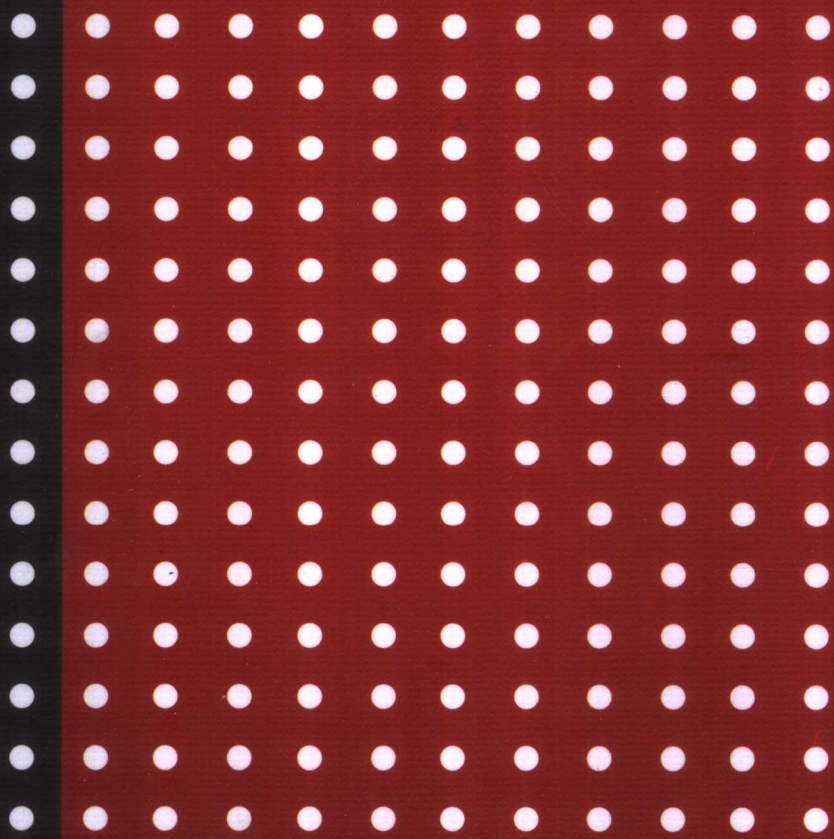


21世纪高等学校电子信息工程型规划教材

# 模拟电子电路分析、设计与仿真

劳五一 劳佳 编著

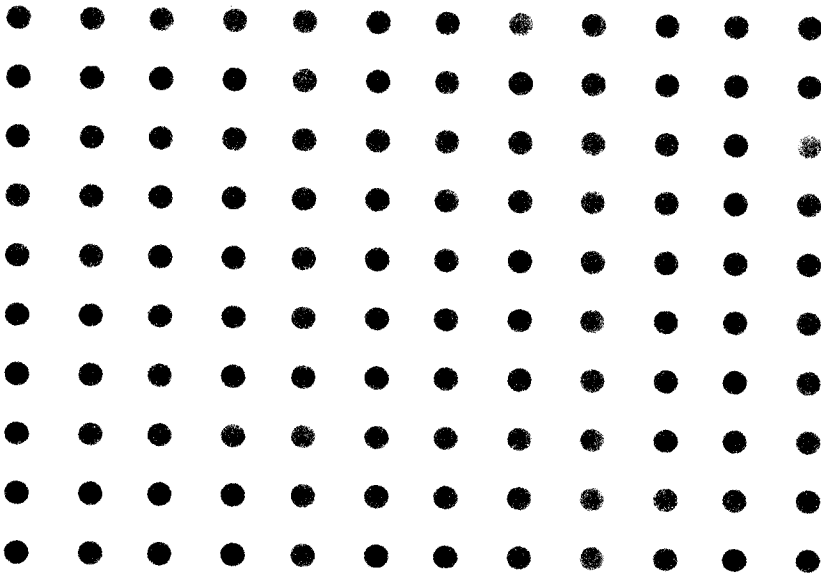


清华大学出版社

21世纪高等学校电子信息工程型规划教材

# 模拟电子电路分析、设计与仿真

劳五一 劳佳 编著



清华大学出版社  
北京

## 内 容 简 介

本书主要包括三个部分。第一部分介绍基础电路设计与仿真,包括对基本的二极管、晶体管和集成运放电路的理论分析、参数设计与计算机仿真,为学习较为复杂的电路打下基础。第二部分介绍应用电路设计与仿真,注重选择具有实际应用价值的电路,包括小信号放大电路、功率放大电路、信号发生电路、信号变换电路和直流电源电路等。每类电路均配有若干实例,加以详细的理论推导,阐明设计方法和思想,并利用仿真加以验证和优化。第三部分介绍模拟集成电路内部电路的分析与仿真,包括电流源电路、放大器与比较器、电源芯片、555 定时器,以及较为前沿的电流模式和开关电容集成电路的分析与仿真。书中很多仿真内容都是第一次在国内教材中出现,力求使学生通过这些内容,明晰较大规模电路的分析方法,提高读图能力,对电路拓扑和原理有更深入的理解。本书对有志于深入学习模拟电路技术的学生以及从事集成电路相关专业的技术人员有重要参考价值。

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 13501256678 13801310933

### 图书在版编目(CIP)数据

模拟电子电路分析、设计与仿真/劳五一,劳佳编著. —北京:清华大学出版社,2007.5  
(21世纪高等学校电子信息工程型规划教材)  
ISBN 978-7-302-14644-5

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

中国版本图书馆CIP数据核字(2007)第018902号

责任编辑:丁岭 李晔

责任校对:李建庄

责任印制:王秀菊

出版发行:清华大学出版社 地 址:北京清华大学学研大厦A座

<http://www.tup.com.cn> 邮 编:100084

[c-service@tup.tsinghua.edu.cn](mailto:c-service@tup.tsinghua.edu.cn)

社总机:010-62770175 邮购热线:010-62786544

投稿咨询:010-62772015 客户服务:010-62776969

印刷者:北京密云胶印厂

装订者:三河市溧源装订厂

经 销:全国新华书店

开 本:185×260 印 张:19.75 字 数:474千字

版 次:2007年5月第1版 印 次:2007年5月第1次印刷

印 数:1~4000

定 价:29.00元

本书如存在文字不清、漏印、缺页、倒页、脱页等印装质量问题,请与清华大学出版社出版部联系调换。联系电话:(010)62770177 转 3103 产品编号:022678-01

# 出版说明

随着我国高等教育规模的扩大和产业结构调整的进一步完善,社会对高层次应用型人才的需求将更加迫切。各地高校紧密结合地方经济建设发展需要,科学运用市场调节机制,合理调整和配置教育资源,在改革和改造传统学科专业的基础上,加强工程型和应用型学科专业建设,积极设置主要面向地方支柱产业、高新技术产业、服务业的工程型和应用型学科专业,积极为地方经济建设输送各类应用型人才。各高校加大了使用信息科学等现代科学技术提升、改造传统学科专业的力度,从而实现传统学科专业向工程型和应用型学科专业的发展与转变。在发挥传统学科专业师资力量强、办学经验丰富、教学资源充裕等优势的同时,不断更新其教学内容、改革课程体系,使工程型和应用型学科专业教育与经济建设相适应。

为了配合高校工程型和应用型学科专业的建设和发展,急需出版一批内容新、体系新、方法新、手段新的高水平电子信息类专业课程教材。目前,工程型和应用型学科专业电子信息类专业课程教材的建设工作仍滞后于教学改革的实践,如现有的电子信息类专业教材中有不少内容陈旧(依然用传统专业电子信息教材代替工程型和应用型学科专业教材),重理论、轻实践,不能满足新的教学计划、课程设置的需要;一些课程的教材可供选择的品种太少;一些基础课的教材虽然品种较多,但低水平重复严重;有些教材内容庞杂,书越编越厚;专业课教材、教学辅助教材及教学参考书短缺,等等,都不利于学生能力的提高和素质的培养。为此,在教育部相关教学指导委员会专家的指导和建议下,清华大学出版社组织出版本系列教材,以满足工程型和应用型电子信息类专业课程教学的需要。本系列教材在规划过程中体现了如下一些基本原则和特点:

(1) 系列教材主要是电子信息学科基础课程教材,面向工程技术应用培养。本系列教材在内容上坚持基本理论适度,反映基本理论和原理的综合应用,强调工程实践和应用环节。电子信息学科历经了一个多世纪的发展,已经形成了一个完整、科学的理论体系,这些理论是这一领域技术发展的强大源泉,基于理论的技术创新、开发与应用显得更为重要。

(2) 系列教材体现了电子信息学科使用新的分析方法和手段解决工程实际问题。利用计算机强大功能和仿真设计软件,使得电子信息领域中大量复杂的理论计算、变换分析等变得快速简单。教材充分体现了利用计算机解决理论分析与解算实际工程电路的途径与方法。

(3) 系列教材体现了新技术、新器件的开发应用实践。电子信息产业中仪器、设备、产品都已使用高集成化的模块,且不仅仅由硬件来实现,而是大量使用软件和硬件相结合方法,使得产品性价比很高,如何使学生掌握这些先进的技术、创造性地开发应用新技术是本系列教材的一个重要特点。

(4) 以学生知识、能力、素质协调发展为宗旨,系列教材编写内容充分注意了学生创新

能力和实践能力的培养,加强了实验实践环节,各门课程均配有独立的实验课程和课程设计。

(5) 21世纪是信息时代,学生获取知识可以是多种媒体形式和多种渠道的,而不再局限于课堂上,因而传授知识不再以教师为中心,以教材为惟一依托,而应该多为学生提供各类学习资料(如网络教材,CAI课件,学习指导书等)。应创造一种新的学习环境(如讨论,自学,设计制作竞赛等),让学生成为学习主体。该系列教材以计算机、网络和实验室为载体,配有多种辅助学习资料,提高学生兴趣。

繁荣教材出版事业,提高教材质量的关键是教师。建立一支高水平的以老带新的教材编写队伍才能保证教材的编写质量和建设力度,希望有志于教材建设的教师能够加入到我们的编写队伍中来。

**21世纪高等学校电子信息工程型规划教材编委会**

**联系人: 魏江江 weijj@tup.tsinghua.edu.cn**

# 前 言

本书作者在两年多的时间里,对大量教材中出现的电路进行了详尽的分析推导、设计实践、仿真和实物制作的验证.并对一些较为新颖的电路形式,以及一些集成电路的内部电路,进行了探索性的分析与研究.给出了较为详尽的理论计算及仿真算例.读者通过学习书中内容,可以对模拟电路的分析手段、设计方法和思想以及一些新颖的电路结构有较生动而深刻的认识,掌握通过计算机仿真来辅助理论分析并指导实践的重要方法.

利用计算机进行电路仿真,近年来已经引起了国内的广泛重视,在很多模拟电子技术教材中都加入了利用 PSpice、Electronic Workbench、Protel 等软件进行仿真的内容,也出版了很多关于仿真软件使用的介绍性书籍.但普遍来看,侧重于软件使用的多,详细讲解仿真的少;验证现象、观察波形者多,深入分析电路思想者少;常见简单电路多,复杂大型电路少.这样的内容显然不能满足读者日益增长的学习要求,也无法充分展现利用计算机仿真进行辅助设计的威力.

本书摒弃了国内一般模拟电子技术教材以“分析为主、仿真作为课外补充”的教学模式,借鉴国外教材强调设计和实践环节的特色,注重方法和思想,对每个电路均给出了详细的理论计算,通过完整的实例,向读者展示电子设计的全过程.计算机仿真作为新的辅助设计手段,可以大大提高设计效率,并为我们的实践做出有效的指导.本书对每一种电路,特别是国内教材中常见的认识误区,利用计算机仿真来验证其正确性,并由此进行更为深入的探究.同时作者做了大量原创性的工作,对一些参数不齐的集成电路内部电路也进行了探索,希望读者通过这些实例,能了解到模拟设计中较为深入和前沿的成果,并体会到模拟设计中的精华思想.

需要指出的是,很多学生在拥有了计算机仿真软件后,便不再仔细进行电路分析和计算,而是直接在仿真软件上进行参数尝试,这样的做法是不可取的.一般来说,电路设计首先需要有明确的设计思想,通过有针对性的分析选择合适的电路拓扑,随后通过计算设定电路的静态电流等直流参数,保证电路工作在合适的工作状态,再进行交流设计等.选择参数时,除了要考虑输出信号正确外,还要考虑到电流、功耗乃至至于体积、封装形式等诸多因素.电路仿真软件可以作为验证和辅助调试的有效工具,但却不能替代整个设计和思考的过程.另外,虽然 SPICE 软件经过将近 30 年的发展已经较为成熟,其仿真结果具有很好的可信度,但在实际应用中,各种仿真参数的设定仍然可能影响计算结果甚至产生错误,器件模型也存在其不完善的一面,可能导致仿真结果不正确甚至根本无法进行仿真.在这些时候,更需要清晰的设计思路和良好的分析能力来指导完成电路设计过程.

除了仿真之外,对于某些适宜制作的电路,我们还进行了实物制作.制作中全部在面包板、万能板或自制印刷电路板上实现.在文中均给出了制作的有关参数,并配有照片.通过这些实例,读者可以强烈地感受到,仿真对于实际电路设计具有很好的指导意义.仿真成功的电路,在实际制作时只需要少量微调,大大节省了选择参数的时间,并且避免了由于参数设置不当引起的器件损坏.相信通过这样的学习过程,读者可以对电路设计方法有一个新的认识.

本书的内容较为丰富,全书包括了超过 600 幅插图,近 70 个仿真专题和十余个实际制作项目。由于内容跨度较大,虽然作者给出了比较详细的推导和说明,但受篇幅所限仍不可能面面俱到。这就需要读者具有比较扎实的电路分析基础,对等效电路、网络分析、 $s$  域分析等工具有比较清晰的概念。希望本书能为对模拟电子技术课程、电子设计课程以及模拟电子技术有兴趣的读者提供有益的参考。

### 全书结构

本书由三部分组成。第一部分为前三章,介绍了基本器件组成的一些简单电路。这些基本器件包括半导体二极管、三极管和集成运算放大器。这部分内容和电路形式在一般的模拟电子技术教材中都有所涉及。本部分中的基本电路结构是组成后续较复杂的应用和集成电路不可或缺的材料。通过本部分的学习,读者可以巩固基本电路的分析和设计方法,并熟悉仿真软件的基本应用。

第二部分包括第 4 至第 9 章。在本部分中包含了各类实用电路,覆盖了实际电路制作和设计中的常见问题,比较详细地叙述了功率放大电路、各类振荡器、直流电源电路等常用电路单元。本部分电路具有很强的实用性,读者可以强烈地体会到电路的设计、仿真直至制作具有良好的一致性和统一性。

第三部分由第 10 章至第 16 章组成,叙述了一些较为复杂和先进的模拟电子学内容。模拟集成电路的分析作为模拟电子技术课程的重要组成部分,也作为微电子学科的基础,是模拟电子技术的发展方向,其重要性是不言而喻的。在本部分中,在仿真软件的有力支持下,对多种常见的模拟集成电路,如运算放大器、功率放大器、比较器、电源电路等的结构和参数设计进行了详细的分析。同时也包含了一些近年来备受关注的、较为新颖的电路形式,如电流模式和开关电容电路。

### 致谢

感谢华东师范大学“百门主干课程——模拟电子电路”建设项目的支持。学校教务处领导和有关老师多次关心本书的出版情况,对作者表示鼓励。华东师范大学信息学院和电子科学与技术系的领导也十分关心和支持本书的出版,并提供很多便利条件,在此表示衷心的感谢。

在参与编写本书的两年里,本书的第二作者一直就读于上海交通大学电子工程系,进行本科和研究生阶段的学习。上海交通大学为之提供了优越的学习和研究条件,电子工程系很多老师和实验员曾经给予指导和帮助,朝夕相处的同学们也曾给予许多帮助和启迪,恕无法一一列举姓名,在此一并致谢。

谨以此书纪念上海交通大学杰出的电子学教师——晏才宏老师。

感谢清华大学出版社的大力支持和帮助。

感谢一直默默支持我们工作的妻子和母亲陈力力女士。在两年多的书稿编写过程中,无论从生活上还是精神上,她都给我们无微不至的关怀与鼓励。没有她的辛苦付出,本书的完成是不可能实现的。

本书作者虽经努力,仍不免囿于一隅,或有偏颇乃至谬误之处,诚请方家不吝赐教。

作者

2007 年 2 月于上海

# 本书符号和图表说明

## 1. 元件和参数

本书中，正体字母表示器件

R	电阻
r	交流等效电阻
C	电容
L	电感
D	二极管
T、Q	三极管
T、J	场效应管
Tr	变压器

斜体字母表示元件参数值

$$R_1 = 1\text{k}\Omega$$

$$C_1 = 1\mu\text{F}$$

## 2. 交流及直流

- 小写字母  $v(i)$ ，小写下标，表示交流电压(电流)瞬时值

$v_o$	输出交流电压瞬时值
$i_b$	三极管基极交流电流瞬时值

- 大写字母  $V(I)$ ，大写下标，表示直流电压(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  $v(i)$ ，大写下标，表示包含直流的电压(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  $V(I)$ ，小写下标，表示正弦电压(电流)有效值，或表示  $s$  域参数

$V_o$	输出正弦电压有效值
$V_m$	正弦电压振幅
$V(s)$	电压的 Laplace 变换

- 大写字母上加圆点表示正弦复数值

$\dot{V} = V e^{j\phi} = V \angle \phi$	复数电压
$\dot{A}$	复数增益



### 3. 其他符号

$V_A$	Early 电压
$V_T = 26\text{mV}$	热电压
$V_{BE(\text{on})}$	三极管 B-E 结导通电压
$g_m$	跨导
$\beta$	三极管共发射极接法电流放大系数
$f_T$	三极管特征频率
$C_\pi$	混合 $\pi$ 模型中发射结等效电容
$C_\mu$	混合 $\pi$ 模型中集电结等效电容
$A_{vf}$	闭环电压增益
Q	静态工作点
BW	带宽

### 4. 仿真图注

本书仿真图标注与 MultiSIM 9 软件中保持一致。常见的分析方法及坐标变量如下

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

正文中打字机字体表示仿真器件内部参数或仿真程序脚本，如 VTO、BF 等。

### 5. 电气符号说明

为了方便学生学习 MultiSIM、PSpice、Cadence、Mentor Graphics 等国外 EDA 软件以及阅读国外参考文献, 本书符号采用美国 ANSI 标准. ANSI 标准符号与国标 GB/T 4728.12-1996 标准的符号对照表如下所示.

器件名称	ANSI 符号	国标符号	器件名称	ANSI 符号	国标符号
一般电阻器			可变电阻器		
滑动电阻器			电感器		
二极管			发光二极管		
稳压二极管			双向击穿二极管		
变容二极管			桥式整流器		
三极管					
理想电压源			交流理想电压源		
理想电流源			受控电压源		
受控电流源					
开关					
理想运算放大器			模拟开关		
与门			与非门		
或门			反相器		

# 目 录

## 第一部分 基础电路设计与仿真

<b>第 1 章 二极管电路</b> .....	<b>2</b>
1.1 限幅电路 .....	2
1.1.1 单向限幅电路 .....	2
1.1.2 双向限幅电路 .....	3
仿真 ◇ 二极管限幅电路 .....	3
1.2 钳位电路 .....	5
仿真 ◇ 钳位电路 .....	6
1.3 齐纳二极管 .....	6
仿真 ◇ 齐纳二极管 .....	8
<b>第 2 章 晶体管电路</b> .....	<b>9</b>
2.1 晶体管基本放大电路 .....	9
2.1.1 静态分析与设计 .....	10
仿真 ◇ 晶体管基本放大电路静态分析与设计 .....	11
2.1.2 动态分析与设计 .....	12
仿真 ◇ 晶体管基本放大电路动态分析与设计 .....	15
2.2 差分电路 .....	19
2.2.1 限幅电路 .....	20
仿真 ◇ 差分对限幅电路 .....	22
2.2.2 放大电路 .....	23
仿真 ◇ 差分放大电路 .....	24
仿真 ◇ 有源负载差分放大电路 .....	25
2.2.3 比较器 .....	27
仿真 ◇ 差分电压比较器 .....	28
2.2.4 史密特触发器 .....	29
仿真 ◇ 史密特触发器 .....	30
2.3 互补输出电路 .....	32

2.3.1	电路结构	32
2.3.2	电路改进	33
	仿真 ◇ 互补输出电路	34
<b>第 3 章</b>	<b>集成运算放大电路</b>	<b>36</b>
3.1	基本运算电路	36
	仿真 ◇ 运算电路	38
3.2	交流放大电路	40
3.2.1	双电源供电	40
3.2.2	单电源供电	43
	仿真 ◇ 交流放大电路	44
	制作 ★ 音频分配器	46
3.3	双极点 Butterworth 滤波器	46
3.3.1	Butterworth 滤波器	46
3.3.2	电路设计	47
	仿真 ◇ 高通 Butterworth 滤波器	49
3.4	波形分割式模拟乘法器	49
	仿真 ◇ 波形分割式模拟乘法器	51
3.5	对数—指数放大器式模拟乘法器	52
	仿真 ◇ 对数—指数放大器式模拟乘法器	53
3.6	精密整流电路	55
3.6.1	半波精密整流电路	55
3.6.2	全波精密整流电路	56
	仿真 ◇ 精密整流电路	57
<b>第二部分 应用电路设计与仿真</b>		
<b>第 4 章</b>	<b>小信号放大电路</b>	<b>60</b>
4.1	两级负反馈放大电路	60
	仿真 ◇ 两级负反馈放大器	62
4.2	共源—共基放大电路	63
4.2.1	传输特性	63
4.2.2	频率特性	64
	仿真 ◇ 共源—共基放大电路	67
4.3	仪用放大器	68
4.3.1	电路分析	68
4.3.2	实例分析	69
	仿真 ◇ 仪用放大器	70
4.4	自动增益控制电路	71

---

4.4.1	电路结构	72
4.4.2	设计要点	72
4.4.3	电路分析	73
	仿真 ◇ AGC 电路	74
	制作 ★ 具有 AGC 功能的可控增益放大器	76
<b>第 5 章</b>	<b>功率放大电路</b>	<b>78</b>
5.1	放大器的分类和效率	78
5.2	OCL 功率放大器	80
5.2.1	电路设计	80
5.2.2	使用集成运放的 OCL 电路	81
	仿真 ◇ OCL 功率放大器	81
	制作 ★ 恒压功放与恒流功放	88
5.3	BTL 功率放大电路	90
5.3.1	电路原理	90
5.3.2	实用 BTL 电路	92
	仿真 ◇ BTL 放大电路	95
5.4	丙类功率放大器	99
5.4.1	电路结构	99
5.4.2	电路设计	99
	仿真 ◇ 丙类放大器	100
	制作 ★ 丙类功率放大器	101
5.5	丁类功率放大器	102
5.5.1	基础知识	102
5.5.2	电路设计	104
	仿真 ◇ 丁类放大器	104
<b>第 6 章</b>	<b>信号发生电路</b>	<b>107</b>
6.1	RC 正弦波振荡器	107
	仿真 ◇ RC 正弦波振荡器	108
	制作 ★ RC 正弦波振荡器	110
6.2	RC 相移振荡器	111
	仿真 ◇ 相移振荡器	113
6.3	Colpitts 振荡器	114
6.3.1	电路组成	114
6.3.2	振荡频率和起振条件	115
6.3.3	电路改进	116
	仿真 ◇ Colpitts 振荡器	117
6.4	利用集成运放的 LC 振荡器	119

	仿真 ◇ 集成运放 LC 振荡器	119
6.5	交叉耦合差分振荡器	120
6.5.1	负阻振荡器	120
6.5.2	差分振荡器	120
	仿真 ◇ 交叉耦合差分振荡器	121
6.6	多谐振荡器	122
	仿真 ◇ 多谐振荡器	123
	制作 ★ 多谐振荡器	124
6.7	方波发生器	125
	仿真 ◇ 方波发生器	125
6.8	宽带正弦波振荡器	126
6.8.1	电路原理	126
6.8.2	电路实现	127
	仿真 ◇ 宽带正弦波振荡器	127
<b>第 7 章</b>	<b>信号变换电路</b>	<b>130</b>
7.1	三角波转正弦波变换电路	130
7.1.1	电路结构	130
7.1.2	电路分析	131
	仿真 ◇ 三角波转正弦波变换电路	132
	制作 ★ 三角波转正弦波变换电路	133
7.2	电压—频率转换电路	135
7.2.1	电路结构	135
7.2.2	电路分析	135
	仿真 ◇ 电压—频率转换电路	137
7.3	电阻—电压变换电路	138
	仿真 ◇ 电阻—电压变换电路	139
<b>第 8 章</b>	<b>直流电源电路</b>	<b>140</b>
8.1	跟踪电源	140
8.1.1	LM317 可调稳压芯片	140
8.1.2	电路设计	141
	仿真 ◇ 跟踪电源	141
	制作 ★ 数显跟踪电源	142
8.2	稳流电源	145
8.2.1	负载不接地式直流稳流源	145
8.2.2	负载接地式直流稳流源	145
	仿真 ◇ 稳流电源	147
8.3	DC-DC 变换器	150

8.3.1	基本原理	150
8.3.2	设计实例	151
	仿真 ◇ DC-DC 变换电路	152
<b>第 9 章</b>	<b>测量与数控电路</b>	<b>154</b>
9.1	电容测量电路	154
9.1.1	测量原理	154
9.1.2	电路结构	154
	仿真 ◇ 电容测量电路	156
9.2	晶体管电流放大系数测试仪	156
9.2.1	测量原理	156
9.2.2	电路分析	157
	仿真 ◇ 晶体管电流放大系数测试仪	158
9.3	温度测量仪	159
9.3.1	电路原理	159
9.3.2	电路设计	160
	仿真 ◇ 温度测量仪	160
	制作 ★ 简易数显温度计	161
9.4	数控多谐振荡器	163
9.4.1	电路原理	163
9.4.2	电路实现	163
	仿真 ◇ 数控多谐振荡器	164
9.5	数控衰减器	166
9.5.1	电路原理	166
9.5.2	电路实现	166
	仿真 ◇ 数控衰减器	168
	制作 ★ 数控音量电位器	170

### 第三部分 模拟集成电路内部电路分析与仿真

<b>第 10 章</b>	<b>电流源电路</b>	<b>172</b>
10.1	BJT 简易电流源	172
10.2	BJT 基本电流镜	172
10.3	基本三晶体管电流镜	173
10.4	Cascode 电流镜	174
10.5	Wilson 电流镜	175
10.6	Widlar 电流镜	176
10.7	多路电流镜	178
10.8	BiCMOS 电流镜	178

仿真 ◇ 电流源电路	179
<b>第 11 章 放大器与比较器</b>	<b>182</b>
11.1 LF351 集成运算放大器	182
11.1.1 电路结构	182
11.1.2 静态分析	184
11.1.3 动态分析	185
仿真 ◇ Bi-FET LF351 集成运算放大器	187
11.2 MC14573 CMOS 运算放大电路	189
11.2.1 电路结构	190
11.2.2 静态分析	190
11.2.3 动态分析	191
仿真 ◇ MC14573 集成运算放大器	192
11.3 LM386 集成功率放大器	195
11.3.1 电路结构	195
11.3.2 静态分析	195
11.3.3 动态分析	196
仿真 ◇ LM386	197
11.4 CA3040 集成宽频带放大器	201
11.4.1 电路结构	201
11.4.2 静态分析	201
11.4.3 动态分析	202
仿真 ◇ CA3040 集成宽频带放大器	204
11.5 LM393 集成电压比较器	206
仿真 ◇ LM393 集成电压比较器	208
11.6 状态变量型有源滤波器	211
11.6.1 电路分析	211
11.6.2 实例分析	215
仿真 ◇ UAF42 有源滤波器	216
<b>第 12 章 模拟乘法器</b>	<b>219</b>
12.1 电路原理	219
12.2 应用电路	221
仿真 ◇ 可变跨导式模拟乘法器	224
<b>第 13 章 开关电容电路</b>	<b>230</b>
13.1 模拟开关	230
仿真 ◇ 模拟开关	232
13.2 模拟电阻	233
仿真 ◇ 模拟电阻电路	235



13.3 开关电容积分器 . . . . .	238
13.3.1 电路分析 . . . . .	238
13.3.2 加有反馈电阻的积分器 . . . . .	240
仿真 ◇ 开关电容积分器 . . . . .	241
13.4 同相放大器 . . . . .	243
仿真 ◇ 同相放大器 . . . . .	243
<b>第 14 章 电源芯片 . . . . .</b>	<b>245</b>
14.1 三端集成稳压器 . . . . .	245
14.1.1 内部电路组成和原理 . . . . .	245
14.1.2 应用电路 . . . . .	247
仿真 ◇ LM78Lxx 集成三端稳压器 . . . . .	248
14.2 TL431 可调精密电压基准 . . . . .	251
14.2.1 带隙基准电压电路模型 . . . . .	251
14.2.2 基本带隙基准电压电路 . . . . .	252
仿真 ◇ 基本带隙基准电路 . . . . .	253
仿真 ◇ 改进的带隙基准电路 . . . . .	254
14.2.3 TL431 芯片 . . . . .	255
仿真 ◇ TL431 . . . . .	258
<b>第 15 章 电流模式电路 . . . . .</b>	<b>260</b>
15.1 集成电流传输器 . . . . .	260
15.1.1 电流传输器模型 . . . . .	260
15.1.2 CCI 的实现方法 . . . . .	260
仿真 ◇ 信号运算电路 . . . . .	261
仿真 ◇ 负阻振荡器 . . . . .	264
15.2 电流反馈运算放大器 . . . . .	266
15.2.1 基础知识 . . . . .	266
15.2.2 模型和特性分析 . . . . .	266
15.2.3 典型原理电路 . . . . .	268
仿真 ◇ CFA 典型电路 . . . . .	269
15.3 跨导放大器 . . . . .	271
15.3.1 OTA 基本知识 . . . . .	272
15.3.2 典型原理电路 . . . . .	272
15.3.3 电路分析 . . . . .	273
15.3.4 跨导放大器的应用 . . . . .	274
仿真 ◇ OTA 应用电路 . . . . .	275
<b>第 16 章 555 定时器 . . . . .</b>	<b>277</b>
16.1 电路分析 . . . . .	277