



装备测试性工程系列丛书

# 装备测试性建模 与设计技术

邱 静 刘冠军 杨 鹏 等 著  
吕克洪 苏永定 陈希祥



科学出版社

国防科技大学学术专著出版基金资助出版  
装备测试性工程系列丛书

# 装备测试性建模与设计技术

邱 静 刘冠军 杨 鹏 等 著  
吕克洪 苏永定 陈希祥

科 学 出 版 社

北 京

## 内 容 简 介

测试性是装备便于测试和诊断的重要设计特性,它已成为和可靠性、维修性同等重要的独立学科,开展测试性设计技术研究具有重要的学术价值和工程指导意义。本书针对测试性建模与设计问题进行了系统论述,内容包括:测试性需求及指标分配技术、测试性建模技术、测试性预计技术、测试性方案优化设计技术、诊断策略构建技术、测试性辅助设计软件以及工程应用案例。

本书可作为高等院校相关专业研究生和高年级本科生的参考书,也可供装备测试性、维修性及测试诊断等领域的科研人员与工程技术人员参考。

### 图书在版编目(CIP)数据

装备测试性建模与设计技术 / 邱静等著. —北京:科学出版社,2012  
(装备测试性工程系列丛书)

ISBN 978-7-03-033411-4

I. ①装… II. ①邱… III. ①武器装备-测试 IV. ①TJ06

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2012)第 013244 号

责任编辑:裴 育 杨 然 / 责任校对:包志虹

责任印制:赵 博 / 封面设计:耕者设计工作室

科学出版社出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

中国科学院印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

\*

2012 年 1 月第 一 版 开本:B5 (720×1000)

2012 年 1 月第一次印刷 印张:31 3/4

字数:621 000

定价:108.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

## 《装备测试性工程系列丛书》序

现代装备的功能与性能越来越先进,技术与结构越来越复杂,对装备测试、诊断与维修保障的挑战越来越严峻。传统的以外部测试为主的测试模式已无法从根本上解决复杂装备的测试问题。要实现准确、快速、全面的测试,就必须按照并行工程与集成科学的思想,在装备论证、设计与研制开始时就综合考虑测试与诊断问题。测试性工程作为装备“五性”工程的主要内容之一,正是应对这种变革与思想,旨在实现装备测试与诊断能力的“优生”和“优育”的总体优化,是从根本上提高装备测试与诊断水平的技术途径,也是当前国内外装备保障领域研究与应用的热点之一。

测试性概念和技术自 20 世纪末进入我国,在我国装备管理、研制部门和科研工作者的高度重视与共同努力下,取得了长足发展。部分新型装备明确提出了测试性要求,开展了测试性工程实践,积累了一定的测试性工程经验。

从总体上来看,我国装备测试性工程还处于以经验、规则为主导的阶段,严格按照有关国军标规范、系统科学地开展测试性论证、设计、分析与验证的案例还较少。从技术发展来看,装备测试性工程已经从经验设计阶段发展到基于模型的科学设计阶段。相关部门也正在组织编撰新标准,替代现行的 GJB2547—95《装备测试性大纲》,旨在以基于模型的测试性分析与设计理论为指导,系统科学地开展装备测试性工程。

国防科技大学装备综合保障技术重点实验室在学科学术带头人温熙森教授、邱静教授的带领下,自“九五”以来一直致力于测试性领域的学术研究与工程应用,在智能机内测试、机内测试降虚警、测试性建模与分析、测试性设计、测试性验证与评估等方面取得了丰硕的研究与应用成果。《装备测试性工程系列丛书》正是对其最新研究成果的全面总结和体现。该丛书以测试性新标准为指导,结合典型案例,系统而全面地阐述了测试性工程的技术流程、测试性建模分析理论、测试性设计方法、测试性验证与评估技术等,并重点针对该领域存在的国际性难题——机内测试虚警问题,阐述了机电系统机内测试降虚警技术。

该丛书体系完整、结构清晰、理论深入、技术全面、方法规范、案例详实,融系统

性、理论性、创新性和指导性于一体。我相信该丛书必将为测试性领域的管理与技术工作者提供非常好的参考和指导,对推动我国装备测试性工程的发展也将起到积极的促进作用。



中国工程院院士

2011 年 12 月于北京

# 前 言

在信息化新技术革命的推动下,各国投入大量的人力、物力和财力竞相发展高新技术武器装备,加快武器装备升级换代。高新技术武器装备在现代战争中扮演着重要角色,其战备完好性、可用性和快速出动能力成为决定现代战争胜负的关键。同时,武器装备的经济可承受性也日益引起重视。高新技术的应用在提高武器装备性能的同时,也增加了装备的复杂性,势必带来装备的测试设备多、测试兼容性差、测试信息获取困难、检测和隔离故障时间长、虚警率高等问题,这不仅会阻碍装备战斗力和保障力的形成,同时会增加装备的使用和保障费用。经过大量的研究和实践,人们认识到:要想从根本上解决上述问题,必须把对付故障的时机从使用阶段提前到设计阶段,即在装备设计研制一开始就综合考虑测试、诊断与维修保障等问题,使装备具有良好的测试性。

测试性,也称可测性,是指装备能及时准确地确定其状态(可工作、不可工作或性能降低),并隔离其内部故障的一种设计特性。测试性是装备便于测试和诊断的重要设计特性,具有良好测试性的装备可以缩短测试时间、快速准确地检测和隔离故障,进而减少维修时间,从而提高装备的可用性,减少使用保障费用。测试性连同可靠性、维修性、保障性和安全性业已成为装备设计必须考虑的系统属性。

20 世纪 80 年代以来,测试性技术在国内外取得了大量的成果和应用:公开发表了大量的论文和研究报告,颁布了大量的标准、规范和手册,开发出为数不少的测试性辅助设计分析软件,并在装备型号中大量应用。测试性已成为和可靠性、维修性同等重要的独立学科。测试性设计技术从最初的基于经验的设计、结构化设计发展到现在的基于模型的设计,包括许多关键技术和应用,但目前还没有一部专门的著作系统介绍测试性设计技术及其应用情况。作者在吸收国内外测试性研究最新成果的基础上,结合自身多年科研、教学和装备型号研制经验著成本书,借以全面阐述测试性内涵、研究现状、工作流程、主要研究内容及关键技术。书中重点叙述了测试性需求及指标分配技术、测试性建模技术、测试性方案优化设计技术及诊断策略构建技术等,介绍了国际上著名的测试性辅助设计软件 TEAMS、eXpress 和作者开发的 TADES,并以某导弹控制系统为背景对书中所述技术进行了应用示范。

本书在撰写过程中得到了学科带头人温熙森教授的悉心指导。全书各章的执笔者为:第 1 章邱静、刘冠军,第 2 章邱静、苏永定,第 3 章邱静、沈亲沐、杨鹏,第 4 章刘冠军、杨鹏、陈希祥,第 5 章邱静、杨鹏,第 6 章邱静、陈希祥,第 7 章刘冠军、

杨鹏、杨述明,第8章刘冠军、吕克洪、张勇。国防科技大学机电工程与自动化学院陈循教授、李岳教授、陶利民研究员、杨拥民教授、胡芑庆教授、胡政研究员、徐永成教授、易晓山副教授、秦国军副研究员、钱彦岭副教授为本书的顺利完成提供了多方面的帮助。博士生曾庆虎、李天梅、徐玉国、谭晓栋、邓冠前、王超、王刚,以及硕士生陈刚勇、刘津、高鑫宇、陈少将、赵晨旭、吴超、赵志傲等参加了全书的撰写和整理工作。

相关课题研究得到了国家、军队主管部门领导和通用测试技术专业组的大力支持,在此深表谢意。湖南大学于德介教授、中南大学吴敏教授以及国防科技大学陈书明教授对本书进行了审阅,并提出了宝贵意见,在此深表感谢。本书的出版得到了科学出版社的大力支持,以及国家科学技术学术著作出版基金和国防科技大学学术专著出版基金的资助,在此表示衷心的感谢。本书参考和引用了许多国内外有关学者的论文和著作,在此一并表示感谢。

测试性是一门与装备应用结合非常紧密的新兴学科,许多问题尚待进一步研究和探索,特别是将测试性理论和技术系统深入地贯彻到装备型号研制中的路还很长,需要装备和系统设计研制人员共同参与。新型保障模式和预测健康管理技术的成熟和应用,对测试性提出了更新、更高的要求,其内涵和技术有待进一步延伸和拓展,相关理论和应用问题值得进一步深入研究。由于作者水平有限,书中难免存在不妥之处,恳请读者批评指正。

作 者

2011年8月于湖南长沙国防科技大学

# 目 录

## 《装备测试性工程系列丛书》序

## 前言

|                             |    |
|-----------------------------|----|
| 第 1 章 绪论                    | 1  |
| 1.1 测试性设计技术内涵               | 1  |
| 1.2 测试性设计技术研究现状综述           | 1  |
| 1.2.1 国外研究现状                | 1  |
| 1.2.2 国内研究现状                | 8  |
| 1.3 测试性工程工作流程               | 11 |
| 1.4 测试性建模与设计关键技术分析          | 13 |
| 1.5 本书的结构安排                 | 15 |
| 参考文献                        | 16 |
| 第 2 章 测试性需求分析技术             | 24 |
| 2.1 概述                      | 24 |
| 2.2 测试性需求影响因素分析             | 26 |
| 2.2.1 任务要求分析                | 27 |
| 2.2.2 可靠性要求分析               | 27 |
| 2.2.3 维修保障要求分析              | 29 |
| 2.2.4 性能要求分析                | 29 |
| 2.2.5 功能结构要求分析              | 31 |
| 2.2.6 可利用/可达技术分析            | 32 |
| 2.2.7 系统需求信息与测试性需求的关联分析     | 33 |
| 2.3 测试性参数分析与指标体系构建          | 36 |
| 2.3.1 测试性参数分类               | 37 |
| 2.3.2 测试性参数定义与分析            | 38 |
| 2.3.3 测试性参数选择               | 47 |
| 2.3.4 测试性指标体系构建             | 48 |
| 2.3.5 基于综合权衡的测试性指标转换方法      | 57 |
| 2.4 测试性指标确定的一般方法            | 62 |
| 2.4.1 通用测试性指标确定方法           | 62 |
| 2.4.2 面向可用度/任务成功率的测试性指标确定方法 | 64 |



|                                       |     |
|---------------------------------------|-----|
| 2.5 基于广义随机 Petri 网的测试性指标确定方法 .....    | 70  |
| 2.5.1 广义随机 Petri 网概述 .....            | 70  |
| 2.5.2 基于 GSPN 的装备系统层测试性需求建模与分析 .....  | 71  |
| 2.5.3 基于 GSPN 的装备多层级测试性需求建模与分析 .....  | 77  |
| 2.6 基于 DSPN 的多任务系统测试性指标确定方法 .....     | 87  |
| 2.6.1 复杂装备的 PMS 分析 .....              | 88  |
| 2.6.2 面向 PMS 的 DSPN 模型 .....          | 88  |
| 2.6.3 基于 DSPN 的 PMS 测试性需求分析模型 .....   | 91  |
| 2.6.4 DSPN-PMS 性能量化分析与测试性指标确定方法 ..... | 96  |
| 2.6.5 案例分析与验证 .....                   | 99  |
| 2.7 本章小结 .....                        | 105 |
| 参考文献 .....                            | 106 |
| <b>第3章 测试性指标分配技术</b> .....            | 110 |
| 3.1 概述 .....                          | 110 |
| 3.2 测试性分配的数学模型与一般流程 .....             | 111 |
| 3.3 经典测试性分配方法 .....                   | 115 |
| 3.3.1 经验分配法 .....                     | 115 |
| 3.3.2 等值分配法 .....                     | 116 |
| 3.3.3 加权分配法 .....                     | 116 |
| 3.3.4 故障率分配法 .....                    | 119 |
| 3.3.5 优化分配法 .....                     | 120 |
| 3.3.6 综合加权分配法 .....                   | 122 |
| 3.3.7 现有各分配方法分析 .....                 | 124 |
| 3.4 基于 AHP 的测试性分配方法 .....             | 126 |
| 3.4.1 基本原理 .....                      | 126 |
| 3.4.2 具体步骤 .....                      | 127 |
| 3.4.3 应用范例 .....                      | 129 |
| 3.5 新老设备组合系统的测试性分配方法 .....            | 130 |
| 3.5.1 基本原理 .....                      | 130 |
| 3.5.2 具体步骤 .....                      | 131 |
| 3.5.3 应用范例 .....                      | 134 |
| 3.6 本章小结 .....                        | 134 |
| 参考文献 .....                            | 135 |
| <b>第4章 测试性建模技术</b> .....              | 136 |
| 4.1 概述 .....                          | 136 |

|                                     |            |
|-------------------------------------|------------|
| 4.2 故障与测试相关性的概念 .....               | 138        |
| 4.3 相关性矩阵获取方法 .....                 | 139        |
| 4.3.1 基于故障树生成相关性矩阵的方法 .....         | 139        |
| 4.3.2 基于仿真分析生成相关性矩阵的方法 .....        | 143        |
| 4.4 经典测试性模型 .....                   | 149        |
| 4.4.1 测试性模型基本原理 .....               | 149        |
| 4.4.2 信息流模型 .....                   | 153        |
| 4.4.3 多信号模型 .....                   | 163        |
| 4.4.4 两种经典模型的比较 .....               | 167        |
| 4.5 测试性模型扩展 .....                   | 173        |
| 4.5.1 故障要素扩展 .....                  | 173        |
| 4.5.2 测试要素扩展 .....                  | 182        |
| 4.6 测试性信息描述模型 .....                 | 190        |
| 4.6.1 广义测试性信息共享与信息建模的基本思想 .....     | 191        |
| 4.6.2 基于 EXPRESS-G 的测试性信息描述模型 ..... | 192        |
| 4.6.3 基于 XML 的测试性描述模型 .....         | 195        |
| 4.6.4 基于本体的测试性信息描述模型 .....          | 197        |
| 4.7 本章小结 .....                      | 208        |
| 参考文献 .....                          | 208        |
| <b>第5章 测试性预计技术</b> .....            | <b>210</b> |
| 5.1 概述 .....                        | 210        |
| 5.2 工程预计方法 .....                    | 211        |
| 5.2.1 基本原理与技术流程 .....               | 211        |
| 5.2.2 测试性/BIT 预计示例 .....            | 216        |
| 5.2.3 工程预计方法的不足 .....               | 220        |
| 5.3 基于模型的测试性预计方法 .....              | 221        |
| 5.3.1 基本原理及技术流程 .....               | 221        |
| 5.3.2 故障检测率预计 .....                 | 224        |
| 5.3.3 故障隔离率预计 .....                 | 225        |
| 5.3.4 虚警率预计 .....                   | 226        |
| 5.3.5 故障检测时间预计 .....                | 227        |
| 5.3.6 故障隔离时间预计 .....                | 227        |
| 5.4 本章小结 .....                      | 228        |
| 参考文献 .....                          | 228        |

|                                  |     |
|----------------------------------|-----|
| <b>第 6 章 测试性方案优化设计技术</b> .....   | 230 |
| 6.1 概述 .....                     | 230 |
| 6.2 测试性方案优化设计技术流程 .....          | 233 |
| 6.2.1 测试性方案优化设计技术流程 .....        | 233 |
| 6.2.2 固有测试性设计 .....              | 234 |
| 6.2.3 UUT/ATE 的兼容性设计 .....       | 235 |
| 6.2.4 基于总线的测试性方案集成 .....         | 238 |
| 6.3 测试优化选择技术 .....               | 241 |
| 6.3.1 测试集完备性分析 .....             | 243 |
| 6.3.2 基于布尔逻辑相关性矩阵的测试优化选择方法 ..... | 244 |
| 6.3.3 基于整数编码相关性矩阵的测试优化选择方法 ..... | 260 |
| 6.4 测试资源选择与优化配置技术 .....          | 265 |
| 6.4.1 测试资源选择与优化配置影响因素分析 .....    | 266 |
| 6.4.2 基于层次分析法的目标权重计算方法 .....     | 268 |
| 6.4.3 测试资源选择与优化配置灰色局势决策模型 .....  | 270 |
| 6.4.4 测试资源选择与优化配置灰色局势决策方法 .....  | 271 |
| 6.5 BIT 总体设计及其权衡技术 .....         | 273 |
| 6.5.1 BIT 总体设计 .....             | 274 |
| 6.5.2 BIT 对系统影响分析 .....          | 280 |
| 6.5.3 BIT 运行模式权衡分析 .....         | 284 |
| 6.5.4 BIT 实现方式权衡 .....           | 289 |
| 6.6 本章小结 .....                   | 293 |
| 参考文献 .....                       | 294 |
| <b>第 7 章 诊断策略构建技术</b> .....      | 297 |
| 7.1 概述 .....                     | 297 |
| 7.2 诊断策略构建基本理论 .....             | 302 |
| 7.2.1 问题的数学描述 .....              | 302 |
| 7.2.2 故障隔离推理机 .....              | 304 |
| 7.2.3 指导测试优化排序的启发函数 .....        | 305 |
| 7.3 经典诊断策略构建方法 .....             | 305 |
| 7.3.1 贪婪搜索方法 .....               | 305 |
| 7.3.2 AO* 搜索方法 .....             | 312 |
| 7.3.3 准深度搜索方法 .....              | 316 |
| 7.4 复杂装备的诊断策略构建技术 .....          | 320 |
| 7.4.1 面向多级维修的诊断策略构建技术 .....      | 320 |

|                                 |            |
|---------------------------------|------------|
| 7.4.2 多模式系统的诊断策略构建技术 .....      | 325        |
| 7.4.3 多回路系统的诊断策略构建技术 .....      | 334        |
| 7.4.4 应用特殊类型测试的诊断策略构建技术 .....   | 344        |
| 7.5 测试不可靠时的诊断策略构建技术 .....       | 348        |
| 7.5.1 问题的数学描述 .....             | 348        |
| 7.5.2 基于双启发函数的诊断策略构建方法 .....    | 349        |
| 7.5.3 诊断策略的准确度预计 .....          | 355        |
| 7.5.4 测试不可靠时的诊断策略构建范例 .....     | 358        |
| 7.6 考虑多故障时的诊断策略构建技术 .....       | 363        |
| 7.6.1 多故障建模与分析 .....            | 363        |
| 7.6.2 非冗余系统的多故障诊断策略构建技术 .....   | 369        |
| 7.6.3 冗余系统的多故障诊断策略优化设计技术 .....  | 377        |
| 7.7 本章小结 .....                  | 384        |
| 参考文献 .....                      | 384        |
| <b>第8章 测试性建模与设计软件及应用 .....</b>  | <b>387</b> |
| 8.1 概述 .....                    | 387        |
| 8.2 eXpress 软件 .....            | 388        |
| 8.2.1 交互式图形化建模 .....            | 388        |
| 8.2.2 测试性分析与报告 .....            | 394        |
| 8.3 TEAMS 软件 .....              | 399        |
| 8.3.1 交互式图形化建模 .....            | 400        |
| 8.3.2 测试性分析与报告 .....            | 408        |
| 8.3.3 其他模块简介 .....              | 414        |
| 8.4 TADES 系统 .....              | 417        |
| 8.4.1 测试性需求分析软件 .....           | 419        |
| 8.4.2 测试性分析与设计软件 .....          | 423        |
| 8.5 TADES 系统在导弹控制系统中的应用示范 ..... | 434        |
| 8.5.1 导弹控制系统概述 .....            | 434        |
| 8.5.2 导弹控制系统测试性需求分析与指标分配 .....  | 435        |
| 8.5.3 导弹控制系统测试性分析与设计 .....      | 445        |
| 8.6 本章小结 .....                  | 466        |
| 参考文献 .....                      | 466        |
| <b>附录一 缩略语中英文对照 .....</b>       | <b>468</b> |
| <b>附录二 测试性术语 .....</b>          | <b>477</b> |

# 第 1 章 绪 论

## 1.1 测试性设计技术内涵

现代装备的功能越来越先进,技术和结构复杂性越来越强,因此对装备测试和诊断提出了更高、更新、更严的要求,也带来了严重的测试、诊断和维修保障问题。主要表现在:①各类测试信息获取困难,无法测试或测试过程复杂;②测试设备繁多,测试标准、测试体系与测试设备不统一、不通用、不兼容;③故障检测与诊断准确性较差、虚警率高;④测试与诊断时间长、效率低、费用高,维修保障资源浪费,装备全寿命周期费用增加。

针对上述问题,测试和诊断界及相关人员开展了大量的研究,提出了大量先进的测试理念、测试技术,开发了功能强大的各类测试系统与设备,如 VXI、PXI 测试系统等。但人们在研究和工程实践中日益发现,片面强调外部测试系统的研发并不能也无法从根本上解决复杂装备的测试问题,要实现快速而精确的测试,必须在装备设计研制一开始就综合考虑测试与诊断问题,使装备具有良好的机内测试(built-in test, BIT)、自诊断能力和为外部测试提供良好而方便的特性和接口,并配套开发外部测试系统,即开展测试性设计。

测试性(testability)也称可测性,是指“产品能及时准确地确定其状态(可工作、不可工作或性能下降)并有效地隔离其内部故障的一种设计特性”<sup>[1]</sup>。测试性作为产品的一种重要属性为人们所认识是在 20 世纪 70 年代中期。测试性设计是指在装备设计阶段并行考虑测试问题,综合应用 BIT、自动测试、人工测试等测试资源,通过优化设计用最小的测试代价获得充分、准确的测试。测试性设计是对传统测试机制的革新,是并行工程思想在装备测试领域的体现,可以实现装备测试能力的“优生”和测试的总体优化,进而快速、全面、准确地感知装备技术状态。

## 1.2 测试性设计技术研究现状综述

### 1.2.1 国外研究现状

历经了 30 余年的发展,美军对于测试性技术体系的认识已经相当全面和完整,其技术水平已经达到一个比较高的水平,概括起来有以下特点。

在技术研究方面,自“测试性”术语提出至今,测试性技术的研究发展经历了三

个阶段:基于经验的设计、结构化的设计和基于模型的设计。

基于经验的测试性设计方法在测试性技术发展的初期(20世纪70年代到80年代中期)比较流行。由于当时测试性概念才初步形成,缺乏深入的理论研究,在工程实践中遇到的一些测试性问题,如测量参数(figure of merit)、设计指导准则、验证和评价方法等通常以军用标准、研究报告、设计指南和用户手册的形式记录下来,用以指导其他的测试性设计项目。

1976年,美国海军首先开始涉足测试性设计领域,海军器材部(Naval Material Command, NAVMATINST)对不同类型的电子电路和系统进行了测试性/BIT研究,发布了NAVMATINST 3960.9《BIT设计指南》<sup>[2]</sup>。1978年,海军海面武器中心(Naval Surface Weapons Center, NSWC)发布了《测试性指南报告》<sup>[3]</sup>,综述了当时存在的测试性问题,定义了一些测试性术语。

1983年美国国防部颁布了MIL-STD-470A《系统及设备维修性管理大纲》<sup>[4]</sup>,强调测试性是维修性大纲的一个重要组成部分,承认BIT及外部测试不仅对维修性设计特性产生重大影响,而且会影响到武器系统的采购及其全寿命周期费用。1985年美国国防部颁布了MIL-STD-2165《电子系统及设备测试性大纲》<sup>[5]</sup>,规定了电子组件内如何保证足够的测试以识别和隔离故障的保障要求,即在系统及设备各研制阶段中应实施的测试性分析、设计及验证的要求及实施方法,是测试性研究的总结性文件,标志了测试性作为一门独立学科的形成。

为满足武器系统的监控诊断与维修要求,美国实施了一系列的综合诊断研究计划,如海军的“综合诊断保障系统”(Integrated Diagnosis Support System, IDSS)计划<sup>[6,7]</sup>、空军的“通用综合维修与诊断平台”(Generic Integrated Maintenance and Diagnostic Support, GIMADS)计划<sup>[8,9]</sup>等。基于上述研究成果,美国国防部于1991年颁布了MIL-STD-1814《综合诊断》<sup>[10]</sup>,对测试性有关内容作了进一步规范。为综合考虑非电子产品的测试性并与综合诊断相协调,美国国防部于1993年颁布了MIL-STD-2165A《系统和设备测试性大纲》并取代了MIL-STD-2165。1995年又将MIL-STD-2165A改编为MIL-HDBK-2165《系统和设备测试性手册》<sup>[11]</sup>。

同时,一些民间机构和公司根据各自的研究成果,也相继发布了测试性手册和指南,如美国罗姆航空发展中心(Rome Air Develop Center, RDAC)的《RDAC测试性手册》<sup>[12]</sup>、航空无线电公司(Aeronautics Radio Incorporation, ARINC)的《BITE设计和使用指南》<sup>[13]</sup>、高级测试工程(Advanced Test Engineering, ATE)公司的《SMTA测试性指南》<sup>[14]</sup>等。

大量测试性设计标准和指南的制定和颁布,在一定程度上促进了测试性设计技术的普及和发展。然而人们在实践中发现,这种经验方法往往是原则性的内容多,而可操作性却比较差。随着人们对测试性认识的加深,一种新的测试性设计思

想——结构化的设计思想逐渐形成。结构化的测试性设计技术以 BIT 体系结构设计技术和边界扫描技术为核心<sup>[15,16]</sup>,主要有以下特点。

首先,BIT 结构化设计技术逐渐成熟。随着各种智能 BIT(intelligent BIT)和灵巧 BIT(smart BIT)的大量应用,BIT 体系结构问题成为研究的热点<sup>[17]</sup>。目前,国外经过研究提出了不少的 BIT 体系结构,包括:集中式(autocratic)、采邑式(feudalistic)、联邦式(confederated)等结构形式<sup>[18]</sup>。1995 年,美国洛克希德·马丁(Lockheed Martin)公司提出了一种层次 BIT 结构<sup>[19]</sup>。位于系统最底层的芯片通过测试访问端口(test access port,TAP)与电路板的测试控制器相连,由测试控制器控制各芯片的 BIT;各电路板通过背板测试总线与外场可更换单元(line replaceable unit,LRU)测试控制器相连,由 LRU 的测试执行模块实现对各电路板的测试调度;各 LRU 通过系统维护总线与系统维护控制器相连,由系统操作软件指挥维护控制器完成系统测试和其他功能的有机集成。层次 BIT 结构是目前装备 BIT 结构设计的主流,很多先进的武器装备均采用了这种结构,如 F-16 及 F-22 等战机;一些民用系统,特别是航空系统中也广泛采用这种结构<sup>[20]</sup>。

其次,复杂电子产品的结构化测试性设计技术日趋完善。早期电子产品主要采用专项测试性设计(Ad hoc DFT),即根据产品的功能结构特点,采取一些简单易行的措施来提高产品的固有测试性(inherent testability)。这种方法对于采用分立元件、复杂度较低的电路比较有效。然而,随着电子器件集成度的提高、安装密度的增大,电子产品大量采用表面贴装器件、多芯片模块、多层印刷电路板,专项测试性设计难以解决根本问题。

1985 年,欧美一些公司成立了联合测试行动组织(Joint Test Action Group, JTAG),提出了一种结构化的测试性设计技术——边界扫描技术<sup>[21]</sup>。该技术通过在器件输入输出管脚与内核电路之间置入边界扫描单元,实现对器件和其外围电路的测试。1990 年 IEEE 和 JTAG 共同推出 IEEE Std 1149.1-1990《边界扫描标准》<sup>[22]</sup>,使边界扫描技术得到了推广。1995 年,IEEE 将美国军方于 20 世纪 80 年代所提出的元件测试和维修总线(ETM-Bus)与系统级测试和维修总线(TM-Bus)发展为模块测试和维修总线(MTM-Bus)<sup>[23]</sup>,并颁布了 IEEE Std 1149.5《模块测试与维修总线标准》<sup>[24]</sup>。该总线用相对较少的测试费用,实现了系统各级可更换单元的测试维护,特别是现场的测试维护。该总线现已被美国空军的“宝石柱”计划和“宝石平台”计划的航空电子系统体系结构所采用,并在 F-22、RAH-66、波音 777 等大型系统中得到成功应用<sup>[25]</sup>。为了实现对数字、模拟混合测试信号的有效控制和访问,1999 年 IEEE 颁布了 IEEE Std 1149.4《混合信号测试总线标准》<sup>[26]</sup>。

进入 21 世纪,IEEE 颁布了最新一版的边界扫描标准 IEEE Std 1149.1-2001<sup>[27]</sup>。为了满足交流耦合差动网络的边界扫描测试需求,安捷伦(Agilent)公司和思科(Cisco)公司于 2001 年开始合作研究数字网络的测试技术,IEEE 随后接受

该项技术并着手制定 IEEE Std 1149.6《先进数字网络的边界扫描标准》<sup>[28]</sup>。随着片上系统(system on chip, SoC)、片上网络(net on chip, NoC)和微机电系统(MEMS)等产品出现,超大规模嵌入式系统的测试问题成为测试学界的一大研究热点<sup>[29,30]</sup>。2005年,IEEE基于IEEE Std 1149.1颁布了IEEE Std 1500《嵌入式芯核的测试性标准》<sup>[31]</sup>。

随着装备系统复杂度和集成度的急剧增加,测试性/BIT与装备性能的一体化、并行设计成为发展现代复杂武器系统的必然要求。由于结构化设计方法本质上采用的是一种串行模式,无法适应并行设计的要求,因此必须寻找新的测试性设计方法。经过大量的研究和实践,人们形成了以下观点:①要实现测试性/BIT与装备性能并行设计,必须建立系统测试性模型,将各种与测试性设计相关的因素、知识有效地组织起来;②这种测试性模型能为设计者提供有效的设计和验证手段,且能在并行工程的环境下,为不同的设计团队提供统一的信息交流界面,保证设计的顺利实施;③测试性模型和系统模型不同,系统模型主要用来描述系统的功能、行为及结构信息,而测试性模型主要用来描述系统故障与测试之间的逻辑关系及对测试资源的占用关系。

自20世纪80年代中后期开始,一些大学和机构开始着手研究测试性建模技术,至今已提出了不少测试性模型,其中具有代表性的是DSI公司的相关性模型(dependency model)<sup>[32~34]</sup>、ARINC公司的信息流模型(information flow model)<sup>[35~43]</sup>以及康涅狄格大学的多信号流图模型(multi-signal flow graph)<sup>[44~46]</sup>。国外还进一步研究了基于模型的测试性分析、设计与评估技术<sup>[43,47]</sup>,并开发了一些测试性设计CAD软件,如WSTA<sup>[7]</sup>、STAMP<sup>[43]</sup>、eXpress<sup>[48]</sup>、TEAMS<sup>[49]</sup>等。

为了便于各个企业之间数据和产品的交换与共享,一个国际化标准组织——IEEE标准协调委员会20(Standard Coordinating Committee 20, SCC20)正在研究测试性信息描述模型。这种模型建立在一个统一的、能支持不同产品信息描述和交换标准上,能够面向系统不同层次和级别的开发人员<sup>[50]</sup>。目前,SCC20已制定了一系列的标准<sup>[51]</sup>:IEEE Std 1232《适用于所有环境的人工智能交换和服务标准》<sup>[52~55]</sup>规范了测试系统与人工智能系统之间的接口,定义了测试和诊断信息,允许这些信息在不同的使用环境中进行交互,基于EXPRESS信息描述语言,构建了动态环境模型(dynamic context model, DCM)、增强型诊断推理模型(enhanced diagnostic inference model, EDIM)、诊断推理模型(diagnostic inference model, DIM)、通用元素模型(common element model, CEM)、故障树模型(fault tree model, FTM)等五种诊断模型。基于IEEE Std 1232中定义的基本模型,IEEE Std 1522《测试性与可诊断性特征和测度标准》<sup>[56~58]</sup>定义了一系列的测试性与诊断性测度的形式化描述模型,IEEE Std 1598《测试需求模型标准》<sup>[59,60]</sup>定义了测试性需求分析模型和基本框架,IEEE Std 1641《信号与测试定义标准》<sup>[61~63]</sup>定义了



一系列的信号与测试的形式化描述模型,IEEE Std 1636《维修信息收集与分析软件接口标准》<sup>[64,65]</sup>定义了一系列的维修信息模型。

在工具研发方面,国外开发了不少测试性辅助工具。洛克希德·马丁公司先进技术实验室在1998年一份题为“CAD系统描述”的报告<sup>[66]</sup>中,对面向测试设计(design for test)的CAD软件进行了综述,并从功能角度出发将这些软件划分成测试需求与测度管理、测试策略管理、测试经济学建模、测试性分析、BIST注入与综合、DFT/ATPG、故障仿真、测试程序开发等8类,详见表1.1。

表 1.1 测试性辅助工具

| 工具功能      | System                                                          | Board/MCM                                            | IC                                                                                                      |
|-----------|-----------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 测试需求与测度管理 | RDD-100 with RASSP Template, Consolidated Requirements Template | RDD-100 with RASSP Template                          | RDD-100 with RASSP Template                                                                             |
| 测试策略管理    | EXCEL TSD Development, TA* Definition Investigation             | TSD Development-Test Means Allocation Driven by TSD  | Test Economic Services                                                                                  |
| 测试经济学建模   | TSD Attribute Population for Predictions under Investigation    | Test Economic Services                               | TBD Development                                                                                         |
| 测试性分析     | STAT, WSTA, STARS                                               | MGC VTM; TOP                                         | MGC QuickGrade                                                                                          |
| BIST注入与综合 | LogicVision BIST CAD Tools                                      | LogicVision BIST CAD Tools MGC PTM; SITE             | (Synthesis) LogicVision BIST CAD Tools, (Insertion) Synopsys Test Compiler, (Insertion) Mentor FASTSCAN |
| DFT/ATPG  | N/A                                                             | Teradyne VICTORY, ASSET Diagnostic Systems           | Synopsys Test Compiler, Mentor FASTSCAN                                                                 |
| 故障仿真      | 工具缺口                                                            | IKOS Voyager/FS                                      | Multiple Tools Available for SSF**, Delay Fault Models under Development for COTS                       |
| 测试程序开发    | 工具缺口                                                            | ASSET, SCANease, Alternative to ASSET Teradyne Laser | Summit TDS                                                                                              |

\* TA—测试结构。

\*\* SSF—单个固定故障。