



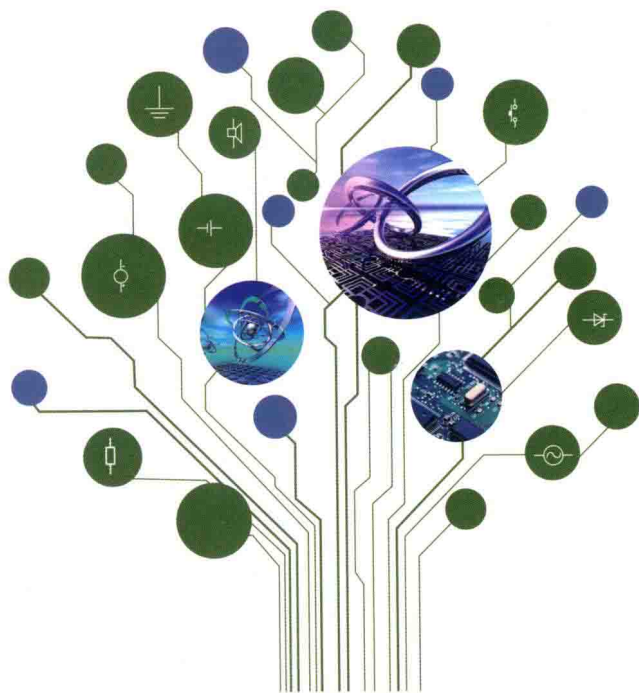
教育部高等学校电子信息类专业教学指导委员会规划教材
高等学校电子信息类专业系列教材

电工电子基础

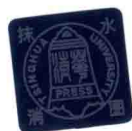
A nalog Electronic Technology

模拟电子技术

劳五一 劳佳 编著
Lao Wuyi Lao Jia



清华大学出版社





教育部高等学校电子信息类专业教学指导委员会规划教材
高等学校电子信息类专业系列教材

Analog Electronic Technology

模拟电子技术

劳五一 劳佳 编著

Lao Wuyi

Lao Jia

清华大学出版社
北京

内 容 简 介

本书是高等院校电子类专业的基础教材,全书共13章,分为电子电路基础知识、基本电路及其应用、基本应用电路和模拟集成电路原理及半导体器件四个部分。本书采用“自顶向下”的层次结构,注重设计思想,全面地介绍了模拟电子学的基本技术和基本理论,内容丰富,实用性强,尤其是与Multisim软件相结合,通过仿真辅助分析和设计验证,提供了大量有价值的实例。本书的附录还对线性电路的基本问题进行了归纳和总结。

本书可用作高等院校模拟电子技术基础课程的教材,也可作为工程技术人员的参考工具书。

本书封面贴有清华大学出版社防伪标签,无标签者不得销售。

版权所有,侵权必究。侵权举报电话:010-62782989 13701121933

图书在版编目(CIP)数据

模拟电子技术/劳五一,劳佳编著.--北京:清华大学出版社,2015

高等学校电子信息类专业系列教材

ISBN 978-7-302-39233-0

I. ①模… II. ①劳… ②劳… III. ①模拟电路—电子技术—高等学校—教材 IV. ①TN710

中国版本图书馆CIP数据核字(2015)第024226号

责任编辑:盛东亮

封面设计:李召霞

责任校对:时翠兰

责任印制:刘海龙

出版发行:清华大学出版社

网 址: <http://www.tup.com.cn>, <http://www.wqbook.com>

地 址:北京清华大学学研大厦A座

邮 编:100084

社总机:010-62770175

邮 购:010-62786544

投稿与读者服务:010-62776969, c-service@tup.tsinghua.edu.cn

质量反馈:010-62772015, zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn

课件下载: <http://www.tup.com.cn>, 010-62795954

印装者:清华大学印刷厂

经 销:全国新华书店

开 本:185mm×260mm 印 张:32.5

字 数:787千字

版 次:2015年7月第1版

印 次:2015年7月第1次印刷

印 数:1~2000

定 价:59.00元

产品编号:061417-01

高等学校电子信息类专业系列教材

顾问委员会

谈振辉	北京交通大学（教指委高级顾问）	郁道银	天津大学（教指委高级顾问）
廖延彪	清华大学（特约高级顾问）	胡广书	清华大学（特约高级顾问）
华成英	清华大学（国家级教学名师）	于洪珍	中国矿业大学（国家级教学名师）
彭启琮	电子科技大学（国家级教学名师）	孙肖子	西安电子科技大学（国家级教学名师）
邹逢兴	国防科学技术大学（国家级教学名师）	严国萍	华中科技大学（国家级教学名师）

编审委员会

主任	吕志伟	哈尔滨工业大学		
副主任	刘旭	浙江大学	王志军	北京大学
	隆克平	北京科技大学	葛宝臻	天津大学
	秦石乔	国防科学技术大学	何伟明	哈尔滨工业大学
	刘向东	浙江大学		
委员	王志华	清华大学	宋梅	北京邮电大学
	韩焱	中北大学	张雪英	太原理工大学
	殷福亮	大连理工大学	赵晓晖	吉林大学
	张朝柱	哈尔滨工程大学	刘兴钊	上海交通大学
	洪伟	东南大学	陈鹤鸣	南京邮电大学
	杨明武	合肥工业大学	袁东风	山东大学
	王忠勇	郑州大学	程文青	华中科技大学
	曾云	湖南大学	李思敏	桂林电子科技大学
	陈前斌	重庆邮电大学	张怀武	电子科技大学
	谢泉	贵州大学	卞树檀	第二炮兵工程大学
	吴瑛	解放军信息工程大学	刘纯亮	西安交通大学
	金伟其	北京理工大学	毕卫红	燕山大学
	胡秀珍	内蒙古工业大学	付跃刚	长春理工大学
	贾宏志	上海理工大学	顾济华	苏州大学
	李振华	南京理工大学	韩正甫	中国科学技术大学
	李晖	福建师范大学	何兴道	南昌航空大学
	何平安	武汉大学	张新亮	华中科技大学
	郭永彩	重庆大学	曹益平	四川大学
	刘缠牢	西安工业大学	李儒新	中科院上海光学精密机械研究所
	赵尚弘	空军工程大学	董友梅	京东方科技集团
	蒋晓瑜	装甲兵工程学院	蔡毅	中国兵器科学研究院
	仲顺安	北京理工大学	冯其波	北京交通大学
	黄翊东	清华大学	张有光	北京航空航天大学
	李勇朝	西安电子科技大学	江毅	北京理工大学
	章毓晋	清华大学	张伟刚	南开大学
	刘铁根	天津大学	宋峰	南开大学
	王艳芬	中国矿业大学	靳伟	香港理工大学
	苑立波	哈尔滨工程大学		
丛书责任编辑	盛东亮	清华大学出版社		

序

FOREWORD

我国电子信息产业销售收入总规模在 2013 年已经突破 12 万亿元,行业收入占工业总体比重已经超过 9%。电子信息产业在工业经济中的支撑作用凸显,更加促进了信息化和工业化的高层次深度融合。随着移动互联网、云计算、物联网、大数据和石墨烯等新兴产业的爆发式增长,电子信息产业的发展呈现了新的特点,电子信息产业的人才培养面临着新的挑战。

(1) 随着控制、通信、人机交互和网络互联等新兴电子信息技术不断发展,传统工业设备融合了大量最新的电子信息技术,它们一起构成了庞大而复杂的系统,派生出大量新兴的电子信息技术应用需求。这些“系统级”的应用需求,迫切要求具有系统级设计能力的电子信息技术人才。

(2) 电子信息系统设备的功能越来越复杂,系统的集成度越来越高。因此,要求未来的设计者应该具备更扎实的理论基础知识和更宽广的专业视野。未来电子信息系统的设计越来越要求软件和硬件的协同规划、协同设计和协同调试。

(3) 新兴电子信息技术的发展依赖于半导体产业的不断推动,半导体厂商为设计者提供了越来越丰富的生态资源,系统集成厂商的全方位配合又加速了这种生态资源的进一步完善。半导体厂商和系统集成厂商所建立的这种生态系统,为未来的设计者提供了更加便捷却又必须依赖的设计资源。

教育部 2012 年颁布了新版《高等学校本科专业目录》,将电子信息类专业进行了整合,为各高校建立系统化的人才培养体系,培养具有扎实理论基础和宽广专业技能、的、兼顾“基础”和“系统”的高层次电子信息人才给出了指引。

传统的电子信息学科专业课程体系呈现“自底向上”的特点,这种课程体系偏重对底层元器件的分析与设计,较少涉及系统级的集成与设计。近年来,国内很多高校对电子信息类专业课程体系进行了大力度的改革,这些改革顺应时代潮流,从系统集成的角度,更加科学合理地构建了课程体系。

为了进一步提高普通高校电子信息类专业教育与教学质量,贯彻落实《国家中长期教育改革和发展规划纲要(2010—2020 年)》和《教育部关于全面提高高等教育质量若干意见》(教高【2012】4 号)的精神,教育部高等学校电子信息类专业教学指导委员会开展了“高等学校电子信息类专业课程体系”的立项研究工作,并于 2014 年 5 月启动了《高等学校电子信息类专业系列教材》(教育部高等学校电子信息类专业教学指导委员会规划教材)的建设工作。其目的是为推进高等教育内涵式发展,提高教学水平,满足高等学校对电子信息类专业人才培养、教学改革与课程改革的需要。

本系列教材定位于高等学校电子信息类专业的专业课程,适用于电子信息类的电子信

息工程、电子科学与技术、通信工程、微电子科学与工程、光电信息科学与工程、信息工程及其相近专业。经过编审委员会与众多高校多次沟通,初步拟定分批次(2014—2017年)建设约100门课程教材。本系列教材将力求在保证基础的前提下,突出技术的先进性和科学的前沿性,体现创新教学和工程实践教学;将重视系统集成思想在教学中的体现,鼓励推陈出新,采用“自顶向下”的方法编写教材;将注重反映优秀的教学改革成果,推广优秀的教学经验与理念。

为了保证本系列教材的科学性、系统性及编写质量,本系列教材设立顾问委员会及编审委员会。顾问委员会由教指委高级顾问、特约高级顾问和国家级教学名师担任,编审委员会由教育部高等学校电子信息类专业教学指导委员会委员和一线教学名师组成。同时,清华大学出版社为本系列教材配置优秀的编辑团队,力求高水准出版。本系列教材的建设,不仅有众多高校教师参与,也有大量知名的电子信息类企业支持。在此,谨向参与本系列教材策划、组织、编写与出版的广大教师、企业代表及出版人员致以诚挚的感谢,并殷切希望本系列教材在我国高等学校电子信息类专业人才培养与课程体系建设中发挥切实的作用。

吕志伟 教授

前言

PREFACE

“模拟电子电路”是电子、通信和计算机等专业的学科基础课程。因为中学生所学课程中几乎没有涉及电子电路的内容,因此“模拟电子电路”是学生接触“电子技术”的启蒙课。作者在多年教学实践中发现,采用传统的从器件原理,到分立元件再到集成电路的教学思路,学生普遍感到入门难、学习枯燥、课程知识点零散庞杂,不易形成电子系统的整体概念,这对于本课程乃至后续专业学习和工作实践均有不利的影响。

在前期学习了侧重掌握基本分析工具的“电路分析”课程之后,学生在学习模拟电子电路时,除了将分析方法进一步延伸到电子电路上外,核心的学习目的是进行电路设计。如今高性能集成电路已经广泛普及,在工程实践中更为重要的是确立设计框架,从宏观上确定系统结构,通过理解器件的外部特性进行选型,并辅以相应的分析和验证从而达到设计要求。

本书首先为读者打下理论基础,采用了从电子系统功能到系统构建,再从器件特性到器件原理的“自顶向下”的层次结构,体现从外部到内部,从整体到局部的逐步深化的认识过程,而不至于在学习之初时“见树木而不见森林”,被大量的器件内部结构和原理等知识所困扰。同时,针对模拟电子电路实践性强的特点,书中采用理论与仿真实验紧密结合的教学形式,利用 Multisim 仿真软件对所学内容进行分析和设计验证。每一章的习题均分为分析题与设计题,旨在能够更好地培养学生认识、分析和设计电路的能力。无论学生后续是侧重混合电路系统设计,还是深入学习半导体和微电子学科,本书均能够发挥良好的基础作用。

本书整体分为四个部分,即第 1~3 章介绍模拟电路的基础知识和分析方法,第 4~7 章为基本电路要素,第 8~11 章为基本应用电路,第 12、13 章为模拟集成电路和半导体器件,如图 0.1 所示。

第 1 章介绍电子电路基础知识。考虑到读者学习知识上的连续性,本书在电路理论(电路分析)的基础上,从电信号和电子系统出发,介绍放大器的主要指标、电源设置和简单应用,形成对模拟电子电路的宏观认识;第 2、3 章分别为放大电路的频率响应和放大电路中的反馈。在学习模拟电路之前,先掌握电路系统中的两个基本问题——频率响应和反馈,掌握严密系统的分析方法,为后续学习各种功能电路打下基础。

第 4~7 章,均从器件的外部特性出发,分别介绍集成运算放大器与集成电压比较器、半导体二极管、双极型晶体管和场效应管的基本电路。前三章的知识会帮助读者深刻理解和掌握这四章的内容。第 8~11 章是各种应用型功能电路介绍,分别为有源滤波器、振荡器、功率放大电路和电源电路,它们是模拟电路实际应用时的常见模块。

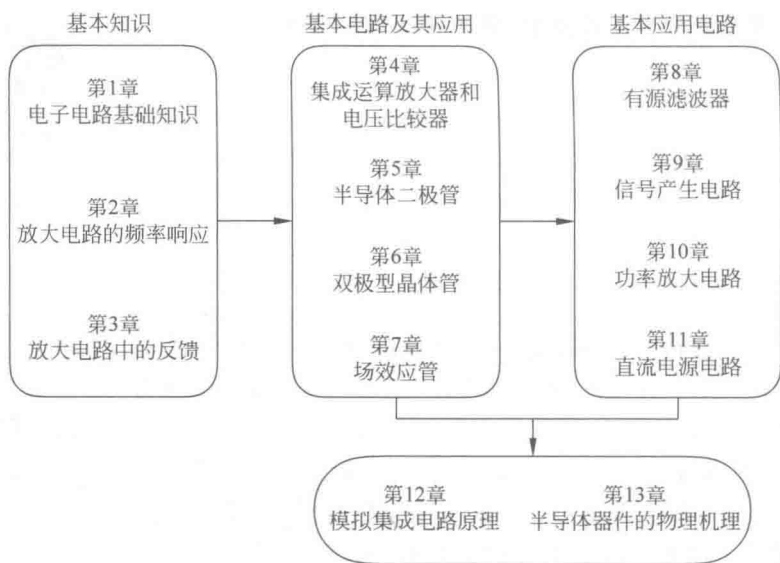


图 0.1 本书内容框图

最后,进一步深入器件内部,第12章介绍各种模拟集成电路内部电路原理,以便读者更好地理解和应用集成电路,掌握基本集成电路结构和分析方法;第13章半导体器件的物理机理,从微观角度对半导体器件的内部结构和原理加以介绍,为今后微电子专业的学习打下基础。

感谢清华大学出版社的大力支持和帮助。

谨将本书献给一如既往支持我们工作的贤妻良母——陈力力女士。

作 者

2015年6月于上海

符号和仿真图说明

1. 交流和直流

小写字母 v 或 i , 小写下标, 表示交流电压或电流瞬时值

v_o 输出交流电压瞬时值

i_b 晶体管基极交流电流瞬时值

大写字母 V 或 I , 大写下标, 表示直流电压或电流

V_o 输出直流电压

V_{CC} 集电极直流电源电压

I_B 基极直流偏置电流

I_L 负载直流电流

小写字母 v 或 i , 大写下标, 表示含直流的电压或电流瞬时值

v_o 含有直流的输出电压瞬时值

v_i 含有直流的输入电压瞬时值

大写字母 V 或 I , 小写下标, 表示正弦电压或电流有效值, 或表示 s 域参数

V_o 输出正弦电压有效值

V_m 正弦电压幅值

大写字母上加圆点表示正弦复数值

$\dot{V}_o$ 复数输出电压

$\dot{A}_v$ 复数电压增益

2. 元器件

R 电阻或等效电阻

r 器件内部的等效电阻

C 电容

L 电感

D 二极管

T 、 Q 双极型晶体管

T 、 J 、 M 场效应管

A 集成运算放大器

C 集成电压比较器

Tr 变压器

3. 其他符号

V_A Early 电压

V_T 热电压

$V_{BE(on)}$	双极型晶体管 B-E 结导通电压
g_m	跨导
β	双极型晶体管共发射极电流放大系数
A_{vf}	闭环电压增益
Q	静态工作点
BW	带宽
T	温度, 周期
φ	相位角
η	效率
SR	压摆率
D	全谐波失真系数

4. 仿真图注

本书仿真图标注(英文)与 NI Multisim 软件中保持一致, 常见的分析方法及坐标变量:

Transient Analysis	瞬态分析
AC Analysis	交流小信号分析
DC Sweep Analysis	直流扫描分析
Parameter Sweep	参数扫描
Temperature Sweep	温度扫描
Fourier Analysis	傅里叶分析
Pole Zero	零-极点分析
Transfer Function	传输函数分析
Post Process	数据后处理
Time	时间
Frequency	频率
Voltage	电压
Current	电流
Resistance	电阻
Capacitance	电容
Temperature	温度
Input	输入
Output	输出
Channel	通道
Gain	增益
Power	功率
Efficiency	效率

目录

CONTENTS

第 1 章 电子电路基础知识	1
1.1 电信号	1
1.2 电子系统	2
1.3 放大电路	3
1.4 放大电路的电源	8
1.5 差分放大电路	9
1.6 放大电路的传输特性	11
1.7 放大电路的性能指标	12
1.8 级联放大电路	14
1.9 计算机仿真	16
本章小结	20
习题	21
第 2 章 放大电路的频率响应	23
2.1 概述	23
2.1.1 为什么要研究放大电路的频率响应	23
2.1.2 频率失真	24
2.2 分析方法	25
2.2.1 高通电路和低通电路	25
2.2.2 三频段近似分析法	29
2.3 放大电路的频率响应	33
2.4 密勒效应	38
本章小结	40
习题	41
第 3 章 放大电路中的反馈	44
3.1 反馈的基本概念	44
3.2 反馈的分类	44
3.3 负反馈放大电路的四种组态	46
3.4 反馈放大电路的基本方程	48
3.5 负反馈对放大电路性能的影响	50
3.5.1 提高增益的稳定性	51
3.5.2 展宽频带	51
3.5.3 减小非线性失真	52
3.5.4 对输入电阻和输出电阻的影响	53

* 3.6 反馈网络的负载作用	56
3.6.1 反馈网络模型	56
3.6.2 电压串联负反馈	57
3.6.3 电流并联负反馈	59
3.6.4 电流串联负反馈	61
3.6.5 电压并联负反馈	62
3.7 负反馈放大电路的稳定性	64
3.7.1 负反馈放大电路产生自激振荡的条件和原因	64
3.7.2 反馈放大器的稳定判据	64
3.7.3 负反馈放大电路的稳定裕度	66
3.7.4 负反馈放大电路自激振荡的消除方法	67
本章小结	71
习题	72
第4章 集成运算放大器和电压比较器	75
4.1 集成运放的电压传输特性	75
4.2 应用电路	77
4.2.1 反相电路	77
4.2.2 同相电路	82
4.2.3 差分电路	85
4.2.4 加法电路	88
4.2.5 积分电路	90
4.2.6 微分电路	92
4.2.7 电压—电流转换电路	93
4.3 集成运放的单电源供电	96
4.3.1 单电源供电运放电路的特性	96
4.3.2 单电源供电运放电路的偏置电路	98
4.3.3 单电源供电运放电路的设计实例	99
4.4 电压反馈运放与电流反馈运放	104
4.4.1 基本概念	104
4.4.2 主要区别	105
* 4.4.3 集成运放的参数	110
4.5 集成电压比较器	111
4.5.1 集成电压比较器的电压传输特性	111
4.5.2 电压比较器的基本应用	112
4.5.3 各种比较器电路简介	119
4.5.4 比较器的简单应用	122
4.6 模拟乘法器	124
4.6.1 模拟乘法器的电路符号及其等效电路	124
4.6.2 模拟乘法器的应用	124
本章小结	127
习题	128
第5章 半导体二极管	134
5.1 半导体二极管的外部特性	134

5.2	半导体二极管模型	136
5.3	应用电路分析与设计	138
5.3.1	整流电路	138
5.3.2	二极管逻辑电路	143
5.3.3	钳位电路	144
5.3.4	稳压电路	144
5.3.5	限幅电路	146
5.3.6	显示电路	148
5.3.7	光控电路	149
5.4	计算机仿真分析与设计	149
5.4.1	二极管的伏安特性	150
5.4.2	二极管的动态特性	150
5.4.3	对数和指数放大电路	151
5.4.4	基准电压源设计	152
5.4.5	限幅放大器	154
	本章小结	155
	习题	156
第 6 章	双极型晶体管	158
6.1	双极型晶体管的外部特性	158
6.2	基本放大电路的工作原理及其组成	161
6.3	工作点稳定的偏置电路	164
6.4	放大电路的三种基本组态	166
6.5	共发射极放大电路	167
6.5.1	直流分析	167
6.5.2	交流分析	169
6.6	共集电极放大电路和共基极放大电路	190
6.6.1	共集电极放大电路	190
6.6.2	共基极放大电路	195
6.7	电流源电路	205
6.7.1	简单的电流源电路	205
6.7.2	基本电流镜	205
6.7.3	基本三晶体管电流镜	206
6.7.4	Cascode 电流镜	206
6.7.5	Wilson 电流镜	207
6.7.6	Widlar 电流镜	208
6.7.7	多路电流镜	209
6.8	偏置电路	210
6.8.1	直流电源的供电模式	210
6.8.2	电流源偏置	215
6.9	有源负载放大电路	216
6.10	差分放大电路	220
6.10.1	晶体管差分放大电路的构成	220
6.10.2	晶体管差分放大电路的分析	223

6.10.3	小信号等效电路分析	229
6.10.4	差分放大电路仿真分析	238
6.10.5	差分放大电路的设计	241
6.11	互补输出电路	243
6.11.1	电路结构	244
6.11.2	电路改进	245
*6.12	基本共射电路的非线性分析	249
	本章小结	250
	习题	252
第7章	场效应管	258
7.1	场效应管的外部特性	258
7.1.1	N 沟道 JFET 的外部特性	260
7.1.2	N 沟道增强型 MOSFET 的外部特性	261
7.2	FET 放大电路的工作原理及其组成	263
7.2.1	FET 的偏置电路	263
7.2.2	FET 放大电路的三种基本组态	264
7.3	共源放大电路	265
7.3.1	直流分析	265
7.3.2	交流分析	266
*7.3.3	共源放大电路与共射放大电路传输特性分析	271
7.4	共漏极放大电路和共栅极放大电路	275
7.4.1	共漏极放大电路	275
7.4.2	共栅极放大电路	276
7.5	电流源电路	277
7.5.1	基本 MOS 电流镜	277
7.5.2	几种常见的 MOS 电流镜	277
7.6	FET 有源负载放大电路	279
7.6.1	以 PMOSFET 作负载的 NMOSFET 共源放大电路	279
7.6.2	以栅-漏极短接的 NMOSFET 作负载的 NMOSFET 共源放大电路	280
7.7	FET 差分放大电路	281
	本章小结	282
	习题	283
第8章	有源滤波器	288
8.1	基本概念	288
8.1.1	滤波器的特性	288
8.1.2	滤波器的分类	289
8.2	滤波电路分析	290
8.2.1	有源低通滤波器	290
8.2.2	有源高通滤波器	294
8.2.3	有源带通滤波器	296
8.2.4	有源带阻滤波器	297
8.2.5	一阶有源全通滤波器	299
*8.3	滤波电路综合	302

8.3.1 巴特沃思滤波器	302
8.3.2 切比雪夫滤波器	305
8.3.3 贝塞尔滤波器	310
8.4 基于积分器的二阶有源滤波器——状态变量型滤波器	313
8.4.1 二阶传递函数的实现	314
8.4.2 状态变量滤波器实例	315
本章小结	316
习题	316
第9章 信号产生电路	319
9.1 正弦波振荡器	319
9.1.1 正弦波振荡器的组成和分类	319
9.1.2 产生正弦波振荡的条件	320
9.1.3 正弦波振荡电路的判断	321
9.1.4 RC正弦波振荡电路	321
9.1.5 LC正弦波振荡电路	326
9.1.6 正弦波振荡器的负电阻模型	338
9.1.7 石英晶体振荡器	344
9.2 非正弦波发生器	349
9.2.1 矩形波发生器	349
9.2.2 三角波发生器	353
9.2.3 锯齿波发生器	356
9.2.4 电压-频率转换电路	357
本章小结	359
习题	360
第10章 功率放大电路	365
10.1 功率放大电路的主要特点	365
10.2 功率放大电路提高效率的主要途径	366
10.3 互补对称功率放大电路	368
10.3.1 OTL功率放大电路	368
10.3.2 OCL功率放大电路	371
10.3.3 BTL功率放大电路	372
10.3.4 互补对称功率放大电路的应用	373
10.4 丁类(D类)功率放大电路	384
10.4.1 电路原理	384
10.4.2 电路实现	385
10.5 集成功率放大电路	386
10.5.1 低电压音频功率放大器 LM386	386
10.5.2 高保真音频功率放大器 TDA2030	387
本章小结	392
习题	393
第11章 直流电源电路	396
11.1 概述	396

11.1.1 小功率稳压电源的组成	396
11.1.2 整流滤波电路	397
11.2 线性稳压电源	399
11.2.1 基准电压源	399
11.2.2 串联型稳压电源	403
11.2.3 三端集成稳压器	405
11.3 开关型稳压电源	411
11.3.1 PWM 开关电源的工作原理	411
11.3.2 串联型开关稳压电路的仿真分析	414
11.4 稳流电源	416
11.4.1 负载不接地式直流稳流源	417
11.4.2 负载接地式直流稳流源	417
本章小结	418
习题	419
第 12 章 模拟集成电路原理	424
12.1 多级放大电路的级间耦合方式	424
12.1.1 阻容耦合	424
12.1.2 变压器耦合	425
12.1.3 光电耦合	425
12.1.4 直接耦合	426
12.2 集成运算放大器	428
12.2.1 集成运放电路的一般设计原理	428
12.2.2 双极型集成运算放大器	429
12.2.3 CMOS 集成运算放大器	432
12.3 集成电压比较器	433
12.4 集成宽带放大器	437
12.5 集成功率放大器	439
12.6 集成三端稳压器	442
12.7 模拟乘法器	445
12.8 开关电容电路	447
12.9 电流模式电路	450
12.9.1 电流反馈运算放大器	451
12.9.2 跨导运算放大器	454
本章小结	462
习题	463
第 13 章 半导体器件的物理机理	469
13.1 半导体基础知识	469
13.1.1 本征半导体	469
13.1.2 杂质半导体	471
13.1.3 PN 结	472
13.2 半导体二极管	477
13.3 双极型晶体管	478
13.3.1 晶体管的工作原理	478

13.3.2	晶体管的特性曲线	481
13.3.3	晶体管的主要参数	482
13.3.4	温度对晶体管参数的影响	484
13.3.5	r_{be} 的近似表达式	484
13.4	场效应管	485
13.4.1	结型场效应管	486
13.4.2	绝缘栅型场效应管	489
	本章小结	493
附录 A	线性电路的基本问题	494
参考文献		499