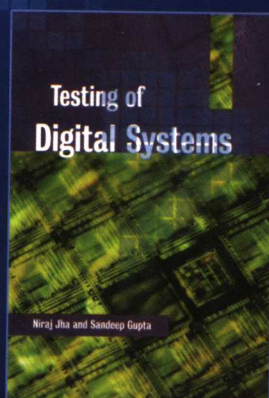


国外电子与通信教材系列

数字系统测试

Testing of Digital Systems



[美] Niraj Jha 著
Sandeep Gupta

王新安 蒋安平 宋春殚 等译



电子工业出版社

Publishing House of Electronics Industry

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

TP271

76

2007

国外电子与通信教材系列

数字系统测试

Testing of Digital Systems

[美] Niraj Jha 著
 Sandeep Gupta

王新安 蒋安平 宋春殚 等译

電子工業出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京 · BEIJING

内 容 简 介

在半导体集成电路的设计与制造过程中,测试的重要性越来越突出,有关数字系统测试方面的书籍也不断出现,本书是这些书籍中内容十分全面丰富的一本。本书系统地介绍了数字系统测试相关方面的知识,包括基础内容方面的自动测试向量生成、可测性设计、内建自测试等,高级内容方面包括 I_{DDQ} 测试、功能测试、延迟故障测试、CMOS 测试、存储器测试以及故障诊断等,并论述了最新的测试技术,包括各种故障模型的测试生成、集成电路不同层次的测试技术以及系统芯片的测试综合等,其内容涵盖了当前数字系统测试与可测试性设计方面的基础知识与研究现状等。

本书可作为高等学校计算机、微电子、电子工程等专业的高年级本科生和研究生的教材与参考书,也可供从事相关领域工作,特别是集成电路设计与测试的科研与工程技术人员参考。

Authorized translation from the English language edition published by The Press Syndicate of the University of Cambridge, England. Copyright © Cambridge University Press 2003.

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 the Publisher.

This edition is licensed for distribution and sale in the People's Republic of China only excluding Hong Kong, Taiwan and Macau and may not be distributed and sold elsewhere.

Simplified Chinese language edition published by Publishing House of Electronics Industry. Copyright © 2007.

本书中文简体专有翻译出版权由 Cambridge University Press 授予电子工业出版社。其原文版权及中文翻译出版权受法律保护。未经许可,不得以任何形式或手段复制或抄袭本书内容。

本书中文简体字版仅限于在中华人民共和国境内(不包括香港、澳门特别行政区以及台湾地区)发行与销售,并不得在其他地区发行与销售。

版权贸易合同登记号 图字:01-2003-3947

图书在版编目(CIP)数据

数字系统测试/(美)查(Jha, N.)等著;王新安等译.—北京:电子工业出版社,2007.6

(国外电子与通信教材系列)

书名原文:Testing of Digital Systems

ISBN 978-7-121-04542-4

I. 数... II. ①查... ②王... III. 数字系统-测试-教材 IV. TP271

中国版本图书馆CIP数据核字(2007)第079801号

责任编辑:李秦华

印 刷:北京市通州大中印刷厂

装 订:三河市皇庄路通装订厂

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

开 本:787×1092 1/16 印张:45.25 字数:1276千字

印 次:2007年6月第1次印刷

定 价:89.00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、南京邮电大学、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、中山大学、哈尔滨工业大学、西南交通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、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

集成电路设计与加工技术的飞速发展给测试带来了新的问题,目前测试费用在集成电路制造过程中所占的比例已经越来越高,如何解决数字系统的测试问题是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。在这一领域中的书籍和论文也层出不穷,Niraj Jha 和 Sandeep Gupta 合著的本书是一本全面介绍数字系统测试方面知识的优秀著作,内容十分丰富。我们将这本著作翻译出版,希望能对国内的相关领域教学科研工作有一定帮助。

本书全面介绍了数字VLSI系统的测试和可测试性设计等方面的知识,全书共分16章,包括基础内容方面的故障模型、故障模拟、自动测试向量生成、可测试性设计、内建自测试等,高级内容方面包括 I_{DDQ} 测试、功能测试、延迟故障测试、CMOS测试、存储器测试以及故障诊断等,并论述了最新的测试技术,包括各种故障模型的测试生成、集成电路不同层次的测试技术以及系统芯片的测试综合等,其内容涵盖了当前数字系统测试与可测试性设计方面的基础知识与研究现状等。

本书可作为高等学校计算机、微电子、电子工程等专业的低年级本科生和研究生的教材与参考书,也可供从事相关领域工作,特别是集成电路设计与测试等方面工作的研究与工程技术人员参考。

本书的翻译分工如下:蒋安平负责第1章至第9章,王新安负责第10章至第16章。另外天津大学的张为老师完成了第1章至第3章的初稿翻译工作,北京大学深圳研究生院的宋春殚、石铭、王为、夏飞、黄慧娟、黄薇、朱立达等同学承担了本书的初稿翻译和部分审校工作。

在本书的翻译出版过程中,电子工业出版社相关工作人员给予了全方位的配合与帮助,北京大学深圳研究生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中发现错误时能及时指正,以便我们能提高翻译质量。我们的联系方式如下:

wangxa@szpku.edu.cn

apjiang@ime.pku.edu.cn

译者

序 言

半导体工业中制造过程的测试费用所占预算的比例在持续稳定地增长。人们早就知道,在设计初期解决与半导体电路测试相关的问题可以明显降低测试成本。因而,对硬件设计者来说,熟知测试的概念是很重要的,这将有助于人们设计出更好的产品。在当今系统芯片时代,强调测试问题不仅在门级是很重要的(这正是长期以来所做的),而且对集成电路设计的其他各个层次而言都是非常重要的。

本书适用于高年级本科生或硕士新生。由于本书在数字电路测试技术方面做了大量工作,它也可为正从事半导体行业工作的工程师提供有益的帮助。本书广泛涵盖了晶体管级、门级、寄存器传输级、行为级和系统级这些不同的设计层次。除了测试生成技术之外,它还详细介绍了可测性设计、可测性综合以及内建自测试技术。本书的重点是提供对基本概念透彻理解,对于更深入的概念在每章的最后会提供一个附加阅读材料列表来帮助理解。

本书的内容安排包含了第一次学习测试课程的一个学期(约40学时)所需的全部材料。各章的组织情况是其中7章包含了主要材料,余下各章可供选学。

每章都配有一组难度不同的练习,可以在课堂上使用,也可以作为课后作业或考试内容。

另外,每章都有许多范例以及小结。

第1章向读者介绍了有关测试的基本概念,诸如故障、错误、测试、失效率、故障覆盖率以及测试经济学等。

第2章讲述了集成电路不同设计层次的故障模型,例如行为级、功能级、结构级、开关级和几何版图级的故障模型,还对不同种类的延迟模型和归纳故障分析进行了讨论。

第3章介绍了无故障和故障电路单元表示方法。本章首先论述了一种逻辑模拟算法和几种加速逻辑模拟的方法。然后从众所周知的故障压缩(fault collapsing)、故障剔除(fault dropping)概念开始进行故障模拟的讨论。并对下述故障模拟范例进行了详细论述:并行故障模拟、并行模式单故障传播模拟、演绎故障模拟、并发故障模拟以及关键路径追踪等。同时还提供了近似的低复杂度故障模拟方法的简要背景资料。

第4章论述组合电路的测试生成。本章首先讨论了复合电路表示及值域系统。然后介绍了测试生成及蕴涵过程中的基本概念。接下来的内容是结构化测试生成算法和可测性分析技术,包括D算法、PODEM及其增强算法。随后讨论了一些非结构化算法,例如那些基于可满足性和二元决策图的算法。本章的最后部分介绍有关静态和动态测试向量的压缩技术以及用于降低热量和噪声的测试生成算法。

第5章讲的是时序电路的测试生成。首先对时序测试生成方法和故障进行分类。接下来讨论故障压缩和故障模拟。所涉及的测试生成方法是从状态表或门级实现开始的。本章还包括了异步时序电路的测试内容。在这一章最后是关于时序测试压缩方法的讨论。

第6章讨论的是 I_{DDQ} 测试。对于组合电路,其测试目标是测试出漏电故障和无限制的桥接故障以及测试压缩。对于时序电路,其目标是测试生成、故障模拟和测试压缩。在故障诊断中,包括了分析、用于诊断的故障模拟和诊断测试的生成。然后介绍内建电流传感器。在先进 I_{DDQ} 测试概念中,介绍了 I_{DD} 脉冲响应测试、动态电流测试、电源损耗(powering)、电流签名以及 I_{DDQ}

测试在深亚微米设计中的适用性。在本章的最后讨论了 I_{DDQ} 测试经济学。

第 7 章涵盖了普适测试集, 各种类型的伪穷举测试以及功能测试中的迭代逻辑阵列测试。

第 8 章详细描述了各种延迟故障测试方法。这一章首先介绍了不同类型延迟故障的分类。然后为包含不同延迟故障类型的组合和时序电路提供了测试生成和故障模拟的方法。同时还讨论了一些延迟故障模拟易犯的误差以及如何防止误差的发生。最后介绍了一些先进的延迟故障测试技术。

第 9 章论述静态和动态 CMOS 电路中固定开路 (stuck-open) 故障和固定导通 (stuck-on) 故障的测试生成方法。本章讨论了静态 CMOS 电路中的测试无效问题以及用于避免该问题出现的可测试性设计方法。

第 10 章介绍的是故障诊断技术。包括原因-结果和结果-原因诊断方法, 同时还讨论了用于诊断的测试生成。

第 11 章介绍了可测试性设计方法。这一章非常详细地论述了完全扫描设计和部分扫描设计。接着介绍了扫描链的组成及使用, 然后讨论了边界扫描, 最后讲述的是针对延迟故障以及低散热的可测试性设计。

第 12 章讨论的是内建自测试 (BIST) 技术。首先介绍了基本概念, 诸如测试向量生成、测试长度的计算、响应压缩以及别名分析等, 然后介绍了原位 (in-situ) 和基于扫描的 BIST 方法学。

第 13 章的重点是门级可测试技术的综合, 涵盖了关于组合电路及时序电路固定 (stuck-at) 故障和延迟故障的可测试性方面的诸多技术。

第 14 章介绍存储器测试, 包括简化的功能故障 (reduced functional faults)、传统存储器测试、March 测试、伪随机存储器测试以及嵌入式存储器的内建自测试技术 (BIST)。

第 15 章讨论的是高级测试综合, 涉及到设计层次中的寄存器传输级和行为级。本章首先描述了层次化和高级测试生成技术。然后讨论了寄存器传输级和行为级的可测试性设计、可测试性综合以及 BIST 技术。

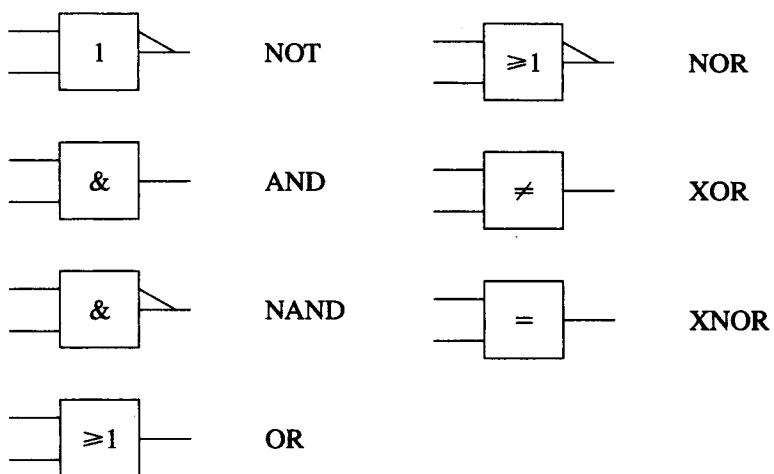
第 16 章中涵盖了现代系统芯片测试综合问题, 其中讨论了核级测试、核测试访问以及核测试外壳 (core test wrapper)。

本书核心章节为第 1 章至第 5 章、第 11 章和第 12 章。这些章节介绍了组合和时序电路中的故障模型、故障模拟及测试生成、可测试性设计以及 BIST。在一个学期的课程中, 如需强调测试生成, 则可将本书第 6 章至第 10 章以及第 14 章中的部分内容补充进来。这些章节分别论述了 I_{DDQ} 测试、功能测试、延迟故障测试、CMOS 测试、故障诊断和存储器测试等。如需强调可测试性综合和寄存器传输级、行为级以及系统级的测试, 则可从本书的第 13 章、第 15 章和第 16 章中选取。

没有很多人的帮助本书是不可能完成的。首先我们要感谢 Ad van de Goor 教授, 他撰写了绪论和存储器测试这两章。我们还想要感谢曾用过本书预印版并给出宝贵反馈意见的分布在世界各地的同事们, 其中包括 S. Blanton 教授、K.-T. Cheng 教授、S. Dey 教授、D. Ha 教授、J. P. Hayes 教授、J. Jacob 教授、P. Mazumder 教授、I. Pomeranz 教授、D. Pradhan 教授、S. M. Reddy 教授和 S. Seth 教授等。非常感谢我们的编辑 F. Nex, 他发现了一些隐藏的错误。最后, 还要感谢普林斯顿大学和南加州大学的学生们, 他们有益的建议使本书更加完善。

Niraj K. Jha
Sandeep Gupta

本书所使用的逻辑门符号^①



① 本书中所使用逻辑符号及变量符号字体除个别外，基本使用英文版中的表示方式，编辑时未统一为国标表示方式
——编者注

目 录

第1章 绪论	1
1.1 故障及其表现	1
1.2 故障分析	2
1.3 测试分类	8
1.4 故障覆盖率要求	10
1.5 测试经济学	12
小结	16
习题	16
参考文献	17
第2章 故障模型	19
2.1 电路的不同抽象层次	19
2.2 不同抽象层次的故障模型	20
2.3 归纳故障分析	29
2.4 故障模型间的关系	31
小结	32
习题	33
参考文献	33
第3章 组合逻辑与故障模拟	36
3.1 简介	36
3.2 预备知识	38
3.3 逻辑模拟	47
3.4 故障模拟基础	54
3.5 故障模拟方式	60
3.6 近似的低复杂度故障模拟	87
小结	89
补充阅读材料	90
习题	90
参考文献	94

第4章 组合电路的测试生成	96
4.1 简介	96
4.2 复合电路表示与值系统	97
4.3 测试生成基础	106
4.4 蕴涵	110
4.5 结构化测试生成算法: 预备知识	127
4.6 特定的结构化测试生成情况	139
4.7 非结构化测试生成技术	157
4.8 测试生成系统	166
4.9 减少测试中散热和噪声的测试生成	177
小结	179
补充阅读材料	181
习题	181
附录 4.A 蕴涵过程	185
参考文献	186
第5章 时序电路的测试向量自动生成	189
5.1 时序 ATPG 方法与故障的分类	189
5.2 故障压缩	194
5.3 故障模拟	197
5.4 同步电路的测试生成	202
5.5 异步电路的测试生成	214
5.6 测试压缩	217
小结	219
补充阅读材料	220
习题	220
参考文献	221
第6章 I_{DDQ} 测试	224
6.1 简介	224
6.2 组合 ATPG	225
6.3 时序 ATPG	234
6.4 组合电路的故障诊断	237
6.5 内建电流检测器	242
6.6 基于电流检测测试的先进概念	244
6.7 I_{DDQ} 测试的经济学	248

小结	250
补充阅读材料	251
习题	251
参考文献	253
第 7 章 功能测试	255
7.1 通用测试集合	255
7.2 伪穷举测试	257
7.3 重复逻辑阵列测试	262
小结	270
补充阅读材料	271
习题	271
参考文献	272
第 8 章 延迟故障测试	274
8.1 简介	274
8.2 组合测试生成	282
8.3 组合故障模拟	295
8.4 组合延迟故障诊断	301
8.5 时序测试生成	304
8.6 时序故障模拟	307
8.7 延迟故障测试的缺陷与补救方法	309
8.8 非常规的延迟故障测试技术	312
小结	313
补充阅读材料	314
习题	315
参考文献	316
第 9 章 CMOS 测试	319
9.1 动态 CMOS 电路的测试	319
9.2 静态 CMOS 电路的测试	327
9.3 健壮性可测性设计	338
小结	341
补充阅读材料	342
习题	342
参考文献	344

第 10 章 故障诊断	347
10.1 简介	347
10.2 符号与基本定义	348
10.3 用于诊断的故障模型	352
10.4 因果诊断	356
10.5 果因诊断	373
10.6 诊断的向量生成	390
小结	398
补充阅读材料	399
习题	400
参考文献	403
第 11 章 可测试性设计	405
11.1 引言	405
11.2 扫描设计	406
11.3 部分扫描	417
11.4 扫描链的组织和应用	428
11.5 边界扫描	444
11.6 其他测试目标的可测试行设计	471
小结	480
补充阅读材料	482
习题	483
参考文献	487
第 12 章 内建自测试	491
12.1 简介	491
12.2 测试向量生成器	492
12.3 测试长度估算	503
12.4 改善可测性的测试点	511
12.5 对给定电路定制向量生成器	516
12.6 响应压缩	526
12.7 线性压缩的混淆现象分析	532
12.8 BIST 方法学	537
12.9 原位内建自测试方法学	544
12.10 基于扫描的 BIST 方法	554
12.11 延迟故障测试的 BIST	558

12.12 减少开关动作的 BIST 技术	562
小结	566
补充阅读材料	569
习题	569
参考文献	572
第 13 章 可测试性综合	576
13.1 固定故障可测试性的组合逻辑综合	576
13.2 延迟故障可测试性的组合逻辑综合	590
13.3 固定故障可测试性的时序逻辑综合	597
13.4 延迟故障可测试性的时序逻辑综合	602
小结	603
补充阅读材料	604
习题	604
参考文献	606
第 14 章 存储器测试	609
14.1 存储器测试的目标	609
14.2 存储器芯片的建模	610
14.3 简化的功能故障	614
14.4 传统测试	622
14.5 行程测试	625
14.6 伪随机存储器的测试	632
小结	640
习题	641
参考文献	642
第 15 章 高级测试综合	644
15.1 简介	644
15.2 RTL 测试生成	645
15.3 RTL 故障仿真	657
15.4 RTL 的可测性设计	658
15.5 RTL 的内建自测试	668
15.6 可测试性的行为改进	674
15.7 可测试性的行为综合	675
小结	680

补充阅读材料	681
习题	681
参考文献	683
第 16 章 系统芯片的测试综合	685
16.1 简介	685
16.2 核级测试	686
16.3 核测试访问	686
16.4 核测试包	702
小结	702
补充阅读材料	703
习题	703
参考文献	703

第1章 绪 论

Ad van de Goor

本章中我们将介绍一些测试中的基本概念。首先介绍术语故障、错误和失效，然后根据故障的时间特性将其分为永久故障和非永久故障。

我们将给出故障的统计分析，并引入失效率和平均失效时间的概念。我们将展示产品的失效率是如何随生命期变化的，以及如何计算串行和并行系统的失效率。我们还将介绍引起故障的物理和电学原因，这称为失效机制。

根据测试设计所针对的技术、测量的参数、测试结果的使用目的以及施加测试的方法，对测试进行了分类。

随后将介绍芯片制造工艺的成品率、测试故障覆盖率（给定测试中所检测出的故障数目占总故障的比例）和缺陷水平（不合格产品通过测试所占比例）之间的关系。可利用此关系计算出为达到一定的产品质量级别所需的测试数量。

最后，将从上市时间、收益、测试开发成本和维护成本等方面来介绍测试经济学。

1.1 故障及其表现

本节将从定义失效（failure）、错误（error）和故障（fault）等术语开始，随后对故障是如何随时间出现的进行概述。

1.1.1 失效、错误和故障

当系统提供的服务与规定的服务或应该提供的服务不一致时，会产生或出现所谓的系统失效（failure）。换言之，就是系统没有做它应该做的事情。失效是由错误（error）所引起的。

当系统所处的状态与提供特定服务应当处于的状态不同时，系统中存在错误（系统处于一个错误状态）。错误是由故障（fault）引起的。

当一个“好”或者“正确的”系统与当前系统间存在物理差别时，当前系统中就出现了故障。

例 1.1 轮胎漏气导致汽车无法使用。轮胎漏气使汽车无法安全驾驶这一事实可以被视为失效。失效是由错误引起的，这里的错误是指轮胎的气压处于一种错误状态。导致这种错误状态的故障是轮胎上有洞，这就是好轮胎与坏轮胎之间的物理差别。

注意，故障不一定会（立即）导致失效；比如，当轮胎漏气速度极慢时。

1.1.2 故障表现

按照故障随时间表现的特性，可以将其分为两类：永久故障（permanent fault）和非永久故障（non-permanent fault）。