恒定律在集总参数电路条件下的一种表现形式。

我们以图 1-17 为例说明如何应用式(1-8)具体列写节点的 KCL 方程。图 1-17 中画出了某电路的节点 A。写 KCL 方程时首先要选定以电流流出节点为正, 还是以电流流入节点为正。例如今取流出为正。然后, 根据汇集于该节点的各支路电流的参考方向, 代入式(1-8)。

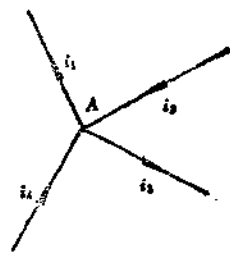


图 1-17 列写 KCL 方程说明用图

式中左边各项当电流参考方向是流出节点时取正号, 流入节点时取负号, 等号右边为零。因此, 图(1-17)中A点的KCL方程为:

$$i_1 - i_2 + i_3 - i_4 = 0 \quad (1-9)$$

式中 i_1 、 $-i_2$ 、 i_3 、 $-i_4$ 分别为相应支路流出节点A的电流。

由式(1-9)又可得
$$i_1 + i_3 = i_2 + i_4 \quad (1-10)$$

式(1-10)体现了基尔霍夫电流定律的另一种表现形式或说另一种含义。即流入某节点电流的总和一定等于流出该节点电流的总和。式(1-10)中, 等号左边为流出该节点电流之和, 各项电流以流出节点为正; 等号右边为流入该节点的电流之和, 各项电流以流入节点为正。

由式(1-9)或式(1-10)还可得到

$$i_1 = i_2 - i_3 + i_4 \quad (1-11)$$

这是基尔霍夫定律的又一表现形式, 即电路中任一支路的电流都可以由与该电流所在支路汇集于同一节点的全部其他支路的电流来表示。如果这个电流是流出该节点的, 则它一定等于其他所有支路流入该节点的电流之和; 如果这个电流是流入该节点的, 则它一定等于其他所有支路流出该节点的电流之和。图1-17中电流 i_1 是流出节点A的, 所以, 式(1-11)给出的等式的等号右边是流入节点A的除 i_1 外其他所有电流之和。

例1-6 若图1-17中的电流 $i_1 = 5\text{A}$, $i_2 = 4\text{A}$, $i_3 = -3\text{A}$, 求 i_4 。

解 根据KCL, 仿照式(1-11), 有

$$\begin{aligned} i_4 &= i_1 - i_2 + i_3 \\ &= 5 - 4 + (-3) = -2\text{A} \end{aligned}$$

由此例看出, 运用基尔霍夫电流定律要涉及两套符号, 一套是KCL方程中各项电流 i 的正负号, 它们取决于选定的电流流出节点为正还是流入节点为正, 一套是各项中电流 i 本身数值的正负号, 它取决于实际的电流方向与其参考方向一致与否。这一点请读者十分注意。

顺便指出, 此例结果为 -2A , 表示 i_4 的大小为 2A , 方向与参考方向相反。

还应指出, 基尔霍夫电流定律不但对节点而言是成立的, 对电路中任意闭合面而言也成立。即对于任一电路中的任一闭合面, 在任一时刻, 流出(或流入)该闭合面的电流之和恒等于零。因为这也是电荷守恒定律的体现。例如对图1-18所示电路中的闭合面(虚线所示)而言有

$$-i_1 + i_2 + i_3 - i_4 = 0 \quad (1-12)$$

实际上, 节点可以看成是闭合面的一种特殊情况, 因此, 基尔霍夫电流定律的上述陈述更具一般性。

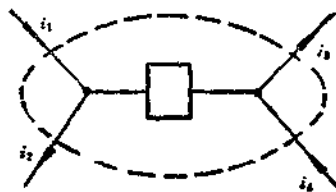


图1-18 KCL运用于电路中的闭合面图示

二、基尔霍夫电压定律(Kirchhoff's Voltage Law, 简称为KVL)

基尔霍夫电压定律是反映电路任一回路中各支路电压之间互相关系的规律。它的内容是:

对于任一电路中的任一回路, 在任一时刻, 沿着该回路的所有支路的电压降之和恒等于零。

用数学表达式为

$$\sum u = 0 \quad (1-13)$$

基尔霍夫电压定律来源于能量守恒原理，它是能量守恒原理在集总参数电路条件下的一种表现形式。

我们以图 1-19 为例说明如何运用式(1-13)来列写回路的 KVL 方程。图 1-19 中画出了某电路中的一个回路。此回路由元件 1、2、3、4 组成。列写 KVL 方程时，首先要选定回路的绕行方向是顺时针的，还是逆时针的，例如选为顺时针的。然后，根据该回路中各个元件电压降的参考方向，写 KVL 方程。等式左边为各元件电压降之和，即其参考极性与绕行方向一致者取正号，与绕行方向不一致者取负号，等号右边为零。因此，对图 1-19 中的回路，KVL 方程为

$$u_1 - u_2 + u_3 - u_4 = 0 \quad (1-14)$$

式中 u_1 、 $-u_2$ 、 u_3 、 $-u_4$ 分别表示相应支路沿选定绕行方向的电压降。

由式(1-14)可以得到

$$u_1 + u_3 = u_2 + u_4 \quad (1-15)$$

式(1-15)体现了基尔霍夫电压定律的另一种表现形式或说另一种含义，即回路中沿某一绕行方向各电压降之和一定等于各电压升之和。式(1-15)等号左边为电压降之和，各项符号以电压降为正，等号右边为电压升之和，各项符号以电压升为正。

由式(1-14)或(1-15)还可得到

$$u_1 = u_4 - u_3 + u_2 \quad (1-16)$$

这是基尔霍夫电压定律的又一种表现形式。它表明，电路中任意两点间的电压降等于从其假定的高电位端沿任一路径到其低电位端时，途中各元件(或部分)的电压降之和。

例 1-7 若图 1-19 中 $u_1 = 5\text{V}$ ， $u_2 = 4\text{V}$ ， $u_3 = -3\text{V}$ ，求 u_4 。

解 依据 KVL，仿照式(1-15)，有

$$\begin{aligned} u_4 &= u_1 - u_2 + u_3 \\ &= 5 - 4 + (-3) = -2\text{V} \end{aligned}$$

此结果说明， u_4 的大小是 2V，其实际极性与参考极性相反。

由上看出，应用基尔霍夫电压定律进行电路分析时也会涉及到两套符号，一套是 KVL 方程中各个电压 u 的正负号，一套是各个 u 本身数值的正负号，前者取决于各部分电压 u 的参考极性与选定的绕行方向是否一致，后者取决于实际的电压极性与参考极性是否一致。这一点也请读者十分注意。

思考题

1-3 电路如图 1-20 所示，已知节点 A 的 KCL 方程为 $i_1 + i_2 - i_3 - i_4 = 0$ ，试标出 i_2 、 i_3 和 i_4 的参考方向。

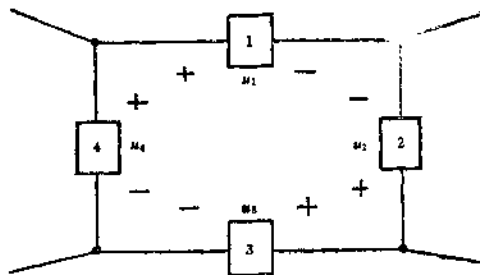


图 1-19 列写 KVL 方程说明用图

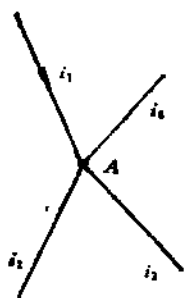


图 1-20 思考题 1-3 电路图

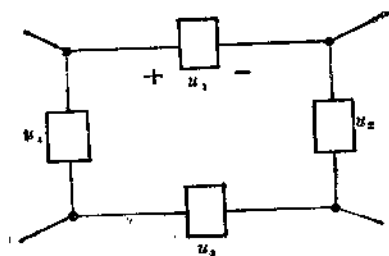


图 1-21 思考题 1-4 电路图

1-4 电路如图 1-21 所示, 已知此回路的 KVL 方程为

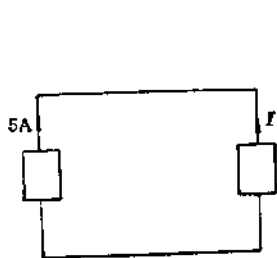
$$u_1 + u_2 - u_3 - u_4 = 0$$

试标出 u_2 , u_3 和 u_4 的参考极性。

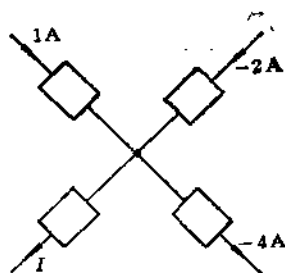
练习题

1-3 分别求图 1-22(a)、(b)、(c) 中的电流 I 。

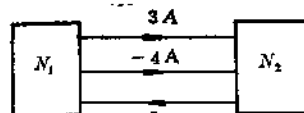
(-5A, 3A, -1A)



(a)



(b)

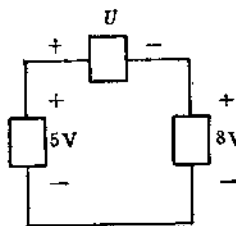


(c)

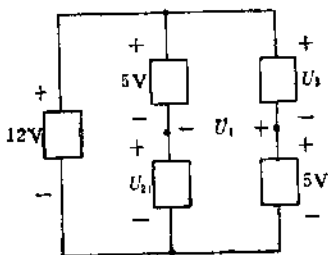
图 1-22 练习题 1-3 电路图

1-4 分别求图 1-23(a) 中的 U 和 (b)、(c) 中的 U_1 , U_2 , U_3 。

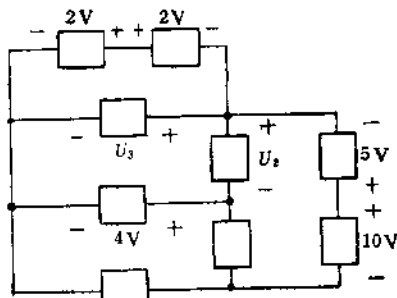
(-3V, -2V, 7V, 7V, -5V, -4V, 0V)



(a)



(b)



(c)

图 1-23 练习题 1-4 电路图

§ 1-4 电 阻 元 件

电阻元件是电路中最重要元件之一。它是实际的炭膜电阻器、金属膜电阻器、线绕电阻器,甚至某些半导体器件,如各种半导体二极管等器件的一种抽象。电阻元件可分为线性电阻元件和非线性电阻元件两种,绝大多数炭膜电阻器、金属膜电阻器和线绕电阻器等可抽象为线性电阻元件,不少半导体二极管可抽象为非线性电阻元件。

一、线性电阻元件和欧姆定律

电路元件的性质是用其端钮的电压、电流关系或称伏安关系来表征的。线性电阻元件的电路符号如图 1-24 所示,在电压、电流关联参考方向下,其端钮的伏安关系是:

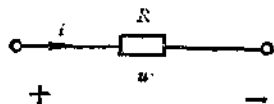


图 1-24 电阻元件

$$u = Ri \quad (1-17)$$

式中 R 为常数。式(1-17)表明,一个线性电阻元件,若通有电流 i ,在其电流的方向上一定产生电压降 u 。若在其两端加上电压 u ,在其电压降的方向上一定产生一个电流 i ,而其电压与电流的比值是一个常数 R ,这个常数 R 就称为该电阻元件的电阻。这就是欧姆定律。所以,也可以说,凡是服从于欧姆定律的元件就称为线性电阻元件。如果用 u 为横坐标 i 为纵坐标的 u, i 平面上的曲线来表达式(1-17),线性电阻元件的伏安关系将是 u, i 平面上通过坐标原点的一条直线,该直线的斜率取决于其电阻值,如图 1-25 所示。这就是这种元件称为线性电阻的原因。在本书中,说到电阻,如不特殊说明,都是指线性电阻。

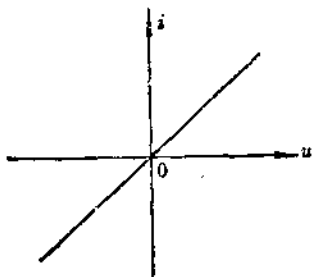


图 1-25 线性电阻的伏安关系曲线

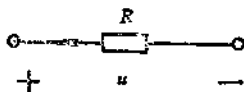


图 1-26 电压、电流参考方向为非关联的情况

在国际单位制中,电阻的单位是欧姆(Ω)。

应该指出,线性电阻的伏安关系的表达式(1-17)是在图 1-24 所示该元件的电压、电流的参考方向是关联参考方向的情况下的形式。若其电压、电流参考方向是非关联的,如图 1-26 所示,则根据欧姆定律可得其伏安关系为

$$u = R(-i) = -Ri \quad (1-18)$$

式(1-18)和式(1-17)是同一个电阻的端钮伏安关系的表达式,它们之间差一个负号,这是因为它们的电压、电流参考方向的关系不同的缘故。

在电路分析中,有时也用电导表示一个电阻元件的性质,电导定义为电阻的倒数,用符号 G

表示, 即

$$G = \frac{1}{R} \quad (1-19)$$

电导的单位在国际单位制中是西门子(S)。显然, 由式(1-17)可知, 用电导来表示的欧姆定律是

$$i = Gu \quad (1-20)$$

例1-8 已知一电阻其电压、电流参考方向如图 1-24 所示。若已测得 $u = 10 \text{ V}$, $i = 2 \text{ A}$, 求其电阻值和电导值。

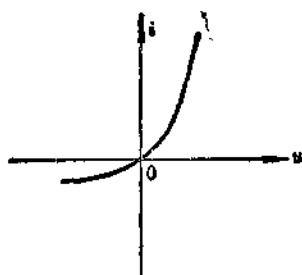
解 由式(1-17)可得

$$R = \frac{u}{i} = \frac{10}{2} = 5 \Omega$$

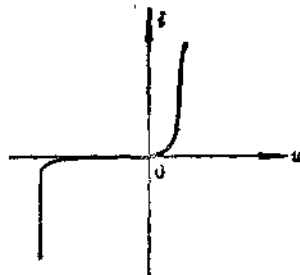
$$G = \frac{1}{R} = \frac{1}{5} = 0.2 \text{ S}$$

二、非线性电阻元件

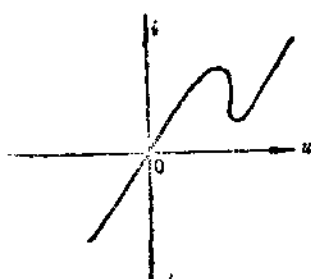
前面指出, 线性电阻元件端钮的伏安关系可以用一条通过 u 、 i 平面坐标原点的直线来表征。但是, 有些元件其端钮的伏安关系不能用 u 、 i 平面上通过坐标原点的一条直线来表征, 而是可以用 u 、 i 平面上一条确定的曲线来表征, 这类元件称为非线性电阻元件。如整流二极管、齐纳二极管、隧道二极管、辉光二极管等都可抽象为一个非线性电阻元件。它们的端钮伏安关系分别如图 1-27 中的(a), (b), (c)和(d)所示。



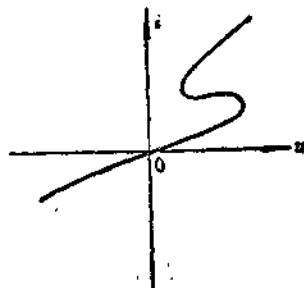
(a) 整流二极管



(b) 齐纳二极管



(c) 隧道二极管



(d) 辉光二极管

图 1-27 某些二极管的伏安关系曲线

非线性电阻元件在工程技术上应用很广。例如整流二极管可构成整流电路, 齐纳二极管可构成稳压电路等等。含非线性元件的电路称为非线性电路。非线性电路的分析问题不是本书介绍的范围, 这里就不再深入讨论了。

三、线性电阻元件的功率

我们对一个电路元件的认识, 首先要了解它的伏安关系, 这是最重要的。接着, 也要了解它的功率情况。

由功率与电压、电流的关系式(1-5)和电阻元件的伏安关系式(1-17)和式(1-20)可得, 如图1-24所示电阻元件 R 所吸收的功率为

$$p = ui = Ri^2 = Gu^2 \quad (1-21)$$

由式(1-21)看出, 只要电阻元件中有电流或电压存在, 它所吸收的功率总是大于零的, 即总是吸收功率的, 而永远不会放出功率。电阻元件吸收的功率常是变成热能、光能等, 所以电阻元件是一个耗能元件。电阻元件吸收的功率越大, 产生的热量就越多。一个实际电阻器的体积和散热条件都是一定的, 当产生的热量不能及时散出, 使元件的温度升高到某一极限值时, 电阻就会失效。一个实际的电路元件在电路中运行时, 对其允许通过的电流、施加的电压及消耗的功率, 都有一个最大值的限制, 以保证其正常工作。这个最大值就称为该元件的额定电流、额定电压和额定功率。

例1-9 一个电阻器的阻值为 $484\ \Omega$, 额定功率为 100W , 问此电阻器两端最大可以加多大电压?

解 因为 $P = Gu^2$

所以

$$\begin{aligned} u &= \sqrt{\frac{P}{G}} = \sqrt{PR} \\ &= \sqrt{100 \times 484} = 220\text{ V} \end{aligned}$$

故此电阻器最大可加 220 V 电压。

练习题

1-5 一个 $500\ \Omega$ 电阻, 通有电流 10 mA , 试求其两端的电压和消耗的功率。 ($5\text{V}, 50\text{mW}$)

1-6 一个 $100\ \Omega$, 1W 的碳膜电阻, 使用于直流电路, 问使用时电流、电压不得超过多大的数值? ($100\text{ mA}, 10\text{ V}$)

1-7 已知某电阻元件两端电压为 $u = 4\cos t\text{ V}$, 电流 $i = 2\cos t\text{ A}$, 关联参考方向, 试问此电阻元件的阻值是多少? ($2\ \Omega$)

1-8 电路如图1-28所示。已知 $U_{bc} = 8\text{ V}$, $U_{cd} = 4\text{ V}$, $U_{de} = -6\text{ V}$, $U_{ef} = -10\text{ V}$, 求 I_1, I_2 和 U_{ab}, U_{af} 。

($2\text{A}, 1\text{A}, 6\text{V}, 2\text{V}$)

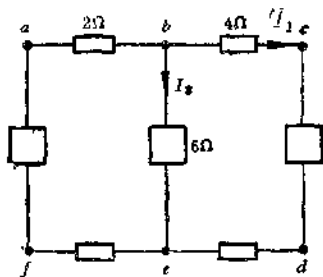


图 1-28 练习题 1-8 电路图

§ 1-5 电压源和电流源

电路中只有电阻是不会有电流的。要想让电路中有电流还必须要电源。干电池、蓄电池、光电池、直流发电机、交流发电机、电子稳压器、稳流器和各种信号发生器等都属于电源之列。根据这些电源的作用,在电路分析中常可抽象为所谓的电压源和电流源。

一、电压源

电压源是实际电源的一种抽象。它的端钮电压总能保持规定的恒定值或时间函数值,而与通过它的电流无关。也就是说,电压源两端电压总是一定的,而电流可以是任何值,其大小不取决于电压源本身,而取决于外电路的情况。提供恒定电压的电压源称为直流电压源。提供一定时间函数的电压源称为随时间变化的电压源,如正弦电压源、方波电压源等等。电压源的电路符号如图 1-29 所示。其中(a)用电池的符号专门表示直流电压源,(b)表示一般电压源,它既可表示随时间变化的电压源,也可表示直流电压源。在电路分析中,恒定的量常用大写字母表示,随时间变化的量常用小写字母表示。有时小写字母也可以表示恒定量,但大写字母一般不表示随时间变化的量。电压源元件端钮的伏安关系可写为

$$U = U_s \quad (1-22a)$$

I 为任意值

$$u = u_s(t) \quad (1-22b)$$

i 为任意值

或

由式(1-22a)和式(1-22b)可知,电压源端钮的伏安关系在 u, i 平面上的表示是一条(对直流电压源而言)或无数条(对随时间变化的电压源而言)与 u 轴垂直的直线,如图 1-30 所示。

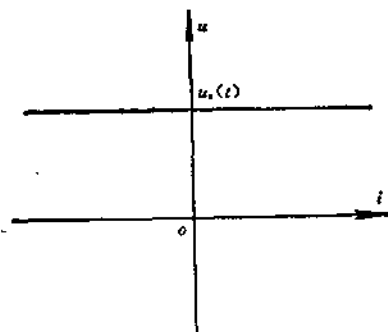


图 1-30 电压源的伏安关系曲线

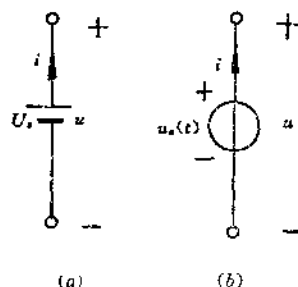


图 1-29 电压源

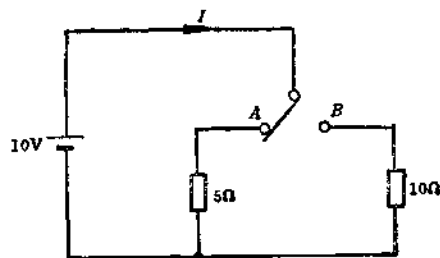


图 1-31 例 1-10 电路图

例 1-10 分别求出图 1-31 中开关在位置 A 和 B 时的电流 I 。

解 (1) 开关在位置 A 时,根据欧姆定律可得