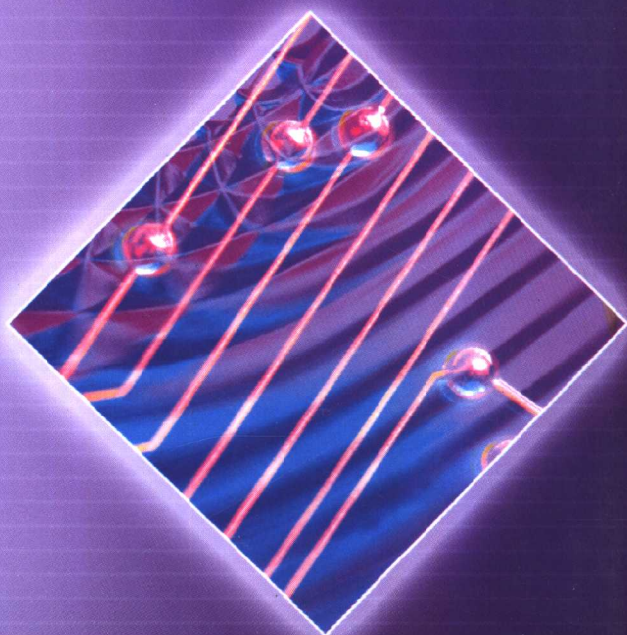




教育科学“十五”国家规划课题研究成果

电路分析简明教程

傅恩锡 主 编

杨四秧 副主编



高等教育出版社

教育科学“十五”国家规划课题研究成果

电路分析简明教程

傅恩锡 主 编

杨四秧 副主编

高等教育出版社

内容简介

本书是教育科学“十五”国家规划课题研究成果,着重讲述电路基础理论和基本分析方法,并结合各章内容介绍了电路分析与仿真软件的使用,主要内容包括:集总电路的分析基础、线性电路分析的基本方法、动态电路的时域分析法、正弦稳态电路的相量分析法共四章及动态电路的复频域分析法简介、非线性电阻电路的分析法简介和 EWB 软件简介三个附录。全书结构严谨,层次清晰,选材恰当,重点突出,贴近专业,注重应用,概念准确,分析细腻,论述透彻,通俗易懂,对重点内容和学习时易出错的地方予以标识或提示,并配有丰富的例题和精选的思考与练习题、习题、自测题(均附答案),以及计算机仿真分析实例等,便于教学与自学。

本书可作为计算机科学与技术等电气信息类专业电路分析课程(少学时)的教材,也可供相关专业技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

电路分析简明教程/傅恩锡主编. —北京:高等教育出版社,2004.1

ISBN 7-04-013012-2

I. 电... II. 傅... III. 电路分析-高等学校-教材 IV. TM133

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2003)第 095392 号

出版发行 高等教育出版社
社 址 北京市西城区德外大街 4 号
邮政编码 100011
总 机 010-82028899

购书热线 010-64054588
免费咨询 800-810-0598
网 址 <http://www.hep.edu.cn>
<http://www.hep.com.cn>

经 销 新华书店北京发行所
印 刷 国防工业出版社印刷厂

开 本 787×960 1/16
印 张 24.25
字 数 440 000

版 次 2004 年 1 月第 1 版
印 次 2004 年 1 月第 1 次印刷
定 价 27.40 元

本书如有缺页、倒页、脱页等质量问题,请到所购图书销售部门联系调换。

版权所有 侵权必究

总 序

为了更好地适应当前我国高等教育跨越式发展需要,满足我国高校从精英教育向大众化教育的重大转移阶段中社会对高校应用型人才培养的各类要求,探索和建立我国高等学校应用型人才培养体系,全国高等学校教学研究中心(以下简称“教研中心”)在承担全国教育科学“十五”国家规划课题——“21世纪中国高等教育人才培养体系的创新与实践”研究工作的基础上,组织全国100余所以培养应用型人才为主的高等院校,进行其子项目课题——“21世纪中国高等学校应用型人才培养体系的创新与实践”的研究与探索,在高等院校应用型人才培养的教学内容、课程体系研究等方面取得了标志性成果,并在高等教育出版社的支持和配合下,推出了一批适应应用型人才培养需要的立体化教材,冠以“教育科学‘十五’国家规划课题研究成果”。

2002年11月,教研中心在南京工程学院组织召开了“21世纪中国高等学校应用型人才培养体系的创新与实践”课题立项研讨会。会议确定由教研中心组织国家级课题立项,为参加立项研究的高等院校搭建高起点的研究平台,整体设计立项研究计划,明确目标。课题立项采用整体规划、分步实施、滚动立项的方式,分期分批启动立项研究计划。为了确保课题立项目标的实现,组建了“21世纪中国高等学校应用型人才培养体系的创新与实践”课题领导小组(亦为高校应用型人才立体化教材建设领导小组)。会后,教研中心组织了首批课题立项申报,有63所高校申报了近450项课题。2003年1月,在黑龙江工程学院进行了项目评审,经过课题领导小组严格的把关,确定了首批9项子课题的牵头学校、主持学校和参加学校。2003年3月至4月,各子课题相继召开了工作会议,交流了各校教学改革的情况和面临的具体问题,确定了项目分工,并全面开始研究工作。计划先集中力量,用两年时间形成一批有关人才培养模式、培养目标、教学内容和课程体系等理论研究成果报告和在研究报告基础上同步组织建设的反映应用型人才培养特色的立体化系列教材。

与过去立项研究不同的是,“21世纪中国高等学校应用型人才培养体系的创新与实践”课题研究在审视、选择、消化与吸收多年来已有应用型人才培养探索与实践成果基础上,紧密结合经济全球化时代高校应用型人才培养工作的实际需要,努力实践,大胆创新,采取边研究、边探索、边实践的方式,推进高校应用型本科人才培养工作,突出重点目标,并不断取得标志性的阶段成果。

教材建设作为保证和提高教学质量的重要支柱和基础,作为体现教学内容

和教学方法的知识载体,在当前培养应用型人才中的作用是显而易见的。探索、建设适应新世纪我国高校应用型人才体系需要的教材体系已成为当前我国高校教学改革和教材建设工作面临的十分重要的任务。因此,在课题研究过程中,各课题组充分吸收已有的优秀教学改革成果,并和教学实际结合起来,认真讨论和研究教学内容和课程体系的改革,组织一批学术水平较高、教学经验较丰富、实践能力较强的教师,编写出一批以公共基础课和专业、技术基础课为主的有特色、适用性强的教材及相应的教学辅导书、电子教案,以满足高等学校应用型人才培养的需要。

我们相信,随着我国高等教育的发展和高校教学改革的不断深入,特别是随着教育部“高等学校教学质量和教学改革工程”的启动和实施,具有示范性和适应应用型人才培养的精品课程教材必将进一步促进我国高校教学质量的提高。

全国高等学校教学研究中心

2003年4月

前 言

本书是教育科学“十五”国家规划课题——“21 世纪中国高等学校应用型人才培养体系的创新与实践”的研究成果,作为以培养应用型人才为主的高等院校的计算机科学与技术等电气信息类专业电路分析课程的教材,建议教学时数范围为 60~80 学时(含实践性环节)。

编写本书总的思路是:既要适应 21 世纪中国高等教育应用型人才的培养目标和要求,反映应用型本科院校的特点,贴近专业需要,精选教材内容,体现“简明”特色,注重实践能力和创新精神的培养;又必须达到高等学校本科电路分析教材应有的科学水平,满足电气信息类专业对电路分析课程的基本要求。按照上述思路,编者在本书中作了以下几个方面的工作:

1. 削枝强干,重点讲述电路基础理论和基本分析方法,并结合各章内容介绍了电路分析与仿真软件的使用,主要内容包括:集总电路的分析基础、线性电路分析的基本方法、动态电路的时域分析法、正弦稳态电路的相量分析法共四章和动态电路的复频域分析法简介、非线性电阻电路的分析法简介、EWB 软件简介三个附录。根据本书的定位,其内容的广度和深度适宜。

2. 以基本传统内容为主,并着重引入了近代电路理论中的某些内容与分析方法,对模型、计算机仿真方法等内容作了较好的介绍,注意运用近代电路理论的观点阐述传统内容,重视了教材的先进性。

3. 以集总电路中的电压、电流关系的“两类约束”统领全书,注重揭示各种分析方法之间的内在联系和普遍规律,前呼后应,浑然一体,结构严谨,层次清晰,力求构建一个良好的教材体系。

4. 注重理论和实际应用的紧密结合,在介绍理想电路元件和分析方法的同时,着力介绍工程背景,强调在工程电路中的分析和应用,例如书中编入了微分和积分电路,低通和高通电路等内容。

5. 注重概念的准确和严密,分析细腻,论述透彻,叙述深入浅出,语言流畅易懂,对重点内容和学习时易出错的地方予以标识或提示,并配有丰富的例题和精选的思考与练习题、习题、自测题(均附有答案)以及计算机仿真分析实例,在这些题目的选择中,强调基本概念和基本分析方法的应用,适当淡化手算技巧;此外,还将出版与本教材配套的学习指导书和 CAI 课件,便于教学使用和自学阅读。

6. 为拓宽专业需要,编入了一些选学内容,采用“※”标记和附录等方式进

行分类,在实际的教学中,可根据情况,灵活地选取所需内容。

本书融入了作者几十年在高校从事电路分析课程教学(其中主要作者曾在国内知名大学执教电路课程多年)的经验和心得体会。纵然如此,因受作者的水平 and 编写时间的限制,书中难免有错误和不妥之处,敬请广大同行和读者不吝赐教。

本书第一、四章(不含 §1-7 和 §4-13)由傅恩锡执笔,第二、三章(不含 §2-9 和 §3-9)及附录 I 由杨四秧执笔,§1-7、§2-9、§3-9 和 §4-13 及附录 III 由李朝健执笔,附录 II 由康迎曦执笔并负责全书的例题、思考与练习题、习题和自测题的答案的校核工作。湖南工程学院傅恩锡教授任主编,负责全书的策划、统稿和定稿工作;杨四秧副教授任副主编,协助主编工作。

本书送审稿承蒙国防科学技术大学博士生导师罗飞路教授、谢克彬副教授仔细审阅,提出了许多宝贵意见。本书的立项和出版得到了教育部全国高等学校教学研究中心、高等教育出版社和湖南工程学院及其电气与信息工程系、电工电子教研室的大力支持,谨在此一并致以衷心的感谢!

编者

2003 年 8 月

目 录

第一章 集总电路的分析基础	1
§ 1-1 实际电路和电路模型	1
一、实际电路	1
二、理想电路元件	1
三、电路模型	2
四、集总假设	3
思考与练习题	3
§ 1-2 电流和电压的参考方向	3
一、电流的参考方向	3
二、电压的参考方向	5
三、电压与电流一致的参考方向	6
思考与练习题	7
§ 1-3 电路中的功率和能量	8
思考与练习题	9
§ 1-4 基尔霍夫定律	10
一、基尔霍夫电流定律(KCL)	11
二、基尔霍夫电压定律(KVL)	12
思考与练习题	14
§ 1-5 基本电路元件的伏安关系	15
一、电阻元件	15
思考与练习题	18
二、电容元件	19
思考与练习题	22
三、电感元件	22
思考与练习题	25
四、电压源	25
思考与练习题	27
五、电流源	28
思考与练习题	30
六、受控源	31

思考与练习题	34
* § 1-6 电阻器、电容器和电感器的电路模型	34
一、电阻器的电路模型	34
二、电容器的电路模型	35
三、电感器的电路模型	35
思考与练习题	36
* § 1-7 计算机仿真分析简单直流电路	36
思考与练习题	43
习题	43
第二章 线性电路分析的基本方法	50
§ 2-1 电路的等效变换	50
一、不含独立源的二端网络的等效电路	51
思考与练习题	56
二、星形联结与三角形联结的电阻电路的等效变换	57
思考与练习题	60
三、实际电源的电路模型及其等效变换	61
四、含独立源支路的串联与并联的等效电路	64
思考与练习题	67
§ 2-2 支路电流法	68
思考与练习题	72
§ 2-3 网孔电流法	72
一、网孔电流	72
二、网孔电流法	73
三、含电流源支路时的分析方法	75
四、含受控源支路时的分析方法	76
思考与练习题	77
§ 2-4 节点电压法	78
一、节点电压	78
二、节点电压法	79
三、含电压源支路时的分析方法	81
四、含受控源支路时的分析方法	82
思考与练习题	84
§ 2-5 叠加定理	84
一、叠加定理	84
二、齐性定理	88
思考与练习题	90

§ 2-6 置换定理	90
思考与练习题	91
§ 2-7 戴维宁定理和诺顿定理	92
一、戴维宁定理	92
二、诺顿定理	98
思考与练习题	100
三、最大功率传输定理	101
思考与练习题	103
* § 2-8 不含独立源的双口网络的等效电路	104
一、双口网络	104
二、双口网络的电导参数方程及其等效电路	104
三、双口网络的电阻参数方程及其等效电路	107
四、双口网络的混合参数方程及其等效电路	110
思考与练习题	112
* § 2-9 计算机仿真分析线性电阻电路	113
思考与练习题	119
习题	119
自测题一	127
第三章 动态电路的时域分析法	130
§ 3-1 电压和电流初始值的计算	130
一、概述	130
二、换路定则	131
三、初始值的计算	131
思考与练习题	133
§ 3-2 一阶电路的零输入响应	133
一、RC 电路的零输入响应	134
二、RL 电路的零输入响应	138
思考与练习题	141
§ 3-3 一阶电路的零状态响应	141
一、RC 电路的零状态响应	142
二、RL 电路的零状态响应	144
思考与练习题	146
§ 3-4 一阶电路的全响应	146
思考与练习题	151
§ 3-5 一阶电路的三要素法	151
思考与练习题	157

§ 3-6 阶跃信号和阶跃响应	158
一、阶跃信号	158
二、一阶电路的单位阶跃响应	161
思考与练习题	163
§ 3-7 微分电路和积分电路	164
一、RC 电路对矩形脉冲激励的零状态响应	164
二、RC 微分电路	165
三、RC 积分电路	167
思考与练习题	168
§ 3-8 二阶电路的零输入响应	168
思考与练习题	174
* § 3-9 计算机仿真分析动态电路	175
思考与练习题	180
习题	180
自测题二	185
第四章 正弦稳态电路的相量分析法	188
§ 4-1 正弦量的特征	188
一、正弦量的三要素	188
二、相位差	190
三、有效值	192
思考与练习题	194
§ 4-2 正弦量的相量表示法	194
一、复数	194
二、相量和相量图	196
思考与练习题	198
§ 4-3 基尔霍夫定律的相量形式	199
思考与练习题	201
§ 4-4 电阻、电感、电容元件的伏安关系的相量形式	201
一、电阻元件	202
二、电感元件	203
思考与练习题	206
三、电容元件	207
思考与练习题	210
§ 4-5 复阻抗与复导纳	210
一、复阻抗	210
二、复导纳	212

三、复阻抗与复导纳的等效互换	213
思考与练习题	216
§ 4-6 正弦稳态电路的相量分析法	217
一、串联、并联和混联电路的分析	218
思考与练习题	223
二、复杂电路的分析	224
思考与练习题	230
三、用相量图法分析正弦稳态电路	230
思考与练习题	233
§ 4-7 正弦稳态电路的功率	234
一、瞬时功率	234
二、平均功率和功率因数	235
三、无功功率	236
四、视在功率和额定容量	237
思考与练习题	239
* 五、复功率	239
六、电路功率因数的提高	241
思考与练习题	244
§ 4-8 正弦稳态电路的最大功率传输	244
思考与练习题	246
§ 4-9 正弦稳态电路的叠加	246
一、多个同频率正弦激励的电路	246
二、多个不同频率正弦激励的电路	248
三、非正弦周期激励的电路	250
四、平均功率的叠加	256
思考与练习题	257
§ 4-10 含耦合电感元件的正弦稳态电路分析	258
一、耦合电感元件	258
二、含耦合电感元件电路的分析	263
思考与练习题	268
§ 4-11 正弦稳态电路的频率特性	270
一、RC 串联电路的频率特性	270
二、串联谐振	273
三、并联谐振	279
思考与练习题	282
§ 4-12 三相电路分析概述	282

一、对称三相电源	283
思考与练习题	286
二、三相电路的分析	286
思考与练习题	298
* § 4-13 计算机仿真分析正弦稳态电路	298
思考与练习题	306
习题	306
自测题三	314
附录 I 动态电路的复频域分析法简介	318
I-1 拉普拉斯变换	318
一、拉普拉斯变换	318
二、拉普拉斯变换的常用性质	320
三、拉普拉斯逆变换	322
思考与练习题	326
I-2 复频域中的电路定律与电路模型	327
一、KCL、KVL 的复频域形式	327
二、元件的 VAR 的复频域形式及电路模型	327
思考与练习题	329
I-3 动态电路的复频域分析法	329
思考与练习题	333
习题	333
附录 II 非线性电阻电路的分析法简介	335
II-1 非线性电阻元件	335
一、非线性电阻元件的伏安关系	335
二、静态电阻和动态电阻	337
思考与练习题	338
II-2 图解分析法	338
一、曲线相加法	338
二、曲线相交法	340
思考与练习题	342
II-3 分段线性法	342
思考与练习题	345
II-4 小信号分析法	346
思考与练习题	348
习题	348

附录Ⅲ EWB 软件简介	351
Ⅲ-1 EWB 软件界面	351
一、软件简介	351
二、EWB 的主窗口	351
三、EWB 的菜单命令	351
四、EWB 的工具栏	353
五、EWB 的元件库栏	354
Ⅲ-2 EWB 的基本操作方法	356
一、创建电路	356
二、元件库中的常用元件	357
三、仪器、仪表的使用	358
四、元器件库和元器件的创建与删除	362
五、子电路的生成与使用	362
Ⅲ-3 EWB 常用的电路分析方法	362
一、用虚拟仪器、仪表直接测量	362
二、直流工作点的分析	362
三、交流频率分析	363
四、瞬态分析	363
五、参数扫描分析	363
六、小信号传递函数分析	363
部分答案	364
第一章	364
第二章	365
第三章	366
第四章	367
附录Ⅰ	369
附录Ⅱ	370
自测题一	370
自测题二	371
自测题三	371
主要参考文献	372

第一章 集总电路的分析基础

本章的中心内容是阐明电路中的电流、电压受到的两类约束。其中一类约束来自元件的相互连接方式,即基尔霍夫定律;另一类约束来自元件的性质,即元件的伏安关系。在所研究的电路中,其电流、电压无不受这两类约束所限制。此外,还着重介绍了电路模型和电流、电压的参考方向等重要概念。

本章介绍的这些基本概念和基本定律是分析电路的基本依据,将贯穿于全书之中。

§ 1-1 实际电路和电路模型

一、实际电路

电路是电流的通路。实际电路是为完成某种功能,由若干电气设备或器件按一定方式用导线连接而成的。

实际电路形式多种多样,有的可以延伸到数百、数千公里以外,有的则局限在几平方毫米以内,但就其功能而言,可以划分为两大类。其中一类主要实现电能的传输和转换,如输电电路和照明电路等。另一类主要实现信号的传输、处理和储存,如收音机电路、滤波电路、计算机电路等。

实际电路都是由电源(信号源)、负载和中间环节三个基本部分组成。电源(信号源)是提供电能或信号^①的器件;负载是用电器件,它将电能转换为其它形式的能量;介于电源和负载之间的其它器件统称为中间环节,它们起着传输、控制、保护、放大等作用。图 1-1-1(a)所示手电筒电路,就是一个最简单的实际电路。其中电池是电源,灯泡是负载,而按钮和导线是中间环节。

二、理想电路元件

组成实际电路的器件不但种类繁多,而且对某一器件来说,其电磁性能也不是单一的。例如,实验室用的滑线变阻器,它由导线绕制而成,当有电流流过时,主要具有电能转换成热能的性质,即电阻的性质;其次,由于电压和电流会产生电场和磁场,使它具有储存电场能量和磁场能量的性质,即电容和电感的性质。

^① 电路中的“信号”一词是指带有信息的电流或电压。

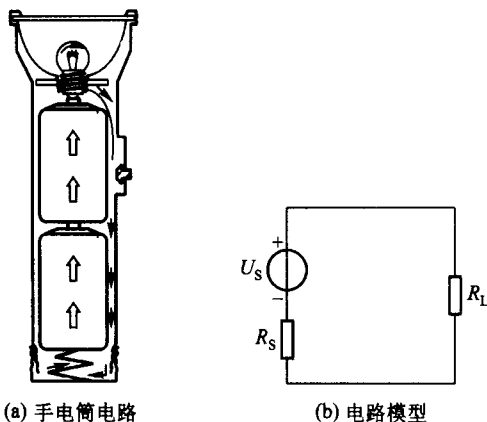


图 1-1-1 一个简单的实际电路及其电路模型

上述性质交织在一起,当电流、电压的频率不同时,其表现程度也不同。

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。为了便于对实际电路进行分析和数学描述,在电路理论中采用了“模型”的概念。这就是在一定的条件下,突出实际器件的主要性质,把它理想化和近似化,用只具有单一电磁性能的理想元件来代表它。所以理想电路元件是实际器件抽象出来的理想化模型。例如,理想电阻元件只消耗电能;理想电感元件只储存磁场能量;理想电容元件则只储存电场能量。在不同工作条件下,一种实际器件可用一种或几种理想电路元件的组合来近似表征。例如,上面提到的滑线变阻器可用理想电阻元件来表征;若考虑磁场的作用,则可用理想电阻元件和理想电感元件的组合来表征。同时,对于电磁性能相近的一类实际器件,也可用同一种理想电路元件来近似表征。例如,所有的电阻器、电烙铁、照明灯具、电熨斗等器件,都可用理想电阻元件来近似表征。在电路分析中,常用的理想电路元件只有几种,而且都有各自精确的数学定义,在电路图中用规定的符号来表示;它们可以用来表征千千万万种实际电路器件。一般将理想电路元件简称为电路元件^①。

三、电路模型

由理想电路元件构成的电路称为电路模型。这里研究的电路都是电路模型,并非实际电路。所有的实际电路,不论简单还是复杂,都可以用由几种电路元件构成的电路模型来表示。图 1-1-1(a)所示的手电筒电路的电路模型如图 1-1-1(b)所示,手电筒电路中的电池用电源元件 U_s 和电阻元件 R_s 的串联组合作为它的模型,灯泡用电阻元件 R_L 作为它的模型,按钮和导线用理想导线

^① 在有的教材中,将实际电路器件称为“电路元件”。本书中的电路元件均指理想化的模型。

(其电阻为零)或线段表示。如何把实际电路变成电路模型称为“建模”。在不同条件下,同一实际器件可能采用不同的模型。模型取得是否恰当,将决定对电路分析和计算结果的精确程度。“建模”是专门课程研究的课题,本书不作介绍。

四、集总假设

理想电路元件只表现一种电或磁的性能,并认为其电磁过程都是集中在元件内部进行,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模型,简称为集总电路。

用集总电路近似描述实际电路,需要满足以下条件:实际电路的尺寸(长度)要远远小于电路工作频率下的电磁波的长度。例如,我国电力用电的频率为 50 Hz,对应的波长为 6 000 km,对实验室电路来说,其尺寸与这一波长相比可以忽略不计,因而用集总的概念是完全可以的;但是,对于远距离输电电路而言,就不能用集总的概念来进行分析计算了,而要用分布参数电路来处理。

集总参数电路模型是电路理论中最基本的假设。本书研究的电路均为集总电路,因此,将省略“集总”二字。

思考与练习题

1-1-1 理想电路元件的主要特征是什么?为什么要在电路分析中采用“模型”的概念?

1-1-2 对于下列实际电路是否能用集总电路来描述。(1)某音频电路,其最高工作频率为 25 kHz;(2)某计算机电路,其工作频率为 500 MHz;(3)某微波电路,其工作频率为 0.3 GHz~3 000 GHz(注:1 G=10⁹)。

[能,不能,不能]

§ 1-2 电流和电压的参考方向

电流和电压是描述电路性能的两个基本变量。关于它们的定义,在物理学中已有介绍,本书不再赘述,只侧重讲述它们的参考方向。

一、电流的参考方向

电流用“ i ”^①或“ I ”表示,“ I ”表示直流电流或交流电流的有效值。在国际单位制(SI)中,电流的单位是安[培](A);其辅助单位有千安(kA)、毫安(mA)和微安(μ A)。1 mA=10⁻³ A,1 μ A=10⁻⁶ A。

^① 小写字母 i 一般表示随时间变化的电流,但本书也经常采用它表示直流电流,后述 u 、 p 亦同。此外,对于随时间变化的电流、电压等变量是时间 t 的函数,本应写作 $i(t)$ 、 $u(t)$ 等,但由于在今后分析中将大量出现这些变量,故在本书中,除在特殊需要的情况下,常将 $i(t)$ 、 $u(t)$ 等简写为 i 、 u 。