

国外电子与通信教材系列

PEARSON

数字集成电路

——电路、系统与设计

(第二版)

Digital Integrated Circuits
A Design Perspective
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

数字集成电路

——电路、系统与设计

(第二版)

Digital Integrated Circuits
A Design Perspective
Second Edition

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



内 容 简 介

本书是美国加州大学伯克利分校经典教材。本书分三部分：基本单元、电路设计和系统设计。在对MOS器件和连线的特性做了简要介绍之后，深入分析了反相器，并逐步将这些知识延伸到组合逻辑电路、时序逻辑电路、控制器、运算电路及存储器这些复杂数字电路与系统的设计中。本书以0.25微米CMOS工艺的实际电路为例，讨论了深亚微米器件效应、电路最优化、互连线建模和优化、信号完整性、时序分析、时钟分配、高性能和低功耗设计、设计验证、芯片测试和可测性设计等主题，着重探讨了深亚微米数字集成电路设计面临的挑战和启示。

本书可作为高等院校电子科学与技术、电子与信息工程、计算机科学与技术等专业高年级本科生和研究生有关数字集成电路设计方面课程的教科书，也可作为从事这一领域的工程技术人员的参考书。

Authorized translation from the English language edition, entitled *Digital Integrated Circuits: A Design Perspective*, Second Edition, 9780130909961 by Jan M. Rabaey, Anantha Chandrakasan, Borivoje Nikolić, published by Pearson Education, Inc., publishing as Prentice Hall, Copyright © 2003 by Pearson Education, Inc.

All rights reserved. No part of this book may be reproduced or transmitted in any form or by any means, electronic or mechanical, including photocopying, recording or by any information storage retrieval system, without permission from Pearson Education, Inc.

CHINESE SIMPLIFIED language edition published by PEARSON EDUCATION ASIA LTD., and PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY Copyright © 2010.

本书中文简体字版专有出版权由 Pearson Education（培生教育出版集团）授予电子工业出版社。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。

本书贴有 Pearson Education（培生教育出版集团）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：01-2003-0352

图书在版编目（CIP）数据

数字集成电路：电路、系统与amp;设计：第2版 /（美）拉贝艾（Rabaey, J. M.）等著；周润德等译.

北京：电子工业出版社，2010.11

（国外电子与通信教材系列）

书名原文：Digital Integrated Circuits: A Design Perspective, Second Edition

ISBN 978-7-121-11982-8

I. ①数… II. ①拉… ②周… III. ①数字集成电路 - 电路设计 - 高等学校 - 教材 IV. ①TN431.2

中国版本图书馆CIP数据核字（2010）第198096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：36 字数：928千字 彩插：4页

印 次：2010年11月第1次印刷

定 价：59.00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 zltz@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。

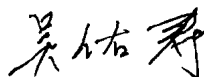
我国领导部门对教材建设一直非常重视。20世纪80年代,在原教委教材编审委员会的领导下,汇集了高等院校几百位富有教学经验的专家,编写、出版了一大批教材;很多院校还根据学校的特点和需要,陆续编写了大量的讲义和参考书。这些教材对高校的教学工作发挥了极好的作用。近年来,随着教学改革不断深入和科学技术的飞速进步,有的教材内容已比较陈旧、落后,难以适应教学的要求,特别是在电子学和通信技术发展神速、可以讲是日新月异的今天,如何适应这种情况,更是一个必须认真考虑的问题。解决这个问题,除了依靠高校的老师 and 专家撰写新的符合要求的教科书外,引进和出版一些国外优秀电子与通信教材,尤其是有选择地引进一批英文原版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

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,我们通过与作者联络、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 杨千里	北京邮电大学校长、教授、博士生导师 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、博士生导师
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
	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
	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 国务院学位委员会学科评议组成员
	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副主任委员 中国电子学会常务理事
	郑宝玉	南京邮电大学副校长、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 教育部电子信息科学与工程类专业教学指导分委员会副主任委员
	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兼秘书长，教授级高工 信息产业部通信科技委副主任
	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 教育部高等学校电子电气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院院长
	范平志	西南交通大学教授、博士生导师、信息科学与技术学院院长

译 者 序

自从美国加州大学伯克利分校的 Jan M. Rabaey 教授所著的《数字集成电路——电路、系统与amp;设计》一书的第一版于 1996 年出版以来，一直深受国内外广大读者（包括本科生、研究生、教师和工程技术人员）的欢迎。然而自那时候起，CMOS 的制造工艺继续以惊人的步伐前进，目前已经达到了前所未有的深亚微米的精度。进入到深亚微米范围后，器件特性的变化引起了一系列的问题，它影响到数字集成电路的可靠性、成本、性能以及功耗。对这些问题的深入讨论是本书第二版（以 0.25 微米的 CMOS 工艺作为讨论的基础）与第一版（以 1.2 微米工艺作为讨论的基础）之间的主要区别。考虑到 MOS 电路现已占有 99% 的数字集成电路市场份额，第二版删去了第一版中有关双极型和 GaAs 的内容，从而完全集中在 CMOS 集成电路上。

第二版保留了第一版的写作基本精神和编写目的——在数字设计中建立起电路和系统之间的桥梁。不同于其他有关数字集成电路设计的教科书，本书不是孤立地介绍“数字电路”、“数字系统”和“设计方法”，而是把这三者有机地结合起来。全书共 12 章，分为三部分：基本单元、电路设计、系统设计。在对 MOS 器件和连线的特性做了简要的介绍之后，深入分析了数字设计的核心——反相器，并逐步将这些知识延伸到组合逻辑电路、时序逻辑电路（锁存器与寄存器）、控制器、运算电路（加法器、乘法器）以及存储器这些复杂数字电路单元的设计。为了反映数字集成电路设计进入深亚微米领域后正在发生的深刻变化，第二版增加了许多新的内容，包括深亚微米器件效应、电路最优化、互连线建模和优化、信号完整性、时序分析、时钟分配、高性能和低功耗设计、设计验证、对实际制造芯片的确认和测试。在阐述所有这些内容时都列举了现今最先进的设计例子，以着重说明深亚微米数字集成电路设计面临的挑战和启示。本书特别把设计方法学单独列出并分插在有关的各章之后，以强调复杂电路设计者共同面临的感兴趣的问题，即起决定作用的设计参数是什么，设计的哪些部分需要着重考虑而哪些部分又可以忽略，此外还强调了在进行数字电路设计时一定要同时注意电路和系统两方面的问题。每章后面都对未来的发展趋势给出了综述和展望。通过这一独特的介绍分析技术和综合技术的方法，第二版最有效地为读者带来了处理复杂问题所需要的基本知识和设计技能。

本书可作为高等院校电子科学与技术（包括微电子与光电子）、电子与信息工程、计算机科学与技术、自动化等专业高年级本科生和研究生有关数字集成电路设计方面课程的教科书。由于涉及面广并且增加了当前最先进的内容，也使这本教材成为对这一领域的工程技术人员非常有用的参考书。

本书在翻译过程中得到了电子工业出版社的大力支持，得到了清华大学微电子学研究所领导和多位教师的关心，特别是得到了朱钧教授、贺祥庆教授、吴行军副教授、李树国副教授以及海燕、韦莹、钱欣、郝效孟、陆自强、郭磊等多位老师的帮助与指正。我的博士研究生戴宏宇、张盛、王乃龙、杨骞、肖勇、张建良以及博士研究生董良等在完成译稿过程中给予了我很大的支持。我的妻子金申美和女儿周晔不仅帮助翻译修改了部分章节，而且完成了全部的文字输入和文稿整理。在此一并深表谢意。

最后，本书虽经仔细校对，但由于译者水平有限，文中定会有不当或欠妥之处，望读者批评指正。

前 言

新在哪里

欢迎使用本书。在本书第一版出版后的 6 年中，数字集成电路领域已有了某些惊人的进展和变化。IC 制造工艺继续缩小到空前小的尺寸。自写作这本书的第一版以来，最小特征尺寸缩小了近 10 倍，现在已接近 100 nm 的范围。这种尺寸的缩小对数字集成电路的设计产生了两方面的影响。首先，在单片上能设计的复杂性大大提高，为了应对这一挑战，产生了一些新的设计方法和实现策略。与此同时，在尺寸小到深亚微米范围后器件的行为特性发生了变化，从而把一系列影响数字 IC 的可靠性、成本、性能以及功耗的新问题提到了面前。对这些问题的深入讨论是本书第二版与第一版之间的区别所在。

看一下目录就可以知道本版扩大了内容范围，包括深亚微米器件、电路优化、互连模型和优化、信号完整性、时钟和时序以及功耗。所有这些内容都用目前最新的设计例子来说明。同时，鉴于 MOS 现已占有数字 IC 领域 99% 的市场份额，我们删去了像硅双极型和 GaAs 这样较陈旧的内容（不过对此有兴趣的读者仍可以通过本书的网址找到有关这些技术的老章节）。为了强调现今设计过程中方法学的重要性，我们贯穿全书增加了“设计方法插入说明”，每一插入部分着重说明设计过程中特有的一些问题。新版对原书做了重要修订，最大的变化是增加了两个合著者——Anantha 和 Borivoje，他们为本书带来了有关数字 IC 设计方面更宽阔的见地以及有关此领域的最新趋势和挑战。

保留了第一版的基本精神

在进行这些修改的同时，我们一直力图保留第一版的基本精神和编写目的——这就是在数字设计中建立起电路设计和系统设计之间的桥梁。我们从彻底弄清电子器件的操作并深入分析数字设计的核心（反相器）开始，逐步将这些知识引向设计比较复杂的模块，如逻辑门、寄存器、控制器、加法器、乘法器以及存储器。我们认识到当今复杂电路设计者共同面临的感兴趣的问题是：起决定作用的设计参数是什么？设计的哪些部分需要着重考虑而哪些细节又可以忽略？显然，简化是处理日益复杂的数字系统的唯一途径，但是过度简化由于忽略了像时序、互连以及功耗这样一些影响整个电路的效应，又可能导致电路不能工作。为了避免这一点，我们在进行数字电路设计时一定要同时注意电路和系统两方面的问题。这就是本书所采用的方法，通过分析技术和实验技术为读者带来处理复杂问题所需要的知识和技能。

如何阅读本书

本书的核心部分是为大学高年级数字电路设计课程编写的。围绕这一核心，还纳入了一些涵盖更前沿专题的章节。在编写本书的过程中，我们发现很难确定应当包括数字电路设计领域的哪些部分才能满足所有人的需要。一方面，刚刚进入该领域的人希望有关于基本概念的详尽内容；

另一方面，来自原有读者和评阅人的反馈意见又表明希望并需要在深度和广度上增加高层次的前沿专题和当前所提出的问题。提供这样一个全面的讨论造成了这本教材的内容大大超出一学期课程的需要，因此其中较为高深的部分可作为研究生课程的基础。由于本书涉及面广泛且包含最新的前沿内容，也使它成为对专业工程师非常有用的参考书。这里我们假定上这门课的学生对基本的逻辑设计已相当熟悉。

本书在内容的安排上使各章节可以按许多不同的方式来讲授和阅读，只需遵守一些前后顺序关系即可。本书的核心部分由第5章~第8章构成。第1章~第4章可以看成是导论。为了满足一般要求，在第2章中引入了有关半导体制造方面的简短论述。曾经学过半导体器件的学生可以很快地浏览一下第3章。我们十分希望每个人至少都这样做一遍，因为一些重要符号和基础知识都在该章中介绍。此外该章还介绍了一种能用来进行手工分析的深亚微米晶体管最原始的建模方法。为了强调互连在当今数字设计中的重要性，我们将互连建模部分提前到本书的第4章。

第9章~第12章的内容较深，可作为某些课程的重点。例如，侧重电路方面的课程可以增加第9章和第12章的核心材料，侧重数字系统设计的课程则应考虑增加第9章、第10章和第11章的（部分）内容。所有这些内容较深的章节都可以作为研究生课程或后续课程的核心。内容较深的章节在书中都标注有*号。

对于本科高年级的课程，下面列出了几种可能的教学安排顺序。在本书网页上所提供的教师文档（*instructor documentation*）中还列出了一批在某些大学相关课程中所采用的完整的教学大纲中列出的章节号。

电路基础课程（针对器件方面知识较少的学生）：

1, 2.1~2.3, 3, 4, 5, 6, 7, 8, (9.1~9.3, 12)。

稍高级一些的电路课程：

1, (2, 3), 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10.1~10.3, 10.5~10.6, 12。

系统方向的课程：

1, (2, 3), 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10.1~10.4, 11, 12.1~12.2。

“设计方法插入说明”部分可与它们所在章同时选用。

为了保持全书风格一致，各章首先介绍本章主题，接着对概念进行详细深入的讨论。综述一节讨论本章介绍的概念与实际设计之间的关系，以及它们如何会受到未来发展的影响。每一章以小结作为结束，它简要列举了教材中讲过的各个主题。小结后面的进一步探讨和参考文献部分为那些希望更详细了解教材中某些内容的读者提供了丰富的参考资料和线索。

正如书名所示，本书的目的之一是强调数字电路的设计特点。为了树立比较实际的观点和达到真正的理解，在全书各处加入了设计实例和版图。对这些个例的研究可以帮助我们回答像“采用这一技术到底可以节省多少面积、速度或功耗”等这样一些问题。为了模拟真实的设计过程，我们广泛使用了各种设计工具，如电路和开关级的模拟以及版图编辑和提取。全书普遍利用计算机分析来验证手工计算的结果、说明新的概念或考察人工无法分析的复杂特性。

最后，为了便于学习，书中还附有大量的例题。每一章还有一定数量的思考题（答案可以在书末找到），它们有助于激发读者在阅读中进行思考和理解。

本书的全球网络指南

本书有一个全球范围的网络指南 (<http://bwrc.eecs.berkeley.edu/IcBook/index.htm>), 可以提供已全部完成的设计题目和书中最重要图表和照片的全套幻灯片。

与第一版不同的是, 我们决定不把习题集和设计题目放在教科书中, 而是放在本书的网页上。这样就使我们有机会不断更新和扩充题目, 为授课教师提供更有用的工具。目前已有 300 多道富有挑战性的习题。其目的是为不同的读者提供一个独立评判对书中材料理解程度的标准和实际使用某些设计工具的机会。每一道题都说明了教材中与它相关的章节 (如<1.3>)、解题时必须使用的设计工具 (如 SPICE) 及难度等级: 容易 (E)、中等 (M) 和难题 (C)。标有 (D) 的题目含有设计或研究的成分。习题集答案仅提供给选用本书作为教材的 University 老师授课使用。可以通过出版商在一个带密码的网站上获得。

开放型设计题目有助于深入理解设计优化和综合考虑中最重要的问题。当试做这些设计题目时, 建议使用设计编辑、验证和分析工具。在网站上可以找到已全部完成的这些设计题目的结果。

此外, 本书的网站还提供硬件和软件的实验例子、额外的背景资料和有用的关联信息。

本书的亮点

- 将电路和系统在设计方面的观点联系在一起, 使设计者深刻领会复杂数字电路的设计问题, 为随时可能面对的挑战做好准备。
- 全书贯穿以设计为导向的思路, 突出了设计难点和设计准则。在介绍技术时用真实的设计和完整的 SPICE 分析来说明。
- 是第一本专门针对深亚微米器件的电路设计书籍。为了便于叙述, 我们建立了一个用于手工分析的简单晶体管模型, 称为通用 MOS 模型。
- 在说明如何运用最新技术设计高性能或低功耗复杂电路方面有独到之处。全书将速度和功耗放在同等重要的地位。
- 内容涵盖实际系统设计中的重要问题, 例如信号完整性、功耗、互连、封装、时序以及同步问题。
- 独一无二地提供了有关最新设计方法及设计工具的内容, 同时讨论了从一个设计者的角度如何来使用它们。
- 提出数字电路技术将来可能发展的方向。
- 出色的例图和可用于设计的四色插图。
- 进一步探讨和参考文献部分为对某些内容的细节感兴趣的读者提供了丰富的参考资料和线索。
- 由作者的网址通过互联网可以得到更多的指导材料, 包括设计软件、原版幻灯片、习题集、设计题目、实际版图以及软件和硬件实验。

内容概览

快速浏览一下目录可以看到各章的安排顺序以及涵盖的内容与所提倡的设计方法学是一致的。从半导体器件的模型开始, 然后逐渐向上进行, 涉及到反相器、复杂逻辑门 (NAND、NOR、

XOR)、功能模块(加法器、乘法器、移位器、寄存器)和系统模块(数据通路、控制器、存储器)的各个抽象层次。对于这些层次中的每一层,都确定了其最主要的设计参数,建立简化模型并去除了不重要的细节。虽然这种分层建模是设计者处理复杂问题最好的方法,但它也有一些不足之处。这将在第9章和第10章中说明,届时将讨论像互连寄生参数和芯片时序这样对全局有影响的专题。为了进一步强调电路和系统设计这两个分支,我们将书中的内容分为两个主要部分:第二部分(第4章~第7章)主要讲述数字电路设计中电路方面的内容,而第三部分(第8章~第12章)则阐述更多面向系统方面的观点。第一部分(第1章~第4章)是必要的基础知识(设计质量评价、制造工艺、器件和互连模型)。

第1章是全书的引论。在概述了数字电路设计的历史之后,引入了层次化设计的概念和不同的抽象层次。同时介绍了一些基本的质量评价方法,用于帮助量化一个设计的成本、可靠性和性能。

第2章简洁介绍了MOS制造工艺。了解工艺过程中的基本步骤有助于建立对MOS晶体管的三维概念,这对于识别器件寄生参数的来源是非常关键的。器件参数的许多变化也与制造过程有关。本章进一步介绍了设计规则的概念,它是设计者与制造者之间的接口。最后概述了芯片封装工艺,这是一个经常被忽视但在数字IC设计全过程中非常关键的一环。

第3章概括了最基本的设计模块即半导体器件。这一章的主要目的是使读者对MOS管的工作有一个直观的了解,并介绍器件模型,这些模型将在以后的章节中广泛使用。本书将重点放在现代亚微米器件本身及其模型。已经具备器件方面知识的读者可以很快地浏览一下这部分内容。

第4章对导线包括互连线及由此引入的起主要作用的寄生参数进行了仔细分析。我们依次讨论了与导线相关的每一种寄生参数(电容、电阻和电感)。对手工分析和计算机分析用的模型都做了介绍。

第5章涉及到数字设计的核心,即反相器。首先介绍了一些数字门的基本特性。这些可以帮助我们量化一个门的性能和可靠性的参数是针对由两种器件构成的具代表性的反相器结构(即静态互补CMOS)详细推导出来的。在这一章中介绍的技术和方法是非常重要的,因为在分析其他门和更复杂门的结构时将多次重复使用它们。

第6章中这一基础知识被延伸来说明简单和复杂数字CMOS门的设计,如NOR和NAND结构。说明了由于主要设计要求(可靠性、面积、性能或功耗)不同,除互补静态门外还有其他一些CMOS门结构也是很有吸引力的。本章还对现代的一些门及逻辑系列的特性进行了分析和比较,并且介绍了优化复杂门的性能和功耗的技术。

第7章讨论如何利用正反馈或电荷存储来实现存储功能。除了分析传统的双稳态触发器外还介绍了其他一些时序电路,如单稳态和不稳态多谐振荡器。第7章之前的所有各章涉及的都是组合电路,这些电路与系统的过去经历没有关系。与此相反,时序逻辑电路可以记忆和存储过去的状态。

第8章之前的各章介绍数字设计中有关电路方面的步骤。分析和优化过程一直局限于单个的逻辑门。本章将进一步分析各个门如何连接在一起形成系统的构造模块。本书的系统级部分顺理成章地从设计方法学的讨论开始。设计自动化是处理日益复杂的数字设计的惟一方法。第8章中将讨论在有限时间内完成大的设计的重要方法。这一章花费了大量时间来说明今天的设计者可以采用的各种不同的实现方法。定制与半定制、硬布线与固定布线、通用阵列与专用阵列等是其中提到的一些内容。

第9章重新回顾了互连线对数字门功能和性能的影响。连线所引起的寄生电容、电阻和电感

效应随着工艺尺寸的缩小正在变得空前重要。本章介绍了使这些互连寄生参数对电路性能、功耗及可靠性的影响减到最小程度的途径,还阐述了如电源电压分配和输入/输出电路这样一些重要的问题。

第10章详细说明了为使一个时序电路正确工作必须严格控制切换顺序。没有这些时序限制,错误的数字数据可能会被写入存储单元。大多数数字电路采用同步时钟控制方法来确保这一顺序。在第10章中讨论了实现数字电路时序和时钟控制的不同方法。分析了像时钟偏差(skew)这样一些重要效应对数字同步电路行为特性的影响。对同步方法与其他技术(如自定时电路)进行了比较。本章最后简短介绍了同步实现和时钟产生电路。

第11章讨论了各种复杂的运算构造模块,如加法器、乘法器和移位器。这一章非常关键,因为它展示了在第5章和第6章中介绍的设计技术怎样延伸到上一个抽象层次。本章介绍了关键路径的概念并广泛用于性能分析和优化,推导了高层次的性能模型。这些可以帮助设计者对一个设计模块的工作情形和质量好坏有一个基本的洞察,而不需要借助于对基本电路深入细致的分析。

第12章深入讨论了不同类型的存储器和它们的实现。在需要存储大量数据时,数字设计者可以借助称为存储器的特殊电路模块。半导体存储器通过对数字门某些基本特性的折中处理可以达到非常高的存储密度。可靠和快速存储器的设计要借助于外围电路的实现,如译码器、灵敏放大器、驱动器和控制电路,这些都在本章的内容中涵盖了。最后,由于存储器设计的最基本问题是要保证在任何工作环境中器件都能始终如一地工作,所以本章末详细讨论了存储器的可靠性问题。对于大学本科课程来说,这一章和上一章可作为选修教材。

致谢

作者在此要感谢所有对本书手稿的诞生、创作和修改做出贡献的人们。首先,要感谢所有的研究生,是他们多年来的帮助使本书得以完成。还要感谢在伯克利分校学习eecs141和eecs241课程以及在麻省理工学院学习6.374课程的学生,他们在以本书为基础提供的实验课上“吃了不少苦头”。从世界各地的教师、工程师和学生中反馈回来的意见极大地帮助了确定新版的方向以及最终这本书的精细修订。连续不断地发来的一系列电子邮件向我们表明我们的方向是正确的。

我们要特别感谢下列人士为本书所做出的贡献,他们是 Mary-Jane Irwin, Vijay Narayanan, Eby Friedman, Fred Rosenberger, Wayne Burleson, Shekhar Borkar, Ivo Bolsens, Duane Boning, Olivier Franza, Lionel Kimerling, Josie Ammer, Mike Sheets, Tufan Karalar, Huifang Qin, Rhett Davis, Nathan Chan, Jeb Durant, Andrei Vladimirescu, Radu Zlatanovici, Yasuhisa Shimazaki, Fujio Ishihara, Dejan Markovic, Vladimir Stojanovic, SeongHwan Cho, James Kao, Travis Simpkins, Siva Narendra, James Goodman, Vadim Gutnik, Theodoros Konstantakopoulos, Rex Min, Vikas Mehrotra, 以及 Paul-Peter Sotiriadis。衷心感谢他们所给予的帮助、投入和反馈意见。当然我们还要感谢那些为第一版的创作和出版提供了帮助的人们。

非常感谢 Prentice Hall 出版公司的工作人员,是他们帮助将这一原本粗糙的手稿变成了一本赏心悦目的书。首先要感谢出版人 Tom Robbins、出版编辑 Daniel Sandin 和责任编辑 David George 的帮助和建设性的反馈意见。在此还要特别提到的是伯克利分校的 Brenda Vanoni,感谢她那十分宝贵的版面编辑和建立网页的工作。Carol Sitea 的网络知识也给予了本书很大的帮助。

在此我还要强调在本书手稿的创作过程中计算机的辅助作用。所有的初稿均在 FrameMaker 出版系统(Adobe 系统)上完成,例图大多用 MATLAB 制作,网页制作采用了微软的 Frontpage。

电路模拟使用 HSPICE (Avant!), 所有版图采用 Cadence 的物理设计工具制作。

最后我们要对在本书创作过程中所“殃及”到的家人 Kathelijn, Karthiyayani, Krithivasan 和 Rebecca 说声谢谢。虽然新版的出版比第一版明显要轻松些, 但我们总是低估所需要的付出, 特别是在每天的日常工作之后。在写作这本书的过程中他们给予了我们始终如一的支持、帮助和鼓励。

Jan M. Rabaey
Anantha Chandrakasan
Borivoje Nikolić
Berkeley, Calistoga, Cambridge

目 录

第一部分 基本单元

第 1 章 引论	2
1.1 历史回顾	2
1.2 数字集成电路设计中的问题	4
1.3 数字设计的质量评价	11
1.4 小结	22
1.5 进一步探讨	22
第 2 章 制造工艺	26
2.1 引言	26
2.2 CMOS 集成电路的制造	26
2.3 设计规则——设计者和工艺工程师之间的桥梁	34
2.4 集成电路封装	37
2.5 综述：工艺技术的发展趋势	44
2.6 小结	47
2.7 进一步探讨	47
设计方法插入说明 A——IC 版图	48
第 3 章 器件	52
3.1 引言	52
3.2 二极管	52
3.3 MOS (FET) 晶体管	62
3.4 关于工艺偏差	87
3.5 综述：工艺尺寸缩小	88
3.6 小结	93
3.7 进一步探讨	93
设计方法插入说明 B——电路模拟	95
第 4 章 导线	98
4.1 引言	98
4.2 简介	98
4.3 互连参数——电容、电阻和电感	100
4.4 导线模型	109

4.5 导线的 SPICE 模型	124
4.6 小结	127
4.7 进一步探讨	127

第二部分 电路设计

第 5 章 CMOS 反相器	130
5.1 引言	130
5.2 静态 CMOS 反相器——直观综述	130
5.3 CMOS 反相器稳定性的评估——静态特性	133
5.4 CMOS 反相器的性能——动态特性	140
5.5 功耗、能量和能量延时	155
5.6 综述：工艺尺寸缩小及其对反相器衡量指标的影响	167
5.7 小结	169
5.8 进一步探讨	170
第 6 章 CMOS 组合逻辑门的设计	171
6.1 引言	171
6.2 静态 CMOS 设计	171
6.3 动态 CMOS 设计	207
6.4 设计综述	221
6.5 小结	224
6.6 进一步探讨	224
设计方法插入说明 C——如何模拟复杂的逻辑电路	226
设计方法插入说明 D——复合门的版图技术	233
第 7 章 时序逻辑电路设计	237
7.1 引言	237
7.2 静态锁存器和寄存器	240
7.3 动态锁存器和寄存器	250
7.4 其他寄存器类型*	258
7.5 流水线：优化时序电路的一种方法	262
7.6 非双稳时序电路	266
7.7 综述：时钟策略的选择	271
7.8 小结	272
7.9 进一步探讨	272

第三部分 系统设计

第 8 章 数字 IC 的实现策略	276
8.1 引言	276

8.2	从定制到半定制以及结构化阵列的设计方法	279
8.3	定制电路设计	280
8.4	以单元为基础的设计方法	281
8.5	以阵列为基础的实现方法	291
8.6	综述：未来的实现平台	308
8.7	小结	310
8.8	进一步探讨	311
设计方法插入说明 E——逻辑单元和时序单元的特性描述		313
设计方法插入说明 F——设计综合		319
第 9 章	互连问题	325
9.1	引言	325
9.2	电容寄生效应	325
9.3	电阻寄生效应	336
9.4	电感寄生效应*	342
9.5	高级互连技术	350
9.6	综述：片上网络	356
9.7	小结	357
9.8	进一步探讨	357
第 10 章	数字电路中的时序问题	359
10.1	引言	359
10.2	数字系统的时序分类	359
10.3	同步设计——一个深入的考察	361
10.4	自定时电路设计*	380
10.5	同步器和判断器*	392
10.6	采用锁相环进行时钟综合和同步*	396
10.7	综述：未来方向和展望	401
10.8	小结	404
10.9	进一步探讨	404
设计方法插入说明 G——设计验证		406
第 11 章	设计运算功能块	410
11.1	引言	410
11.2	数字处理器结构中的数据通路	410
11.3	加法器	411
11.4	乘法器	431
11.5	移位器	438
11.6	其他运算器	440

11.7	数据通路结构中对功耗和速度的综合考虑*	442
11.8	综述:设计中的综合考虑	456
11.9	小结	457
11.10	进一步探讨	458
第 12 章	存储器 and 阵列结构设计	460
12.1	引言	460
12.2	存储器内核	467
12.3	存储器外围电路*	496
12.4	存储器的可靠性及成品率*	512
12.5	存储器中的功耗*	518
12.6	存储器设计的实例研究	523
12.7	综述:半导体存储器的发展趋势与进展	529
12.8	小结	530
12.9	进一步探讨	531
	设计方法插入说明 H——制造电路的验证和测试	533
	思考题答案	547