

习题	587
第 18 章 傅里叶电路分析	595
18.1 引言	595
18.2 傅里叶级数的三角形式	595
18.2.1 谐波	595
18.2.2 傅里叶级数	597
18.2.3 一些有用的三角积分	598
18.2.4 傅里叶系数的计算	598
18.2.5 线谱和相位谱	602
18.3 对称性的应用	603
18.3.1 偶对称和奇对称	603
18.3.2 对称性和傅里叶级数项的关系	604
18.3.3 半波对称性	605
18.4 周期激励函数的完全响应	607
18.5 傅里叶级数的复数形式	609
18.5.1 采样函数	613
18.6 傅里叶变换的定义	614
18.7 傅里叶变换的性质	617
18.7.1 傅里叶变换的物理意义	618
18.8 几个简单时域函数的傅里叶变换对	620
18.8.1 单位冲激函数	620
18.8.2 直流激励函数	622
18.8.3 符号函数	622
18.8.4 单位阶跃函数	623
18.9 一般周期时域函数的傅里叶变换	624
18.10 系统函数和频率响应	626
18.11 系统函数的物理意义	631
18.11.1 本节小结	633
18.12 小结与复习	634
习题	635
附录 A 网络拓扑简介	642
附录 B 联立方程求解	652
附录 C 戴维南定理的证明	659
附录 D PSpice 指南	661
附录 E 复数	667
附录 F MATLAB 简介	676
附录 G 拉普拉斯变换的补充定理	680
附录 H 题号为单数的习题答案	686

第 1 章 电路分析和电气工程

1.1 引言

今天的工科毕业生不仅将从事工程技术设计,他们的作用已超出先进计算机和通信系统的研究领域,进入到解决社会经济问题的范畴,如空气和水污染治理、城市规划、公共交通、新能源开发、自然资源(特别是石油和天然气)保护等

为了解决这些工程问题,工程师必须掌握包括电路分析在内的许多技术,如果已经或打算学习电气工程专业,电路分析将是先导课程。可是如果选择其他工程专业,电路分析也许就是有关电气工程方面的主要课程。电路分析的学习使得在电子学、仪器和其他领域的学习更加有效。最重要的是它为拓宽知识面提供了可能,使学生将来成为开发某种电子器件和电气系统的小组中见多识广的成员。只有大家都熟悉所用的语言和定义,小组成员之间才能有效地交流。

本章是对本书将要涉及题目的预览,简要讨论了分析与设计的关系,以及现代电路分析中计算机工具的作用。

1.2 本书概要

本书研究的题目称为线性电路分析,有些读者可能立刻会问“什么是非线性电路分析?”我们每天都会碰到非线性电路:电视和收音机信号的接收和解码;微处理器中每秒百万次的运算;电话中语音到电信号的转换。既然非线性电路如此广泛,也许问题应该改为,“为什么要学习线性电路呢?”

各行各业的工程师在解决迥然不同的各类问题时所采用的基本方法与上述似乎幼稚的问题紧密相连。一个简单的事实是没有哪个物理系统(包括电路)是完美的线性系统。所幸的是,大多数系统在一定范围内呈现出近似的线性。例如,如果能以每 5 分钟 1 页的速度阅读这本书,那么用半小时将能够读完 6 页书。不用多加思考,只要连续不停顿地阅读,任何人都将在 8 小时 20 分钟内读完 100 页。

线性问题本质上比非线性问题容易解决。因此,作为工程师常常为物理现象寻找合理而精确的线性近似。这种方法不仅速度快,而且往往提供了可以直觉地理解决定系统性能的关键因素。在以下各章里所遇到的电路都是实际电路的线性近似。在适当的时候,会对潜在的误差或模型的局限性进行简单讨论,但一般说来,这种近似对大多数应用已足够精确了。当实际需要更高精度时,可以采用非线性模型——这将显著增加解题的复杂性。

线性电路分析可以分为三个大类:电阻电路分析、时域分析和频域分析。本课程将从电阻电路开始,它包括一些简单的例子,如闪光灯和烤面包机。这提供了很好的机会去学习许多强有力的工程电路分析方法,比如节点分析、网孔分析、叠加原理、电源变换、戴维南

定理、诺顿定理以及几种串并联电路元件的替代方法。电阻电路的惟一特点是任何时间相关性不影响分析过程。这样如果要求出某一时刻的参数值,不必对电路做所有时刻的分析。

学习的第二步集中在时域分析,即允许在电路中包含电容和电感。因为这些元件的电压-电流关系是以积分和导数定义的,这类电路在不同时刻表现得很不相同(尽管很容易预测)。在分析过程中,一般要求所得到的表达式适用于所有时间,好在所有以前学习的方法都适用于时域电路分析。

直接处理时域分析中得到的微分方程,有助于对含储能元件(电容和电感)电路的工作过程有直观的理解。然而正如下面将要看到的那样,即便是含有很少元件的电路在分析中可能也会相当麻烦,所以已经发展出很多直接而有效的方法。这些方法构成了频域分析的基础,将微分方程转化为容易处理的代数方程。利用这种方法还能设计出对特定频率有指定响应的电路。日常生活中,当用收音机选择喜欢的电台、使用蜂窝电话或连接互联网时,都在使用频率相关的电路。

1.3 电路分析与工程的关系

即使对于那些完成本课程后不打算继续做电路分析的人来说,下面将要学习的方法也是非常有价值的。电路分析是一门学习怎样分析问题的课程。重要的是学习如何:

- 变得有条理
- 判断一个问题的目标
- 用已给的信息制定解决问题的计划
- 完成计划并得出结果

最后:

- 证明所得结果是准确的

因此,尽管这门课似乎主要是与电子打交道,实际上它是在培养一名工程师必备的分析技巧。

熟悉诸如液体流动、机车悬置系统、桥梁设计、供应链管理和过程控制等工程题目的学生将会发现,这里建立的许多描写各种电路行为的方程与其他课程中的方程具有共同形式。只需学会怎样“翻译”有关的变量(例如,用力替换电压、距离替换电荷、摩擦系数替换电阻等),就知道了怎样处理其他类型的问题。只要注重培养对事物的直观理解,而不是简单地翻书,直到找到一个似乎可用的公式,就完全可以做到这一点。在现实生活中,没有写在书背而的答案,常常会遇到从未有人解决过的问题。但这正是工程师的工作!事情往往是,如果有了解决类似或有关问题的经验,直觉会引导人们找到一个全新问题的答案。

本书的内容是后续电气工程课程的基础。电子学研究依靠对二极管和晶体管电路的分析,用二极管和晶体管可以组成电源、放大器和数字电路。本书所要培养的技巧是被电子工程师熟练而系统应用的方法,有时他们甚至不用笔就可以分析一个复杂电路!本书有关时域和频域的章节将话题直接引向信号处理、输电、控制理论和通信的讨论。研究发现,频域分析是一种特别有效的方法,很容易用于时变激励下的任何物理系统。

1.4 分析和设计

每当有问题需要解决时人们便会找工程师。工程师对各种科学原理有基本的认识,结合一些常用数学语言表达的实际知识以及少量创造性(有时是很多创造性),找到解决方案。许多电路问题只要求分析感兴趣的参数,如:电压、电流或功耗。随着电路复杂性的增加,常常发现,确定几个求解解答所需的公式并不难,但是要得到其余公式将是一个很大的挑战。正是因为这一点,需要有过人的分析技能。

一旦完成分析,问题的答案可能是显而易见的。例如,在电路板上焊接一个关键元件时,发生意外短路,引起设备可观测到的故障状况(例如,冒烟)。这时的解决办法也许只要简单地去掉这个元件,焊上一个替代元件(比第一次仔细一点)就行了。可是工程问题常常需要一些新的创造。如果搁浅在一个荒芜的岛上而仅有一架收音机,则必须利用收音机里的元件设计出一个新电路,发射求救信号。与培养设计技能相比,培养分析技能显得更为重要。

本书致力于培养分析和解决问题的能力,因为这是每个工程应用的出发点。分析和设计之间的一个关键区别是,在分析电路时,希望有一个惟一的答案作为一个通用规则。而设计一般没有惟一的方案。例如,让几个人设计一座房子,有人可能用砖,有人用木头,有人会设计一个二层的寓所,还有人会选择一个简易的村舍。即使严格规定设计规格,每个人仍然可能会给房子涂上不同的颜色!

在本书每章末尾的习题里,大家将有机会自己动手设计。

1.5 计算机辅助分析

用计算机解决电路分析中出现的方程决不是什么新东西。早在机械计算机时代,在对电路、行星运动、经济学和许多其他领域的研究中就迫切希望使用能够迅速求解各种方程的计算机,如 Charles Babbage 在 19 世纪早期到中期设计的“分析引擎”(Analytical Engine)。在电子管时代,比如 ENIAC 计算机,为利用高速计算机求解复杂方程开辟了一条道路。晶体管和随后的集成电路技术的发展使得精确分析日益复杂的系统成为可能。可是,随着个人计算机的发明,计算机辅助电路分析已发展成一个非常有价值的日常工具,它不仅是分析,而且是设计工作的一个组成部分。

计算机辅助设计的最强有力的表现之一是最近实现的对用户透明的多任务集成。这样在计算机屏幕上就可以很快画出电路图,并自动还原为分析程序(如将在第 4 章介绍的 SPICE)所要求的格式。其输出结果自动传递给第三个程序,以便对描述电路的各种感兴趣量进行绘图。这样工程师只要画个草图,按几个按键,就能确定一个复杂电路的工作是否符合期望。现代电路分析软件正迅速提高集成化水平,最终目标是,人们只要坐在计算机终端前,画出电路图,分析电路并确认其性能,再按几下按键,就能得到制造完成的电路样品,然后测试!

在这里要奉劝读者,电路分析软件决不能替代传统的纸加笔式的良好分析方法,这有很多原因。需要对电路工作有透彻理解,以培养设计电路的能力。运行某个软件包就可得到一个简单问题的答案,但这就像依靠看录像去学钢琴一样,学会几个音节甚至一首短歌,但不大可

能有人愿意听他的演奏。另一个原因是,程序往往有错,更为常见的是,用户往往会输入错误。如果不知道结果会发生什么,那些错误会不知不觉地留下,到发现时已经太晚了。可是,与人的近似分析相结合,这样的软件包具有更细致的电路分析能力。结果将是减少重复性工作,从而可以将更多时间集中到工程细节上。

1.6 解题制胜策略

当被问及什么是电路分析中最令人头痛的部分时,绝大多数同学的回答是对一个习题如何下手。第二困难的事情是怎样得到一组完整的方程,并将它们组织成便于管理的形式。

基本直觉往往是快速阅读题目内容,紧接着搜索适合的方程。人们习惯于给定圆的直径求其周长或是确定一个棱锥体的体积。

制定解题制胜策略要靠实践,也需要相当的耐心、专注和决心。尽管快速解题方法是吸引人的,但从长远看,始终如一的系统解题方法才是更可取的。

假定眼下已具备了耐心、专注和决心,并保证要进行实践,要制定这个十分重要的解题步骤应从哪里开始呢?

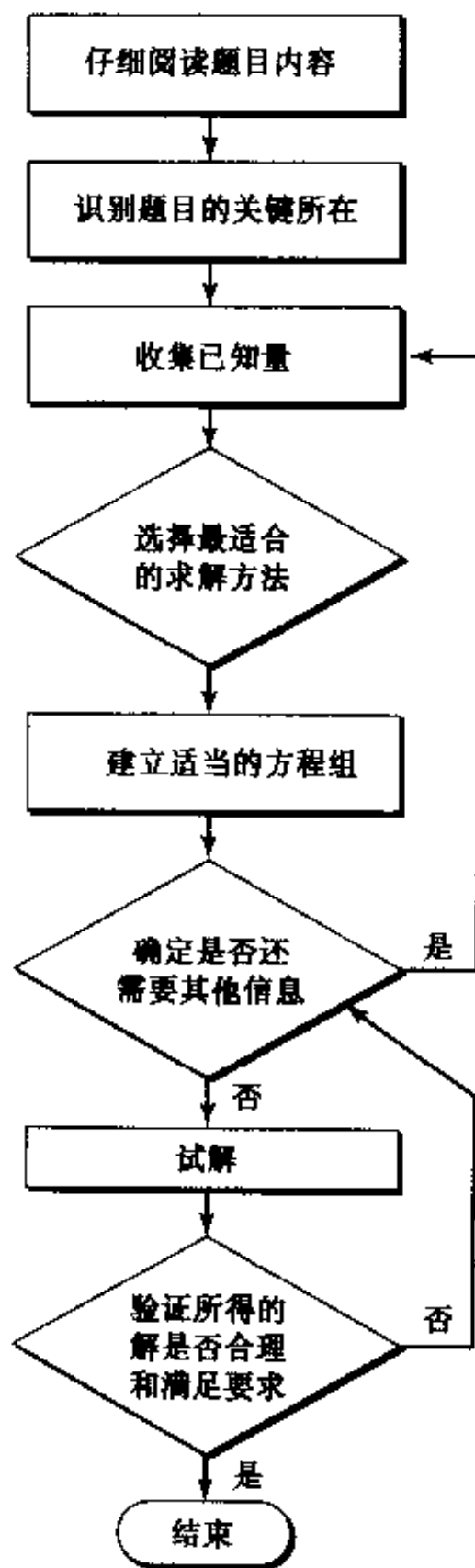
本页右侧的流程图是设计用来帮助解决最常见的两个困难:习题入手和解答安排。有的步骤似乎是显然的,但正是每个任务的次序安排以及完成情况才决定成功与否。

仔细阅读题目内容是习题入手的最好方法。辨别出特定目标是决定性的,它往往是选择某个分析方法而不是选择另一个方法的直接原因。一旦收集到已知量并拿出了解决方案,下一步就是按照本书提供的步骤去建立合适的方程组。如果变量太多或者问题的目标不能通过解这些方程达到,就应寻找额外的信息或寻找其他更合适的方法。最后,如果答案不正确,还需重复上述过程。

可是电路分析成功的关键是实践。经验是最好的老师,一名成功工程师的成长离不开从错误中积累经验。

1.7 推荐阅读

G. Polya, *How to Solve It*, Princeton University Press, 1971. ISBN: 0691023565——这是一本世界著名的畅销书,价钱不贵,它能教会读者在似乎不可能解决的习题面前如何制定取胜的策略。



第2章 基本元件和电路

本章要点:

- 基本电量的定义和有关单位
- 对电荷、电流、电压和功率之间关系的理解
- 运用无源符号规则的能力
- 受控及独立电压源和电流源介绍
- 电阻的详细性质和欧姆定律

2.1 引言

先来考虑单位制及几个基本定义和规则。为了解电路怎样工作,首先看看几个不同的电路元件:电压源、电流源、电池和电阻。还应了解电压、电流和功率的概念,因为这些是通常要求的物理量。在开始讲解之前要简单提醒大家,标注电压时,要仔细注意“+”号和“-”号,定义电流时要注意箭头的意义,这往往是产生错误的原因。

2.2 基本单位和单位扩展

为了表示某一可测量的量,不仅要给出它的值,还要给出单位,比如“3 英寸”。幸好大家都使用同一种数制。对单位来说却不是如此,必须花一点时间熟悉有关的单位制。必须遵守一个标准单位并保证它的持久性和广泛性。例如,标准长度单位不应定义为某种橡胶带上两个标记之间的距离,因为它不能持久,而且每个人都有自己的标准。

关于单位制可选择的余地很小。本书采用美国国家标准局于 1964 年所采用的单位制。它为所有主要专业工程协会所采用,也是当今教科书所采用的单位制。这就是国际单位制(在各种语言中一律简写为 SI),它于 1960 年被国际度量衡会议所采纳。从那以后国际单位制经过数次修订,它建立在 7 种基本单位的基础之上:米、千克、秒、安培、绝对温标、摩尔和坎德拉(见表 2.1)。这是“公制”单位,其中有几种单位,尽管现在在美国还未广泛使用,但在大多数技术先进国家已广泛使用。其他量的单位,像体积、力、能量等都是从这 7 个基本单位里导出的。功或能量的基本单位是焦耳(J)。1 焦耳(在国际单位制里为 $1 \text{ kgm}^2\text{s}^{-2}$)等价于 0.737 6 英尺-磅力(ft-lbf)。其他能量单位包括卡路里(cal),1 卡路里等于 4.187 J。英国热量单位(Btu)是 1 055 J。1 千瓦时(kWh)等于 $3.6 \times 10^6 \text{ J}$ 。功率定义为做功或能量消耗的速率。功率的基本单位是瓦(W),定义为 1 J/s。1 瓦等价于 0.737 6 ft-lbf/s 或 1/745.7 马力(hp)。

国际单位制用 10 进制将较大和较小的单位与基本单位相联系,用词冠指明 10 的各次幂。表 2.2 列出了词冠及其相应的符号。

表 2.1 国际单位制的基本单位

基本量	名称	符号
长度	米	m
质量	千克	kg
时间	秒	s
电流	安培	A
热力学温度	开尔文	K
物质的量	摩尔	mol
光强度	坎德拉	cd

表 2.2 国际单位制词冠

因数	名称	符号	因数	名称	符号
10^{-24}	yocto	y	10^{24}	yotta	Y
10^{-21}	zepto	z	10^{21}	zetta	Z
10^{-18}	atto	a	10^{18}	exa	E
10^{-15}	femto(飞)	f	10^{15}	peta	P
10^{-12}	pico(皮)	p	10^{12}	tera(太)	T
10^{-9}	nano(纳)	n	10^9	giga(吉)	G
10^{-6}	micro(微)	μ	10^6	mega(兆)	M
10^{-3}	milli(毫)	m	10^3	kilo(千)	k
10^{-2}	centi(厘)	c	10^2	hecto(百)	h
10^{-1}	deci(分)	d	10^1	deka(十)	da

这些词冠值得记住,因为它们不仅经常出现在本书中,而且还经常出现在其他科技图书中。几个词冠的结合(如毫微秒)是不能接受的。值得指出的是:在距离的术语中,专有词“micron(μm)”比衍生词“micrometer”更常见,而 10^{-10} 米常用埃($\text{\AA}$)表示。在电路分析和一般工程中,往往用所谓的“工程单位”来表示数值。在工程表示法中,某个量被表示为介于 1~999 之间的数字和一个适当的千进制的公制单位。例如,人们更愿意将 0.048 W 表示成 48 mW,而不是 4.8 cW, 4.8×10^{-2} W 或 48 000 μW 。

练习

- 2.1 KrF 激光器发射的光波长为 248 nm。它等同于:(a) 0.024 8 mm;(b) 2.48 μm ;
(c) 0.248 μm ;(d) 24 800 $\text{\AA}$ 。
- 2.2 在某一数字集成电路中,逻辑门从开态转到关态的时间为 1 ns。这对应于:(a) 0.1 ps;
(b) 10 ps;(c) 100 ps;(d) 1 000 ps。

答案:2.1 (c);2.2 (d)

2.3 电荷、电流、电压和功率

2.3.1 电荷

电路分析中的一个最基本概念就是电荷守恒。从基本物理学知道,存在两种电荷:正电荷(对应质子)和负电荷(对应电子)。在本书的大部分电路场合下,电子流动占主导地位。有许多器件(如电池、半导体二极管和晶体管)正电荷的运动对于理解器件内部的工作原理是很重要的,但是在器件之外,一般关心的是电子在连接导线上的流动。尽管电荷在电路的不同部分

之间转换,但电荷总量不受影响。换句话说,当电路工作时,电子(或质子)既没有被产生,也没有被消灭⁽¹⁾。流动的电荷表现为电流。

在国际单位制里,电荷的基本单位是库仑(C)。库仑是借助于电流单位(安培)来定义的,电流是指在1秒钟内通过任意截面导线的电荷量;1库仑规定为运载1安培电流的导线每秒钟流过的电荷量(见图2.1)。在这种单位制里,单个电子的电荷量为 -1.602×10^{-19} C,单个质子的电荷量为 $+1.602 \times 10^{-19}$ C。

从表2.1可见,国际单位制的基本单位不是从基本物理量导出的,而是与历史上的测量相一致。这有时可能导致似乎逆向的定义。如根据物理意义应该用电子电荷来定义电流。

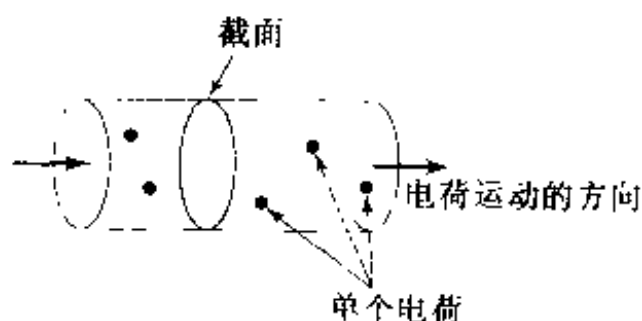


图2.1 流过导线的电荷和库仑定义的图解

不随时间变化的电荷量一般用 Q 表示。瞬时电荷量(可能随时间、也可能不随时间变化)通常用 $q(t)$ 来表示,或简记为 q 。在本书以下所有部分都遵从这个约定:大写字母保留做常(时不变)量,而小写字母表示更一般的量。这样,常数电荷可以表示为 Q 或 q ,但是随时间变化的电荷必须用小写字母 q 表示。

2.3.2 电流

“电荷传输”或“电荷运动”的概念对学习电路的人来说是至关重要的,因为电荷从一处移动到另一处,就伴随着能量从一处移动到另一处。人们熟悉的跨越区域的电力输送线就是传递能量装置的一个实例。同样重要的是改变电荷传输速率的可能性,而电荷是用来传递信息的。这个过程是诸如无线电广播、电视和测距的基础。

在一定的路径上,如金属线、呈现的电流,不仅有数值,还有方向。电流是以特定方向流经指定参考点的电荷运动的速率之量度。

一旦规定了参考方向,可以让 $q(t)$ 等于从任意时刻($t=0$)以来,以规定方向通过参考点的总电荷量。负电荷以规定方向运动,则形成负电流;正电荷以相反方向运动也形成负电流。例如,图2.2表示流经一段导线(比如图2.1中那样的导线)中给定参考点的电荷总量随时间变化的情况。

定义在特定位置、特定方向的电流为净的正电荷流经该点的瞬时速率。遗憾的是,直到后来才意识到这个被广泛使用的定义是不正确的,实际上电流是由负电荷而不是正电荷的流动产生的。电流用 I 或 i 来表示,所以:

$$i = \frac{dq}{dt} \quad (2.1)$$

电流的单位是以法国物理学家安培(A. M. Ampere)命名的。安培(A)常常缩写为“amp”,不过

(1) 偶尔的钋烟情况也许另当别论。

这种写法并不是公认的。

利用式(2.1)计算瞬时电流,可得到图 2.3。使用小写字母 i 是因为它是瞬时值;大写字母表示常(时不变)量。

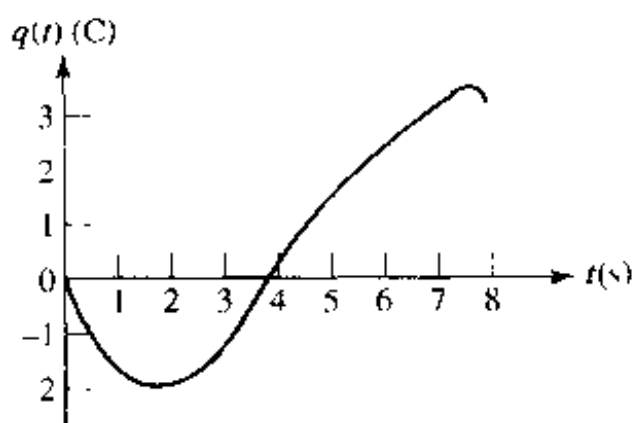


图 2.2 $t=0$ 之后通过给定参考点的总电荷 $q(t)$ 的瞬时值

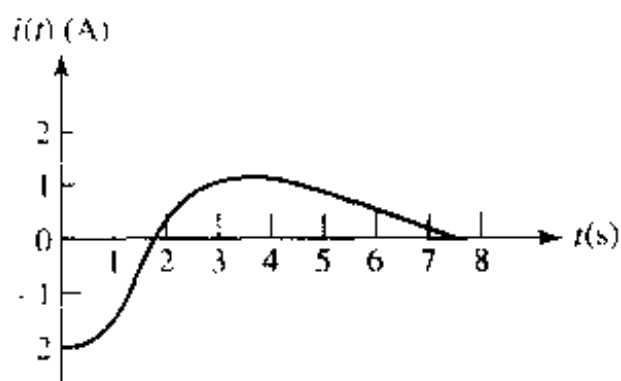


图 2.3 瞬时电流 $i = dq/dt$, 其中 q 在图 2.2 中给出

从 t_0 到 t 传输的电荷可以表示为定积分:

$$\int_{q(t_0)}^{q(t)} dq = \int_{t_0}^t i dt'$$

在上式中加上直到时刻 t_0 所传输的电荷 $q(t_0)$ 就得到直到时刻 t 的总电荷:

$$q(t) = \int_{t_0}^t i dt' + q(t_0) \quad (2.2)$$

图 2.4 中显示了几种不同类型的电流。不随时间变化的电流称为直流电流,简称为 DC(或 dc),如图 2.4(a) 所示。将会发现许多随时间按正弦变化的电流的实例[图 2.4(b)],普通民用电路中的电流就是这种类型。这种电流通常称为交流电流或 AC。以后还将遇到指数电流和衰减正弦电流[见图 2.4(c) 和图 2.4(d)]。

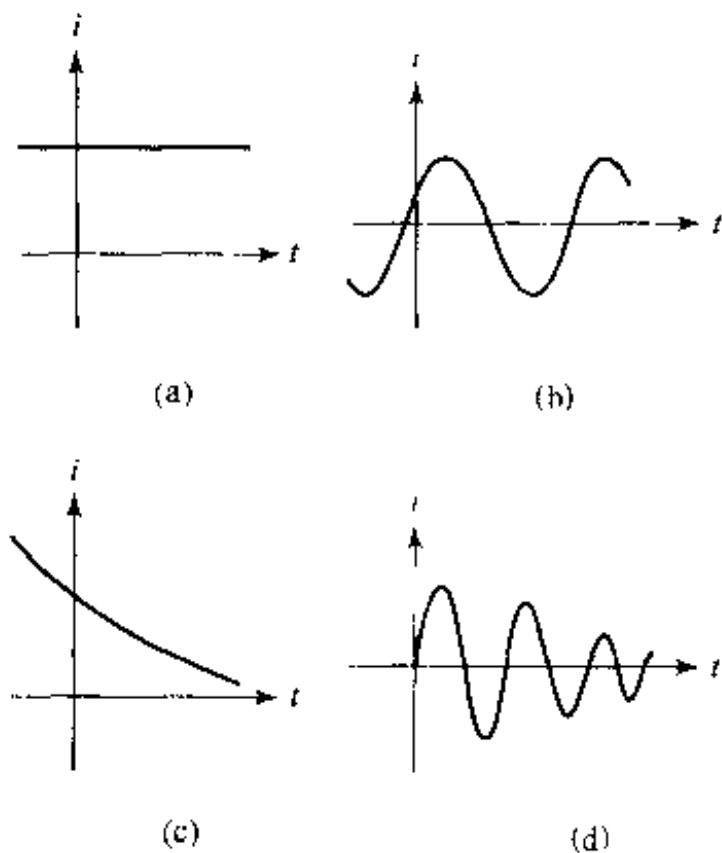


图 2.4 几种电流类型:(a) 直流;(b) 正弦电流;
(c) 指数电流;(d) 衰减的正弦电流

可以用导体附近的箭头来表示电流。图 2.5(a) 中的箭头和数值 3 A 表示净正电荷正以 3 C/s 的大小向右移动,或者净负电荷以 -3 C/s 的大小向左移动。图 2.5(b) 中也是两种可能,

要么 -3 A 流向左边,要么 $+3\text{ A}$ 流向右边。所有上述四句话和两张图表示的电流在电效应上是等效的,称它们相等。一个更容易想像的非电类的分析是将电流设想为个人储蓄账户:一笔存款可以认为是负的现金流出你的账户,或者正的现金流入你的账户。



图 2.5 相同电流的两种表示法

尽管金属导体中的电流是源于电子运动,可是把电流看做正电荷的运动很方便。在电离化气体、电解质以及某些半导体材料中,正电荷的运动构成部分或全部的电流。所以电流的两种定义都只能部分地符合电流的物理性质。我们应该采用电流的标准定义和符号。

必须认识到电流箭头并不表示实际的电流方向,它不过是一个约定,以免在讨论“导线中的电流”时产生歧义。箭头是电流定义中的一个基本方面!讨论电流 $i_1(t)$ 的数值而没有规定方向就等于讨论没有定义的东西。例如图 2.6(a) 和图 2.6(b) 表示的 $i_1(t)$ 是无意义的,而图 2.6(c) 是 $i_1(t)$ 的确切表示。

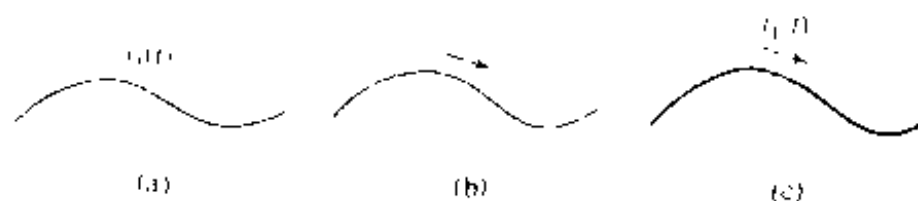


图 2.6 (a),(b)不完全、不适当和不正确的电流定义;(c) $i_1(t)$ 的正确定义

练习

2.3 在图 2.7 的导线中,电子从左向右移动产生 1 mA 的电流,请确定 I_1 和 I_2 。

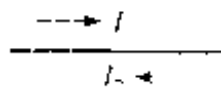


图 2.7

答案: $I_1 = -1\text{ mA}$; $I_2 = +1\text{ mA}$

2.3.3 电压

现在开始讨论电路元件,最好从一般性定义开始。诸如,保险丝、灯泡、电阻、电池、电容、发电机和火花线圈,都可以表示为简单电路元件的组合。用一个无定形物体表示一般的电路元件,它有两个可以连接其他元件的端点(见图 2.8)。

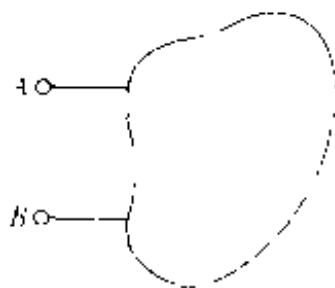


图 2.8 一般两端电路元件

元件有两条供电流流进或流出的通路。以下讨论具体电路元件,其特性可以通过观测端点上的电特性来描述。

在图 2.8 中假定直流电流进入端点 A , 通过整个元件, 又从端点 B 回来。同时假定, 推动电荷流过元件需要消耗能量。所以在两个端点之间存在电压(或电势差), 即电压跨接在元件上。这样, 跨接在一对端点上的电压是推动电荷流过元件所需做功的度量。电压的单位是伏特, 1 伏特就是 1 J/s 。电压用 V 或 v 表示。

电压可以存在于—对电极之间, 电极之间可以有、也可以没有电流流过。例如, 无论有没有东西接到电极上, 汽车电池的两极之间都有 12 V 电压。

按照能量守恒原理, 迫使电荷穿过元件所花费的能量必定在别处出现。在以后遇到电路元件时会注意到, 那些能量或是以某种形式储存起来并可以方便地以电的形式获得, 或者以不可逆形式转变为热、声或其他非电形式。

现在必须建立—种约定, 通过选择电极 A 相对于电极 B 的电压符号, 以区分提供给元件的能量和元件所提供的能量。如果正电流流进元件电极 A , 外加电源肯定要花费能量以建立这—电流, 那么电极 A 相对于电极 B 的电压为正。或者说也可以说电极 B 相对于电极 A 的电压为负。

电压的意义由—对正负代数符号来表示。例如, 在图 2.9(a) 中, 将电极 A 标为正号(+), 表示电极 A 相对于电极 B 的电压为正 v 伏特。如果后来发现 v 的数值正巧是 -5 V , 可以说 A 相对于 B 是 -5 V , 或者说 B 相对于 A 是正 5 V 。其他情况示于图 2.9(b), 图 2.9(c) 和图 2.9(d)。

正像在定义电流时注意到的, 必须认识到代数符号的正负并不表明电压的实际极性, 这不过是一种约定, 使得讨论“加在电极两端的电压”时不至于产生混淆。注意, 任何电压的定义必须包含—对正负号! 如果只给出变量 $v_1(t)$ 的大小而未标出正负号的位置, 就如同使用未定义的量。图 2.10(a) 和图 2.10(b) 不能用做 $v_1(t)$ 的定义; 图 2.10(c) 是正确的。

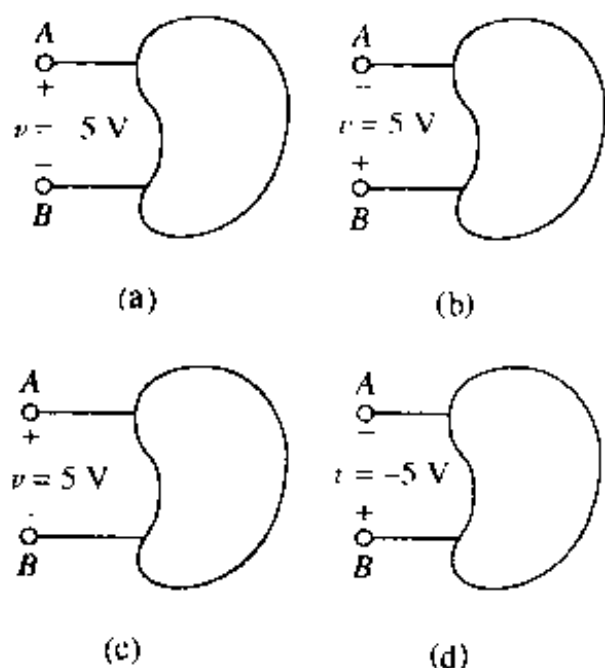


图 2.9 (a), (b) 端点 B 相对于端点 A 为正 5 V ; (c), (d) 端点 A 相对于端点 B 为正 5 V

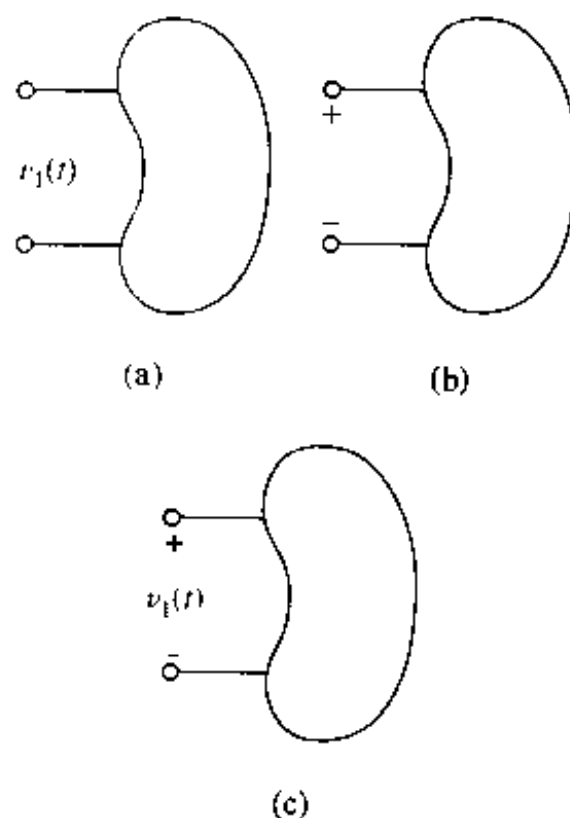


图 2.10 (a), (b) 不正确的电压定义; (c) 正确定义不仅包含变量符号, 还包含—对正负号

练习

2.4 对于图 2.11 中的元件, $v_1 = 17 \text{ V}$ 。求 v_2

答案: $v_2 = -17 \text{ V}$

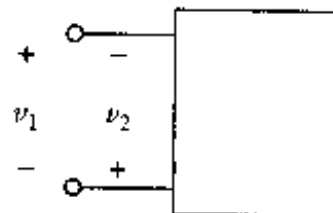


图 2.11

2.3.4 功率

现在需要用电路元件两端的电压和流过它的电流来确定该元件所吸收的功率。我们已经从能量消耗的角度对电压做了定义,功率则是能量消耗的速率。可是只有确定了电流的方向,才能说出图 2.9 中发生的 4 种能量传递过程。假定每个元件的上半部的导线都存在指向右边的电流,标为“+2 A”。因为在图 2.9(c) 和图 2.9(d) 中都是 A 端的电位高于 B 端 5 V,还因为正电流从 A 端进入,所以有能量提供给元件。在余下的两种情况中,元件提供能量给外部元件。

我们已经定义了功率,并用 P 或 p 表示。假定在 1 秒钟内 1 焦耳能量通过某个元件被传递,那么能量传递的速率就是 1 瓦特。所吸收的能量必定正比于每秒钟传递的电荷量(电流),而且也正比于传递 1 库仑电荷所需的能力(电压)。因而:

$$p = vi \quad (2.3)$$

从量纲上讲,上式右端为焦耳每库仑和库仑每秒,即瓦特。在图 2.9 中每个上端标出向右的电流箭头,大小为 2 A,图 2.9(c) 和图 2.9(d) 中元件吸收的能量为 10 W;而图 2.9(a) 和图 2.9(b) 中吸收的能量为 -10 W(或产生了 10 W)。电流、电压和功率的约定如图 2.12 所示。

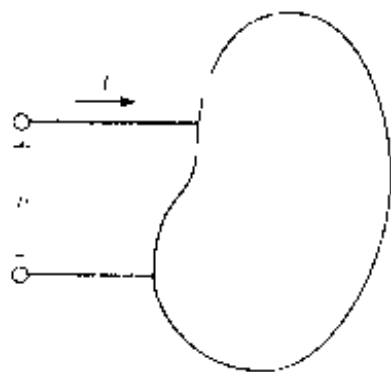


图 2.12 元件吸收的功率由乘积 $p = vi$ 给出。或者换一种说法,元件产生或提供的功率为 $-vi$

图 2.12 说明,如果元件的一端比另一端电位高 v 伏特,如果电流 i 从元件的第一端进入,那么元件吸收的功率为 $p = vi$;同样也可以说,提供给元件的功率为 $p = vi$ 。如果电流箭头的方向为进入带正号的一端,就满足无源符号规则。应当仔细地研究、理解和记住这一规则。换句话说,如果这样安排电流箭头和电压极性,即电流进入标有正号电压的元件一端,那么元件吸收的功率可以表示为给定电压和电流变量的乘积。如果乘积的数值为负,那么说元件吸收负功率,或者,实际上元件产生功率,并且将功率提供给其他外部元件。例如在图 2.12 中, $v = 5\text{ V}$, $i = -4\text{ A}$, 元件可以被描述为吸收 -20 W 功率,或产生 20 W 功率。

当做一件事情有多种方法时,才需要规则,当两组不同的人试图交流时就会产生混淆。例如,将地图的上方总是标为北是相当任意的,指北针并不是任何时候都指向上方。而且,如果同一个习惯将地图上部标为南的人进行交流,可想而知会发生什么样的混乱! 同样,IEEE^①建立的通用规则是,无论元件是提供还是吸收功率,总是将电流的方向画为指向进入正电压一端。这一规则并不错,但是有时导致电路图中与直觉相反的电流。更自然的方法应当是将正电流标成流出一个电压或电流源,为一个或多个电路元件提供正功率。

① Institute of Electrical and Electronics Engineers, 电气与电子工程师协会。

例题 2.1 计算图 2.13 中每一部分的吸收功率

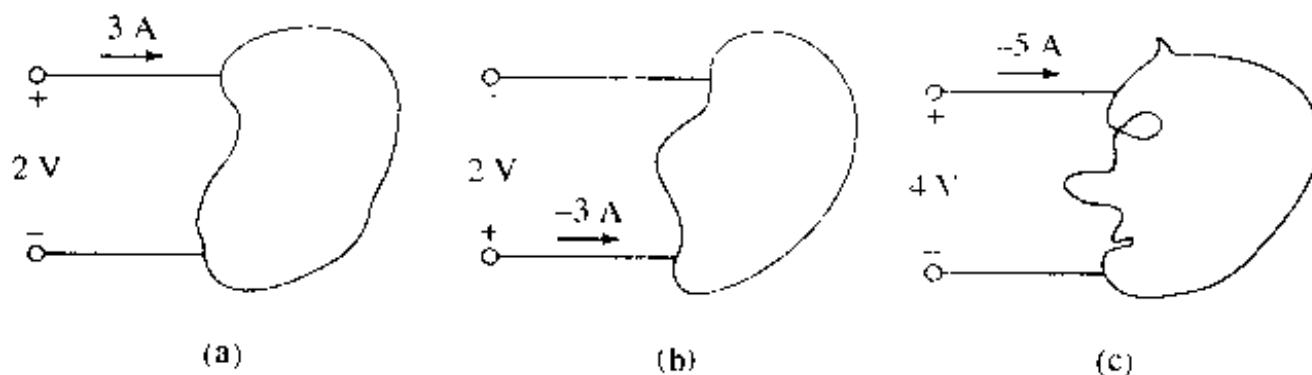


图 2.13 (a), (b), (c) 双端元件的 3 个例子

在图 2.13(a) 中, 参考电流的定义与无源符号规则一致, 它假定元件吸收功率。给定 +3 A 电流流入正参考端, 求得:

$$P = (2 \text{ V}) \times (3 \text{ A}) = 6 \text{ W}$$

功率被元件吸收。

图 2.13(b) 中, 示出了稍微不同的情况, 现在电流是 -3 A 流入正参考端。可是电压定义为负。由此得出吸收功率为:

$$P = (-2 \text{ V}) \times (-3 \text{ A}) = 6 \text{ W}$$

从中可见这两种情况实际上是等效的。在改变了某一端为正之后, 必须将原来的电压乘以 -1。+3 A 电流从上端流入等同于 -3 A 电流从下端流出。

参见图 2.13(c), 再次应用无源符号规则, 求得吸收功率为:

$$P = (4 \text{ V}) \times (-5 \text{ A}) = -20 \text{ W}$$

因为得到的吸收功率为负, 这说明图 2.13(c) 的元件实际上是提供 +20 W 功率的 (即它是能量源)。

练习

2.5 求图 2.14(a) 中电路元件吸收的功率

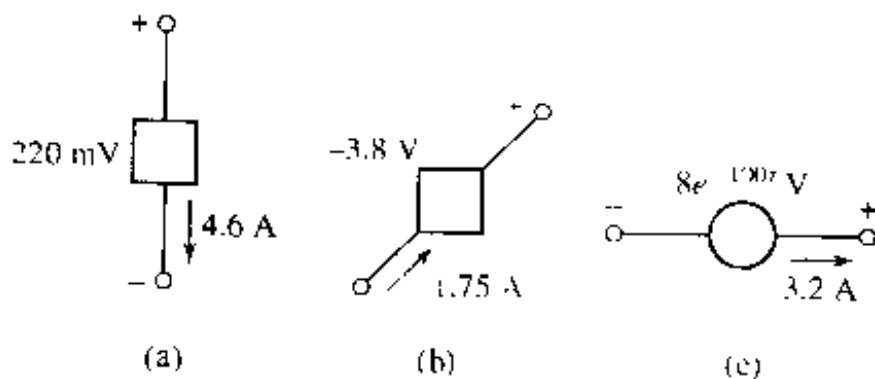


图 2.14

2.6 求图 2.14(b) 中电路元件产生的功率。

2.7 求图 2.14(c) 中, 在 $t = 5 \text{ ms}$ 时提供给电路元件的功率。

答案: 1.012 W; 6.65 W; -15.53 W

2.4 电压源和电流源

利用电流和电压的概念, 现在可以更确切地定义“电路元件”了。

重要的是区分物理器件本身和用来分析其电路特性的数学模型。模型只是一种近似。

下面用“电路元件”来表示元件的数学模型。为实际器件选择某种模型,必须根据实验数据或经验,这里假定已经选出了模型。为简单起见,在初始阶段先考虑由简单模型表示的理想元件组成的电路。

所有简单电路元件可以按照流经元件电流与元件两端电压之间的关系来分类。例如,如果元件两端电压线性正比于流经元件的电流,这种元件称为电阻。另一种类型的简单电路元件是,两端电压正比于电流对时间的导数(电感),或正比于电流对时间的积分(电容)。有的元件其电压完全独立于电流,或者其电流完全独立于电压,这些元件称为独立源。还有,需要定义一种特殊电源,它们的源电压或源电流取决于电路中另一处的电流或电压,这种电源称为受控源。受控源广泛用于电子学中以模拟晶体管的直流或交流特性,尤其是在放大器电路中。

按照定义,简单电路元件是两端电器件的数学模型,它的特性完全由其电压-电流关系所决定,且不能再分成为其他两端器件。

2.4.1 独立电压源

将要考虑的第一个元件是“独立电压源”。它的电路符号示于图 2.15(a)中。下标 s 仅仅表示电压为“源”电压,这种方法是常见的,但不是必需的。独立电压源的特点是端电压完全独立于流过它的电流。这样,如果给定一个电压源的端电压为 12 V,那么无论流经的电流是多大,端电压永远如此。

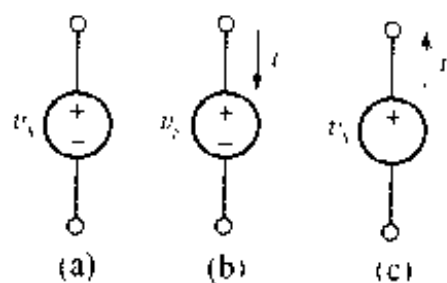


图 2.15 独立电压源的电路符号

独立电压源是一种理想电源,不能严格表示任何实际物理器件,因为理想电源理论上可以提供无限大的能量。可是理想电压源确实提供了几种实际电压源合理的近似。例如,汽车蓄电池有 12 V 端电压,只要流过的电流不超过几个安培,其端电压基本上保持为常数。小电流可以从两个方向流过电池。如果电流为正,且流出电池正端,那么电池为汽车前灯提供功率;如果电流为正,且流进电池正端,那么电池从发电机吸收能量而充电。平常家用电插座也近似于一个独立电压源,提供 $v_s = 115\sqrt{2}\cos 2\pi 60t$ V 的电压(北美),这一近似对小于 20 A 的电流是有效的。

直流电压源和直流电流源被广泛使用,字面上,它们分别表示“直接电流电压源”和“直接电流电流源”。尽管这些术语似乎有些奇怪甚至冗余,但这些术语使用得如此广泛,以至于无法改正。

有一点值得重申,在图 2.15(a)中独立电压源符号上端标注的正号并不一定表示上端电压的数值真的相对于下端为正,它只表示上端电压比下端电压高 v_s 伏。在某些场合, v_s 可能为负,这时上端电压相对于下端电压实际上为负。

设想在图 2.15(b)的电源上端附近标出电流 i ,其方向为进入电源正端,满足无源符号规

则,这样电源吸收功率 $p = v_i i$ 。常见的是电源给网络提供功率而不是吸收功率。因此选择图 2.15(c)中的箭头方向,使 v, i 表示电源提供的功率。这两种箭头方向都可采用,在本书中采用图 2.15(c)中的规则来表示电压源和电流源,它们不是无源元件。

具有常数端电压的独立电压源通常称为独立直流电压源,可以用图 2.16(a)或图 2.16(b)来表示。注意在图 2.16(b)中示出了电池的物理结构,长条板放在正端;这样正负号标注显得多余,但通常都是这样标注的。出于完整性的考虑,图 2.16(c)给出了独立交流电压源的符号。

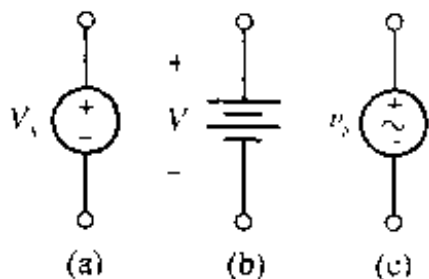


图 2.16 (a)直流电压源符号;(b)电池符号;(c)交流电压源符号

2.4.2 独立电流源

需要的另一个理想电源是“独立电流源”。这里,流过元件的电流完全独立于元件两端的电压。图 2.17 给出了独立电流源的符号,我们称这种电源为独立直流电流源。

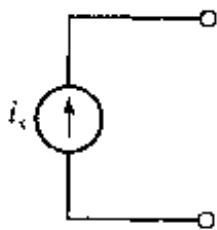


图 2.17 独立电流源的电路符号

像独立电压源一样,独立电流源充其量不过是一种物理元件的合理近似。理论上,它可以提供无限大的功率,因为它在任何端电压下产生相同的有限电流。可是它确实是实际电源的很好近似,尤其是在电子电路中。

2.4.3 受控电源

至此讨论的两种理想电源称为独立电源,因为电源的值不以任何方式受到电路其他部分的影响。这与另一类理想电源——相关源或受控源相反,受控源的值决定于所分析系统某处的电压或电流。这类电源出现在许多等效电路模型中,比如晶体管、运算放大器和集成电路。为区分独立源与受控源,引入图 2.18 中的菱形符号。在图 2.18(a)和图 2.18(c)中, K 是无量纲的标量。在图 2.18(b)中, g 是具有 A/V 单位的标量系数。在图 2.18(d)中, r 是具有 V/A 单位的标量系数。控制电流 i_x 和控制电压 v_x 必须在电路中定义。

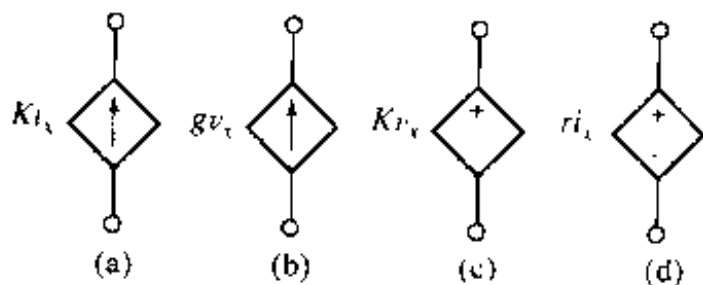


图 2.18 4种受控源类型:(a)电流控制电流源;(b)电压控制电流源;(c)电压控制电压源;(d)电流控制电压源

例题 2.2 在图 2.19(a) 电路中, 已知 v_2 为 3 V, 求 v_L

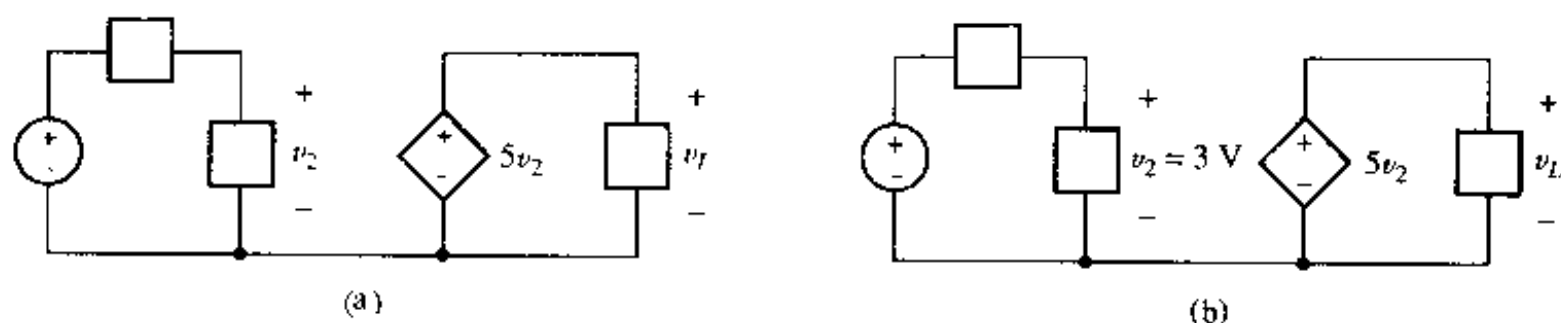


图 2.19 (a) 含有电压控制电压源的电路; (b) 其余信息在图中提供

仔细阅读题意之后, 问题的目标是得到标为 v_L 的电压。

所给电路只标出了一部分, 附加信息为 $v_2 = 3$ V。将它加入到电路中, 得到图 2.19(b)。

下一步, 回头看看收集到的信息。在检查电路过程中, 注意到所求电压 v_L 与受控源的端电压相同。这样:

$$v_L = 5v_2$$

此时, 只要知道 v_2 就可完成问题解答!

回到电路, 实际上确实知道 v_2 , 它为 3 V。如果事先已经将图 2.19(b) 中的受控源的值更新, 就会知道 $v_L = 15$ V。花费一点时间完成电路图的标注总是一种好的投资。通过快速验证可以确信, 答案是正确的。

练习

2.8 求图 2.20 的电路中每个元件所吸收的功率。

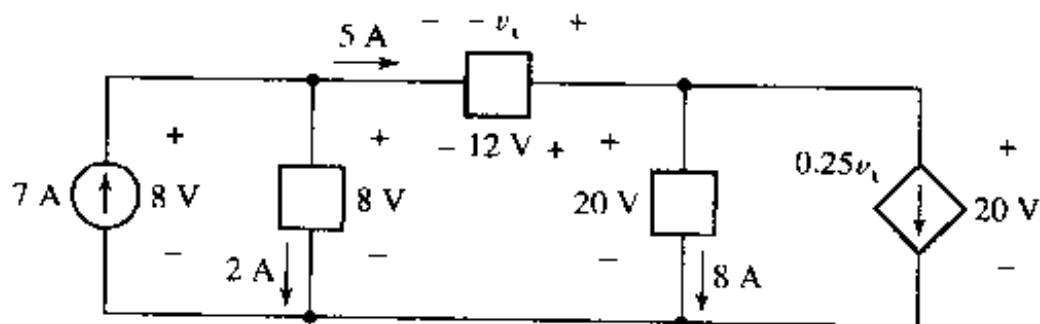


图 2.20

答案: (从左至右) -56 W; 16 W; -60 W; 160 W; -60 W

受控和独立电压、电流源是有源元件, 它们有能力对外部器件提供功率。目前暂且认为无源元件是一种只能接受功率的元件。可是以后将会看到, 有些无源元件能够储存有限的能量, 然后将能量返回给其他外部器件。因为仍然希望称它们为无源元件, 所以必须在以后将原先的两个定义做一些修改。

2.4.4 网络和电路

两个或更多的简单电路元件互相连接就形成电网络。如果网络包含至少一个闭合回路, 那它也是一个电路。注意: 任何电路都是网络, 但不是所有网络都是电路(见图 2.21)!

含有至少一个有源元件的网络(例如独立电压源或电流源)称为有源网络, 不含任何有源元件的网络称为无源网络。

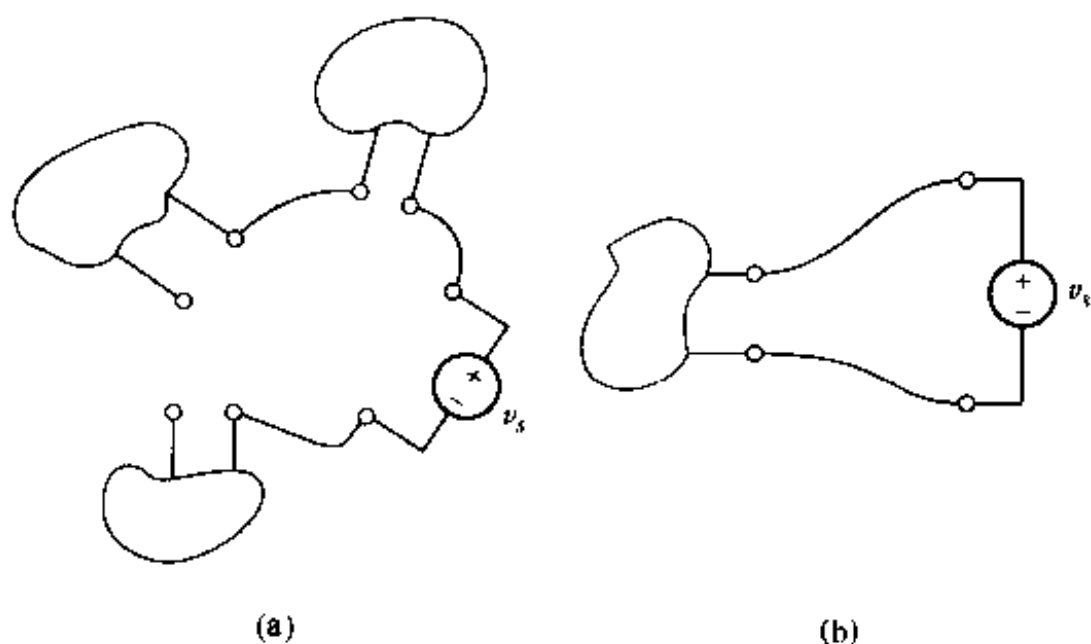


图 2.21 (a)非电路网络;(b)电路网络

现在定义了电路元件,给出了几种特定电路元件——独立源和受控源的定义。在本书余下部分将只定义 5 种其他电路元件:电阻、电感、电容、变压器和理想运算放大器(简称运放,op amp)。这些就是所有的理想元件。它们很重要,因为可以把它们连接起来形成网络和电路,按要求的精度表示真实器件。这样图 2.22(a)和图 2.22(b)所示的晶体管可以用由 v_{gs} 表示的电压端对和单一的受控电流源来模拟,见图 2.22(c)。受控电流源产生的电流取决于电路中另一处的电压。这一模型用起来很好,只要正弦信号的频率不是太高或太低。这一模型经过修正,加上另一些理想电路元件,如电阻和电容,还可以用于考虑频率相关的效应。

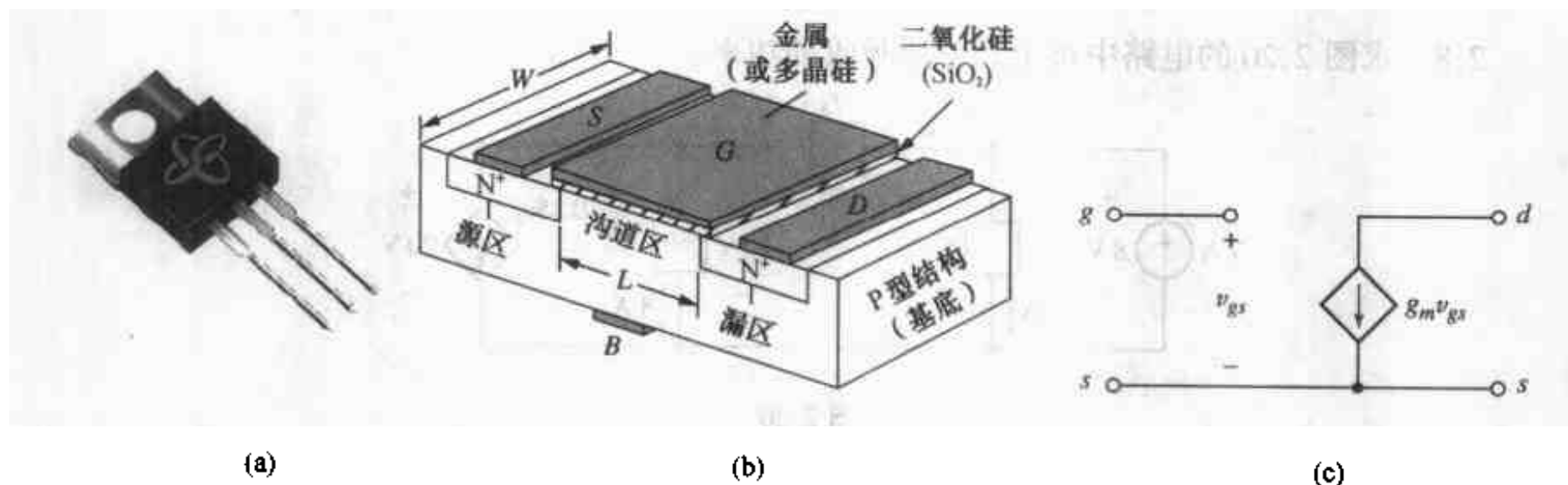


图 2.22 金属氧化物半导体场效应晶体管(MOSFET)。(a) TO-5 封装的分离式晶体管;(b)截面图;(c)用于交流电路分析的等效电路模型

这样的晶体管仅是集成电路的一小部分,然而一个小于 $2\text{ mm} \times 2\text{ mm}$ 见方, $200\text{ }\mu\text{m}$ 厚的集成电路却包含几千个晶体管和各種电阻电容。这样一个大小等于本页上一个字母的实际器件,却包含 1 万个理想简单电路元件的模型。“电路模型”的概念广泛应用于与电气工程相关的课程中,包括电子学、能源转换和天线。

2.5 欧姆定律

至此已经介绍了受控源和独立源,并已知它们是理想化有源元件,在实际电路中只能近似

表示。现在准备介绍另外的理想元件——线性电阻。电阻是最简单的无源元件。讨论从德国物理学家 Georg Simon Ohm 的工作开始。他于 1827 年发表的小册子,描述了电流和电压测量的最初结果,从数学上建立了电流和电压之间的关系。他的结果现在称之为“欧姆定律”(尽管后来知道这一结论早在 46 年前就被英格兰一位很有才气的半隐居者 Henry Cavendish 所发现)。当时欧姆地位平凡,他的小册子在发表后的最初几年中受到很多不公正的批评和嘲笑,但后来被接受,以澄清与他名字相关的不公正看法。

欧姆定律指出,导体材料上的电压正比于流过这一材料的电流,即:

$$v = iR \quad (2.4)$$

其中,比例常数 R 称为“电阻”,电阻的单位是欧姆,即 1 V/A ,习惯上用大写字母 Ω 表示。

用 i - v 坐标画出这一方程的图形时,图形是通过原点的一条直线(见图 2.23)。方程(2.4)是线性方程,它就是线性电阻的定义。因此,如果与任何简单电路元件有关的电流和电压比率是常数,那么这个元件就是线性电阻,它的电阻值等于电压对电流的比率。尽管用特殊电路可以模拟负电阻,但通常认为电阻是一个正的量。

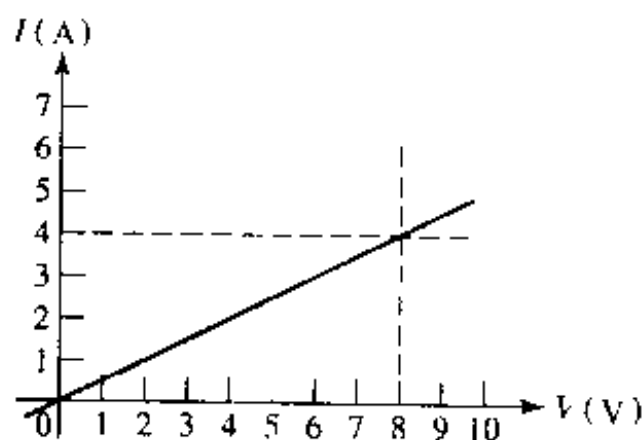


图 2.23 一个 2Ω 线性电阻的电流 - 电压关系

必须强调指出,线性电阻是一个理想化电路元件,它只是实际物理元件的数学模型。电阻器很容易买到,也很容易制造,但是你很快就能发现,这种物理元件的电压 - 电流比率只在电流、电压或功率的一定范围内保持为常数,电阻的大小还与温度和其他环境因素有关。一般将线性电阻简称为电阻,而总是将任何非线性电阻确切地称为非线性电阻。不能把非线性电阻看成是不受欢迎的元件。尽管它们的存在确实使分析变得更加复杂,但有些元件的性能正是依靠它的非线性或由于非线性的存在而使性能大大改进。例如,用做过流保护的保险丝和用做电压调整的稳压二极管都是非线性程度很大的元件,在电路设计中正是利用了它们的非线性特性。

2.5.1 功率吸收

图 2.24 示出了几种不同电阻的封装形式以及电阻的最常用电路符号。与已经采用的电压、电流和功率规则相一致, v 和 i 的乘积给出电阻吸收的功率。即按照无源元件规则选择 v 和 i 。被吸收的功率以热和/或光的形式出现,而且总是正的,一个(正)电阻是无源元件,不能提供或储藏功率。吸收功率的一个替代表达式为:

$$p = vi = i^2 R = v^2 / R \quad (2.5)$$

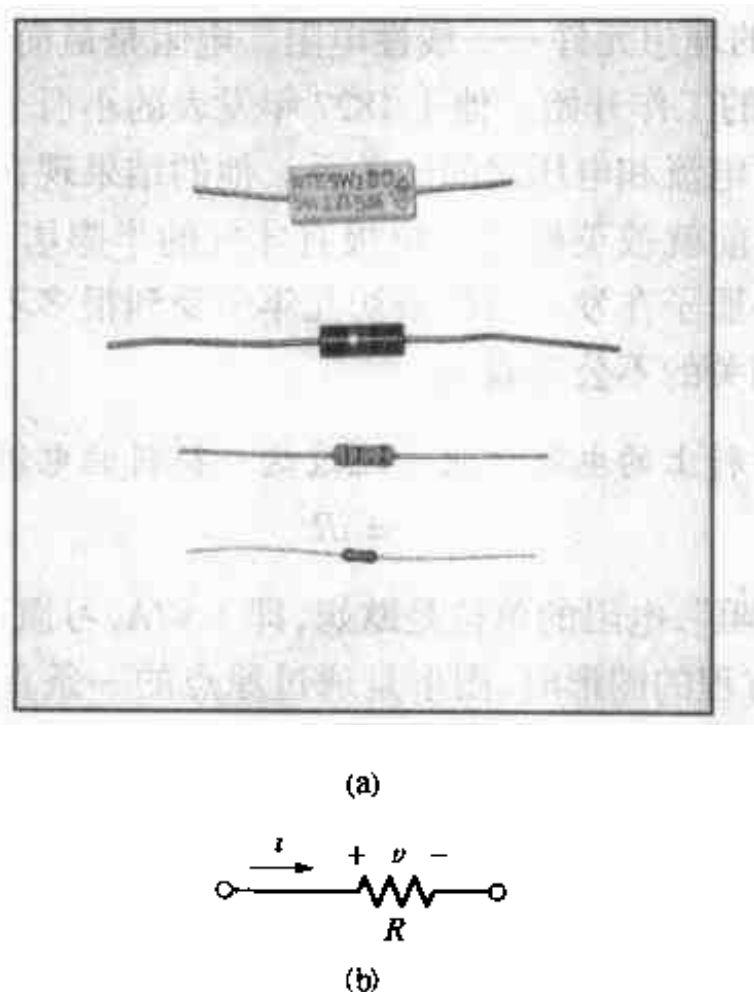


图 2.24 (a)一些有代表性的电阻(体积大的用在功率耗散大的场合);(b)电阻的电路符号

本书的作者之一(他不希望指明)曾经有过不幸的经历,不适当地将 $100\ \Omega$ 电阻连接到 $110\ \text{V}$ 电源上。继而产生的火苗、烟和爆裂是相当令人震惊的。它表明实际的电阻只是在一定限度内表现得像一个理想线性电阻模型。在当时情况下,那个不幸的电阻被要求去吸收 $121\ \text{W}$ 的功率,可是按照设计它只能承受 $2\ \text{W}$,可以理解它的反应是多么激烈。

实际应用

线 规

从技术上讲,任何材料(除了超导体)都对电流流动产生阻挡作用。可是如同所有电路教材,这里未加说明地假定电路图中导线的电阻为零。这意味着导线两端没有电势差,并且没有功率吸收和热量产生。尽管通常这是一个合理的假设,但它确实忽略了需要对不同应用选择合适的导线规格。

电阻决定于:(1)材料的本征电阻率;(2)元件的几何尺寸。电阻率用 ρ 表示,是度量电子穿过材料的难易程度。每种材料都有不同的与温度有关的本征电阻率,一定物体的电阻是电阻率与电阻器长度 l 的乘积除以截面积(A),如式(2.6)所示;这些参数示于图 2.25。

$$R = \rho \frac{l}{A} \quad (2.6)$$

因为电流流动会产生热,通过选择制作导线的材料类型和测量应用环境的温度可以决定电阻率,现实中的导线只能吸收有限的功率。粗的导线电阻较小,且散发热量也容易,但是重

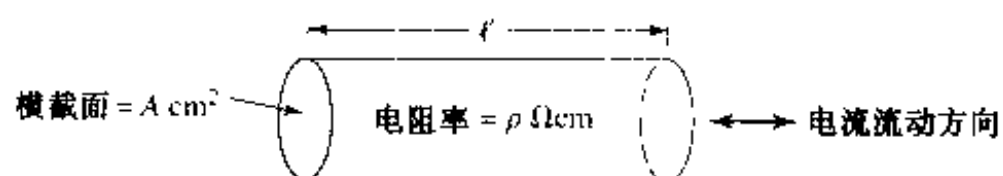


图 2.25 用于计算导线电阻的几何参数定义(假定材料电阻率在空间上是均匀的)

量大、体积大,且价格昂贵。美国导线规格(AWG)是一个确定导线尺寸的标准系统。在选择电线规格时,较小的 AWG 对应较大的电线直径,表 2.3 为常用线规简表。

表 2.3 常用线规和(软)实心铜线的电阻

导体尺寸 (AWG)	截面积 (mm^2)	20 °C 下每 1 000 英尺 ^① 的电阻
28	0.0804	65.3
24	0.208	25.7
22	0.324	16.2
18	0.823	6.39
14	2.08	2.52
12	3.31	1.59
6	13.3	0.395 2
4	21.1	0.248 5
2	33.6	0.156 3

例题 2.3 一根导线跨过 2 000 英尺距离接到一个大功率灯泡上,它吸收 100 A 电流。如果使用 4 AWG 的导线,有多少功率消耗(即损失或浪费)在导线内?

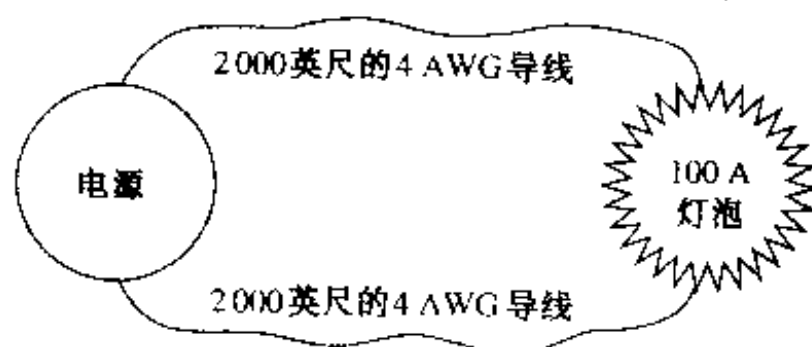


图 2.26 电灯电路草图

解决这个问题的第一步最好是画一个草图,如图 2.26 所示。从表 2.3 可见 4 AWG 电线是 $0.248\ 5\ \Omega/1\ 000$ 英尺。去电灯的电线有 2 000 英尺长,返回电源的电线也是 2 000 英尺长,总长 4 000 英尺。这样电线的电阻为:

$$R = (4\ 000\ \text{英尺}) \times (0.248\ 5\ \Omega/1\ 000\ \text{英尺}) = 0.994\ \Omega$$

功率消耗为 $i^2 R$, 其中 $i = 100\ \text{A}$ 。所以导线消耗功率为 9 940 W 或 9.94 kW。可见,即便电阻小于 $1\ \Omega$,导线消耗的功率也是巨大的。这些功率必须由电源提供,而未进入灯泡!

① 1 英尺 = 0.3048 m——编者注。