

电路理论基础

白惠珍 王宝珠 张惠娟等 编著

中国科学技术出版社

责任编辑:白丽娟 胡萍

封面设计:朴勇峰

ISBN 7-5046-3159-0



9 787504 631596 >

ISBN 7-5046-3159-0/TM·17

定价:26.00 元

电路理论基础

白惠珍 王宝珠 张惠娟等 编 著

中国科学技术出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

电路理论基础 / 白惠珍编著. —北京: 中国科学技术出版社, 2001.9

ISBN 7-5046-3159-0

I. 电… II. 白… III. 电路理论 IV. TM13

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2001) 第 062359 号

中国科学技术出版社

北京市海淀区中关村南大街 16 号 邮政编码 100081

华星印刷厂印刷

*

开本 787 毫米 × 1092 毫米 1/16 印张: 22.75 字数 500 千字

2001 年 9 月第 1 版 2001 年 9 月第 1 次印刷

印数: 1-3000 册 定价 26.00 元

(凡购买本社的图书, 如有缺页、倒页、脱页者, 本社发行部负责调换)

责任编辑:白丽娟 胡 萍

封面设计:朴勇锋

责任校对:林 华

责任印制:王 沛

前 言

本书根据国家教育部审定的《电路》课程教学大纲要求,结合当前高等院校的教育、教学改革,本着加强理论基础,拓宽知识面,培养具有能力型、创新型的高素质人才的原则,为普通高等工科院校电气信息类专业《电路》课程而编写的。

本书在编写前,课程组的教师对其内容的深度、广度、体系模块安排等进行了充分的讨论。在编写中,着重基本概念、基本内容和基本技能的处理,注重内容的层次性,由浅入深、循序渐进。同时减小内容的梯度,在要点处采用加入适量例题的方式,使读者在自学中加深对电路理论知识理解,提高应用的能力。同时,还注意运用启发方式,提高读者的创新意识,对一些章节,在基本概念论述清楚后,加入了让读者自行推导的内容,激发读者的学习兴趣,提高读者举一反三、触类旁通的能力。在教学实践中,我们深深感到,高新技术的发展,计算机的普及,使电路理论基础有了今天日趋广泛的应用。为此,本书增加了电路计算机辅助分析的基础知识,并附有相关C语言程序,供读者在学习时参考。该部分内容不断的更新,为电路理论基础教学增添了活力,对读者后续课程的学习乃至工作都将会受益匪浅。

本书重点讨论集中参数电路,并以线性电路为主。对非线性电路仅用少量篇幅简单介绍最基本的概念。本书的内容包括:直流电路分析、正弦稳态电路分析、线性动态电路分析,二端口网络、电路方程的矩阵形式及电路机辅分析的初步知识。读者可根据所学的不同专业的需要斟酌取舍。

为了帮助读者更好地学习,另外编有电路学习指导书,其内容按本书的章节顺序,在对电路理论基础的要点、难点进行简明扼要叙述的基础上采用典型例题分析及大量的习题、难题练习的方式来增强读者的理解。

本书由白惠珍主持,并编写了第一、第二、第三、第四章,第五、第六、第七章由王宝珠编写,第八章及部分习题由杨文荣编写,第九、第十、第十一章由张惠娟编写,第十二章、附录由姚芳编写,第十三章由王胜恩编写,参加本书编写工作的还有耿恒山。本书最后由白惠珍统稿。

本书从编写到出版都得到了河北工业大学教务处和电气信息学院的大力支持和资助,原稿承蒙李望超教授仔细审阅,并提出了许多宝贵意见。谨在此一并表示衷心的感谢。

本书的错误和不足之处恳切希望读者批评指正。

编者

2001年1月

目 录

第一章 电路模型和基尔霍夫定律	1
1.1 电路和电路模型	1
1.2 电路变量	2
1.3 电路元件	6
1.4 基尔霍夫定律	19
习题一	24
第二章 电阻电路的等效变换	30
2.1 电路等效变换的概念	30
2.2 无源电阻电路的等效变换	31
2.3 有源电路的等效变换	38
2.4 输入电阻的计算	43
习题二	46
第三章 电阻电路的分析方法	50
3.1 电路的图	50
3.2 KCL 和 KVL 的独立方程数	53
3.3 支路电流法	54
3.4 网孔电流法	58
3.5 回路分析法	61
3.6 节点分析法	69
习题三	80
第四章 电路基本定理	86
4.1 叠加定理	86
4.2 替代定理	91
4.3 戴维宁定理和诺顿定理	92
4.4 最大功率传递定理	99
4.5 特勒根定理	101
4.6 互易定理	103
习题四	107
第五章 正弦稳态电路分析	111
5.1 正弦交流电的基本概念	111
5.2 电阻、电容及电感中的正弦电流	115
5.3 正弦量的相量表示法	117

5.4	电路定律及电路基本元件 VCR 的相量形式	121
5.5	复阻抗、复导纳	125
5.6	正弦稳态电路分析的相量法	130
5.7	正弦稳态电路的电功率	135
5.8	关于功率因数提高与最大功率传输问题	141
5.9	频率特性和谐振现象	145
	习题五	154
第六章	含耦合电感电路的计算	161
6.1	耦合电感	161
6.2	含耦合电感电路的计算	165
6.3	空心变压器	170
6.4	理想变压器	172
	习题六	176
第七章	三相电路	179
7.1	三相电路	179
7.2	对称三相电路的计算	182
7.3	不对称三相电路的概念	184
7.4	三相电路的功率	186
	习题七	190
第八章	非正弦周期电流电路	192
8.1	非正弦周期电流电路	192
8.2	非正弦周期量的有效值、平均值、平均功率	192
8.3	非正弦周期电流电路的计算	196
8.4	对称三相电路中的高次谐波	200
	习题八	203
第九章	线性电路动态过程的时域分析	205
9.1	线性电路的动态过程及其经典分析	205
9.2	电路变量的初始值	206
9.3	一阶电路的零输入响应	209
9.4	一阶电路的零状态响应	213
9.5	一阶电路的全响应	217
9.6	一阶电路的阶跃响应	220
9.7	一阶电路的冲激响应	222
9.8	二阶电路的动态过程	227
9.9	电路动态过程的状态变量分析	232
	习题九	238

第十章 线性电路动态过程的复频域分析	243
10.1 拉普拉斯变换	243
10.2 复频域形式的电路定律与电路模型	247
10.3 利用拉普拉斯变换分析线性电路的动态过程	249
10.4 网络函数与电路的动态过程	253
习题十	258
第十一章 二端口网络	261
11.1 二端口网络的基本概念	261
11.2 二端口网络的参数	262
11.3 二端口的等效电路	272
11.4 二端口的转移函数	273
11.5 二端口的连接	274
习题十一	277
第十二章 电路方程的矩阵形式	280
12.1 割集和基本割集	280
12.2 关联矩阵、回路矩阵和割集矩阵	283
12.3 支路方程的矩阵形式	293
12.4 节点电压方程的矩阵形式	296
12.5 割集电压方程的矩阵形式	300
12.6 回路电流方程的矩阵形式	303
习题十二	307
第十三章 非线性电路	313
13.1 非线性电阻及其特性	313
13.2 非线性电阻电路的图解分析	315
13.3 分段线性化方法	318
13.4 小信号分析	323
13.5 非线性电容和非线性电感	326
习题十三	328
附录 电路机辅分析	332
F.1 概述	332
F.2 电路数据的格式与输入	333
F.3 网络方程的直接形成	337
F.4 方程组的求解	345
F.5 分析结果的形成与输出	350

第一章 电路模型和基尔霍夫定律

本章提要：介绍电路模型的概念，电压、电流的参考方向，讨论各种电路元件的特性，建立电路元件特性方程。最后介绍电路的基尔霍夫定律，明确电路元件的互联性质，即拓扑约束关系。

1.1 电路和电路模型

在现实生活和生产中，人们所接触到的实际电路，是由电气设备和电器件按一定的联接方式而组成的，并为电流提供了通路。这些电气设备和电器件，包括供电设备、用电设备、电阻器、电容器、电感器、晶体管、集成电路等。如图 1.1(a) 所示，是由于电池、灯泡、开关和导线所组成的一个简单电路。

实际的电路种类是很多的。按其用途分类有：电力电路，通讯及信息电路，计算机电路等等。通过这些电路来实现电力的传输和分配，信号的控制和处理，信息的发送和存储等。虽然这些电路在设计方法、结构组合、功能特点等方面各有不同，但它们都是以电路理论为基础建立起来的。

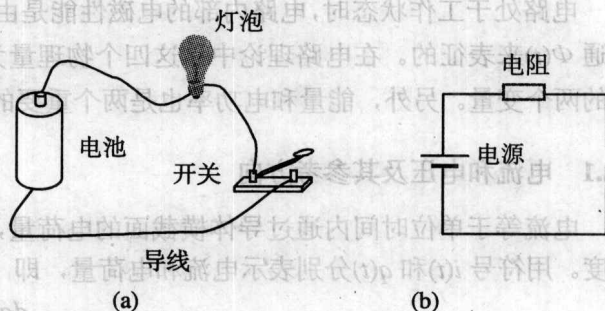


图 1.1 电路范例

电路理论是研究电路普遍规律的一门科学，它讨论的对象不是实际的电路和电气设备或电器件，而是它们的模型。由实际电路的定义可知，要建立电路的模型，首先要建立构成电路最基本的电气设备和电器件的模型。

所谓电气设备和电器件的模型，是指在一定条件下能准确地反映电气设备或电器件的主要电磁性能，而从中抽象出来的一种理想化的电路元件。电路元件与电气设备或电器件在概念上是不同的，前者是模型，并有其严格的数学定义，后者是实物。模型只是在一定程度上反映电气设备和电器件的电磁性能，它不等于实物，但是它可以逼近实物。显然要得到一个最佳地逼近电气设备和电器件的实际效果，就得抽象出最佳的元件模型。电路元件模型是唯一的，它只能反映一种电磁性能，用一种特定的函数关系来表示，它并非与电气设备和电器件一一对应。仅有的几种电路元件，就能描述诸多电气设备和电器件的电磁性能。当在某种情况下，一些电气设备和电器件的电磁性能，用一个模型不

能足以最佳逼近时，可以用多个或多种模型的组合来逼近，以准确地反映其电磁性能。

电路元件相互连接构成电路模型。如图 1.1(b)所示的电路是图 1.1(a)电路模型。这个模型是由三个元件和无电阻的导线组合而成的。在图 1.1(a)中干电池的电磁特性是提供电能，所以可以将其抽象为一个提供电能的电源元件，如图 1.1(b)所示的电源。白炽灯的主要电磁性能是消耗电能，可用一个电阻元件表示。诸如此类，各种电气设备和电器元件及实际电路均有各自的模型。电路理论基础中所研究的对象就是这种电路模型，习惯上称为电路。大规模的电路又称为电网络，简称为网络。

电路的电磁性能可以用电流、电压、电荷和磁通等物理变量来表示。电路中每个元件所反映的电压和电流之间的关系可以用参数来表示，称这种元件为集中参数元件。由这些集中参数元件组成的电路，称之为集中参数电路，或集总参数电路。大部分电路都是集中参数电路。但也有一些电路在对其进行分析和计算时，需要分析研究沿电路各处的电压和电流的分布规律，考虑参数的分布性，例如，远距离的输电线和电视馈线等，这种电路称为分布参数电路。电路理论基础研究的电路是集总参数电路。

1.2 电路变量

电路处于工作状态时，电路内部的电磁性能是由物理量电压 $u(t)$ 、电流 $i(t)$ 、电荷 $q(t)$ 、磁通 $\Phi(t)$ 来表征的。在电路理论中称这四个物理量为电路变量，其中电流和电压是最常用的两个变量。另外，能量和电功率也是两个重要的电路变量。

1.2.1 电流和电压及其参考方向

电流等于单位时间内通过导体横截面的电荷量，用以衡量电流大小的量，称为电流强度。用符号 $i(t)$ 和 $q(t)$ 分别表示电流和电荷量，即

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

通常，习惯上将正电荷移动的方向定为电流的正方向，也称电流的实际方向。

如果电流的大小和方向都不随时间变化，则这种电流称为恒定电流，简称直流 (Direct current, 缩写为 DC) 可用符号 I 表示。如果电流的大小和方向都随时间变化，则这种电流称为交变电流，简称交流 (Alternating current, 缩写为 AC) 可用符号 $i(t)$ 来表示。

以上规定了电流的实际方向。但是在进行电路分析时，电路中某个元件或某段电路的电流是未知的，也可能是随时间变化的，这时就很难用一个固定箭头来表示出电流的实际方向。为了解决这个问题，需要指定电流的参考方向。参考方向的指定可以是任意的，一般可用一个实箭头表示。如图 1.2(a)所示，长方框表示电路中的一个元件或一段电路。箭头由 a 指向 b 的方向，是指定流经这个元件电流的参考方向。但流过元件的电流的实际方向，可能是由 a 指向 b，也可能是由 b 指向 a。也就是说，电流的参考方向与

电流的实际方向要么相同，要么相反。若电流的实际方向是由 a 指向 b，如图 1.2(b)中虚线箭头所示，它与指定的参考方向一致，则电流 i 为正值，即 $i > 0$ 。在图 1.2 (c)中指定

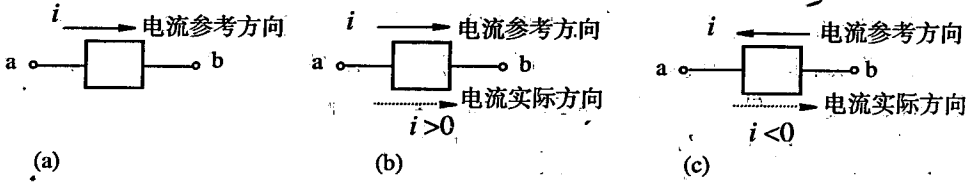


图 1.2 电流参考方向

电流的参考方向是由 b 指向 a，而实际方向是由 a 指向 b，与电流 i 的参考方向相反，即 $i < 0$ 。这样，在已指定电流参考方向的情况下，电流 i 值的正和负，就反映了电流 i 的实际方向。电流参考方向指定后，电流 i 就为代数量，若没指定电流参考方向，电流 i 的正和负值毫无意义。所以在分析电路时要预先指定电流的参考方向。

电压等于单位正电荷在电场力作用下由 a 点移到 b 点时所做的功，即

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

式(1-2)中， dq 表示电荷由 a 点转移到 b 点的电量，单位为库仑 [国际单位制中符号为 C]， dw 为转移过程中，电荷 dq 所失去的电能，单位为焦耳 [J]，电压单位为伏特 [V]。

单位正电荷在电场力的作用下由 a 移到 b，消耗电能，则 a 点是高电位点，称为正极，用符号“+”表示，b 点为低电位点，称为负极，用“-”号表示。电荷转移失去电能表现为电压降落，即电压降。通常表达电路中两点之间的电压方向，可用电压极性或电压降方向表示。

若电压的大小和极性均不随时间变动，这样的电压称为恒定的电压或直流电压，可用符号 U 表示。若电压的大小和极性均随时间变化，则称为交变电压或交流电压，用符号 $u(t)$ 表示。

对电路两点之间的电压，如同电流一样，也需要指定参考极性或参考方向。当指定电压参考极性或参考方向后，电压 u 的值就成为代数量。在图 1.3(a)中，如果指定 a 点的电位高于 b 点的电位，a 点为“+”极性，b 点为“-”极性，若实际上 a 点的电位高于

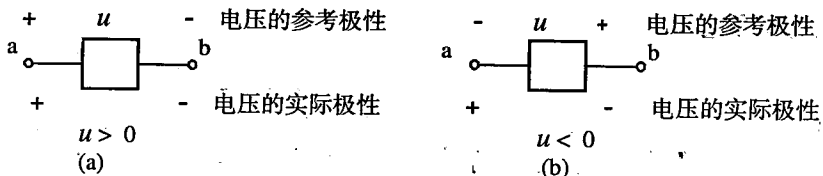


图 1.3 电压的参考极性

b 点的电位，则电压 $u > 0$ 。这表示元件两端的电压实际极性与指定参考极性相同，或者说电压实际方向与参考方向一致。如果 $u < 0$ ，说明电压的指定参考方向与实际方向相反，

如图 1.3(b)所示。

一个元件通过的电流或端电压的参考方向可以分别任意指定。如果指定流过元件的电流参考方向是从标有电压“+”极性的一端指向“-”极性的一端，即电流和电压参考方向一致，则把这种电流和电压参考方向称为关联参考方向，如图 1.4(a)所示。当电压和电流的参考方向不一致时，称为非关联参考方向。在图 1.4(b)中，N 表示电路的一部分，N 有两个端子与外电路相连，为二端电路，其电流 i 的参考方向是从电压的“+”极流入二端电路，再从“-”极流出，电流和电压参考方向一致，所以是关联参考方向。图 1.4(c)所示电流与电压是非关联参考方向。

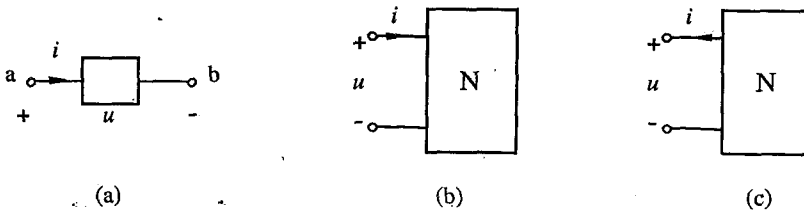


图 1.4 关联的参考方向

在国际单位制(SI)中，已规定了电路变量的单位，如安、伏、秒等。表格 1-1 中列出了 SI 单位制中规定的十进制倍数和分数的单位词头。例如：

- 1 微安 [μ A] = 1×10^{-6} 安 [A]
- 5 千伏 [KV] = 5×10^3 伏 [V]
- 2 毫秒 [ms] = 2×10^{-3} 秒 [S] 等等。

表 1-1 部分国际制(SI)倍数与分数词头

倍率	词头名称		词头符号	分率	词头名称		词头符号
	中文	原文(法)			中文	原文(法)	
10^{12}	太[拉]	tera	T	10^{-1}	分	deci	d
10^9	吉[咖]	giga	G	10^{-2}	厘	centi	c
10^6	兆	mega	M	10^{-3}	毫	milli	m
10^3	千	kilo	k	10^{-6}	微	micro	μ
10^2	百	hecto	h	10^{-9}	纳[诺]	nano	n
10	十	deca	da	10^{-12}	皮[可]	pico	p

1.2.2 电功率和电能

在电路中电荷流动时，总是伴随着电能和其它形式能量的相互转换。电荷在电路的某些部分(如电源处)得到电能，而在另外一些部分(如电阻元件处)失去电能。正电荷从电路元件电压的“+”极端，经元件移到电压“-”极端，是从高电位点移向低电位点，是电场力对电荷做功的结果，这时，电荷失去电能，元件吸收能量，或者称元件消耗电能。相反地，正电荷从电路元件电压“-”极端，经元件到电压的“+”极端，是外力(化学力、电磁力等)对电荷做功，这时电荷获得电能，元件发出电能，或者称元件提供电能。

若某一个电路元件两端的电压为 $u(t)$ ，在 dt 时间内从电压“+”极端到“-”极端流

过元件的电量为 dq ，那么由式(1-2)和(1-1)可得电场力所作的功，即元件所吸收的电能为

$$dw(t) = u(t) dq(t) = u(t) \cdot i(t) dt \quad (1-3)$$

式(1-3)中 $w(t)$ 为电能的符号。

电能对时间的导数是电功率，电功率的符号用 $p(t)$ 来表示，于是该元件吸收的电功率为

$$p(t) = \frac{dw(t)}{dt} = u(t)i(t) \quad (1-4)$$

若元件的电流为直流电流 I ，电压为直流电压 U ，则电功率为

$$P = UI \quad (1-5)$$

式(1-4)或(1-5)中的电压 $u(t)$ 和电流 $i(t)$ 是关联参考方向， $p(t)$ 为元件吸收的电功率。若在某时， $p(t) > 0$ 时，表明元件确实吸收电功率； $p(t) < 0$ 时，表明元件实际上提供了电功率，或输出电功率。

电流的单位为安培[A]、电压的单位为伏特[V]、能量的单位为焦耳[J]、时间的单位为秒[S]时，则电功率的单位为瓦特[W]。

从 t_0 到 t 的时间内，元件吸收的电能，由(1-2)式求得为

$$w = \int_{q(t_0)}^{q(t)} u(t) dq \quad (1-6)$$

由(1-4)式得

$$w = \int_{t_0}^t u(\xi) i(\xi) d\xi \quad (1-7)$$

若选择 $t_0 = -\infty$ ，且假设 $w(-\infty) = 0$ ，则

$$w = \int_{-\infty}^t u(\xi) i(\xi) d\xi \quad (1-8)$$

式(1-8)表示时间从 $-\infty$ 直到 t 为止，元件所吸收的能量。

若对任意时间 t 下式都成立

$$w(t) = \int_{-\infty}^t u(\xi) i(\xi) d\xi \geq 0 \quad (1-9)$$

则说明，时间变化到任意时刻 t 为止，送入元件的能量为正值，该元件是能量的消耗者，这类元件称为无源元件；若 $w(t) < 0$ ，则该元件为有源元件。

设一个元件的初始电压和电流均为零，随时间增长，元件吸收的能量从无到有，又从有到无，逐渐变化，最终又衰减到零，即送入元件的总能量为零，则称此元件为无损耗元件。用数学式子表示为

$$w = \int_{-\infty}^{\infty} u(\xi) i(\xi) d\xi = 0 \quad (1-10)$$

式中 $u(-\infty) = u(\infty) = i(-\infty) = i(\infty) = 0$ 。若 $w(t) \neq 0$ ，则该元件为有损元件。

以上有损和无损及有源和无源元件的定义，也可以在分析多端元件时应用。

例 1-1 计算图 1.5 所示各电路的电功率。设图(a)中，(1) $I = 1\text{ A}$, $U = 2\text{ V}$; (2) $I = 1\text{ A}$, $U = -2\text{ V}$ 。设图(b)中，(1) $I = -2\text{ A}$, $U = 3\text{ V}$; (2) $I = -2\text{ A}$, $U = -3\text{ V}$ 。



图 1.5 例 1-1 题图功率的计算

解 在图 1.5(a)中 I 和 U 为关联参考方向。

(1) 元件吸收的电功率为

$$P = UI = 1 \times 2 = 2\text{ W}$$

(2) 元件吸收的电功率为

$$P = UI = (-2) \times 1 = -2\text{ W}$$

计算结果为负值，表明该元件向外提供 2W 电功率。

在图(b)中，电压和电流为非关联参考方向， U 与 I 的乘积表示该元件提供的电功率。

(1) 元件提供的电功率为

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

元件提供的电功率为负值，表明其实际吸收了 6W 电功率。

(2) 元件提供的电功率为

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

计算结果为正值，表明该元件向外提供 6W 电功率。

1.3 电路元件

电路元件是构成集中参数电路的最基本单元。元件按一定方式进行互联而组成电路，这种连接是通过元件端子来实现的。元件就其端子的数目，可分为二端元件，如图 1.6(a) 所示。具有两个以上端子的元件称为三端、四端、…… n 端元件，统称为多端元件。如

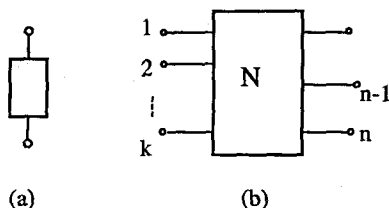


图 1.6 二端元件与多端元件

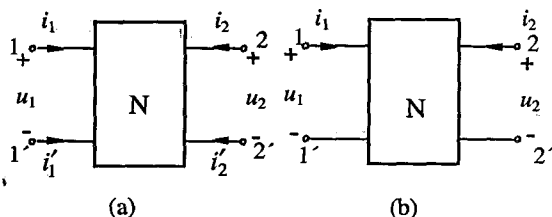


图 1.7 四端元件与二端口元件

图 1.6(b)为 n 端元件。在图 1.7(a)四端元件中,如果 $i_1 = -i'_1, i_2 = -i'_2$ 时,该元件构成了 1-1' 和 2-2' 两个端口,这种元件称为二端口元件,或称双口元件。通常二端口元件中每个端口的电流只需用一个电流表示,如图 1.7(b)所示。

元件的主要电磁性能是通过端子间有关变量来描述的,不同变量间的特定关系,反映了不同元件的性质。元件的这种关系可用一条曲线、一个或一组方程来表示,该曲线称为元件的特性曲线,该方程或方程组称为元件的定义(或特性)方程或方程组。通常,在电路分析中,用元件端电压与电流的关系(Voltage Current Relation, 缩写 VCR)来表征元件的特性。VCR 方程也称为元件的特性方程或称为元件的约束方程。

电路元件还可以分为线性元件和非线性元件,时变元件和时不变元件等等。本章介绍的是线性时不变元件(也称为线性定常元件)。

1.3.1 电阻元件

电阻元件是指电阻器、白炽灯、电炉等实际电路器部件的理想化模型。这些实际电路器部件的共同电磁特性是消耗电能。电阻元件就是模拟这种电磁特性的理想化的二端元件。

一个二端元件,在任何时刻 t ,它两端的电压 $u(t)$ 和电流 $i(t)$ 的关系遵循欧姆定律(ohm's law),有

$$u(t) = R i(t) \quad (1-11)$$

或

$$i(t) = G u(t) \quad (1-12)$$

则这个二端元件称为线性时不变电阻元件,简称电阻元件。

式(1-11)和式(1-12)中,电压 $u(t)$ 和电流 $i(t)$ 为关联参考方向,参数 R 称为电阻(系数),单位是欧姆 $[\Omega]$ 。参数 G 为电导(系数),单位是西门子[S]。对同一电阻,显然 $GR=1$ 。电阻的电路图形符号如图 1.8(a)所示。

电阻元件的特性可以在 $u-i$ 坐标平面上用一条通过原点的直线表示,如图 1.8(b)所示。该曲线称为电阻的伏安特性曲线。伏安特性曲线位于 $u-i$ 坐标平面的 I、III象限, R 和 G 均为正值。

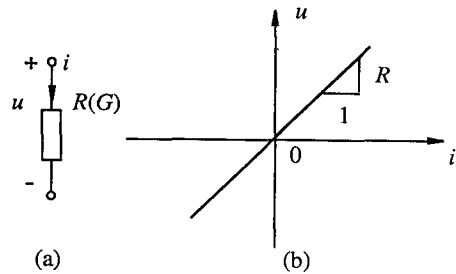


图 1.8 电阻的符号和特性

电阻元件消耗的电功率为 $P = u i$,将式(1-11)和(1-12)分别代入其中,得到

$$P = u i = R i^2 = G u^2 \quad (1-13)$$

式(1-13)中 G 和 R 为正值(一般情况下),则 $P > 0$,说明电阻元件消耗电功率,电阻是耗能元件。从能量角度分析,直到 t 时刻电阻消耗的电能为