

Mc
Graw
Hill

Education



国外名校最新教材精选

模拟 CMOS 集成电路设计

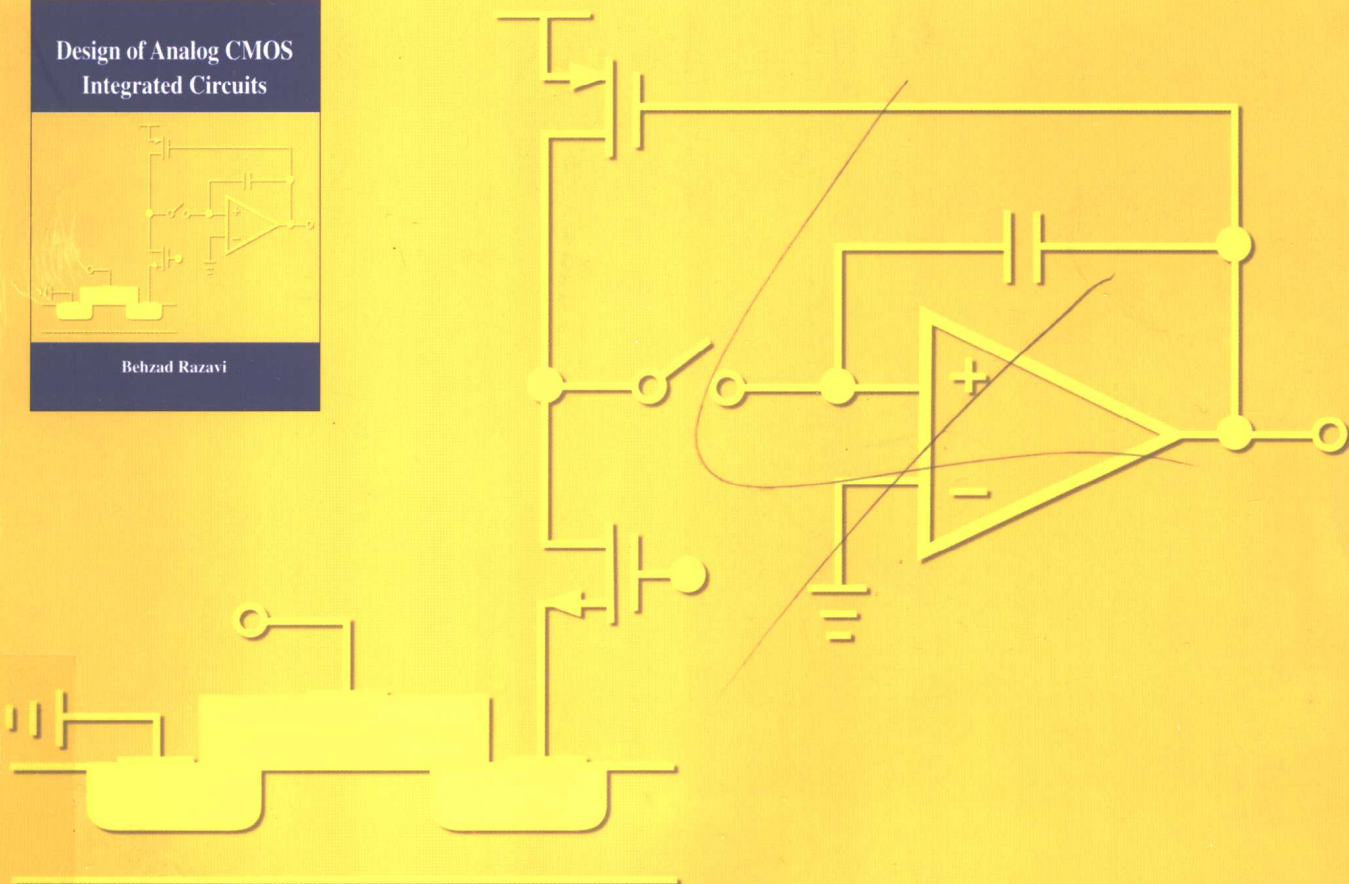
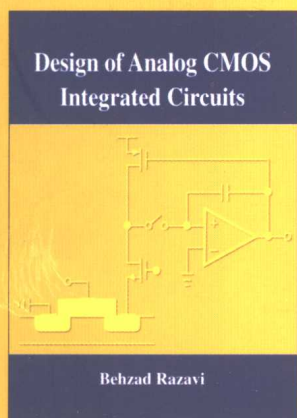
Design of Analog CMOS Integrated Circuits

[美] 毕查德·拉扎维 著

陈贵灿 程 军 张瑞智 等译

陈贵灿 审校

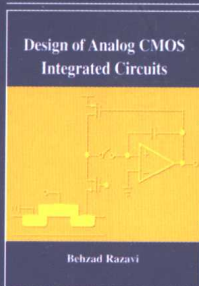
本科高年级及研究生用书



Mc
Graw
Hill



西安交通大学出版社
XI'AN JIAOTONG UNIVERSITY PRESS

**本科高年级及研究生用书**

当代微电子系统广泛应用各种模拟 CMOS 集成电路，从音频、视频到无线、宽带通信以及计算机磁盘驱动，模拟 CMOS 设计已成为半导体工业竞争中成功的关键，从而对从事模拟电路设计的技术人员的要求比以往任何时候都高。

本书提供了模拟 CMOS 集成电路分析和设计的新观点，可作为课堂教学和工业界培训的教材，课文既侧重基础，又侧重现代模拟电路中必需的新的范例。对模拟和混合信号的集成电路中的许多重要概念，作者以直观、通俗易懂的语言逐步地启发读者对它们的理解。

- MOS 器件物理和工艺、短沟道效应与模型。
- 单级和差动放大器与电流镜
- 频率响应与噪声
- 反馈，运放设计及稳定性
- 带隙基准与开关电容电路
- 非线性与失配
- 振荡器与锁相环
- 版图与封装

本书有大量的例题和超过 400 道习题，向读者提供在高性能模拟电路设计中必需的深入的内容。

责任编辑 / 白居宪 赵丽平 封面设计 / 阎亮

ISBN 7-5605-1606-8



9 787560 516066 >



ISBN 7-5605-1606-8/TN · 72

定价：65.00 元

 国外名校最新教材精选

Design of Analog CMOS Integrated Circuits

模拟 CMOS 集成电路设计

[美] 毕查德·拉扎维 著

Behzad Razavi
Professor of Electrical Engineering
University of California, Los Angeles

陈贵灿 程军 张瑞智 等译
陈贵灿 审校



西安交通大学出版社

Xian Jiaotong University Press

内 容 提 要

本书介绍模拟 CMOS 集成电路的分析与设计。从直观和严密的角度阐述了各种模拟电路的基本原理和概念,同时还阐述了在 SOC 中模拟电路设计遇到的新问题及电路技术的新发展。本书由浅入深,理论与实际结合,提供了大量现代工业中的设计实例。全书共 18 章。前 10 章介绍各种基本模块和运放及其频率响应和噪声。第 11 章至第 13 章介绍带隙基准、开关电容电路以及电路的非线性和失配的影响,第 14、15 章介绍振荡器和锁相环。第 16 章至 18 章介绍 MOS 器件的高阶效应及其模型、CMOS 制造工艺和混合信号电路的版图与封装。

本书是现代模拟集成电路设计的理想教材或参考书。可供与集成电路领域有关的各电类专业的高年级本科生和研究生使用,也可供从事这一领域的工程技术人员自学和参考。

Behzad Razavi

Design of Analog CMOS and Integrated Circuits

ISBN:0-07-238032-2

Copyright©2001 by The McGraw-Hill Companies, Inc.

Original language published by The McGraw-Hill Companies, Inc. All Rights reserved. No part of this publication may be reproduced or distributed by any means, or stored in a database or retrieval system, without the prior written permission of the publisher.

Simplified Chinese translation edition jointly published by McGraw-Hill Education (Asia) Co. and Xian Jiaotong University Press.

本书中文简体字翻译版由西安交通大学出版社和美国麦格劳-希尔教育(亚洲)出版公司合作出版。未经出版者预先书面许可,不得以任何方式复制和抄袭本书的任何部分。

本书封面贴有 McGraw-Hill 公司防伪标签,无标签者不得销售。

陕西省版权局著作权合同登记号:25-2002-079 号

图书在版编目(CIP)数据

模拟 CMOS 集成电路设计/(美)拉扎维(Razavi, B.)著;
陈贵灿等译. —西安:西安交通大学出版社,2002.12

书名原文:Design of Analoga CMOS Integrated Circuits

ISBN 7-5605-1606-8

I. 模… II. ①拉…②陈… III. 模拟集成电路—电路设计
IV. TN431.102

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2002)第 091479 号

*

西安交通大学出版社出版发行

(西安市兴庆南路 25 号 邮政编码:710049 电话:(029)2668315)

陕西宝石兰印务有限责任公司印装

各地新华书店经销

*

开本:787 mm×1 092 mm 1/16 印张:36.375 字数:877 千字

2003 年 2 月第 1 版 2003 年 2 月第 1 次印刷

印数:0001~4 000 定价:65.00 元

发行科电话:(029)2668357,2667874

作者简介

毕查德·拉扎维于 1985 年在沙里夫理工大学的电气工程系获得理学学士学位,并分别于 1988 年和 1992 年在斯坦福大学电气工程系获得理学硕士和博士学位。他曾在 AT&T 贝尔实验室工作,随后又受聘于 Hewlett - Packard 实验室,直到 1996 年为止。1996 年 9 月,他成为加利福尼亚大学洛杉矶分校的电气工程系副教授,随后晋升为教授。目前他从事的研究包括无线收发、频率合成,高速数据通信及数据转换的锁相和时钟恢复。

拉扎维教授分别于 1992 年到 1994 年在普林斯顿大学(新泽西州普林斯顿)和 1995 年在斯坦福大学任副教授。他是 VLSI 电路专题讨论会的技术程序委员会和国际固体电子协会(ISSCC)的成员,在其中担任模拟小组委员会的主席。此外,他还分别担任 IEEE 固体电路杂志、IEEE 电路和系统杂志及高速电子学国际杂志的特邀编辑和副编辑。

拉扎维教授于 1994 年因为卓越的编辑能力获 ISSCC 的 Beatrice 奖,1994 年在欧洲固体电子会议上获最佳论文奖,1995 年和 1997 年 ISSCC 的最佳专题小组奖,1997 年 TRW 创新教学奖,1998 年 IEEE 定制集成电路会议最佳论文奖。他是《数据转换系统设计原理》(IEEE 出版,1995)和《RF 微电子学》(Prentice Hall 出版,1998)的作者,以及《单片锁相环和时钟恢复电路》(IEEE 出版,1996)的编者。



Foreword

The semiconductor and communication industries continue to impose increasingly greater demands on the performance of analog integrated circuits. Over the past few years, CMOS technology has demonstrated capabilities in the range of tens of gigahertz, gradually abolishing the view that “CMOS devices are slow and noisy.” The importance of analog CMOS design has reached such a level that even CAD companies and foundries have begun to develop analog circuits for their customers.

These developments have also been reflected in many Asian countries, creating a number of Silicon Valleys (or, more specifically, “CMOS Valleys”) in the Eastern hemisphere. It is therefore my great pleasure to see that Professor Guican Chen has undertaken the task of translating my book to Chinese. Considering the tremendous semiconductor force in Asia, I believe the translation will allow many generations of students and practicing engineers to learn analog CMOS design clearly and efficiently.

I wish to thank Professor Chen and his colleagues for their dedication and hard work. I am certain that the readers will gratefully appreciate the availability of this translation.

Behzad Razavi

October 2002

中文版前言

半导体和通信工业不断地对模拟集成电路的性能提出越来越高的要求。在过去几年中,CMOS 技术已显示了在几十吉赫兹频率范围工作的能力,逐渐地打破了关于“CMOS 器件是低速度和高噪声”的观念。模拟 CMOS 设计的重要性已经达到了这样的程度,甚至连 CAD 公司和晶圆代工厂也开始为其客户研制模拟电路了。

这些发展也在许多亚洲国家中得到了体现,在东半球建立了大量的“硅谷”(或更确切地说“CMOS 谷”)。我很高兴地看到,陈贵灿教授已经承担了把我的书译成中文的任务。鉴于亚洲半导体的雄厚实力,我相信,本书的中译本将使许多代学生和工程师们更清楚、更有效地学习模拟集成电路设计。

对陈教授和他的同事们的艰辛工作,谨表谢意。我确信,读者对本书忠实、畅达的译文一定会倍感欣慰。

毕查德·拉扎维
2002 年 10 月

译者序

集成电路已发展到系统级芯片(SOC)的阶段。随着 CMOS 工艺的进步,由于 CMOS 电路的低成本、低功耗以及速度的不断提高,由于 CMOS 模拟电路设计技术的不断进步,CMOS 技术已被证明是实现 SOC 的最好选择。模拟电路是 SOC 中不可缺少的部分。由于器件尺寸不断缩小和低电源电压、低功耗等要求,模拟 CMOS 集成电路设计在不断地发展,在 SOC 中变得越来越重要。

本书是加州大学洛杉矶分校(UCLA)的新教材。该书组织严谨,内容丰富,循序渐进。在阐述原理和概念时,由浅入深,逐步分析。模拟电路设计需要直观、严密和创新。在阐述各种模拟电路的改进和新电路结构的产生时,着重观察和分析,不断地提出问题和解决问题,重视这三方面能力的培养。

本书由陈贵灿组织翻译和审校。参加本书翻译工作的有:陈贵灿、程军、张瑞智、李恩铃、潘锐、张凌云、杨抗、宁勃、宋红花、王金富、郝大明、刘勖。王法翔和李宁参与了部分整理工作。在本书的翻译工作中,周光父教授给予了许多帮助,西安交通大学出版社赵丽平编审和白居宪编审在组织出版和编辑工作中给以了很大的支持,对他们表示衷心的感谢。

原书作者在本书的翻译过程中给予了支持和帮助,并专门为中译本写了前言。在此对拉扎维教授表示衷心的感谢。

译者于
西安交通大学微电子研究所
2002年10月

序

在过去的 20 年间,CMOS 技术已经迅速地采用了模拟集成电路,因而提供了低成本、高性能的 CMOS 产品,这些产品已一跃而主宰了市场。尽管硅的双极器件和 III-V 族化合物器件仍然找到了适合它们的应用范围,但对于今天的复杂的混合信号系统,CMOS 技术已经表现出是最好的选择。如果沟道长度能缩小到 $0.03\mu\text{m}$,那么对于电路设计,CMOS 技术也许还有 20 年的工作寿命。

模拟电路设计本身也在技术上得到了发展。包含几十个晶体管、处理小的连续时间信号的高电压、大功耗的模拟电路,已经逐渐被低电压、低功耗的系统替代,而这些系统由几千个器件组成,且能处理大的、多数是离散时间的信号。例如,10 年前采用的许多模拟技术,由于不能在低电压下工作已经被淘汰。

本书讨论模拟 CMOS 集成电路的分析与设计,既着重基本原理,也着重于学生和工程师需要掌握的现代工业中新的范例,由于模拟(电路)设计既需要直觉又要求严密,每个概念首先从直观开始引入,然后逐步地进行仔细分析。其目的是,既要建立坚实的基础,又要通过观察来逐步掌握分析电路的方法,使读者学习到:在哪些电路中,能使用的什么样的近似方法;在每种近似方法中有多大的预期误差。这种方法也可使读者毫不费力地把这些概念运用到双极电路中。

在 ULCA 和工业界的教学中,我已讲授了本书的大部分内容,并在每次讲授中,对讲授的顺序、形式和内容均进行了加工整理。读者在全书中将可以看到,我在写书(以及授课)中遵循四条“金科玉律”:(1) 我要说明:读者为什么要懂得所学习的概念;(2) 设身处处地为读者设想,他们第一次读到这些内容时,可能会遇到什么问题;(3) 考虑到第二条规则,设想自己与初学者处于同一认识水平,并与他们一起,逐步由浅入深地分析、“增长”知识,因而在学习过程中与他们有同样的体验;(4) 以通俗(甚至是不精确的)的语言从“粗糙”的概念开始,然后逐渐增加必要的修改,得到最终的(精确的)概念。最后一条规则在讲授电路中特别重要,因为它能使读者观察到一种电路结构的改进,因而既可学习分析,又可学习综合。

本书包含 18 章,其内容和顺序经过认真选择和安排,衔接自然,适于自学和短学期(季度)或长学期(半年)的课堂教学。与一些其它的模拟设计的

书不同,本书在开始时仅包括了起码的最少量的 MOS 器件物理,而更多的高阶特性和制造细节留到了后面的各章。对专家而言,这简单的器件物理处理也许显得过于简单,但我的经验表明以下三点:(1) 初学者在学习电路之前,难以吸收器件的高阶效应和制造技术的内容,因为他们不会注意电路与这些内容之间的关联;(2) 如果适当地对它们作一点介绍,即使是简单处理也被证明是适用于大范围的基本电路;(3) 读者在学习了大量的电路分析和设计之后,再学习高阶现象和工艺步骤会容易得多。

第 1 章向读者介绍学习本书的意义。

第 2 章阐述 MOS 器件的基本物理原理和工作原理。

第 3 章至第 5 章分别讨论单级和差动级放大器以及电流镜。通过观察对基本电路性能的量化建立有效的分析工具。

第 6,7 章介绍电路的二个非理想性,即频率响应和噪声。噪声在输入的第一级就进行处理,使读者在考虑噪声在后续级的影响时,“容易理解”。

第 8 章至第 10 章分别阐述反馈、运放和反馈系统中的稳定性。利用所分析的反馈的有益特性,读者可以设计出高性能、稳定的运放,并学会在速度、精度和功耗之间进行折衷考虑。

第 11 章至第 13 章讨论更高级的课题:带隙基准、初级开关电容电路以及非线性和失配的影响。这里研究这三个课题,是因为在现代的大多数模拟系统和混合信号系统中,它们被证明是基本的内容。

第 14 章和第 15 章集中研究振荡器和锁相环的设计。由于这些电路的广泛应用,这里提供了关于它们性能的详细研究和它们的工作原理的许多实例。

第 16 章涉及 MOS 器件的高阶效应及其模型,侧重有关电路设计的结论。如果读者愿意,也可以在第 2 章之后直接学习这一章。第 17 章阐述 CMOS 制造工艺并对版图设计规则进行了简述。

第 18 章介绍模拟电路和混合信号电路的版图和封装。阐述了许多直接影响电路性能的实际问题,介绍了许多解决这些问题的不同的技术。

本书的读者,应具备电路和器件的基础知识,例如,pn 结、小信号工作的概念、等效电路和简单的偏置。对于高年级的选修课程,在短学期中可讲授第 1 章至第 8 章;在长学期中可讲授第 1 章至第 10 章。对于一年级的研究生课程,一季度可讲授第 1 章至第 11 章,外加第 12 章至第 15 章中的一章;半年可讲授前 16 章。

每章后面的习题用来扩展读者对内容的理解以及以附加的实际问题对内容进行补充。

毕查德·拉扎维

2000 年 7 月

采用该书作教材的教师可向 McGraw-Hill 公司北京代表处联系索取教学课件资料
传真:(010)6263 8354 电子邮件:webmaster@mcgraw-hill.com.cn

致 谢

写书伊始的心情是非常兴奋的。然而经历了两年不懈的写作、绘图和修改之后,当全书超过 600 页,并且几乎不可能使书的最后一章和第一章的公式、下标、上标达到一致时,作者本人开始感到近乎有些疯狂,因此认识到,若没有众多其他人士的支持,此书将永远无法完成。

此书得益于许多人的帮助。UCLA 的许多同学逐字逐句地阅读了手稿和试用版。特别是 Alireza Zolfaghari, Ellie Cijvat, 以及 Hamid Rafati 仔细地阅读了此书并发现了许多错误(有些错误是难以捉摸的)。并且, Emad Hegazi, Dawei Guo, Alireza Razzaghi, Jafar Savoj, Jing Tian 对许多章节提出了有益的建议。我向他们表示感谢。

学术界和工业界的很多专家阅读了此书的诸多章节,提出了宝贵的反馈意见。这其中包括 Brian Brandt(国家半导体公司), Matt Corey(国家半导体公司), Terri Fiez(俄勒冈州大学), Ian Galton(加州大学, 圣地哥), Ali Hajimiri(加利福尼亚理工学院), Stacy Ho(模拟器件公司), Yin Hu(德州仪器公司), Shen - Iuan Liu(台湾大学), Joe Lutsky(国家半导体公司), Amit Mehrotra(伊利诺斯州大学, Urbana - Champaign), David Robertson(模拟器件公司), David Su(T-Span 公司), Tao Sun(国家半导体公司), Robert Taft(国家半导体公司), Masoud Zargari(T-Span 公司)。Jason Woo(UCLA)耐心地回答了我关于器件物理方面的问题。向他们表示诚挚的谢意。

Ramesh Harjani(明尼苏达州大学), John Nyenhius(普度大学), Norman Tien(康奈尔大学)和 Mahmoud Wagdy(加利福尼亚州立大学, 长滩市)审阅了本书的提案并提出了许多宝贵意见。向他们谨表谢意。

我的夫人 Angelina, 从各章的键入到发现为数众多的错误, 再到提出问题使我再次审视自己的理解, 都为此书做出了很大的贡献。我很感激她。

本书能够及时出版离不开 McGraw - Hill 全体人员的辛勤工作, 尤其是 Catherine Fields, Michelle Flomenhoft, Heather Burbridge, Denise Santor - Mitzit 以及 Jim Labeots。在此向他们表示感谢。

我是向两位大师学习模拟设计的: Mehrdad Sharif - Bakhtiar(沙里夫理工大学)以及 Bruce Wooley(斯坦福大学), 向他们谨表谢意。我从他们那里所继承的将会使多代学子受益匪浅。

毕查德·拉扎维
2000 年 7 月

目 录

作者简介

中文版前言

译者序

序

致谢

第 1 章 模拟电路设计绪论

- 1.1 研究模拟电路的重要性 (1)
- 1.2 研究模拟集成电路的重要性 (5)
- 1.3 研究 CMOS 模拟集成电路的重要性 (5)
- 1.4 本书的特点 (6)
- 1.5 电路设计的一般概念 (6)
 - 1.5.1 抽象级别 (6)
 - 1.5.2 鲁棒模拟电路设计 (7)
 - 1.5.3 符号 (7)

第 2 章 MOS 器件物理基础

- 2.1 基本概念 (9)
 - 2.1.1 MOSFET 开关 (9)
 - 2.1.2 MOSFET 的结构 (9)
 - 2.1.3 MOS 符号 (11)
- 2.2 MOS 的 I/V 特性 (11)
 - 2.2.1 阈值电压 (12)
 - 2.2.2 I/V 特性的推导 (13)
- 2.3 二级效应 (20)
- 2.4 MOS 器件模型 (24)
 - 2.4.1 MOS 器件版图 (24)
 - 2.4.2 MOS 器件电容 (25)
 - 2.4.3 MOS 小信号模型 (28)
 - 2.4.4 MOS SPICE 模型 (31)
 - 2.4.5 NMOS 与 PMOS 器件的比较 (32)
 - 2.4.6 长沟道器件与短沟道器件的比较 (33)

附录 A: 用作电容器的 MOS 器件的特性	(33)
习题	(34)
第 3 章 单级放大器	
3.1 基本概念	(40)
3.2 共源级	(41)
3.2.1 采用电阻负载的共源级	(41)
3.2.2 采用二极管连接的负载的共源级	(45)
3.2.3 采用电流源负载的共源级	(49)
3.2.4 工作在线性区的 MOS 为负载的共源级	(50)
3.2.5 带源极负反馈的共源级	(50)
3.3 源跟随器	(57)
3.4 共栅级	(64)
3.5 共源共栅级	(70)
3.5.1 折叠式共源共栅	(75)
3.6 器件模型的选择	(77)
习题	(78)
第 4 章 差动放大器	
4.1 单端与差动的工作方式	(84)
4.2 基本差动对	(86)
4.2.1 定性分析	(87)
4.2.2 定量分析	(90)
4.3 共模响应	(98)
4.4 MOS 为负载的差动对	(103)
4.5 吉尔伯特单元	(105)
习题	(108)
第 5 章 无源与有源电流镜	
5.1 基本电流镜	(113)
5.2 共源共栅电流镜	(116)
5.3 有源电流镜	(121)
5.3.1 大信号分析	(124)
5.3.2 小信号分析	(125)
5.3.3 共模特性	(128)
习题	(131)
第 6 章 放大器的频率特性	
6.1 概述	(138)

6.1.1	密勒效应	(138)
6.1.2	极点与结点的关联	(141)
6.2	共源极	(143)
6.3	源跟随器	(147)
6.4	共栅级	(151)
6.5	共源共栅级	(153)
6.6	差动对	(155)
附录 A:	密勒定理的对偶	(159)
习题	(161)
第 7 章	噪声	
7.1	噪声的统计特性	(165)
7.1.1	噪声谱	(167)
7.1.2	幅值分布	(170)
7.1.3	相关噪声源和非相关噪声源	(171)
7.2	噪声类型	(172)
7.2.1	热噪声	(172)
7.2.2	闪烁噪声	(176)
7.3	电路中的噪声表示	(179)
7.4	单级放大器中的噪声	(184)
7.4.1	共源级	(185)
7.4.2	共栅级	(187)
7.4.3	源跟随器	(190)
7.4.4	共源共栅级	(191)
7.5	差动对中的噪声	(192)
7.6	噪声带宽	(196)
习题	(197)
第 8 章	反馈	
8.1	概述	(202)
8.1.1	反馈电路的特性	(203)
8.1.2	放大器的种类	(208)
8.1.3	检测和返回机制	(210)
8.2	反馈结构	(212)
8.2.1	电压-电压反馈	(212)
8.2.2	电流-电压反馈	(216)
8.2.3	电压-电流反馈	(218)
8.2.4	电流-电流反馈	(221)
8.3	负载的影响	(221)

8.3.1 二端口网络模型	(221)
8.3.2 电压-电压反馈中的负载	(223)
8.3.3 电流-电压反馈中的负载	(226)
8.3.4 电压-电流反馈中的负载	(228)
8.3.5 电流-电流反馈中的负载	(230)
8.3.6 负载影响小结	(232)
8.4 反馈对噪声的影响	(233)
习题	(234)

第9章 运算放大器

9.1 概述	(239)
9.1.1 性能参数	(240)
9.2 一级运放	(243)
9.3 两级运放	(252)
9.4 增益的提高	(254)
9.5 性能比较	(257)
9.6 共模反馈	(258)
9.7 输入范围限制	(266)
9.8 转换速率	(268)
9.9 电源抑制	(275)
9.10 运放的噪声	(276)
习题	(279)

第10章 稳定性与频率补偿

10.1 概述	(284)
10.2 多极点系统	(287)
10.3 相位裕度	(289)
10.4 频率补偿	(292)
10.5 两级运放的补偿	(297)
10.5.1 两级运放中的转换	(301)
10.6 其它补偿技术	(302)
习题	(306)

第11章 带隙基准

11.1 概述	(309)
11.2 与电源无关的偏置	(310)
11.3 与温度无关的基准	(312)
11.3.1 负温度系数电压	(313)
11.3.2 正温度系数电压	(314)

11.3.3 带隙基准	(314)
11.4 PTAT 电流的产生	(319)
11.5 恒定 G_m 偏置	(320)
11.6 速度与噪声问题	(321)
11.7 实例分析	(324)
习题	(327)

第 12 章 开关电容电路

12.1 概述	(330)
12.2 采样开关	(334)
12.2.1 MOSFETs 开关	(334)
12.2.2 速度问题	(338)
12.2.3 精度问题	(341)
12.2.4 电荷注入抵消	(343)
12.3 开关电容放大器	(345)
12.3.1 单位增益采样器/缓冲器	(345)
12.3.2 同相放大器	(351)
12.3.3 精确乘 2 电路	(356)
12.4 开关电容积分器	(357)
12.5 开关电容共模反馈	(359)
习题	(360)

第 13 章 非线性与不匹配

13.1 非线性	(364)
13.1.1 概述	(364)
13.1.2 差动电路的非线性	(367)
13.1.3 负反馈对非线性的影响	(369)
13.1.4 电容器的非线性	(371)
13.1.5 线性化技术	(372)
13.2 不匹配	(376)
13.2.1 失调消除技术	(382)
13.2.2 用失调消除来降低噪声	(386)
13.2.3 CMRR 的另一种定义	(388)
习题	(389)

第 14 章 振荡器

14.1 概述	(391)
14.2 环形振荡器	(393)
14.3 LC 振荡器	(402)

14.3.1	交叉耦合振荡器	(404)
14.3.2	科尔皮兹振荡器	(406)
14.3.3	单端口振荡器	(409)
14.4	压控振荡器	(413)
14.4.1	环形振荡器调节	(415)
14.4.2	LC 振荡器的调节	(423)
14.5	VCO 的数学模型	(426)
	习题	(430)

第 15 章 锁相环

15.1	简单的锁相环	(432)
15.1.1	鉴相器	(432)
15.1.2	基本的 PLL 结构	(434)
15.1.3	简单锁相环的动态特性	(441)
15.2	电荷泵锁相环	(447)
15.2.1	锁定捕获的问题	(447)
15.2.2	鉴相/鉴频器和电荷泵	(448)
15.2.3	基本的电荷泵锁相环	(452)
15.3	锁相环中的非理想效应	(458)
15.3.1	PFD/CP 的非理想性	(458)
15.3.2	锁相环中的抖动现象	(462)
15.4	延迟锁相环	(464)
15.5	应用	(466)
15.5.1	频率倍增和合成	(467)
15.5.2	歪斜的减小	(469)
15.5.3	抖动的减小	(470)
	习题	(470)

第 16 章 短沟道效应与器件模型

16.1	按比例缩小理论	(473)
16.2	短沟道效应	(477)
16.2.1	阈值电压的变化	(477)
16.2.2	垂直电场引起的迁移率退化	(479)
16.2.3	速度饱和	(479)
16.2.4	热载流子效应	(481)
16.2.5	漏-源电压引起的输出阻抗的变化	(481)
16.3	MOS 器件模型	(483)
16.3.1	Level 1 模型	(483)
16.3.2	Level 2 模型	(484)