

教育部高等教育司推荐

国外优秀信息科学与技术系列教学用书

模拟集成电路 的分析与设计

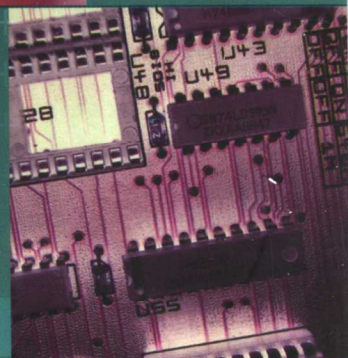
第4版

翻译版

ANALYSIS AND DESIGN OF ANALOG INTEGRATED CIRCUITS

Fourth Edition

美] • PAUL R. GRAY
• PAUL J. HURST
• STEPHEN H. LEWIS
• ROBERT G. MEYER 著
张晓林 等译



高等教育出版社
Higher Education Press



教育部高等教育司推荐

国外优秀信息科学与技术系列教学用书

模拟集成电路 的分析与设计

第4版 翻译版

ANALYSIS AND DESIGN OF ANALOG
INTEGRATED CIRCUITS

Fourth Edition

- [美] • **PAUL R. GRAY**
University of California, Berkeley
- **PAUL J. HURST**
University of California, Davis
- **STEPHEN H. LEWIS**
University of California, Davis
- **ROBERT G. MEYER**
University of California, Berkeley 著
张晓林 等译



WILEY



高等教育出版社

Higher Education Press

图字:01-2003-5105号

Analysis and Design of Analog Integrated Circuits, 4th ed.

Paul R. Gray, Paul J. Hurst, Stephen H. Lewis and Robert G. Meyer.

Copyright 2001©John Wiley & Sons, Inc. All rights reserved.

AUTHORIZED TRANSLATION OF THE EDITON PUBLISHED BY JOHN WILEY & SONS, New York, Chichester, Brisbane, Singapore AND Toronto. No part of this book may be reproduced in any form without the written permission of John Wiley & Sons, Inc.

内容简介

本书介绍模拟集成电路的分析与设计。全面阐述了模拟集成电路的基本原理和概念,同时还阐述了模拟集成电路的新技术和新发展。全书共十二章。前七章介绍了集成电路放大器件模型,双极型、MOS和BiCMOS集成电路技术,单级放大器与多级放大器,镜像电流源、有源负载和基准源,输出级,单端输出的运算放大器以及集成电路的频率响应,第八、九章介绍了反馈,反馈放大器的频率响应和稳定性。第十章至十二章介绍了非线性模拟电路,集成电路的噪声和全差分运算放大器。

本书是现代模拟集成电路分析与设计的教材或参考书。既可以作为研究生或高年级本科生的教科书,也可作为应用工程的参考书,同时又是一本比较全面、系统的模拟集成电路方面的专著。

图书在版编目(CIP)数据

模拟集成电路的分析与设计:第4版/(美)格雷
(Gray, P. R.)等著;张晓林等译. —北京:高等教育出版社,2005.6

书名原文:Analysis and Design of Analog Integrated Circuits

ISBN 7-04-016600-3

I. 模... II. ①格... ②张... III. ①模拟集成电路
—电路分析—高等学校—教材②模拟集成电路—电路设计—高等学校—教材 IV. TN431.1

中国版本图书馆CIP数据核字(2005)第022805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 010-58581000

经 销 北京蓝色畅想图书发行有限公司
印 刷 北京民族印刷厂

购书热线 010-58581118
免费咨询 800-810-0598
网 址 <http://www.hep.edu.cn>
<http://www.hep.com.cn>
网上订购 <http://www.landaco.com>
<http://www.landaco.com.cn>

开 本 787×1092 1/16
印 张 52.5
字 数 1 200 000

版 次 2005年6月第1版
印 次 2005年6月第1次印刷
定 价 65.00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

物料号 16600-00

序

20 世纪末,以计算机和通信技术为代表的信息科学和技术对世界经济、科技、军事、教育和文化等产生了深刻影响。信息科学技术的迅速普及和应用,带动了世界范围信息产业的蓬勃发展,为许多国家带来了丰厚的回报。

进入 21 世纪,尤其随着我国加入 WTO,信息产业的国际竞争将更加激烈。我国信息产业虽然在 20 世纪末取得了迅猛发展,但与发达国家相比,甚至与印度、爱尔兰等国家相比,还有很大差距。国家信息化的发展速度和信息产业的国际竞争能力,最终都将取决于信息科学技术人才的质量和数量。引进国外信息科学和技术优秀教材,在有条件的学校推动开展英语授课或双语教学,是教育部为加快培养大批高质量的信息技术人才采取的一项重要举措。

为此,教育部要求由高等教育出版社首先开展信息科学和技术教材的引进试点工作。同时提出了两点要求,一是要高水平,二是要低价格。在高等教育出版社和信息科学技术引进教材专家组的努力下,经过比较短的时间,第一批引进的 20 多种教材已经陆续出版。这套教材出版后受到了广泛的好评,其中有不少是世界信息科学技术领域著名专家、教授的经典之作和反映信息科学技术最新进展的优秀作品,代表了目前世界信息科学技术教育的一流水平,而且价格也是最优惠的,与国内同类自编教材相当。

这项教材引进工作是在教育部高等教育司和高教社的共同组织下,由国内信息科学技术领域的专家、教授广泛参与,在对大量国外教材进行多次遴选的基础上,参考了国内和国外著名大学相关专业的课程设置进行系统引进的。其中,John Wiley 公司出版的贝尔实验室信息科学研究中心副总裁 Silberschatz 教授的经典著作《操作系统概念》,是我们经过反复谈判,做了很多努力才得以引进的。William Stallings 先生曾编写了在美国深受欢迎的信息科学技术系列教材,其中有多种教材获得过美国教材和学术作者协会颁发的计算机科学与工程教材奖,这批引进教材中就有他的两本著作。留美中国学者 Jiawei Han 先生的《数据挖掘》是该领域中具有里程碑意义的著作。由达特茅斯学院的 Thomas Cormen 和麻省理工学院、哥伦比亚大学几位学者共同编著的经典著作《算法导论》,在经历了 11 年的锤炼之后于 2001 年出版了第二版。目前任教于美国 Massachusetts 大学的 James Kurose 教授,曾在美国三所高校先后 10 次获得杰出教师或杰出教学奖,由他主编的《计算机网络》出版后,以其体系新颖、内容先进而备受欢迎。在努力降低引进教材售价方面,高等教育出版社做了大量和细致的工作。这套引进的教材体现了权威性、系统性、先进性和经济性等特点。

教育部也希望国内和国外的出版商积极参与此项工作,共同促进中国信息技术教育和信息产业的发展。我们在与外商的谈判工作中,不仅要坚定不移地引进国外最优

秀的教材,而且还要千方百计地将版权转让费降下来,要让引进教材的价格与国内自编教材相当,让广大教师和学生负担得起。中国的教育市场巨大,外国出版公司和国内出版社要通过扩大发行数量取得效益。

在引进教材的同时,我们还应做好消化吸收,注意学习国外先进的教学思想和教学方法,提高自编教材的水平,使我们的教学和教材在内容体系上,在理论与实践的结合上,在培养学生的动手能力上能有较大的突破和创新。

目前,教育部正在全国 35 所高校推动示范性软件学院的建设和实施,这也是加快培养信息科学技术人才的重要举措之一。示范性软件学院要立足于培养具有国际竞争力的实用性软件人才,与国外知名高校或著名企业合作办学,以国内外著名 IT 企业为实践教学基地,聘请国内外知名教授和软件专家授课,还要率先使用引进教材开展教学。

我们希望通过这些举措,能在较短的时间,为我国培养一大批高质量的信息技术人才,提高我国软件人才的国际竞争力,促进我国信息产业的快速发展,加快推动国家信息化进程,进而带动整个国民经济的跨越式发展。

教育部高等教育司

二〇〇二年三月

To Liz , Barbara , Robin , and Judy

译 者 序

21世纪将是信息时代,而信息技术是国民经济的核心技术,它服务于国民经济各个领域,以通信和集成电路为基础的信息产业已成为国民经济最重要的先导和支柱产业,近年来我国通信与信息产业的迅猛发展,直接带动了集成电路市场的大幅度增长,给全球信息产业注入了新的活力。

本书自第1版面世至今已23年,先后出版了4版,在第4版中,原作者 Paul Gray 和 Robert Meyer 联合了两位新的作者 Paul Hurst 和 Stephen Lewis,增加了模拟集成电路分析与设计中的新的概念和技术,即在第三至七章重点论述的 CMOS 电路、全差分放大器、共模反馈电路以及二端口反馈电路的反馈比分析方法,新的内容还包括对二级 MOS 运算放大器、单级运算放大器和嵌套式密勒补偿的理解。全书从基本理论、关键技术、实用工程的角度,全面介绍了模拟集成电路的新应用,是作者多年教学和科研工作的总结。书中内容丰富新颖,各章都有相当数量的习题,并引入 SPICE 技术作为工具,对复杂的电路进行分析,是模拟集成电路设计领域的一本好教材。在教学中,我们把该书的英文版作为教学参考书,收到了良好的效果。

本书广泛、系统地介绍了模拟集成电路的基础知识和基本理论,深入浅出,概念清晰,因此本书既可以作为研究生或高年级本科生的教科书,也可作为工程技术人员的参考书,同时又是一本比较全面、系统的模拟集成电路方面的专著。

本书由张晓林教授翻译并统稿,由赵琦博士审校,参加本书翻译和审校工作的还有郑惠荣、王哲、赵岭、魏晨曦、孙凯、段少婷、路程、李蕾、高晓曦、徐广毅、房林堂、肖海凤、陈质冉等。在此,对所有为本书的出版提供帮助的人们表示诚挚的谢意!

由于译者水平有限,加之时间仓促,译文中难免有不妥之处,敬请读者批评指正。

译 者

2004年10月

于北京航空航天大学电子信息工程学院

前 言

自本书第1版面世以来的23年里,模拟集成电路领域已有了一定的发展并成熟起来。在最初的双极型技术基础上,MOS模拟集成电路紧接着飞速发展起来,进而BiCMOS技术(在电路板上同时集成了双极型和CMOS器件)也作为传统技术的有力竞争对手脱颖而出。一个关键问题是CMOS技术已经在数字电路设计方面占有主导地位,因为功能相同的CMOS数字电路比双极型数字电路占用的空间更少,功率损耗也更低。为了降低系统成本,减少功率损耗,如今常把模拟电路和数字电路集成到一起,这对于CMOS兼容型模拟电路的使用形成了强有力的经济诱因。结果,在很多的实际应用中产生了一个重要的问题,就是“是使用纯粹的CMOS?还是使用BiCMOS技术?”尽管制作成本稍贵一些,BiCMOS允许设计者同时使用双极型和MOS器件以尽可能地发挥它们的优势,还允许创新性地结合两种器件的特性。另外,在实现某种特定的模拟电路功能时,BiCMOS技术还可以通过直接运用许多已有的单元电路来减少设计时间。另一方面,纯粹CMOS的主要优点是总成本最低。20年前,CMOS技术的速度还只能满足音频方面应用的需要。然而,集成电路(IC)最小形体尺寸的不断缩减极大地提高了最高工作频率,结果CMOS技术的速度也变得足以满足许多新应用的需要。举例而言,视频方面的应用需要大约4MHz的带宽,15年前的双极型技术才刚刚能够满足要求,然而现在CMOS却可以轻松地提供视频所需的带宽,甚至还可以应用于射频。

在第4版中,以合为一体的方式综合考虑了MOS电路、双极型电路和以BiCMOS技术实现的MOS双极型结合电路。发行该版本是为了使教师更容易地选择与之有关的不同主题,例如,只关于CMOS电路的,只关于双极型电路的或两者兼有的。相信对于模拟电路设计者来说,具有对MOS和双极型器件的相似点和不同点的透彻理解,以及能够在合适的地方对其中的任何一种进行设计,这一点变得越来越重要了。

鉴于如今所有电子工程专业的学生和专业人士都能够很容易地接触到SPICE计算机分析程序,本书的该版本广泛应用了SPICE,并以此作为许多习题的主要部分。我们之所以使用计算机分析,是因为在工程设计过程中它既可以作为人工计算的一个更精确的验证,也可以作为工具来分析超出人工计算能力的复杂电路特性。在习题集中还包括了大量未下结论的开放性设计习题,读者可以由此了解到在实际情况下为达到一定的性能指标,怎样寻求一整套电路设计解决方案。

本书既可作为学生教材,也可作为工程师的参考书。为满足课堂需要,每章都包含了许多例题;每章末尾的习题集都是将教材中的内容进行实际应用的示例。所有作者都在IC设计方面具有丰富的行业经验和该学科的教学经验,这些经验反映在教学材料的选取和习题的设置当中。

虽然该书的内容主要是关于 IC 的分析与设计,但也有相当多的内容涉及到应用。在实践中,这两部分是紧密联系的,对 IC 的设计者和使用者来说,具备这两方面的知识是很重要的。到目前为止,后者为数较多,而且对于 IC 使用者来说,掌握 IC 设计的应用知识占很大优势。当使用者需要从大量的竞争性的设计方案中进行取舍来满足特定需求时,这个优势就会显著地表现出来。对 IC 结构的理解有助于在极端条件下或是供电电压变化时对不同设计方案的相对需求进行评价。此外,如果 IC 使用者具有集成电路内部工作的应用知识,将更有利于理解器件制造商的技术数据。

本书内容主要来源于加利福尼亚大学 Berkeley 和 Davis 分校开设的模拟集成电路课程,该课程主要作为研一学生课程及本科生的选修课。此书的结构安排适于作为后续课程的基础教材。在每章最后或是附录中会有一些内容较深的材料,当本书用于模拟集成电路的基础课程时可以省略这部分内容而不失连贯性。下面给出了各章大纲及用于基础课程时内容选取的参考意见。默认为一学期 15 周,每周 3 课时,且学生具有拉普拉斯变换和电路频域分析的应用知识。同时,学生应当已经学习了电子学的入门课程,从而能够熟悉晶体管工作原理及简单模拟电路功能。如未另作说明,每章学习需要 3~4 学时。

第一章是对双极型晶体管和 MOS 晶体管物理结构的概述,建议对本章内容用一星期时间来进行有选择性的学习,内容的选取由学生的知识背景而定。第一章和第二章的材料在 IC 设计中很重要,因为在电路设计和器件设计之间有着很重要的相互联系,这一点读者将在接下来的章节中看到。因此,对器件构造及特性的深入理解十分重要。

第二章以大量描述性的语言阐述了 IC 构造技术。如果要求学生课下阅读本章内容,讲授安排一学时即可。

第三章解决基本晶体管的连接特性。单级放大电路的内容是高年级及研究生的复习材料,可安排课下阅读。二级放大电路需要 3 学时,主要强调差分组态。如果时间允许,可以将差放的不匹配效应纳入其中。

在第四章里,讲述了有关镜像电流源及有源负载的重要问题。它们是当今模拟集成电路设计的基本单元电路,除了带隙基准源及附录内容以外,需要全部掌握。

第五章讨论输出级和将输出功率传递到负载的方法。涵盖了实现甲类、乙类和甲乙类输出级集成电路及输出级保护的方法。本章内容可以有选择性地进行学习。

第六章是运算放大器(运放)的设计。用几个实例来详细描述了 MOS 运放和双极型运放的直流、交流分析及基本运放的局限性。还包括了以 MOS、双极型技术实现的特性改善的运放设计。这一章是放大器设计的重点,至少需要 6 学时。

第七章研究放大器的频率响应。介绍了开路时间常数分析法用于复杂电路中计算 -3 dB 截止频率。本章内容需要全部掌握。

第八章描述了反馈电路的分析。介绍了两种类型的分析方法:二端口分析和反馈比分析。要求全面掌握这两种方法。本章的稳压器部分可作为阅读材料。

第九章的内容是反馈电路的频率响应和稳定性,需要全部掌握根轨迹部分之前的

内容。如果没有足够的时间详细讨论根轨迹,可以进行初步介绍。

在包含 15 周的一个学期里,除了以上内容外,还留有两周左右时间来学习第十章、第十一章和第十二章。对于这几章的内容可以作如下取舍:第十章分析非线性模拟电路,10.3 节之前的内容可以作为初级课程。第十一章分析集成电路的噪声,掌握 11.4 节及之前的内容就足够了。第十二章完整地描述了差分运算放大器和共模反馈,可以作为提高课程。

感谢以下同仁提出的建议和/或对此版本的想法:R. Jacob Baker, Bernhard E. Boser, A. Paul Brokaw, John N. Churchill, David W. Cline, Ozan E. Erdoğan, John W. Fattarusso, Weinan Gao, Edwin W. Greeneich, Alex Gros-Balthazard, Tünde Gyurics, Ward J. Helms, Timothy H. Hu, Shafiq M. Jamal, John P. Keane, Haideh Khorramabadi, Pak-Kim Lau, Thomas W. Matthews, Krishnaswamy Nagaraj, Khalil Najafi, Borivoje Nikolić, Robert A. Pease, Lawrence T. Pileggi, Edgar Sánchez-Sinencio, Bang-Sup Song, Richard R. Spencer, Eric J. Swanson, Andrew Y. J. Szeto, Yannis P. Tsividis, Srikanth Vaidianathan, T. R. Viswanathan, ChorongKuang Wang 和 Dong Wang. 同时也要感谢 Kenneth C. Dyer 同意将他设计的集成电路印制成照片,并作为本书的封面,感谢 Zoe Marlowe 进行文字处理工作。最后,还要感谢 Wiley 和 Publication Services 的成员在第 4 版发行过程中所做的工作。

本书的材料很大程度上受到了 Donald O. Pederson 影响,感谢他所作出的贡献。

加利福尼亚大学 Berkeley 和 Davis 分校, 2001

Paul R. Gray

Paul J. Hurst

Stephen H. Lewis

Robert G. Meyer

符号说明

如未另作说明,本书使用如下符号表示。偏置或直流量为大写字母和大写下标,如晶体管集电极电流 I_C 和集电极-发射极电压 V_{CE} 。小信号量为小写字母和小写下标,如晶体管集电极电流增量 i_c ,小信号等效电路的参数如跨导 g_m 也同样表示。最后,要体现偏置量和小信号量的总和,如集电极总电流 I_c ,为大写字母和小写下标。

郑重声明

高等教育出版社依法对本书享有专有出版权。任何未经许可的复制、销售行为均违反《中华人民共和国著作权法》，其行为人将承担相应的民事责任和行政责任，构成犯罪的，将被依法追究刑事责任。为了维护市场秩序，保护读者的合法权益，避免读者误用盗版书造成不良后果，我社将配合行政执法部门和司法机关对违法犯罪的单位和个人给予严厉打击。社会各界人士如发现上述侵权行为，希望及时举报，本社将奖励举报有功人员。

反盗版举报电话：(010) 58581897/58581896/58581879

传 真：(010) 82086060

E - mail：dd@hep.com.cn

通信地址：北京市西城区德外大街4号

高等教育出版社打击盗版办公室

邮 编：100011

购书请拨打电话：(010)58581118

策划编辑	吴陈滨
责任编辑	欧阳舟
封面设计	李卫青
责任绘图	朱 静
版式设计	胡志萍
责任校对	胡晓琪
责任印制	陈伟光

目 录

第一章 集成电路放大器件模型	1
1.1 引言	1
1.2 pn 结的耗尽区	1
1.2.1 势垒电容	4
1.2.2 结击穿	6
1.3 双极型晶体管的大信号特性	7
1.3.1 正向放大区的大信号模型	8
1.3.2 集电极电压对正向放大区大信号特性的影响	13
1.3.3 饱和区和反向放大区	15
1.3.4 晶体管击穿电压	19
1.3.5 工作条件决定晶体管电流增益	22
1.4 双极型晶体管的小信号模型	24
1.4.1 跨导	24
1.4.2 基区寄生电容	26
1.4.3 输入电阻	27
1.4.4 输出电阻	27
1.4.5 双极型晶体管的基本小信号模型	28
1.4.6 集电极-基极电阻	28
1.4.7 小信号模型的寄生单元	29
1.4.8 晶体管频率响应特性	32
1.5 金属氧化物场效晶体管的大信号特性	35
1.5.1 MOS 器件的转移特性	36
1.5.2 双极型晶体管和 MOS 晶体管工作区的比较	42
1.5.3 栅-源电压的分解	44
1.5.4 阈值的温度独立性	44
1.5.5 MOS 器件的电压限制	46
1.6 MOS 晶体管的小信号模型	47
1.6.1 跨导	47
1.6.2 栅-源以及栅-漏固有电容	48
1.6.3 输入电阻	49
1.6.4 输出电阻	49
1.6.5 MOS 晶体管的基本小信号模型	49
1.6.6 衬底跨导	50
1.6.7 小信号模型的寄生单元	51
1.6.8 MOS 晶体管的频率响应	52
1.7 MOS 晶体管的短沟道效应	55
1.7.1 水平场中的速率饱和	56
1.7.2 跨导和特征频率	60
1.7.3 垂直场中的迁移率下降	61
1.8 MOS 晶体管中的弱反型	62
1.8.1 弱反型中的漏极电流	62
1.8.2 弱反型区中的跨导和特征频率	65
1.9 MOS 晶体管中的衬底电流	67
附录	69
A.1.1 有源器件参数列表	69
第二章 双极型、MOS 和 BiCMOS 集成电路技术	74
2.1 引言	74
2.2 集成电路生产的基本过程	74
2.2.1 硅的电阻率	75
2.2.2 固态扩散	76
2.2.3 扩散层的电特性	77
2.2.4 光刻工艺	79
2.2.5 外延生长	80
2.2.6 离子注入	81
2.2.7 局部氧化	82
2.2.8 多晶硅的淀积	83
2.3 高压双极型集成电路的制造	83
2.4 高级双极型集成电路的制造	87
2.5 双极型模拟集成电路中的放大器件	90
2.5.1 npn 型晶体管集成电路	90
2.5.2 pnp 型晶体管集成电路	101
2.6 双极型集成电路中的无源元件	108
2.6.1 扩散电阻	108
2.6.2 外延生长电阻和外延夹断	

电阻	111	3.3.4 共栅组态	175
2.6.3 集成电路电容	112	3.3.5 r_o 有限时的共基与共栅组态	177
2.6.4 齐纳二极管	113	3.3.5.1 共基与共栅组态的输入	
2.6.5 结型二极管	113	电阻	177
2.7 基本双极型工艺的改进	115	3.3.5.2 共基与共栅组态的输出	
2.7.1 电介质隔离法	116	电阻	178
2.7.2 高性能有源器件的兼容		3.3.6 共集组态(射随器)	180
处理	117	3.3.7 共漏组态(源极跟随器)	184
2.7.3 高性能无源元件	118	3.3.8 射极反馈的共射放大器	186
2.8 MOS 集成电路的制造	120	3.3.9 源极反馈的共源放大器	189
2.9 MOS 集成电路中的有源器件	123	3.4 多级放大器	190
2.9.1 n 沟道晶体管	123	3.4.1 共集-共射,共集-共集及	
2.9.2 p 沟道晶体管	133	达林顿组态	191
2.9.3 耗尽型器件	133	3.4.2 串接组态	194
2.9.4 双极型晶体管	134	3.4.2.1 双极型串接组态	194
2.10 MOS 工艺中的无源器件	136	3.4.2.2 MOS 晶体管串接	
2.10.1 电阻	136	组态	196
2.10.2 MOS 工艺中的电容	137	3.4.3 有源串接组态	199
2.10.3 CMOS 技术的门锁	139	3.4.4 超级源极跟随器	201
2.11 BiCMOS 技术	141	3.5 差分对	202
2.12 异质结双极型晶体管	143	3.5.1 共射差分对的直流传输特性	203
2.13 互连延迟	144	3.5.2 射极反馈的直流传输特性	204
2.14 集成电路制造过程的经济意义	145	3.5.3 共源差分对的直流传输特性	205
2.14.1 集成电路制造过程的收益		3.5.4 差分放大器的小信号分析	
因素	145	介绍	208
2.14.2 集成电路制造中的成本核算	148	3.5.5 理想对称的差分放大器的小	
2.15 集成电路的封装因素	150	信号特性	211
2.15.1 最大功耗	150	3.5.6 差分放大器中的不匹配效应	218
2.15.2 集成电路封装中的稳定性		3.5.6.1 输入失调电压和失调	
因素	153	电流	218
附录	153	3.5.6.2 共射差分对的等效输入	
A.2.1 SPICE 模型参数	153	失调电压	219
第三章 单级放大器与多级放大器	161	3.5.6.3 共射差分对的失调电压:	
3.1 模拟电路近似分析中器件模型的选择	162	近似分析	219
3.2 放大器的二端口模型	163	3.5.6.4 共射差分对的失调电压	
3.3 基本单管放大器	165	漂移	221
3.3.1 共射组态	165	3.5.6.5 共射差分对的输入失调	
3.3.2 共源组态	169	电流	221
3.3.3 共基组态	172	3.5.6.6 共源差分对的输入失调	
		电压	222
		3.5.6.7 共源差分对的失调电压:	

近似分析·····	223	4.3.5.3 共模抑制比·····	278
3.5.6.8 共源差分对的失调电压 漂移·····	224	4.4 电压和电流基准源·····	284
3.5.6.9 非对称差分放大器的小 信号特性·····	225	4.4.1 低电流偏置·····	284
附录·····	231	4.4.1.1 双极型 Widlar 电流源·····	284
A.3.1 静态初步和高斯分布·····	231	4.4.1.2 MOS 管 Widlar 电流源·····	286
第四章 镜像电流源、有源负载和 基准源 ·····	240	4.4.1.3 双极型峰值电流源·····	287
4.1 引言·····	240	4.4.1.4 MOS 管峰值电流源·····	288
4.2 镜像电流源·····	240	4.4.2 对电源不敏感的偏置·····	290
4.2.1 一般特性·····	240	4.4.2.1 Widlar 电流源·····	290
4.2.2 简单的镜像电流源·····	241	4.4.2.2 使用其他标准电压的镜像 电流源·····	291
4.2.2.1 双极型晶体管结构·····	241	4.4.2.3 自偏置·····	293
4.2.2.2 MOS 晶体管结构·····	244	4.4.3 对温度不敏感的偏置·····	299
4.2.3 减小 β 影响的 (β helper) 基本镜像电流源·····	246	4.4.3.1 基于双极型技术的带隙 基准源偏置电路·····	301
4.2.3.1 双极型晶体管结构·····	246	4.4.3.2 CMOS 技术的带隙基准源 偏置电路·····	306
4.2.3.2 MOS 晶体管结构·····	248	附录·····	310
4.2.4 改进型基本镜像电流源·····	248	A.4.1 考虑镜像电流源的匹配·····	310
4.2.4.1 双极型晶体管结构·····	248	A.4.1.1 双极型晶体管结构·····	310
4.2.4.2 MOS 晶体管结构·····	249	A.4.1.2 MOS 晶体管结构·····	312
4.2.5 串接镜像电流源·····	249	A.4.2 有源负载差分对的输入失调 电压·····	315
4.2.5.1 双极型晶体管结构·····	249	A.4.2.1 双极型晶体管结构·····	315
4.2.5.2 MOS 晶体管结构·····	252	A.4.2.2 MOS 晶体管结构·····	317
4.2.6 威尔逊镜像电流源·····	258	第五章 输出级 ·····	328
4.2.6.1 双极型晶体管结构·····	258	5.1 引言·····	328
4.2.6.2 MOS 晶体管结构·····	262	5.2 射随器作为输出级·····	328
4.3 有源负载·····	263	5.2.1 射随器的传输特性·····	329
4.3.1 概述·····	263	5.2.2 输出功率和效率·····	330
4.3.2 带有互补输出级的共射/共源 放大器·····	264	5.2.3 射随器的驱动要求·····	337
4.3.3 带有耗尽型负载的共射/共源 放大器·····	267	5.2.4 射随器的小信号特性·····	337
4.3.4 带有二极管连接负载的共射/ 共源放大器·····	269	5.3 源极跟随器作为输出级·····	338
4.3.5 带有镜像电流源负载的 差分对·····	271	5.3.1 源极跟随器的传输特性·····	339
4.3.5.1 大信号分析·····	271	5.3.2 源极跟随器的失真·····	340
4.3.5.2 小信号分析·····	273	5.4 乙类放大器推挽式输出级·····	344
		5.4.1 乙类放大器输出级的转移 特性·····	344
		5.4.2 乙类输出级的功率输出和 效率·····	347

5.4.3 乙类互补式输出级的实际 应用	350	6.3.3 输入失调电压	405
5.4.4 全 npn 乙类输出级	356	6.3.4 共模抑制比	408
5.4.5 准互补输出级	358	6.3.5 共模输入范围	408
5.4.6 过载保护	360	6.3.6 电源抑制比(PSRR)	410
5.5 CMOS 甲乙类输出级	361	6.3.7 过载电压的效应	415
5.5.1 共漏极结构	362	6.3.8 布局的讲解	415
5.5.2 具有误差放大的共源极结构	363	6.4 具有串接放大器的二级 MOS 运算放大器	418
5.5.3 等效电路	370	6.5 MOS 管可伸缩式串接运算 放大器	419
5.5.3.1 共漏共源组合电路	370	6.6 MOS 管折叠串接运算放大器	421
5.5.3.2 具有高摆幅的共漏共源 组合电路	372	6.7 MOS 管有源串接运算放大器	425
5.5.3.3 平行共源结构	372	6.8 双极型运算放大器	428
第六章 单端输出的运算放大器	383	6.8.1 741 运算放大器的直流分析	431
6.1 运算放大器的应用	384	6.8.2 741 运算放大器的小信号 分析	436
6.1.1 反馈的基本概念	384	6.8.3 741 运算放大器的输入失调 电压、输入失调电流和共模 抑制比	444
6.1.2 反相放大器	384	6.9 单片集成运算放大器的设计中 要考虑的问题	445
6.1.3 非反相放大器	386	6.9.1 低温漂运算放大器的设计	447
6.1.4 差分放大器	387	6.9.2 低输入电流运算放大器的 设计	449
6.1.5 非线性的模拟运算	387	第七章 集成电路的频率响应	461
6.1.6 积分器和微分器	388	7.1 引言	461
6.1.7 内部放大器	389	7.2 单级放大器	461
6.1.7.1 开关电容器放大器	389	7.2.1 单级电压放大器和密勒效应	462
6.1.7.2 开关电容器积分器	394	7.2.1.1 双极型差分放大器: 差模增益	466
6.2 从理想运算放大器到实际运算 放大器的偏离	397	7.2.1.2 MOS 差分放大器:差模 增益	469
6.2.1 输入偏置电流	397	7.2.2 差分放大器共模增益的频率 响应	472
6.2.2 输入失调电流	397	7.2.3 电压缓冲的频率响应	474
6.2.3 输入失调电压	398	7.2.3.1 射随器的频率响应	476
6.2.4 共模输入范围	398	7.2.3.2 源级跟随器的频率响应	481
6.2.5 共模抑制比(CMRR)	398	7.2.4 电流缓冲器的频率响应	483
6.2.6 电源抑制比(PSRR)	399	7.2.4.1 共基放大器的频率响应	486
6.2.7 输入电阻	400	7.2.4.2 共栅放大器的频率响应	487
6.2.8 输出电阻	401		
6.2.9 频率响应	401		
6.2.10 运算放大器的等效电路	401		
6.3 基本的二级 MOS 运算放大器	402		
6.3.1 输入电阻、输出电阻与开路 电压增益	403		
6.3.2 输出摆幅	404		

7.3 多级放大器的频率响应·····	487	和稳定性·····	587
7.3.1 主极点近似·····	488	9.1 引言·····	587
7.3.2 零值时间常数分析法·····	488	9.2 反馈放大器中增益与带宽的关系·····	587
7.3.3 串接电压放大器的频率响应·····	493	9.3 不稳定性和奈奎斯特判据·····	589
7.3.4 串接放大器的频率响应·····	496	9.4 补偿·····	595
7.3.5 负载为一个镜像电流源的差分 对的频率响应·····	502	9.4.1 补偿理论·····	595
7.3.6 短路时间常数·····	504	9.4.2 补偿方法·····	600
7.4 741 运算放大器的频率响应分析·····	507	9.4.3 二级 MOS 管放大器补偿·····	606
7.4.1 741 的高频等效电路·····	507	9.4.4 单级 CMOS 运算放大器·····	613
7.4.2 741 的 -3dB 截止频率的 计算·····	508	9.4.5 嵌套式密勒补偿·····	616
7.4.3 741 的非主极点·····	510	9.5 根轨迹·····	624
7.5 频率响应和时间响应的关系·····	511	9.5.1 三极点的传递函数根轨迹·····	624
第八章 反馈 ·····	523	9.5.2 根轨迹准则·····	627
8.1 理想反馈方程·····	523	9.5.3 主极点补偿根轨迹图·····	634
8.2 增益灵敏度·····	524	9.5.4 零反馈补偿根轨迹图·····	635
8.3 负反馈对失真的影响·····	525	9.6 摆率·····	638
8.4 反馈结构·····	526	9.6.1 摆率受限的原因·····	638
8.4.1 串联-并联反馈·····	526	9.6.2 提高二级运算放大器摆率的 方法·····	641
8.4.2 并联-并联反馈·····	529	9.6.3 双极型运算放大器摆率的 改进·····	642
8.4.3 并联-串联反馈·····	531	9.6.4 MOS 运算放大器的摆率 改进·····	643
8.4.4 串联-串联反馈·····	532	9.6.5 摆率受限对大信号正弦性能 的影响·····	647
8.5 实际组态及负载的影响·····	532	附录·····	648
8.5.1 并联-并联反馈·····	532	A.9.1 反馈比参数术语分析·····	648
8.5.2 串联-串联反馈·····	538	A.9.2 二次方程根·····	649
8.5.3 串联-并联反馈·····	546	第十章 非线性模拟电路 ·····	659
8.5.4 并联-串联反馈·····	550	10.1 引言·····	659
8.5.5 总结·····	553	10.2 精密整流·····	659
8.6 单级反馈·····	553	10.3 使用双极型晶体管的模拟乘法器·····	665
8.6.1 局部串联-串联反馈·····	554	10.3.1 共射极对管构成简单的 乘法器·····	665
8.6.2 局部串联-并联反馈·····	556	10.3.2 吉尔伯特单元的直流分析·····	666
8.7 反馈电路用作稳压器·····	558	10.3.3 使用吉尔伯特单元的模拟 乘法器·····	668
8.8 使用反馈比的反馈电路分析·····	563	10.3.4 完整的模拟乘法器·····	671
8.8.1 使用反馈比求闭环增益·····	566	10.3.5 吉尔伯特乘法器单元构成平衡 调制器和鉴相器·····	672
8.8.2 使用反馈比的闭环阻抗公式·····	570		
8.8.3 反馈比分析的总结·····	576		
8.9 在反馈电路中建立输入和 输出端口的模型·····	576		
第九章 反馈放大器的频率响应			