

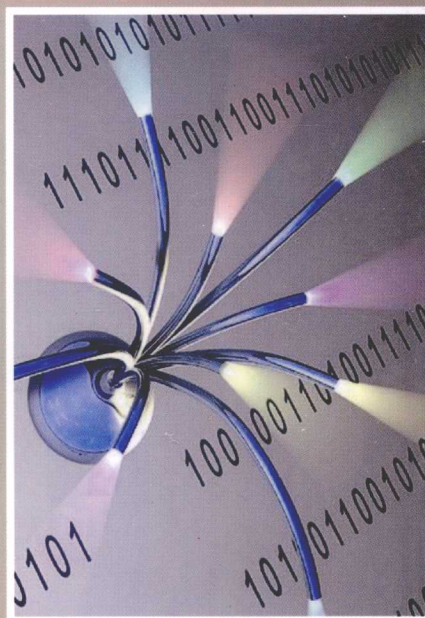


微电子计量测试技术

*MICROELECTRONIC
MEASUREMENT
AND TEST
TECHNOLOGY*

沈森祖 主著

沈森祖 韩红星 刘文捷 吴丹 著



西北工业大学出版社

NORTHWESTERN POLYTECHNICAL UNIVERSITY PRESS

微电子计量测试技术

沈森祖 主著

沈森祖 韩红星 刘文捷 吴丹 著

西北工业大学出版社

【内容简介】 本书从工程的实际应用出发,系统地介绍了微电子计量测试的基本概念,并通过微电子计量技术、微电子测试技术、微电子测试设备以及微电子测试程序设计开发技术等部分,深入介绍了作者及所在团队——中船重工集团公司第709研究所第六研究室(国防微电子一级计量站)——25年来,在研究、工作实践中取得的主要成果和经验。

本书可供相关工程技术人员、科研人员阅读参考,也可作为高等学校有关专业教材或教学参考书。

图书在版编目(CIP)数据

微电子计量测试技术/沈森祖等著. —西安:西北工业大学出版社,2009.5

ISBN 978-7-5612-2516-5

I. 微… II. 沈… III. ①微电子技术—计量—技术②微电子技术—测试技术
IV. TN407

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2009)第 022047 号

出版发行:西北工业大学出版社

通信地址:西安市友谊西路 127 号 邮编:710072

电 话:(029)88493844 88491757

网 址:www.nwpup.com

印 刷 者:陕西宝石兰印务有限责任公司

开 本:787 mm×1 092 mm 1/16

印 张:15.375

字 数:354 千字

版 次:2009 年 5 月第 1 版 2009 年 5 月第 1 次印刷

定 价:30.00 元

前 言

归纳是人类提高认知的基本手段，
演绎是人类验证认知的必然途径。
归纳和演绎认知的高度统一，
是人类追求自然的最高境界和永恒目标。
——让读者了解过去，体会现在，挑战将来。

本书从工程的实际应用出发，系统地介绍了微电子计量测试的基本概念，并通过微电子计量技术、微电子测试技术、微电子测试设备以及微电子测试程序设计开发技术等部分，深入介绍了作者及所在团队——中船重工集团公司第 709 研究所(下称第 709 所)第六研究室(国防微电子一级计量站)——25 年来，在研究、工作实践中取得的成果和经验。这些成果和经验主要包括团队在高水平的测试程序的设计、开发中的主要技巧；集成电路变量的相关分析和测试设备检定方法(标准样片制备维护和应用技术)中的独到见地；PLD 自动测试操作平台设计中的模拟算法、自动生成和无网卡异种机互连互操作等关键技术；团队在使用软件工程和可测性设计的思想和方法开发测试程序，解决规范管理和可靠性验证中积累的宝贵经验。本书可供相关工程技术人员、科研人员阅读参考，也可作为高等学校有关专业的教材或教学参考书。

本书由沈森祖主著。本书第 2 章的 2.2.5“设备计量的不确定度评定”由刘文捷执笔；第 6 章的 6.6“PLD 芯片测试”由吴丹执笔；第 9 章的 9.2.2“开发规范”由韩红星执笔；其他部分由沈森祖执笔并统稿。

经论文作者同意，本书第 2 章的 2.2.4.4，引用了贺志容等论文作者 2008 年，在苏州第五届中国测试学术会议上发表的文章《93K 集成电路测试系统参考源校准方法研究》的相关内容；第 6 章的 6.2 和 6.3，引用了焦慧芳、王香芬、高成等论文作者，在第一届 CMMT 2008 年会上发表的文章《CMOS 电路瞬态电流测试及解析模型研究》和《基于漏电流故障模型的集成电路测试方法研究》的相关内容，特致谢忱。

本团队的工作人员石坚、周红、夏强民、陈春玲、陈桂萍、贺志容、肖莹、张明虎、方明、李轩冕、刘倩、章婷、胡勇、杨志文等，分别参与了微电子器件的试验、测

试、计量等工作,包括过程策划、技术研究、各类实验以及其中的数据收集、整理、计算等;本书的出版得到了第 709 所王小非所长、黎华书记、孙潮义总工的大力支持和指导;承蒙 IEEE 院士,中国科学院计算技术研究所闵应骅研究员审阅书稿并作序,在此一并表示衷心的感谢。

由于水平所限,书中存在的不妥甚至谬误之处,恳请同行、读者指教。

著 者

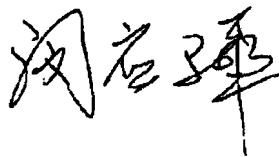
2008 年 12 月 18 日

序

自从1958年杰克·基尔比(Jack S. Kilby)研制出第一块集成电路以来,微电子技术突飞猛进,发展了50年,成为信息时代的推动力,也成为仪器仪表行业的支撑技术。但是,微电子产品本身也需要计量测试。公元前4世纪的秦国统一度量衡,只在全国统一了长度、质量、体积标准,但可以认为是开启了计量测试之先河。微电子计量测试需要比一般微电子设备更高、精、尖的仪器仪表,而这些先进的测试设备,没有软件又开动不起来。所以,微电子计量测试是近代电子设备的关键工程任务和基础专业技术。在航空、航天、交通、通信,尤其是在国防领域,其重要程度有时可谓生命攸关;有时又差之毫厘,失之千里。在我国,人们常常对产品重数量,轻质量,而质量就是生命。计量测试是保证质量关键的一环。

虽然,从我国第一个微电子计量站建立算起,已有20多年历史了,但是,我国的微电子量值还不能完全准确一致,集成电路的测试还没有得到应有的重视。这说明,微电子计量与测试工作的开展确有难度,特别是在微电子产业迅猛发展的今天,更是如此。当前,微电子系统的规模越来越大,结构越来越复杂,功能越来越强大,使微电子计量与测试面临极大的挑战。这是我国各单位在微电子参数计量测试、测试设备计量检定等方面普遍遇到的难题,也是计量测试基础行业中比较薄弱的环节。这里,既有技术问题,也有大量的组织管理工作。

沈森祖研究员和他在中船重工第709所第六研究室(国防微电子一级计量站)的同事们,经过25年的坚持不懈、奋勇拼搏,做了许多实际工作,在微电子计量测试技术方面积累了丰富的经验。本书就是这些经验的总结,也是我国第一部有关微电子计量测试技术的专著。本书对微电子计量技术、微电子测试技术、微电子测试设备以及微电子测试程序设计,从概念到具体的技术细节,都作了系统的介绍,具有很好的实用价值。我相信,本书对从事微电子计量测试的专业技术人员、相关的管理干部,以及相关专业的学生们都有很好的参考价值。本书在微电子计量测试技术方面所积累的经验,对促进我国微电子计量和测试技术的蓬勃发展,将起到承前启后、继往开来的作用。



IEEE 院士

中国科学院计算技术研究所研究员

2008年12月于北京中关村

目 录

第一部分 基本概念

第 1 章 微电子计量测试的基本概念	3
1.1 微电子计量的基本概念	3
1.1.1 微电子计量的目的与任务	3
1.1.2 微电子计量的技术领域和地位	3
1.1.3 微电子计量的工作和研究范围	3
1.1.4 微电子计量的单位制	4
1.1.5 微电子计量的主要术语和名词	4
1.1.5.1 微电子器件	4
1.1.5.2 微电子器件参数	4
1.1.5.3 测试设备	4
1.1.5.4 (测试设备的)系统量	4
1.1.5.5 工程量	5
1.1.5.6 系统量和工程量的对应关系	5
1.1.5.7 内部参考源法	5
1.1.5.8 通道末端法	5
1.1.5.9 标准样片法	6
1.1.5.10 量值传递体系	6
1.1.5.11 测试设备量值的稳定性指标	7
1.2 微电子测试的基本概念	7
1.2.1 微电子测试的目的与任务	7
1.2.2 微电子测试的技术领域和地位	8
1.2.3 微电子测试的工作和研究范围	8
1.2.4 微电子测试的单位制	8
1.2.5 微电子测试的主要术语和名词	8
1.2.5.1 与微电子计量单位相同的名词	8
1.2.5.2 微电子测试	8
1.2.5.3 功能测试法	8
1.2.5.4 穷举法	9
1.2.5.5 基于输入向量的有限扩展法(状态穷举)	9

第二部分 微电子计量技术

第2章 微电子测试设备的计量技术	13
2.1 综述	13
2.2 微电子测试设备的计量检定技术	13
2.2.1 微电子测试设备的计量确认	13
2.2.2 微电子测试设备的溯源性规则	14
2.2.3 微电子测试设备的计量检定原理	14
2.2.4 微电子测试设备的计量检定方法	15
2.2.4.1 微电子测试设备的内部参考源检定法	15
2.2.4.2 微电子测试设备的通道末端检定法	15
2.2.4.3 微电子测试设备的标准样片检定法	16
2.2.4.4 微电子测试设备的内部参考源检定方法实例	16
2.2.5 设备计量的不确定度评定	20
2.2.5.1 影响因素分析	20
2.2.5.2 标准计量器具或装置固有的不确定度	20
2.2.5.3 环境条件引起的不确定度	21
2.2.5.4 人员素质引起的不确定度	21
2.2.5.5 测量方法和过程引入的不确定度	21
2.2.5.6 辅助硬件如夹具、引线等引起的不确定度	21
2.2.5.7 测量重复性引起的不确定度	21
2.2.5.8 设备计量的不确定度的合成	21
2.2.5.9 设备计量的不确定度评定实例	21
参考文献	27
第3章 微电子标准样片的制备、维护和应用技术	28
3.1 综述	28
3.2 微电子数字器件标准样片的制备技术	28
3.2.1 制备内容	28
3.2.2 制备方法	29
3.2.3 制备过程	29
3.2.3.1 原材料(器件类型)的确认	29
3.2.3.2 采购	29
3.2.3.3 临时标识	29
3.2.3.4 三温检测	29
3.2.3.5 老化(静态和动态老化)	30
3.2.3.6 检漏	30

3.2.3.7 常温终测	30
3.2.3.8 赋值参量的确定	30
3.2.3.9 赋值及稳定性验证	30
3.2.3.10 命名及包装(标识)	31
3.2.3.11 申请定级	32
3.2.3.12 定级鉴定	32
3.2.3.13 审批(发证书)	32
3.2.4 微电子标准样片的维护技术	32
3.2.4.1 微电子标准样片的维护	32
3.2.4.2 微电子标准样片的复验和周期检定	32
3.2.5 微电子标准样片的应用技术	32
3.2.5.1 应用规范	32
3.2.5.2 软件开发	33
3.2.5.3 辅助硬件开发及误差消除技术	33
3.2.5.4 消除辅助硬件误差实例	33
3.2.5.5 通道复用技术	34
3.2.5.6 通道冗余测量技术	34
3.2.5.7 通道变换技术	35
参考文献	35
第4章 微电子器件参数的计量检定技术	36
4.1 综述	36
4.2 微电子器件参数的计量检定技术	36
4.2.1 微电子器件参数的计量检定原理	36
4.2.1.1 输入低电流 I_{il} 的计量检定原理	38
4.2.1.2 输入高电流 I_{ih} 的计量检定原理	38
4.2.1.3 输出高阻态时的高电平电流 I_{oh} 的计量检定原理	38
4.2.1.4 输出高阻态时的低电平电流 I_{ol} 的计量检定原理	39
4.2.1.5 电源电流 I_{dd} 的计量检定原理	39
4.2.1.6 输出高电平 V_{oh} 的计量检定原理	39
4.2.1.7 输出低电平 V_{ol} 的计量检定原理	39
4.2.1.8 输入电容 C_i 的计量检定原理	39
4.2.1.9 输出电容 C_o 的计量检定原理	40
4.2.1.10 数据延迟时间 $T_{D(Q)}$ 的计量检定原理	40
4.2.1.11 地址延迟时间 $T_{D(A)}$ 的计量检定原理	40
4.2.2 微电子器件参数的计量检定依据	41
4.2.3 微电子器件参数的计量检定方法	43
4.2.3.1 当前存在的致命问题	43
4.2.3.2 解决方法	44

4.2.4 参数检定程序设计规范实例	45
4.2.4.1 目的和适用范围	45
4.2.4.2 引用文件	45
4.2.4.3 定义	45
4.2.4.4 职责	45
4.2.4.5 要求	46
4.2.4.6 记录	49
4.2.5 参数计量的不确定度评价	49
4.2.5.1 基础知识	49
4.2.5.2 AC 参量的量值校准方法	49
4.2.5.3 不确定度评定/计算	49
参考文献	51

第三部分 微电子测试技术

第5章 微电子测试技术	55
5.1 综述	55
5.2 微电子测试技术	55
5.2.1 微电子器件的分类	55
5.2.1.1 按规模分类的方法	55
5.2.1.2 按用途分类的方法	56
5.2.1.3 按结构分类的方法	56
5.2.1.4 按功能分类的方法	56
5.2.2 微电子器件的参数	57
5.2.2.1 TTL 器件参数	57
5.2.2.2 HTL 器件参数	58
5.2.2.3 ECL 器件参数	58
5.2.2.4 CMOS 器件参数	59
5.2.2.5 双极形随机存储器参数	60
5.2.2.6 MOS 器件参数	60
5.2.2.7 微处理器及外围接口器件参数	61
5.2.2.8 运算放大器参数	61
5.2.2.9 线性放大器参数	62
5.2.2.10 稳压器参数	63
5.2.2.11 时基电路参数	64
5.2.2.12 模拟锁相环参数	64
5.2.2.13 数字锁相环参数	65
5.2.2.14 模拟乘法器参数	65

5.2.2.15	模拟开关参数	66
5.2.2.16	电压比较器参数	66
5.2.2.17	D/A 转换器参数	67
5.2.2.18	A/D 转换器参数	67
5.2.2.19	读出放大器参数	68
5.2.2.20	外围驱动器参数	68
5.2.2.21	磁芯存储器参数	68
5.2.2.22	显示驱动器参数	69
5.2.2.23	电平转换器参数	69
5.2.2.24	线电路参数	70
5.2.3	微电子器件的测试原理、技术和方法	70
5.2.3.1	功能测试	71
5.2.3.2	交流参数测试	74
5.2.3.3	直流参数测试	76
5.2.3.4	微电子器件参数的重要性分析	76
5.3	微电子测试的操作规范	82
5.3.1	微电子测试的人员要求	82
5.3.2	微电子测试设备的要求	82
5.3.3	微电子测试的环境要求	83
5.3.4	微电子测试的操作规程要求	84
5.3.5	微电子测试的记录和报告要求	84
	参考文献	86
第 6 章	十大专用的测试技术	87
6.1	内建自测试	87
6.1.1	综述	87
6.1.2	器件级离线 BIST 的体系结构	87
6.1.3	BIST 的功能和关键元素	89
6.1.4	BIST 的测试过程	89
6.1.5	当前 BIST 的水平	89
6.2	I_{ddq} 参数测试	90
6.2.1	I_{ddq} 参数测试原理	90
6.2.2	I_{ddq} 参数测试集生成	90
6.2.3	I_{ddq} 参数测试方法	91
6.2.4	I_{ddq} 参数测试的将来	91
6.3	I_{ddt} 参数测试	91
6.3.1	I_{ddt} 参数测试的基本原理	92
6.3.2	I_{ddt} 参数测试的基本方法	93
6.3.3	进一步研究	93

6.3.3.1	CMOS 电路电流成分	93
6.3.3.2	I_{ddt} 参数的特性分析	93
6.3.4	I_{ddt} 参数解析模型研究	95
6.3.4.1	撬杠电流解析模型	95
6.3.4.2	撬杠电流解析模型的修正	96
6.4	存储器测试	97
6.4.1	存储器的分类	97
6.4.2	存储器的结构	98
6.4.3	存储器的故障模型	98
6.4.4	存储器的常见故障现象	98
6.4.5	测试图形及其作用	99
6.4.5.1	N 类测试图形	99
6.4.5.2	N^2 类测试图形	100
6.4.5.3	$N^{2/3}$ 类测试图形	102
6.4.6	存储器的测试技术	103
6.4.6.1	EPROM 测试技术	104
6.4.6.2	静态 RAM 测试技术	110
6.4.6.3	动态 RAM 测试技术	110
6.4.7	存储器测试中存在的问题	111
6.5	微处理器测试	111
6.5.1	实装法	112
6.5.2	比较(测试)法	112
6.5.3	图形(测试)法	112
6.5.3.1	输入/输出(I/O)通道设置	113
6.5.3.2	时钟发生器(TG)设置和数据格式的设置	113
6.5.3.3	测试图形的编制和调试	114
6.5.3.4	交流参数测试	115
6.6	PLD 芯片测试	115
6.6.1	ispLSI 器件测试	116
6.6.2	对 E^2 CMOS 单元和编程通路的测试	117
6.6.3	对 I/O 单元和 GLB, ORP 的测试	118
6.6.4	具体实现	118
6.6.4.1	辅助硬件设计	118
6.6.4.2	程序设计	120
6.7	FPGA 测试	122
6.7.1	FPGA 器件资源	122
6.7.2	FPGA 测试的特殊性	123
6.7.3	FPGA 测试方法	124
6.7.3.1	FPGA 测试方法之一	124

6.7.3.2 FPGA 测试方法之二	124
6.8 DSP 测试	125
6.8.1 DSP 基本结构	125
6.8.2 DSP 测试	126
6.8.2.1 DSP 测试方法之一	126
6.8.2.2 DSP 测试方法之二	126
6.9 SOC 测试	127
6.9.1 有关基本概念	127
6.9.2 SOC 的测试体系结构	127
6.9.3 SOC 的测试	128
6.10 边界扫描测试	128
6.10.1 边界扫描测试综述	128
6.10.2 边界扫描测试原理	129
6.10.3 边界扫描测试的物理基础	129
6.10.4 边界扫描测试	129
6.10.5 边界扫描测试标准	130
参考文献	130

第四部分 微电子测试设备

第7章 微电子测试设备	133
7.1 微电子测试设备发展历史	133
7.1.1 现有测试设备的分类与用途	133
7.1.2 测试设备的发展趋势	134
7.2 我国使用的通用主流机	134
7.2.1 S10 测试系统	134
7.2.1.1 S10 测试系统的主要技术指标	134
7.2.1.2 S10 测试系统的物理布局	135
7.2.1.3 S10 测试系统的逻辑布局	136
7.2.1.4 S10 测试系统的主要模块的功能结构	136
7.2.1.5 S10 测试系统的计量	138
7.2.2 ITS9000 系列	138
7.2.2.1 ITS9000MX 测试系统的主要技术指标	138
7.2.2.2 ITS9000MX 系统的物理布局	139
7.2.2.3 ITS9000MX 系统的逻辑布局	140
7.2.2.4 主要模块的功能说明	141
7.2.2.5 操作系统和语言	143
7.2.2.6 系统的开关	143

7.2.2.7 关于系统自带的校验和诊断	143
7.2.2.8 关于 ITS9000MX 正确计量问题	144
7.2.3 V93000 系列	144
7.2.3.1 主要技术指标	144
7.2.3.2 外观结构	145
7.2.3.3 物理布局	146
7.2.3.4 主要模块的功能指标	146
7.2.3.5 操作系统和语言	147
7.2.3.6 计量	147
7.2.4 ASL3000/1000 系列	149
7.2.4.1 主要技术指标	149
7.2.4.2 物理布局	150
7.2.4.3 逻辑布局	151
7.2.4.4 主要模块的功能结构	153
7.2.4.5 操作系统和语言	154
7.2.4.6 计量	154
7.2.5 SapphireS40 测试系统	154
7.2.5.1 主要技术指标	154
7.2.5.2 物理布局	155
7.2.5.3 主要模块的功能结构和技术指标	156
7.2.5.4 操作系统和语言	158
7.2.5.5 计量	158
7.2.6 J750 测试系统	158
7.2.6.1 主要技术指标	159
7.2.6.2 物理布局	160
7.2.6.3 逻辑布局	160
7.2.6.4 主要模块的功能结构和主要技术指标	160
7.2.6.5 操作系统和语言	162
7.2.6.6 计量	162
7.2.7 Cstalist 测试系统	162
7.2.7.1 主要技术指标	163
7.2.7.2 逻辑布局	163
7.2.7.3 测试头的物理布局	164
7.2.7.4 主要模块的功能结构和技术指标	164
7.2.7.5 操作系统和语言	165
7.2.7.6 计量	165
7.2.8 国产 JC3160 系列	165
7.2.8.1 主要技术指标	165
7.2.8.2 系统结构	166

7.2.8.3 主要模块的功能和技术指标	166
7.2.8.4 操作系统和语言	169
7.2.8.5 计量	169
7.2.9 国产 SP31××系列	169
7.2.9.1 主要技术指标	169
7.2.9.2 系统结构	169
7.2.9.3 主要模块的功能和技术指标	170
7.2.9.4 操作系统和语言	171
7.2.9.5 计量	172

第五部分 微电子测试程序设计开发技术

第 8 章 测试软件设计开发技术	175
8.1 综述	175
8.2 测试软件设计开发技术	175
8.2.1 测试软件开发的目的和要求	175
8.2.2 测试软件设计依据	175
8.2.3 一般软件设计原理和方法	176
8.2.3.1 结构化的设计原理	176
8.2.3.2 逐步求精的实现方法	176
8.2.3.3 N-S 图	177
8.2.4 测试软件的可测性设计技术	177
8.2.4.1 微电子测试程序的可测性设计要求	178
8.2.4.2 微电子测试程序的可测性设计技术	178
8.2.4.3 微电子测试程序的正确性验证	179
8.2.4.4 测试软件可测性设计的得益和代价	180
8.2.4.5 结论	180
8.2.5 辅助测试硬件	180
8.2.5.1 辅助测试硬件综述	180
8.2.5.2 LB 设计技术	180
8.2.5.3 DUT 设计技术	182
8.2.5.4 通用的 LB+DUT 方式	182
8.2.5.5 带有自动修正机制的 LB 设计技术	183
8.2.5.6 测试速率 200 MHz 以上的 LB 设计技术	183
第 9 章 测试程序开发的质量保障技术	184
9.1 综述	184
9.2 测试程序开发的质量保障技术	184

9.2.1 软件工程技术	184
9.2.1.1 工程化管理	184
9.2.1.2 文件化描述	184
9.2.1.3 结构化设计	185
9.2.2 开发规范	185
9.2.2.1 规范的一般要求	185
9.2.2.2 规范的详细要求	185
9.2.2.3 规范举例 1(重点:开发过程)	185
9.2.2.4 程序的可靠性验证	191
9.2.2.5 规范举例 2(重点:可测性设计及验证)	191
9.2.3 检测过程的质量保证	198
参考文献	199
第 10 章 ASIC 器件的自动测试与自动测试程序生成(ATPG)技术	200
10.1 综述	200
10.2 ASIC 器件的自动测试与 ATPG 技术平台	200
10.2.1 硬、软件组成	200
10.2.1.1 硬件组成	200
10.2.1.2 软件组成	201
10.2.1.3 通信规则	201
10.2.2 工作流程	202
10.2.3 应用条件	203
10.2.4 实现过程	203
10.2.4.1 测试程序的自动生成	203
10.2.4.2 时序电路的图形码重用	205
10.2.4.3 直流测试时的自动定位	205
10.2.4.4 系统间的自动切换	205
10.2.4.5 自动编译、加载和测试	205
10.2.4.6 数据流程和工作流程	206
10.2.5 ASICATPG 使用说明书	206
10.2.5.1 设计目标	206
10.2.5.2 运行环境	206
10.2.5.3 执行程序名字	206
10.2.5.4 结果文件名字	206
10.2.5.5 操作过程	206
10.2.5.6 其他说明	212
10.2.6 与 ATPG 有关的部分关键技术	213
10.2.6.1 自动定位技术	213
10.2.6.2 状态复位技术	213

10.2.6.3 常态三态测试向量的一体化设计技术.....	213
10.2.7 测试生成算法.....	217
10.2.7.1 功能法.....	217
10.2.7.2 穷举法.....	218
10.2.7.3 基于输入向量的有限扩展法.....	218
10.2.7.4 其他算法.....	218
第 11 章 测试程序的软件测试和验证技术	222
11.1 综述.....	222
11.2 微电子测试程序质量验证的发展历史.....	222
11.2.1 设计规范.....	222
11.2.2 可测性程序设计技术.....	222
11.2.2.1 局部化测试参数.....	223
11.2.2.2 相对性模拟.....	223
11.2.3 验证的具体方法.....	223
11.2.3.1 静态检查的目的和方法.....	223
11.2.3.2 调试的目的和方法.....	223
11.2.3.3 实测验证的目的和方法.....	223
11.2.4 当前的验证水平.....	224
11.3 微电子测试程序的软件自动测试.....	224
11.3.1 基于软件测试的新概念和新方法.....	224
11.3.2 完备的微电子测试程序的软件测试方案.....	224
11.4 发展方向.....	227