



装备测试性工程系列丛书

# 装备测试性建模

邱静 刘冠军 杨鹏  
吕克洪 苏永定 陈希祥 等著



科学出版社

国家科学技术学术著作出版基金资助出版  
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。

Handwritten signature in black ink, consisting of three characters: 徐彦士.

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

<b>第 1 章 绪论</b> .....	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
<b>第 2 章 测试性需求分析技术</b> .....	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</b>	<b>测试性指标分配技术</b>	<b>110</b>
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</b>	<b>测试性建模技术</b>	<b>136</b>
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</b>	<b>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</b>	<b>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
附录一	缩略语中英文对照	468
附录二	测试性术语	477

# 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。

系统级的测试性分析辅助工具可分为基于表格(checklist-based)的工具和基于仿真(simulation-based)的工具。其中基于表格的工具是指简单提供可视化的界面和自动的表格生成和数据存储的CAD,这样的工具一般是参照有关标准和大纲指定的内容和步骤开发的,如Daniel等根据MIL-STD-2165开发的测试性分析表格工具<sup>[67]</sup>。而基于仿真的工具则首先构建测试性模型,然后基于该模型开展测试性分析、设计和评估,因此也称为基于模型(model-based)的工具。最早的计算机辅助测试性设计工具是由DSI公司的前身——Detex Systems Inc.所开发的LOGMOD工具<sup>[68~70]</sup>,它采用了De Paul提出的逻辑模型<sup>[71]</sup>。1975年,LOGMOD被首次应用于军事领域,当时的应用并不广,主要是针对小规模电子系统。1980年,ARINC公司首次把LOGMOD认定为测试性工具<sup>[72]</sup>,于是LOGMOD成为基于模型的测试性分析与设计思想的开端。后来DSI公司在此基础上又陆续开发了一系列测试性分析工具,如1986年同美国海军合作开发的“武器系统测试性分析工具”(weapon system testability analyzer, WSTA)<sup>[73,74]</sup>、“系统测试性分析工具”(system testability analysis tool, STAT)<sup>[75]</sup>等。WSTA和STAT均采用了基于模型的测试性分析与设计思想——这一思想对测试性设计领域产生了巨大的影响,以至于许多大公司纷纷仿效,其中比较著名的是ARINC公司于1981年开发的“系统测试性与维修程序”(system testability and maintenance program, STAMP)<sup>[76,77]</sup>工具。STAMP以信息流模型为基础,能够对系统进行测试性分析与诊断策略设计,根据分析与设计结果评估系统的测试性与可诊断性,对没有达到设计要求的系统自动给出改进建议。随后STAMP被集成到“便携交互式诊断工具”(portable interactive troubleshooter, POINTER)<sup>[78]</sup>当中,并成功地运用于许多大型装备(如B-2轰炸机、黑鹰直升机的稳定性增强系统等)的测试性分析与设计<sup>[79]</sup>中。

进入20世纪90年代,各种测试性辅助设计工具如雨后春笋般涌现出来,如Harris公司为NASA空间站项目开发的“哈里斯系统测试性分析”(Harris' system testability analysis, HSTA)工具<sup>[80]</sup>、智能自动化公司(Intelligent Automation Inc., IAI)开发的“自动相关性模型分析器”(automatic dependency model analyzer, ADMA)<sup>[81,82]</sup>、Robach等开发的“计算机辅助测试分析”(computer-aided test analysis, CATA)系统<sup>[83]</sup>、康涅狄格大学开发的“测试性分析与研究工具”(system testability analysis and research tool, START)<sup>[84]</sup>、美军测试计量与诊断装备研究机构开发的“诊断分析与维修工具箱”(diagnostic analysis and repair tool set, DARTS)<sup>[85,86]</sup>、以色列特拉维夫大学开发的“人工智能测试”(artificial intelligence test, AITEST)工具<sup>[87,88]</sup>、法国系统结构分析实验室(Laboratoire d'Analyse et d'Architectures des Systèmes, LAAS)开发的“诊断树自适应生成”(automatic generation of diagnosis trees, AGENDA)工具<sup>[89]</sup>等。

上述工具大多面向军方或者特定客户专门研制,应用范围有限。美国近年来加强了对通用型测试性分析与设计工具的研发,其中最为成功的是 DSI 国际公司开发的 eXpress<sup>[90]</sup> 和 QSI(Qualtech Systems Inc.)公司开发的“测试性工程与维修系统”(testability engineering and maintenance system, TEAMS<sup>®</sup>)<sup>[91]</sup>。目前前者已升级至 5.10 版本,后者也升级到了 11.0 版本,二者不仅被广泛应用于军用产品,而且在民用产品方面也有不少成功应用的案例。

eXpress 作为一种测试性设计工具,可支持从论证阶段起将产品的测试性设计和功能结构设计相结合,可正确评估产品的诊断能力,并对设计方案进行修改,从而达到优化设计的目的。在系统测试性建模方面,eXpress 采用了混合诊断模型,允许用户对组成系统的各单元进行属性定义,包括可靠度、成本、寿命、任务剖面、运行模式、运行状态及失效影响程度等,从而使模型更接近真实系统的功能结构;在诊断策略优化方面,eXpress 允许用户设置测试费用以及停工时间等属性以进行故障诊断策略的优化(费用优化、测试时间优化及测试精度优化等)。

TEAMS 在功能方面比 eXpress 更加强大,它由 TEAMS<sup>™</sup>、TEAMS-KB<sup>™</sup>、TEAMS-RT<sup>™</sup>、TEAMATE<sup>™</sup> 和 TEAMS-RDS<sup>™</sup> 五部分构成。TEAMS<sup>™</sup> 作为 TEAMS 的重要构成单元之一,主要用于系统诊断策略设计和测试性分析。在系统测试性建模方面,TEAMS<sup>™</sup> 采用了多信号流图模型;在诊断策略设计方面,TEAMS<sup>™</sup> 集成了先进的人工智能算法,设计人员只要设置几个基本参数,软件程序就可以自动生成近似最优的诊断策略;在测试性分析方面,TEAMS<sup>™</sup> 可以自动分析出未被覆盖的故障、冗余测试、模糊组、反馈回路等,并给出测点布局等测试性改进建议;在系统测试性评估方面,TEAMS<sup>™</sup> 可以自动生成大量标准格式的测试性报告,包括 FMECA 表格、基于 XML 语言的诊断策略等。TEAMS<sup>™</sup> 建立的系统模型和分析结果可以输出到 TEAMS-RT<sup>™</sup> 和 TEAMATE<sup>™</sup> 工具以进行实时的系统健康管理和在线交互式诊断;TEAMS-KB<sup>™</sup> 主要用于模型管理和维修数据的收集;TEAMS-RDS<sup>™</sup> 主要提供远程诊断服务。

在技术应用方面,测试性技术不仅广泛应用于装备维修测试中,而且应用在设备的设计定型、生产、安装、检验、训练和维修过程的测试与诊断中,在提高武器装备测试性和维修性、简化测试设备、提高测试效率、降低测试与维修费用等方面起到了极大作用<sup>[92~94]</sup>。如美国 ITT Giltillan 公司生产的新一代 SPS-48E 型警戒和武器控制雷达采用测试性/BIT 技术,使得系统试验时间从 16 周缩短到 8 周,设备安装检验时间缩短了 50%,同时人员培训的训练课时减少了 25%;单就设备前期的设计、试验成本而言,这种雷达与早期没有测试性/BIT 的 SPS-48C 雷达相比,每套系统就大致节约 10 万美元。F-18 战机由于重视了可靠性、维修性、测试性及 BIT 设计,减少了维修工时和维修人员数量。美国海军对飞机的调查研究表明,若对 F/A-18、F-14、A-6E、S-3A 四个机种的 239 项关键产品的测试性、可靠性、维修

性(包括测试性、BIT 和诊断技术)进行改进,将减少维修费用 30%。LST-1179 舰推进系统非电子设备的测试性/BIT 研究表明:应用测试性/BIT 可使每条舰每年的维修费用减少 7 万美元。测试性/BIT 技术在美军 F-22 战机上也得到了成功应用,为改善装备维修性的重要手段。据统计,在 20 年寿命周期内,F-22 战机的维修和保障费用估计比 F-15 战机低 30%,一个 F-22 战机中队(24 架)在 20 年内的维修和保障费用可能比 F-15 战机中队少 5 亿美元。在美军新一代战机 JSF 中,测试性/BIT 技术更是得到广泛应用,以此为主要支撑技术之一建立了自主维修保障系统,将三级维修体制转化为二级,预计 JSF 战机可减少维修人力 20%~40%,后勤规模缩小 50%,出动架次率提高 25%,使用寿命达 8000 飞行小时,大大提高了维修保障效率和自动化、智能化程度<sup>[95~98]</sup>。

QSI 公司应用其开发的 TEAMS<sup>®</sup> 软件已经成功地为许多客户完成了测试性开发项目<sup>[99,100]</sup>。自 1995 年至今,已完成的项目有:波音公司的 AH-64D 直升机综合引擎诊断系统(IEDS)项目;西科斯基飞机(Sikorsky Aircraft)公司的联合先进健康状态监控与使用管理系统(JAHUMS)项目、S-92 直升机先进诊断方案项目;NASA-Ames 研究中心的无人驾驶太空飞船机载 FDIR 系统项目、国际空间站(ISS)上的 1553 总线系统测试性建模与分析项目;普·惠公司对 F-22 的 F119 型发动机和 F-35(JSF)的 F135 型发动机的测试性建模、数据分析和预报项目;霍尼韦尔(Honeywell)公司的电信集成项目(NOVA)、IR&D 项目;美国海/空军的 F/A-18C/D 制动力系统早期故障检测、隔离及剩余寿命预计项目(SBIR)等。

DSI 公司运用 eXpress 对 F-22、F-117、B-2、V-22、F/A-18 等先进战机,以及三叉戟潜艇(TRIDENT)和法国马特拉(MATRA)公司的多种导弹系统进行了测试性设计,提高了上述装备的诊断能力和效率。目前,DSI 公司正在参与的项目包括未来作战系统(future combat system, FCS)、响尾蛇导弹(AIM-9X)、X 波段相控阵雷达、陆基反弹道导弹等。购买和使用 eXpress 的公司和部门超过 100 家,其中包括美国陆/海军、洛克希德·马丁公司、波音公司、雷神(Raytheon)公司、欧洲航空防务及航天公司(EADS)等<sup>[101]</sup>。

## 1.2.2 国内研究现状

在技术研究方面,我国大致从 20 世纪 80 年代中后期才开始测试性设计技术研究。30 年来已经取得了大量成果,主要有以下几个方面。

在测试性需求分析与指标确定方面,目前主要通过类比法、经验法、权衡法和折中系数法来确定<sup>[102]</sup>。吕晓明提出了基于遗传算法的系统级测试性指标确定方法<sup>[103]</sup>,该方法支持并行工程的测试性设计思想,以装备的可用度和全寿命周期费用为优化目标,对装备早期设计阶段的系统级测试性指标进行优化选取。钱彦岭提出了一种基于广义随机 Petri 网(GSPN)的系统级测试性指标确定方法<sup>[104]</sup>,该

方法将测试看做设备整个生命周期内可靠性、维修性活动的一个有机组成部分,从而建立起了系统的测试性分析模型;并在此基础上,采用数值分析的方法得出系统稳态可用度与系统测试性参数之间的关系曲线,作为确定测试性参数的依据。苏永定在此基础上提出了基于离散随机 Petri 网(DSPN)的多任务阶段的系统级测试性指标确定方法,重点考虑多阶段任务系统状态的关联性,体现了装备的实际使用需求,使得提出的装备系统级测试性指标要求更加科学合理<sup>[105~110]</sup>。

在测试性指标分配方面,目前多采用故障率分配法、加权分配法、综合加权分配法等测试性指标分配方法<sup>[102]</sup>。沈亲沐在测试性影响参数量化分析基础上,提出了基于层次分析法(AHP)的测试性指标分配方法<sup>[111]</sup>。

在测试性建模方面,目前研究和应用较为广泛的是信息流模型和多信号模型。杨鹏<sup>[112]</sup>和龙兵<sup>[113]</sup>针对经典测试性模型在描述不确定信息方面的不足,分别建立了不确定模型。针对经典测试性模型未能描述其他相关信息的问题,国内部分研究人员在测试性信息描述模型方面开展了一定研究,如钱彦岭研究了基于 EXPRESS-G 语言的测试性信息描述模型<sup>[93]</sup>,连光耀在此基础上进一步研究了基于 XML 语言的测试性信息描述模型<sup>[114]</sup>,陈希祥研究了基于本体语言的测试性信息描述模型<sup>[115]</sup>。

在测试性设计方面,目前的研究多集中在基于模型进行测试选择与诊断策略构建方面。其中,在测试选择方面,苏永定提出了基于遗传算法的测试选择方法<sup>[116]</sup>,并通过案例验证了智能优化方法是解决测试选择问题的有效途径;连光耀<sup>[114]</sup>、蒋荣华<sup>[117]</sup>等将粒子群算法应用于测试选择问题;杨成林等针对电子系统测试点选择问题,设计了改进的 AO\* 算法用于测试点选择<sup>[118]</sup>;薛凯旋等基于信息流模型,利用改进的列表寻优法进行了测试选择方法<sup>[119]</sup>;陈希祥等提出了基于布尔逻辑相关性矩阵的测试优化选择方法<sup>[120,121]</sup>和基于整数编码相关性矩阵的测试优化选择方法<sup>[122]</sup>,并对测试选择问题进行了扩展,将其作为测试性方案的一部分进行研究,在总结、分析相关技术的基础上,较系统、深入地研究了测试性方案优化生成技术。在诊断策略构建方面,龙兵基于不确定模型,提出了基于量子行为粒子群优化的诊断策略搜索算法<sup>[113]</sup>,并应用于卫星系统的故障诊断;田仲等基于相关性模型研究了测试点最少的诊断策略,在考虑可靠性和测试费用等因素下设计了优化的故障诊断策略<sup>[102]</sup>;杨鹏等针对多级维修、多模式、多回路、测试有先后约束、多值测试以及考虑测试不可靠、多故障的情况,提出了相应的诊断策略构建方法<sup>[112,123~132]</sup>。

在 BIT 设计技术方面,国防科技大学,电子科技大学,航天一院、二院、航天测控公司,航空 634 所、611 所、613 所、628 所,电子科技集团 14 所、28 所、38 所、41 所,兵器 206 所等多家机构进行了研究。国防科技大学在“九五”期间深入研究了边界扫描技术,提出了基于边界扫描的 BIT 设计与测试方法<sup>[17,21]</sup>，“十五”期间,开

展了机电产品 BIT 设计技术研究,提出了不同类型机电产品 BIT 结构设计方法和 BIT 信息获取、特征提取、诊断决策的方法,并对电子产品 BIT、机电产品 BIT 的虚警问题开展了深入研究,系统地提出智能降虚警方法<sup>[133]</sup>。电子科技大学提出了基于 CAN 总线的复杂电子系统 BIT 的技术方案,研究了 BIT 和 ATE 组合测试技术及其应用<sup>[134,135]</sup>。航天测控公司提出了基于边界扫描和 BIST 的电路板可测试性设计,研究了边界扫描技术在电路板测试性设计中的应用。电子科技集团 41 所、电子测试技术国防科技重点实验室的程云波等研究了基于边界扫描技术的电路板测试性设计分析<sup>[136]</sup>。

1995 年,国防科学技术工业委员会颁布了 GJB2547《装备测试性大纲》,加强了对测试性设计技术的指导和管理,对我国测试性设计理念的普及和发展起到了很大的推动作用。自《装备测试性大纲》颁布以来,我国又陆续颁布了一些测试性标准,如表 1.2 所示。

表 1.2 我国颁布的测试性标准

序列	标题	颁布部门
SJ/T10566—1994	测试性总线 第一部分:标准测试存取口与边界扫描结构	中国电子工业部
HB/Z301—1997	航空电子系统和设备测试性设计指南	中国航空工业总公司
HB7503—1997	测试性预设计程序	中国航空工业总公司
GJB3385—1998	测试与诊断术语	国防科学技术工业委员会
QJ3050—1998	航天产品故障故障模式、影响及危害分析指南	中国航天工业总公司
QJ3051—1998	航天产品测试性设计准则	中国航天工业总公司
SJ20695—1998	地面雷达测试性设计指南	中国电子工业部
GJB3970—2000	军用地面雷达测试性要求	国防科学技术工业委员会
GJB4260—2001	侦察雷达测试性通用要求	国防科学技术工业委员会

上述标准的制定对我国测试性设计技术的进一步发展起到了巨大的推动作用,但是相比国外而言,我国在支持上述标准实施的测试性设计理论、技术与方法研究方面还相对薄弱。对此,国内多家单位正在联合制定 GJB2547 的替代标准——GJB2547A《装备测试性工作通用要求》<sup>[137]</sup>。为了保证装备测试性设计工作的实际开展,需要在现有标准的基础上,结合实际需求,积极开展测试性设计的理论、技术与方法研究,加强对国外先进理论成果的借鉴、消化、吸收并为我所用,最终形成相对完整的测试性设计技术体系,提供支持测试性设计实施的方法与工具。

在工具研发方面,我国在“九五”和“十五”期间,初步开发了一些测试性计算机辅助分析与设计软件工具。其中,国防科技大学开发了一套测试性辅助分析与决

策系统<sup>[116]</sup>,并运用该系统对机电跟踪与稳定伺服平台进行了测试性分析与设计。北京航空航天大学在可靠性工程研究的基础上,联合北京可维创业科技有限公司开发了一款用于装备“五性”(可靠性、维修性、保障性、测试性和安全性)设计的CAD软件——可维 ARMS<sup>[138]</sup>,该软件可支持进行一定的装备测试性分析。“十一五”期间,国防科技大学进一步开发了测试性分析、设计与评估系统(testability analysis design and evaluation system,TADES),该系统主要由测试性需求分析软件(testability requirement analysis software,TRAS)、测试性分析与设计软件(testability analysis and design software,TADS)和测试性综合评估软件(testability integrated evaluation software,TIES)等组成,各软件模块可以独立运行,可以完成测试性要求分析与指标确定、测试性分配、固有测试性设计、测试性方案优化生成、诊断策略构建以及测试性综合验证评估等工作。电子科技大学、航天634所、航天测控公司、北京联合信标测试技术有限公司等单位也开发了测试性分析与设计软件。

在技术应用方面,特别是在BIT的应用方面,我国取得了较大成果<sup>[136~146]</sup>。国防科技大学,航天一院、二院、五院、航天测控公司,航空634所、611所、613所、628所,电子科技集团14所、28所、38所、41所,兵器206所,中船705所等多家单位分别针对飞机、导弹、卫星、雷达等装备开展了大量应用研究。例如,电子科技集团14所针对有源相控阵雷达设计的分布式检测、集中式控制BIT系统,融雷达故障检测和性能测试为一体,保证了雷达的正常和准确工作,还对某型雷达的BIT系统提出了对于大型复杂设备的分布式检测、集中式控制处理的BIT设计原则,将雷达系统的故障检测和性能检测融为一体<sup>[147]</sup>。兵器206所研制的某型雷达的BIT系统兼有监测、诊断和控制功能,该系统除了实现操作自动化外,还可以实施监控系统的运行状态,在故障发生时,能以在线或脱机的方式将故障定位到可更换模块<sup>[148]</sup>。航空613所进行了某型飞机计算机控制子系统的BIT设计,对加电BIT、周期BIT和启动BIT进行了研究和实现。

### 1.3 测试性工程工作流程

本书根据GJB2547—95及GJB2547A确定的测试性工程项目,综合已有的理论技术研究成果和装备测试性工程实践经验,提出装备测试性工程中的工作流程,如图1.1所示。

在装备论证阶段,若装备通过综合保障要求等规定了明确的测试性指标(如故障检测率、故障隔离率、虚警率等),则采用该指标实施测试性工程。若无明确的测试性指标,则根据装备任务要求、可靠性要求、维修保障要求等,提出测试需求和测试性要求,主要包括定性的要求和系统级定量指标要求。然后将系统级测试性指

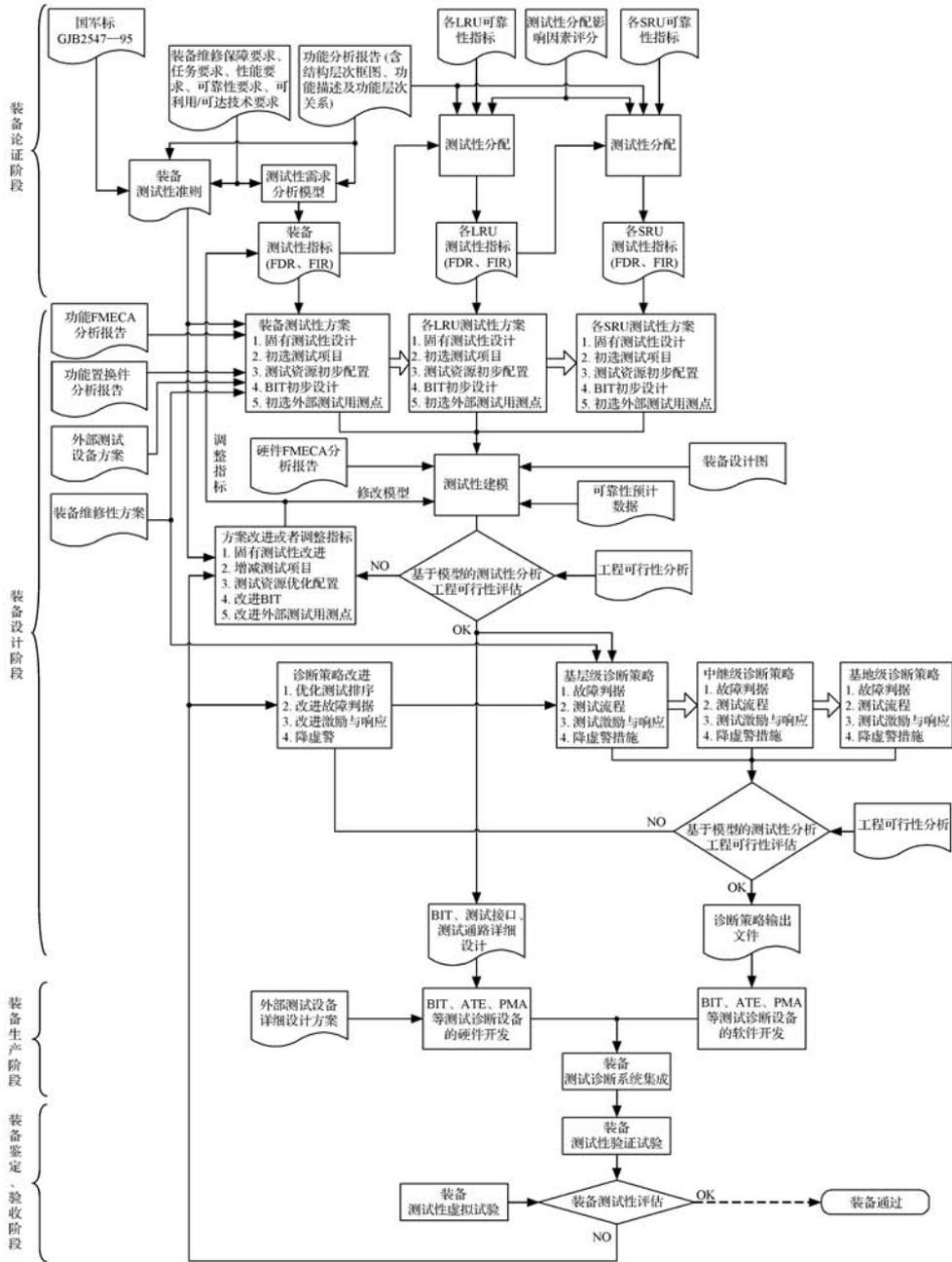


图 1.1 基于模型的测试性工程工作流程

标要求分配到各 LRU、SRU 等层级。同时,根据装备实际,对《装备测试性大纲》进行适用性裁减,制定装备测试性准则。

在装备设计阶段,系统、LRU 和 SRU 三级产品的测试性设计工作协调开展,采用 Top-Down 的设计策略展开设计,然后将较低层级(LRU 和 SRU)的设计结果反馈至系统级。首先根据功能 FMECA 报告、维修性方案、外部测试设备初步方案等,根据设计经验和测试性准则,初步设计测试性方案,包括固有测试性设计、初选测试项目、测试资源初步配置、BIT 初步设计、初选外部测试用测点及 ATE/UUT 兼容性初步设计等。然后综合装备设计资料、硬件 FMECA 报告、可靠性预计数据等测试性设计相关信息,建立测试性模型。基于该模型,进行装备测试性的理论分析评估,同时结合装备工程实际进行工程可行性评估。若分析所得测试性指标达到了测试性指标要求,则可按照测试性方案内容进行 BIT、测试接口、测试点的详细设计,同时继续进行各级诊断策略的设计。若分析得到的测试性指标没有达到要求或者测试性方案局部不可行,则根据测试性分析指出的不足和问题进行优化改进设计,然后对改进模型再次进行测试性分析,直到所得测试性方案满足测试性指标要求为止。测试性优化改进设计的主要内容包括固有测试性改进、增减测试项目、测试资源优化配置、BIT 改进、兼容性及外部测试用测点改进等。实在达不到测试性指标要求的,则建议适当调整测试性指标。

测试性方案确定后,需要进行诊断策略设计。诊断策略设计可以根据基层级、中继级、基地级等维修级别要求分级设计,主要包括测试顺序、故障判据、测试激励与响应及降虚警措施等。同测试性方案设计过程类似,诊断策略设计需要进行基于模型的理论分析及工程可行性分析,并根据要求进行多次迭代的优化改进设计,如优化测试排序、改进故障判据、改进激励与响应、改进降虚警措施等,最后得到满足测试性指标要求的诊断策略。

在装备生产阶段,可根据测试性方案、外部测试设备详细设计方案等进行 BIT、ATE、PMA 等测试设备的硬件开发,根据诊断策略等进行 BIT、ATE、PMA 等测试设备的软件开发,并在测试性方案指导下进行集成。

在装备鉴定、验收阶段,为进行测试性鉴定或测试性验收,可以通过测试性验证试验、测试性虚拟试验等手段进行测试性验证,评估装备测试性水平,作出装备测试性合格与否的判定,或提出技术更改和设计改进建议并反馈到装备设计阶段。

## 1.4 测试性建模与设计关键技术分析

根据上述工作流程,可以分析得出开展测试性工程需要解决以下关键技术问题。

### 1. 测试性需求分析技术

开展测试性需求分析,确定科学合理的测试性要求是制定测试性方案、指导测试性设计的前提。其关键在于系统地分析装备任务要求、性能要求、功能结构要求、可靠性要求、维修保障要求和可利用/可达技术要求等多种测试性需求影响因素,建立准确的测试性需求分析模型。基于此模型,通过科学的计算方法而非经验方法,确定满足用户需求且技术可行的测试性指标。

### 2. 测试性建模技术

测试性模型是开展测试性设计的基础。测试性方案和诊断策略都由测试性信息推理得到。其关键在于需要根据装备的测试、诊断、维修保障、可靠性、服役环境,采用标准信息建模语言,全面描述测试性信息之间、测试性信息与测试方案的关联关系,以及故障与测试信号的逻辑对应关系,从而形式化地描述测试性信息与测试性方案的因果关系。

### 3. 测试性方案优化设计技术

测试性方案描述装备中哪些项目要测试,何时(连续或定期)何地(哪个维修级别)测试及其技术手段,是装备测试性设计的核心内容之一。其关键在于基于测试性模型,根据系统故障模式影响及分析结果、系统测试性信息模型、固有测试性要求等,选择满足故障检测率和故障隔离率等设计指标的测试项目;并针对所选测试项目,分析备选测试方法手段(如自动测试设备、BIT)的性能、费用、何时何地实施等因素,确定便于测试实现且费用较少的测试设备配置方案。

### 4. 诊断策略构建技术

诊断策略构建是确定按照何种顺序实施测试以实现快速故障检测与隔离,是开发系统诊断程序的基础。其关键在于综合考虑实际中存在的各种复杂情况,如装备工况环境多样、故障状态多变、测试结果非可靠等,构建符合实际需求的、优化的诊断策略。

### 5. BIT 设计技术

BIT 是监控装备关键功能、隔离故障的主要手段和方法,也是测试性设计的重要部分。其关键技术主要有 BIT 设计技术及降虚警技术等。

本书综合作者近年来的研究成果,总结国内外研究情况,重点阐述测试性设计中的上述关键技术。需要指出的是,BIT 设计及降虚警技术已在其他文献中进行较详细阐述,本书不再做重点阐述,读者可根据需要参考相关文献<sup>[20,94,102,133]</sup>。

## 1.5 本书的结构安排

本书具体的结构安排如图 1.2 所示。

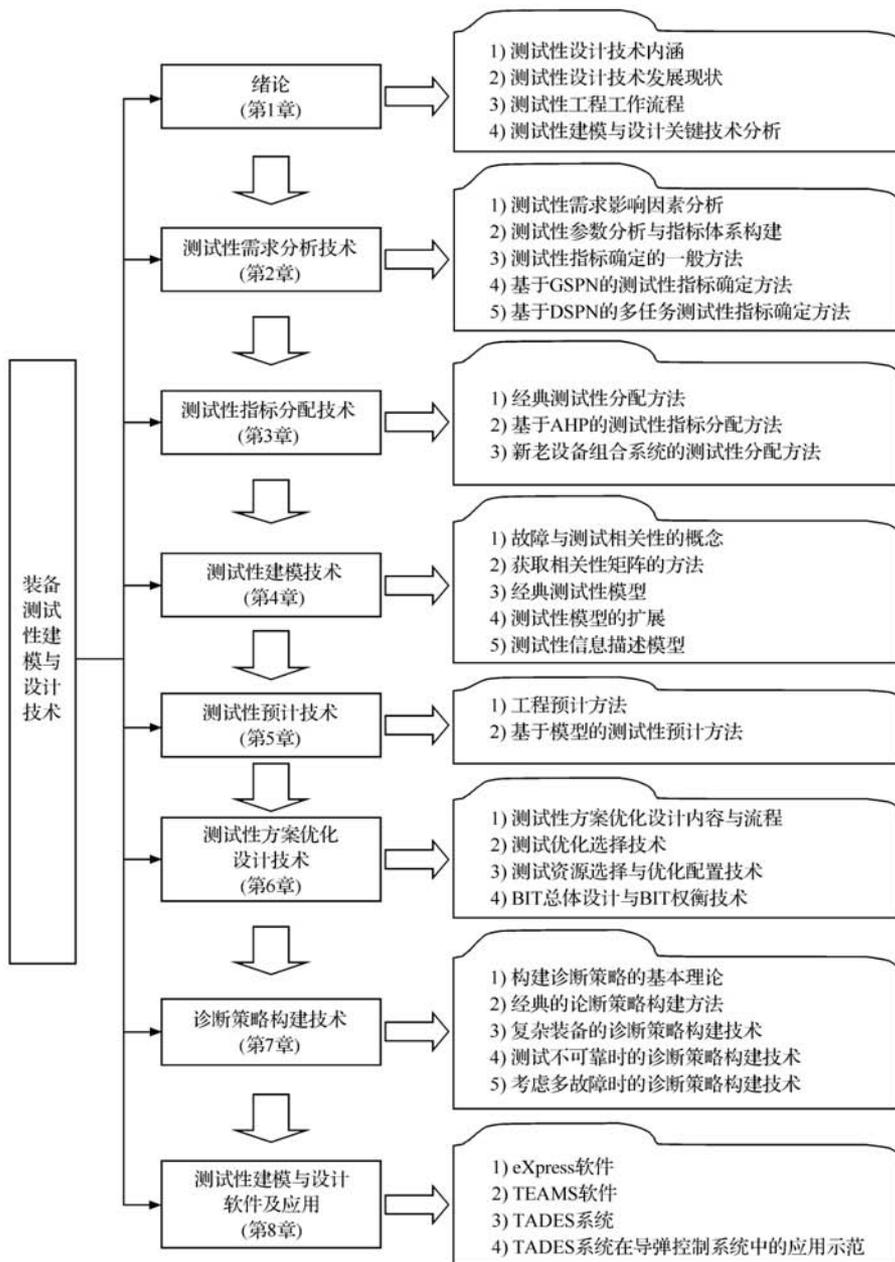


图 1.2 本书的章节结构

第1章,绪论。首先阐述装备测试性设计的技术内涵,综述装备测试性设计技术的国内外研究现状;在此基础上给出测试性工程工作流程,并分析测试性建模与设计的关键技术。

第2章,测试性需求分析技术。首先分析测试性需求影响因素,概述已有的测试性参数并构建测试性指标体系;然后介绍测试性指标确定的一般方法;针对其存在的技术问题,给出基于广义随机 Petri 网(GSPN)模型的测试性指标确定方法和基于离散随机 Petri 网(DSPN)模型的多任务系统测试性指标确定方法。

第3章,测试性指标分配技术。首先阐述测试性分配的数学模型与技术流程,然后介绍经验分配法、故障率分配法、加权分配法、综合加权分配法等经典测试性分配方法;针对这些方法存在的不足,给出基于层次分析法(AHP)的测试性分配方法和新老设备组合系统的测试性分配方法。

第4章,测试性建模技术。首先阐述故障与测试相关性的基本概念;然后介绍由诊断模型分析和电路仿真获取相关性矩阵模型的方法;针对这两种方法工作量较大的问题,引出信息流模型和多信号模型这两种经典的测试性模型,针对经典测试性模型描述信息有限等问题,给出扩展的测试性模型和测试性信息描述模型。

第5章,测试性预计技术。首先介绍目前常用的工程预计方法,并分析其存在的不足;然后给出目前国外测试性建模分析软件中应用的基于相关性矩阵模型的测试性预计方法。

第6章,测试性方案优化设计技术。首先阐述测试性方案的内涵,给出测试性方案优化设计的工作内容、技术流程;在此基础上,重点介绍测试优化选择、测试资源选择与优化配置、BIT 总体设计与 BIT 权衡等关键技术。

第7章,诊断策略构建技术。首先阐述诊断策略构建的基本理论,介绍贪婪搜索方法、AO\* 搜索方法等经典的诊断策略构建方法;然后根据装备功能结构及测试约束条件,给出面向多级维修、多模式、多回路、测试有先后约束、多值测试等的诊断策略构建技术,以及考虑测试不可靠、多故障时的诊断策略构建方法。

第8章,测试性建模与设计软件及应用。首先简要介绍国外开发的 eXpress 和 TEAMS 软件;然后介绍国内开发的 TADES 系统,重点介绍该系统的测试性需求分析软件(TRAS)和测试性分析与设计软件(TADS)两个软件包;最后详细介绍这两个软件在某导弹控制系统中的应用。

## 参 考 文 献

- [1] 国防科学技术工业委员会. GJB2547—95. 装备测试性大纲. 北京: 国防科工委军标出版社, 1995.
- [2] Greenspan A M. Establishing testability standards. Proceedings of the IEEE AUTOTESTCON, San Diego, 1978; 275~281.
- [3] Keiner W L, Coppola A, Drummond R R. Service initiative in testability. Proceedings of the IEEE Reliability and Maintainability Symposium, San Francisco, 1984; 158~161.

- 
- [4] US Department of Defense. MIL-STD-470A. Military Standard Maintainability Program for Systems and Equipments. 1983.
- [5] US Department of Defense. MIL-STD-2165. Military Standard Testability Program for Electronic Systems and Equipments. 1985.
- [6] Rosenberg B. The navy integrated diagnostic support system-system overview, architecture and interfaces. Proceedings of the IEEE AUTOTESTCON, San Francisco, 1987; 251~255.
- [7] Magliero A, Bethel R, Leong R. ADS—The IDSS adaptive diagnostic system. Proceedings of the IEEE AUTOTESTCON, San Francisco, 1987; 61~64.
- [8] Orr H A. Generic integrated maintenance Diagnostics (GIMADS): Designing weapon systems with the maintainer in mind. Proceedings of the IEEE National Aerospace and Electronics Conference, Dayton, 1988; 1477~1481.
- [9] Clothier R H, Nguyen H T. GIMADS diagnostics allocation process. Proceedings of the IEEE National Aerospace and Electronics Conference, Dayton, 1989; 1339~1344.
- [10] US Department of Defense. MIL-HDBK-1814. DOD Handbook Integrated Diagnostics. 1997.
- [11] US Department of Defense. MIL-HDBK-2165. Military Standard Testability Program for Systems and Equipments. 1995.
- [12] Byron J, Deight L, Stratton G. RADC-TR-82-189. RADC testability notebook. 1982.
- [13] ARINC604. Guidance for design & use of built-in test equipment. 1988.
- [14] SMTA Testability Committee. SMTA Testability Guidelines TP-101C. [http://www.smta.org/files/smta\\_testability\\_guideline\\_PROMO2.pdf](http://www.smta.org/files/smta_testability_guideline_PROMO2.pdf), 2002 [2011-08-01].
- [15] Parker K P. The boundary-scan handbook. Boston; Kluwer Academic Publishers, 2003.
- [16] Lala P K. Digital Circuit Testing and Testability. New York; Elsevier Science and Technology Books, 1997.
- [17] 刘冠军. 基于边界扫描的智能板级 BIT 技术研究. 长沙: 国防科技大学博士学位论文, 2000.
- [18] 温熙森, 邱静, 刘冠军等. 机电产品 BIT 总体设计技术. 长沙: 国防科技大学出版社, 2005.
- [19] Lockheed Martin RASSP Team/Lockheed Martin Advanced Technology Laboratories. RASSP design for testability (DFT) methodology version 1.0. Piscataway; Advanced Technology Laboratories, 1995.
- [20] 张宝珍, 曾天翔. 智能 BIT 技术. 测控技术, 2000, 19(11): 1~4.
- [21] 胡政. 边界扫描测试理论与方法研究. 长沙: 国防科技大学博士学位论文, 1998.
- [22] IEEE Standards Board. IEEE Std 1149.1-1990. Standard Test Access Port and Boundary-scan Architecture. Piscataway; IEEE Standards Press, 1990.
- [23] 林清. TM 总线技术简介. 航空计算技术, 1997, (1): 32~37.
- [24] IEEE Standards Board. IEEE Std 1149.5-1995. IEEE Standard for Module Test and Maintenance Bus (MTM-Bus) Protocol. Piscataway; IEEE Standards Press, 1995.
- [25] 韩国泰. TM 总线和模块故障检测. 航空电子技术, 1999, (1): 4~15.
- [26] IEEE Standards Board. IEEE Std 1149.4-1999. IEEE Standard for a Mixed-signal Test Bus. Piscataway; IEEE Standards Press, 1999.
- [27] IEEE Standards Board. IEEE Std 1149.1-2001. Standard Test Access Port and Boundary-scan Architecture. Piscataway; IEEE Standards Press, 2001.
- [28] IEEE Standards Board. IEEE Std 1149.6-2003. IEEE Standard for Boundary-scan Testing of Advanced Digital Networks. Piscataway; IEEE Standards Press, 2003.

- 
- [29] Chakrabarty K. SOC (system-on-a-chip) Testing for Plug and Play Test Automation. Boston: Kluwer Academic Publishers, 2002.
- [30] Rajsuman R. SoC 设计与测试. 于敦山, 盛世敏译. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2003.
- [31] IEEE Standards Board. IEEE Std 1500. IEEE Standard Testability Method for Embedded Core-based Integrated Circuits. Piscataway: IEEE Standards Press, 2005.
- [32] Basic dependency modeling terminology. Integrated Systems Testability Life Cycle Design. [http://www.testability.com/Reference/Glossaries.aspx?Glossary=Dependency Modeling](http://www.testability.com/Reference/Glossaries.aspx?Glossary=Dependency+Modeling), 2008 [2011-08-01].
- [33] Nair R, Lin C J, Haynes L, et al. Automatic dependency model generation using SPICE event driven simulation. Proceedings of the IEEE AUTOTESTCON, Dayton, 1996; 318~328.
- [34] Haynes L, Levy R, Lin C J, et al. Automatic generation of dependency models using autonomous intelligent agents. Proceedings of the IEEE AUTOTESTCON, Dayton, 1996; 303~308.
- [35] Simpson W R, Sheppard J W. System complexity and integrated diagnostics. IEEE Design & Test of Computers, 1991, 8(3):16~30.
- [36] Sheppard J W, Simpson W R. A mathematical model for integrated diagnostics. IEEE Design & Test of Computers, 1991, 8(4): 25~38.
- [37] Sheppard J W, Simpson W R. Applying testability analysis for integrated diagnostics. IEEE Design & Test of Computers, 1992, 9(3): 65~78.
- [38] Simpson W R, Sheppard J W. System testability assessment for integrated diagnostics. IEEE Design & Test of Computers, 1992, 9(1): 40~54.
- [39] Simpson W R, Sheppard J W. Fault isolation in an integrated diagnostic environment. IEEE Design & Test of Computers, 1993, 10(1): 52~66.
- [40] Sheppard J W, Simpson W R. Performing effective fault isolation in integrated diagnostics. IEEE Design & Test of Computers, 1993, 10(2): 78~90.
- [41] Ahmed A U, Cheng Z X, Saito S. Information flow model and estimations for services on the internet. Proceedings of the IEEE International Conference on Advanced Information Networking and Applications, Fukuoka, 2004; 499~505.
- [42] Sheppard J W. Maintaining diagnostic truth with information flow models. Proceedings of the IEEE AUTOTESTCON, Dayton, 1996; 447~454.
- [43] Simpson W R, Sheppard J W. System Test and Diagnosis. Boston: Kluwer Academic Publishers, 1994.
- [44] Deb S, Pattipati K R, Raghavan V, et al. Multi-signal flow graphs: A novel approach for system testability analysis and fault diagnosis. IEEE Aerospace and Electronics Systems Magazine, 1995, 10(5): 14~25.
- [45] Deb S, Ghoshal S, Mathur A, et al. Multisignal modeling for diagnosis, FMECA, and reliability. Proceedings of the IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics, San Diego, 1998; 3026~3031.
- [46] Qualtech Systems Inc. TEAMS6.0 User's Guide. 2002.
- [47] DSI International Inc. Design for testability. <http://www.designfortestability.com>, 2008 [2011-08-01].
- [48] DSI International Inc. eXpress. <http://www.dsiintl/WebLogic/products.aspx>, 2011 [2011-08-01].