

国外电子与通信教材系列

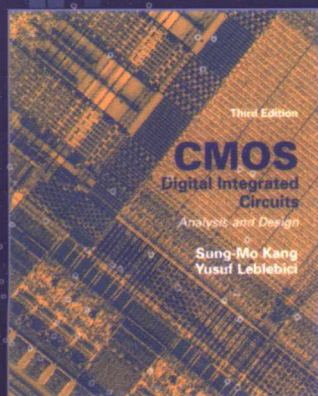
CMOS数字集成电路

——分析与设计（第三版）

CMOS Digital Integrated Circuits

Analysis and Design

Third Edition



[美] Sung-Mo Kang 著
Yusuf Leblebici

王志功 窦建华 等译

Mc
Graw
Hill



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 数字集成电路

——分析与设计

(第三版)

CMOS Digital Integrated Circuits
Analysis and Design
Third Edition

[美] Sung-Mo Kang 著
Yusuf Leblebici

王志功 窦建华 等译

Publishing House of Electronics Industry
北京·BEIJING

内 容 简 介

本书详细讲述了 CMOS 数字集成电路,反映了现代技术的发展水平,提供了电路设计的最新资讯。本书共有十五章。前八章详细讨论了 MOS 晶体管的相关特性和工作原理、基本反相器电路设计、组合逻辑电路及时序逻辑电路的结构与工作原理;第 9 章介绍应用于先进 VLSI 芯片设计的动态逻辑电路;第 10 章介绍先进的半导体存储电路;第 11 章介绍低功耗 CMOS 逻辑电路;第 12 章介绍双极型晶体管基本原理和 BiCMOS 数字电路设计;第 13 章详细介绍芯片的 I/O 设计;第 14 章和第 15 章分别讨论电路的可制造性设计和可测试性设计这两个重要问题。

本书是现代数字集成电路设计的理想教材和参考书。可供与集成电路设计领域有关的各电类专业的本科生和研究生使用,也可供从事集成电路设计、数字系统设计和 VLSI 设计等领域的工程师参考。

Sung-Mo Kang, Yusuf Leblebici: **CMOS Digital Integrated Circuits: Analysis and Design, Third Edition.**

ISBN 0-07-246053-9

Copyright © 2003 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 in 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 Publishing House of Electronics Industry. Copyright © 2005.

本书中文简体字翻译版由电子工业出版社和美国麦格劳-希尔教育出版(亚洲)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或抄袭本书的任何部分。

本书封面贴有 McGraw-Hill 公司激光防伪标签,无标签者不得销售。

版权贸易合同登记号 图字:01-2003-1831

图书在版编目(CIP)数据

CMOS 数字集成电路——分析与设计(第三版)/(美)宋莫康等著;王志功等译.

-北京:电子工业出版社,2005.1

(国外电子与通信教材系列)

书名原文:CMOS Digital Integrated Circuits: Analysis and Design, Third Edition

ISBN 7-5053-9951-9

I. C... II. ①宋... ②王... III. ①数字集成电路-电路分析-教材 ②数字集成电路-电路设计-教材 IV. TN431.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2004)第 118716 号

责任编辑:周宏敏

印 刷:北京兴华印刷厂

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

经 销:各地新华书店

开 本:787 × 1092 1/16 印张:31 字数:794 千字

印 次:2005 年 1 月第 1 次印刷

定 价:48.00 元

凡购买电子工业出版社的图书,如有缺损问题,请向购买书店调换;若书店售缺,请与本社发行部联系。联系电话:(010)68279077。质量投诉请发邮件至 zts@phei.com.cn, 盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

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。

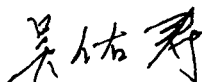
我国领导部门对教材建设一直非常重视。20世纪80年代,在原教委教材编审委员会的领导下,汇集了高等院校几百位富有教学经验的专家,编写、出版了一大批教材;很多院校还根据学校的特点和需要,陆续编写了大量的讲义和参考书。这些教材对高校的教学工作发挥了极好的作用。近年来,随着教学改革不断深入和科学技术的飞速进步,有的教材内容已比较陈旧、落后,难以适应教学的要求,特别是在电子学和通信技术发展神速、可以讲是日新月异的今天,如何适应这种情况,更是一个必须认真考虑的问题。解决这个问题,除了依靠高校的老师 and 专家撰写新的符合要求的教科书外,引进和出版一些国外优秀电子与通信教材,尤其是有选择地引进一批英文原版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

出版说明

进入21世纪以来,我国信息产业在生产和科研方面都大大加快了发展速度,并已成为国民经济发展的支柱产业之一。但是,与世界上其他信息产业发达的国家相比,我国在技术开发、教育培训等方面都还存在着较大的差距。特别是在加入WTO后的今天,我国信息产业面临着国外竞争对手的严峻挑战。

作为我国信息产业的专业科技出版社,我们始终关注着全球电子信息技术的发展方向,始终把引进国外优秀电子与通信信息技术教材和专业书籍放在我们工作的重要位置上。在2000年至2001年间,我社先后从世界著名出版公司引进出版了40余种教材,形成了一套“国外计算机科学教材系列”,在全国高校以及科研部门中受到了欢迎和好评,得到了计算机领域的广大教师与科研工作者的充分肯定。

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,将有助于我国信息产业培养具有国际竞争能力的技术人才,也将有助于我国国内在电子与通信教学工作中掌握和跟踪国际发展水平。根据国内信息产业的现状、教育部《关于“十五”期间普通高等教育教材建设与改革的意见》的指示精神以及高等院校老师们反映的各种意见,我们决定引进“国外电子与通信教材系列”,并随后开展了大量准备工作。此次引进的国外电子与通信教材均来自国际著名出版商,其中影印教材约占一半。教材内容涉及的学科方向包括电路理论与应用、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,其中既有本科专业课程教材,也有研究生课程教材,以适应不同院系、不同专业、不同层次的师生对教材的需求,广大师生可自由选择 and 自由组合使用。我们还将与国外出版商一起,陆续推出一些教材的教学支持资料,为授课教师提供帮助。

此外,“国外电子与通信教材系列”的引进和出版工作得到了教育部高等教育司的大力支持和帮助,其中的部分引进教材已通过“教育部高等学校电子信息科学与工程类专业教学指导委员会”的审核,并得到教育部高等教育司的批准,纳入了“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”。

为做好该系列教材的翻译工作,我们聘请了清华大学、北京大学、北京邮电大学、东南大学、西安交通大学、天津大学、西安电子科技大学、电子科技大学等著名高校的教授和骨干教师参与教材的翻译和审校工作。许多教授在国内电子与通信专业领域享有较高的声望,具有丰富的教学经验,他们的渊博学识从根本上保证了教材的翻译质量和专业学术方面的严格与准确。我们在此对他们的辛勤工作与贡献表示衷心的感谢。此外,对于编辑的选择,我们达到了专业对口;对于从英文原书中发现的错误,我们通过作者联络、从网上下载勘误表等方式,逐一进行了修订;同时,我们对审校、排版、印制质量进行了严格把关。

今后,我们将进一步加强同各高校教师的密切关系,努力引进更多的国外优秀教材和教学参考书,为我国电子与通信教材达到世界先进水平而努力。由于我们对国内外电子与通信教育的发展仍存在一些认识上的不足,在选题、翻译、出版等方面的工作中还有许多需要改进的地方,恳请广大师生和读者提出批评及建议。

电子工业出版社

教材出版委员会

- | | | |
|-----|-----|--|
| 主任 | 吴佑寿 | 中国工程院院士、清华大学教授 |
| 副主任 | 林金桐 | 北京邮电大学校长、教授、博士生导师 |
| | 杨千里 | 总参通信部副部长，中国电子学会会士、副理事长
中国通信学会常务理事 |
| 委员 | 林孝康 | 清华大学教授、博士生导师、电子工程系副主任、通信与微波研究所所长
教育部电子信息科学与工程类专业教学指导分委员会委员 |
| | 徐安士 | 北京大学教授、博士生导师、电子学系主任
教育部电子信息与电气学科教学指导委员会委员 |
| | 樊昌信 | 西安电子科技大学教授、博士生导师
中国通信学会理事、IEEE 会士 |
| | 程时昕 | 东南大学教授、博士生导师、移动通信国家重点实验室主任 |
| | 郁道银 | 天津大学副校长、教授、博士生导师
教育部电子信息科学与工程类专业教学指导分委员会委员 |
| | 阮秋琦 | 北京交通大学教授、博士生导师
计算机与信息技术学院院长、信息科学研究所所长 |
| | 张晓林 | 北京航空航天大学教授、博士生导师、电子信息工程学院院长
教育部电子信息科学与电气信息类基础课程教学指导分委员会委员 |
| | 郑宝玉 | 南京邮电学院副院长、教授、博士生导师
教育部电子信息与电气学科教学指导委员会委员 |
| | 朱世华 | 西安交通大学副校长、教授、博士生导师、电子与信息工程学院院长
教育部电子信息科学与工程类专业教学指导分委员会委员 |
| | 彭启琮 | 电子科技大学教授、博士生导师、通信与信息工程学院院长
教育部电子信息科学与电气信息类基础课程教学指导分委员会委员 |
| | 毛军发 | 上海交通大学教授、博士生导师、电子信息与电气工程学院副院长
教育部电子信息与电气学科教学指导委员会委员 |
| | 赵尔沅 | 北京邮电大学教授、《中国邮电高校学报（英文版）》编委会主任 |
| | 钟允若 | 原邮电科学研究院副院长、总工程师 |
| | 刘彩 | 中国通信学会副理事长、秘书长 |
| | 杜振民 | 电子工业出版社原副社长 |
| | 王志功 | 东南大学教授、博士生导师、射频与光电集成电路研究所所长
教育部电子信息科学与电气信息类基础课程教学指导分委员会主任委员 |
| | 张中兆 | 哈尔滨工业大学教授、博士生导师、电子与信息技术研究学院院长 |
| | 范平志 | 西南交通大学教授、博士生导师、计算机与通信工程学院院长 |

译者序

“CMOS Digital Integrated Circuits: Analysis and Design”，即《CMOS 数字集成电路——分析与设计》一书是美国巴斯肯工学院 Sung-Mo “Steve” Kang（康松默，“史坦夫”）教授和洛桑瑞士联邦工学院 Yusef Leblebici（约瑟夫·列波列比西）教授编著的一本讨论 CMOS 逻辑电路的教材。该书 1995 年首版，1998 年、2002 年出版了第二版和第三版，在多所大学作为教材使用。

我们受电子工业出版社的委托，组织对该书的 2002 年版（即第三版）进行了翻译，意在为我国正在蓬勃兴起的集成电路设计人才培养提供可直接使用的教材，或为采用该原版教材进行双语教学的师生提供对照阅读的中文文本。

在本书的翻译过程中，东南大学的朱恩老师和合肥工业大学的吴玺、郭铭铭老师都对该书做出了贡献；合肥工业大学的常传文、钱立旺、郑霆、陈守府、潘矢一、常虹、韩芳芳、杜江、郭建洲、唐亮、徐宜彬、姜磊、张纯青、郭怡等同学参与了部分章节的翻译工作；东南大学的唐路、鲍剑、刘永旺、池毓宋、周忻、沈志远、姜辉、黄璐、蒋俊洁、郑欣、肖洁、张少勇、钱枫、张震宇、朱礼安、凌云、黄茜等同学参与了部分章节的校对，在此对他们表示感谢。

鉴于时间紧迫，译者水平有限，译文中难免有错误之处，敬请读者批评指正。

译者

2004 年 10 月

前 言

CMOS (互补金属氧化物半导体) 数字集成电路已成为当今信息时代一种领先的创新技术。由于具有低功耗、大噪声容限以及易于设计等固有特点, CMOS 集成电路在开发研制随机存取存储器 RAM、微处理器、数字信号处理 DSP 和专用集成电路 ASIC 芯片方面得到了广泛的应用。随着在笔记本电脑、个人数字助理 PDA、便携式电话和多媒体代理等芯片开发方面对于低功耗、低噪声电子系统日益增长的需要, CMOS 电路的广泛应用将持续增长。

CMOS 集成电路涉及的领域非常广泛, 通常分为数字 CMOS 电路和模拟 CMOS 电路两类。本书将集中讨论 CMOS 数字集成电路。然而需要指出的是: 随着超深亚微米制作工艺、极低的工作电压和 GHz 级工作频率带来的挑战, 经典的数字 CMOS 电路设计与模拟 CMOS 电路设计的界限已渐趋模糊。因此, 作者将试图从“模拟”的角度来分析和设计数字 CMOS 电路, 例如用器件和电路的模拟和连续特性来实现数字化功能。

作者在 20 世纪 90 年代初期即计划撰写本书, 当时我们二人正在从事本科及研究生的数字 IC 基础教学。在乌尔瓦那-尚佩恩的伊利诺伊大学 (University of Illinois at Urbana-Champaign) 任教期间, 我们在高年级工程技术选修课 (即 ECE382——大规模集成电路设计) 教学中尝试选用已有的教材, 然而老师和同学们一致反映需要一本深入讨论 CMOS 逻辑电路的全新教材, 因此作者通过整理多年的上课讲义开始编撰本书。从 1993 年起, 作者在乌尔瓦那-尚佩恩的伊利诺伊大学、伊斯坦布尔技术大学 (Istanbul Technical University)、伍斯特工学院 (Worcester Polytechnic Institute)、洛桑瑞士联邦工学院 (Swiss Federal Institute of Technology in Lausanne) 使用了这些新版的讲义。从广大同学、同行及审阅者的好评中, 我们得到了极大的肯定和鼓舞。于 1995 年末出版了《CMOS 数字集成电路——分析与设计》的第一版。

在第一版出版后不久, 众多使用本书的师生提出了许多建设性的意见, 作者迫切感到本书有待修改。作者对低功耗电路的设计、高速电路设计中的互连线问题、深亚微米电路设计等问题进行了修改和补充, 并且针对存储电路的新发展提供了众多更为精确有效的处理方法。在 CMOS 数字电路这个发展异常迅速的领域中, 一本教科书只有通过不断的修改, 及时反映当今的技术发展水平, 才能保证具有高的学术水平。基于这种认识, 作者对本书不断地进行修改, 先后于 1998 年、2002 年出版了第二版和第三版, 以反映技术水平和电路设计实践的最新发展。

本书可作为高年级本科生和一年级研究生的教材, 也可供从事集成电路设计、数字设计、VLSI 等领域的工程师参考。数字集成电路设计正在持续高速地发展, 作者也竭尽全力对本书所涵盖的问题提供最新的资料。本书共分为十五章, 依据作者的教学经验, 在一学期内教授本书所有内容略显局促, 因此推荐按照如下计划授课: 在面向本科生的教学中, 用一学期的时间来讲授前十章有关 CMOS 数字集成电路的内容。如时间允许, 还可有选择地讲授第 11、12 和 13 章的内容。本书也可安排为两学期讲授, 可以对第 13 章以后的章节中的新问题进行详细的探讨。在面向研究生的教学中, 本书的前十章和后五章可安排在一个学期内讲授。

本书的前八章详细讨论 MOS 晶体管及其相关特性、静态和动态工作原理与分析以及基本反相

器电路的设计、组合逻辑电路及时序逻辑电路的结构与工作原理。需要指出的是，由于本书的前半部分主要讨论的是与数字 VLSI 及 ASIC 设计相关的一些数字 IC 设计方法，作者认为有必要在本书的开头加以说明。因此第 1 章的内容有所扩充，将详细介绍一些 VLSI 的设计方法。第 6 章深入讨论芯片上的互连线模型及互连线上的延迟时间计算，并将完整介绍数字集成电路的开关特性。第 9 章单独介绍应用于达到领先水平的 VLSI 芯片上的动态逻辑电路。第 10 章在内容和表达形式方面都做了全面的修改，深入地介绍许多达到当今领先水平的半导体存储电路。

由于低功耗电路设计的重要性日益增加，作者在第 11 章将致力于低功耗的 CMOS 逻辑电路的讨论，全面覆盖了低功耗大规模数字集成电路的设计方法和实例。由于在高速电路设计中双极型和 BiCMOS 电路的持续运用，作者认为至少应开辟一个章节来介绍双极型晶体管的工作原理。因此，第 12 章将通过双极型晶体管基本原理的全面介绍来引入 BiCMOS 数字电路设计。第 13 章将对芯片的 I/O 设计做详细介绍。对于诸如 ESD 保护电路、时钟分配、时钟缓冲及 latch-up 效应等一系列不可忽视的问题亦给出了详细的讨论。最后，第 14 章和第 15 章分别讨论电路的可制造性设计和可测试性设计这两个重要问题。

作者曾就本书中的 nMOS 电路进行了长篇幅的讨论。从教学的角度来看，对 nMOS 电路进行一些介绍是有益的。学习 nMOS 电路将有助于对其他场效应管电路（如 GaAs 电路）的学习，因为其电路结构与耗尽型负载 nMOS 电路相似。为了强调广泛应用于数字电路设计的负载的概念，作者在本书多处介绍了基本的耗尽型负载 nMOS 电路和与其对应的 CMOS 电路。

尽管作者花费了大量的时间和精力从事影印手稿的准备，但书中难免存在不足，敬请读者对本书的结构和内容给予指正批评。

目 录

第 1 章 概论	1
1.1 发展历史	1
1.2 本书的目标和结构	4
1.3 电路设计举例	6
1.4 VLSI 设计方法综述	14
1.5 VLSI 设计流程	15
1.6 设计分层	17
1.7 规范化、模块化和本地化的概念	18
1.8 VLSI 的设计风格	20
1.9 设计质量	29
1.10 封装技术	31
1.11 计算机辅助设计技术	33
1.12 习题	34
第 2 章 MOS 场效应管的制造	36
2.1 引言	36
2.2 制造工艺的基本步骤	36
2.3 CMOS n 阱工艺	44
2.4 版图设计规则	44
2.5 全定制掩膜版图设计	51
2.6 习题	55
第 3 章 MOS 晶体管	64
3.1 金属-氧化物-半导体 (MOS) 结构	64
3.2 外部偏置下的 MOS 系统	67
3.3 MOS 场效应管 (MOSFET) 的结构和作用	69
3.4 MOSFET 的电流-电压特性	76
3.5 MOSFET 的收缩和小尺寸效应	86
3.6 MOSFET 电容	97
3.7 习题	105
第 4 章 用 SPICE 进行 MOS 管建模	109
4.1 概述	109
4.2 基本概念	109

4.3	一级模型方程	111
4.4	二级模型方程	113
4.5	三级模型方程	117
4.6	先进的 MOSFET 模型	118
4.7	电容模型	118
4.8	SPICE MOSFET 模型的比较	121
4.9	附录	123
4.10	习题	125
第 5 章	MOS 反相器的静态特性	126
5.1	概述	126
5.2	电阻负载型反相器	131
5.3	n 型 MOSFET 负载反相器	138
5.4	CMOS 反相器	146
5.5	习题	159
第 6 章	MOS 反相器的开关特性和体效应	162
6.1	概论	162
6.2	延迟时间的定义	163
6.3	延迟时间的计算	164
6.4	延迟限制下的反相器设计	171
6.5	互连线电容的估算	179
6.6	互连线延迟的计算	187
6.7	CMOS 反相器的开关功耗	193
6.8	附录	199
6.9	习题	201
第 7 章	组合 MOS 逻辑电路	204
7.1	概述	204
7.2	带耗尽型 nMOS 负载的 MOS 逻辑电路	205
7.3	CMOS 逻辑电路	213
7.4	复合逻辑电路	219
7.5	CMOS 传输门	229
7.6	习题	236
第 8 章	时序 MOS 逻辑电路	241
8.1	概述	241
8.2	双稳态元件的特性	242
8.3	SR 锁存电路	245
8.4	钟控锁存器和触发器电路	250
8.5	CMOS 的 D 锁存器和边沿触发器	256

8.6	附录	261
8.7	习题	264
第 9 章	动态逻辑电路	267
9.1	概述	267
9.2	传输晶体管电路的基本原理	268
9.3	电压自举技术	276
9.4	同步动态电路技术	279
9.5	动态 CMOS 电路技术	283
9.6	高性能动态逻辑 CMOS 电路	286
9.7	习题	299
第 10 章	半导体存储器	303
10.1	概述	303
10.2	动态随机存储器 (DRAM)	306
10.3	静态随机存取存储器 (SRAM)	329
10.4	非易失存储器	340
10.5	闪存	350
10.6	铁电随机存储器 (FRAM)	357
10.7	习题	359
第 11 章	低功耗 CMOS 逻辑电路	363
11.1	概述	363
11.2	功耗综述	364
11.3	电压按比例降低的低功率设计	371
11.4	开关激活率的估算和最佳化	379
11.5	减小开关电容	384
11.6	绝热逻辑电路	385
11.7	习题	390
第 12 章	BiCMOS 逻辑电路	392
12.1	概述	392
12.2	双极型晶体管 (BJT) 的结构和工作原理	394
12.3	BJT 的动态特性	403
12.4	基本 BiCMOS 电路的静态特性	408
12.5	BiCMOS 逻辑电路的开关延迟	410
12.6	BiCMOS 的应用	414
12.7	习题	417
第 13 章	芯片输入输出电路	420
13.1	概述	420

13.2	静电放电 (ESD) 保护	420
13.3	输入电路	423
13.4	输出电路和 $L(di/dt)$ 噪声	426
13.5	片内时钟生成和分配	430
13.6	“闩锁”现象及其预防措施	434
13.7	习题	439
第 14 章	产品化设计	441
14.1	概述	441
14.2	工艺变化	441
14.3	基本概念和定义	443
14.4	实验设计与性能建模	447
14.5	参数成品率的评估	453
14.6	参数成品率的最大值	456
14.7	最坏情况分析	458
14.8	性能参数变化的最小化	462
14.9	习题	465
第 15 章	可测性设计	468
15.1	概述	468
15.2	故障类型和模型	468
15.3	可控性和可观察性	471
15.4	专用可测试性设计技术	472
15.5	基于扫描的技术	474
15.6	内建自测 (BIST) 技术	475
15.7	电流监控 I_{DDQ} 检测	477
15.8	习题	478
参考文献		479

第1章 概 论

1.1 发展历史

由于集成技术和大规模系统设计的飞速进步，电子工业在过去的几十年里得到了惊人的发展。集成电路在高性能计算、通信以及消费类电子等领域中的应用一直在飞速发展。事实上，正是这些应用所需求的计算和信息处理能力成为电子领域快速发展的驱动力。图1.1所示的是近几十年信息技术的发展趋势。当前的前沿技术（如低比特率视频和蜂窝通信）已经为终端用户提供了一定的处理能力和便捷性，人们希望这种对VLSI和系统设计具有重大影响的发展趋势能够延续下去。对高性能的处理能力和带宽的不断增加的需求是信息业务最重要的特征之一（例如处理实时的视频信号）。另一个重要特征是信息业务更趋向个人化，这将意味着信息处理设备必须更加智能化，并具有便携性。便携化的趋势（亦即分布式系统结构）成为系统集成的主要驱动力之一。当然，集中化的趋势[例如在NC（网络计算）和视频业务中需要的高性能信息系统]也同样需要。

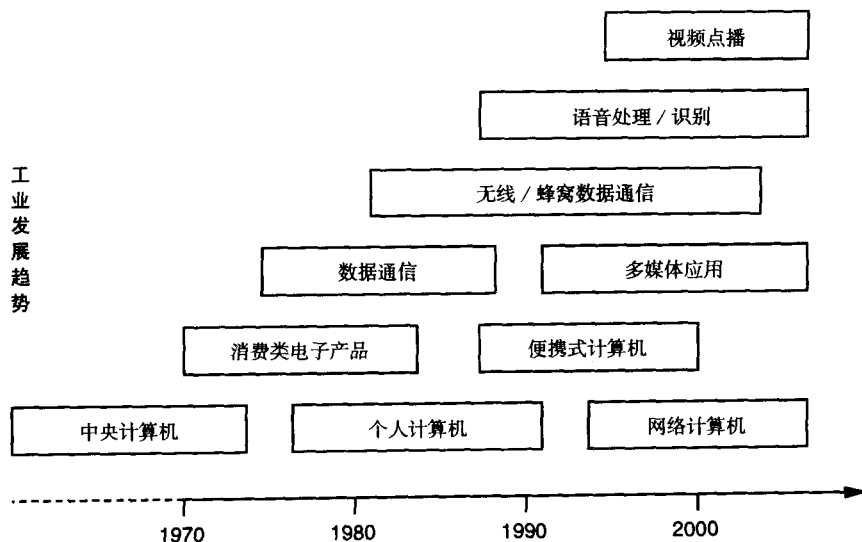


图 1.1 信息技术的发展趋势

随着各种数据处理和通信设备功能越来越复杂，将众多功能集成在一块小芯片之上的需求一直在增加。集成度是由单块芯片上逻辑门的数量来衡量的。由于工艺技术和互连技术的快速进步，过去三十年来芯片的集成度一直在稳步提高。表1.1所示的是过去三十年来集成电路逻辑复杂度的发展以及每个时期的里程碑。这里把电路复杂度作为惟一的衡量标准。

根据功能不同，一个逻辑块可以包含 10~100 个晶体管。而 ULSI 芯片，例如 DEC 公司的 Alpha 或 Intel 公司的 Pentium 芯片则包含数千万到上亿个晶体管。需要说明的是，VLSI 有时也指 ULSI 一类的芯片，并不完全与表 1.1 一致。

表 1.1 集成电路逻辑复杂度的发展

电路规模	年代	复杂度（每个芯片上逻辑块数量）
单个晶体管	1958	<1
逻辑单元（1个门）	1960	1
多功能	1962	2~4
复杂功能	1964	5~20
中等规模集成电路（MSI）	1967	20~200
大规模集成电路（LSI）	1972	200~2 000
超大规模集成电路（VLSI）	1978	2 000~20 000
甚大规模集成电路（ULSI）	1989	20 000~?

一块集成了大量功能的芯片通常有以下几个特点：

- 更小的面积 / 体积，更加紧缩
- 更低的功耗
- 需要更少的系统级测试
- 由于改进了芯片的互连，可靠性更高
- 由于明显降低了互连长度，速度更快
- 更节省费用

因此，在未来的一段时间内，电路将继续朝着集成迈进。设备制造技术的进步使得集成电路的最小特征尺寸（即晶体管的最小沟道长度或芯片上可实现的互连线宽度）逐步减少。图1.2所示为20世纪70年代后期以来集成电路中晶体管最小特征尺寸的发展过程。在1980年，也就是VLSI时代刚刚开始的时候，典型的最小特征尺寸为 $2\mu\text{m}$ ，并且当时预计到2000年将减小到 $0.3\mu\text{m}$ 。然而实际技术的发展远远超出人们的预想：1995年最小特征尺寸就达到了 $0.25\mu\text{m}$ ，而在2001年已经达到 $0.18\mu\text{m}$ 。到1994年，第一个64 Mb的DRAM（动态随机存储器）和Intel Pentium微处理器芯片就包含了300万个晶体管，这是当时集成密度的极限。1997年初，NEC公司宣布第一个基于 $0.15\mu\text{m}$ 制造技术的4 Gb DRAM生产成功。根据ITRS（国际半导体技术规划局）的预计，到2008年MOS晶体管的特征尺寸将达到70 nm。每个芯片上集成的晶体管数将达到30亿个。

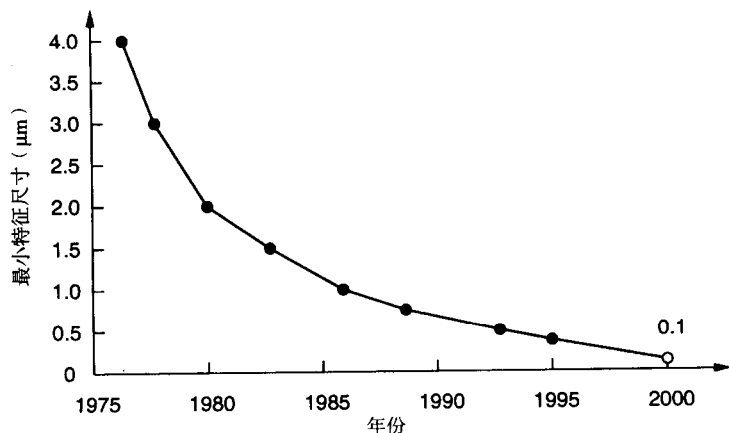


图 1.2 集成电路最小特征尺寸的发展过程

比较集成电路的集成度时可以发现,存储芯片与逻辑芯片之间有明显的区别。图1.3所示的是从1970年以来存储芯片与逻辑芯片集成度的发展。在过去三十年中,每个芯片所包含的晶体管数量呈指数率增长,这就证明了摩尔在20世纪60年代早期关于芯片复杂度增长速率的预言(摩尔定律)。由于复杂的互连线占用了大量的芯片面积,逻辑芯片所包含的晶体管数量明显变少。而存储芯片则非常规则,因而互连线所占用的面积大大减少。这也是存储电路芯片复杂度(每个芯片含有的晶体管数量)增长速率更高的主要原因之一。

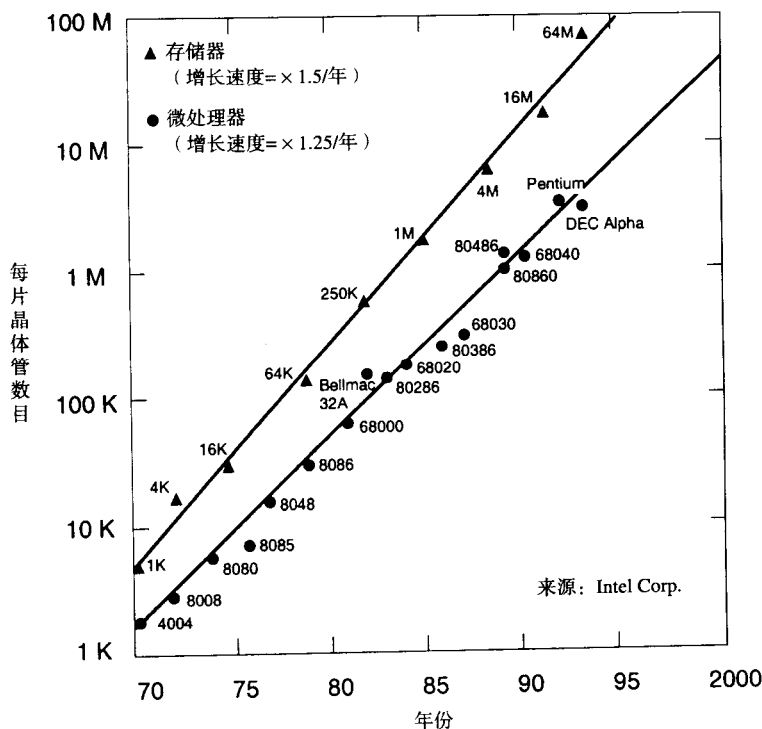


图 1.3 存储芯片和逻辑芯片集成度的比较

数字 CMOS (互补金属氧化物半导体) 集成电路是超大规模集成电路在高性能计算和其他科学和工程领域中应用的驱动力, 由于具有低功耗、高可靠性以及采用诸如动态电路来获得高速的技术和工艺技术不断进步等突出特征, 人们对于数字 CMOS 集成电路的需求越来越大。

人们计划在十年内将 CMOS 集成电路的最小特征尺寸降到 $0.035\mu\text{m}$ (35nm)。若能够达到这个技术水平, 单个逻辑芯片上的集成度就能达到几百亿的晶体管, 而对存储芯片来说集成度会更高。这对于芯片开发人员来说, 无论是在工艺、设计和测试方面, 还是在项目管理方面都是一个巨大的挑战。只有通过“各个击破”的策略, 并采用更加先进的计算机辅助设计 (CAD) 工具和自动设计方法, VLSI 的设计问题才能得到解决。

超高速电路则采用双极型硅工艺和砷化镓工艺, 而且这种实践仍将继续。例如, GaAs MESFET (金属半导体场效应管) 工艺已经非常成功地用于实现单片微波集成电路 (MMIC)。但由于其工艺的难度和相对高的功耗, MESFET 不适合用于 VLSI 或 ULSI, 尽管会在一些特殊应用场合继续得到使用。只要 CMOS 工艺按比例缩小的趋势继续保持, 其他工艺就极有可能仍是未来的工艺。

1.2 本书的目标和结构

本书的目标是帮助读者培养对数字 CMOS 电路和芯片进行深入分析与设计的能力。超大规模集成芯片的开发需要一支由市场专家、系统结构设计工程师、逻辑设计工程师、电路与版图设计工程师、封装工程师、测试工程师以及工艺与器件工程师等不同专业人员组成的团队。最基本的任务是完成计算机辅助设计和优化。任何一书中都不可能涉及到所有的开发问题。因此，本书着重介绍数字电路，并且介绍深入理解 CMOS 数字电路所必需的器件规则和工艺的相关知识。

读者常常会感到“只见树木，不见森林”。然而对于超大规模集成电路的设计来说，采用适当的边界条件进行全面的优化设计是很重要的。最终设计的目标是关注所有互连的晶体管的整体性能而不是单个管子的性能，事实上这也是集成电路的引人入胜之处。因此互连的问题与单个晶体管问题同样重要。不管单个晶体管的性能有多好，如果没有同样好的互连技术，就会由于寄生电容和寄生电阻的影响使总体性能变得很差，从而导致晶体管与逻辑门之间的互连线产生很大的延迟。

本书可作为高年级本科生和一年级研究生数字电路设计课程的教材，对 VLSI 设计工程师也会有很大帮助。书中绝大部分内容都作为本科和研究生课程的讲义在包括两位作者所在的伊利诺伊大学电子与计算机工程系等许多学校讲授数年。我们假定本书的读者应该已具有足够的半导体器件、电子线路分析与设计以及逻辑理论的基础知识。全书非常强调逻辑设计、电路设计以及版图设计之间的相互联系，重点是晶体管级的电路分析与设计，这就要求读者除了对传输延时、噪声容限以及功耗这些器件特性如何影响电路的整体特性有深刻理解外，还需要有相当熟练的电流电压计算知识。

图1.4 描述了一门典型的数字电路课程各主题的相关顺序以及覆盖的范围。首先是电路分析、理解和使用各种 MOSFET 器件模型需要的基本器件的物理知识。复习过基本器件之后，重点将从单个器件转向诸如反相器一类的简单的双晶体管电路，然后转向更加复杂的逻辑电路。我们将看到，随着问题讨论的不断深入，每个标题所涉及内容的广度也在不断扩展。事实上，在实现复杂电路和系统时，我们应考虑众多的变化。因此，我们将研究大规模系统实现的一些典型例子，对性能、可靠性和制造工艺上的优缺点进行比较。

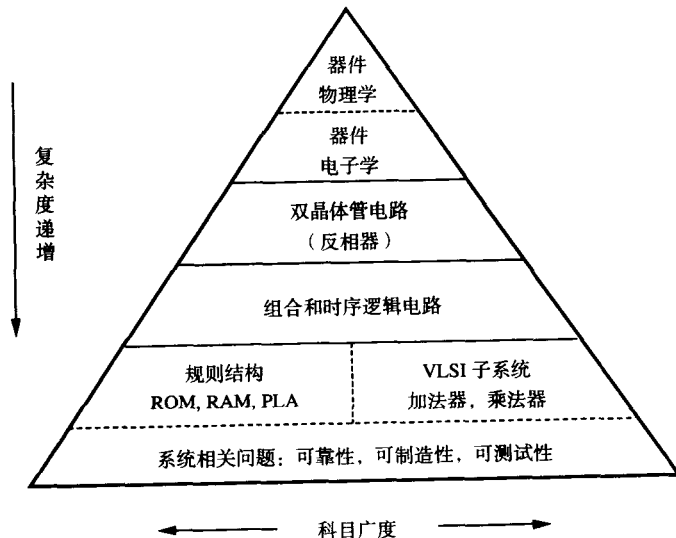


图 1.4 一门典型的数字集成电路课程所覆盖的科目顺序