




高等院校电子科学与技术专业系列教材

电路理论基础

王勇 龙建忠 方勇 李军 编著

 科学出版社
www.sciencep.com

高等院校电子科学与技术专业系列教材

电路理论基础

王 勇 龙建忠 方 勇 李 军 编著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书全面系统地介绍了电路分析的基本原理和基本分析方法,内容包括:电路分析导论,电路元件,线性电路基本分析方法,线性电路的输入/输出时域分析,线性电路的正弦稳态分析,拉普拉斯变换和s域分析,双口网络,图论及线性电路矩阵分析法,有源滤波器分析和设计。书中还以附录的形式介绍了PSpice、EWB等EDA工具在线性电路分析中的应用。并在相关章节的复习思考题中提供了相应的练习。

本书可作为高等院校电子信息、电气工程、自动控制、通信工程、计算机科学与技术等专业的教材,也可作为成人教育的教材和相关专业科技人员的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

电路理论基础/王勇等编著. —北京:科学出版社,2005

(高等院校电子科学与技术专业系列教材)

ISBN 7-03-015697-8

I. 电… II. 王… 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(2005)第062602号

责任编辑:段博原 资丽芳 于宏丽 / 责任校对:张怡君

责任印制:钱玉芬 / 封面设计:陈 敬

科学出版社 出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

丽源印刷厂 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2005年8月第一版 开本:B5(720×1000)

2005年8月第一次印刷 印张:27 3/4

印数:1—4 000 字数:539 000

定价:32.00元

(如有印装质量问题,我社负责调换(环伟))

《高等院校电子科学与技术专业系列教材》编委会

- | | | |
|-----|-----------|----------|
| 主 编 | 姚建铨 | 天津大学 |
| 副主编 | 金亚秋 | 复旦大学 |
| | 陈治明 | 西安理工大学 |
| | 吕志伟 | 哈尔滨工业大学 |
| 委 员 | (按姓氏音序排列) | |
| | 曹全喜 | 西安电子科技大学 |
| | 崔一平 | 东南大学 |
| | 傅兴华 | 贵州大学 |
| | 郭从良 | 中国科技大学 |
| | 郭树旭 | 吉林大学 |
| | 黄卡玛 | 四川大学 |
| | 金伟琪 | 北京理工大学 |
| | 刘纯亮 | 西安交通大学 |
| | 刘 旭 | 浙江大学 |
| | 罗淑云 | 清华大学 |
| | 马长芳 | 科学出版社 |
| | 毛军发 | 上海交通大学 |
| | 饶云江 | 重庆大学 |
| | 张怀武 | 电子科技大学 |
| | 张在宣 | 中国计量学院 |
| | 周乐柱 | 北京大学 |
| | 邹雪城 | 华中科技大学 |
| 秘 书 | 资丽芳 | 科学出版社 |

序 言

21 世纪,随着现代科学技术的飞速发展,人类历史即将进入一个崭新的时代——信息时代。其鲜明的时代特征是,支撑这个时代的诸如能源、交通、材料和信息等基础产业均将得到高度发展,并能充分满足社会发展和人民生活的多方面需求。作为信息科学的基础,微电子技术和光电子技术同属于教育部本科专业目录中的一级学科“电子科学与技术”。微电子技术伴随着计算机技术、数字技术、移动通信技术、多媒体技术和网络技术的出现得到了迅猛的发展,从初期的小规模集成电路(SSI)发展到今天的巨大规模集成电路(GSI),成为使人类社会进入信息化时代的先导技术。20 世纪 60 年代初出现的激光和激光技术以其强大的生命力推动着光电子技术及其相关产业的发展,光电子技术集中了固体物理、波导光学、材料科学、半导体科学技术和信息科学技术的研究成就,成为具有强烈应用背景的新兴交叉学科,至今光电子技术已经应用于工业、通信、信息处理、检测、医疗卫生、军事、文化教育、科学研究和社会发展等各个领域。可以预言,光电子技术将继续微电子技术之后再次推动人类科学技术的革命和进步。因此,本世纪将是微电子和光电子共同发挥越来越重要作用的时代,是电子科学与技术飞速发展的时代。

电子科学与技术对于国家经济发展、科技进步和国防建设都具有重要的战略意义。今天,面对电子科学技术的飞速发展,世界上发达国家像美国、德国、日本、英国、法国等都竞相将微电子技术和光电子技术引入国家发展计划。我国对微电子技术和光电子技术的研究也给予了高度重视。在全国电子科学技术的科研、教学、生产和使用单位的共同努力下,我国已经形成了门类齐全、水平先进、应用广泛的微电子和光电子技术的科学研究领域,并在产业化方面形成了一定规模,取得了可喜的进步,为我国科学技术、国民经济和国防建设做出了积极贡献,在国际上也争得了一席之地。但是我们应该清醒地看到,在电子科学与技术领域,我国与世界先进水平仍有不小的差距,尤其在微电子技术方面的差距更大。这既有历史、体制、技术、工艺和资金方面的原因,也有各个层次所需专业人才短缺的原因。

为了我国电子科学与技术事业的可持续发展和抢占该领域中高新技术的制高点,就必须统筹教育、科研、开发、人才、资金和市场等各种资源和要素,其中人才培养是极其重要的一环。根据教育部加强高等学校本科教育的有关精神,电子科学与技术教学指导委员会和科学出版社,经过广泛而深入的调研,组织出版了这套电子科学与技术本科专业系列教材。

本系列教材具有以下特色:

1. 多层次。考虑到多层面的需求(普通院校、重点院校或研究型大学、应用型

大学),根据不同的层次,有针对性地编写不同的教材,同层次的教材也可能出版多种面向的教材。

2. 延续传统、更新内容,基础精深、专业宽新。教材编写在准确诠释基本概念、基本理论的同时,注重反映该领域的最新成果和发展方向,真正使教材能够达到培养“厚基础、宽口径、会设计、可操作、能发展”人才的目的。

3. 拓宽专业基础,加强实践教学。适当拓宽专业基础知识的范围,以增强培养人才的适应性;注重实践环节的设置,以促进学生实际动手能力的培育。

4. 适应教学计划,考虑自学需要。教材的编写完全按照教学指导委员会最新的课程设计和课程要求的指示精神,同时给学生留有更大的选择空间,以利于学生的个性发展和创新能力的培养。

5. 立体化。教材的编写是立体的,包括主教材、学习辅导书、教师参考书和多媒体课件等等。

本系列教材的编写集中了全国高校的优势资源,突出了多层次与适应性、综合性与多样性、前沿性与先进性、理论与实践的结合。在教材的组织和出版过程中得到了相关学校教务处及学院的帮助,在此表示衷心的感谢。

根据电子科学与技术专业发展战略的要求,我们将对这套系列教材不断更新,以保持教材的先进性和适用性。热忱欢迎全国同行以及关注电子科学与技术领域教育及发展前景的广大有识之士对我们的工作提出宝贵意见和建议。



教育部“电子科学与技术”教学指导委员会主任
中国科学院院士,天津大学教授

前 言

电路理论课是国家教育部规定的综合性大学电子信息类专业的专业基础课与专业主干课,也是电气工程、控制科学与工程、计算机科学与技术等各类专业必修的专业基础课或专业主干课。1982年以来,我们一直从事这门课程的教学。根据国家教委1983年制定的该课程教学大纲和1991年制定的教学基本要求,我们编写了这门课的讲义,并以该讲义为基础,融入多年的教学改革成果和电路系统理论的新技术与新方法,编成了《电路与系统理论》(1996年出版)、《电路系统分析与设计》(2002年出版)。电路理论课已经成为四川大学精品课程,根据国家教育部1998年新专业的基本要求和学分制教学改革的要求,我们在《电路系统分析与设计》(2002年出版)一书的基础上重新编写了本书。

本书内容由三部分组成:

(1) 电路分析基础,即第1~7章,主要介绍了电路分析的三种基本规律(电路元件约束规律、电路拓扑结构约束规律和基本信号规律);电路分析的基本方法;电路基本定理及其应用。

(2) 网络系统理论,即第8~10章,重点阐述了现代电路系统分析理论和计算机辅助分析技术。

(3) 现代电路系统设计,即第11~12章,介绍了现代滤波器设计基础、有源RC滤波器设计方法、现代集成滤波器设计和计算机辅助设计技术。

本书的主要特点是:

第一,将电路系统分析与设计有机地融合在一起,既系统地阐述了理论,又突出了工程应用,做到了理论联系实际,理论与实用技术相结合。

第二,将电路理论与系统理论有机地融合在一起,既将现代系统理论的观点、方法用于电路理论中,又将电路理论中的新方法、新成果推广到系统中;既反映了科学发展的趋势,也有利于对学生创新能力的培养。

第三,将电路分析基础、网络系统理论和电路系统综合设计有机地融合在一起,避免了三部分内容独立设课,造成学时过多、交叉重复的问题,有利于学生学习。

第四,广泛应用了计算机技术,全书突出了物理概念的论述和基本方法的应用;以有源电路系统为研究对象,例题丰富,并且具有典型性和启发性。

本书可以作为电子信息类、电气信息类和计算机类专业的本科生教材,也可供研究生和工程技术人员参考。

本书由王勇、龙建忠负责主编,其中王勇编写了第6章、第8章、第11章、第

12章,龙建忠编写了第1章、第2章、第5章,方勇编写了第3章、第4章、第7章,李军编写了第9章、第10章;我院研究生蒋鸿宇、何毅、王红宁、李霏、唐海洋参加了部分习题的编写和绘制插图工作。

四川大学电子信息学院全体同仁给予了许多帮助,院领导对本课程给予了许多支持,借本书出版之机,向他们表示最真挚的谢意!

本书在出版中得到了四川大学精品课程建设基金资助,在此,向四川大学校领导、学校教学指导委员会和教务处领导表示真挚的谢意!

由于编者水平所限,书中难免有错误和不当之处,恳请读者批评指正。

编者

2005年5月于四川大学

目 录

序言

前言

第 1 章 电路分析导论	1
1.1 引言	1
1.2 电路模型和集中参数假设	1
1.3 电路的基本变量和关联参考方向	4
1.4 功率和能量——电路的复合变量	6
1.5 基尔霍夫电流定律与电荷守恒公理	8
1.6 基尔霍夫电压定律与能量守恒公理.....	10
1.7 特勒根定理.....	12
1.8 总结与思考.....	15
1.8.1 总结	15
1.8.2 思考	16
习题 1	16
第 2 章 电路元件与电路分类	19
2.1 二端电路元件的数学抽象及描述.....	19
2.1.1 二端电阻	19
2.1.2 二端电容	25
2.1.3 二端电感	30
2.1.4* 二端忆阻元件	33
2.2 独立电源.....	34
2.3 基本信号.....	39
2.3.1 复指数信号	39
2.3.2 单位阶跃信号	40
2.3.3 单位斜坡信号	42
2.3.4 单位冲击信号	42
2.4 多端电路元件的数学抽象及其描述.....	45
2.4.1 多端电阻	46
2.4.2 多端电感	60
2.4.3 多端电容	62
2.5 电路元件的基本组与器件造型的概念.....	63
2.6 电路分类.....	63

2.7 总结与思考	64
2.7.1 总结	64
2.7.2 思考	67
习题 2	68
第 3 章 电路分析的基本方法	76
3.1 支路电流法	76
3.2 节点分析法	79
3.3 网孔电流法	88
3.4 总结与思考	95
3.4.1 总结	96
3.4.2 思考	99
习题 3	99
第 4 章 电路定理	105
4.1 叠加定理	105
4.2 替代定理	109
4.3 戴维南定理与诺顿定理	111
4.3.1 戴维南定理	111
4.3.2 诺顿定理	113
4.3.3 定理使用的技巧	114
4.4 互易定理	121
4.5 对偶原理	124
4.6 最大功率传输定理	126
4.7 总结与思考	127
4.7.1 总结	127
4.7.2 思考	129
习题 4	129
第 5 章 电路的时域分析	134
5.1 一阶电路分析	134
5.1.1 一阶电路的零输入响应	134
5.1.2 一阶电路的零状态响应	141
5.1.3 一阶电路的完全响应	145
5.1.4 一阶电路的三要素分析法	148
5.2 一般电路系统 I/O 微分方程的建立和求解	151
5.2.1 电路系统 I/O 微分方程的建立和求解	151
5.2.2 初始条件的确定	155
5.2.3 电路系统微分方程的求解	161

5.3	冲击响应和阶跃响应	168
5.4	卷积与零状态响应	174
5.4.1	卷积的定理	174
5.4.2	卷积的几何解释	177
5.4.3	卷积的性质	179
5.5	卷积积分应用	183
5.6	总结与思考	186
5.6.1	总结	186
5.6.2	思考	187
	习题 5	188
第 6 章	正弦电路的稳态分析	195
6.1	正弦稳态分析基础	195
6.1.1	正弦信号的基本概念	195
6.1.2	线性时不变电路的正弦稳态响应和正弦量的相量	196
6.1.3	基尔霍夫定律的相量形式	199
6.2	阻抗、导纳和相量模型	201
6.2.1	二端电路元件 VCR 的相量形式	201
6.2.2	多端电路元件 VCR 的相量形式	205
6.2.3	阻抗和导纳	206
6.3	相量分析法	211
6.3.1	等效变换分析法	211
6.3.2	相代数方程描述电路法	212
6.4	正弦电路的功率	217
6.4.1	二端网络的功率	217
6.4.2	正弦稳态的最大功率传输条件	222
6.5	非正弦周期信号激励下电路的稳态分析	224
6.5.1	电子技术中的非正弦周期信号	224
6.5.2	非正弦周期信号的正弦稳态响应	226
6.5.3	非正弦周期信号的功率	227
6.6	谐振电路	228
6.6.1	串联谐振电路	229
6.6.2	并联谐振电路	233
6.6.3	耦合谐振电路	235
6.7	总结与思考	238
6.7.1	总结	238
6.7.2	思考	240

习题 6	241
第 7 章 三相电路	246
7.1 三相交流电路	246
7.1.1 三相电源	246
7.1.2 三相电源的连接	247
7.1.3 三相负载的连接	249
7.1.4 三相电路	249
7.2 对称三相电路的计算	249
7.3 三相电路的功率及测量	252
7.3.1 有功功率(平均功率) P	252
7.3.2 无功功率 Q	253
7.3.3 视在功率 S	253
7.3.4 瞬时功率 p	253
7.3.5 测量方法	254
7.4 不对称三相电路的计算	257
7.5 总结与思考	259
7.5.1 总结	259
7.5.2 思考	261
习题 7	261
第 8 章 电路的复频域分析方法	264
8.1 拉普拉斯变换的定义	264
8.2 拉普拉斯变换的基本性质	265
8.3 拉普拉斯反变换	269
8.4 复频域电路分析方法	272
8.4.1 基本电路元件的复频域模型	272
8.4.2 复频域电路分析方法	275
8.5 网络函数的定义	278
8.6 网络函数的零点和极点	280
8.7 网络函数的瞬态响应	282
8.7.1 极点与自由响应和强迫响应	282
8.7.2 零、极点与冲击响应	284
8.8 网络的正弦稳态响应	286
8.9 网络的稳定性分析	290
8.10 总结与思考	294

8.10.1 总结	294
8.10.2 思考	295
习题 8	296
第 9 章 双口网络	300
9.1 双口网络的参数	300
9.1.1 短路导纳参数(y 参数)	300
9.1.2 开路阻抗参数(z 参数)	302
9.1.3 混合参数	304
9.1.4 传输参数	306
9.1.5 双口网络参数之间的关系	308
9.2 双口网络的等效电路	314
9.3 双口网络的相互连接	316
9.3.1 双口网络的串联	317
9.3.2 双口网络的并联	318
9.3.3 双口网络的级联	319
9.3.4 双口网络的混联	320
* 9.4 双口网络有效连接的判别和实现	321
9.5 双口网络的黑箱分析法	323
9.6 总结与思考	325
9.6.1 总结	325
9.6.2 思考	326
习题 9	326
第 10 章 图论及 LTI 电路系统的矩阵分析法	332
10.1 图论基础	332
10.1.1 图	333
10.1.2 回路	334
10.1.3 树	334
10.1.4 割集	335
10.1.5 基本回路与基本割集	336
10.2 电路系统的图矩阵表示	336
10.2.1 关联矩阵	336
10.2.2 基本割集矩阵	339
10.2.3 基本回路矩阵	340
10.2.4 图矩阵间的关系	343
10.2.5 支路变量之间的基本关系	343

10.3	支路电压电流关系——VCR 方程	345
10.4	节点分析法和基本割集分析法	349
10.4.1	节点分析法	349
10.4.2	基本割集分析法	354
10.5	网孔分析法和基本回路分析法	357
* 10.6	改进节点分析法	361
10.7	总结与思考	365
10.7.1	总结	365
10.7.2	思考	368
	习题 10	369
第 11 章	滤波器设计	374
11.1	滤波器设计基础	374
11.1.1	滤波器的定义和分类	374
11.1.2	频率和阻抗的归一化	376
11.1.3	滤波器的幅频特性设计	377
11.2	有源 RC 滤波器的设计方法	389
11.2.1	有源 RC 滤波器的元件	389
11.2.2	有源滤波器的级联实现	389
11.2.3	典型二阶有源滤波器设计	391
11.3	有源 RC 滤波器的计算机辅助设计	396
11.3.1	低通滤波器的计算机辅助设计	396
11.3.2	高通滤波器的计算机辅助设计	399
11.4	总结与思考	401
11.4.1	总结	401
11.4.2	思考	402
	习题 11	402
第 12 章	计算机辅助设计	404
12.1	计算机辅助设计基础	404
12.1.1	计算机辅助设计技术简介	404
12.1.2	SPICE 简介	405
12.2	Multisim2001 软件基础	406
12.2.1	Multisim2001 简介	406
12.2.2	Multisim2001 基本操作	408
12.3	Multisim2001 高级应用	412
12.3.1	直流工作点分析	412
12.3.2	瞬态分析	416

12.3.3 交流分析	417
12.3.4 扫描分析	419
12.4 Multisim2001 应用实例——有源带通滤波器的仿真	420
12.5 总结与思考	424
12.5.1 总结	424
12.5.2 思考	425
习题 12	425
主要参考文献	427
附录	428

第1章 电路分析导论

内容提要

本章在集中参数假设的条件下,导出了电路模型的基本概念,介绍了描述电路的基本变量和复合变量,给出了关联参考方向的约定。

重点介绍了电路分析的理论基础:电荷守恒公理和能量守恒公理,由此导出了电路必须遵守的两大约束规律之一——拓扑(或称结构)约束规律:基尔霍夫定律和特勒根定理。

1.1 引言

在当今时代,人们的生活中已离不开电话(手机)、电视、音响、照明……工作中离不开计算机、测试仪表、控制装置、识别系统……尽管它们形状各异,性能不同,但都建立在一个共同的理论基础——电路理论基础之上。

电路理论由两个分支构成:电路分析、电路综合(设计)。电路分析是在给定电路系统的结构和元件参数之后,求解电路输入(激励)与输出(响应)之间的规律;电路综合是在给定电路系统的输入(激励)与输出(响应)之间的规律(或技术指标)的基础上,设计出电路系统(包括结构和元件参数)。本书在重点介绍电路分析的同时,也简要讨论电路综合(设计)。

电路分析必须满足两大约束规律:拓扑(结构)约束规律和元件约束规律。它们是电路分析与计算的基础,但它们又是建立在电荷守恒公理和能量守恒公理基础之上的。在这些理论基础之上,导出了一些重要的电路定理和各种基本分析方法。

电路理论是一门融合理论与工程应用的学科,我们既要学习和掌握它的基本概念、基本理论规律、基本分析方法,又要注重它的工程应用,与时俱进,不断创新!

电路理论是现代电子信息技术的重要基础,它既为后续课程模拟电子技术、数字电子技术、信号与系统、自控原理、通信原理等奠定了坚实的基础,又培养了读者成为一名科学家或工程师必备的分析问题和解决问题的能力。

1.2 电路模型和集中参数假设

在工农业生产、国防、科研和日常生活中,为实现电能的产生、传输、分配和转换,电信号的采集、交换、传输及处理,信息的存储,电量的测试等任务,人们设计、

制造出各种实际电路元件(如电阻器、电容器、变压器、晶体管、运算放大器),再将实际电路元件按一定的互连规律连接起来,以完成上述各种任务,这就形成了电路系统,通常人们称它们为实际电路。

为了研究实际电路系统的特性,必须进行科学抽象与概括,用一些反映其电磁本质属性的理想化元件按照一定的互连规律连接起来,成为有某种功能的组合体,来表征实际电路系统,这就是电路模型。它是对实际电路系统的抽象和概括。电路理论研究的对象就是电路模型。因为给客观事物建立一个理想化模型,再以此模型为对象进行定性或定量分析,然后根据分析的结果得出合乎客观事物实际情况的科学结论,是人们在长期科学实验中总结出来的一种自然科学研究方法。例如,力学中的质点模型,电学中的点电荷模型,原子物理学中的原子模型等。虽然模型并不是原来的客观事物,而仅仅是客观事物的符合一定条件的科学抽象,但它本身又有严格的定义。一个理想化模型可能与一个原物相对应,也可能用几个理想化模型的组合来最佳逼近原物。

电路理论以电路模型为研究对象,采用这种模拟的方法是必要的和可能的。因为在实际电路系统中,各种器件的工作过程都与电路的电磁现象有关。例如,电阻器的电阻是由于电场和磁场的能量与热能及其他形式能量的相互转换而形成的;电感线圈中磁场能量的存储与变化,决定于电路中的磁场分布情况;电容器中电场能量的存储与变化,决定于电路中的电场分布状态……这就是说,任何一个实际电路元件或由它们组成的实际电路都与其电磁特性有关。如果以实际电路为研究对象,必然是所有实际元件的电磁性能交织在一起,不仅使问题复杂化,甚至无法进行分析研究。所以只能采用模拟的概念,假设实际器件或电路中的电磁过程可以分别研究,从而可以用集中参数元件(即理想化元件)构成电路元件模型。每一种集中参数元件都只表示一种基本的电磁过程,反映一个物理本质特征,可以用数学方法精确定义。例如,理想的电阻元件是一种只表示消耗电能,产生焦耳热效应的器件;理想电容器只表示电荷及电场能量的存储;理想电感元件只表示磁链和磁场能量的存储等。这样任何实际电路元件均可以用这些理想化元件模型或它们的组合来表征。例如,一个实际电阻器,若只考虑电磁能转变为热能的特性,就可用一个理想电阻元件表示;若要表示由它引起磁场存在效应,就要用一个理想电阻与一个理想电感串联的模型表示;若还需表示由它引起电场存在的效应,就要用一个理想电阻与电容并联的模型表示。

上述所谓理想化元件(即集中参数元件)的假设,是指在似稳条件下,若电路元件的外部尺寸很小时,它的每个端钮上的电流和任意两个端钮之间的电压在任意时刻都有确定的值。也就是说,若实际电路的尺寸远小于电路正常工作时信号最高频率所对应的波长,实际电路中的电磁过程才可以分别研究,每一种物理本质才可以用一个理想化模型来表征。这种理想化元件模型就是集中参数元件,简称电路元件。