



国防电子信息技术丛书

The Technology on Testability Design Analysis
and Verification of Equipment

装备测试性设计 分析验证技术

王红霞 叶晓慧 等编著



中国工信出版集团



电子工业出版社
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY
<http://www.phei.com.cn>

装备测试性设计 分析验证技术

王红霞 叶晓慧 陈冰 陈亚男 编著

电子工业出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京·BEIJING

内 容 简 介

本书以装备开展测试性工作的实际工程需求为牵引,以测试性设计分析验证中所涉及的关键技术为线索,系统阐述了测试性建模技术、测试性分配技术、测试(点)优选方法、诊断策略优化技术、测试性预计方法、测试性验证技术,并通过实例对相应的理论、方法、技术和模型进行了应用验证分析。同时简要介绍了装备开展测试性工作的工程框架,包含测试性设计分析与验证。

本书可作为测试性相关专业大专、本科和研究生的学习参考,也可作为装备测试性、维修性等领域的科研人员与工程技术人员的学习参考。

未经许可,不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。
版权所有,侵权必究。

图书在版编目(CIP)数据

装备测试性设计分析验证技术/王红霞等编著. —北京:电子工业出版社,2018.5
ISBN 978-7-121-33786-4

I. ①装… II. ①王… III. ①武器装备—测试 IV. ①TJ06

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2018)第 039909 号

策划编辑:陈晓莉

责任编辑:王晓庆 特约编辑:陈晓莉

印 刷:三河市兴达印务有限公司

装 订:三河市兴达印务有限公司

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:787×1 092 1/16 印张:15.75 字数:435 千字

版 次:2018 年 5 月第 1 版

印 次:2018 年 5 月第 1 次印刷

定 价:58.00 元



凡所购买电子工业出版社图书有缺损问题,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,(010)88258888。

质量投诉请发邮件至 zltts@phei.com.cn,盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

本书咨询联系方式:wangxq@phei.com.cn。

前 言

在集成性、综合型和智能化装备快速发展的今天,装备的性能在日益提高,但同时使装备的研制风险增大、研制周期增长、研制费用增高,这对装备的使用与维修保障提出了更高的要求。经过大量的研究和实践,人们逐渐认识到装备测试性的重要作用:要想在不增加装备使用和保障费用的前提下,解决高性能装备测试信息获取难、检测和隔离故障时间长、虚警率高等问题,就应将管理故障的时机从使用阶段提前到设计阶段,也就是在装备研制初期便针对装备的测试、诊断和维修保障进行综合设计,即测试性设计。

测试性是装备的一种系统属性,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特性。测试性是构成装备质量特性的重要组成部分,具有与安全性、可靠性、维修性和保障性同等重要的地位。良好的测试性是设计出来的,管理出来的。具有良好测试性的装备可以快速准确地检测和隔离故障,进而减少维修时间,从而提高装备性能,减少维修保障资源,降低寿命周期费用,确保战备完好性和任务成功性。

1985年,测试性已经成为一门与可靠性、维修性并列的独立学科。由于装备保障能力需求的牵引,装备综合诊断、预测与健康工程管理工程的实施,极大地推动了测试性技术的发展。近年来,测试性技术在国内外取得了大量的研究成果,如学术论文、标准(规范和手册)、软件、著作等,而测试性技术的发展进一步推动了型号装备测试性工程的实施。

本书是作者多年科研与学术成果的总结,并吸收国内外测试性研究成果,参考有关标准、文献、研究报告和图书编写而成,是一部集理论与实践于一体的专业著作:一是按照装备测试性工作中设计分析验证过程组织全书内容,具有很强的系统性;二是紧紧围绕测试性设计分析、验证所涉及的各项关键技术,从设计和使用需求的角度展开研究,给出具体的实现方法和步骤,具有很强的理论性;三是以某装备的实际综合诊断工程为背景,针对装备综合诊断需求,对相关方法和模型进行实例分析,具有很强的实践性。

全书共分9章:第1章概述,从测试性的概念和影响出发,重点介绍了测试性工程包含的内容及测试性工作中用到的关键技术。第2章测试性建模技术,从工程实践出发,重点介绍了测试性建模过程中用到的关键技术,包括系统划分、故障模式分析与测试性模型等。第3章测试性分配技术,介绍了测试性分配的经典方法、基于层次分析法和基于二次线性插值的方法。第4章测试(点)选择,包括测试优选方法和测试点优选方法。第5章诊断策略构建与优化技术,包括单故障、多故障的诊断策略构建技术和优化技术,重点介绍了基于AO*算法的诊断策略构建、优化和改进算法。第6章测试性预计,介绍了测试性预计的工程方法。第7章测试性设计与分析,简单介绍了装备测试性的工作流程。第8章测试性验证技术,重点介绍了验证方法、故障样本选取和分配、参数预计等。第9章装备测试性验证,简单介绍了装备测试性验证的工作框架、工作内容和要求,并给出了验证流程示例。

本书由王红霞、叶晓慧、陈冰、陈亚男编著。本书在成稿过程中得到了曹水教授、张志华教授、尹明博士等的指导和帮助,作者对他们的辛勤付出表示衷心的感谢。本书引用了国内外专

家学者的研究成果,编者对列入或未列入参考文献的专家学者在该领域所作出的贡献和无私的奉献表示崇高的敬意,对能引用他们的成果感到十分荣幸并表示由衷的谢意。本书研究内容涉及的课题得到了军队相关部门的支持,在此深表谢意。同时感谢电子工业出版社的编辑。

限于编者的水平,不妥与错误在所难免,敬请广大读者批评指正。

编著者

2018年4月

目 录

第 1 章 概述	1
1.1 测试性的概念、目标及其影响	1
1.1.1 测试性概念	1
1.1.2 测试性的影响.....	2
1.2 测试性的发展过程	4
1.2.1 测试性技术发展阶段	4
1.2.2 测试性标准	4
1.3 测试性工程及关键技术	6
1.4 常用测试性术语及参数	9
1.4.1 常用测试性术语	9
1.4.2 参数.....	14
第 2 章 测试性建模技术	16
2.1 系统划分	16
2.1.1 基于模糊有向图的系统划分	16
2.1.2 基于模糊聚类的系统划分	21
2.2 故障模式分析	25
2.2.1 故障模式分析法	25
2.2.2 测试性与故障模式分析	26
2.3 相关矩阵	28
2.3.1 相关矩阵概念	28
2.3.2 相关矩阵生成方法	29
2.3.3 相关矩阵的化简	34
2.4 测试性模型	35
2.4.1 信息流模型	35
2.4.2 多信号模型	36
2.4.3 混合诊断模型	40
2.5 测试性建模方法	46
第 3 章 测试性分配技术	47
3.1 概述.....	47
3.1.1 测试性分配的输入/输出	47
3.1.2 分配原则与要求	48
3.1.3 数学模型	49
3.2 经典测试性分配方法.....	49
3.2.1 故障率分配法	49
3.2.2 加权分配法	50
3.2.3 综合加权分配法	52
3.3 基于层次分析的测试性分配方法	53
3.3.1 AHP 方法基本理论	53

3.3.2	基于 AHP 方法的测试性分配	54
3.3.3	示例分析	55
3.4	基于线性插值的测试性分配方法	57
3.4.1	基于线性插值的测试性分配方法	57
3.4.2	基于二次线性插值的测试性分配方法	58
第 4 章	测试(点)选择	61
4.1	概述	61
4.1.1	测试选择问题	61
4.1.2	测试参数的描述	62
4.2	测试可靠情况下的测试优选方法	63
4.2.1	基于布尔逻辑的测试优选	63
4.2.2	基于启发式搜索策略的测试优选	64
4.2.3	基于粘贴模型的测试优选	67
4.3	测试点优选方法	70
4.3.1	基于二元分裂法的测试点优选	70
4.3.2	基于信息论的测试点优选	72
4.3.3	基于分割相关矩阵的测试点优选	75
4.3.4	测试点优选方法比较	76
4.3.5	测试点选取原则	76
第 5 章	诊断策略构建与优化技术	77
5.1	概述	77
5.2	面向单故障的诊断策略构建技术	78
5.2.1	DP 算法	78
5.2.2	基于 AO* 算法的诊断策略构建问题	79
5.2.3	基于广义 AO* 算法的诊断策略问题	86
5.2.4	基于搜索算法的诊断策略优化	90
5.3	诊断策略优化方法	95
5.3.1	诊断策略优化提出	95
5.3.2	诊断策略优化方法	96
5.3.3	诊断策略优化的理论证明	96
5.4	面向多故障的诊断策略构建技术	103
5.4.1	求解极小碰集的方法	104
5.4.2	求解掩盖故障的方法	108
5.4.3	基于 SURE 的诊断策略构建问题	110
5.4.4	扩展的单故障诊断策略构建问题	114
5.4.5	改进的多故障诊断策略构建问题	115
第 6 章	测试性预计	119
6.1	概述	119
6.2	工程预计法	120
6.3	其他参数的预计问题	126
第 7 章	测试性设计与分析	128
7.1	测试性要求	129
7.2	诊断方案	130

7.2.1	诊断方案的组成因素	131
7.2.2	诊断方案的制订程序	133
7.2.3	诊断方案权衡	134
7.3	固有测试性设计	137
7.3.1	复杂装备的合理划分	138
7.3.2	功能与结构设计	139
7.3.3	初始化	140
7.3.4	测试控制(可控性)	141
7.3.5	观测性设计准则及元器件选择	143
7.4	测试性设计准则	144
7.4.1	测试性设计准则的内容	144
7.4.2	测试性设计准则条款示例	145
7.5	BIT 设计内容	157
7.5.1	BIT 工作模式设计	157
7.5.2	BIT 布局形式	158
7.5.3	BIT 软、硬件设计	159
7.5.4	BIT 设计技术	160
7.5.5	BIT 设计准则	166
7.6	防虚警设计	168
7.6.1	确定合理的测试容差	169
7.6.2	确定合理的故障指示、报警条件	171
7.6.3	提高 BIT 工作的可靠性	171
7.6.4	智能 BIT	172
7.7	外部诊断设计	175
7.7.1	测试点设计	175
7.7.2	诊断逻辑与测试程序设计	178
7.7.3	兼容性设计	182
7.8	测试性分析(核查)	184
7.8.1	测试性设计准则符合性检查	184
7.8.2	兼容性评价	187
7.8.3	装备测试性分析的实施	191
第 8 章	测试性验证技术	195
8.1	测试性验证试验方法	195
8.1.1	以二项分布为基础的验证方法	195
8.1.2	以正态分布为基础的验证方法	203
8.2	故障样本量的确定方法	204
8.3	故障样本分配方法	205
8.3.1	按比例分层抽样分配方法	205
8.3.2	按比例简单随机抽样分配法	206
8.3.3	基于故障模式的样本分配法	206
8.3.4	基于危害度相对比值的样本分配方法	209
8.3.5	基于多因子综合的样本分配法	211
8.3.6	故障样本分配方法优缺点比较	212
8.4	故障样本选取方法	212

8.4.1	基于多信号模型的故障样本选取算法	213
8.4.2	基于模糊聚类法的故障样本选取算法	215
8.4.3	基于影响度的故障样本选取算法	217
8.5	故障模拟与注入	223
8.6	测试性参数估计	225
8.6.1	点估计	225
8.6.2	区间估计	226
8.6.3	近似估计	227
8.7	虚警率验证方法	227
8.7.1	按可靠性要求验证	228
8.7.2	按成功率验证	228
8.7.3	考虑双方风险时的验证	228
8.7.4	近似验证方法	229
第9章	装备测试性验证	230
9.1	测试性验证目的和内容	231
9.2	测试性验证的工作框架及要求	231
9.3	测试性验证工作内容及要求	232
9.3.1	测试性验证的程序	232
9.3.2	测试性验证计划及要求	233
9.3.3	测试性验证方法	233
9.3.4	数据收集与参数计算	234
9.3.5	测试性验证组织与职责	234
9.3.6	测试性验证报告	235
9.4	测试性验证实施方案示例	235
9.4.1	测试性试验验证计划	235
9.4.2	测试性试验验证过程	237
9.4.3	测试性试验验证结果评定与试验报告	239
参考文献		240

第 1 章 概 述

1.1 测试性的概念、目标及其影响

1.1.1 测试性概念

测试性是描述系统健康状态可监控和可测试难易程度的一种设计特性。它是从维修性中分离出来的,继可靠性、维修性和保障性学科成立之后,在 20 世纪 70 年代才逐渐被普遍认识、研究和发展的。定义为:测试性指产品能及时、准确地确定其状态(可工作、不可工作或性能下降)并隔离其内部故障的一种设计特性。

根据测试性的定义,可以进一步理解测试性的内涵。

(1) 测试性是一种设计特性。测试性是在系统的设计中就要考虑并实现的特性,贯穿于系统的全寿命周期,因此与系统的设计研制工程是并行的,并在验证、使用中不断提升熟化测试性。不同系统的功能和特性不同,对应的测试性要求和实现的技术就有所区别,但是总体的测试性是一致的。

(2) 测试性具有状态监测能力。系统健康状态是持续变化的过程,从可工作、性能下降到不可工作,只有持续监测,积累足够分析系统性能变化趋势的数据,才能有效预测故障,实时检测和隔离故障到需要维修的级别。

(3) 测试性具有故障检测和隔离能力。利用机内测试或外部测试设备在线或离线检测故障,并隔离故障到需要级别的可更换单元,且虚警极少。

因此测试性的目标是:状态监测、故障检测、故障隔离、虚警抑制和故障预测。

状态监测:在系统正常运行中,选择特定的参数对系统的性能进行观测,并判定是否在规定的极限范围内工作,在运行中通过状态监测,可实时监测性能和健康状态是否发生变化,判别系统健康状态趋势,并显示和存储相关的状态信息,必要时进行报警。

故障检测:通过一次或多次测试确定被测单元(Unit Under Test, UUT)是否存在故障的过程,即发现故障存在的过程。当发生故障时,能确定故障的状态或故障发生的部件,并完成修后检验的能力。

故障隔离:在确定发生故障的情况下,通过一次或多次测试进一步定位故障到维修级别的可更换单元的过程。当发生故障时,能够迅速隔离到规定级别的外场可更换单元(Line Replace Unit, LRU)或车间可更换单元(Shop Replace Unit, SRU)。

虚警抑制:对故障检测过程的错误报警现象,进一步抑制和消除的过程;通过更好的测试性设计,抑制虚警,进一步降低虚警率。

故障预测:收集、分析系统的有效运行状态数据,采取合适的预测算法,预测参数性能变化过程,给出故障前工作时间或剩余寿命。

测试性作为系统的一种固有属性,主要表现为具有便于监控其工作状况、易于检查和测试的特性。系统的测试性应在尽可能少地增加硬件和软件的基础上,以最少的费用使系统获得

所需的测试诊断能力,实现检测诊断简便、迅速、准确。测试性工作主要有测试性设计、测试性分析和测试性验证。

测试性设计是指通过机内测试(Build-In Test,BIT)、外部测试接口的设计,快速地检测和隔离故障,以提高系统的测试诊断能力,减少故障诊断的测试代价,从而降低寿命周期费用。通过测试性初步设计和详细设计达到规定的测试性要求。测试性设计工作主要在系统论证、研制阶段中开展。

在测试性初步设计完成之后,应进行测试性分析,以评估测试性设计的指标能否满足规定的测试性要求,如故障检测率、故障隔离率等,并进行相应的测试性设计改进。测试性分析的目的是为了获得系统的固有测试属性,如计算系统的检测率、隔离率、模糊组大小,并列出不测的元件清单,给出系统测试性的改进建议和诊断策略等。测试性分析开展于系统研制和使用阶段,在使用阶段开展测试性分析是为了改善和弥补研制阶段测试性的不足。

测试性验证是为确定系统是否达到规定的测试性要求而进行的测试性试验与评价工作。测试性试验是为检查系统的测试性水平,评价其是否满足测试性要求而进行的各种试验的总称,是在系统研制、生产、交付和使用阶段对系统的测试性进行设计、增长、验证和评价的一种重要手段,主要通过一系列的测试性试验,将缺陷尽可能地诱发出来,予以纠正、改进,避免在实际使用中造成严重的危害和巨大的经济损失。测试性验证主要在系统交付、使用阶段进行。

1.1.2 测试性的影响

测试性与可靠性、维修性、保障性、安全性处于同等重要的地位,是系统的先天属性,是设计出来的、管理出来的,是武器装备质量特性的重要组成部分。具有良好的测试性设计,可以通过改变可靠性、维修性、保障性、安全性的性能,进一步提高装备的性能,减少维修保障资源,降低寿命周期费用。通过增加 BIT 系统来提高性能、增强功能,将有效实现装备的健康管理、自主式保障和视情维修。测试性与其他质量特性的目标一致,即提高装备的战备完好性、任务成功性和任务完成率,降低维修人力与保障资源费用。

测试性对维修性、可靠性、保障性和系统性能有直接的影响,通过故障检测时间、故障隔离时间进一步影响维修时间、停机时间、工作时间等,间接影响装备战备完好性、任务成功性和安全性。

1. 对维修性的影响

测试性对维修性的影响如下。

(1) BIT 可以快速检测和隔离故障,除有时需要启动之外,完全可自动实现诊断,与手工测试相比,其故障检测与隔离时间可以忽略不计,因此可以大大减少平均故障修复时间(Mean Time To Repair, MTTR)。

(2) BIT 可以实现系统维修后的自动检验,从而大大缩短维修后的检验时间。

(3) BIT 自动测试可以减少手工测试时产生的人为诱发故障,从而减少诱发故障的修复时间。

(4) BIT 具有显示报警功能,可使隐蔽故障变为明显故障,从而减少这类故障的修复时间。

(5) 好的测试性设计可为外部测试设备提供方便的接口和优化的诊断程序,从而减少利用外部测试设备进行诊断的时间,减少 MTTR。

(6) BIT 产生虚假报警时会导致不必要的维修活动,确认虚警往往还需要进行更多的维修活动,这是 BIT 对维修性产生的不利影响。

2. 对可靠性的影响

测试性对基本可靠性的影响如下。

(1) BIT 增加了系统的复杂性,当 BIT 设计不当或 BIT 与系统公用某些硬件和软件时,BITE 故障可能引起系统故障,因而会降低系统的基本可靠性,降低系统的平均故障间隔时间(Mean Time Between Failure,MTBF);

(2) BIT 虚警,当未证实是虚警之前,会被认为是系统故障,影响装备执行任务;

(3) BIT 实现自动测试,可以避免人为差错导致的系统故障,这属于测试性对系统基本可靠性的有利影响;

(4) BIT 实时检测隔离故障实现余度管理,功能完善的 BIT 不仅能实时检测隔离故障,还能记录状态信息的变化,分析预测状态参数趋势,有效提高任务可靠性。

测试性对基本可靠性的不利影响远大于有利影响,通过合理设计、限制 BIT 故障率和抑制虚警的办法尽量减少 BIT 的不利影响,能有效提高任务可靠性。

3. 对综合保障的影响

测试性对综合保障的影响如下:

(1) BIT 可以在系统运行过程中实时检测与隔离故障,从而减少外部测试的后勤延误时间和备件等待时间;

(2) 使用 BIT 后,可以减少外部测试设备、有关保障设备等设备的要求,从而减少等待维修时间和相关费用;

(3) BIT 能快速诊断故障,减少备件补给库存量,使维修的后勤延误时间缩短;

(4) BIT 具有记录和存储故障数据的功能,可应用于识别间歇故障、故障趋势分析预测,通过预测与健康管理系统设计,可以提早安排维修工作计划,实现自主保障;

(5) BIT 实现自动测试,可以降低维修人员技术等级要求,减少维修人员数量,从而减少维修保障费用;

(6) 没有抑制掉的 BIT 虚警会导致自主保障系统的不必要启动,造成时间、资源和金钱的浪费。

4. 测试性对系统性能的影响

测试性对系统性能的影响如下。

(1) BIT 的电源消耗增加了系统的用电负担;

(2) BIT 的硬件增加了系统的质量和体积;

(3) BIT 的软件占用了系统的存储器和 CPU 资源;

(4) 合理、有效的测试性设计,可以减少装备外部测试设备,提高装备机动性。

5. 对系统寿命周期费用的影响

装备的寿命周期费用通常包括研究与研制费用、采办费用、使用与保障费用三个部分。

装备中加入 BIT 会对研究与研制费、采办费产生不利影响,但对使用与保障费用产生有利影响。所以,在选用 BIT 和确定诊断方案时应进行权衡分析,保证 BIT 的加入和使用的诊断方案能减少总的寿命周期费用。测试性、BIT 对系统寿命周期费用的影响包括以下几个方面。

(1) 良好的 BIT、测试性和诊断设计,可以提高系统的可用性/战备完好性、任务可靠性/任务成功性,可以减少系统的采购数量,从而大大减少系统的采办费用;

(2) 完善的测试性和诊断能力,可以显著减少维修人力、维修设备和维修时间,从而减少

系统的使用保障费用；

(3) 装备中增加 BIT 软件和硬件,将增加系统的研制费和采办费；

(4) BIT 虚警会导致无效的维修活动,增加使用与维修费用。

对后两条不利影响可从设计上采取措施加以限制,如采取必要的防止虚警措施来尽量减少虚警的发生,限制 BIT 使用硬件和软件的数量,并尽量采用成熟技术,减少研究和研制费用。

1.2 测试性的发展过程

1.2.1 测试性技术发展阶段

测试性技术是故障诊断、故障预测的基础,故障诊断技术和故障预测技术的发展是随着测试性技术的发展而发展的。测试性技术的发展主要经历了以下几个阶段。

(1) 人工测试阶段

早期由于系统功能单一、结构简单,通常是由彼此独立的模拟系统构成,所用的测试方法以人工测试为主,并依靠维修测试人员的经验和水平进行系统的故障诊断。

(2) 外部测试阶段

随着装备系统功能的增加和结构的复杂化,此时所用的测试方法以外部测试为主,即将外部测试设备和被测对象连接来获取系统的状态信息,然后由测试人员依据状态信息通过对比等方法进行装备系统故障诊断。手工测试和外部测试需要借助专用或通用测试设备才能完成故障的检测与隔离。

(3) 内部测试阶段

随着计算机、自动化等技术在武器装备中的使用,装备复杂程度增加,检测故障更加困难,而且要求装备操作人员实时了解装备运行状态,如有故障能及时采取措施,因此要求被测系统本身具有一定的自测试能力,这就产生了嵌入式的机内测试。

(4) 综合诊断阶段

由于复杂装备的测试性差,BIT 虚警率高,导致故障诊断时间长,于是提出了综合诊断的概念,即是一种通过考虑和综合测试性、自动和人工测试、维修辅助手段、技术信息、人员和培训等构成诊断能力的所有要素,武器装备的诊断效能达到最佳的结构化过程,是实现经济有效地检测和准确地隔离武器系统、设备中所有已知的或可能发生的故障,以满足武器系统任务要求的手段。

(5) 故障预测阶段

由于设计不充分、制造误差、维修差错和非计划事件等各种原因,导致机上关键故障响应方法的出现,如故障保护和冗余管理等,随后出现了诊断故障源和故障原因的技术,最终故障预测诞生。故障预测是以当前装备的使用状态为起点,结合已知预测对象的结构特性、参数、环境条件和运行历史(包括运行记录、曾发生过的故障和修复记录),对装备未来任务段内出现的故障进行预报、分析和判断,确定故障性质、类别、程度、原因和部位,指出故障发展趋势和后果,向用户及时提出警告。

1.2.2 测试性标准

测试性标准和指南的制订及颁布,在一定程度上促进了测试性技术的普及和发展。表 1-1 所示为国内外关于测试性的部分主要标准和指南(报告)。

表 1-1 颁布的部分测试性标准

标准编号	标准名称
国外标准	
1976 年	BIT 设计指南
1978 年	测试性指南报告
MIL-STD-471—1978	设备或系统的机内测试、外部测试、故障隔离和测试性特性要求的验证及评价,通告
MIL-STD-470A—1983	系统及设备维修性大纲
MIL-STD-2165—1985	电子系统和设备测试性大纲
MIL-STD-1814—1991	综合诊断标准
MIL-STD-2165A—1993	系统和设备测试性大纲
MIL-HDBK-2165—1995	系统和设备测试性手册
IEEE STD 1149.1—1990	边界扫描标准
IEEE STD 1149.4—1999	混合信号测试总线标准
IEEE STD 1149.5—1995	模块测试与维修总线标准
IEEE STD 1149.6—2001	先进数字网络的边界扫描标准
IEEE STD 1149.7—2009	紧凑型边界扫描技术
IEEE1232.1—1997	所有测试环境的人工智能交换与服务标准;数据与知识标准
IEEE1232.2—1998	所有测试环境的人工智能交换与服务标准;服务规范
国内标准	
GJB 1622—1993	航空电气和电子设备的测试设备通用规范
GJB1701—1993	战术导弹测试设备通用规范
SJ/T10566—1994	测试性总线第一部分:标准测试存取口与边界扫描
GJB2072—1994	维修性试验与评定
GJB2547—1995	装备测试性大纲
HB/Z301—1997	航空电子系统和设备测试性设计指南
HB7503—1997	测试性预计程序
QJ3050—1998	航天产品故障模式、影响及危害性分析指南
QJ3051—1998	航天产品测试性设计准则
SJ20695—1998	地面雷达测试性设计指南
GJB 3385—1998	测试与诊断术语
GJB 3947—2000	军用电子测试设备通用规范
GJB 3966—2000	被测单元与自动测试设备兼容性通用要求
GJB 3970—2000	军用地面雷达测试性要求
GJB 3972—2000	对空导弹综合测试设备通用规范
GJB 4045—2000	对面战术导弹综合测试设备通用规范
GJB 4047—2000	弹道导弹常规弹头总装测试及发射测试设备通用规范
GJB 4055—2000	军用数据通信电路测试设备通用要求
GJB 4260—2001	侦察雷达测试性通用要求
GJB4464—2002	军用短波电台测试接口

标准编号	标准名称
GJB5540—2006	航空自动测试系统测试程序集通用规范
GJB5541—2006	航空自动测试系统测试通用规范
GJB5628—2006	军用超短波电台测试接口
GJB5936—2006	军用电子装备自动测试设备接口
GJB5937—2007	军用电子装备自动测试系统通用要求
GJB5938—2007	军用电子装备测试程序集通用要求
GJB 5014—2001	弹道式战略导弹单元测试设备通用规范
GJB 5188—2003	飞机地面自动测试设备通用技术要求
GJB 3947A—2009	军用电子测试设备通用规范
GJB 7248—2011	自动测试系统体系结构要求
GJB2547A—2012	装备测试性工作通用要求

上述标准中,有代表性的标准有:

1985年,美国国防部颁布了《电子系统和设备测试性大纲》(MIL-STD-2165),标志着测试性成为一门独立学科。

1995年,国防科学技术工业委员会颁布了《装备测试性大纲》(GJB2547),加强了对测试性技术的指导和管理,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。2012年,颁布了《装备测试性工作通用要求》(GJB2547A),以替代《装备测试性大纲》,该标准增加和修改了部分测试性内容,并扩展了装备全寿命周期的测试性适用阶段。

1.3 测试性工程及关键技术

能够以较少的费用保证装备健康状态可监控,故障可预测,能够在即将发生故障或发生故障后迅速隔离,并恢复系统性能,是系统最基本的要求。为了达到这一要求,系统必须具备良好的测试性。20世纪70年代,继可靠性工程、维修性工程和保障性工程之后,测试性已经独立成为一门学科,这门学科称为测试性工程。

测试性工程是研究为了达到系统的测试性要求,在一系列设计、研制生产和试验工作过程中进行的各种工程技术和活动的一门专业工程学科。

为了使装备具有良好的测试性,在装备研制中应全面认真开展测试性工作。根据GJB2547A—2012《装备测试性工作通用要求》的规定,测试性工作项目分为要求确定、管理、设计与分析、试验与评价、使用评价与改进五个类别,具体如表1-2所示。

表 1-2 测试性工作项目组成

工作项目类别	工作项目名称	工作项目说明
测试性及其工作项目要求的确定 (100系列)	101 确定诊断方案和测试性要求	协调并确定装备诊断方案和测试性定量要求和定性要求,以满足装备战备完好性、任务成功性、安全性要求和保障资源等约束
	102 确定测试性工作项目	选择并确定测试性工作项目,以合理的费用实现规定测试性要求

工作项目类别	工作项目名称	工作项目说明
测试性管理 (200 系列)	201 制定测试性计划	全面规划装备寿命周期的测试性工作,制定实施测试性计划,以确保测试性工作顺利进行
	202 制定测试性工作计划	明确并合理地安排要求的工作项目,以确保装备满足合同规定的测试性要求
	203 对承制方、转承方和供应方的监督和控制	订购方对承制方、承制方对转承方和供应方的测试性工作进行监督与控制,以确保承制方、转承方和供应方有效完成测试性工作项目,交付的产品符合规定的测试性要求
	204 测试性评审	按计划进行测试性要求和测试性工作评审,确保测试性要求和设计的合理性,确保测试性工作按合同要求和工作计划进行,最终实现规定的测试性要求
	205 测试性数据收集、分析和处理	收集、分析和处理在研制、生产和使用过程中与测试性有关的数据,为测试性设计分析、评价和改进提供信息
	206 测试性增长管理	及时发现测试性问题并安排纠正措施,以实现测试性增长
测试性设计与分析 (300 系列)	301 建立测试性模型	建立产品的测试性模型,用于分配、预计、设计和评价产品的测试性
	302 测试性分配	根据可靠性、任务关键性和技术风险等要求,将产品的测试性定量要求逐层分配到规定的产品层次中,以明确产品各层次的测试性定量要求
	303 测试性预计	根据测试性设计资源估计产品的测试性水平是否满足规定的测试性定量要求
	304 故障模式、影响及危害性分析——测试性信息	进行故障模式、影响及危害性分析(FMECA),为产品的测试性设计、分析、试验与评价提供相关信息
	305 制定测试性设计准则	将测试性要求、使用和保障约束转化为具体的产品测试性设计准则,以指导和检查产品设计
	306 固有测试性设计和分析	从设计早期阶段开始,将固有测试性设计到系统和设备中,并对设计结果进行分析与评价
	307 诊断能力设计	进行嵌入式诊断设计和外部诊断设计,以满足规定产品测试性指标要求
测试性试验与评价 (400 系列)	401 测试性核查	识别测试性设计缺陷,并采取纠正措施,实现测试性的持续改进与增长
	402 测试性验证试验	验证产品的测试性是否符合规定的要求
	403 测试性分析评价	通过综合利用产品的有关信息,评价产品是否满足规定的测试性要求
使用期间测试性 评价与改进 (500 系列)	501 使用期间测试性信息收集	通过有计划地收集装备使用期间的各项有关数据,为使用期间测试性评价、测试性改进,以及新装备的论证与研制等提供信息
	502 使用期间测试性评价	评价装备在实际使用条件下达到的测试性水平,确定是否满足规定的测试性要求,为改进测试性、完善使用以及维修工作与新研装备的论证等提供支持
	503 使用期间测试性改进	对装备在使用中发现的测试性问题和相关技术的发展,通过必要的权衡分析或试验,确定需要改进的项目

测试性工作项目在研制阶段中的开展时机见表 1-3。

表 1-3 测试性工作开展时机

工作项目编号	工作项目名称	论证阶段	方案阶段	工程研制与定型阶段	生产与使用阶段
101	确定诊断方案和测试性要求	√	√	√	×
102	确定测试性工作项目	√	√	×	×
201	制定测试性计划	√	√	√	√
202	制定测试性工作计划	△	√	√	√
203	对承制方、转承方和供应方的监督和控制	×	△	√	√
204	测试性评审	△	√	√	△
205	测试性数据收集、分析和管理	×	√	√	√
206	测试性增长管理	×	√	√	△
301	建立测试性模型	△	√	√	×
302	测试性分配	△	√	√	×
303	测试性预计	×	△	√	×
304	故障模式、影响及危害性分析——测试性信息	×	√	√	×
305	制定测试性设计准则	×	△	√	×
306	固有测试性设计和分析	×	△	√	△
307	诊断能力设计	×	△	√	△
401	测试性核查	×	△	√	×
402	测试性验证试验	×	△	√	△
403	测试性分析评价	×	△	√	△
501	使用期间测试性信息收集	×	×	×	√
502	使用期间测试性评价	×	×	×	√
503	使用期间测试性改进	×	×	×	√

注：√——适用，△——有选择地应用，×——不适用

测试性工作在装备的方案、设计、研制、生产和使用过程中处理与测试性有关的工程技术工作。这些关键技术主要内容如下：

(1) 测试诊断方案与测试性要求。诊断方案是对系统或设备诊断的总体构想，它包括诊断对象、范围、功能、要求、方法、维修级别、诊断要素和诊断能力。诊断方案要满足各维修级别的诊断要求，具备比较完善的诊断能力，包括各维修级别的 BIT、自动测试、人工测试、技术文件、人员技术水平和培训，以及各维修级别的诊断能力等。测试性要求是系统的定性和定量要求。诊断方案根据约束条件制定，不同的优化目标有不同的备选诊断方案，根据系统任务要求、系统特性、使用保障要求和诊断方案的要求，提出合适的测试性要求。

(2) 测试性管理。测试性管理是从系统的观点出发，对装备寿命周期中各项测试性活动进行规划、组织、协调与监督，以全面贯彻测试性工作的基本原则，实现既定的测试性目标。详见《GJB2547A—2012》。

(3) 测试性设计与分析。通过分析系统性能要求，确定诊断方案和测试性要求，综合考虑并实现测试的可控性与可观测性、初始化与可达性、BIT 与外部测试设备的兼容性等，以达到