

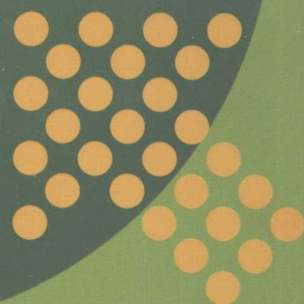
21世纪高等学校规划教材



DIANLI JICHU

电路基础

钟建伟 主 编



中国电力出版社

<http://jc.cepp.com.cn>

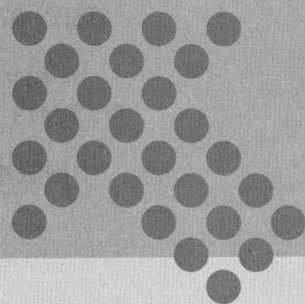
21世纪高等学校规划教材



电路基础

DIANLI JICHU

主 编 钟建伟
编 写 郎建勋 易金桥
主 审 陈意军



中国电力出版社
<http://jc.cepp.com.cn>

内 容 提 要

本书为 21 世纪高等学校规划教材。

全书共分 14 章, 主要内容包括电路基本元件和基本定律、简单电路的等效变换、电阻电路的一般分析、电路定理、动态电路的时域分析、正弦稳态电路的分析、三相电路、非正弦周期电路的稳态分析、电路的复频域分析法、电路方程的矩阵形式、动态电路的状态变量分析法、非线性电路、二端口网络和均匀传输线。书后有微分方程、复数、傅里叶变换、拉普拉斯变换、正弦量、行波和驻波六个附录。本书重视基础内容、基本概念, 结合长期的教学经验, 对部分概念结合实际应用作了更详尽、更具体的诠释; 同时对传统内容进行整合, 增加了一些新的知识点以便于和后续课程接轨。

本书可作为高等学校电气信息类专业基础课教材, 也可作为高职高专和函授教材, 同时可作为相关工程技术人员的参考书。

图书在版编目 (CIP) 数据

电路基础/钟建伟主编. —北京: 中国电力出版社,
2008

21 世纪高等学校规划教材

ISBN 978 - 7 - 5083 - 7352 - 2

I. 电… II. 钟… III. 电路理论—高等学校—教材
IV. TM13

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2008) 第 082079 号

中国电力出版社出版、发行

(北京三里河路 6 号 100044 <http://jc.cepp.com.cn>)

汇鑫印务有限公司印刷

各地新华书店经售

*

2008 年 7 月第一版 2008 年 7 月北京第一次印刷

787 毫米×1092 毫米 16 开本 19.75 印张 478 千字

定价 29.60 元

敬 告 读 者

本书封面贴有防伪标签, 加热后中心图案消失
本书如有印装质量问题, 我社发行部负责退换

版 权 专 有 翻 印 必 究

前言

本书是根据国家教育部教学指导委员会颁布的“电路理论基础”和“电路分析基础”两门课程的教学基本要求,并结合目前实际,为电气信息类专业“电路”和“电路分析”两门课程编写的通用教材。

“电路基础”课程以分析电路中的电磁现象、研究电路的基本规律及电路的分析方法为主要内容。通过本课程的学习,使学生掌握电路的基本理论知识和基本分析方法,为进一步学习电路理论打下基础,为电气信息类专业的后续课程准备必要的电路知识。

本书重视基础内容、基本概念,结合长期的教学经验,对部分概念结合实际应用进行了更详尽、更具体的诠释,以便于学生理解和自学。同时对传统内容进行整合,增加了一些新的知识点以便于和后续课程接轨,保证学生学习的连贯性。

本书的内容分为两大部分:一是集总参数电路;二是分布参数电路,本部分主要内容为均匀传输线。集总参数电路包括线性部分和非线性部分。线性部分含稳态电路和暂态电路。稳态电路的具体内容为直流电路、单相交流电路、互感电路、三相电路、非正弦周期电流电路、二端口电路、电路方程的矩阵形式。动态电路的具体内容包括一、二阶电路的时域分析,电路的复频域分析,动态电路的状态变量分析法,网络函数。本书在内容安排上着重于基本传统内容的叙述和应用,适当引入现代电路理论的一些概念和方法;注重正文、例题、思考题和习题的配合,突出理论和方法中所蕴涵的数学概念、物理基础和工程背景,实现原理、方法和应用的有机结合,努力使学生在学的过程中,既能够获取有效的知识,又能够培养和提高分析问题、解决问题的能力。

本书由湖北民族学院钟建伟、易金桥以及武汉理工大学郎建勋共同编写,钟建伟负责绪论、第1~4章、第11章及附录A的编写,易金桥负责第5章、第7章和第12章的编写,郎建勋负责第6章、第8~10章、第13~14章及附录B~F的编写。各章的习题由钟建伟、易金桥选编。本书由钟建伟担任主编,由湖南工程学院陈意军主审。

限于编者的水平,本书在许多方面可能存在不足与疏漏之处,衷心欢迎批评指正。意见请寄湖北民族学院信息工程学院(邮编:445000),也可发电子邮件至 zhjwei163@163.com。

编者

2008年4月

目 录

前言	
绪论	1
第 1 章 电路基本元件和基本定律	4
1.1 电路和电路模型	4
1.2 电流和电压的参考方向	5
1.3 电功率和能量	6
1.4 电路元件	7
1.5 基尔霍夫定律	15
习题	17
第 2 章 简单电路的等效变换	21
2.1 等效变换的概念和条件	21
2.2 电阻元件的串联和并联	22
2.3 电阻的 Y 形连接和 Δ 形连接的等效变换	24
2.4 独立电源的串联和并联	26
2.5 实际电源的电路模型及其等效变换	27
2.6 输入电阻	29
2.7 电容元件和电感元件的串联、并联	30
习题	31
第 3 章 电阻电路的一般分析	35
3.1 引言	35
3.2 独立的 KCL 和 KVL 方程数	35
3.3 支路电流法	39
3.4 回路电流法	41
3.5 节点电压法	44
习题	47
第 4 章 电路定理	50
4.1 替代定理	50
4.2 叠加定理	51
4.3 戴维南定理和诺顿定理	53
4.4 特勒根定理	59
4.5 互易定理	62
4.6 对偶原理	65
习题	66

第5章 动态电路的时域分析	71
5.1 动态电路的方程及其初始条件	71
5.2 一阶电路的零输入响应与时间常数	75
5.3 一阶动态电路的零状态响应	80
5.4 一阶动态电路的全响应与三要素法	84
5.5 一阶动态电路的阶跃响应和冲激响应	88
5.6 二阶动态电路的零输入响应	93
5.7 二阶动态电路的零状态响应	102
5.8 二阶动态电路的全响应	104
* 5.9 激励为任意波形的响应与卷积积分	106
习题	108
第6章 正弦稳态电路的分析	114
6.1 相量法	114
6.2 正弦稳态电路的分析	123
6.3 正弦稳态电路的功率	130
6.4 谐振电路	139
6.5 含耦合电感的电路	142
习题	153
第7章 三相电路	161
7.1 三相电路的基本概念	161
7.2 对称三相电路的分析	164
7.3 不对称三相电路的分析	166
7.4 三相电路的功率	168
习题	171
第8章 非正弦周期电路的稳态分析	174
8.1 引言	174
8.2 非正弦周期电路的谐波分析法	174
8.3 非正弦周期信号的有效值及电路中的平均功率	177
习题	180
第9章 电路的复域分析法	182
9.1 引言	182
9.2 电路定律的复域形式	183
9.3 电路的复域分析法	185
9.4 网络函数	191
9.5 频率特性	197
习题	200
第10章 电路方程的矩阵形式	205
10.1 割集	205
10.2 有向图的矩阵表示	206
10.3 回路电流方程的矩阵形式	212

10.4	节点电压方程的矩阵形式	214
* 10.5	割集电压方程的矩阵形式	217
* 10.6	列表法	218
	习题	219
* 第 11 章	动态电路的状态变量分析法	223
11.1	引言	223
11.2	状态变量的选择	223
11.3	状态方程的列写和解法	224
	习题	229
第 12 章	非线性电路	231
12.1	非线性元件	231
12.2	非线性电路方程	235
12.3	非线性电阻电路的图解法	236
12.4	小信号分析法	239
12.5	分段线性化方法	242
	习题	245
第 13 章	二端口网络	248
13.1	二端口网络	248
13.2	二端口的方程和参数	249
13.3	二端口的连接	256
13.4	二端口的等效电路	258
13.5	二端口的转移函数	259
13.6	回转器和负阻抗变换器	260
	习题	262
第 14 章	均匀传输线	266
14.1	分布参数模型	266
14.2	均匀传输线及其方程	268
14.3	均匀传输线方程的正弦稳态解	270
14.4	均匀传输线的原参数和副参数	276
14.5	无损耗传输线	278
14.6	无损耗线方程的通解及其波过程	282
	习题	284
附录		286
附录 A	微分方程	286
附录 B	复数	289
附录 C	正弦量	290
附录 D	周期函数的傅里叶级数	292
附录 E	拉普拉斯变换	295
附录 F	行波和驻波	304
参考文献		306

绪 论

一、本课程的地位、任务和作用

电路基础是高等学校电气与电子信息类专业的一门重要基础课,是研究电路理论的入门课程,是培养电气工程技术人员的重要基础课。

学习本课程要求学生具备必要的电磁学和工程数学方面的基础知识。本课程以分析电路中的电磁现象,研究电路的基本规律及电路的分析方法为主要内容,主要为学生进一步学习电路理论打下良好的基础,为学习电气信息类专业的后续课程准备必要的电路知识。

本课程理论严谨,逻辑性强,在培养学生的抽象思维能力和踏实的科学作风,树立理论联系实际的工程观念和提高学生分析问题、解决问题的能力,以及加强基本技能训练等方面起着重要的作用。

二、电路理论的发展简史及现状

电路理论,又称电网络理论,属电路与系统学科的一部分,是整个电气科学中一门极为重要的基础理论。电路理论的历史已有一百多年,这在人类历史的长河中是很短暂的,但电路理论的发展对人类进步产生了十分深远的影响。

人类很早就发现了电与磁的现象,中外古籍早有“静电拾芥”与“磁石吸铁”的记载,我国最早用天然磁石和磁针来导航。然而在很长一段历史时间里,人类在创立和发展电或磁的某种科学概念上并没有取得任何重大的进展。直到 20 世纪 30 年代,电路理论才从一般的电磁理论中脱颖而出,形成了一门独立的学科。从 19 世纪 20 年代到 20 世纪 30 年代这一时期,重要的成果有欧姆定律(1827 年)、基尔霍夫定律(1847 年)、等效电源定理(1853 年)、 Δ -Y 变换(1899 年)、对偶原理(1904 年)、阻抗概念(1911 年)、Foster 的电抗定律(1924 年)、瞬态响应概念(1926 年)、等效电路概念、多端口网络概念等,并且形成了电路模型的概念。所有这一切都是为了满足当时电力工程和通信工程的需要。

20 世纪 30~40 年代,电路在理论上进一步成熟。在此期间的重要成果有网络综合逼近理论(1930 年)、正实函数的概念(1931 年)、网络函数概念(1936 年)、Nyquist 稳定判据(1932 年)、电路的综合实现等。到了 20 世纪 40 年代,电路理论的体系在分析方面主要包括直流、交流和暂态几个组成部分;在综合方面主要包括实现、逼近和等值方面的问题。

20 世纪 40 年代以后,由于生产的发展和第二次世界大战的需要,除了电力和电信以外,自动控制技术也飞速发展。这样,在电气科学技术领域内就形成了三足鼎立的体系:电力系统、通信系统和控制系统。电路理论是这三个系统的共同基础。为了适应这一发展,电路理论经历了一次重大变革。这一发展阶段大体上延伸到 20 世纪 50 年代末和 60 年代初。

在此期间的主要成果有特勒根定理（1952年）、状态变量分析（20世纪60年代）、拓扑分析等。这一次重大变革标志着电路理论在学术体系上进一步完备，在学术思想上进一步成熟。通常把20世纪60年代以前的发展阶段称为经典电路理论阶段。

20世纪50年代中期以后，随着自动控制、信息科学、半导体电子学和微电子学、计算机技术、激光技术以及核科学和航天技术等新兴尖端科学技术的突飞猛进，与它们关系密切的电路理论不得不在内容和概念体系上进行不断的调整和革新，以适应科学技术的发展，这就形成了近代电路理论。近代电路理论的主要特征为：在器件上多端化、电路集成化；在分析方法上系统化、通用化、计算机辅助化；综合上有源化、最佳化、数字化、可集成化；在体系上从线性扩大到非线性、从无源扩大到有源、从时不变扩大到时变、从模拟扩大到数字、从单元件分立扩大到电路系统的集成。新的研究方向迭起，新的研究成果不断涌现，如超大规模集成电路、开关电容网络、故障诊断自动测试技术、非线性电路与系统的分析综合、器件建模和新器件的创制、数字处理与数字综合等都是当前研究的热门。近代电路理论已成为现代科学基础理论中一门十分活跃、举足轻重而又有着广阔发展前景的学科。

三、本书的主要内容

电路理论有三个组成部分，即电路分析、电路综合和电路故障诊断。电路分析是指在电路结构和参数已知的条件下，根据电路分析法建立电路方程求解电路中的电压、电流，从而了解电路的特性；电路综合是指根据所需要的电路特性构建电路并确定参数，使其满足设计要求；电路故障诊断则是在已知电路结构和响应的情况下，通过必要的测试方法和计算，确定开路、短路故障或特性偏离设计值的元件。

本书只涉及电路分析这一部分的基本内容。其中，电路模型及其两类约束关系、电路的等效变换、电路分析法和电路定理是本书最重要的内容。

电路的两类约束关系指元件约束关系和拓扑约束关系。元件约束关系是指元件的特性方程，拓扑约束关系指的是基尔霍夫定律。这两类约束是电路分析中建立电路方程的基本依据。

等效是电路分析中的一种重要思想。等效变换是指在满足等效性的前提下，对电路结构进行的变换。恰当的等效变换可以使电路的分析和计算大大简化。

电路分析法主要讨论如何选择合适的电路变量，并系统地建立电路方程来求解这些变量的方法。本书中所涉及的内容有支路分析法、节点分析法、回路分析法、割集分析法、状态变量分析法。

电路定理主要指叠加定理、替代定理、戴维南定理、诺顿定理、特勒根定理和互易定理六个电路定理，它们反映了电路的最基本的性质。

四、全书的体系结构

本书要研究的核心问题是对于一个结构和参数已知的电路应如何去求解电路中的电压和电流，其基本方法是在电路中选择选择合适的电路变量，根据电路分析法（第三章）建立电路方程来求解。

全书的体系结构可以用表0-1表示。

表 0-1 全书的体系结构

电路名称	电源信号	电路方程的类型	相关章节
电阻电路	恒定直流信号	常系数代数方程	第 1、2、3、4 章
动态电路	直流/交流信号	微分方程 复域方程 状态方程	第 5 章 第 10 章 第 11 章
正弦稳态电路	正弦周期信号	复代数方程 (即相量法)	第 6、7 章
非正弦周期电路	非正弦周期信号	傅里叶变换 相量法	第 8、9 章
非线性电路	直流/交流信号	非线性代数方程 非线性微分方程	第 12 章
二端口网络	直流/交流信号	复域方程	第 13 章
分布参数电路	主要讨论正弦 周期信号	偏微分方程 相量法	第 14 章

通过表 0-1 不难看出，不同的电路虽对应着不同类型的电路方程，但其分析方法是相同的，这一点在学习时应注意。本书主要就是依据电路方程的类型及其所涉及的数学知识来划分和安排全书的体系结构的，其中所用到的数学知识在附录中均有讲解，在学习时可参考相应的附录。

同时可看出，在列电路方程对电路进行分析时，往往同一类型的电路可用不同类型的电路方程来求解，这就说明这些电路方程（也称电路的数学模型）之间必然是有联系的，即这些数学模型之间是可以相互转换的。在学习的过程中，应注意把握这些数学模型之间的联系，即应明确时域模型（微分方程）、频域模型（复系数方程）、复域模型（复域方程）这三者之间的联系，这也是今后学习自动控制原理、信号分析和处理等相关课程的基础。

五、学习电路理论的方法

勤于思考、善于总结、理论联系实际是学好电路理论的关键所在。在学习过程中要不断总结电路理论的分析方法，使之形成体系，明确哪些是一般方法、普遍使用的方法，哪些是特殊的方法，在什么条件下才能使用，如何运用它们。学习过程中要发现问题，总结规律，并把理论运用于实践，最终达到培养解决电路理论相关问题的能力的目的。

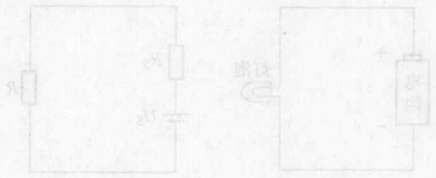


图 1-1 图 1-1(a) 和图 1-1(b) 所示电路

第1章 电路基本元件和基本定律

内 容 简 介

本章首先介绍了电路、电路模型以及电流与电压参考方向等概念,接着介绍了电路基本元件(电阻元件、电容元件、电感元件、独立电源、受控源、运算放大器)的端口特性,最后介绍了电路中最基本的定律——基尔霍夫定律。

1.1 电路和电路模型

电路是人们根据需要,将各种电路器件相互连接而形成的电流的通路,用于电能传输、处理信号、测量、控制、计算等方面。其中,供电设备称为电源,用电设备称为负载。

电源又称为激励源,由电源提供的电压和电流也相应地称为激励信号,简称激励;除激励信号外,电路中的其他电压和电流均是由激励信号产生的,统称为响应信号,简称响应。有时,也根据激励与响应之间的因果关系,把激励称为输入,响应称为输出。

在实际电路中,电路器件的特性千差万别,为了研究方便,通常将这些电路器件用若干个“理想电路元件”的组合表示出来,各理想元件的端子用“理想导线”连接起来,从而构成与实际电路相对应的电路。这种由理想电路元件相互连接组成的电路称为电路模型,电路模型是实际电路的抽象和近似。在电路模型中,根据元件对外端子的数目,理想电路元件可分为二端、三端、四端元件等。

图1-1(a)所示为一个简单的实际电路,这是一个由于电池通过连接导线向灯泡供电的装置,可以用图1-1(b)所示电路作为其电路模型。该模型中的电阻元件 R 作为灯泡的电路模型,反映了将电能转换为热能和光能这一物理现象;干电池用电压源 U_s 和电阻元件 R_s 的串联组合作为模型,分别反映了电池内储化学能转换为电能以及电池本身耗能的物理过程。连接导线用理想导线(电阻为零)表示。

电路理论中的一些理想元件,如电阻、电感、电容等,都分别集总地表现实际电路中的电场或磁场的作用,每一种具有两个端子的元件中有确定的电流,端子间有确定的电压。这样的元件称为集总参数元件,由集总参数元件构成的电路称为集总参数的电路。

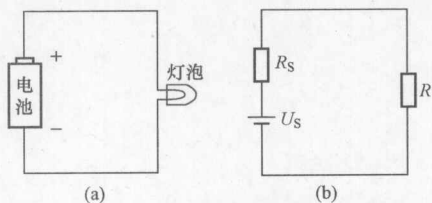


图1-1 一个简单的实际电路
及其电路模型

(a) 一个简单的实际电路; (b) 电路模型

实际电路要能用集总参数的电路去近似,需要满足以下条件,即实际电路的线长必须远小于电路工作频率下的电磁波的波长,或者说电磁波通过电路的时间可认为是瞬时的。

用理想电路元件或它们的组合来模拟实际器件就称为建立电路的模型,简称建模。建模时必须考虑工作条件,并按不同准确度的要求把给定工作情况下的主要物理现象和功能反映出来。有的电路建模比较简

单,有的器件或系统的建模则需要深入分析其中的物理现象才能建立它们的电路模型,需要进行专门研究,本书不做介绍。

本书所涉及电路均指理想电路元件构成的电路模型,同时把理想电路元件简称电路元件。

思考题 实际电路与电路模型之间的区别与联系是什么?

1.2 电流和电压的参考方向

电路的特性是通过电流、电压、电荷、磁通链、电功率和能量等物理量来描述的,这些物理量称为电路变量。在这些变量中,电流和电压是两个基本变量。在绪论中谈到电路研究的核心问题是建立电路方程求解电路中的电压和电流,但在建立方程之前,必须先标出电压和电流的方向。对于简单的直流电路而言,往往可以直接看出电路中的电压和电流的实际方向,但对于较复杂的电路,在求解前判断其中的电压和电流的实际方向就很难了,所以在引入参考方向的概念。

1.2.1 电流的参考方向

图1-2所示为电流的参考方向,其中的方框表示一个二端元件。流过这个元件的电流为 i ,其实际方向或是由A到B,或是由B到A。图1-2中,在导线上标示的箭头表示电流的参考方向,它不一定是电流的实际方向。指定参考方向的用意在于把电流看成代数量。如果电流 i 的实际方向是由A到B,如图1-2(a)中虚线箭头所示,参考方向与实际

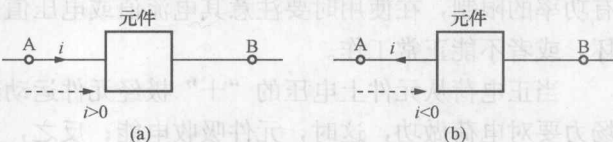


图1-2 电流的参考方向

(a) 电流参考方向与实际电流方向相同; (b) 电流参考方向与实际电流方向相反

方向一致,则电流为正值,即 $i > 0$ 。在图1-2(b)中,指定的电流参考方向自B到A(见实线箭头),如果电流的实际方向是由A到B(见虚线箭头),两者不一致,故电流为负值,即 $i < 0$ 。这样,在指定的电流参考方向下,电流的正和负就可以反映出电流的实际方向。电流的参考方向可以任意指定,一般用箭头表示,也可以用双下标表示,例如 $i_{AB} > 0$ 表示参考方向是由A到B。不标定电路中电流的参考方向,其计算结果的正负无意义;分析电路的过程中,参考方向一旦选定,中途不得更改。

1.2.2 电压的参考方向

对电路中两点之间的电压也可以指定参考方向或参考极性。两点之间的电压参考方向可以用正(+)、负(-)极性表示,正极指向负极的方向就是电压的参考方向,如图1-3所示。指定电压参考方向后,电压就成为一个代数量。在图1-3中,如果A点电位高于B点

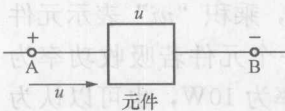


图1-3 电压的参考方向

电位,即电压的实际方向是由A到B,两者的方向一致,则 $u > 0$ 。若实际电位是B点高于A点,两者相反,则 $u < 0$ 。有时为了方便,可用一个箭头表示电压的参考方向(见图1-3)。还可用双下标表示电压,如 u_{AB} 表示A到B之间电压参考方向是由A指向B。

1.2.3 电流和电压的关联参考方向

一个元件的电流或电压的参考方向可以独立地任意指定。如果指定流过元件的电流参考方向是从电压正极的一端指向负极的一端,即两者的参考方向一致,则称元件上的电压和电流为关联参考方向,如图 1-4 所示。当两者不一致时,称为非关联参考方向。人们常常习惯采用关联参考方向。本书中,当一个元件上的只标出了电流(电压)的参考方向,但又要讨论其电压(电流)时,就默认两者是关联参考方向。

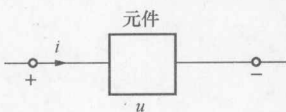


图 1-4 关联参考方向

在国际单位制(SI)中,电流的单位为 A(安培,简称安),电压的单位为 V(伏特,简称伏)。

思考题 在分析和计算电路问题时,为什么要设电流、电压的参考方向?

1.3 电功率和能量

在电路的分析和计算中,能量和功率的计算是十分重要的。这一方面是因为电路在工作状况下总是伴随着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偏离额定值,过载会使设备或部件损坏,或者不能正常工作。

当正电荷从元件上电压的“+”极经元件运动到电压的“-”极时,与此电压相应的电场力要对电荷做功,这时,元件吸收电能;反之,正电荷从电压“-”经元件运动到电压的“+”极时,电场力做负功,元件向外是释放电能。

$t_0 \sim t$ 的时间内,元件吸收的能量可根据电压的定义(A、B 两点的电压在数值上等于电场力将单位正电荷由 A 点移动到 B 点时所做的功)求得为

$$W = \int_{q(t_0)}^{q(t)} u dq$$

由于 $i = \frac{dq}{dt}$, 所以

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

式中, i 和 u 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。

功率是电能对时间的导数,由式(1-1)可知,元件吸收的功率可写为

$$p(t) = u(t)i(t) \quad (1-2)$$

式中, p 是元件吸收的功率。

在指定电压和电流的参考方向后,应用式(1-2)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,此时,当 p 为正值时,表示该元件实际吸收功率。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,表示该元件实际发出功率。一个元件若吸收功率为 10W,也可以认为它发出功率为 -10W,同理,一个元件若发出功率为 10W,也可以认为它吸收功率为 -10W。

在国际单位制 (SI) 中, 当电流的单位为 A, 电压的单位为 V 时, 能量的单位为 J (焦耳, 简称焦), 当时间的单位为 s (秒) 时, 功率的单位为 W (瓦特, 简称瓦)。

思考题 在非关联参考方向下, $p < 0$ 表示元件何含义?

1.4 电路元件

电阻元件、电容元件、电感元件、独立电源、受控源和运算放大器是电路中常见的电路元件, 它们是电路中最基本的组成单元。电路元件通过其端子与外部相连接, 元件的特性则通过与端子有关的物理量来描述。电路元件可分为无源元件和有源元件、线性元件和非线性元件、时不变元件和时变元件等。

本节讨论电路元件主要是讨论单个电路元件上的电压 u 和电流 i 的关系。由于电压和电流的单位分别为 V (伏) 和 A (安), 所以元件的电压—电流关系又称为伏安特性, 也称为元件约束关系 (VCR)。元件约束关系和下一节中谈到的基尔霍夫定律 (也称拓扑约束关系) 是建立电路方程的两类基本依据。

1.4.1 电阻元件

电阻器、电炉、灯泡等在一定条件下可以用二端线性电阻元件作为其模型。线性电阻元件是这样的理想元件: 当电压和电流取关联参考方向时, 在任何时刻其两端的电压和电流服从欧姆定律, 即

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

线性电阻元件的图形符号如图 1-5 (a) 所示。式 (1-3) 中 R 为电阻元件的参数, 称为元件的电阻。 R 是一个正实常数。当电压单位用 V, 电流单位用 A 时, 电阻的单位为 Ω (欧姆, 简称欧)。

令 $G = \frac{1}{R}$, 式 (1-3) 变成

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

式中, G 称为电阻元件的电导, 电导的单位是 S (西门子, 简称西)。 R 和 G 都是电阻元件的参数。

图 1-5 (b) 所示为线性电阻元件的伏安特性曲线,

它是通过原点的一条直线。直线的斜率与元件的电阻 R 有关。

线性电阻元件经过 $u-i$ 平面的直线有两个特殊的情况, 一是直线与 u 轴重合, 二是直线与 i 轴重合。当直线与 u 轴重合时, 流过它的电流恒为零值, 就把它称为“开路”。开路的伏安特性曲线在 $u-i$ 平面上与电压轴重合, 它相当于 $R = \infty$ 或 $G = 0$, 如图 1-6 (a) 所示。当直线与 i 轴重合时, 它的端电压恒为零值, 就把它称为“短路”。短路的伏安特性曲线在 $u-i$ 平面上与电流轴重合, 它相当于 $R = 0$ 或 $G = \infty$, 如图 1-6 (b) 所示。如果电路中的一对端子 $1-1'$ 之间呈断开状态, 如图 1-6 (c) 所示, 这相当于 $1-1'$ 之间接有 $R = \infty$ 的电阻, 此时称 $1-1'$ 处于“开路”。如果把端子 $1-1'$ 用理想导线 (电阻为零) 连接起来, 称这对端子 $1-1'$ 被短路, 如图 1-6 (d) 所示。

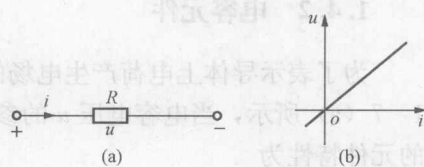


图 1-5 电阻元件及其伏安特性曲线

(a) 线性电阻元件图形符号; (b) 线性

电阻元件伏安特性曲线

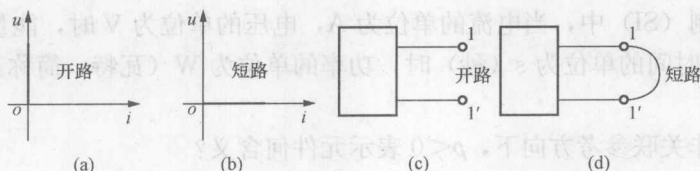


图 1-6 开路和短路的伏安特性曲线

(a) 开路时的伏安特性曲线；(b) 短路时的伏安特性曲线；(c) 电路开路示意图；(d) 电路短路示意图

当电压 u 和电流 i 取关联参考方向时, 电阻元件消耗的功率为

$$p = ui = Ri^2 = \frac{u^2}{R} = Gu^2 = \frac{i^2}{G} \quad (1-5)$$

由于 R 和 G 是正实常数, 故功率 p 恒为非负值, 所以线性电阻元件是一种无源元件。实际电阻器消耗的功率都有规定的限度, 超过规定值就会使电阻器因过热而损坏。所以实际使用电阻器时, 既要使电阻值大小符合要求, 又要注意消耗的功率不要超过其允许值。

电阻元件从 $t_0 \sim t$ 的时间内吸收的电能为

$$W = \int_{t_0}^t Ri^2(\xi) d\xi$$

电阻元件把吸收的电能转换成热能。

线性电阻元件的伏安特性曲线位于第一、三象限。如果一个电阻元件的伏安特性曲线位于第二、四象限, 则此元件的电阻为负值, 即 $R < 0$, 那么就是有源的。负电阻元件实际上是一个发出电能的元件。如果要获得这种元件, 一般需要专门设计。

为了叙述方便, 本书中把线性电阻元件简称为电阻, 所以“电阻”这个术语以及它的相应符号 R , 一方面表示一个电阻元件, 另一方面也表示元件的参数。

1.4.2 电容元件

为了表示导体上电荷产生电场的作用, 引入了电容元件。线性电容元件的图形符号如图 1-7 (a) 所示, 当电容电压 u 的参考极性与极板储存电荷 q 的极性一致时, 线性电容元件的元件特性为

$$q = Cu \quad (1-6)$$

式中, C 是电容元件的参数, 称为电容, 它是一个正实常数。

电容器的电容只取决于导体的几何形状、尺寸和导体间绝缘物质的介电常数。

在国际单位制 (SI) 中, 当电荷和电压的单位分别为 C 和 V 时, 电容的单位为 F (法拉, 简称法)。在实用中, 这个单位太大, 常用微法 (μF)、皮法 (pF) 作为电容的单位,

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

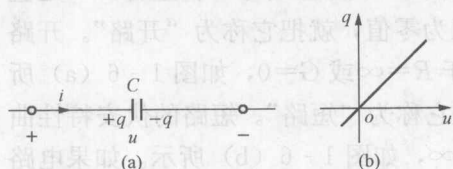


图 1-7 电容元件及其库伏特性曲线

(a) 线性电容元件的图形符号；(b) 线性电容元件的库伏特性曲线

图 1-7 (b) 中, 以 q 与 u 为坐标轴画出线性电容元件的库伏特性曲线。线性电容元件的库伏特性曲线是一条通过原点的直线。

如果电容元件的电流 i 和电压 u 取关联参考方向, 如图 1-7 (a) 所示, 则得到电容元件的电压电流关系 (VCR) 为

$$i = \frac{dq}{dt} = \frac{d(Cu)}{dt} = C \frac{du}{dt} \quad (1-7)$$

表明电流与电压的变化率成正比。当电容上电压发生剧变(即 $\frac{du}{dt}$ 很大)时,电流很大。

式(1-7)的逆关系为

$$q = \int idt \quad (1-8)$$

这是一个不定积分,用定积分表示为

$$q = \int_{-\infty}^t id\xi = \int_{-\infty}^{t_0} id\xi + \int_{t_0}^t id\xi = q(t_0) + \int_{t_0}^t id\xi \quad (1-9)$$

式中 $q(t_0)$ 为 t_0 时刻电容所带电荷。式(1-9)的物理意义是: t 时刻电容具有的电荷等于 t_0 时电容具有的电荷加以 $t_0 \sim t$ 时间间隔内增加的电荷。如果指定 t_0 为时间的起点并设为零,式(1-9)可写为

$$q = q(0) + \int_0^t id\xi \quad (1-10)$$

对于电压与电流的关系,由于 $u = \frac{q}{C}$,因此有

$$u(t) = u(t_0) + \frac{1}{C} \int_{t_0}^t id\xi \quad (1-11)$$

当 $t_0=0$ 时

$$u(t) = u(0) + \frac{1}{C} \int_0^t id\xi \quad (1-12)$$

电容元件的电压 u 与电流 i 具有动态关系,因此,电容元件是一个动态元件。从式(1-12)可见,电容电压除与 $0 \sim t$ 的电流值有关外,还与 $u(0)$ 值有关,因此,电容元件是一种记忆元件。与之相比较,电阻元件的电压仅与该瞬间的电流有关,是无记忆的元件。

在电压和电流的关联参考方向下,线性电容元件吸收的功率为

$$p = ui = Cu \frac{du}{dt}$$

时间从 $-\infty \sim t$ 时刻,电容元件吸收的能量为

$$W_C = \int_{-\infty}^t u(\xi)i(\xi)d\xi = \int_{-\infty}^t Cu(\xi) \frac{du(\xi)}{d\xi} d\xi = C \int_{u(-\infty)}^{u(t)} u(\xi) du(\xi) = \frac{1}{2} Cu^2(t) - \frac{1}{2} Cu^2(-\infty)$$

电容元件吸收的能量以电场能量的形式储存在元件的电场中。在 $t=-\infty$ 时, $u(-\infty)=0$,其电场能量也为零。这样,电容元件在任何时刻 t 储存的电场能量 $W_C(t)$ 将等于吸收的能量,可写为

$$W_C(t) = \frac{1}{2} Cu^2(t) \quad (1-13)$$

从时间 $t_1 \sim t_2$,电容元件吸收的能量为

$$W_C = C \int_{u(t_1)}^{u(t_2)} u du = \frac{1}{2} Cu^2(t_2) - \frac{1}{2} Cu^2(t_1) = W_C(t_2) - W_C(t_1)$$

电容元件充电时, $|u(t_2)| > |u(t_1)|$, $W_C(t_2) > W_C(t_1)$,故在此时间内元件吸收能量;电容元件放电时, $W_C(t_2) < W_C(t_1)$,元件释放电能。元件在充电时吸收并储存起来的能量一定在放电完毕时全部释放,它不消耗能量。所以,电容元件是一种储能元件。同时,

电容元件也不会释放出多于它吸收或储存的能量, 所以它又是一种无源元件。

一般的电容器除有储能作用外, 也会消耗一部分电能。这时, 非理想电容器的模型就必须是电容元件和电阻元件的组合。由于电容器消耗的电功率与所加电压直接相关, 因此, 其模型宜是两者的并联组合。

为了叙述方便, 把线性电容元件简称为电容, 本书中“电容”这个术语以及它的相应符号 C , 一方面表示一个电容元件, 另一方面也表示元件的参数。

1.4.3 电感元件

为表示载流回路中电流产生磁场的作用, 引入电感元件。图 1-8 所示为电感线圈, 其中的电流 i 产生的磁通 ϕ_L 与 N 匝线圈交链, 则磁通链 $\psi_L = N\phi_L$ 。 ϕ_L 与 ψ_L 的方向与电流 i 的参考方向成右手螺旋关系。当磁通链 ψ_L 随时间变化时, 在线圈的端子间产生感应电压。如果感应电压 u 的参考方向与 ψ_L 成右手螺旋关系 (即从端子 A 沿导线到端子 B 的方向与 ψ_L 成右手螺旋关系), 则根据电磁感应定律, 有

$$u = \frac{d\psi_L}{dt} \quad (1-14)$$

由式 (1-14) 确定感应电压的真实方向时, 与楞次定律的结果是一致的。

电感元件是实际线圈的一种理想化模型, 它反映了电流产生磁通和磁场能量储存这一物理现象, 其元件特性是磁通链 ψ_L 与电流 i 的代数关系。线性电感元件的图形符号如图 1-9 (a) 所示, 一般在图中不必也难以画出 ψ_L (ϕ_L) 的参考方向, 但规定 ψ_L 与电流 i 的参考方向满足右手螺旋关系。对于线性电感元件, 其元件特性为

$$\psi = Li \quad (1-15)$$

式中, L 为电感元件的参数, 称为自感系数或电感, 它是一个正实常数。

线圈电感的大小取决于线圈的形状、几何尺寸、匝数和线圈周围磁介质的磁导率。线圈的电感可以根据电磁学的理论计算得出, 还可以用量测电感的仪器测量得出。

在国际单位制 (SI) 中, 磁通和磁链的单位是 Wb (韦伯, 简称韦), 当电流单位为 A 时, 电感的单位是 H (亨利, 简称亨)。

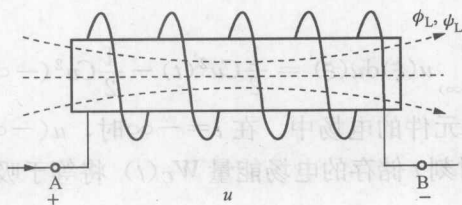


图 1-8 电感线圈

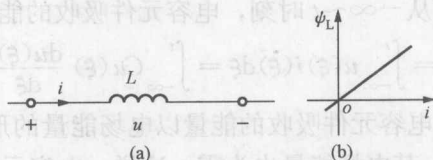


图 1-9 电感元件及其韦安特性曲线

(a) 线性电感元件的图形符号; (b) 线性电感元件的韦安特性曲线

线性电感元件的韦安特性是 $\psi_L - i$ 平面上通过原点的一条直线, 如图 1-9 (b) 所示。

将 $\psi = Li$ 带入式 (1-14), 可以得到电感元件的电压电流关系 (VCR), 即

$$u = L \frac{di}{dt} \quad (1-16)$$

式中, u 与 ψ_L 成右手螺旋关系, u 与 i 为关联参考方向。

式 (1-16) 的逆关系为