



普通高等教育
软件工程

“十二五”规划教材



工业和信息化普通高等教育
“十二五”规划教材

12th Five-Year Plan Textbooks
of Software Engineering

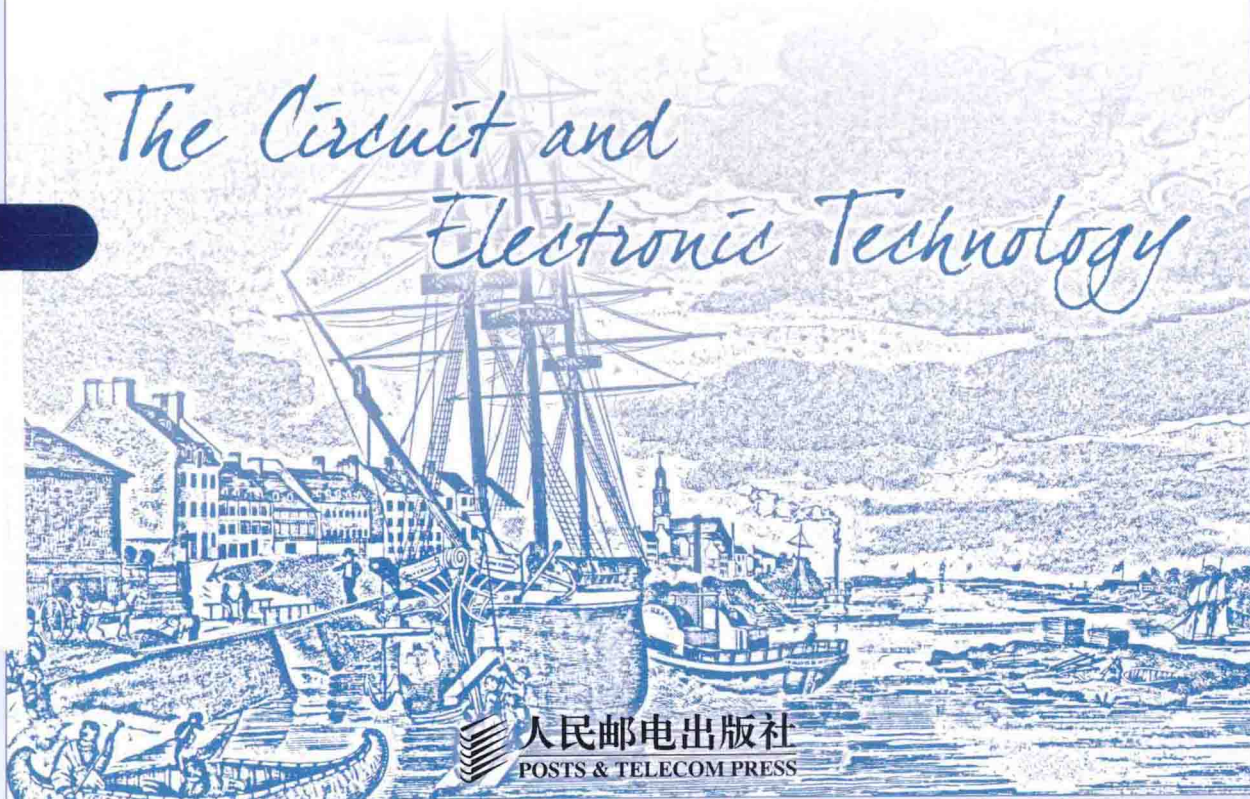


电路与电子技术基础

郝晓丽 ◎ 主编

廖丽娟 武淑红 ◎ 副主编

*The Circuit and
Electronic Technology*



人民邮电出版社
POSTS & TELECOM PRESS



普通高等教育
软件工程

“十二五”规划教材



工业

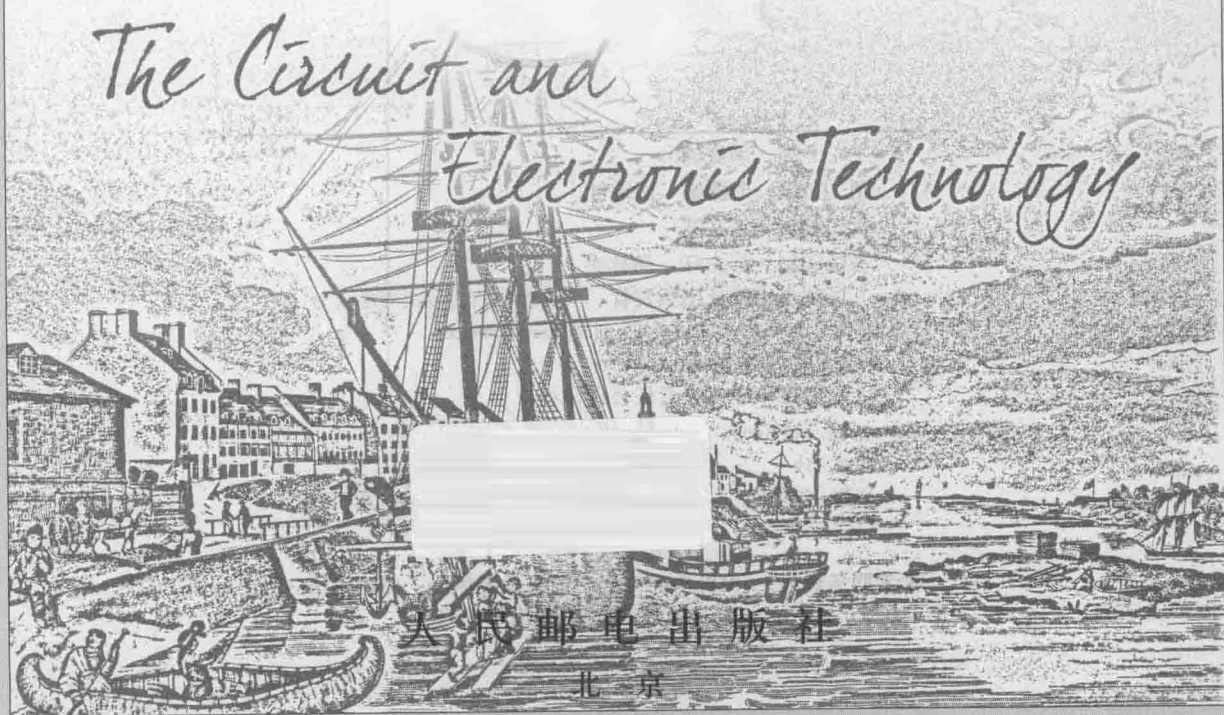
12th Five-Year Plan Textbooks
of Software Engineering

电路与电子技术基础

郝晓丽 ◎ 主编

廖丽娟 武淑红 ◎ 副主编

The Circuit and
Electronic Technology



人民邮电出版社

北京

图书在版编目(CIP)数据

电路与电子技术基础 / 郝晓丽主编. — 北京: 人民邮电出版社, 2014. 10
普通高等教育软件工程“十二五”规划教材
ISBN 978-7-115-36272-8

I. ①电… II. ①郝… III. ①电路理论—高等学校—教材②电子技术—高等学校—教材 IV. ①TM13②TN01

中国版本图书馆CIP数据核字(2014)第196145号

内 容 提 要

本书分为三篇。第一篇为电路分析, 主要介绍电路的基本概念和基本定律, 直流电路分析、动态电路时域分析、正弦稳态交流电路分析; 第二篇为模拟电子技术, 主要介绍半导体器件基础、放大电路基础、集成运算放大电路及其应用; 第三篇为数字电子技术, 主要介绍逻辑代数基础、组合逻辑电路、触发器、时序逻辑电路、数/模和模/数转换等。

本教材知识全面, 深入浅出, 简单易懂, 在基础理论知识够用的前提下, 注重了理论联系实际, 培养学生的实践能力。

本书适合作为高等院校计算机、电子信息、物联网等专业的教科书, 也可以作为自学考试和从事电子技术工程人员的自学用书。

-
- ◆ 主 编 郝晓丽
 - 副 主 编 廖丽娟 武淑红
 - 责任编辑 邹文波
 - 责任印制 彭志环 杨林杰
 - ◆ 人民邮电出版社出版发行 北京市丰台区成寿寺路 11 号
邮编 100164 电子邮件 315@ptpress.com.cn
网址 <http://www.ptpress.com.cn>
大厂聚鑫印刷有限责任公司印刷
 - ◆ 开本: 787×1092 1/16
印张: 19 2014 年 10 月第 1 版
字数: 502 千字 2014 年 10 月河北第 1 次印刷
-

定价: 42.00 元

读者服务热线: (010)81055256 印装质量热线: (010)81055316
反盗版热线: (010)81055315

前言

随着电路分析及电子技术在各个领域广泛的应用,它越来越成为电类专业的重要课程。然而,由于学时数的限制以及高校培养目标改革等诸多原因,以往的相关教材显得篇幅过于庞大,内容多,学时长,容易造成学生学习吃力,负担过重。同时,考虑到计算机类、电子信息类、通信工程及物联网等专业对电路、电子技术课程的不同教学要求,迫切需要一本简单明了、涵盖内容广的教材。本书是顺应“软件工程专业培养计划”的实施,结合当前各专业人才培养厚基础、宽口径的特点,为缩短专业课程学时、较广覆盖教学内容、提高工程化需求编写而成的。

本书将电路分析、模拟电子技术、数字电子技术进行整合,以“学基本概念、架构知识框架、建应用思路”为出发点,将电路分析知识以必需、够用作为授课基础,模拟电子技术的讲授以放大电路为核心进行展开,数字电路则以芯片外部结构及应用为目的进行全书构架。在结构上,既要保持整个知识体系的完整性和连贯性,又要突出各篇章内容的独立性和特殊性;在分析方法上,将“电路分析法为基础、着重系统的外部特性”进行重点层次划分;在实践上,每章根据其内容,辅以仿真实验,并可将其进一步推行至实物实验,提高学生的实践能力,加强学生对知识点的理解和掌握。

本书的编写融入了编者们的丰富的教学实践经验,为了有效地实现课程整合,从内容的选取和衔接、例题和仿真的选定,到重点难点的体现,都做了细致的准备和充分的总结,形成了以深入浅出、通俗易懂为风格,以仿真为依托、技术应用为主线的编写特点。本书适合作为高等院校计算机、电子信息、物联网等专业的教科书,也可以作为自学考试和从事电子技术工程人员的自学用书。

本书编写的原则是:

- (1) 保证知识的基础性,强调概念和基本理论;
- (2) 内容的精心筛选,体现主次详略得当;
- (3) 联系实际应用,理论与实践并重;
- (4) 辅以仿真,便于知识的理解;
- (5) 突出集成电路芯片的外部特点及应用。

本书由太原理工大学郝晓丽担任主编,廖丽娟、武淑红担任副主编。其中,郝晓丽编写第3章、第9章、第11章,廖丽娟编写第5章,武淑红编写第2章、第10章,相洁编写第1章,李梅编写第4章,王芳编写第6章,宁爱平编写第7章,马垚编写第8章。本书的编写思路与内容选择由所有作者共同讨论确定,全书由郝晓丽统稿,廖丽娟、武淑红在本书的定位及编写过程中,付出了大量辛苦的劳动,在此表示感谢。在本书的编写过程中,引用的相关资料,已列于书末的参考文献中,在此一并向资料的作者表示诚挚的谢意。

限于编者的水平,书中难免存在错误和不足之处,欢迎使用本书的教师、学生和工程技术人员批评指正,以便改进和提高。

编者

2014年8月

第一篇 电路基础

第1章 电路的基本概念和基本定律

1.1 电路和电路模型	2
1.2 电路的基本变量	4
1.2.1 电流及其参考方向	4
1.2.2 电压及其参考方向	5
1.2.3 电路中的功率和能量	6
1.3 电路的基本元件	7
1.3.1 电阻元件	7
1.3.2 电容元件	9
1.3.3 电感元件	11
1.4 电源	13
1.4.1 独立源	13
1.4.2 受控源	15
1.5 基尔霍夫定律	16
1.5.1 基尔霍夫电流定律	16
1.5.2 基尔霍夫电压定律	18
1.6 Multisim 仿真应用	19
1.6.1 Multisim 11 软件简介	19
1.6.2 Multisim 11 实例	20
小 结	21
习 题	22

第2章 直流电路及基本分析法

2.1 直流电路的一般分析法	25
2.1.1 支路电流法	25
2.1.2 网孔电流法	26
2.1.3 节点电压法	28
2.2 线性电路的基本定理	30
2.2.1 叠加定理	30
2.2.2 戴维南定理	33
2.2.3 诺顿定理	35
2.3 最大功率传输定理	37
2.4 Multisim 直流电路分析	40
小 结	43
习 题	44

第3章 一阶电路的时域分析

3.1 电路的过渡过程及换路定则	49
3.1.1 电路的过渡过程	49
3.1.2 电路的换路定则	50
3.1.3 初始值的确定	51
3.2 一阶电路的过渡过程	53
3.2.1 一阶电路的零输入响应	53
3.2.2 一阶电路的零状态响应	57
3.3 一阶电路的全响应	59
3.3.1 一阶电路的全响应	59
3.3.2 三要素法	61
3.4 一阶电路的阶跃响应	63
3.4.1 单位阶跃信号	63
3.4.2 阶跃响应	64
3.5 一阶电路的冲激响应	66
3.5.1 单位冲激信号的定义	66
3.5.2 冲激响应	67
3.6 卷积积分	69
3.6.1 信号的时域分解	69
3.6.2 零状态响应——卷积积分	70
3.7 Multisim 动态电路分析	71
小 结	72
习 题	73

第4章 正弦稳态电路分析

4.1 正弦信号的基本概念	77
4.1.1 正弦量的三要素	77
4.1.2 有效值	78
4.1.3 同频率正弦量的相位差	79
4.2 正弦量的相量表示	81
4.2.1 复数	81
4.2.2 相量	83
4.3 正弦稳态电路的相量模型	84
4.3.1 基尔霍夫定律的相量形式	85
4.3.2 无源二端元件伏安关系的相量形式	86
4.3.3 电路的相量模型	88
4.4 简单正弦交流电路的分析	90
4.4.1 二端网络的阻抗与导纳	90

4.4.2 阻抗与导纳的串、并联	91
4.5 正弦交流电路的功率	94
4.5.1 瞬时功率及平均功率	94
4.5.2 无功功率、视在功率和功率因数	94
4.5.3 功率因数的提高	96
4.5.4 最大功率传输	98
4.6 Multisim 正弦稳态分析	99
小 结	101
习 题	102

第二篇 模拟电子技术

第5章 半导体器件基础 106

5.1 半导体基础知识	106
5.1.1 半导体及其特性	106
5.1.2 本征半导体	107
5.1.3 杂质半导体	108
5.1.4 PN 结	109
5.2 半导体二极管	111
5.2.1 二极管的结构及分类	111
5.2.2 二极管的伏安特性	113
5.2.3 二极管的主要参数	114
5.2.4 晶体二极管的检测	114
5.2.5 含二极管的电路分析	115
5.3 晶体三极管	122
5.3.1 晶体三极管的结构及分类	122
5.3.2 晶体三极管的电流放大原理	123
5.3.3 晶体三极管的共射特性曲线	125
5.3.4 晶体三极管的主要参数	126
5.3.5 晶体三极管的引脚及管型的判定	127
5.3.6 含三极管电路分析	128
5.4 场效应管	129
5.4.1 结型场效应管	130
5.4.2 绝缘栅型场效应管	133
5.4.3 场效应管的主要参数	135
5.4.4 场效应管和晶体三极管的比较	136
5.5 Multisim 二极管应用电路分析	136
小 结	138
习 题	139

第6章 放大电路基础 141

6.1 放大的概念	141
6.2 基本共射放大电路的分析	144
6.2.1 放大电路的基本组成	144

6.2.2 静态分析	145
6.2.3 动态分析	146
6.3 放大电路静态工作点的稳定	152
6.3.1 静态工作点稳定的必要性	152
6.3.2 静态工作点稳定电路	153
6.4 放大电路的三种组态及比较	154
6.4.1 基本共集电极放大电路	154
6.4.2 基本共基极放大电路	157
6.4.3 三种组态比较	158
6.5 多级放大电路	159
6.5.1 多级放大电路的耦合方式	159
6.5.2 多级放大电路性能指标分析	161
6.5.3 两级阻容多级放大电路分析	162
6.6 Multisim 共射放大电路分析	163
小 结	165
习 题	165

第7章 集成运算放大器及其应用 169

7.1 集成运放的概述	169
7.1.1 集成运放的特点及分类	169
7.1.2 集成运放的基本组成	170
7.1.3 集成运放的主要技术指标	171
7.2 负反馈放大电路	172
7.2.1 反馈概念的建立	172
7.2.2 反馈的分类及判断	173
7.2.3 负反馈的四种类型	175
7.2.4 负反馈对放大电路性能的影响	177
7.3 具有负反馈的集成运放应用电路	180
7.3.1 理想运放分析基础	180
7.3.2 比例运算电路	181
7.3.3 加法运算电路	182
7.3.4 减法运算电路	183
7.3.5 积分与微分运算电路	185
7.4 滤波的概念及有源滤波电路	186
7.4.1 滤波的概念	186
7.4.2 一阶有源低通滤波电路	188
7.4.3 一阶有源高通滤波电路	189
7.4.4 带通和带阻滤波电路	190
7.5 电压比较器	190
7.5.1 单限比较电路	191
7.5.2 滞回比较电路	192
7.5.3 双限比较电路	194
7.6 Multisim 集成运算放大器应用分析	195
小 结	198

习 题	198
-----	-----

第三篇 数字电子技术

第 8 章 数字逻辑基础 204

8.1 数制与编码	204
8.1.1 数制	204
8.1.2 编码	207
8.2 逻辑代数及其运算	211
8.2.1 基本逻辑运算	211
8.2.2 复合逻辑	214
8.2.3 正逻辑和负逻辑	216
8.3 逻辑代数的基本公式和规则	216
8.3.1 逻辑代数的基本公式	216
8.3.2 逻辑代数的三个重要运算规则	218
8.4 逻辑函数的化简	219
8.4.1 逻辑函数的代数化简法	219
8.4.2 卡诺图化简法	221
8.5 集成逻辑门电路	226
8.5.1 数字集成逻辑门电路的分类	226
8.5.2 OC 门	227
8.5.3 三态门	227
8.5.4 常用的集成 TTL 门电路	228
8.6 Multisim 门电路分析	229
8.6.1 与非门逻辑功能测试	229
8.6.2 逻辑转换仪的使用	230
小 结	231
习 题	231

第 9 章 组合逻辑电路 233

9.1 组合逻辑电路概述	233
9.1.1 组合逻辑电路的特点	233
9.1.2 组合逻辑电路的分析	233
9.1.3 组合逻辑电路的设计	235
9.2 常用组合逻辑电路部件	236
9.2.1 编码器	236
9.2.2 译码器	239
9.2.3 加法器	243
9.2.4 数值比较器	245
9.2.5 数据选择器	246
9.2.6 数据分配器	249
9.3 组合逻辑电路的竞争与冒险	250
9.3.1 竞争与冒险的基本概念	250

9.3.2 消除冒险的基本方法	250
9.4 Multisim 组合逻辑电路仿真分析	251
小 结	251
习 题	252

第 10 章 触发器和时序逻辑电路 254

10.1 触发器	254
10.1.1 基本 RS 触发器	254
10.1.2 其他类型触发器	256
10.2 时序逻辑电路	262
10.2.1 时序逻辑电路的概述	262
10.2.2 时序逻辑电路功能的描述方法	263
10.2.3 同步时序逻辑电路分析举例	263
10.3 常用中规模时序逻辑电路	267
10.3.1 计数器	267
10.3.2 寄存器	273
10.4 Multisim 时序电路仿真分析	277
10.4.1 触发器逻辑功能测试	277
10.4.2 计数器逻辑功能测试	278
10.4.3 同步时序逻辑电路分析	279
10.4.4 移位寄存器功能测试	279
小 结	281
习 题	282

第 11 章 数/模和模/数转换 284

11.1 D/A 转换器	284
11.1.1 D/A 转换器的基本原理	284
11.1.2 D/A 转换器的主要参数	286
11.1.3 集成 D/A 转换器	287
11.2 A/D 转换器	291
11.2.1 A/D 转换的基本结构和工作原理	291
11.2.2 A/D 转换器的组成和工作原理	293
11.3 Multisim 应用于转换器分析	296
小 结	296
习 题	296

参考文献 298

第一章

电路基础

第一篇

电路基础

在当今高度信息化和自动化的社会中，小到家庭生活，大到工农业生产以及科学研究，甚至是军事研究和航空航天探索，电路与系统无处不在。人们听的收音机，通信用的电话、手机，上网用的笔记本电脑以及各种功能的家用电器都离不开电路，工厂企业自动生产线的控制离不开电路，大型医疗设备、水下核潜艇以及航天飞机等的控制更离不开电路与系统。

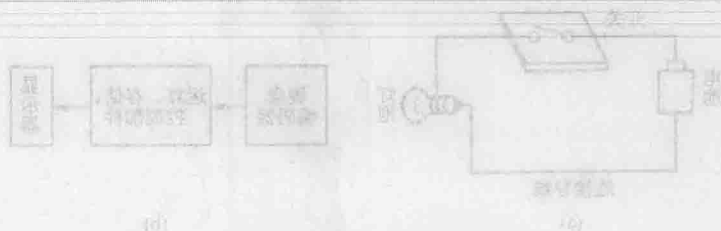


图 1-1 电路基础

图 1-1(a) 所示为控制系统的框图，其中“显示”、“控制”、“执行”三个模块分别代表系统的输入、处理和输出部分。图 1-1(b) 所示为一个基本的物理电路，由一个直流电源、一个开关、一个灯泡和一个电阻器组成，用于说明电路的基本组成和连接方式。

第 1 章

电路的基本概念和基本定律

学习电路基础课程主要是掌握电路的基本概念、基本定理和分析方法。本章主要介绍电路的基本概念，重点包括电路和电路模型、基本变量、基本元件以及电路的基本定律——基尔霍夫定律。

1.1 电路和电路模型

电路是电气设备或电气元件按一定的方式组成并具有一定功能的连接整体，电路为电流提供了通路。

在现代化农业生产、国防建设、科学研究及日常生活中，使用着各种各样的电气设备，例如电动机、雷达导航设备、计算机、电视机以及手机等。广义上说，这些电气设备都是实际电路。

图 1.1 (a) 是一个简单的照明电路，由电池、开关、连接导线、灯泡组成。其作用是把由电池提供的电能传送给灯泡并转换成光能。电池就是该照明电路的电源，提供电能，它的作用是将化学能转换为电能；灯泡是负载，将电源提供的电能转换为光和热能；导线和开关是电源与负载的中间环节，起着连接电源与负载、传输电能及控制的作用。电源、负载和连接导线是任何实际电路不可缺少的组成部分。

图 1.1 (b) 是计算机电路组成的简化框图，它的基本功能是通过处理输入信号实现数值计算。人们在键盘上输入计算数据和步骤，编码器将输入信号表示成二进制数码，经运算、存储、控制部件处理得到计算结果，然后在显示器上输出。

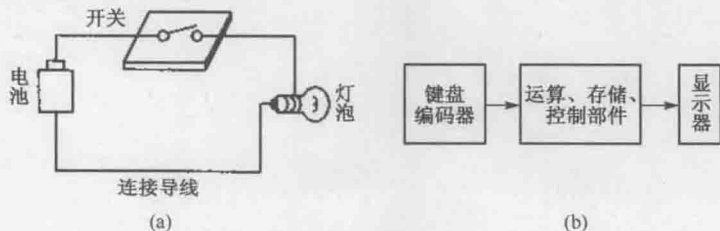


图 1.1 实际电路

实际电路种类繁多，其结构形式多种多样，但从电路的组成和功能上来看，可将电路分为两大类。一类完成能量的产生、传输、分配和转换，典型的例子就是电力系统。一般电力系统包括发电厂、输变电环节和负载三个组成部分。在各类发电厂中，发电机组分别把不同形式的能量（热

电厂的热能、水电厂的水能和核电厂的原子能)转换为电能,并通过输变电环节将电能输送给各用户;通过用户的电灯、电动机、电炉等用电设备把电能转化为其他形式的能量,如灯泡将电能转换成光能,电动机将电能转换成机械能,电炉则将电能转换成热能。这类电路具有电压高(如我国电力系统的运行电压已达 750kV)、电流大、功率强的特点,所以称为强电系统。另一类电路实现信息的传递和处理,如手机、电话、收音机、电视机、计算机等电路。这类电路对输入信号(如声音、音乐、图像等)进行变换或处理成为人们需要的输出信号送到扬声器或显像管等输出设备中进行播出或显示。由于这类电路所涉及的电压和电流都较小,所以称为弱电系统。

在实际电路中使用着各种各样的电气元器件,如电阻器、电容器、电感器、灯泡、电池、晶体管、变压器等。对于一个实际元件来说,其电磁性能也不是单一的。例如,滑线变阻器由导线绕制而成,但有电流通过时,不仅具有电阻的性质(会消耗电能),而且具有电感的性质(还会产生磁场);不仅如此,导线的匝与匝之间还存在着分布电容,具有电容的性质。上述电性质交织在一起共同产生作用,而且电压、电流频率不同时,其表现程度也不一样。

在电路分析中,如果对实际器件的所有性质都加以考虑,将是十分困难的。为此,在电路理论中采用了模型的概念,对于组成实际电路的各种器件,我们忽略其次要因素,只抓住其主要电磁特性,对实际元件加以近似使之理想化,用具有单一电磁性能的理想电路元件来代表它。这与经典力学中采用质点作为小物体的模型一样,用理想电路元件模型进行电路问题的研究与分析可以使问题的处理大为简化,从而便于人们去认识和掌握它们。

对于电路模型的概念特别需要强调的有下面几点。

(1) 理想电路元件是一种理想的模型,它在物理上具有某种确定的电磁性能,在数学上也具有严格的定义,但实际中并不存在。理想电阻元件只消耗电能而没有电场和磁场特性,其元件模型如图 1.2 (a) 所示;理想电容元件只储存电能,既不消耗电能也不储存磁能,其元件模型如图 1.2 (b) 所示;理想电感元件只储存磁能,既不消耗电能也不储存电能,其元件模型如图 1.2 (c) 所示。

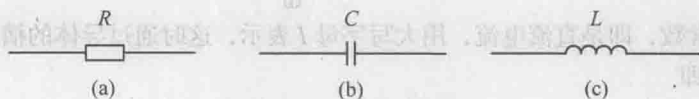


图 1.2 理想元件模型

(2) 不同的实际电路部件只要具有相同的主要电磁特性,在一定的条件下可用同一个电路模型来表示。比如电阻器、灯泡、电炉等,这些器件在电路中的主要特性都是消耗电能,因此都可用理想电阻元件作为它们的模型。

(3) 同一个实际电路部件在不同的条件下可以用不同的模型来表示。例如,一个线圈在工作频率较低时,用理想电感元件作为模型;在需要考虑能量损耗时,使用理想电阻和电感元件串联电路作为模型;而在工作频率较高时,则应进一步考虑线圈绕线之间相对位置的影响,这时模型中还应包含理想电容元件。图 1.3 表示线圈在不同条件下的理想模型。

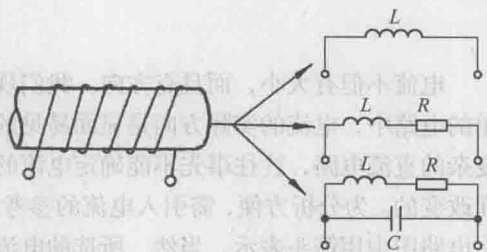


图 1.3 实际电感的不同模型

通常,当实际电路的几何尺寸远小于电路工作时电磁波长时,可以认为元件的参数都“集总”在

一个点上,形成所谓的集总参数元件。理想元件是抽象的模型,没有体积大小,是集总参数元件。由集总参数元件构成的电路称为集总参数电路。我们用能足够精确反映其电磁性质的一些理想电路元件或它们的组合来模拟实际元件。

在集总参数电路中,电路元件的电能消耗及电能、磁能的储存等现象可以分开研究,而且这些电磁过程都集中在元件的内部进行,任何时刻该电路任何地方的电流、电压都是与空间位置无关的确定值。

本书只讨论集总参数电路,后面所说的“元件”、“电路”均指理想化的集总参数的元件和电路。

1.2 电路的基本变量

在电路分析中,电流、电压、功率与能量是描述电路工作状态和特性的变量,一般都是时间的函数。其中人们所关心的物理量有电流和电压,它们是电路分析中最常用的两个基本变量。在具体展开分析和讨论之前,建立和深刻理解与这些电路基本变量相关的概念是非常重要的。本节重点讨论电流、电压的定义和参考方向,以及电路功率的计算。

1.2.1 电流及其参考方向

电荷有规则的定向运动形成传导电流。虽然看不见摸不着,但人们可通过电流的各种效应(如磁效应、热效应)来感觉它的客观存在。所以,毫无疑问,电流是客观存在的物理现象。

电流的强弱用单位时间内通过导体横截面的电荷量定义。设在 dt 时间内通过导体某一横截面的电荷量为 $dq(t)$, 通过该截面的电流为 $i(t)$, 则

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

若 $dq(t)/dt$ 为常数,即是直流电流,用大写字母 I 表示,这时通过导体的横截面的电荷量为 q 与时间 t 成正比,即

$$I = \frac{q}{t} \quad (1.2)$$

在国际单位制中,电流的单位是安培(A),简称“安”。电力系统中嫌安培单位小,有时取千安(kA)为电流的单位。而无线电系统中(如晶体管电路中)又嫌安培这个单位太大,常用毫安(mA)、微安(μA)作电流单位。它们之间的换算关系是

$$1 \text{ kA} = 10^3 \text{ A}$$

$$1 \text{ mA} = 10^{-3} \text{ A}$$

$$1 \mu A = 10^{-6} \text{ A}$$

电流不但有大小,而且有方向。我们规定正电荷运动的方向为电流的真实方向。在一些很简单的电路中,电流的实际方向是显而易见的,它是从电源正极流出,流向电源负极的。对于比较复杂的直流电路,往往事先不能确定电流的实际方向;对于交流电,其电流的实际方向是随时间而改变的。为分析方便,需引入电流的参考方向这一概念。参考方向是人们任意选定的一个方向,在电路图中用箭头表示。当然,所选的电流参考方向不一定就是电流的实际方向。当所设的电流参考方向与实际方向一致时,电流为正值($i > 0$);当所设的电流参考方向与实际方向相反时,电

流为负值 ($i < 0$)。这样,在选定的电流参考方向下,根据电流的正负,就可以确定电流的实际方向,如图1.4所示。电流虽是代数量,但其数值的正负只有与参考方向的假定相对应才有明确的物理意义。所以在分析电路时,首先要假定电流的参考方向,并以此为标准去分析计算,最后从结果的正负值来确定电流的实际方向。



图 1.4 电流参考方向

今后若无特殊说明,就认为电路图上所标箭头是电流的参考方向。

1.2.2 电压及其参考方向

将单位正电荷从a点移至b点电场力做功的大小称为a、b两点间的电位差,即a、b两点间的电压。用符号 $u(t)$ 表示,即

$$u(t) = \frac{dw(t)}{dq(t)} \quad (1.3)$$

式中, $dq(t)$ 为由a点移至b点的电荷量,单位为库仑(C); $dw(t)$ 是为移动电荷 $dq(t)$ 电场力所做的功,单位为焦耳(J)。电位、电压的单位都是伏特(V),1V电压相当于为移动1C正电荷电场力所做的功为1J。在电力系统中嫌伏特单位小,有时用千伏(kV)。在无线电电路中嫌伏特单位太大,常用毫伏(mV)、微伏(μV)作电压单位。它们之间的换算关系是

$$1 \text{ kV} = 10^3 \text{ V}$$

$$1 \text{ mV} = 10^{-3} \text{ V}$$

$$1 \mu\text{V} = 10^{-6} \text{ V}$$

电压大小、方向均恒定不变时为直流电压,常用大写 U 表示。这种情况下,电场力做的功与电荷量成正比,即

$$U = \frac{w}{q} \quad (1.4)$$

电压的实际方向规定为从高电位点指向低电位点,是电位真正降低的方向。电位、电压都是代数量,也有参考方向问题。和电流一样,电路中两点间的电压也可任意选定一个参考方向。所谓电压参考方向,就是所假设的电位降低的方向,在电路图中用“+”、“-”号标出,“+”表示参考极性的高电位端,“-”表示参考极性的低电位端,如图1.5所示。参考方向和电压的正负值来反映该电压的实际方向。当电压的参考方向与实际方向一致时,电压为正($u > 0$);相反时,电压为负($u < 0$)。

也可以用带下脚标的字母表示。如电压 u_{ab} ,脚标中第一个字母a表示假设电压参考方向的正极性端,第二个字母b表示假设电压参考方向的负极性端。同电流参考方向一样,不标注电压参考方向的情况下,电压的正负是毫无意义的,所以求解电路时必须首先要假定电压的参考方向。

对一个元件或一段电路上的电压、电流的参考方向可以分别独立地任意指定,但为了方便,常常采用关联参考方向,即电流的参考方向和电压的参考方向一致,如图1.6(a)所示。这时在电路图上只需标明电流参考方向或电压参考极性中的任何一种即可。电流、电压参考方向相反时称为非关联参考方向,如图1.6(b)所示。

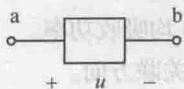


图 1.5 电压参考方向

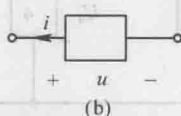
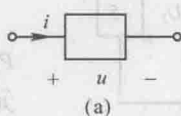


图 1.6 电流、电压的关联与非关联参考方向

1.2.3 电路中的功率和能量

单位时间内做功的大小称做功率,也称为做功的速率。在电路问题中涉及的电功率即是电场力做功的速率,以符号 $p(t)$ 表示。功率的数学定义式可写为

$$p(t) = \frac{dw(t)}{dt} \quad (1.5)$$

式中 $dw(t)$ 为 dt 时间内电场力所做的功。功率的单位为瓦 (W)。1 瓦功率就是每秒做功 1 焦耳,即 $1\text{W} = 1\text{J/s}$ 。

当电压电流参考方向关联时,得

$$p(t) = \frac{dw}{dt} = \frac{dw}{dq} \frac{dq}{dt} = ui \quad (1.6)$$

如果元件电压电流取非关联参考方向,可以把电压或电流看成关联参考方向时的负值,只需在式 (1.6) 中冠以负号,即

$$p(t) = -ui \quad (1.7)$$

其计算结果的意义与式 (1.6) 相同。

根据电压电流参考方向是否关联,可以选择不同的公式计算功率,但不论使用哪个公式,都是计算的吸收功率。当 $p > 0$ 时,表示 dt 时间内电场力对电荷 dq 做功 dw ,这部分能量被元件吸收,所以 p 是元件的吸收功率;在 $p < 0$ 时,表示元件吸收负功率,实际上是该元件向外电路提供功率或产生功率。

在直流情况下,电压和电流都是常数,则式 (1.6) 和式 (1.7) 可分别改写为

$$P = UI \quad (1.8)$$

$$P = -UI \quad (1.9)$$

若已知元件吸收功率为 $p(t)$,并设 $w(-\infty) = 0$,则对式 (1.5) 从 $-\infty$ 到 t 积分,可求得从 $-\infty$ 到 t 的时间内元件吸收的能量 (u, i 为关联参考方向) 为

$$w(t) = \int_{-\infty}^t p(\xi) d\xi = \int_{-\infty}^t u(\xi) i(\xi) d\xi \quad (1.10)$$

如果对于任意时刻 t ,均有 $w(t) \geq 0$,则称该元件 (或电路) 是无源元件,否则就称其为有源元件。所以,无源元件是指在接入任一电路进行工作的全部时间范围内,总的输入能量不为负值的元件;而有源元件在它接入电路进行工作的某个时刻 t , $w(t) < 0$,即供出能量,甚至任何时刻一直供出能量。

例 1.1 如图 1.7 所示电路,方框分别代表一个元件,各电压、电流的参考方向均已设定。已知 $I_1 = 2\text{A}$, $I_2 = -1\text{A}$, $I_3 = -1\text{A}$, $U_1 = 7\text{V}$, $U_2 = 5\text{V}$, $U_3 = 4\text{V}$, $U_4 = -3\text{V}$, $U_5 = 8\text{V}$ 。求各元件吸收或向外提供的功率。

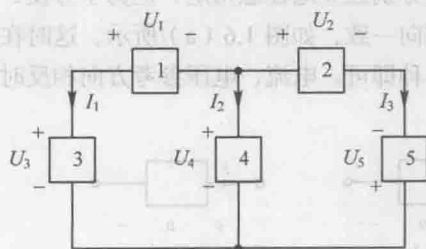


图 1.7 例 1.1 图

解: 元件 2、3、4 的电压、电流为关联方向,

$$P_2 = U_2 I_2 = 5 \times (-1) = -5\text{W}$$

$P_2 < 0$, 表明元件 2 向外提供功率。

$$P_3 = U_3 I_3 = 4 \times 2 = 8\text{W}$$

$$P_4 = U_4 I_4 = (-3) \times (-1) = 3\text{W}$$

$P_3 > 0$, $P_4 > 0$, 表明元件 3、4 均吸收功率。

元件 1、5 的电压、电流为非关联方向。

$$P_1 = -U_1 I_1 = -7 \times 2 = -14\text{W}$$

因为 $P_1 < 0$, 表明元件 1 向外提供功率。

$$P_3 = -U_3 I_3 = -8 \times (-1) = 8 \text{ W}$$

因为 $P_5 > 0$, 表明元件 5 吸收功率。

电路向外提供的总功率为

$$P_{\text{供}} = P_1 + P_2 = 5 + 14 = 19 \text{ W}$$

电路吸收的总功率为

$$P_{\text{吸}} = P_3 + P_4 + P_5 = 8 + 8 + 3 = 19 \text{ W}$$

计算结果表明对于任何完整的电路, 吸收功率等于供出功率, 这正是能量守恒定律的具体体现。

1.3 电路的基本元件

电路元件是组成电路的最基本元件, 它通过端子与外部连接, 元件的特性通过与端子有关的物理量描述, 每种元件都反映某种确定的电磁特性, 具有精确的数学定义和特定的表示符号, 以及不同于其他元件的特性。

根据能量特性电路元件可以分为有源元件和无源元件, 根据与外部电路连接的端子数目分为二端、三端或四端元件等, 还可以分为线性和非线性元件、时变元件和非时变元件等。

基本的无源元件有电阻、电感和电容, 这三种元件都是二端元件。有源元件有独立电源和受控电源。

了解元件的特性, 也就是要了解它端子上的电压与电流之间的关系, 这种关系称为元件的伏安特性, 即 VAR (Volt Ampere Relation)。伏安特性决定了元件在电路中的表现。

1.3.1 电阻元件

一个二端元件, 如果在任意时刻 t , 其 VAR 能用 $u-i$ 平面 (或 $i-u$ 平面) 上的曲线所确定, 就称其为二端电阻元件, 简称电阻元件。它是实际电路中的电灯泡、电炉、滑杆电阻器、半导体二极管等所有消耗能量的器件的理想化模型。

如果电阻元件的伏安关系不随时间变化 (即它不是时间的函数), 则称其为时不变 (或非时变) 的, 否则称为时变的。如其伏安特性是通过原点的直线, 则称为线性的, 否则称为非线性的。本书涉及最多的是线性时不变电阻元件。

线性时不变电阻元件的伏安特性是 $u-i$ 平面上一条通过原点的直线, 如图 1.8 (b) 所示。

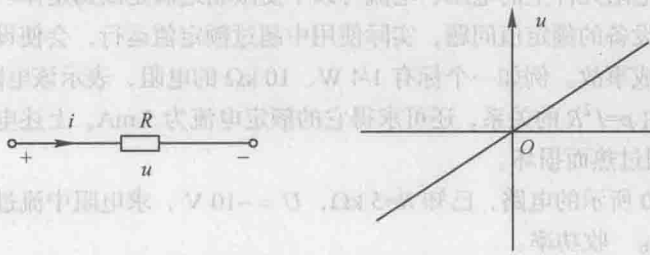


图 1.8 线性时不变电阻及伏安特性

在电压、电流参考方向相关联（见图 1.8（a））的条件下，其电压与电流的关系就是熟知的欧姆定律，即

$$u(i) = Ri(t) \quad (1.11)$$

或写为

$$i(t) = Gu(i) \quad (1.12)$$

式中， R 为元件的电阻，单位为欧姆，简称欧（ Ω ）。该式表明在一定电压下，电阻 R 越大，电流 i 越小，所以电阻 R 是表征电阻元件对电流阻碍程度的参数； G 是元件的电导，单位为西门子，简称西（S），该式表明在一定电压下，电导 G 越大，电流 i 越大，所以电导 G 是表征电阻元件对电流传导程度的参数；电阻 R 和电导 G 是联系电阻元件的电压与电流的电气参数。对于线性时不变电阻元件， R 和 G 都是与电压、电流无关的常量，它们的关系是

$$G = \frac{1}{R} \quad (1.13)$$

对线性电阻，当 $R=\infty$ 或 $G=0$ ，称为开路，其伏安特性曲线与 u 轴重合，此时无论端电压为何值，其端电流恒为零；当 $R=0$ 或 $G=\infty$ ，称为短路，其伏安特性曲线与 i 轴重合，电阻元件相当于一理想导线，此时无论端电流为何值，其端电压恒为零。开路和短路时，其电路符号及伏安特性分别如图 1.9（a）、（b）所示。

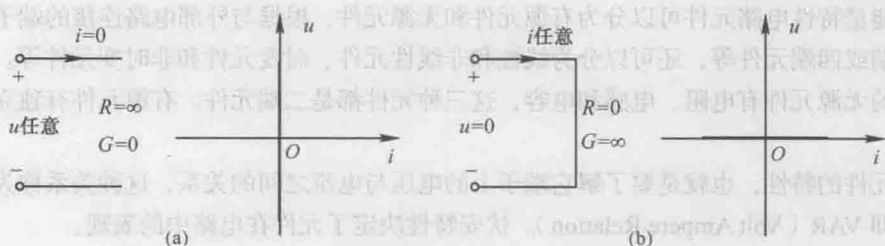


图 1.9 开路、短路的符号及伏安特性

在这样的电阻、电导上， t 时刻的电压（或电流）只与 t 时刻的电流（或电压）有关。这说明电阻、电导上的电压（或电流）不能记忆 t 时刻以前电流（或电压）的“历史”作用。所以说电阻、电导元件是无记忆性元件，又称即时元件。

根据式（1.6）和欧姆定律，可得电阻 R 的吸收功率为

$$p = ui = Ri^2 = Gu^2 \quad (1.14)$$

从式（1.14）可以看出，电阻元件的功率与通过的电流的平方或端电压的平方成正比，其功率恒大于零。因此，电阻元件是一个只消耗电能而非储存电能的元件，称为耗能元件。

作为理想元件，电阻元件上的电压、电流可以不受限制地满足欧姆定律。但在实际使用中还应该考虑电气元件、设备的额定值问题，实际使用中超过额定值运行，会使设备、元件缩短使用寿命或遭致毁坏而造成事故。例如一个标有 $1/4\text{ W}$ 、 $10\text{ k}\Omega$ 的电阻，表示该电阻的阻值为 $10\text{ k}\Omega$ 、额定功率为 $1/4\text{ W}$ ，由 $p=I^2R$ 的关系，还可求得它的额定电流为 5 mA 。上述电阻在使用电流超过 5 mA 时，将使电阻因过热而损坏。

例 1.2 如图 1.10 所示的电路，已知 $R=5\text{ k}\Omega$ ， $U=-10\text{ V}$ ，求电阻中流过的电流和电阻的吸收功率。

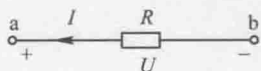


图 1.10 例 1.2 图

解：由于电阻上电流电压为非关联参考方向，因此按欧姆定律，其电流

$$I = -\frac{U}{R} = -\frac{(-10)}{5 \times 10^3} = 2 \times 10^{-3} \text{ A} = 2 \text{ mA}$$

注意上面算式中公式前面的负号与算式括号中的负号, 其含义是不同的, 前者表示 R 中电流电压参考方向非关联, 后者表示 R 上电压参考方向与实际方向相反。电阻的吸收功率为

$$P = -UI = -(-10) \times 2 \times 10^{-3} = 20 \times 10^{-3} \text{ W} = 20 \text{ mW}$$

或者

$$P = RI^2 = 5 \times 10^3 \times (2 \times 10^{-3})^2 = 20 \text{ mW}$$

$$P = \frac{U^2}{R} = \frac{(-10)^2}{5 \times 10^3} = 20 \text{ mW}$$

1.3.2 电容元件

一个二端元件, 如果在任意时刻 t , 其所积累的电荷 $q(t)$ 与端电压 $u(t)$ 之间的关系能用 $q-u$ 平面上的一条曲线所确定, 就称其为电容元件。电容器是最常用的存储电能的器件, 将两片金属极板中间填充电介质, 就可以构成一个简单的实际电容器。

如果约束电容的 $q-u$ 平面上的曲线不随时间变化 (即它不是时间的函数), 则称其为时不变 (或非时变) 的, 否则称为时变的。若曲线是通过原点的直线, 如图 1.11 (b) 所示, 则称为线性的, 否则称为非线性的。本书主要讨论线性时不变电容元件。

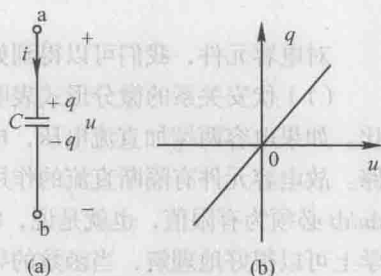


图 1.11 线性电容

对线性非时变电容, 电荷量 q 与其端电压 u 的关系为

$$q(t) = Cu(t) \quad (1.15)$$

式中, C 称为电容元件的电容量, 单位为法拉, 简称法 (F)。它是一个与 q 、 u 和 t 无关的正值常量, 是表征电容元件积聚电荷能力的物理量。

在电路分析中, 关心的是元件的伏安特性。若电容端电压 u 与通过的电流 i 采用关联参考方向, 如图 1.11 (a) 所示, 则有

$$i = \frac{dq}{dt} = C \frac{du}{dt} \quad (1.16)$$

将式 (1.16) 改写为

$$du(t) = \frac{1}{C} i(t) dt \quad (1.17)$$

对式 (1.17) 从 $-\infty$ 到 t 进行积分, 并设 $u(-\infty)=0$, 得

$$u(t) = \frac{1}{C} \int_{-\infty}^t i(\xi) d\xi \quad (1.18)$$

式 (1.16) 和式 (1.18) 分别称为电容元件伏安关系的微分形式和积分形式。表明电容的电压与以前所有时刻流过电容的电流有关, 电容具有“记忆”电流的作用。

设 t_0 为初始时刻, 时刻 t_0 以后电容上电压电流的关系为

$$\begin{aligned} u(t) &= \frac{1}{C} \int_{-\infty}^{t_0} i(\xi) d\xi + \frac{1}{C} \int_{t_0}^t i(\xi) d\xi \\ &= u(t_0) + \frac{1}{C} \int_{t_0}^t i(\xi) d\xi \end{aligned} \quad (1.19)$$

$u(t_0) = \frac{1}{C} \int_{-\infty}^{t_0} i(\xi) d\xi$ 称为电容元件的初始电压。由下面讨论可知, $u(t_0)$ 反映了电容在初始时刻的储能状况, 故也称为初始状态。

在电压、电流参考方向关联的条件下, 电容元件的吸收功率为

$$p(t) = u(t)i(t) = Cu(t) \frac{du(t)}{dt} \quad (1.20)$$

电容元件所储存的能量为其从 $-\infty$ 到 t 时刻所吸收的能量

$$\begin{aligned} w_c(t) &= \int_{-\infty}^t p(\xi) d\xi = \int_{-\infty}^t Cu(\xi) \frac{du(\xi)}{d\xi} d\xi = \int_{u(-\infty)}^{u(t)} Cu(\xi) du(\xi) \\ &= \frac{1}{2} Cu^2(t) - \frac{1}{2} Cu^2(-\infty) \end{aligned} \quad (1.21)$$

一般可以认为 $u(-\infty) = 0$, 得电容的储能为

$$w_c(t) = \frac{1}{2} Cu^2(t) \geq 0 \quad (1.22)$$

对电容元件, 我们可以得到如下结论。

(1) 伏安关系的微分形式表明, 任何时刻, 通过电容元件的电流与该时刻的电压变化率成正比。如果电容两端加直流电压, 电压恒定不变, 其变化率为零, 则电流 $i=0$, 电容元件相当于开路。故电容元件有隔断直流的作用。在实际电路中, 某一时刻电容的电流 i 为有限值, 这意味着 du/dt 必须为有限值, 也就是说, 电容两端电压 u 必定是时间 t 的连续函数, 而不能跃变。这从数学上可以很好地理解, 当函数的导数为有限值时, 其函数必定连续。

(2) 伏安关系的积分形式表明, 任意时刻 t 的电容电压与该时刻以前电流的“全部历史”有关。或者说, 电容电压“记忆”了电流的作用效果, 故称电容为记忆元件。与此不同, 电阻元件任意时刻 t 的电压值仅取决于该时刻电流大小, 而与它的历史情况无关, 因此电阻为无记忆元件。

(3) 由式 (1.22) 可知, 任意时刻 t , 电容的储能只取决于该时刻的电容电压值, 恒有 $w_c(t) \geq 0$, 故电容元件是储能元件而不是耗能元件, 它从外部吸收的能量以电场能量形式储存于自身的电场中。

(4) 电容元件上的电压、电流关系是微积分关系, 因此电容元件是动态元件。而电阻元件上的电压、电流关系是代数关系, 所以它是即时元件。

例 1.3 图 1.12 (a) 所示电路中, 电容 $C = 0.5 \mu\text{F}$, 电压 u 的波形如图 1.12 (b) 所示。求电容电流 i , 并绘出其波形。

解: 由电压 u 的波形, 应用电容元件的元件约束关系, 可求出电流 i 。

当 $0 \leq t \leq 1 \mu\text{s}$, 电压 u 从 0 V 均匀上升到 10 V , 其变化率为

$$\frac{du}{dt} = \frac{10-0}{1 \times 10^{-6}} = 10 \times 10^6 \text{ V/s}$$

由式 (1.16) 可得

$$i = C \frac{du}{dt} = 0.5 \times 10^{-6} \times 10 \times 10^6 = 5 \text{ A}$$

当 $1 \mu\text{s} \leq t \leq 3 \mu\text{s}$, $5 \mu\text{s} \leq t \leq 7 \mu\text{s}$ 及 $t \geq 8 \mu\text{s}$ 时, 电压 u 为常量, 其变化率为

$$\frac{du}{dt} = 0$$

故电流

$$i = C \frac{du}{dt} = 0 \text{ A}$$