

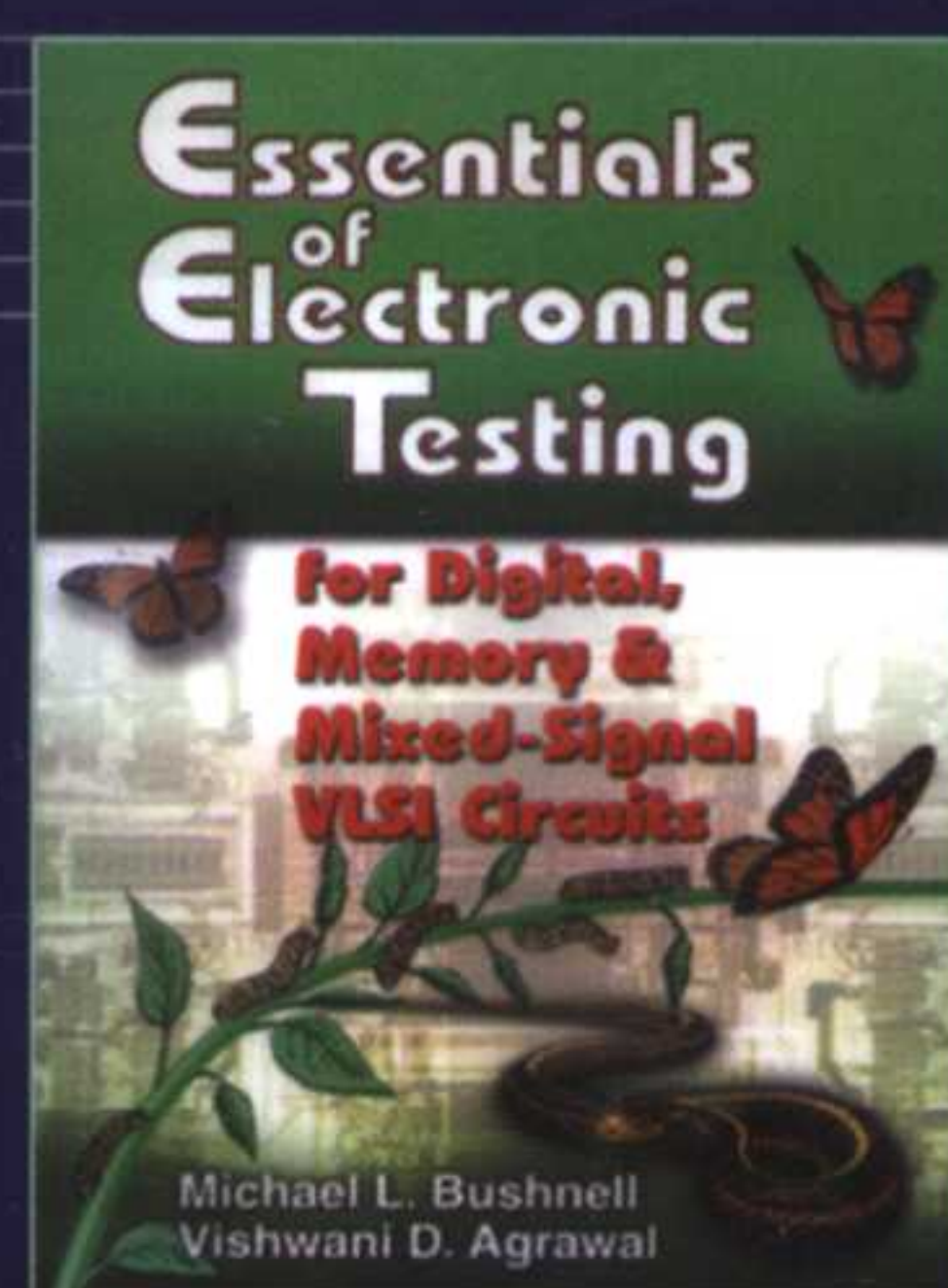
国外电子与通信教材系列



超大规模集成电路测试

—— 数字、存储器和混合信号系统

Essentials of Electronic Testing
for Digital, Memory & Mixed-Signal VLSI Circuits



[美] Michael L. Bushnell 著
Vishwani D. Agrawal

蒋安平 冯建华 王新安 译



电子工业出版社

Publishing House of Electronics Industry
<http://www.phei.com.cn>

超大规模集成电路测试

—— 数字、存储器和混合信号系统

Essentials of Electronic Testing

for Digital, Memory & Mixed-Signal VLSI Circuits

现代的电子设计与测试工程师需要处理数字、存储器和混合信号等几类子系统，每一类都需要不同的测试和可测试性设计方法。本书提供了精心选择的所有这三类电路的重要测试课题。测试的目的是提高产品质量，它意味着“以最小的代价满足用户的需求”。本书包含了确定VLSI芯片级缺陷的测试经济学和技术。它除了可以作为测试课程的教材外，还是电子器件、系统或系统芯片等领域的工程师的一个完整的可测试性指南。

本书反映了当今VLSI测试与可测试性设计的研究现状和发展趋势，它是一本全面覆盖数字、存储器和混合信号电路测试的专著和教材。

本书主要包含三个部分和三个附录：

- 第一部分包括测试概论、测试过程和自动测试设备、测试经济学和产品质量、故障模型等内容。
- 第二部分包括逻辑与故障模拟、可测试性度量、组合ATPG、时序ATPG、存储器测试、基于DSP的模拟和混合信号测试、基于模型的模拟和混合信号测试、延迟测试、 I_{DDQ} 测试等内容。
- 第三部分包括DFT和扫描设计、BIST、边界扫描标准、模拟测试总线标准、系统测试和基于核的设计等内容。
- 附录包括循环冗余码理论、本原多项式以及有关测试的书籍。



ISBN 7-121-01490-4



9 787121 014901 >

传播教育信息 共享教育资源

华信 华信教育资源网
www.hxedu.com.cn

欢迎登录 获取优质教学资源



责任编辑：许菊芳

责任美编：毛惠庚

本书贴有激光防伪标志，凡没有防伪标志者，属盗版图书

ISBN 7-121-01490-4 定价：58.00元

国外电子与通信教材系列

超大规模集成电路测试

——数字、存储器和混合信号系统

Essentials of Electronic Testing
for Digital, Memory & Mixed-Signal VLSI Circuits

[美] Michael L. Bushnell 著
Vishwani D. Agrawal

蒋安平 冯建华 王新安 译

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

内 容 简 介

VLSI 测试包括数字、存储器和混合信号三类电路测试, 本书系统地介绍了这三类电路的测试和可测试性设计。全书共分三个部分。第一部分是测试基础, 介绍了测试的基本概念、测试设备、测试经济学和故障模型。第二部分是测试方法, 详细论述了组合和时序电路的测试生成、存储器测试、基于 DSP 和基于模型的模拟与混合信号测试、延迟测试和 I_{DDQ} 测试等。第三部分是可测试性设计, 包括扫描设计、BIST、边界扫描测试、模拟测试总线标准和基于 IP 核的 SOC 测试。

本书可作为高等学校计算机、微电子、电子工程、无线电及自动控制、信号处理专业的高年级学生与研究生的教材和参考书, 也可供从事上述领域工作的科研人员参考, 特别适合于从事 VLSI 电路设计和测试的工程技术人员。

Authorized translation from the English language edition published, entitled *Essentials of Electronic Testing for Digital, Memory & Mixed-Signal VLSI Circuits*, ISBN: 0792379918 by Michael L. Bushnell, Vishwani D. Agrawal, published by Kluwer Academic Publishers. Copyright © 2000 by Lucent Technologies and Michael L. Bushnell.

All rights reserved. No part of this work may be reproduced, stored in a retrieval system, or transmitted in any form or by any means, electronic, mechanical, photocopying, microfilming, recording, or otherwise, without the written permission from the Publisher.

Simplified Chinese Language edition published by Publishing House of Electronics Industry, Copyright © 2005.

本书中文简体专有翻译出版版权由 Kluwer Academic Publishers 授予电子出版社。其原文版权及中文翻译出版版权受法律保护。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: 01-2003-0596

图书在版编目 (CIP) 数据

超大规模集成电路测试——数字、存储器和混合信号系统 / (美) 布什内尔 (Bushnell, M. L.) 等著;
蒋安平等译. —北京: 电子工业出版社, 2005.8

(国外电子与通信教材系列)

书名原文: *Essentials of Electronic Testing for Digital, Memory & Mixed-Signal VLSI Circuits*

ISBN 7-121-01490-4

I. 超... II. ①布... ②蒋... III. 超大规模集成电路 - 测试 - 教材 IV. TN470.7

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2005) 第 071504 号

责任编辑: 许菊芳

印 刷: 北京市海淀区四季青印刷厂

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: 33 字数: 845 千字

印 次: 2005 年 8 月第 1 次印刷

定 价: 58.00 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 zltz@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 | 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

随着集成电路设计与加工技术的飞速发展，超大规模集成电路（VLSI）的测试已经成为一个越来越困难的问题，测试和可测试性设计的理论与技术已经成为VLSI领域中的一个重要研究方向，在理论和实践方面都有十分突出的价值。这一领域中的书籍和论文也层出不穷，Michael L. Bushnell和Vishwani D. Agrawal两位教授合著的本书就是其中比较全面和优秀的一本著作，所以在我们的建议下，电子工业出版社决定将这本著作翻译出版，希望能对国内相关的技术人员有一定帮助。

本书系统地介绍了数字、存储器和混合信号VLSI系统的测试和可测试性设计。它是根据原作者多年的科研成果和教学实践，结合国际上关注的最新研究热点，并参考大量的文献撰写而成的。全书共分三部分19章，第一部分是测试概论，介绍了测试的基本概念、测试设备、测试经济学和故障模型等。第二部分是测试方法，详细论述了组合和时序电路测试生成、存储器测试、基于DSP和基于模块的模拟和混合信号测试、延迟测试和 I_{DDQ} 测试等。第三部分是可测试性设计，包括扫描设计、BIST、边界扫描测试、模拟测试总线标准和基于IP核的SOC测试等。

本书反映了当今VLSI测试的研究现状和发展趋势，它是第一本全面覆盖数字、存储器和混合信号电路测试的专著和教科书。本书可作为高等学校计算机、微电子、电子工程、无线电及自动控制、信号处理专业高年级学生和研究生的教材和参考书，也可供从事上述领域工作的科研人员参考，特别适合于从事VLSI电路设计和测试的工程技术人员使用。

本书的翻译分工如下：王新安负责第1~6章的翻译；冯建华负责第7章、第9~13章的翻译，并对第1~6章进行了审校；蒋安平负责第8章、第14~19章以及前言、附录的翻译，并对第7章进行了审校。北京大学微电子学研究院02级硕士研究生中也有很多同学参与了部分章节的初稿翻译工作，这里恕不一一列出他们的姓名。

在本书的翻译出版过程中，一直得到了纽约城市大学陈星浩教授的大力帮助，他向我们推荐了这本著作，并帮助我们与原著作者进行了沟通；北京大学信息科学技术学院的各位领导给予了我们多方面的关心、鼓励和帮助。在此谨向为本书的翻译与出版付出辛勤劳动的各位老师、领导、同事、同学致以衷心的感谢。

由于译者水平所限，在翻译中难免有错误或不妥之处，真诚希望各位读者在阅读本书时能将发现的错误及时告知，以便再版时能订正。

译者

apjiang@ime.pku.edu.cn

fengjh@ime.pku.edu.cn

wangxa@szpku.edu.cn

前 言

现代电子测试已有40年的历史,在此期间,测试的专业人员举行过一些大型会议和许多专题学术研讨会,有一本专业期刊,并且在测试方面有一百多种书籍。但是仅在少数几所大学开设了测试方面的完整课程,而且主要是由对这个领域有研究兴趣的大学教授开设的。显然,在大多数教授还是学生的时候,他们没有学习过电子测试方面的课程。

除了计算机工程的课程太多以外,缺少电子测试课程的主要原因是缺乏合适的教材。半导体器件工艺、电路设计和电子测试是VLSI的基础课程。因此,在计算机工程的课程中,基础课程需要安排在实际应用课程之前讲授。VLSI领域已经扩展到了系统芯片(systems-on-a-chip),其中包括数字、存储器和混合信号子系统。据我们所知,这是第一本包括所有这三种类型电子电路的教材。

我们为大学本科的电子测试基础课编写了这本教材。作为一学期的课程,它的内容显然是太多了,教师可根据需要从中选择。我们不想限制教师的选择自由,因为选择可能依赖于个人的专长和兴趣。除此之外,一本内容丰富的书对其所有者来说,其好处是即使在课程结束后,它仍然是有用的。

我们同样考虑了其他三类读者的需求。第一类是工程师,他们在毕业后从事各种类型的电子硬件设计、测试或制造工程。本书第一部分和第三部分侧重于面向设计的工程需求,而第一部分和第二部分着重于面向测试的工程需求。第二类是选择VLSI设计课程的学生,他们还没有学习有关测试的课程。第一部分和第三部分能满足他们的需求。第三类是研究生和从事研究的学生,他们会找到完全覆盖各种主题的内容,并且在因为篇幅限制而省略高级材料的地方有指向参考文献的索引。图1.6给出了阅读本书的几种方法。

1999年,在国际测试会议的一次主题为“在VLSI设计过程中提高测试覆盖率”的讨论会上,一个来自微电子工业界的与会者提出的希望研讨的问题可概括为:测试经济学、典型的半导体缺陷、简单测试图形覆盖率、系统芯片设计的结构化可测试性设计方法(扫描、边界扫描、BIST)、自动测试设备(限制和费用)、经挑选的高级主题(I_{DDQ} 和延迟故障)。在写这本书时,我们一直牢记这个列表,并且希望讲授VLSI设计和电子测试课程的教师也是这样。

我们都非常了解软件调试和硬件设计验证的不完善性,我们也没有采用形式化的方法验证书中的材料。尽管我们付出很大努力来消除错误,但是不能保证读者不会发现错误。我们将非常感激那些告诉我们任何错误的读者。我们将通过网站使所有的读者都可以利用这样的勘误表,直到出版商给我们机会改正错误并给予发现错误的读者应得的感谢。

在过去的10年里,我们在Rutgers大学讲授了一门有关测试的课程。和这门课的学生以及硕士、博士研究生的交流对我们关于该学科的理解具有非常大的影响,我们非常感谢他们。特别要提到的是2000年春季班的学生,他们使用了本书的草稿,并提出了修正和改进的意见。我们对于贝尔试验室和Rutgers大学的同事的建议和讨论表示感谢。世界范围内的测试专业人员给予了格外的热心和支持。我们要感谢的部分人员包括: Miron Abramovici, Prathima Agrawal, Mark Barber, Shawn Blanton, Amy Bushnell, Tapan Chakraborty, Srimat Chakradhar, Xinghao Chen, Dochan C. Choi, Rick Chruscial, Don Denburg, José de Sousa, Shaun Erickson, David Fessler, Hideo

Fujiwara, Paul Glick, John Hayes, Michael Hsiao, James Jacob, Neil Kelly, Bill Kish, Kozo Kinoshita, Cliff Miller, Ken Lanier, Yuhai Ma, Pinaki Mazumder, Karen Panetta, Janusz Rajski, Elizabeth Rudnick, Manoj Sachdev, Kewal Saluja, Sharad Seth 和 Lakshman Yagati。还要感谢出版商 Carl Harris, 他总是激励我们前进, 并能忍耐对时间的延期。我们感谢贝尔试验室的研究主管 Al Aho, Dennis Ritchie 和 Tom Szymanski, 以及 Rutgers 大学的 David Daut 和 Jim Flanaga 的支持。

也要感谢 LTX 公司、Advantest 公司、Samsung 电子有限公司、IBM 和 Lucent Technologies 在为本书提供数据方面的通力合作。在描述技术贡献方面, 我们尽最大努力来正确引证。对于发现他们的工作被不正确地引用的人, 我们请求他们的原谅, 因为这些由于我们的疏忽而引起的错误并不是故意的。

我们已经改正了第一次印刷中发现的很多错误。我们要感谢在 Rutgers 大学 2001 年春季班的学生, 特别是 Xiao Liu, Shuo Sheng 和 Liang Zhang, 他们指出了错误。我们要衷心感谢提供了帮助的很多其他的读者, 包括: Credence 的 Mike Balster 和 Gordon Robinson, Agere Systems 的 Kanad Chakraborty 以及 Wisconsin 大学的 Yong Kim。

基于本书的一套完整的讲稿 (powerpoint 幻灯片) 可以从我们的网站获得。

Michael L. Bushnell

bushnell@caip.rutgers.edu

[http://www-caip.rutgers.edu/](http://www-caip.rutgers.edu/~bushnell/rutgers.html)

~bushnell/rutgers.html

Vishwani D. Agrawal

va@agere.com

[http://cm.bell-labs.com/](http://cm.bell-labs.com/cm/cs/who/va)

cm/cs/who/va

作者简介

Michael L. Bushnell 是美国 Rutgers 大学电子与计算机工程系的正教授和董事会研究会员。他于 1975 年在麻省理工学院获得学士学位, 并分别于 1983 年和 1986 年在卡内基梅隆大学获得硕士和博士学位。1983 年他入选美国电子协会才能发展计划 (Faculty Development Program), 并获得过卡内基梅隆大学杰出毕业生教学奖。Bushnell 还是美国国家自然科学基金的总统青年研究员。他最近在 VLSI CAD 上的研究方向是串行和分布式计算机上的数字、模拟和混合信号电路的自动测试码模式生成、延迟故障的内建自测试、故障模拟、可测试性综合和低功耗设计等。他是 *Journal of Electronic Testing: Theory and Applications* 杂志编委会成员, 并曾担任 1995 年和 1996 年 *International Conference on VLSI Design* 印度年会程序委员会的联合主席。

Vishwani D. Agrawal 现在是贝尔实验室 (Lucent Technologies 公司的研发机构) 计算科学研究中心的杰出科学家, 也是 Rutgers 大学电子与计算机工程系的客座教授。他于 1960 年在印度 Allahabad 大学获理学学士学位, 1964 年在印度 Roorkee 大学获得 (荣誉) 工学学士学位, 1966 年在印度科学研究所获硕士学位, 1971 年在美国伊利诺斯大学获得电子工程博士学位。他最近的研究方向是测试、可测试性综合和并行算法。他是 *Journal of Electronic Testing: Theory and Applications* 的主编和 *IEEE Design & Test of Computers* 杂志的原主编。1993 年, 他获得伊利诺斯大学杰出校友奖。1998 年, 由于对电子测试领域的创造性贡献, 他获得了 IEEE 计算机协会 Harry H. Goode 纪念奖。

目 录

第一部分 测试概论

第 1 章 引言	2
1.1 测试哲学	2
1.2 测试的作用	4
1.3 数字和模拟 VLSI 测试	5
1.4 VLSI 技术的发展趋势对测试的影响	7
1.5 本书范围	11
1.6 习题	12
第 2 章 VLSI 测试过程和测试设备	13
2.1 如何测试芯片	13
2.1.1 测试类型	14
2.2 自动测试设备	17
2.2.1 Advantest Model T6682 测试仪	18
2.2.2 LTX Fusion ATE	21
2.2.3 多点测试	21
2.3 电气参数测试	21
2.4 小结	24
2.5 习题	25
第 3 章 测试经济学和产品质量	26
3.1 测试经济学	26
3.1.1 成本定义	26
3.1.2 生产	28
3.1.3 成本利润分析	30
3.1.4 可测性设计的经济学	31
3.1.5 十倍法则	32
3.2 良率	32
3.3 测量品质的缺陷等级	35
3.3.1 测试数据分析	35
3.3.2 缺陷级别评估	37
3.4 小结	40
3.5 习题	40
第 4 章 故障模型	42
4.1 缺陷、错误和故障	42

4.2	功能测试与结构测试	43
4.3	故障模型的级别	43
4.4	故障模型术语表	44
4.5	单固定故障	51
4.5.1	故障等价	52
4.5.2	单固定故障的等价	53
4.5.3	故障压缩	54
4.5.4	故障支配和检测点定理	55
4.6	小结	57
4.7	习题	57

第二部分 测试方法

第5章	逻辑与故障模拟	60
5.1	用于设计验证的模拟	60
5.2	用于测试评估的模拟	63
5.3	用于模拟的模型电路	65
5.3.1	模型的层次与模拟器类型	65
5.3.2	层次连接描述	66
5.3.3	MOS 网络的门级模型	67
5.3.4	模拟信号的状态	69
5.3.5	时序	70
5.4	用于真值模拟的算法	73
5.4.1	编码模拟	73
5.4.2	事件驱动模拟	74
5.5	故障模拟算法	75
5.5.1	串行故障模拟	76
5.5.2	并行故障模拟	76
5.5.3	推演故障模拟	78
5.5.4	并发故障模拟	80
5.5.5	Roth 的 TEST-DETECT 算法	83
5.5.6	微分故障模拟	84
5.6	故障模拟的统计学方法	86
5.6.1	故障取样	86
5.7	小结	89
5.8	习题	89
第6章	可测试性度量	92
6.1	SCOAP 可控制性和可观测性	93
6.1.1	组合 SCOAP 度量	94
6.1.2	组合电路的例子	96

6.1.3	时序 SCOAP 度量	100
6.1.4	时序电路的例子	102
6.2	高层次可测试性度量	106
6.3	小结	108
6.4	习题	108
第 7 章	组合电路测试生成	112
7.1	算法与表示	112
7.1.1	结构测试与功能测试	112
7.1.2	自动测试矢量生成器的定义	113
7.1.3	搜索空间的抽象	114
7.1.4	算法完备性	115
7.1.5	ATPG 代数	115
7.1.6	算法类型	116
7.2	冗余识别	122
7.3	全局测试问题	125
7.4	定义	125
7.5	重要的组合 ATPG 算法	129
7.5.1	D 运算和 D 算法 (Roth)	129
7.5.2	PODEM (Goel)	137
7.5.3	FAN (Fujiwara 和 Shimono)	142
7.5.4	高级算法	146
7.6	测试生成系统	152
7.7	测试矢量压缩	152
7.8	小结	153
7.9	习题	154
第 8 章	时序电路的测试矢量生成	157
8.1	单时钟同步电路的 ATPG	157
8.1.1	一个简化的问题	159
8.2	时间帧展开方法	159
8.2.1	九值逻辑的使用	161
8.2.2	时间帧展开方法的发展	162
8.2.3	近似方法	165
8.2.4	时间帧展开方法的实现	165
8.2.5	时序 ATPG 的复杂度	167
8.2.6	无循环电路	168
8.2.7	循环电路	170
8.2.8	时钟故障和多时钟电路	172
8.2.9	异步电路	173
8.3	基于模拟的时序电路 ATPG	178

8.3.1	CONTEST 算法	179
8.3.2	遗传算法	184
8.4	小结	185
8.5	习题	186
第 9 章	存储器测试	189
9.1	存储器密度和缺陷的趋势	190
9.2	概念	192
9.3	故障	193
9.3.1	故障表示	193
9.3.2	失效机理	194
9.4	存储器测试层次	195
9.5	March 测试符号	196
9.6	故障模型	197
9.6.1	诊断与测试需要	198
9.6.2	简化的功能故障	199
9.6.3	故障模型与物理缺陷之间的关系	206
9.6.4	多故障模型	208
9.6.5	故障的频率	210
9.7	存储器测试	212
9.7.1	采用 March 测试矢量的功能 RAM 测试	212
9.7.2	测试 RAM 相邻矢量敏感故障	214
9.7.3	测试 RAM 技术和与版图有关的故障	219
9.7.4	RAM 测试层次	220
9.7.5	cache RAM 芯片测试	221
9.7.6	功能 ROM 芯片测试	223
9.7.7	电参数测试	224
9.8	小结	228
9.9	习题	228
第 10 章	基于 DSP 模拟和混合信号测试	230
10.1	模拟和混合信号电路趋势	230
10.2	定义	233
10.3	基于 DSP 的功能测试	235
10.3.1	概念	235
10.3.2	基于 DSP 测试仪的机理	236
10.3.3	波形综合	237
10.3.4	波形采样和数字化	238
10.4	静态 ADC 和 DAC 测试方法	239
10.4.1	传输参数与本征参数	240
10.4.2	理想 ADC 的不确定性和失真	240

10.4.3	DAC 转移函数误差	241
10.4.4	ADC 转移函数误差	242
10.4.5	Flash ADC 测试方法	243
10.4.6	DAC 测试方法	247
10.5	采用傅里叶变换实现仿真仪器	249
10.5.1	傅里叶电压计	258
10.5.2	采用非相干采样的模拟器件测试	261
10.5.3	相干多音测试	266
10.5.4	ATE 矢量操作	273
10.6	CODEC 测试	274
10.6.1	CODEC 性能测试的考虑	276
10.6.2	CODEC 测试	278
10.7	动态 Flash ADC 测试 FFT 方法	281
10.8	高级方法	282
10.8.1	事件数字化	282
10.8.2	随机噪声测量	284
10.9	小结	285
10.10	习题	285
第 11 章	基于模型的模拟和混合信号测试	288
11.1	模拟测试的困难	288
11.2	模拟故障模型	289
11.3	抽象级	291
11.4	模拟测试类型	291
11.5	模拟故障模拟	291
11.5.1	动机	292
11.5.2	非线性电路的 DC 故障模拟	292
11.5.3	线性模拟电路 AC 故障模拟	295
11.5.4	蒙特卡罗模拟	297
11.6	模拟自动测试生成	297
11.6.1	采用灵敏度 ATPG	297
11.6.2	采用信号流图 ATPG	303
11.6.3	其他方法	308
11.7	小结	308
11.8	习题	309
第 12 章	延迟测试	311
12.1	延迟测试问题	311
12.2	路径延迟测试	312
12.2.1	组合电路测试生成	316
12.2.2	电路中的路径数	318

12.3	转换故障	319
12.4	延迟测试方法	320
12.4.1	慢时钟组合测试	320
12.4.2	增强扫描测试	320
12.4.3	正常扫描时序测试	321
12.4.4	可变时钟非扫描时序测试	322
12.4.5	额定时钟非扫描时序测试	323
12.5	延迟测试实际考虑	323
12.5.1	全速度测试	324
12.6	小结	325
12.7	习题	325
第 13 章	I_{DDQ} 测试	328
13.1	动机	328
13.2	I_{DDQ} 测试检测的故障	329
13.3	I_{DDQ} 测试方法	334
13.3.1	I_{DDQ} 故障覆盖率标准	334
13.3.2	从固定故障测试集选择 I_{DDQ} 测试矢量	334
13.3.3	仪器问题	337
13.3.4	电流阈值设定	337
13.4	I_{DDQ} 测试有效性综述	338
13.5	I_{DDQ} 测试的局限性	339
13.6	ΔI_{DDQ} 测试	340
13.7	I_{DDQ} 内建电流测试	342
13.8	I_{DDQ} 可测试性设计	343
13.9	小结	343
13.10	习题	343

第三部分 可测试性设计

第 14 章	数字电路 DFT 和扫描设计	346
14.1	特定的 DFT 方法	346
14.2	扫描设计	347
14.2.1	扫描设计规则	348
14.2.2	扫描电路的测试	350
14.2.3	多重扫描寄存器	353
14.2.4	扫描设计的开销	353
14.2.5	设计自动化	356
14.2.6	扫描的物理设计与时序验证	357
14.3	部分扫描设计	358
14.4	扫描的变种	360

14.5	小结	363
14.6	习题	363
第 15 章	内建自测试	365
15.1	BIST 的经济性情况	365
15.1.1	芯片/电路板面积费用与测试仪费用	368
15.1.2	芯片/电路板面积费用与系统停机时间费用	369
15.2	随机逻辑 BIST	369
15.2.1	定义	369
15.2.2	BIST 过程	370
15.2.3	BIST 测试矢量生成	372
15.2.4	BIST 响应压缩	383
15.2.5	内建逻辑块观察器	389
15.2.6	按时钟测试 BIST 系统	391
15.2.7	按扫描测试 BIST 系统	391
15.2.8	循环自测试路径系统	393
15.2.9	电路初始化	394
15.2.10	器件级 BIST	394
15.2.11	测试点的插入	395
15.3	存储器 BIST	396
15.3.1	定义	397
15.3.2	MARCH 测试 SRAM BIST	398
15.3.3	使用 MISR 的 SRAM BIST	400
15.3.4	相邻矢量敏感故障测试 DRAM BIST	402
15.3.5	透明存储器 BIST 测试	404
15.3.6	复杂的例子	404
15.4	延迟故障 BIST	406
15.5	小结	407
15.6	习题	407
第 16 章	边界扫描标准	412
16.1	目的	412
16.1.1	标准的用途	414
16.2	边界扫描的系统结构	415
16.2.1	TAP 控制器和端口	416
16.2.2	边界扫描测试指令	419
16.2.3	标准对管脚的限制	424
16.3	边界扫描描述语言	428
16.3.1	BSDL 描述的成分	428
16.3.2	管脚描述	429
16.4	小结	430
16.5	习题	430