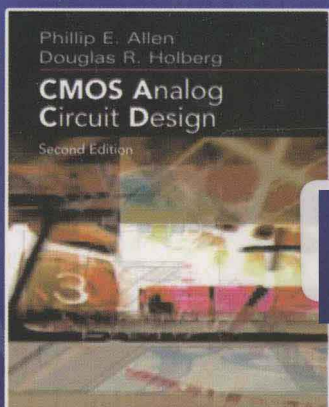


国外电子与通信教材系列

CMOS 模拟集成电路设计 (第二版)

CMOS Analog Circuit Design
Second Edition



电子工业出版社
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY

<http://www.phei.com.cn>

国外电子与通信教材系列

CMOS 模拟集成电路设计

(第二版)

CMOS Analog Circuit Design
Second Edition

[美] Phillip E. Allen 著
Douglas R. Holberg

电子工业出版社
Publishing House of Electronics Industry
北京 · BEIJING

内 容 简 介

本书是模拟集成电路设计课程的一本经典教材,作者从CMOS技术的前沿出发,结合丰富的工程和教学经验,对CMOS模拟电路设计的原理和技术以及容易被忽略的问题给出了详尽论述,阐述了分层设计的方法。全书共分十章,主要介绍了模拟集成电路设计的背景知识,CMOS技术,器件模型,以及主要模拟电路的原理和设计,包括CMOS基本单元电路(MOS开关、MOS二极管、有源电阻、电流漏、电流源、电流镜、带隙基准源、基准电流源和电压源等),放大器,运算放大器,比较器,开关电容电路,D/A和A/D转换电路。本书通过大量设计实例阐述设计原理,将理论与实践融为一体,同时还针对许多工业界人士的需求和问题进行了分析和解释,因而本书不仅可以用做大专院校相关专业高年级本科生和研究生的教材,也可以作为半导体和集成电路设计领域技术人员很有价值的参考书。

Copyright © 2002 by Oxford University Press, Inc.

This translation of CMOS Analog Circuit Design, Second Edition, originally published in English in 2002, is published by arrangement with Oxford University Press, Inc., U. S. A.

Simplified Chinese translation edition Copyright © 2011 by Publishing House of Electronics Industry.

本书中文简体版专有版权由美国Oxford University Press, Inc.授予电子工业出版社,未经许可,不得以任何方式复制或抄袭本书的任何部分。

版权贸易合同登记号 图字:01-2003-3949

图书在版编目(CIP)数据

CMOS模拟集成电路设计(第二版)/(美)艾伦(Allen, P. E.), (美)霍尔伯格(Holberg, D. R.)著;冯军,李智群译. -北京:电子工业出版社,2011.1

(国外电子与通信教材系列)

书名原文:CMOS Analog Circuit Design, Second Edition

ISBN 978-7-121-12680-2

I. C… II. ①艾… ②霍… ③冯… ④李… III. ①模拟集成电路-电路设计-高等学校-教材
IV. TN431.102

中国版本图书馆CIP数据核字(2010)第259260号

策划编辑:马 岚

责任编辑:马 岚

印 刷:北京市顺义兴华印刷厂

装 订:三河市双峰印刷装订有限公司

出版发行:电子工业出版社

北京市海淀区万寿路173信箱 邮编:100036

开 本:787×1092 1/16 印张:41.25 字数:1056千字

印 次:2011年1月第1次印刷

定 价:75.00元

凡所购买电子工业出版社的图书有缺损问题,请向购买书店调换;若书店售缺,请与本社发行部联系。联系及邮购电话:(010)88254888。

质量投诉请发邮件至zlt@phei.com.cn,盗版侵权举报请发邮件至dbqq@phei.com.cn。

服务热线:(010)88258888。

序

2001年7月间,电子工业出版社的领导同志邀请各高校十几位通信领域方面的老师,商量引进国外教材问题。与会同志对出版社提出的计划十分赞同,大家认为,这对我国通信事业、特别是对高等院校通信学科的教学工作会很有好处。

教材建设是高校教学建设的主要内容之一。编写、出版一本好的教材,意味着开设了一门好的课程,甚至可能预示着一个崭新学科的诞生。20世纪40年代MIT林肯实验室出版的一套28本雷达丛书,对近代电子学科、特别是对雷达技术的推动作用,就是一个很好的例子。

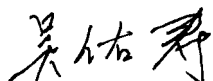
我国领导部门对教材建设一直非常重视。20世纪80年代,在原教委教材编审委员会的领导下,汇集了高等院校几百位富有教学经验的专家,编写、出版了一大批教材;很多院校还根据学校的特点和需要,陆续编写了大量的讲义和参考书。这些教材对高校的教学工作发挥了极好的作用。近年来,随着教学改革不断深入和科学技术的飞速进步,有的教材内容已比较陈旧、落后,难以适应教学的要求,特别是在电子学和通信技术发展神速、可以讲是日新月异的今天,如何适应这种情况,更是一个必须认真考虑的问题。解决这个问题,除了依靠高校的老师 and 专家撰写新的符合要求的教科书外,引进和出版一些国外优秀电子与通信教材,尤其是有选择地引进一批英文原版教材,是会有好处的。

一年多来,电子工业出版社为此做了很多工作。他们成立了一个“国外电子与通信教材系列”项目组,选派了富有经验的业务骨干负责有关工作,收集了230余种通信教材和参考书的详细资料,调来了100余种原版教材样书,依靠由20余位专家组成的出版委员会,从中精选了40多种,内容丰富,覆盖了电路理论与应用、信号与系统、数字信号处理、微电子、通信系统、电磁场与微波等方面,既可作为通信专业本科生和研究生的教学用书,也可作为有关专业人员的参考材料。此外,这批教材,有的翻译为中文,还有部分教材直接影印出版,以供教师用英语直接授课。希望这些教材的引进和出版对高校通信教学和教材改革能起一定作用。

在这里,我还要感谢参加工作的各位教授、专家、老师与参加翻译、编辑和出版的同志们。各位专家认真负责、严谨细致、不辞辛劳、不怕琐碎和精益求精的态度,充分体现了中国教育工作者和出版工作者的良好美德。

随着我国经济建设的发展和科学技术的不断进步,对高校教学工作会不断提出新的要求和希望。我想,无论如何,要做好引进国外教材的工作,一定要联系我国的实际。教材和学术专著不同,既要注意科学性、学术性,也要重视可读性,要深入浅出,便于读者自学;引进的教材要适应高校教学改革的需要,针对目前一些教材内容较为陈旧的问题,有目的地引进一些先进的和正在发展中的交叉学科的参考书;要与国内出版的教材相配套,安排好出版英文原版教材和翻译教材的比例。我们努力使这套教材能尽量满足上述要求,希望它们能放在学生们的课桌上,发挥一定的作用。

最后,预祝“国外电子与通信教材系列”项目取得成功,为我国电子与通信教学和通信产业的发展培土施肥。也恳切希望读者能对这些书籍的不足之处、特别是翻译中存在的问题,提出意见和建议,以便再版时更正。



中国工程院院士、清华大学教授

“国外电子与通信教材系列”出版委员会主任

前 言

本书第二版的目的仍然是介绍 CMOS 模拟电路的设计方法,只是电路设计的介绍远不止是给出一些电路的例子以及分析方法,它还包括在分层次设计方式中必须用到的基础知识和背景知识,以便初学者易于理解。本书最重要的就是讲授采用 CMOS 技术设计模拟集成电路的概念。这些概念能使读者理解模拟 CMOS 电路的工作原理以及如何改变电路性能。在当今依靠计算机的情况下,至关重要的一点就是继续保持人对设计的控制,知道希望得到什么,当模拟结果有误时如何辨别。随着集成电路设计变得越来越复杂,了解电路怎样工作变得越来越重要。如果不了解电路的工作原理,进行电路的模拟可能会引起错误的结果。

读者应怎样获取关于电路工作的知识呢?这是本书第二版致力解决的问题。在获取知识的过程中有这样几个重要的步骤:首先,学会分析电路。这种分析应能导出简单、易懂且可在不同场合重复应用的结果。其次,以分层次的观点来看模拟集成电路的设计。这就意味着设计者要能够清楚怎样利用子电路形成整体电路,怎样用简单电路构成复杂电路,等等。第三,列出一些步骤以便帮助初学者做出一些实用的设计。这就形成了一些所谓的“设计秘诀”,在第一版中曾很受欢迎,因此在第二版中又做了些补充。有一点很重要,这就是设计者了解 CMOS 模拟电路设计有三种简单的输出,它们是:(1) 电路图;(2) 直流电流;(3) 宽长比。绝大多数设计流程或者“秘诀”都可以很容易地围绕这三种输出组织起来。

15 年以前,人们还不清楚 CMOS 技术会对模拟电路设计产生多么重要的影响。然而,现在已经非常清楚,CMOS 技术已成为混合信号环境中模拟电路设计的一种选择。这种技术并不是设计者必须的选择,而是工业界的必然倾向,他们希望用标准技术实现模拟电路和数字电路。为此,第一版的《CMOS 模拟集成电路设计》在这个主题上率先满足了该领域对教科书的需求。该书不仅广泛应用于工业界,而且在世界各地的学校也都获得了广泛的应用。和第一版一样,第二版也未包含 BJT 技术。随着时间的推移人们将会看到这种选择的明智。编写本书第二版的目的是对第一版在模拟电路设计方面的观点和概念进行补充。

第二版的编写酝酿了很长时间,采用了一种独特的工业界和学术界相结合的方式。这种结合在过去的 15 年中就已经出现在本书的第一作者所执教的培训班上。自第一版以来已经举办了 50 多期培训班,来自世界各地的 1500 多名工程师参加了培训。在培训班上这些工程师想知道 CMOS 模拟电路设计的观点和概念。对这些问题的回答大部分都被纳入第二版中。除此之外,在过去的 10~15 年里,作者一直在佐治亚理工学院和得克萨斯大学奥斯汀分校讲授这些材料,这些经历为我们提供了一些来自于学生的思考问题的观念,这些观念也都包含在第二版中。同样,这些材料对理论的应用也形成了大量测试性习题。它们现在也被收录进第二版中。第一版有 335 个习题,第二版有 500 多个习题并且大部分都是新的。

本书第二版的读者和第一版基本相同。第一版对于那些刚开始接触 CMOS 模拟电路设计的初学者来说是非常有用的。许多人告诉作者,这本书已成为他们日常工作中一本便捷的参考书,而第二版无论是对新手还是对工业界富有经验的工程师来说都将继续保持其价值。即使是技术继续

发展，书中讨论的原理和概念也不会过时。

本书的另一部分读者是学生。那些从学校毕业并且想进入 CMOS 模拟设计领域的学生还不适应业界的要求。我们希望第二版成为教师和学生们的工具，帮他们满足业界的要求。为了促进这一目标的实现，两个作者都提供了网址，允许下载 pdf 格式的短训班课程的幻灯片、课程进度表、课堂笔记以及习题和解答。在 www.aicdesign.org (P. E. Allen) 和 www.holberg.org (D. R. Holberg) 上可以找到更多的信息。这些网站一直在不断更新，我们欢迎老师和同学们使用上面的信息和教学辅助材料。

第二版在第一版的基础上做了大范围的修改。这些修改包括将第一版中的第 4 章移到第二版的附录 B 中。第一版中的比较器是在运算放大器之前讲解的，第二版中将比较器放到了运算放大器之后。自从第一版出版以后的 15 年里，比较器更像一个传感放大器而不是一个没有补偿的运算放大器。另一个主要的变化是加进第 9 章的开关电容电路。这样做有两个原因：开关电容在模拟电路和系统设计中都是非常重要的，这些知识对于学习第 10 章中有关数模、模数转换器来说都是必需的。第一版中的第 11 章被去掉了。原本计划用一章讨论包含锁相环和 VCO 的模拟系统来代替它，但因时间关系而未能实现。第二版的习题放在各章之后，目的是强化和扩充关于这个主题的原理和概念。

本书的层次结构如表 1.1-2 所示。第 1 章给出了介绍 CMOS 模拟电路设计所必需的一些知识。这一章对 CMOS 模拟电路设计进行了概述，定义了符号和一些术语，扼要介绍了模拟信号处理，最后给出了模拟 CMOS 设计的一个例子，这个例子着重强调了设计中的层次。第 2 章和第 3 章构成了模拟 CMOS 设计的基础，介绍了 CMOS 技术和器件模型。第 2 章介绍了用于各种元器件的 CMOS 技术，这些器件包括：MOS 器件、pn 结、与 CMOS 技术兼容的无源器件和诸如横向 BJT、衬底 BJT 和锁存器等的其他器件。这一章还用了一节专门介绍集成电路版图的影响。在这里说明了集成电路中物理层设计与电路设计具有同样的重要性，许多好的电路设计会因为低劣的物理层设计或版图设计而失败。第 3 章介绍了器件模型的关键问题，它将贯穿全书被应用于电路分析以预测 CMOS 电路的性能。这一章的核心就是介绍一个足够好的模型，能够被用来在 $\pm 10\%$ ~ $\pm 20\%$ 的误差范围内分析 CMOS 电路的性能，而且便于设计者观察和理解。计算机模拟可以采用更精确的电路模型，但是不能给出有关电路的任何直观的图像和理解。这一章中给出的模型包括 MOSFET 的大信号和小信号模型，考虑频率影响的模型。另外，该章还介绍了怎样对 MOSFET 中噪声和温度的影响以及兼容的无源元件建立模型。这一章还讨论了计算机模拟的模型，虽然这个问题的复杂程度远远超出了本书的范围，但是给出的一些基本思想有利于读者对计算机模拟模型有所认识。此外还介绍了其他一些模型，诸如亚阈值区工作的模型以及怎样用 SPICE 对 MOSFET 电路进行计算机模拟。

第 4 章和第 5 章介绍子电路和放大器，这些电路将被用来设计诸如运算放大器等更复杂的模拟电路。第 4 章介绍 MOSFET 的开关应用，然后是 MOS 二极管或有源电阻。接下来介绍电流漏和镜像电流源等关键子电路。这些子电路的介绍涵盖了一些重要的设计概念，例如负反馈、设计中的折中以及匹配原理。最后，介绍了独立基准电压、电流和带隙基准电压。这些基准电路提供不受电源以及温度影响的电压或电流。第 5 章介绍各种形式的放大器，用大信号和小信号性能来描述它们的特征，有时也考虑噪声和带宽。放大器的种类包括反相放大器、差分放大器、共源共栅放大器、电流放大器以及输出放大器。最后一节讨论怎样用本章中的放大器模块构成高增益放大器。

第 6 章、第 7 章和第 8 章介绍一些复杂模拟电路的实例。第 6 章介绍一个简单的两级运算放

大器电路的设计。该运算放大器中应用了实用电路所必需的补偿原理。对这两级运算放大器的分析提供了设计这一类模拟电路的方法。这一章中还介绍了共源共栅运算放大器的设计，特别是折叠式共源共栅运算放大器。本章最后讨论运算放大器的测试和/或仿真技术以及宏模型。宏模型可以在较高的抽象层次上更有效地对运算放大器进行仿真。第7章介绍高性能的运算放大器。在这一章中要对简单运算放大器的各种性能以其他性能为代价进行优化。这些运算放大器包括输出缓冲运算放大器、高频运算放大器、差分输出运算放大器、低功耗运算放大器、低噪声运算放大器和低电压运算放大器。第8章介绍开环比较器，其实就是一个未加补偿的运算放大器。之后介绍设计这类具有线性或快速响应比较器的方法。介绍包括自动校零、迟滞技术等改进开环比较器性能的方法。最后，介绍再生比较器以及它们如何与低增益、高速放大器结合构成具有极小传输时延的比较器。

第9章和第10章专门讨论模拟系统。新引入的第9章介绍开关电容电路。开关电容的基本原理在介绍开关电容放大器和积分器电路的同时予以介绍。第9章还给出了分析和仿真开关电容电路的方法，以及采用一阶和二阶开关电容电路设计各种级联或梯形滤波器的方法。最后给出一个全部由开关电容电路构成的抗混叠滤波器。第10章介绍CMOS数/模、模/数转换电路。这里，数/模转换器按照电压、电流和电荷3种比较参考源的方式逐一加以介绍。此外还会介绍提高数/模转换器精度的方法。模/数转换器可分为奈奎斯特和过采样两种方式。奈奎斯特转换器依照它们工作的速度，即慢速、中速和快速逐一介绍。最后将会介绍过采样模/数和数/模转换器。这类转换器具有高分辨率且特别适合于CMOS技术。

三个附录的内容分别是关于CMOS模拟电路的电路分析方法、CMOS器件的特性（其实就是第一版的第4章）以及二阶系统时域和频域间的关系。

第二版的内容对15周的课程来说可能过多。根据学生的情况，一学期15周课程，每周3学时可以讲授的内容包括第2章和第3章的部分内容、第4章~第6章、第7章的一部分内容以及第8章。第9章和第10章可以作为模拟系统课程的部分内容。在佐治亚理工学院，这本教材是和《模拟集成电路的分析与设计》（“Analysis and Design of Analog Integrated Circuits”）（第四版）一起使用的，两学期的课程中包括了BJT与CMOS模拟IC设计。第9章和第10章可以作为一个学期的模拟IC系统设计课程70%的内容。

学习本书必要的基础是较好地掌握基本电子学知识。主要内容是：大信号模型、偏置、小信号模型、频率响应、反馈和运算放大器。当然，具有半导体器件及其工作原理、集成电路工艺、用SPICE仿真及MOSFET模型化的相关背景知识对学习本课程将会很有帮助。如果具有这些背景知识的话，读者从第4章开始学习也不会有什么困难。

作者衷心感谢许多对本书第二版修改做出贡献的人，包括许多研究生和本科生。在使用第一版的过程中他们提出了很多建议和修正意见。这些人也包括1500多位工业界的参与者，在过去的15年里他们相继参加了关于这个课题的为期一周的短训班。感谢他们的鼓励、耐心以及建议。我们还要感谢那些给予我们反馈和修正意见的来自全球范围内的业界和学术界的人士。此外我们十分感谢那些阅读、使用本书初稿并不断给我们提出意见的人。特别是Tom DiGiacomo、Babak Amini和Michael Hackner，非常感谢他们对新版本提供了有价值的反馈意见。我们十分感谢在第二版编写的过程中来自牛津大学出版社科学与计算机科学类图书的总编Peter Gordon的耐心和鼓励，以及在出版过程中项目主管Justin Collins坚定而和善的领导作风。最后，对Marge Boehme在协助备课和教学上所做的细致工作表示感谢。

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 模拟集成电路设计	1
1.2 字符、符号和术语	5
1.3 模拟信号处理	7
1.4 VLSI 混合信号电路设计模拟举例	8
1.5 小结	12
习题	13
参考文献	14
第 2 章 CMOS 技术	15
2.1 基本 MOS 半导体制造工艺	15
2.2 pn 结	24
2.3 MOS 晶体管	29
2.4 无源元件	34
2.5 关于 CMOS 技术的其他考虑	38
2.6 集成电路版图	44
2.7 小结	53
习题	54
参考文献	56
第 3 章 CMOS 器件模型	58
3.1 简单的 MOS 大信号模型 (SPICE LEVEL 1)	58
3.2 其他 MOS 管大信号模型的参数	63
3.3 MOS 管的小信号模型	70
3.4 计算机仿真模型	73
3.5 亚阈值电压区 MOS 模型	78
3.6 MOS 电路的 SPICE 模拟	80
3.7 小结	88
习题	88
参考文献	91
第 4 章 模拟 CMOS 子电路	92
4.1 MOS 开关	92
4.2 MOS 二极管 / 有源电阻	101
4.3 电流漏和电流源	103

4.4	电流镜	109
4.5	基准电流和电压	117
4.6	带隙基准	125
4.7	小结	130
	习题	130
	参考文献	137
第 5 章	CMOS 放大器	138
5.1	反相器	138
5.2	差分放大器	148
5.3	共源共栅放大器	162
5.4	电流放大器	171
5.5	输出放大器	176
5.6	高增益放大器结构	185
5.7	小结	187
	习题	188
	参考文献	197
第 6 章	CMOS 运算放大器	198
6.1	CMOS 运算放大器设计	198
6.2	运算放大器的补偿	206
6.3	两级运算放大器设计	218
6.4	两级运算放大器的电源抑制比	231
6.5	共源共栅运算放大器	236
6.6	运算放大器的仿真和测量	249
6.7	运算放大器的宏模型	259
6.8	小结	275
	习题	275
	参考文献	284
第 7 章	高性能 CMOS 运算放大器	286
7.1	缓冲运算放大器	287
7.2	高速/高频 CMOS 运算放大器	300
7.3	差分输出运算放大器	313
7.4	低功耗运算放大器	320
7.5	低噪声运算放大器	328
7.6	低电压运算放大器	339
7.7	小结	353
	习题	353
	参考文献	357
第 8 章	比较器	359
8.1	比较器的特性	359

8.2	两级开环比较器	363
8.3	其他开环比较器	375
8.4	开环比较器性能的改进	377
8.5	离散时间比较器	386
8.6	高速比较器	392
8.7	小结	396
	习题	397
	参考文献	400
第9章	开关电容电路	402
9.1	开关电容电路	402
9.2	开关电容放大器	413
9.3	开关电容积分器	424
9.4	两相开关电容电路的 z 域模型	433
9.5	一阶开关电容电路	442
9.6	二阶开关电容电路	447
9.7	开关电容滤波器	456
9.8	小结	487
	习题	487
	参考文献	500
第10章	数模和模数转换器	501
10.1	数模转换器简介及特性	501
10.2	并行数模转换器	510
10.3	并行数模转换器分辨率的扩展	519
10.4	串行数字模拟转换器	529
10.5	模数转换器简介和特性	533
10.6	串行模数转换器	544
10.7	中速模数转换器	546
10.8	高速模数转换器	557
10.9	过采样转换器	571
10.10	小结	583
	习题	584
	参考文献	600
附录A	模拟电路设计的电路分析	604
附录B	CMOS器件性能	613
附录C	二阶系统的时域和频域关系	632
	索引	639

第1章 绪 论

超大规模集成电路 (VLSI) 技术已经发展到可以在一块芯片上集成数百万个晶体管的水平。芯片中那些原来组成子系统的电路, 尤其是数模接口部分的电路, 现在能够以数模混合方式集成在一起形成一个片上系统[1]^①。互补金属-氧化物半导体 (CMOS) 技术已经成为实现混合信号^②电路的主流技术, 因为对数字电路来说其集成度高、功耗低, 对模拟电路则能提供各种单元的良好组合。由于应用广泛, CMOS 技术将成为本书讨论的主题。

由于数字电路的规律性和离散性, 计算机辅助设计 (CAD) 方法学在给定所需功能行为描述的数字系统设计自动化方面已经非常成功。但是这不适用于模拟电路设计。一般说来, 模拟电路设计仍需“手工”进行。而且, 许多用于分立器件模拟电路的设计技术也无法应用于模拟/混合信号的 VLSI 电路设计中。因此, 仔细研究模拟电路的设计过程, 熟悉那些提高设计效率、增加设计成功机会的原则是必要的。为此, 本书提供模拟集成电路设计的层次化结构和一般原则的综述。

本章主要介绍模拟集成电路设计的相关知识, 为后续学习打下基础。本章首先阐述了模拟集成电路设计的一般问题, 然后介绍本书中用到的字符、符号和术语, 接下来讨论了涉及模拟信号处理系统的一般考虑, 最后一节给出了一个模拟 CMOS 电路设计的例子。在学习第 2 章之前, 读者也许希望先了解一些与之相关的知识, 这些知识包括电子器件模型、计算机仿真技术、拉普拉斯变换和 z 变换理论以及半导体器件理论。

1.1 模拟集成电路设计

集成电路设计可分为两大类: 模拟和数字。为了显示这两类设计方法的特征, 我们必须首先定义模拟信号和数字信号。信号可以被认为电压、电流或电荷等电量的可视值。信号应该反映物理系统的状态或行为信息。模拟信号定义为在连续时间范围内具有连续幅度变化的信号, 图 1.1-1 (a) 为模拟信号的示例。数字信号是只在一些离散幅度值上有定义的信号, 换句话说, 数字信号是一些量化的离散值。典型的数字信号是只有两种幅值定义的信号的二进制加权和, 如图 1.1-1 (b) 和式 (1.1-1) 所示。图 1.1-1 (b) 是图 1.1-1 (a) 所示模拟信号的 3 位表示。

$$D = b_{N-1} 2^{-1} + b_{N-2} 2^{-2} + b_{N-3} 2^{-3} + \cdots + b_0 2^{-N} = \sum_{i=1}^N b_{N-i} 2^{-i} \quad (1.1-1)$$

一个二进制数 b_i 取值仅为 0 或 1。因而, 可以用只工作在两个稳定状态的器件来实现数字电路。这导致了很强的规则性, 并可用代数方法描述电路的功能。因此, 数字电路设计者可以得心应手地设计更复杂的电路。

模拟集成电路中还会遇到另一种信号, 即模拟采样数据信号。模拟采样数据信号是指在连续幅值范围内仅在时间离散点上有定义的信号。通常, 采样模拟信号保持的是采样周期结束时的值, 形成的是采样保持信号。模拟采样保持信号如图 1.1-1 (c) 所示。

① [n]表示见本章参考文献 n 。——编者注

② 术语“混合信号”被广泛接受用来描述在同一块硅衬底上制作的模拟和数字电路。

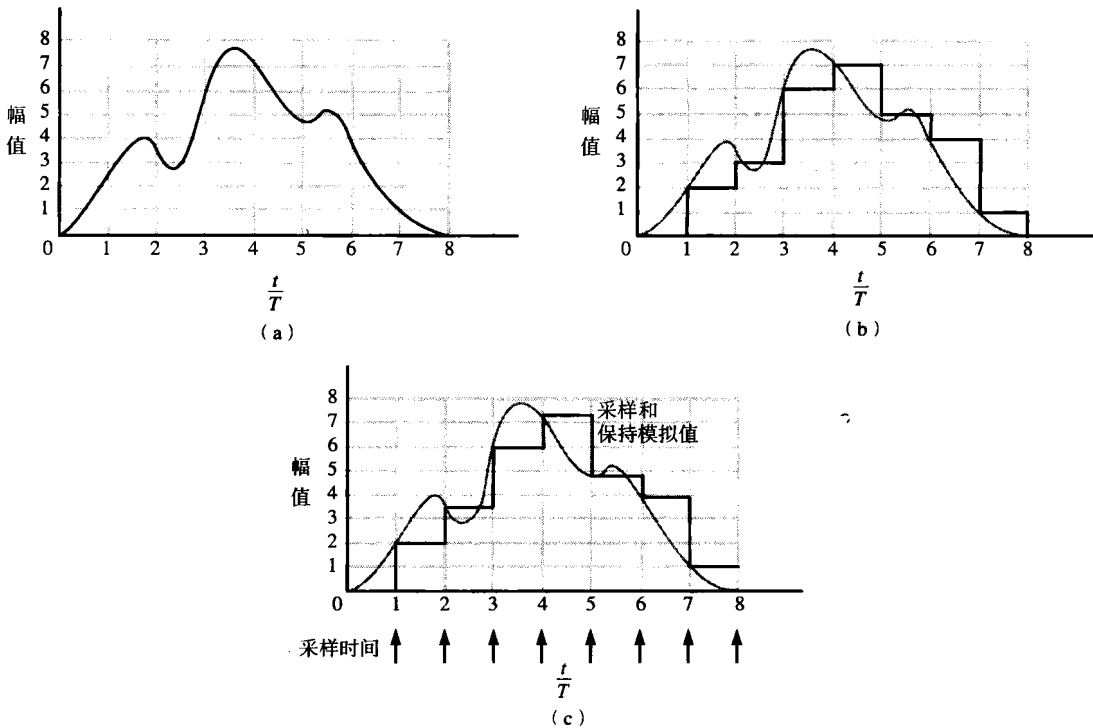


图 1.1-1 信号。(a) 模拟或连续时间信号；(b) 数字信号；(c) 模拟采样数据或离散时间信号； T 是数字信号或采样信号的周期

电路设计是为解决特定问题构思一个电路的创造性过程。对电路进行分析和比较能够更好地理解设计。如图 1.1-2 (a) 所示，电路分析是从电路出发找出其特性的过程。分析过程的一个重要特点是答案或特性是惟一的。另一方面，电路综合或者设计是这样一过程，从要求的特性出发，找出满足这些特性的电路。对设计来说方案并不惟一，于是为设计者提供了发挥创造力的机会。比如以设计一个 1.5Ω 的电阻为例，可以用三个 0.5Ω 电阻的串联实现，也可以用两个 1Ω 的电阻并联后再与一个 1Ω 的电阻串联来实现，等等。所有设计都会满足 1.5Ω 电阻的要求，虽然有些设计其他特性可能会更好。图 1.1-2 示出了综合（设计）与分析之间的不同。

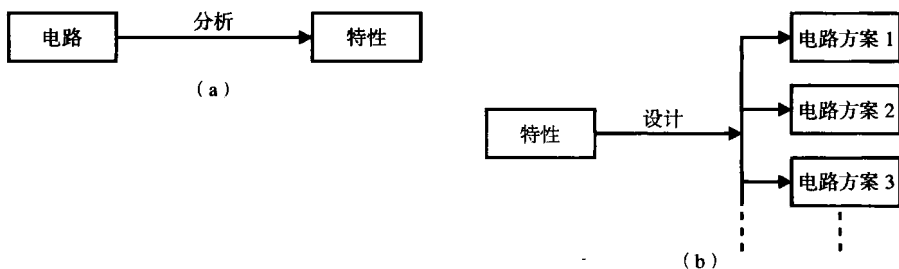


图 1.1-2 (a) 分析过程；(b) 设计过程

了解集成和分立模拟电路设计的不同是很重要的。与集成电路不同，分立电路不把有源和无源元件制作在同一衬底上，而将器件紧密地制作在同一衬底上的一个主要的优点就是器件间的匹配也可以作为设计考虑的一个工具。两种设计方式的一个不同点是在集成电路设计中有源器件和无源器件的几何尺寸是在设计者的控制之下的。在设计过程中这种控制赋予设计者更大的自由

度。另一个不同点就是集成电路设计无法用电路试验板验证。因此，设计者必须采用计算机仿真的方法来验证其电路的性能。再一个不同点是，在集成电路设计中，设计者将会更多地受到与所用工艺相关的元器件类型的约束。

设计一个模拟集成电路分为很多步骤。图1.1-3所示为一个集成电路设计的一般过程。主要的步骤有：

1. 定义
2. 综合或装配
3. 仿真或模型化
4. 版图设计
5. 考虑版图寄生参数后的仿真（后仿真）
6. 制作
7. 测试和验证

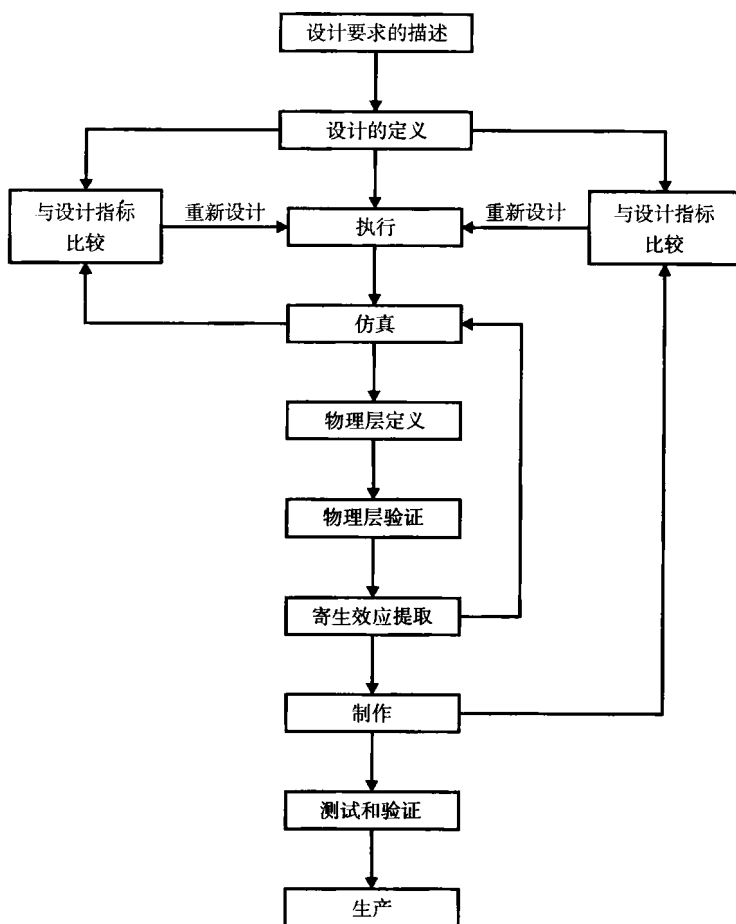


图 1.1-3 模拟集成电路设计过程

上述所有步骤，除了加工制造外，其余过程均需设计者负责。第一步是功能的定义和综合。这一步非常重要，因为这决定了设计的性能。当这些步骤完成后，设计者必须在制造之前能够

确认这个设计。为此，下一步就是对电路进行仿真，观察电路性能。开始设计者只能使用电路物理层的近似参数仿真，一旦完成版图设计，就可以用从版图得到的寄生参数信息检查仿真结果。此后设计者可反复用模拟结果改进电路的性能。一旦满足了性能要求，就可以进入下一步——电路的几何描述（版图）。通常情况下，这种几何描述由在不同层面上（ z 轴）的各种形状的矩形或多边形（ x - y 平面）形成的计算机数据库组成，它与电路的电性能密切相关。如前所述，版图完成后，需要将版图的寄生效应考虑进去再次仿真。如果性能满足，就可以制造电路了。制成之后，设计者将会面临最后一步——确定制成的电路是否满足设计要求。如果在整个设计过程中设计者没有仔细考虑这一步，那么在进行电路测试以及判断电路是否满足设计要求时可能会遇到困难。

正如前面所提到的，分立与集成模拟电路设计的区别之一是后者无法用电路试验板验证。计算机仿真技术已经有了长足的发展，能提供适当的模型。

其优点包括：

- 不需要电路试验板
- 具有监测电路任一处信号的能力
- 能够将反馈环路拆开
- 可以方便地修改电路
- 可在不同的工艺和温度条件下分析电路

计算机仿真也有一些缺点：

- 模型的精度问题
- 由于不收敛而得不出仿真结果
- 对大电路进行仿真很费时间
- 无法用计算机代替人的思维

由于仿真与设计过程密切相关，本书将在适当的地方进行介绍。

在完成上述各个设计步骤的过程中，设计者使用了三种不同的描述格式：设计描述、物理层描述和模型/仿真描述。设计描述的格式用来确定电路；物理层描述用来定义电路的几何形状；模型/仿真描述用来对电路进行仿真。设计者必须在每种描述格式中都能对设计进行描述。例如，模拟集成电路设计的第一步可以用设计描述格式完成，显然，版图设计阶段可以用物理层描述格式，仿真阶段可采用模型/仿真描述格式。

模拟集成电路设计还可以用分层的观点来描述。表1.1-1展示了由器件、电路和系统构成的纵向层次，横向分为设计、物理和模型三个层次。器件级是设计的最底层。可以分别用器件性能、几何图形和器件模型作为设计、物理和模型的相应描述。电路级是设计的较高层，可以用器件的术语来表示。电路级的设计、物理和模型描述的格式一般为：电压电流关系、参数化的版图和宏模型。设计的最高层是系统级——用电路来表示。系统级的设计、物理和模型描述的格式为：数学或图形描述、芯片布局规划以及行为模型。

表 1.1-1 模拟集成电路设计过程的层次及描述

层次	设计	物理	模型
系统	系统说明	版图布局	行为模型

(续表)

层次	设计	物理	模型
电路	电路性能	参数化模块/单元	宏模型
器件	器件特性	版图描述	器件模型

本书的组织体系侧重于集成电路设计的层次化观点,表1.1-2示出了模拟电路设计与相应各章的对应关系。在器件级,第2章和第3章介绍CMOS工艺技术及模型。为了设计CMOS模拟集成电路,设计者必须了解工艺技术,因此第2章概要地介绍了CMOS工艺技术以及由工艺考虑得出的设计规则。这些信息对于设计者理解工艺的限制和约束是非常重要的。在设计之前,设计者应该已经知道工艺和器件模型的电参数。建模在综合与仿真这两个步骤中是关键部分,这在第3章中做了介绍。设计者还应了解实际器件的模型参数,以便确定假设模型参数是否合适,理想情况下设计者已获得可以对这些参数进行测量的测试芯片。最终,制成后的模型参数测试可被用来测试完整的电路。器件描述方法在附录B中做了介绍。

表 1.1-2 模拟电路设计与相应各章的对应关系

设计层次	CMOS 技术		
系统	第9章 开关电容电路	第10章 数模和模数转换器	
复杂电路	第6章 CMOS 运算放大器	第7章 高性能 CMOS 运算放大器	第8章 比较器
简单电路	第4章 模拟 CMOS 子电路	第5章 CMOS 放大器	
器件	第2章 CMOS 技术	第3章 CMOS 器件模型	附录 B CMOS 器件性能

第4章与第5章主要介绍由两个管子及两个以上管子构成的电路,这类电路称为简单电路。在第6章到第8章中介绍如何由这些简单电路设计更复杂的电路。最后,在第9章和第10章中给出了由这些复杂电路设计的模拟系统。各种设计层次间的界限有时并不太明确。但是,基本的关系是有效的,可以给读者一个模拟集成电路设计的框架结构概念。

1.2 字符、符号和术语

为了让读者更清楚地理解本书介绍的内容,本节介绍书中所用到的字符、符号和术语。通常的选择是与本科电子学教材中使用的以及由技术协会建议的标准字符、符号和术语一致。计量单位采用国际单位制。本书将尽量采用这些规定。

首先是电流、电压的符号表示。信号通常用带下标的参量表示。参量和下标的大小写规定参见表1.2-1。

表 1.2-1 各种信号的符号定义

信号定义	参量	下标	示例
瞬时信号值	小写	大写	q_A
直流信号值	大写	大写	Q_A
交流信号值	小写	小写	q_a
复变量、相位或有效值	大写	小写	Q_a

图1.2-1示出在直流电平上叠加周期信号时如何用表1.2-1中的规定来表示。

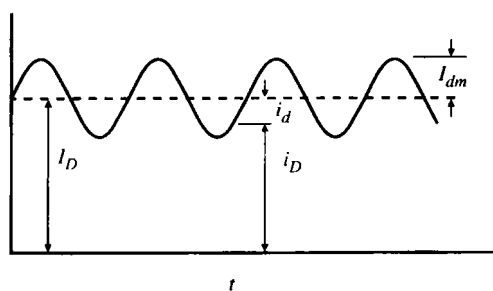


图 1.2-1 表示信号的符号

器件建模时这些符号是有用的。例如，在 MOS 模型中考虑场效应管的漏源电流与各端口间电压的关系。这个模型要用总的瞬态变量 (i_D) 表示；用直流变量 (I_D) 表示偏置；用交流变量 (i_d) 进行小信号分析；用复变量 (I_d) 讨论小信号频率特性。

第二项要讨论的是用什么符号表示各种元器件（这些符号中的大多数读者都很熟悉。只是 MOS 器件的符号有所不同，如图 1.2-2 所示）。图 1.2-2 (a) 与图 1.2-2 (b) 表示增强型 MOS 场效应管或其衬底（或体）(B) 接相应的电源。一般来说，这种接法是指：p 沟道管衬底接最高电位，n 沟道管衬底接最低电位。图中三个电极分别是：漏极 (D)、栅极 (G) 和源极 (S)。如果衬底没有接在相应的电源，那么图 1.2-2 (c) 和图 1.2-2 (d) 可用来表示增强型 MOS 管。知道电路设计中所用 MOS 管的衬底接在何处是很重要的。

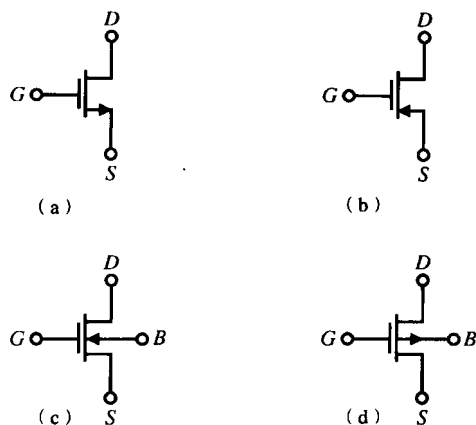


图 1.2-2 MOS 器件符号。(a) n 沟道增强型 MOS 管，衬底接最低电位；(b) p 沟道增强型 MOS 管，衬底接最高电位；(c)、(d) 与 (a)、(b) 相同，只是衬底未给出连接

图 1.2-3 是另一类需要定义的符号。图 1.2-3 (a) 表示差分输入的运算放大器，有时也可表示与运算放大器增益相近的比较器。图 1.2-3 (b) 和图 1.2-3 (c) 分别表示独立的电压电流源。有时电池符号用图 1.2-3 (b) 所示的符号表示。最后，图 1.2-3 (d) ~ 图 1.2-3 (g) 表示四种理想的受控源。图 1.2-3 (d) 为电压控制电压源 (VCVS)，图 1.2-3 (e) 为电压控制电流源 (VCCS)，图 1.2-3 (f) 为电流控制电压源 (CCVS)，图 1.2-3 (g) 为电流控制电流源 (CCCS)。这些受控源的增益分别为 A_v 、 G_m 、 R_m 和 A_i （分别对应于 VCVS、VCCS、CCVS 和 CCCS）。

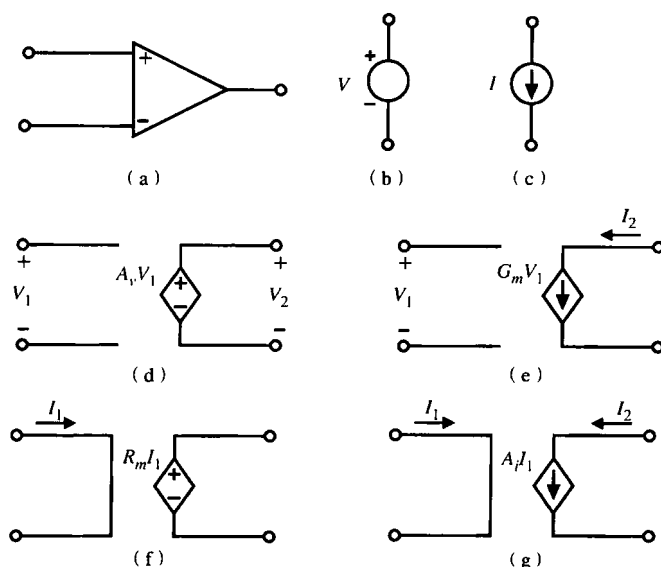


图 1.2-3 (a) 运算放大器符号; (b) 独立电压源; (c) 独立电流源;
 (d) 电压控制电压源 (VCVS); (e) 电压控制电流源 (VCCS);
 (f) 电流控制电压源 (CCVS); (g) 电流控制电流源 (CCCS)

1.3 模拟信号处理

在深入学习模拟电路设计之前,需要探讨这类电路的应用。模拟信号处理包括本书将提到的大部分电路与系统。图1.3-1所示为一典型的信号处理系统的简单框图。过去,这样一个信号处理系统需要多个集成电路以及其他无源器件。然而,随着模拟数据采集技术以及MOS工艺的出现,使得在单片集成电路中同时采用模拟、数字技术实现信号处理的设计成为可能[2]。

模拟信号处理系统设计的第一步是仔细考察技术指标,确定系统中的模拟部分和数字部分。多数情况下,输入信号是模拟的,可以是语音信号、传感器输出、雷达回波等。图1.3-1中的第一个模块是预处理模块。一般来说,这个模块由滤波器、自动增益控制电路和模数转换器(ADC或A/D)组成。通常,精确的速度和精度要求由该模块的组件承担。模拟信号处理器后面接数字信号处理器。用数字的方式进行信号处理有很多优点。一个是数字电路易于用最小尺寸的工艺实现,提供了价格和速度优势。另一个是与数字信号处理中(例如,线性相移滤波器)额外的有效自由度有关。还有一个优点是很容易对数字器件进行编程。最终,必须有一个模拟的输出。在这个例子中需要一个后加工模块,此模块通常包括一个数模转换器(DAC或D/A)、放大器和滤波器。

在信号处理系统中,待处理信号的带宽是需要特别考虑的问题。图1.3-2中列出了一些信号的工作频率。低端是地震信号,因地壳的吸收作用不会低于1Hz。高端是微波信号。高于30GHz的信号未被列出,因为在高频即使最简单的信号处理也很难。

为使图1.3-2所示的任何特定区域均能使用,必须采用支持所要求带宽的工艺。图1.3-3所示为目前可用技术所能提供的速度。决定在某个应用领域采用哪种技术设计集成电路时,不仅要考虑带宽和速度的要求,还要考虑成本和集成度。如今的趋势是尽可能采用CMOS数模混合技术(如果需要的话),因为这可以达到很高的集成度,从而提供高可靠的紧凑系统解决方案。