

自动化

专业本科系列教材

Dianlu

电路

0101001000100001

张兢 主编

重庆大学出版社

电 路

张 兢 主 编

重庆大学出版社

内 容 简 介

本书是根据教育部颁发的《电路课程教学基本要求》编写的。

“电路”课是自动化、电子信息工程等电类专业的一门重要的专业基础课。它的任务是通过本课程的学习,掌握电路的基本理论、电路分析的基本方法和进行实验的初步技能,并为后续的课程准备必要的电路知识。

本书的主要内容有:电路模型和电路定律;电阻电路的等效变换;电阻电路的一般分析方法;电路定理;含有运算放大器的电阻电路;一阶电路;二阶电路;相量法基础;正弦稳态电路的分析;磁路和铁心线圈;耦合电感和理想变压器;三相电路;傅立叶分析的应用;拉普拉斯变换的应用;网络函数;二端口网络及非线性电路和均匀传输线等。每章末尾附有习题,书末附有部分习题参考答案。

本书可作为电子技术、通信技术、电子信息、电气自动化等专业的本科教材,也可供夜大、自学考试、成人教育有关专业选用,还可供有关科技人员学习参考。

图书在版编目(CIP)数据

电路/张兢主编. —重庆:重庆大学出版社,2003.8

(自动化专业本科系列教材)

ISBN 7-5624-2774-7

I. 电... II. 张... III. 电路—高等学校—教材 IV. TM13

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2003)第 032218 号

电 路

张 兢 主 编

责任编辑:周 立 胡新炼 版式设计:周 立

责任校对:任卓惠 责任印制:秦 梅

*

重庆大学出版社出版发行

出版人:张鸽盛

社址:重庆市沙坪坝正街174号重庆大学(A区)内

邮编:400044

电话:(023) 65102378 65105781

传真:(023) 65103686 65105565

网址:<http://www.cqup.com.cn>

邮箱:fxk@cqup.com.cn (市场营销部)

全国新华书店经销

重庆铜梁正兴印务有限公司印刷

*

开本:787×1092 1/16 印张:21 字数:524千

2003年8月第1版 2003年8月第1次印刷

印数:1—5 000

ISBN 7-5624-2774-7/TM·90 定价:25.00元

本书如有印刷、装订等质量问题,本社负责调换

版权所有 翻印必究

前言

面向 21 世纪,社会对德才兼备的高素质科技人才的需求更加迫切。通过行之有效的途径和方法培养符合时代要求的优秀人才,是摆在全社会尤其是高等院校面前的一项艰巨而现实的任务。

为了强化素质教育,使大学生学有所长,增长才智,高等教育部门各有关单位对高等学校公共基础课、专业技术基础课到专业课的整个教学过程都做了大量细致的工作。与之相配合,不少出版社也相继出版了各类满足不同需求的教材。《电路》这本书就是在这样的大环境下编写出版的。

《电路》课是自动化、电子信息工程等电类专业的一门重要的专业基础课。它的任务是通过本课程的学习,掌握电路的基本理论、电路分析的基本方法和进行实验的初步技能。目前,国内外的一致意见认为电路课程的基本内容和范围大体上已趋稳定。本课程的主要任务是为后续课程和学生将来工作需要准备必要的基础知识。

根据教育部全国高校《电路课程教学基本要求》及电路原理课程在电类工程师培养过程中的地位和作用,本书在编写中重视电路原理的基本内容和基本概念,不过分强调电路原理学科本身的系统性和严密性;重视电路的基本概念、基本方法和基本定律的应用,但不过分追求技巧;注重辩证思维和创新意识的培养。

本教材内容以够用为原则,编写中注意保留了《电路》传统教材特点,对传统内容进行了精选,保证了必需的常用基础知识。为了适应学时数不断缩减的现实,删去了一些不常用的和陈旧的内容,还删减了一些较繁琐的推导和过分强调技巧的内容,而力图突出基本概念和基本原理。文字叙述力求做到深入浅出、清楚、准确,力求做到便于自学,使其更能适应启发式教学方法的需要。

考虑到一些专业的需要,书中增加了磁路和铁心线圈的内容,并独立成章。书末附录中是非线性电路和均匀传输线的基

基础知识,可以根据实际需求和学时情况作适当取舍,不一定都要讲授。适当增加了例题数量,例题不片面追求难度和电路的复杂性。注意了正文、例题和习题的密切配合。

每章附有习题,书末还附有部分习题的参考答案,可供读者参考。全书统一采用国际单位制、国家统一的图形及标准文字符号。

书末列出了参考书目,既为读者提供了一些内容的出处与依据,也为读者在选择参考书时提供便利。

本书主编张兢,副主编蒋军、何莉。参加本书编写的有张兢(第3章、第5章、第14章、第15章和附录B);蒋军(第9章、第10章、第12章);何莉(第2章、第4章、第13章、第16章);陈新岗(第6章、第7章);王智忠(第1章、第11章);陈鸿雁(第8章和附录A)。

本书在编写过程中得到了有关领导和同志的大力支持和帮助,许多兄弟院校的老师 and 同行们为本书的编写提出了许多宝贵意见,在此,一并表示衷心的感谢。

本书可作为电子、通信、电气、自动控制等专业的本科教材,也可供夜大、自学考试、成人教育有关专业选用,还可供有关科技人员学习参考。

由于编者的水平和经验所限,书中不足及错误在所难免,恳请读者批评指正。

编者

2003年1月

目录

第 1 章 电路模型和电路定律	1
1.1 电路和电路模型	1
1.2 电流和电压的参考方向	2
1.3 电阻元件	5
1.4 电容元件	7
1.5 电感元件	9
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
小结	16
习题 1	17
第 2 章 电阻电路的等效变换	20
2.1 引言	20
2.2 等效电阻和电路的等效变换	20
2.3 电阻的串联和并联	21
2.4 电阻的 Y 形连接与 Δ 形连接的等效变换	26
2.5 电压源和电流源的串联和并联	29
2.6 实际电源的两种模型及其等效变换	31
2.7 输入电阻	34
小结	35
习题 2	35
第 3 章 电阻电路的一般分析方法	40
3.1 电路的图	40
3.2 KCL 和 KVL 的独立方程数	41
3.3 支路电流法	44
3.4 回路电流法	46
3.5 节点电压法	52
小结	56
习题 3	57
第 4 章 电路定理	61
4.1 叠加定理	61
4.2 戴维南定理和诺顿定理	65

4.3	最大功率传输定理	69
4.4	应用电路定理分析含受控源电路	70
4.5	互易定理	72
4.6	对偶原理	76
	小结	78
	习题4	78
第5章	含有运算放大器的电阻电路	84
5.1	运算放大器的电路模型及理想运算放大器的条件	84
5.2	含有理想运算放大器的电路分析	86
	习题5	88
第6章	一阶电路	90
6.1	动态电路	90
6.2	电路动态过程的初始条件	92
6.3	一阶电路的零输入响应	94
6.4	一阶电路的零状态响应	98
6.5	一阶电路的全响应	102
6.6	一阶电路的阶跃响应	106
6.7	一阶电路的冲激响应	109
	习题6	114
第7章	二阶电路	119
7.1	二阶电路的零输入响应	119
7.2	二阶电路的零状态响应和阶跃响应	126
7.3	二阶电路的冲激响应	130
	习题7	131
第8章	相量法基础	134
8.1	正弦量	134
8.2	正弦量的有效值	136
8.3	复数的复习	137
8.4	正弦量的相量表示	139
8.5	KCL 与 KVL 的相量形式	141
8.6	R 、 L 、 C 伏安关系的相量形式	142
	习题8	148
第9章	正弦稳态电路的分析	150
9.1	复阻抗和复导纳	150
9.2	阻抗和导纳的串联和并联	151
9.3	正弦稳态电路的分析	155
9.4	正弦稳态电路的功率	157

9.5	功率因数的提高	160
9.6	正弦稳态电路的最大功率传输	161
9.7	串联电路的谐振	162
9.8	并联电路的谐振	165
	小结	167
	习题 9	168
第10章	磁路和铁心线圈	174
10.1	磁场中的基本概念和基本规律	174
10.2	磁路的基本概念和基本定律	175
10.3	铁磁物质的磁化曲线	176
10.4	非线性恒定磁通磁路的计算	178
10.5	非线性交变磁通磁路简介	182
10.6	铁心线圈的电路模型	183
	小结	185
	习题 10	185
第11章	耦合电感和理想变压器	187
11.1	耦合电感	187
11.2	含有耦合电感电路的计算	190
11.3	空心变压器电路的分析	194
11.4	理想变压器	195
	小结	198
	习题 11	199
第12章	三相电路	203
12.1	三相电源和三相电路	203
12.2	线电压(电流)和相电压(电流)之间的关系	205
12.3	对称三相电路的计算	206
12.4	不对称三相电路的计算	208
12.5	三相电路的功率	209
	小结	211
	习题 12	212
第13章	傅立叶分析的应用	214
13.1	非正弦周期信号	214
13.2	周期信号分解为傅立叶级数	215
13.3	有效值、平均值和平均功率	221
13.4	非正弦周期电流电路的计算	224
	小结	227
	习题 13	228
第14章	拉普拉斯变换	230
14.1	拉普拉斯变换的定义	230

14.2	拉普拉斯变换的性质	232
14.3	拉普拉斯反变换的部分分式展开	237
14.4	运算电路	242
14.5	应用拉普拉斯变换法分析线性电路	246
	习题 14	250
第15章	网络函数	254
15.1	网络函数的定义	254
15.2	网络函数的零点、极点	257
15.3	网络函数的零点、极点与冲激响应	257
15.4	网络函数的零点、极点与频率响应	259
	习题 15	261
第16章	二端口网络	264
16.1	引言	264
16.2	二端口的参数及方程	265
16.3	二端口的等效电路	272
16.4	二端口网络的转移函数	274
16.5	二端口网络的联接	276
16.6	回转器和负阻抗变换器	278
	小结	281
	习题 16	281
附录 A	非线性电路	285
A.1	非线性电阻	285
A.2	非线性电容和非线性电感	289
A.3	非线性电路的方程	290
A.4	小信号分析法	292
A.5	分段线性化方法	294
	习题 A	299
附录 B	均匀传输线	301
B.1	分布参数模型	301
B.2	均匀传输线电路模型及其方程	302
B.3	均匀传输线方程的正弦稳态解	303
B.4	均匀传输线的参数和传播特性	306
B.5	均匀传输线上的行波和波的反射	308
B.6	终端接有负载的传输线	309
B.7	无损耗传输线	313
	部分习题答案	317
	参考书目	326

第 1 章

电路模型和电路定律

内容提要

本章首先从电路及电路模型的基本概念出发,介绍电流、电压的参考方向,吸收功率、发出功率的判定和计算方法;还将介绍电阻、电容、电感、独立源和受控源等电路元件;最后介绍分析集总参数电路时所应遵循的最基本的电路定律——基尔霍夫定律。

1.1 电路和电路模型

电路是指由电路元件以一定的方式连接起来的整体。在当今社会中,具有各种各样功能的实际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,为社会的发展和人类的文明进步发挥着巨大的作用。如果没有电路,当今的社会将是不可想象的。

实际电路都是由各种电路器件(电阻器、晶体管、电源等)以一定的方式连接而成,具有传输电能、处理信号、测量、控制、计算等功能。电路的类型多种多样,有大到可以跨地区、跨洲际的电力传输系统,有小到在不大于指甲盖大小的硅片上集成有成千上万个晶体管的集成电路,不同电路的作用也各不相同。日常生活中所用的手电筒电路就是一个最简单的电路。它是由干电池、小灯珠、手电筒壳(连接导体)组成的,如图 1.1(a)所示。干电池是一种电源,对电路提供电能,小灯珠是用电的器件,称为负载,连接导体可使电流构成通路。像这些能看得见、摸得着的电路器件统称为实际电路器件,由实际电路器件连接而成的电路称为实际电路。

电路理论研究电路中发生的电磁现象,并用电流、电荷、电压、磁通等物理量描述其中的过程。然而,实际电路中的电磁现象都是很复杂的,在分析电路时,如果把各个电路器件中的电磁变化关系全部加以考虑,势必会给分析带来极大的困难,而且在工程上也没有这样精确的必要。因此,必须在一定条件下对实际电路器件加以近似化和理想化,用一个足以表征其主要性能的理想元件作为实际电路器件的模型。电路理论正是建立在模型元件基础上的,电路分析的对象也是电路模型而不是实际的电路。电路分析中常用的有 3 种最基本的模型元件:只表征将电能转换成热能的电阻元件;只表征电场现象的电容元件;只表征磁场现象的电感元件。

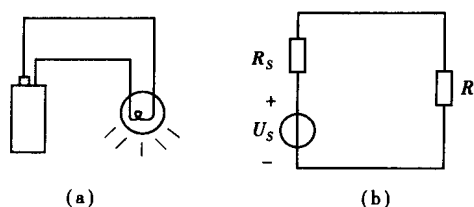


图 1.1 实际电路及其电路模型

每一种理想化元件都有其各自的数学模型并有精确的数学定义。用抽象的理想化元件及其组合近似地替代实际电路,从而构成了与实际电路相对应的电路模型,本书所讨论的电路一般均指电路模型,如图 1.1(b)所示电路是手电筒电路的电路模型。

可以认为理想电路元件的电磁过程都是集中在元件内部进行的,即在任何时刻,从具有两个端钮的理想元件的某一端钮流入的电流,恒等于同时刻从另一端钮流出的电流,并且元件两端钮间的电压值也是完全确定的。凡端钮处电流和端钮间电压满足上述情况的电路元件称为集总参数元件(lumped parameter element),简称为集总元件,由集总元件构成的电路称为集总电路,或称为具有集总参数的电路。

用集总电路来近似实际电路是有条件的,这个条件就是实际电路元件的尺寸要远小于电路工作频率所对应的波长。例如,我国电力用电的频率为 50Hz,对应的波长为 6 000km,对以此为工作频率的实验室设备来说,其尺寸与这一波长相比可以忽略不计,因而用集总概念是完全可以的。但对远距离输电而言,就必须考虑到电场、磁场沿电路分布的现象,不能用集总参数而要用分布(distributed)参数表征。

集总假说是本书最主要的假说。以后所述的电路基本定律均在这一假说前提下才能使用。

电路理论的任务在于通过对电路中电磁效应的研究,预测电路的性状,其目的在于改进电路设计、改善电路性能和降低成本。它的内容包括电路分析和电路综合两个方面,分析是综合的基础。本书作为电路分析的入门,主要介绍电路的基本概念、基本定律和基本计算方法。这些基本知识无论对学习后续课程还是分析和解决实际工程技术问题来说都是重要的基础。

1.2 电流和电压的参考方向

在电路问题的分析中,人们所关心的物理量是电流、电压、功率和能量。在具体展开分析、讨论电路问题之前,首先建立并深刻理解与这些物理量有关的基本概念是很重要的。

电流是电荷的定向运动形成的。电荷有正有负,习惯上规定正电荷运动的方向为电流的方向。

电流的大小用电流强度表示。电流强度在数值上等于单位时间内通过导体横截面的电荷量。电流强度通常简称电流,用符号 i 表示。即

$$i = \frac{dq}{dt} \quad (1.1)$$

在国际单位制(SI)中, t 的单位是秒(s), q 的单位是库仑(C), i 的单位是安培(A)。电流的辅助单位有毫安(mA)、微安(μ A)、纳安(nA)等,它们之间的关系为:

$$1\text{A} = 10^3\text{mA} = 10^6\mu\text{A} = 10^9\text{nA}$$

电流是一个既有大小又有方向的量。但由于电流只有两个流向,因此可以用一个代数量来表示,代数值的绝对值表示电流的大小,代数值的正、负值反映电流的方向。于是引入了电

流“参考方向”的概念。

在一个二端元件上,可以任意选定一个方向作为电流的参考方向,用实线箭头方向表示,当然所选的电流参考方向不一定就是电流的实际方向(用虚线箭头方向表示),这样就可以把电流看成代数量。若电流的参考方向与实际方向一致,则电流为正值;若电流的参考方向与实际方向相反,则电流为负值。于是就可以利用电流的正、负值结合图上指定的电流参考方向,来反映电流的实际方向。例如在图 1.2(a)中, $i > 0$ 时,电流实际方向与参考方向一致;图 1.2(b)中, $i < 0$ 时,电流实际方向与参考方向相反。参考方向一般用箭头(标在连接线上或连接线旁)表示,也可以用双下标表示,如 i_{AB} 表示参考方向从 A 指向 B,显然, $i_{AB} = -i_{BA}$ 。

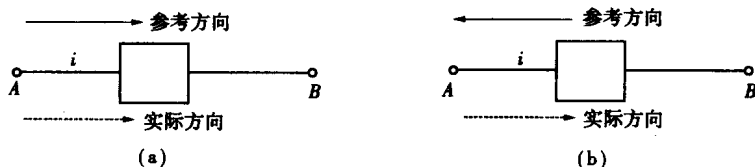


图 1.2 电流的参考方向与实际方向
(a) $i > 0$; (b) $i < 0$

电路中的电流在没有求得以前,它的方向与大小同样是未知的,有时也不能简单地加以判断,有时电流的方向是变化的(如正弦交变电流)。因此在分析电路以前先要设定元件中电流的参考方向。电流的参考方向可以任意设定,但是,一经设定后,列写方程或分析电路时就以这个方向为准,在整个计算过程中不能随意改变。电流值的正与负在设定参考方向的前提下才有意义。

从物理学中知道,将单位正电荷自某一点 A 移到参考点(物理学中习惯选无穷远处作为参考点)电场力做的功的大小称为 A 点的电位。在电路中,电位的物理意义同物理静电场中所讲电位是一样的,只不过电路中某点的电位,是将单位正电荷沿电路所约束的路径移至参考点(习惯选电路中某点而不选无穷远)电场力所做功的大小。

电荷在电场力作用下做有规则的运动,电场力对电荷做了功,电压就是衡量电场力做功能力的一个物理量,电压也叫电位差、电位降落,用 u 表示。

A、B 两点间的电压 u 在数值上等于电场力把单位正电荷从 A 点移动到 B 点所做的功,即

$$u = \frac{dw}{dq} \quad (1.2)$$

在国际单位制(SI)中, w 的单位是焦耳(J), q 的单位是库仑(C),电压的单位是伏特(V)。电压的辅助单位有千伏(kV)、毫伏(mV)、微伏(μ V)等,它们之间的关系为:

$$1\text{kV} = 10^3\text{V}, 1\text{mV} = 10^{-3}\text{V}, 1\mu\text{V} = 10^{-6}\text{V}$$

习惯上把高电位点规定为正极性点,低电位点规定为负极性点。如同讨论电流的方向一样,也引入参考极性或参考方向的概念。电压的参考极性或参考方向就是假定的电压极性或方向。如图 1.3 所示,图中方框代表一个元件或一段电路,实线箭头表示电压参考方向,虚线箭头表示电压真实方向。在设定的参考极性或方向下,电压为正值时,参考极性或方向与真实极性 or 方向一致;反之电压为负值时,参考极性 or 方向与真实极性 or 方向相反。因此,在参考极性 or 方向下,电压值的正或负可以反映电压的真实极性 or 方向。同电流一样,两点间电压数值的正与负,在设定参考方向的条件下才是有意义的。

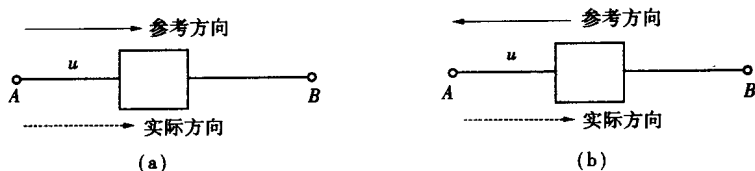


图 1.3 电压的参考极性与实际极性

(a) $u > 0$; (b) $u < 0$

电压的参考极性或方向可用图示的箭头方向来表示;也可用双下标表示,如用 u_{AB} 表示参考方向为由 A 指向 B,显然, $u_{AB} = -u_{BA}$;也可用极性符号“+”和“-”标注在电路的两端,表示电压的参考方向为“+”端指向“-”端。

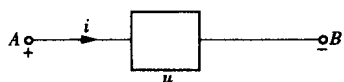


图 1.4 关联参考方向

在分析电路时,一段电路或一个元件上的电压参考极性与电流参考方向可以独立地任意设定。但是为了运算方便,电压与电流的参考方向尽量选取一致,即设定的电流参考方向是从电压参考极性的“+”端流向“-”端,如图 1.4 所示。

电压与电流的参考方向一致时称为关联参考方向,否则,称为非关联参考方向。

在电路的分析和计算中,能量和功率的计算是十分重要的。这是因为电路在工作状况下,总伴随有电能与其他形式能量的相互交换;另一方面,电气设备、电路部件本身都有功率的限制,在使用时要注意其电流值或电压值是否超过额定值,过载会使设备或部件损坏,而使设备不能正常工作。

电功率是电路中能量转换的速率,用符号 p 表示。即

$$p(t) = \frac{dw}{dt} \quad (1.3)$$

把式(1.1)和式(1.2)代入式(1.3),则计算电功率的一般公式为

$$p(t) = u(t)i(t) \quad (1.4)$$

在国际单位制中,电压的单位是伏特(V),电流的单位是安培(A),功率的单位是瓦特(W),能量的单位是焦耳(J)。

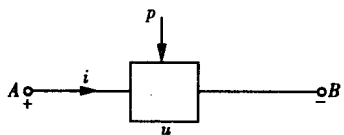


图 1.5 元件的功率

在图 1.5 中,方框泛指元件,在电压、电流关联参考方向下,意味着正电荷从电压的“+”极经元件到“-”极,电荷失去能量而元件获得能量。因为电压 u 表示单位电荷从“+”极流向“-”极失去的能量,电流 i 表示单位时间内流经元件的正电荷量,所以,两者的乘积就是元件吸收的功率。图 1.5

中 p 的箭头表示元件吸收的功率。

在指定电压和电流的参考方向后,应用式(1.4)求功率时应当注意:当电压和电流的参考方向为关联参考方向时,乘积“ ui ”表示元件吸收的功率;当 p 为正值时,表示该元件确实吸收(或消耗)功率。如果电压和电流的参考方向为非关联参考方向时,乘积“ ui ”表示元件发出的功率,此时,当 p 为正值时,该元件确实发出(或产生)功率。一个元件若吸收功率 100W,也可以认为它发出功率 -100W,同理,一个元件若发出 100W 功率,也可以认为它吸收 -100W 功率,这两种说法是一致的。

可见,电路中任一元件的功率,等于该元件电压、电流的乘积,元件实际上是吸收功率还是

产生功率,可由电压、电流参考方向的关联性和功率值的正负来确定。

功率是能量对时间的导数,能量则是功率对时间的积分。由式(1.3)和式(1.4)可知,在 t_0 至 t 的时间内,元件吸收的电能为

$$w(t_0, t) = \int_{t_0}^t p(\xi) d\xi = \int_{t_0}^t u(\xi) i(\xi) d\xi \quad (1.5)$$

式中 u 和 i 都是时间的函数,并且是代数量,因此,电能 w 也是时间的函数,且是代数量。以上关于一个元件功率和能量的讨论,同样适合任何一段电路。

例 1.1 图 1.6 所示电路,已知 $i = 1\text{A}$, $u_1 = 3\text{V}$, $u_2 = 7\text{V}$, $u_3 = 10\text{V}$, 求 ab , bc , ca 三部分电路上各吸收的功率 p_1, p_2, p_3 。

解 对 ab 段、 bc 段,电压、电流参考方向关联,所以吸收功率

$$p_1 = u_1 i = 3\text{V} \times 1\text{A} = 3\text{W}$$

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

对 ca 段电路,电压、电流参考方向非关联,所以这段电路吸收功率

$$P_3 = -u_3 i = -10\text{V} \times 1\text{A} = -10\text{W}$$

实际上 ca 这段电路产生功率为 10W 。

由此可见, $p_1 + p_2 + p_3 = 0$, 即对一完整的电路来说,它产生的功率与消耗的功率总是相等的,这称为功率平衡。这一点通过能量守恒原理是容易理解的。

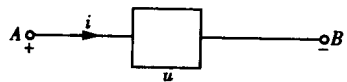


图 1.7 例 1.2 电路图

例 1.2 图 1.7 所示元件中, $i = 5\sin\omega t$, $u = -10\sin\omega t$, 试求元件功率,并分析是吸收功率还是发出功率。

解 由于图 1.7 中的电压和电流的参考方向关联,则有

$$p = ui = -10\sin\omega t \cdot 5\sin\omega t = -50\sin^2\omega t$$

计算结果表明,该元件的功率是随时间变化的,但始终是负值,表示该元件是发出功率的,它是一个电源。

1.3 电阻元件

电阻元件是一个理想的二端元件,它是实际电阻器和各种耗能器件(电灯、电炉等)的理想化模型。线性电阻元件用图 1.8(a)所示符号表示。

在任何时刻,线性电阻元件两端的电压与元件中的电流间的关系满足欧姆定律。即在关联电压、电流参考方向下,电阻元件上的电压、电流关系(称为伏安关系,简称为 VCR)为

$$u(t) = Ri(t) \quad (1.6)$$

式(1.6)中 u, i 是电路变量, R 是表征电阻元件上电压电流关系的参数,称为电阻。在国际单位制中,电压单位为伏特,电流单位为安培时,电阻的单位为欧姆,简称欧(Ω)。因此,字母符号 R 既表示电阻元件,又表示电阻元件的参数。

R 是联系电阻元件电压、电流关系的一个电气参数,它可以表征电阻元件的特性。电阻元

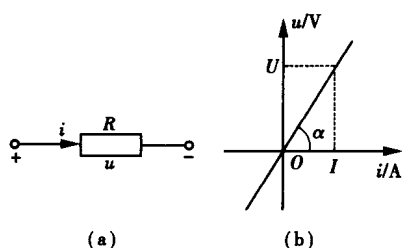


图 1.8 线性电阻元件符号及其伏安特性曲线

件还可另外用一个参数——电导来表征,电导用符号 G 来表示,它是电阻的倒数,即

$$G = \frac{1}{R}$$

在国际单位制中,电导的单位为西门子,简称西(S)。用电导表征电阻元件,则式(1.6)变为

$$i(t) = G \cdot u(t) \quad (1.7)$$

向,则欧姆定律应表示为

$$u(t) = -R \cdot i(t) \quad (1.8a)$$

或

$$i(t) = -G \cdot u(t) \quad (1.8b)$$

所以,应用欧姆定律时必须注意电压、电流参考方向的关联性。

若把电阻元件的电流取为横坐标(或纵坐标),电压取为纵坐标(或横坐标),在 $i-u$ 平面(或 $u-i$ 平面)上画出电压、电流的关系曲线,这称为电阻元件的伏安特性曲线。线性电阻元件的伏安特性曲线如图 1.8(b) 所示,是一条通过坐标原点的直线。其斜率正是元件的电阻 R (或电导 G),即 $R = \tan \alpha$ 。

另外,电阻元件上的电压、电流在任何瞬间总是同时出现的,与该瞬间以前的电压、电流是无关的,所以电阻元件属于“无记忆”元件或“即时性”元件。

在电压、电流的关联参考方向下,任意时刻线性电阻元件吸收的电功率为

$$p(t) = u(t)i(t) = Ri^2(t) = Gu^2(t) \quad (1.9)$$

电阻 R 和电导 G 是正实常数,故 $p \geq 0$,任何时刻的功率恒为非负值。这表明任何时刻电阻元件都不可能向外提供电能,它总是吸收电能并全部消耗掉。所以,线性电阻元件不仅是无源元件,还是耗能元件。

电阻元件在 t_0 至 t 的时间内,吸收的能量为

$$w(t_0, t) = \int_{t_0}^t p(\xi) d\xi = \int_{t_0}^t R \cdot i^2(\xi) d\xi \quad (1.10)$$

在电路中对于任意一个二端元件,有两种特殊情况值得注意。一种是不论它两端的电压为何值,通过它的电流恒为零值,它相当于 $R = \infty$ 或 $G = 0$,在 $i-u$ 平面上的特性就是电压轴,如图 1.9(a) 所示,把它称为“开路”。另一种情况是,不论流过它的电流为何值,它的端电压恒为零,它相当于 $R = 0$ 或 $G = \infty$,它的伏安特性就是电流轴,如图 1.9(b) 所示,称这种情况为“短路”。上述定义及特性均可推广到电路中的任何一对端子之间,如图 1.9(c), (d) 所示。

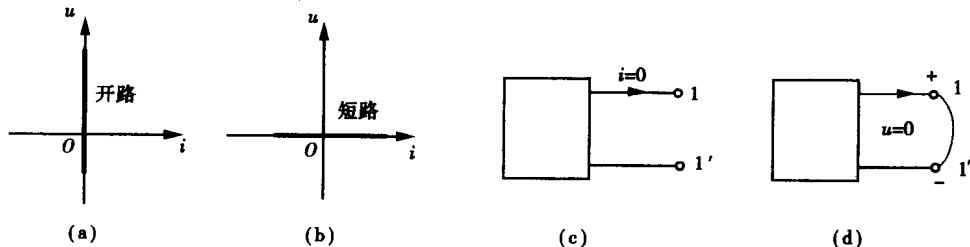


图 1.9 开路和短路及其伏安特性

实际上,可以说所有电阻器件的伏安特性都呈现或多或少的非线性。不过,在一定条件下,许多器件的伏安特性可近似为线性,可用线性电阻元件作为其模型。另外,有些器件的伏安特性呈现明显的非线性,属于非线性器件,要用非线性电阻元件作为器件的模型。还有的电阻器件,电阻值随时间而变化,称为时变电阻器,其模型为时变电阻元件。

例 1.3 一只 220V、100W 的灯泡,在正常点燃时通过灯丝的电流和灯丝的电阻是多少?

解 由式 $P = UI$ 可知,通过灯丝的电流为

$$I = \frac{P}{U} = \frac{100}{220} \text{A} = 0.4545 \text{A}$$

又由公式 $P = \frac{U^2}{R}$ 可知,灯丝的电阻为

$$R = \frac{U^2}{P} = \frac{220^2}{100} \Omega = 484 \Omega$$

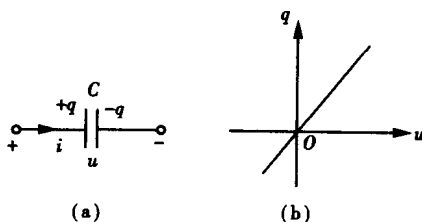
或者根据欧姆定律得

$$R = \frac{U}{I} = \frac{220}{0.4545} \Omega = 484 \Omega$$

1.4 电容元件

电容元件是实际电容器的理想化模型。电容器的品种规格很多,但就其结构来说,都是由两块金属极板间填以不同的介质组成的。在电容器两端接上电源后电容器的两块金属极板上将分别聚集起等量异性的电荷,在介质中建立起电场,并储存电场能量。如断掉电容器两端的电源,极板上的电荷仍聚集着,电场能量也继续存在,所以电容器是一种能够储存电荷和电场能量的器件。实际电容器由于介质损耗及漏电流而会引起电场能量的减少,但对于一个质量优良的电容器来说,介质损耗与漏电流都可忽略不计。因此在一定条件下,可以用电容元件作为实际电容器的理想化模型。

电容元件用图 1.10(a) 所示图形符号表示,其中 $+q$ 和 $-q$ (q 是代数量) 分别是电容元件两极板上的电荷。若电容元件上电压参考极性设定为从带正电荷的正极板指向带负电荷的负极板,那么在任何时刻电容元件极板上所带电荷量 q 与其两端的电压 u 有以下关系:



$$q = C \cdot u \quad (1.11) \quad \text{图 1.10 电容元件及其库伏特性曲线}$$

式(1.11)中 C 是一个与电荷 q 、电压 u 无关的正实常数,是描述电容元件的电荷 q 与电压 u 间关系的一个参数,称为电容。因此,电容 C 既表示了一个元件,又表示了一个元件参数。通常电容元件也简称为电容。

在国际单位制(SI)中,电容的单位是法拉,简称法,用符号 F 表示。当电容极板上带有 1C 的电荷量,它两端电压是 1V,那么该电容元件的电容就是 1F。实际电容器的电容往往比 1F 小得多,因此常用微法(μF)、皮法(pF)作为电容的单位,它们之间的关系为:

$$1\text{F} = 10^6 \mu\text{F} = 10^{12} \text{pF}$$

若取 u 为横坐标, q 为纵坐标, 则线性电容的库伏特性曲线如图 1.10(b) 所示, 也是一条通过坐标原点的直线, 其斜率正是元件的电容 C 。

当电容两极板间电压变化时, 极板上的电荷量也随着变化, 于是电容中就出现了电流。如果设定电流的参考方向为流入正极板(见图 1.10(a)), 即与电容两端电压是关联参考方向, 则

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

把式(1.11)代入, 则可得到电容的电流与电压的关系为:

$$i = \frac{dq}{dt} = C \frac{du}{dt} \quad (1.12)$$

式(1.12)表示, 任何时刻, 通过电容的电流与该时刻电容两端电压的变化率成正比, 而与该时刻的电压值无关。

当 $\frac{du}{dt} > 0$ 时, 则 $i > 0$, 电流实际方向与参考方向一致, 电流流入正极板, 使电荷增加, 这时电容处于充电状态。

当 $\frac{du}{dt} < 0$ 时, 则 $i < 0$, 电流实际方向与参考方向相反, 电流流出正极板, 使电荷减少, 这时电容处于放电状态。

当 $\frac{du}{dt} = 0$ 时, 则 $i = 0$, 说明接入电容元件的电压恒定不变时, 电容电流为零, 这时电容相当于开路状态, 故电容元件有隔直流的作用。

由于电容元件的伏安关系与电压的变动状态有关, 故电容元件属于动态元件。

电容的伏安关系还可以用另一种形式表示, 将式(1.12)两边积分, 得

$$\begin{aligned} u(t) &= \frac{1}{C} \int_{-\infty}^t i(\xi) d\xi = \frac{1}{C} \int_{-\infty}^0 i(\xi) d\xi + \frac{1}{C} \int_0^t i(\xi) d\xi = \\ &u(0) + \frac{1}{C} \int_0^t i(\xi) d\xi \end{aligned} \quad (1.13)$$

式(1.13)中 $u(0)$ 是电容初始时刻的电压, 称为初始电压。可见, 某时刻电容的电压与初始值及从 0 到 t 时的所有电流值有关。所以说, 电容元件是一种“记忆性”元件。

若电容原来没有充过电, $u(0) = 0$, 则:

$$u(t) = \frac{1}{C} \int_0^t i(\xi) d\xi$$

在电压与电流关联正方向下, 线性电容元件吸收的功率为

$$p(t) = u(t) \cdot i(t) = C \cdot u(t) \frac{du(t)}{dt} \quad (1.14)$$

从 t_0 到 t 的时间内, 电容吸收的能量为

$$\begin{aligned} w_c(t_0, t) &= \int_{t_0}^t p(\xi) d\xi = \int_{t_0}^t u(\xi) i(\xi) d\xi = C \int_{t_0}^t u(\xi) \frac{du(\xi)}{d\xi} d\xi = \\ &C \int_{u(t_0)}^{u(t)} u(\xi) d\xi = \frac{1}{2} C u^2(t) - \frac{1}{2} C u^2(t_0) = w(t) - w(t_0) \end{aligned} \quad (1.15)$$