

P.E. 艾伦 D.R. 霍尔伯格 著

CMOS 模拟电路设计

微电子学系列

科学出版社

TN431.1
A 42

381475

CMOS 模拟电路设计

P. E. 艾伦 D. R. 霍尔伯格 著

王正华 叶小琳 译



科学出版社

1995

(京)新登字 092 号

dw 90/61
内 容 简 介

本书适应微电子技术发展的需要,以“系统设计”为出发点,阐述了采用分层次设计方法,设计 CMOS 模拟集成电路的原理与技术。

本书共分十一章,第一至四章介绍 CMOS 模拟集成电路设计的基础知识;第五、六两章介绍简单模拟集成电路;第七至十章是本书的重点,系统介绍了大规模模拟集成电路的设计方法、设计过程以及产品性能优化方法;最后一章则介绍集成系统的设计。

本书由浅入深,由简单电路设计开始逐渐深化到系统设计,书中通过大量设计实例阐述设计原理,将理论与实践融为一体,因而本书不仅可供半导体、集成电路领域中的科技人员参考,也可作为大专院校相应专业的教学参考书。

Phillip E. Allen Douglas R. Holberg

CMOS ANALOG CIRCUIT DESIGN

Copyright © 1987 by Saunders College Publishing

Translation Copyright © 1995 by Science Press, China.

All rights reserved.

CMOS 模拟电路设计

Phillip E. Allen D. R. Holberg 著

王正华 叶小琳 译

责任编辑:魏玲 唐正必

科学出版社出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码: 100717

北京市怀柔黄坎印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

*

1995 年 3 月第 一 版 开本: 850×1168 1/32

1995 年 3 月第一次印刷 印张: 21 5/8

印数: 1—1 500 字数: 568 000

ISBN 7-03-004273-5/TN·161

定价: 32.00 元

中译本序言

随着集成电路技术和产业的发展，集成电路的设计正在逐步形成与制造业相配比的设计业，使集成电路技术和产业基本上可以分为两个部门：1) 从系统、整机要求出发，将它们的要求即信息通过设计工具设计（写）到半导体芯片上；2) 应用一系列特定的设备和工艺实现并制造出包括这些“信息”的集成电路。前者的发展除对设计工具有迫切需求外，还要求加强对集成电路设计方法学的研究。特别是随着集成电路应用领域的日益延拓，制造工艺的成熟和标准化，以及设计工具和方法的成熟，使专用集成电路（ASIC）得到了迅速的发展，这就需要对集成电路的设计有更系统和深入的了解。

应当说，我们对模拟集成电路的了解比起数字电路来更显不足。由于早年的模拟电路多由双极型集成电路来制造，因而对CMOS模拟电路就更需要注意学习。所以我认为由王正华和叶小琳两位同志翻译的《CMOS模拟电路设计》一书的出版是十分适时的。

据我所知，美国加州大学伯克利分校教授 P.R.Gray 和 R.G. Mayer 曾写了一本《模拟集成电路的分析与设计》(Analysis and Design of Analog Integrated Circuits)*，主要是讲双极型模拟集成电路的，很受欢迎。而通过本书把 CMOS 模拟集成电路的设计介绍到我国来恐怕还是头一次。

王正华教授和叶小琳高工是我多年的老朋友，80年代，他们两位参与并领导筹建了我国集成电路设计中心。由他们两位合作来翻译这本书，无疑是十分合适的。

* 该书中译本已于 1981 年由科学出版社出版。

《CMOS 模拟电路设计》一书总结了美国 CMOS 模拟集成电路的设计经验，在美国曾被广泛地用作继续教育的教材和研究生课程的教材。内容除了部分器件工艺之外，还包括了 CMOS 模拟电路的模型、CMOS 器件特性、CMOS 模拟电路单元和多种典型的 CMOS 模拟电路的设计。我相信这本书的出版将有助于提高我国集成电路设计者的水平。

因此，我衷心地祝贺这本译著的出版，并希望它为我国集成电路设计业的起飞助一臂之力。

我冒昧地写上这么几句话，希望读者能对这本译著出版的背景有更多的了解。

王阳元

1992年7月于北京大学

原 序

本书主要介绍采用 CMOS 工艺的模拟集成电路的设计原理和技术。酝酿编写本书时，有两个目标。首先是想介绍用分层次设计方法 (hierarchically-oriented approach) 来设计模拟集成电路；其次是试图将学术的和实际的见解融为一体，使所述内容既不流于浮泛抽象而又不至于过分具体，见树不见林。书中叙述的一些原理、技术和线路是根据作者（以及对本书直接或间接提供材料的人们）在工业界的经验和知识编写的。

70年代中期以前，集成技术，尤其是 MOS 集成技术，并没有被模拟电路广泛采用。这是因为多数模拟电路对所用元件的电阻值，电容值或阻容值之积，有严格的精度要求；而精确的电阻或电容是通常的集成电路技术所做不到的。因此模拟电路只在一些内部不需要这类元件的线路中，如运算放大器、电压调整器等线路中得以实现集成化。

70年代兴起的开关电容电路，把对阻容乘积的精确要求转化为对电容比值的要求。结果使模拟电路能和 MOS 工艺相适应。MOS 工艺的电容相对精度（因此也就是 RC 乘积的精度）在 1% 以内。这样使许多（简单的和相当复杂的）模拟电路和系统得以采用 MOS 工艺制造成功，并成为集成电路商品市场中人们熟悉的产品。

本书的材料来自两方面，一个来源是德克萨斯州 A & M 大学研究生的模拟电路设计课程用的讲义。这些讲义是作为 Gray 及 Meyer 合编的《模拟集成电路的分析与设计》^[1] 一书第一版的补充教材而编写的。该书第一版只讲了双极型模拟集成电路。另一个来源是一份约 300 页的文集，题目叫作“CMOS 模拟电路设计”，是 1981 年为 G. E. 公司承担的合同工作中的一部分。

该项工作描述并验证了CMOS模拟集成电路设计的基本原理和方法。这本书的早期版本曾分别在斯德哥尔摩的皇家技术学院和硅谷的Lockheed研究所的短期培训班上用作教材。后来这些讲义又被休斯敦的Schlumberger公司采用，作为柏林工程师继续教育计划课程中的“CMOS模拟集成电路设计”课程的教材；同时，也在乔治亚工业大学，德克萨斯州A&M大学，Nebraska大学和南Methodist大学等学校，用作研究生课程的教材。

编写本书过程中最难做出的决定，是将双极型模拟电路排除在外。促使下此决心的原因有三：1) 关于双极型模拟电路设计的书籍已经有了一些很好的教本，而关于CMOS模拟电路设计的教本，除了上面提到的《模拟集成电路的分析与设计》一书的第二版^[2]中有所提及外，还没有其它的教本；2) CMOS已经成为模拟集成电路设计所采用的主要工艺技术；3) 为了减少本书的篇幅。因此，本书要实现的任务就是从CMOS工艺技术的角度来阐明模拟集成电路的设计。尽管CMOS和BJT模拟电路有许多相似之处，但也确有一些重要的区别。其中之一就是：CMOS电路的小信号性能强烈地依赖于器件的几何尺寸和直流变量，而BJT电路则只依赖于直流变量。换言之，CMOS电路的设计比双极型电路有两倍的自由度。现在CMOS工艺已经成为模拟集成电路的主流工艺，将来当技术进一步成熟后，CMOS和BJT相结合的工艺技术可能成为集成电路工艺技术的主流。

本书在工业部门可作为工程技术人员的参考书，在高等学校可用作高年级及研究生有关课程的教材。作者假定读者对于电子学基本课程的内容是了解的（包括偏置、模型化、电子线路分析以及频率响应等等）。本书叙述了设计工作的全过程（包括建立模型、模拟和测试）。学完本书以后，读者应能担任用CMOS工艺设计模拟集成电路的工作。本书还提醒初学的设计人员在刚开始设计时容易犯的误差和容易疏忽之处。工业界的工程师们将发现本书不仅可作为入门的向导，而且在具体设计CMOS模拟集成电路时也是十分有用的参考书。对于有经验的专家，本书内容的

组织和对设计方法学的强调能帮助他们从更高的角度总结过去的设计经验。

表 1.1.2 中示出了本书的结构。为了帮助读者理解全书的结构层次，以后各章还会反复提到此表。第一章是绪论。概述本书内容，确定符号的意义，规定一些惯例，综述了模拟信号的处理并举出一个 CMOS 模拟电路设计的实例。书中各章都备有一些练习题（大部分曾被用作测验题和试题），是为了帮助读者加深对各章内容的理解。

按照表 1.1.2 所列模拟线路设计的层次划分；第二、第三和第四章内容是属于器件一级的层次。第二章扼要介绍制造 MOS 器件、无源元件和垂直双极型器件、齐纳二极管等元器件的 CMOS 工艺技术。还介绍了设计规则及其含意。第三章介绍器件模型这一关键内容（本书其余各章都要应用这些模型），还介绍了不同精确度级别的有源器件模型和无源元件模型，以及如何在模拟仿真过程中应用这些模型。第四章重点介绍 MOS 器件的特性，并介绍运用哪些方法和技术去提取并确定模型参数（第三章介绍的模型的模型参数）。

第五和第六章是在层次式设计过程中从器件级层次向子电路（简单电路）级层次转移。这两章介绍的基本电路将作为更复杂电路中的部件。这些基本电路包括：MOS 开关、有源电阻、电流源、电流镜、共源共栅放大器和输出级放大器等。

第七、第八及第九章介绍较复杂电路。这是本书的核心，它对设计过程作了充分的阐述。首先介绍的是比较器，实际上比较器就是未加补偿的运算放大器，这里首先分析其直流特性。第八章介绍无缓冲级的运算放大器。在介绍了运算放大器的一般设计方法之后，接着介绍补偿问题和简单的两级运算放大器的详细设计过程；然后再介绍共源共栅放大器。本章还介绍了运算放大器特性的模拟仿真和测量。第九章介绍了比两级运算放大器性能更好、更复杂的运算放大器的设计。内容包括如何减少温度变化、电源变化对运放性能的影响，如何降低功耗、降低噪声和扩大动

态工作范围。本章是介绍如何优化电路性能的最好实例。

第十章介绍 CMOS 数/模、模/数转换器。首先介绍这类电路的特性和特征，然后再从性能角度进行分析和介绍。本章对分压式、电荷分布式和串行变换式数/模转换器及串行变换式、中速和高性能模/数转换器均分别进行了介绍。

第十一章介绍模拟电路及系统，分别介绍了能源电压基准、模拟乘法器，削波器、振荡器和定时器等线路。以前各章介绍过的电路，都作为模块 (block) 来处理，这样可以集中注意力分析解决线路和系统方面较高层次的设计问题。

最后的附录包括：线路分析方法概述、一个用计算器分析 CMOS 线路的程序以及频域和时域的二阶系统关系。

本书内容可供 10 或 15 周的课程使用。一般 10 周课程可以讲授第二至第八章的大部分内容，如果时间允许还可以讲授第九和第十章的部分内容。第五、第六章是后面内容的关键，应尽可能详细讲授。15 周的课程可适当将其他章节内容包括进去。如果读者对双极型模拟电路设计有较好的基础，考虑到两种工艺有相似的部分，有些内容可以不讲。但是，切不可忽略 MOS 电路性能对几何尺寸的强烈依赖性。

学习本书需要具有电子学的基本知识。学过 Sedra 和 Smith 合著的《微电子学线路》^[3] 一书后就完全可以开始学习本书了。比较重要的课题有：大信号模型、偏置、小信号模型、频率响应、反馈和运放。如果具有半导体器件物理、集成电路工艺、模拟和模型化等方面的基本知识，对学习本课程是十分有帮助的。如果具有以上基础，读者可以从第四或第五章开始学起。

本书中作为示例的许多电路都是由德克萨斯州仪器公司和 Harris 半导体公司分别制造的，作者衷心感谢两家公司的帮助。作者还要感谢 D.T.Paris 博士的支持和鼓励 (D.T.Paris 博士是乔治亚工业大学所属电机学院的院长，并在 Crystal 半导体公司中负责工程管理)。此外，本书内容在许多方面，特别是在模拟集成电路设计方法学方面，得到半导体科技开发公司在科研工作中

的大力支持。

作者还要借此机会，对于在本书形成过程中给予帮助的许多人士表示感谢和赞赏。这些人士，包括曾在乔治亚工业大学，德克萨斯州A & M大学，Nebraska 大学和南 Methodist 大学的教学中曾采用本书（本书较早版本的原稿）作为教材的教师和研究生们。乔治亚工业大学的两位研究生 M. Breevoort 和 J. Still 是对本书有过特殊贡献的研究生中的代表。J. A. Connelly, R. Geiger, M. Ismail 和 J. Lowell 等位教授在他们的教学中采用本书原稿，不断给予指正。Mike 和 M. Buchanan 校阅了本书的最后修订稿。对于工业界的朋友，他们对本书提出过不少建议并提供设计的实例，作者在此一并表示感谢。我们两位作者还应特别感谢 S. Brenner 女士的无私帮助，她的贡献远超过我们的期望。最后还应感谢我们的家人，没有她们的理解和支持，本书是不可能完成的。

参 考 文 献

- [1] P. R. Gray and R. G. Meyer, *Analysis and Design of Analog Integrated Circuits*, First Edition, John Wiley & Sons, New York: NY, 1977.
- [2] Ibid, Second Edition, 1984.
- [3] A. S. Sedra and K. C. Smith, *Microelectronic Circuits*, Holt, Rinehart and Winston, New York: NY, 1982.

目 录

第一章 绪 论	(1)
1.1 模拟集成电路设计	(1)
1.2 字符、符号及名词术语	(9)
1.3 模拟信号处理	(14)
1.4 模拟电路设计举例	(17)
1.5 小结	(24)
习题	(25)
参考文献	(27)
第二章 CMOS 工艺	(28)
2.1 MOS 半导体器件的基本生产过程	(29)
2.2 pn 结	(36)
2.3 MOS 晶体管	(46)
2.4 无源元件	(55)
2.5 有关 CMOS 工艺的一些其他问题	(62)
2.6 集成电路的几何图形	(71)
2.7 小结	(82)
习题	(83)
参考文献	(88)
第三章 CMOS 模拟电路的模型化	(91)
3.1 MOS 器件的简单大信号模型	(92)
3.2 其他的 MOS 大信号模型参数	(100)
3.3 MOS 晶体管的小信号模型	(110)
3.4 二阶效应的模型	(114)
3.5 MOS 器件的亚阈值模型	(120)
3.6 使用计算机和计算器对 MOS 电路进行仿真模拟	

.....	(123)
3.7 小结	(141)
习题	(142)
参考文献	(147)
第四章 CMOS 器件的特性表征	(149)
4.1 几何形状对器件特性的影响	(149)
4.2 简化的器件模型的表征	(151)
4.3 扩展了的模型的晶体管特性表征	(162)
4.4 $1/f$ 噪声	(167)
4.5 其他有源元器件的表征	(169)
4.6 电阻元件的表征	(171)
4.7 电容的表征	(177)
4.8 小结	(182)
习题	(183)
参考文献	(189)
第五章 模拟 CMOS 子电路	(190)
5.1 MOS 开关	(191)
5.2 有源电阻或负载	(204)
5.3 电流沉和电流源	(211)
5.4 电流镜和电流放大器	(219)
5.5 基准电流和电压	(232)
5.6 小结	(244)
习题	(244)
参考文献	(249)
第六章 CMOS 放大器	(250)
6.1 反相器	(250)
6.2 差分放大器	(265)
6.3 共源共栅放大器	(278)
6.4 输出级	(290)
6.5 高增益放大器	(299)

6.6	小结	(304)
	习题	(305)
	参考文献	(312)
第七章	比较器	(313)
7.1	比较器的模型	(313)
7.2	CMOS 比较器的发展	(317)
7.3	两级比较器	(322)
7.4	滞迟性比较器	(337)
7.5	自动置零技术	(344)
7.6	小结	(348)
	习题	(348)
	参考文献	(351)
第八章	无缓冲 CMOS 运算放大器	(352)
8.1	运算放大器的设计方法	(352)
8.2	运算放大器的补偿	(360)
8.3	两级运算放大器的设计	(372)
8.4	共源共栅运算放大器	(386)
8.5	运放的模拟与测量	(408)
8.6	小结	(428)
	习题	(429)
	参考文献	(438)
第九章	高性能 CMOS 运算放大器	(439)
9.1	采用 MOS 作输出级的运放	(440)
9.2	采用 MOS/BJT 作输出级的运放	(451)
9.3	高速/高频 CMOS 运放	(462)
9.4	低噪声运放	(469)
9.5	斩波-稳定运算放大器	(473)
9.6	微功率运算放大器	(480)
9.7	动态运放电路	(486)
9.8	小结	(493)

习题.....	(494)
参考文献.....	(500)
第十章 CMOS 数-模、模-数转换器.....	(502)
10.1 数-模转换器简介及其特性.....	(502)
10.2 分压式和电荷分布式 D/A 转换器.....	(511)
10.3 串行 D/A 转换器.....	(525)
10.4 A/D 转换器简介及其特性.....	(530)
10.5 串行 A/D 转换器.....	(536)
10.6 中速 A/D 转换器.....	(540)
10.7 高速和高性能 A/D 转换器.....	(551)
10.8 小结.....	(565)
习题.....	(566)
参考文献.....	(568)
第十一章 CMOS 模拟电路及系统.....	(570)
11.1 基准电压源.....	(571)
11.2 模拟乘法器.....	(579)
11.3 整形电路.....	(588)
11.4 振荡器和波形产生器.....	(614)
11.5 小结及结论.....	(634)
习题.....	(635)
参考文献.....	(639)
附录 A 模拟电路设计的电路分析.....	(642)
附录 B 分析 CMOS 电路的计算器程序.....	(654)
附录 C 二阶系统的时域、频域关系.....	(669)

第一章 绪 论

VLSI (超大规模集成) 技术的进步, 以及电子系统集成的迫切需求 (即希望在单个芯片上集成尽可能多的信号处理功能), 为模拟集成电路设计开辟了广阔的天地^[1]. 十分明显, VLSI 技术的应用离不开模拟集成电路和模拟集成系统. 例如多数 VLSI 系统都需要滤波器、电压比较器、数-模、模-数转换器, 以及自动增益控制线路等等模拟电路或系统.

遗憾的是, 以前沿用的用分立器件实现模拟电路的设计方法, 对于用 VLSI 技术实现的、更复杂的模拟电路和模拟集成系统的设计是不适用的. 因此有必要仔细研究模拟电路的设计过程, 以便找出能提高设计效率, 提高设计成功机会的途径. 本书试图提出分层次组织模拟集成电路设计的课题, 并明确分层次设计的基本原则.

本章介绍设计模拟集成电路过程中要解决的问题, 并为以后各章的学习作好准备. 本章中首先阐述模拟集成电路设计的过程, 然后规定本书采用的字符、图符和名词术语, 接着讨论设计模拟信号处理系统应考虑的问题; 最后举一个 CMOS 模拟电路设计的例子. 读者最好先复习一些有关基础知识, 再接着开始学习第二章. 这些基础知识包括电子元器件模型、计算机模拟仿真技术、拉普拉斯变换、 z 变换以及半导体器件物理等.

1.1 模拟集成电路设计

模拟电路设计的目标是把对电路的技术要求转变成实际的电路, 而这一电路应能满足原定的技术要求. 这是一件复杂的创造性的工作. 因为在设计过程中有许多可供选择的因素, 需要根据

实际情况决定取舍以实现一个成功的设计。设计师的经验不同，背景不同，可能会采取不同的方案去解决同一个课题。直到今天，真正创新的模拟电路设计还是少数“天才”设计师的王国。但是随着模拟电路复杂程度的增加，愈来愈有必要考虑规整性(regularity)，划分(partitioning)，以及分层设计(design hierarchy)等概念。这些概念得到了精巧设计的计算机辅助设计工具的支持，促使模拟电路设计领域也开始为更多人们所涉足。本书就是为帮助日益增多的设计师们更好地完成他们的任务。

集成电路可分为模拟集成电路和数字集成电路两大类，两类电路的设计方法也不尽相同，为了了解其不同之处，应先弄清模拟信号和数字信号的区别。可以把信号看作是任何一个可检测的电压，电流或电荷值。一个信号应能传达一个物理系统的状态或行为的信息。一个模拟信号，是在一定连续时间范围内和一定连续幅度范围内具有确定意义的信号。图1.1.1(a)示出了一个模拟信号。而一个数字信号则是在时间和幅度的某些离散点上有确定意义的信号。一般说来，数字信号如图1.1.1(b)所示，可以用加权的二进制数的和来表示。单个的二进制数只能具有数值0或1。数字信号可用下式表示：

$$D = b_1 2^{-1} + b_2 2^{-2} + b_3 2^{-3} + \dots + b_N 2^{-N} = \sum_{i=1}^N b_i 2^{-i} \quad (1.1.1)$$

可以用只具有两种状态的线路来实现数字电路。电路的规整性很强。可以用布尔代数式描述电路的功能。因此数字电路设计师能得心应手地设计较复杂的电路。

模拟集成电路设计工作中还会遇见另一类信号，即模拟取样数据信号(analog sampled-data signal)。模拟取样数据信号的幅度在一段连续范围内有意义，而在时间上只在离散点上有意义。开关电容技术得到的就是这种信号。通常取样模拟信号保持的是在取样时期起始点的数值，这样的信号叫作取样保持信号。在图1.1.1(c)中分别画出模拟取样数据信号和模拟取样保持信号的图形。

电路“设计”是寻找解决问题的办法的创造性过程。将它和“分析”作对比，便于更好地理解。电路分析如图 1.1.2 (a)所示，它是从存在的电路出发研究该电路特性的过程。电路分析过

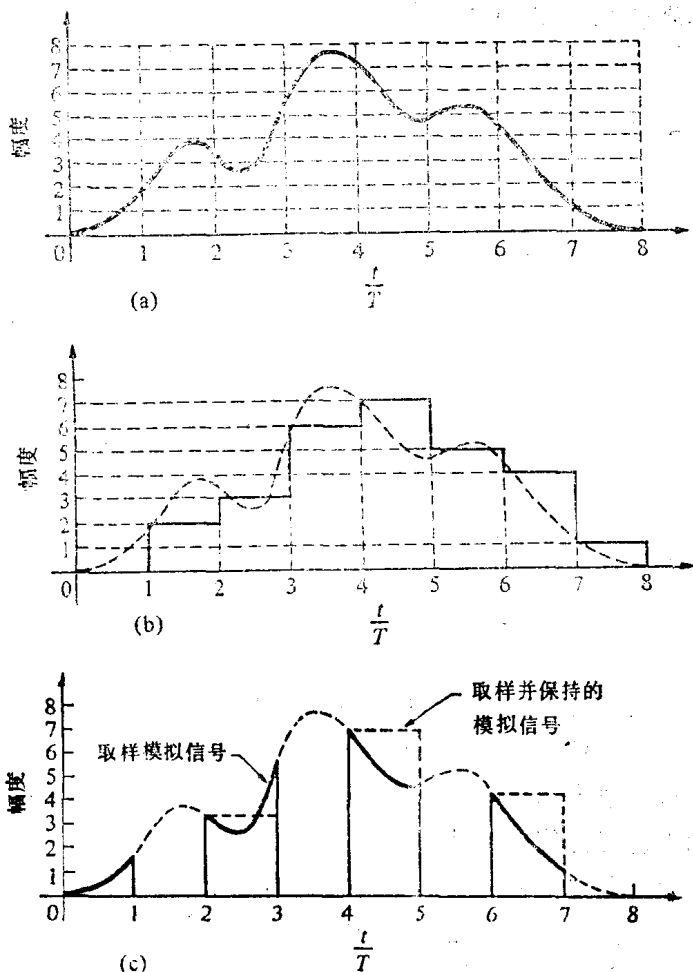


图 1.1.1 信号。(a) 模拟的或连续时间信号；(b) 数字信号；(c) 模拟取样数据或离散时间信号。 T 是数字信号或取样信号的周期。

程的重要特点是：它的解答（即电路的特性）是唯一的。而电路的综合（或设计）是：从对电路提出的特性出发，找出符合以上特性的电路。对于设计问题，其解答并不一定是唯一的。这就使