

# 电路基础理论

主 编 信毓昌

副主编 顾德隆 赵殿礼 赵 红

主 审 薛继汉



大连海事大学出版社

# 道路基础知识

主编 王 强  
副主编 张 强  
编 者 王 强 张 强



ISBN 978-7-111-60000-0

# 电路基础理论

主 编 信毓昌  
副主编 顾德隆 赵殿礼 赵红  
主 审 薛继汉

大连海事大学出版社

## 图书在版编目(CIP)数据

电路基础理论 / 信毓昌主编. - 大连:大连海事大学出版社,  
2001.8(2006.9重印)  
ISBN 7-5632-1489-5

I.电… II.信… III.电路理论 IV.TM13

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2001)第 038186 号

### 大连海事大学出版社出版

地址:大连市凌海路1号 邮编:116026 电话:0411-84728394 传真:0411-84727996

<http://www.dmupress.com> E-mail:cbs@dmupress.com

大连海事大学印刷厂印装 大连海事大学出版社发行

2001年8月第1版 2006年9月第2次印刷

幅面尺寸:185 mm×260 mm 印张:14

字数:349千字 印数:3001~4000册

责任编辑:张 娴 封面设计:王 艳

定价:21.00元

## 内 容 提 要

本书共分 11 章,分别介绍了电路基本定律和简单电阻电路;电阻电路的一般分析;含运算放大器电路;一阶电路;正弦电流电路和相量法;谐振与频率响应;含有互感的电路分析;三相电路;非正弦周期电流电路与谐波分析法;二端口网络及 PSPICE 分析。每章均有习题,其中少量习题规定用 PSPICE 进行分析计算,书后附有部分习题答案。

本书主要供电子信息、通信工程及计算机等专业使用,也可供其他相关专业和有关工程技术人员参考。

## 前 言

《电路基础理论》是高等工科院校电类专业重要的专业基础课,是后续专业课及科学研究的基础。但由于专业方向不同,对此课要求的内容也不相同。《电路基础理论》教材是按照教育部电工课程教学指导委员会修订后的“电路课程教学基础要求”编写的,主要适用于较少学时,在一个学期讲授完的电路课程。

本书的编者曾在1993年以美国普渡大学的教材“ENGINEERING CIRCUIT ANALYSIS”为基础编写过中英文配套的电路教材。此次编写又吸收了普渡大学等国内外最新教材的特点,在结构上、体系上采取先基本概念,后分析方法;先直流后交流;先 $R, L, C$ 简单元件后运算放大器、回转器、负阻抗变换器等复合元件的步骤,从易到难,循序渐进,逐步展开。为使电路教学内容与国际先进国家接轨,提高电路计算机分析计算的能力,本书新增加了国际通用的PSPICE软件的介绍,着重讲述该软件的电路计算机辅助分析和电路模拟仿真功能,这对培养电类专业学生在今后工作中的计算机应用能力有重要作用。

本书可供自动化、计算机、电子、通信等各专业电路教学使用,也可供有关工程技术人员参考。

全书由薛继汉教授主审。

限于编者的水平,本书难免有不妥之处,望读者及同行老师给予批评指正。

编 者

2001年2月

# 目 录

<b>第一章 电路基本定律和简单电阻电路</b> .....	(1)
§ 1-1 电路和电路模型 .....	(1)
§ 1-2 电流、电压、电位和电势 .....	(2)
§ 1-3 电流和电压的参考方向 .....	(5)
§ 1-4 电功率 .....	(6)
§ 1-5 电路的基本元件 .....	(7)
§ 1-6 电压源和电流源 .....	(10)
§ 1-7 受控源 .....	(12)
§ 1-8 基尔霍夫定律 .....	(13)
§ 1-9 简单电阻电路计算 .....	(15)
§ 1-10 电阻组合和电源组合 .....	(18)
§ 1-11 电阻星角等效变换 .....	(22)
§ 1-12 实际电压源和电流源的等效变换 .....	(24)
§ 1-13 输入电阻和等效电阻 .....	(26)
习题 .....	(29)
<b>第二章 电阻电路的一般分析</b> .....	(34)
§ 2-1 支路电流法 .....	(34)
§ 2-2 回路电流法 .....	(35)
§ 2-3 结点电压法 .....	(38)
§ 2-4 替代定理 .....	(42)
§ 2-5 齐性与叠加定理 .....	(43)
§ 2-6 戴维南定理和诺顿定理 .....	(46)
§ 2-7 直流电路的最大功率传输 .....	(53)
习题 .....	(54)
<b>第三章 含运算放大器电路</b> .....	(62)
§ 3-1 运算放大器 .....	(62)
§ 3-2 含理想运算放大器电阻电路 .....	(63)
§ 3-3 电压跟随器(隔离器) .....	(64)
§ 3-4 模拟加法和减法 .....	(65)
§ 3-5 简单电容运算放大器 .....	(66)
习题 .....	(67)
<b>第四章 一阶电路</b> .....	(70)
§ 4-1 动态电路的暂态过程 .....	(70)
§ 4-2 电路量的初始值 .....	(70)

§ 4-3	无源一阶电路的动态过程	(72)
§ 4-4	有源一阶电路的动态过程	(76)
§ 4-5	用单位阶跃函数代替直流电源的接入	(80)
§ 4-6	零输入响应和零状态响应	(81)
	习题	(83)
<b>第五章</b>	<b>正弦电流电路和相量法</b>	<b>(87)</b>
§ 5-1	正弦量	(87)
§ 5-2	相量法的基本概念	(90)
§ 5-3	电路定律的相量形式	(95)
§ 5-4	阻抗与导纳	(98)
§ 5-5	正弦电流电路的功率	(106)
§ 5-6	正弦电流电路的稳态分析	(111)
§ 5-7	最大功率传输定理	(114)
	习题	(116)
<b>第六章</b>	<b>谐振与频率响应</b>	<b>(123)</b>
§ 6-1	串联电路的谐振	(123)
§ 6-2	并联电路的谐振	(129)
§ 6-3	其它谐振电路	(132)
	习题	(134)
<b>第七章</b>	<b>含有互感的电路分析</b>	<b>(136)</b>
§ 7-1	互感与互感电压	(136)
§ 7-2	具有互感电路的计算	(140)
§ 7-3	空心变压器	(143)
§ 7-4	理想变压器	(145)
	习题	(146)
<b>第八章</b>	<b>三相电路</b>	<b>(150)</b>
§ 8-1	三相电路的概念	(150)
§ 8-2	对称三相电路的分析计算	(152)
§ 8-3	不对称三相电路的概念	(157)
§ 8-4	三相电路的功率	(159)
§ 8-5	三相电路的功率测量	(160)
	习题	(162)
<b>第九章</b>	<b>非正弦周期电流电路与谐波分析法</b>	<b>(165)</b>
§ 9-1	非正弦周期电流和电压的产生	(165)
§ 9-2	周期函数分解为傅里叶级数与信号频谱	(166)
§ 9-3	周期函数的波形与傅里叶系数的关系	(169)
§ 9-4	非正弦周期量的有效值和平均功率	(171)
§ 9-5	非正弦周期电流电路的计算	(174)
§ 9-6	傅里叶级数的指数形式	(177)



§ 9-7 傅里叶积分和傅里叶变换 .....	(178)
习题 .....	(180)
<b>第十章 二端口网络</b> .....	<b>(182)</b>
§ 10-1 二端口网络概述 .....	(182)
§ 10-2 二端口网络的导纳参数 .....	(182)
§ 10-3 二端口的阻抗参数 .....	(184)
§ 10-4 混合参数 .....	(185)
§ 10-5 二端口的传输参数和特性阻抗 .....	(187)
§ 10-6 二端口的等效网络 .....	(188)
§ 10-7 二端口的连接 .....	(189)
§ 10-8 回转器和负阻抗变换器 .....	(191)
习题 .....	(193)
<b>第十一章 PSPICE 分析</b> .....	<b>(196)</b>
§ 11-1 PSPICE 直流分析 .....	(196)
§ 11-2 动态电路 PSPICE 分析 .....	(200)
§ 11-3 正弦稳态交流电路 PSPICE 分析 .....	(205)
习题 .....	(209)
<b>附录 部分习题答案</b> .....	<b>(213)</b>

# 第一章 电路基本定律和简单电阻电路

本章中将介绍电路模型和各种理想电路元件,其中包括电阻、电容、电感、独立电源和受控电源。同时还引进电流、电压参考方向概念及功率发出和吸收的概念。在引入等效概念的基础上,介绍电阻的星形和三角形的等效变换及实际电压源和电流源之间的等效变换。

基尔霍夫电压定律和电流定律是电路理论中最基本的定律。结合定律的初步应用,我们将介绍简单电阻电路的分析方法。

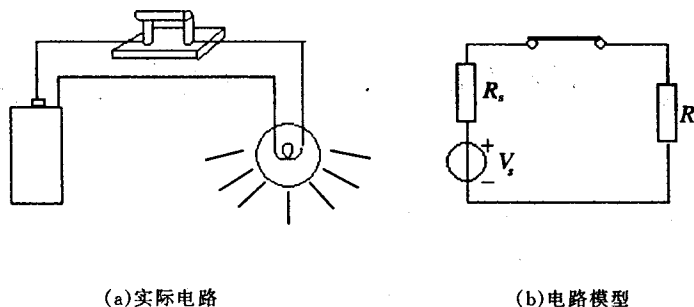
## § 1-1 电路和电路模型

电路是电流的通路,实际电路是由电工设备和器件组成的。电路的作用,在电力系统中主要是进行电能的输送和转换,在通信、控制和计算机科学领域中,则用以传递信号和处理信号。例如在电力系统中,发电厂的发电机把热能、原子能或水能转换成电能,通过变压器、输电线输送给各用电单位,在那里又把电能转换成机械能、热能和光能。又如在通信系统中,通过电路把施加的信号(称为激励)经过放大、滤波或调谐变换处理成所需要的输出信号(称为响应)。这里,我们把提供电能或电信号的设备或实际元件称为电源,而把接受电能或电信号的设备或实际元件称为负载,电源和负载间联系的中间环节称为传输控制器件。凡是正常工作的电路,一般都由这三大部分组成。

如上所述,一个实际电路由实际电路元件构成,通常用电流、电压、电荷或磁通等物理量来描述电路中的现象及其产生的过程。为分析方便起见,通常把实际电路元件用足以反映其电、磁性质的一些理想电路元件及其组合来代替,这样就把实际电路变成了一个由理想电路元件构成的电路模型。

理想电路元件是具有某种确定电、磁性质的抽象元件,是一种数学模型,它们都有各自的精确定义。实际电路元件虽然种类繁多,但在电磁现象方面却有许多共同的地方。例如各种电阻器、电灯、电炉,它们的共同特点就是都消耗电能,而“电阻元件”这样一个具有两个端钮的理想电路元件的最大特点就是当电流通过时,其内部就发生电能转换成热能的不可逆过程,这样,所有的电阻器、电灯、电炉等实际元件都可用“电阻元件”来近似代替。像发电机、电池这样一些供给电压和电能的实际元件,就可以用“电压源元件”这样一个维持确定电压值的二端理想元件来近似代替。

用抽象的理想元件及其组合近似替代实际元件,构成了与实际电路相对应的电路模型。如图 1-1(a)所示的一个简单实际电路,由一个干电池(电源)、一个小灯泡(负载)和两根连接导线及闸刀开关组成,其电路模型如图 1-1(b)所示。电阻元件  $R$  表示小灯泡,电压源  $V_s$  和电阻元件  $R_s$  这两个理想元件表示干电池的模型,连接导线在电路模型中用相应的理想导线(认为它们电阻为零)或线段来表示。本书以后所述的电路一般均是这种抽象的电路模型,而非实际电路。大量实践充分证实,只要电路模型取得恰当,按电路模型分析计算的结果与实际电路测量的结果基本上是一致的。



(a)实际电路 (b)电路模型

图 1-1 实际电路及其电路模型

当电路的尺寸远小于电路工作频率的电磁波波长时,电路元件的电磁过程都可认为是在元件内部进行的,这样的电路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。不满足上述条件时,实际电路就只能用分布参数电路来描述。本书只限于研究集总参数电路。

电路元件有线性与非线性之分。完全由线性元件构成的电路称为线性电路,否则便是非线性电路。工程上遇到的电路大都可作为线性电路来分析,本书只局限于研究线性电路。

本书主要内容是电路分析,在探讨电路的基本定律和电路的各种计算方法中,加深电路的基本理论和基本概念的理解,为后续课程准备必要的电路知识。

## § 1-2 电流、电压、电位和电势

### 1. 电流

电路中自由电子或带电质点在电场力作用下有规律的运动形成电流,电流包括大小和方向。习惯上规定,在电场力作用下正电荷运动的方向作为电流的方向,即电流的实际方向(在金属导体中,实际上是带负电的自由电子在运动,相当于正电荷在与自由电子相反方向上运动,但我们仍把正电荷运动的方向作为电流的方向)。

在电路图中,电流的方向一般用箭头表示,见图 1-2。也可用双下标  $I_{ab}$  表示。

我们把单位时间内沿规定方向通过导线截面元的净电荷量定义为电流强度(简称电流),用以衡量电流的大小,其数学表达式为

$$i = \frac{dQ}{dt}$$

电流的单位为安培(A)。当每秒通过截面元净电荷量为 1 C(库仑)时,电流为 1 A。有时取千安(1 kA =  $10^3$  A)、毫安(1 mA =  $10^{-3}$  A)、微安(1  $\mu$ A =  $10^{-6}$  A)作单位。

通常用大写字母  $I$  表示恒定的直流电流,用小写字母  $i$  或  $i(t)$  表示变动电流。

### 2. 电压

带电质点只有在电场力作用下才产生有规律的运动。例如把导体放在电场中,如图 1-3 所示,正电荷  $Q$  受电场力  $F$  作用从  $a$  点移动到  $b$  点(实际上是自由电子从  $b$  点移到  $a$  点)表明电荷在此过程中消耗了能量(即  $ab$  这段电路吸收了电能并转换为其它能量),电场力作了功。

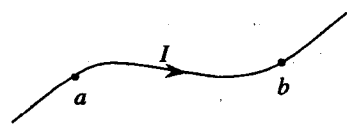


图 1-2 电流方向的标注

电场力作功  $A_{ab}$  等于  $Q$  所受的电场力  $F$  与  $ab$  距离的乘积,  $Q$  愈大,  $F$  愈大,  $A_{ab}$  也愈大, 但对单位正电荷来说, 在  $ab$  这段距离内电场力所作的功是不变的。我们把电场力移动单位正电荷从  $a$  到  $b$  所作的功定义为  $a, b$  之间的电压, 即

$$V = \frac{A_{ab}}{Q}$$

电压的单位为伏特(V), 1 伏电压相当于移动 1 库仑电荷作 1 焦尔的功。有时取千伏 ( $1 \text{ kV} = 10^3 \text{ V}$ )、毫伏 ( $1 \text{ mV} = 10^{-3} \text{ V}$ ) 作单位。

对一般电路而言, 若电流  $i$  从  $a$  端经元件流到  $b$  端, 并在此过程中消耗了电能, 则  $a$  点为“+”极,  $b$  点为“-”极,  $a, b$  两端钮间就有电压  $V$ 。

电压不仅有大小也有方向(或极性)。

电压方向规定从“+”到“-”, 电压必须是跨在两点之间, 在电路图上一端标“+”, 另一端标“-”, 中间则标注符号  $V$  或具体的电压值, 如图 1-4(a)所示。电压方向还有另外两种标注方法, 一种是用箭头表示, 箭头起点处为“+”, 终点处为“-”, 如图 1-4(b)所示, 此时图中可不再标“+”和“-”。另一种是用文字下标表示, 如  $V_{ab}$  就表示图中  $a, b$  两点间的电压是从  $a$  点指向  $b$  点,  $a$  为“+”,  $b$  为“-”, 如果交换下标的位置, 则根据上面的约定,  $V_{ba} = -V_{ab}$ 。采用下标标注法, 电路图中既不画箭头, 也不标“+”和“-”符号。后面两种电压标注法经常用于比较复杂的电路图。

通常用大写字母  $V$  表示恒定的直流电压, 用小写字母  $v$  或  $v(t)$  表示变动电压。

### 3. 电位

在分析和计算电路时(特别在分析电子电路时)经常用到电位这个概念。在电路中任选一点为参考点, 定义参考点上电位为零, 把任意一点与参考点之间的电压定义为该点的电位。电位用希腊字母  $\varphi$  表示, 电位的单位同电压。例如在图 1-5 中选  $o$  点为参考点, 则  $\varphi_o = 0$ , 根据定义,  $a, b$  的电位分别是  $a$  点和  $b$  点到  $o$  点间的电压, 即

$$\varphi_a = v_{ao}, \varphi_b = v_{bo}$$

在给定的电路中各点间的电压是确定的, 而各点的电位则是相对的, 视所选的参考点而定。但只要参考点一经选定, 电路中各点的电位就有确定的数值, 且与所选路径无关, 这就是所谓电位的单值性, 电压也同样具有单值性。电压和电位的的关系以图 1-5 为例为

$$\varphi_a - \varphi_b = v_{ao} - v_{bo} = v_{ao} + v_{ob} = v_{ab}$$

上式表明, 电场力先将单位正电荷从  $a$  移到  $o$ , 再从  $o$  移到  $b$ , 根据电压的单值性, 它与电场力将单位正电荷直接从  $a$  移到

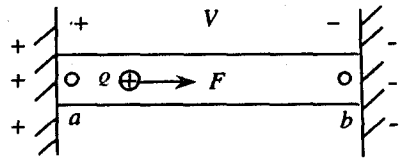
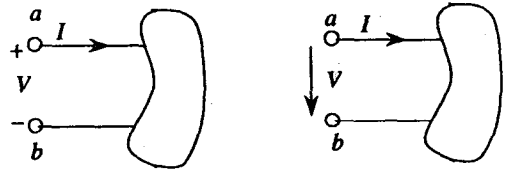


图 1-3 电场力作功



(a) 电压方向标注

(b) 用箭头标注电压

图 1-4 电压标注

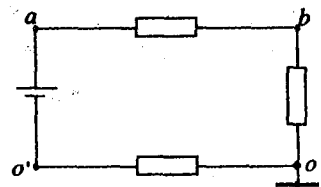


图 1-5 电路中的电位

$b$  是一样的,于是得出结论: $a, b$  间的电压  $v_{ab}$  等于  $a$  点和  $b$  点的电位差。可见,电压是从高电位指向低电位的,故又称电压为电位降。

当选择图 1-5 中  $o'$  为参考点时, $a, b$  点的电位分别变成  $\varphi'_a, \varphi'_b$ , 电位差:

$$\varphi'_a - \varphi'_b = v_{ao'} - v_{bo'} = v_{ao'} + v_{o'b} = v_{ab}$$

可见  $a, b$  间的电压与参考点的选择无关。

参考点的选择原则上是任意,但在工程上通常选大地为参考点,即认为大地的电位为零。电子设备中机壳需要接地的,就选机壳为参考点;如机壳不接地,则常选设备中的公共线为参考点。选参考点时用符号“⊥”接于该点表示“接地”。

在电子电路里用电位分析计算有时可以使问题简化。以图 1-6 为例,它共有  $a, b, c, d$  四个结点,任何两点之间都有电压,计为  $v_{ab}, v_{bc}, v_{cd}, v_{ad}, v_{bd}, v_{ac}$  六个不同的电压,但若用电位来讨论,只要指定任一结点  $d$  为参考结点,则只有  $\varphi_a, \varphi_b, \varphi_c$  三个电位,使讨论对象的数目大大减少。

根据上述情况,并考虑到电子电路中一般都把电源、信号输入和输出的公共端接在一起作为参考点,因此电子电路有一种习惯画法,即独立电源不再用电源符号表示,而改为标出其电位的极性 & 数值。按照这种画法,图 1-7(a) 可改画为图 1-7(b) 形式。

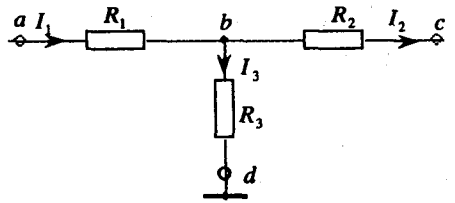
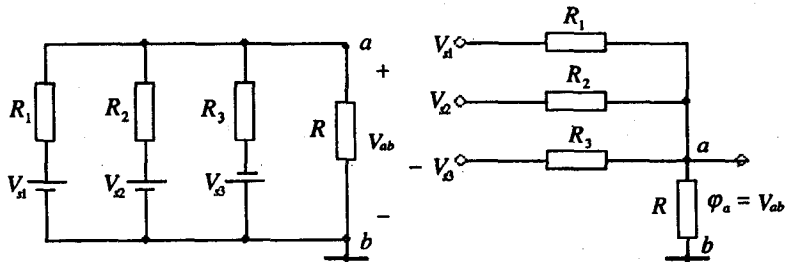


图 1-6 电位计算图



(a) 原电路

(b) 电子电路

图 1-7 电子电路习惯画法

#### 4. 电势(电动势)

电场力作用虽可以使电荷移动,但在作功后电场变弱,难以持久,所以要想维持持续的电流,必须有一种非电场的局外力,不断地把正电荷从低电位移到高电位。电池中的化学力,发电机线圈中的电磁感应力就是这种局外力。

我们把非电场力将单位正电荷从低电位移到高电位所作的功定义为电动势简称电势。电势在直流电路中用大写字母  $E$  表示,而用小写字母  $e$  或  $e(t)$  表示变动电势,电势的单位同电压。凡用电势作为电源的称为电压源,电压源在电路图中的符号标注将在稍后介绍。

电压是电位降,它将正电荷从高电位移向低电位,而电势则产生电位升,它将正电荷从低电位移向高电位,因此电势的实际方向在电路图中是从“-”指向“+”,其方向与电压标注方向恰好相反。例如在图 1-8 中电势方向是从  $b$  指向  $a$ ,电压  $V$  的方向是从  $a$  指向  $b$ ,但不管怎样

标注都表示 $a$ 点电位比 $b$ 点电位高这个客观事实。正因为如此,在本书以后的电路图中,我们通常采用电压标注方法来表明电位的高低,电势的标注则很少出现。

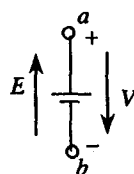


图 1-8 电势和电压的方向

### § 1-3 电流和电压的参考方向

电流在导线或电路元件中流动的实际方向只有两种可能,见图 1-9。当正电荷的净流量从 $A$ 端流入并从 $B$ 端流出时,电流的实际方向就是从 $A$ 端流向 $B$ 端[图 1-9(a)],反之则认为电流是从 $B$ 端流向 $A$ 端[图 1-9(b)]。但是在实际问题中,电流的实际方向往往难以预先在电路图中标出。例如交流电路中的电流,其方向随时间变化,很难用一个固定方向的箭头来表示其真实方向,即使在直流电路中,当求解较复杂的电路时,也常常难以预先判断电流的实际方向。为此我们引入参考方向这一概念。

参考方向就是在电路图中任意假定的一个方向,用箭头表示并同时约定:如果电流的实际方向与参考方向一致,则电流为正值( $i > 0$ );如果电流的实际方向与参考方向相反,则电流为负值( $i < 0$ ),见图 1-10。根据这个约定,在指定

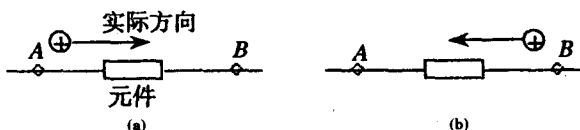


图 1-9 电流方向

参考方向后如果算出电流 $i = 2\text{ A}$ ,则即可判定电流为 $2\text{ A}$ ,如算出电流 $i = -2\text{ A}$ ,则判定电流虽为 $2\text{ A}$ ,但实际方向与参考方向相反。

参考方向并不是一个抽象的概念,当我们用直流电流表测量电路中的未知电流时,电流表上的“+”、“-”端钮如何接入电路,这本身就是在假定参考方向。接入前如果认定电流是从电流表“+”端流入电表,而接入后表针又正向偏转(即 $i > 0$ ),则表明电流的实际方向就是认定的从“+”端流入电表的方向。如果表针反向偏转(即 $i < 0$ ),则表明我们假定错了,电流实际上是从“-”端流进电表。

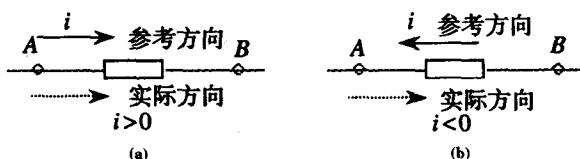


图 1-10 电流参考方向

这就是假定参考方向的实质所在。

从前面关于参考方向的约定中可见,在电路中未标参考方向的情况下,讨论电流的正负是毫无意义的。

电流参考方向又称电流的正方向,它是进行电路课程学习碰到的第一个新概念,在电路分析中起着十分重要的作用。今后在电路图中大多只标出电流的参考方向,实际方向反而不在图中标出,只通过电流具体数值的正、负来判断。电流参考方向也可用双下标表示,如 $i_{AB}$ 即表明参考方向是从 $A$ 指向 $B$ 。

如同需要为电流规定参考方向一样,我们也需要为电压规定参考方向(也称正方向)。电压的参考方向在元件或电路的两端用“+”、“-”符号来标注,“+”表示高电位端,“-”表示低电位端,电压的参考方向就是从高电位端指向低电位端。并同时约定:当电压为正值( $V > 0$ )时,电压的实际方向与标注的参考方向一致;反之,则相反。电压参考方向也可用箭头或文字

下标表示,前面已作过介绍。同电流一样,今后在电路图中只标电压参考方向,很少标注电压实际方向。在电路图中未标注参考方向时谈论电压的正负也是毫无意义的。

综上所述,在分析电路时,我们既要为通过元件的电流假定参考方向,又要为元件两端的电压假定参考方向,这种假定原可以彼此独立无关地任意假定,但为了方便起见,我们常采用关联参考方向标注,即要求元件的电流参考方向从元件电压的“+”端流入元件,从“-”端流出。这时,元件上电流的参考方向与电压的参考方向一致,如图 1-11 所示。这样,就可以免去在电路图中既标电压又标电流的麻烦,而只须标出其中一种参考方向即可,但需要在文中说明电压电流是关联参考方向。

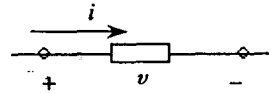


图 1-11 电压和电流关联参考方向

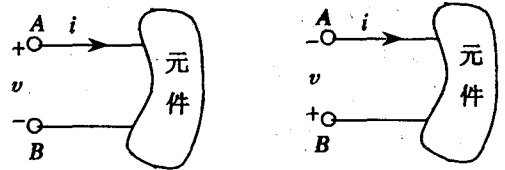
## § 1-4 电功率

单位时间内元件消耗(或吸收)的电能定义为该元件吸收的电功率,对恒定直流电路用大写字母  $P$  表示,对变动电流电路用小写字母  $p$  或  $p(t)$  表示。

电功率与元件的电压、电流有关,以图 1-12 (a)为例,根据电流、电压定义, $i$  是单位时间从  $A$  移动到  $B$  的正电荷量, $v$  是将单位正电荷从  $A$  移动到  $B$  电场力所作的功, $v$  与  $i$  的乘积恰好表达了该元件所消耗的电功率,表达式为

$$p = vi \quad (1-1)$$

或  $P = VI \quad (1-2)$



(a)  $v, i$  关联参考方向 (b)  $v, i$  非关联参考方向

图 1-12 元件的电功率

注意到图 1-12(a)中元件的  $v, i$  正好是关联参考方向。如果元件上的电压在  $B$  端是高电位,在  $A$  端是低电位,见图 1-12(b),此时正电荷能从低电位移动到高电位,一定是在局外力作用下才能实现,因此该元件将发出(或产生)电能,该元件实际上是个电源。此时元件上  $v$  和  $i$  的参考方向相反,称为非关联参考方向。

综上所述,电路中电功率有发出和吸收的问题,为此,我们约定:当元件上的  $v, i$  是关联参考方向时,则将  $p = vi$  定义为元件所吸收的功率;而当元件上的  $v, i$  为非关联参考方向时,则将  $p = vi$  定义为元件所发出的功率,这功率将供给电路的其它部分。功率  $p$  的单位为瓦特(W),有时也用千瓦( $1 \text{ kW} = 10^3 \text{ W}$ )和毫瓦( $1 \text{ mW} = 10^{-3} \text{ W}$ )作单位。

由于电路中所标注的  $v$  和  $i$  都是参考方向,它们的数值可正可负,其乘积也可正可负,所以  $p$  的具体数值也是可正可负的。为了判断元件或一段电路实际上是发出还是吸收功率,我们将进一步约定:当  $p > 0$  时,认为前面约定中的定义正确,元件实际发出或吸收功率的状况与定义的一致;当  $p < 0$  时,认为前面约定中的定义不正确,元件实际发出或吸收功率的状况与定义中的相反。例如在图 1-12(a)中,假设  $i = 3 \text{ A}, v = 6 \text{ V}$ ,则  $p = 18 \text{ W} > 0$ ;表明定义该元件吸收功率是正确的。如在该图中,假设  $i = -3 \text{ A}, v = 6 \text{ V}$ ,则  $p = -18 \text{ W} < 0$ ,表明定义该元件吸收功率是错误的,元件实际上是发出功率。

## § 1-5 电路的基本元件

前已述及,电路理论经科学抽象后,把实际元件用足以反映其主要电磁性质的一些理想元件来代替。这些理想元件都是数学模型,每一个都有其精确定义。理想元件是通过其端钮与外部相连接的。根据端钮的个数,可分为二端、三端、四端元件。本节中我们讨论的电路基本元件主要是指无源二端理想元件,它们是电阻元件、电容元件和电感元件。有源二端理想元件和电压源、电流源及有四个端钮的各种受控电源,将在以后章节中陆续介绍。为简单起见,以后在称呼各种理想元件时,常略去“理想”二字,简称元件。

### 1. 电阻元件

当电路的某一部分只有电能的消耗,则在这一部分电路中只存在电阻,在线性电路中,可用一个线性电阻元件来代替它。线性电阻元件是这样的二端理想元件,在任何时刻它两端的电压与其电流都服从欧姆定律。线性电阻在电路中的图形符号如图 1-13 所示。如果用直角坐标画出电压和电流的关系曲线,则这条曲线叫做电阻元件的伏安特性曲线。线性电阻元件的伏安特性曲线是通过坐标原点的直线,见图 1-14。元件上电压和电流成正比,在电压和电流呈关联参考方向时,欧姆定律可表示为

$$v = Ri \quad (1-3)$$

式中,比例系数  $R$  称为电阻元件的阻值, $R$  的大小可由下式确定

$$R = \frac{v}{i} = \frac{m_v}{m_i} \tan \alpha$$

$\alpha$  是伏安特性曲线与电流轴的夹角( $m_v, m_i$  分别是  $v, i$  坐标比例尺)。

可见,线性电阻元件的阻值  $R$  与  $v, i$  无关。令  $G = \frac{1}{R}$ ,则式(1-3)可写成

$$i = Gv \quad (1-4)$$

式中, $G$  称为电阻元件的电导。

电阻单位为欧姆( $\Omega$ ),有时取千欧( $1 \text{ k}\Omega = 10^3 \Omega$ )、兆欧( $1 \text{ M}\Omega = 10^6 \Omega$ )为单位,电导的单位为西门子(S)。

如果电阻元件的电压、电流是非关联参考方向,如图 1-13(b)所示,则欧姆定律应写成

$$v = -Ri \quad (1-5)$$

$$i = -Gv \quad (1-6)$$

所以,欧姆定律表达式必须与参考方向配套使用。

任何时刻线性电阻元件吸收的电功率

$$p = vi = Ri^2 = Gv^2$$

式中, $R, G$  都是正常数值。故电阻上的电功率为非负值,这说明任何时刻电阻均不可能发出电能,而是将吸收的电能全部转换为其它能量(热能、光能)消耗掉,所以线性电阻不仅是无源

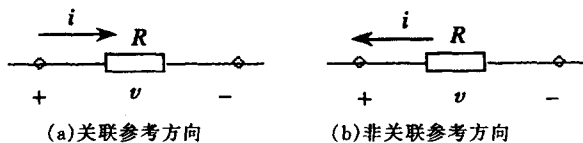


图 1-13 电阻元件

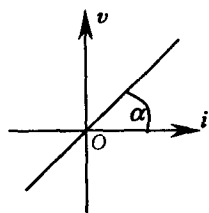


图 1-14 线性电阻的伏安特性曲线



元件,而且还是耗能元件。

如果电阻元件把吸收的电能全部转换成热能,利用焦尔与卡之间的换算关系,从  $t_0$  到  $t$  时间内,电阻元件产生的热量为

$$W = 0.239 \int_{t_0}^t p d\tau = 0.239 \int_{t_0}^t Ri^2 d\tau \quad (1-7)$$

上式称为焦尔—楞次定律。保险丝的熔断,电气设备的烧毁,都是由于这种热量引起的。

如果电阻元件值随元件的电流、电压改变而改变,其伏安特性曲线就不再是直线,则称这样的电阻元件为非线性电阻元件。含非线性电阻元件的电路称为非线性(电阻)电路。本书只局限于介绍线性电阻电路。

今后为叙述方便,把线性电阻元件简称为电阻。这样,电阻  $R$  既表示一个电阻元件,又可表示电阻的阻值。

## 2. 电容元件

实际电容元件称电容器,它由两块金属板间隔以绝缘介质构成,当电容器两端加上电压后,它的两个金属板(称极板)上分别聚集了等量异性电荷,在两极板间建立起电场并储存电场能量。电源电压撤走后,极板上的异性电荷由于相互吸引而继续保持,所以电容器是一种能够储存电荷(或电场能量)的实际电路元件。

电容器两极板愈靠近,相互吸引的电荷愈多,储存电荷愈多;极板面积愈大,储存的电荷也愈多。当电容器极板面积和极板间距离等实际结构一定时,外加电压愈高,储存电荷也愈多,但单位电压下储存的电荷量却保持不变。我们把电容器在单位电压下所储存的电荷量定义为电容器的电容,在数值上电容等于一个极板上的电荷量与两极板间电压的比值,如图 1-15(a)所示,即

$$C = \frac{Q}{v} \quad (1-8)$$

或

$$Q = Cv \quad (1-9)$$

式中,  $C$  为电容元件的电容。

以  $Q, v$  为坐标画出  $Q$  与  $v$  的关系曲线,称为该电容元件的库伏特性曲线,如图 1-15(b)所示,它是通过坐标原点的直线,故称该元件为线性电容元件。

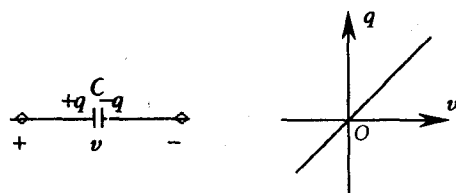
线性电容元件是一个二端理想元件,它的电容  $C$  是一个与  $Q, v$  无关的常数,只取决于电容元件本身的结构。以平行板电容器为例,它的电容为

$$C = \frac{\epsilon S}{d}$$

式中,  $\epsilon$  为介电系数,  $S$  为一个极板的面积,  $d$  为两极板间的距离。

电容的单位为法拉(F),有时取微法( $1 \mu\text{F} = 10^{-6} \text{F}$ )或皮法( $1 \text{pF} = 10^{-12} \text{F}$ )作单位。

当电容两端外加电压随时间变化时,电容极板上的电荷  $Q$  也将变化。当电容两端电压增加时,电荷进入极板形成充电电流  $i$ ,其大小等于极板上正电荷的增长率,即  $i = dQ/dt$ ,如图 1-16(a)所示,以  $Q = Cv$  代入得



(a) 电容图形符号

(b) 库伏特性

图 1-15 线性电容元件