

丛书主编 王自力

RIMS

测试性 设计分析与验证

Testability Design Analysis and Verification

主编 石君友

Reliability
Maintainability
Supportability



国防工业出版社
National Defense Industry Press

可靠性·维修性



保障性技术丛书

测试性设计分析与验证

Testability Design Analysis and Verification

主 编 石君友
编写组成员 田 仲 侯文魁
(按姓氏笔画排序) 徐 萍



1090334

国防工业出版社

·北京·

1431284

3本

内 容 简 介

本书从工程实际出发,系统地阐述了测试性设计分析、试验与评价的思想和方法,包括测试性的基本概念、测试性定性要求和定量要求、诊断方案设计、测试性分配和预计、故障模式与测试分析、基于相关性模型的测试设计分析、测试性设计准则、机内测试设计、外部测试设计、测试性验证与评价等,最后对测试性的新技术趋势(综合诊断、预测和健康管理)进行了综述。

本书可供工程技术人员和管理人员在开展测试性设计分析、验证与评价时学习和参考,也可以作为培训教材使用。同样可供测试性专业人员、大专院校本科生及研究生学习和参考。

图书在版编目(CIP)数据

测试性设计分析与验证/石君友主编. —北京:
国防工业出版社,2011.4
(可靠性·维修性·保障性技术丛书)
ISBN 978-7-118-07287-7

I. ①测... II. ①石... III. ①装备-测试
IV. ①TJ01

中国版本图书馆CIP数据核字(2011)第009892号

※

国防工业出版社 出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路23号 邮政编码100048)

北京嘉恒彩色印刷有限责任公司

新华书店经售

*

开本 710×960 1/16 印张 22 $\frac{3}{4}$ 字数 395千字

2011年4月第1版第1次印刷 印数 1—4000册 定价 56.00元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店:(010)68428422

发行邮购:(010)68414474

发行传真:(010)68411535

发行业务:(010)68472764

《可靠性·维修性·保障性技术丛书》 编辑委员会

主任委员 王自力

副主任委员 康 锐 屠庆慈

委 员 (按姓氏笔划排序)

于永利	马 麟	石君友	田 仲	付桂翠
吕 川	吕明华	朱小东	刘 斌	刘春和
阮 镰	孙有朝	孙宇锋	李建军	宋晓秋
陆民燕	陈 新	罗汉生	金惠华	房祥忠
赵 宇	赵廷弟	姜同敏	章国栋	曾天翔
曾声奎	曾曼成	徐居明	戴慈庄	

1995年,国防科技及教育界著名专家杨为民教授组织编辑出版了国内第一套《可靠性·维修性·保障性丛书》,对推动武器装备质量观念的转变,提高武器装备的可靠性、维修性、保障性水平,发挥了重要的推动作用。

15年后的今天,树立现代质量观,持续提高可靠性、维修性、保障性水平,已成为武器装备建设与国防科技发展中的共识,特别是《武器装备质量管理条例》的颁布实施,表明可靠性、维修性、保障性在现代质量观中具有战略性、全局性和基础性的地位和作用,高可靠、长寿命、好维修、易测试、能保障、保安全已成为武器装备研制、生产和使用中的普遍要求,可靠性、维修性、保障性工程活动已全面进入武器装备寿命周期各阶段,为提高武器装备的效能、降低寿命周期费用发挥了不可替代的作用。

在上述背景下,在武器装备建设与国防科技发展中,无论在技术上还是在管理上,都对可靠性、维修性、保障性提出了更高的要求。为适应这种新形势,我们组织有关专家重新编辑出版了这套《可靠性·维修性·保障性技术丛书》,共12册,以满足广大工程技术和管理人员的迫切需求。

本套丛书认真总结了15年来国内外武器装备可靠性、维修性、保障性最新实践经验,全面吸收了我国在预先研究和技术基础研究领域中取得的主要研究成果,从装备、系统、设备、元器件等多个产品层次和硬件、软件等不同产品类别,可靠性、维修性、测试性、保障性、安全性等多种质量特性,以及论证、研制、生产和使用与保障等寿命周期各阶段,全方位地论述了相关领域的基本概念、技术方法、实践经验及发展方向,具有系统性、实用性和前瞻性,从而有助于读者全面、系统地了解 and 掌握该项技术的全貌。本套丛中阐述的可靠

性、维修性、保障性理论与技术,对武器装备和一般民用工业产品均具有普遍的适用性。

《可靠性·维修性·保障性技术丛书》是一套理论与工程实践并重的著作,它不仅可以为广大工程技术和管理人员提供有用的指导和参考,也可作为有关工程专业本科生、研究生的教学参考书。我们相信,这套丛书的出版,对我国武器装备可靠性、维修性、保障性工程的全面深入发展将起到重要的推动和促进作用。

丛书编辑委员会

2010年12月

随着武器装备性能的日益提高以及信息技术飞速发展的需求,测试性越来越受到人们的重视,许多新技术、新方法都应用到了测试性之中,测试性技术得到了快速发展,经历了由外部测试到机内测试,由测试性/BIT 到智能BIT、综合诊断再到预测与健康管理的的发展过程。

测试性作为装备的一种设计特性,具有与可靠性、维修性、保障性同等重要的位置,是构成武器装备质量特性的重要组成部分。测试性作为装备可靠性设计与装备维修保障设计之间的重要纽带,是确保装备战备完好性、任务成功性和安全性要求得到满足的重要中间环节。通过良好的测试性设计,可以提高装备的战备完好性、任务成功性和安全性,减少维修人力及其他保障资源,降低寿命周期费用。

测试性分析与验证是一门新兴的学科,国外在 20 世纪 70 年代已开展研究,并用于第三代武器装备。我国在这方面的研究起步较晚,近些年来已经开展了不少的研究工作,颁发了测试性军用标准,在新型号研制中提出了测试性要求,开展了有关设计分析与评估验证工作。总的来说,国内对测试性技术的应用首先体现在航空装备上,逐渐推广应用到航天、航海和地面装备,测试性知识尚不普及。在下一代武器装备的研制中,将采用以测试性为核心的综合诊断、预测与健康管理技术来提升装备保障能力,这极大地推动了测试性技术的发展,并使研制单位真正地重视测试性技术的研究和应用。编写本书的出发点是为从事测试性技术研究和应用的工程技术人员提供参考,也可以作为大学本科和研究生参考书,希望能在促进我国测试性学科发展方面做些有益的工作。

本书是在多年科研、教学和参与型号研制的基础上,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。本书全面阐述了测

试性的基本概念、参数、设计分析工作、测试性要求和诊断方案、测试点与诊断策略、指标分配和预计、测试性设计和验证等技术和方法。考虑到工程应用与新技术的需要,编写本书时注意到了科学性和实用性。力求结合国情,从系统性和工程实用观点出发组织有关章节内容。

本书共分11章,其中第1章、第4章、第5章、第6章、第9章、第11章由石君友编写,第3章、第10章由田仲编写,第2章、第7章由侯文魁、石君友共同编写,第8章由徐萍、田仲共同编写。全书由石君友主编,由田仲研究员、曾天翔研究员主审。在该书编写过程中领导和同事们给予了热情的支持和帮助,提供了宝贵意见,主审对全书内容安排提供了宝贵的意见。此外,张鑫、史萌、王风武、纪超等硕士生参与了本书初稿整理和校订工作。在此一并表示衷心的感谢。

测试性是一门新兴学科,正处在发展之中,又鉴于编者水平有限,书中有错误和疏漏之处,恳请读者谅解和指正。

编者

2010年8月

符 号

A_0	使用可用度	T_{FI}	平均故障隔离时间
A_i	固有可用度	T_D	诊断树的平均测试时间
C_D	诊断树的平均测试费用	W_{FD}	故障检测权值
$I(t_j)$	测试点的诊断信息量	W_{FI}	故障隔离权值
N_D	故障诊断平均测试步骤数	γ_{CFD}	关键故障检测率
N_{FD}	故障检测平均测试步骤数	γ_{FA}	虚警率
N_{FI}	故障隔离平均测试步骤数	γ_{FC}	故障覆盖率
N_{FO}	预期虚警次数	γ_{FD}	故障检测率
T_{BFA}	平均虚警间隔时间	γ_{FI}	故障隔离率
T_{BF}	平均故障间隔时间	γ_{FP}	误拆率
T_{BM}	系统平均维修间隔时间	λ_S	系统总的故障率
T_{BR}	平均 BIT 运行时间	λ_D	系统总的可检测故障率
T_{MD}	系统平均不能工作时间	λ_{IL}	隔离故障率
T_{FD}	平均故障检测时间	λ_B	BIT 故障率

缩 略 语

- ACARS** (Aircraft Communication Addressing and Reporting System) 飞机通信询问与报告系统
- ADMS** (Aircraft Diagnosis and Maintenance System) 飞机诊断和维护系统
- ALIS** (Autonomic Logistics Information System) 自主后勤信息系统
- AP** (Airborne Printer) 机载打印机
- ATE** (Automatic Test Equipment) 自动测试设备
- ATS** (Automatic Test System) 自动测试系统
- BCS Rate** (Bench Checked-Serviceable Rate) 台检可工作率
- BIT** (Built-In Test) 机内测试
- BITE** (Built-In Test Equipment) 机内测试设备
- BITS** (Built-In Test System) 机内测试系统
- CA** (Criticality Analysis) 危害性分析
- CATS** (Common Automatic Test System) 通用自动测试系统
- CBIT** (continuous BIT) 连续 BIT
- CDR** (Critical Design Review) 关键设计评审
- CDU** (Control Display Unit) 控制显示单元
- CEM** (Common Element Model) 共用元素模型
- CFDIU** (Central Fault Display Interface Unit) 中央故障显示接口装置
- CFDR** (Critical Fault Detection Rate) 关键故障检测率
- CITS** (Central Integrated Test System) 中央综合测试系统
- CMC** (Central Maintenance Computer) 中央维修计算机
- CMCS** (Central Maintenance Computer System) 中央维修计算机系统
- CMMS** (Computer Maintenance Management System) 计算机维修管理系统
- CMP** (Central Maintenance Panel) 中央维修控制板
- CND** (Cannot Duplicate) 不能复现
- CNDR** (Cannot Duplicate Rate) 不能复现率
- CRC** (Cyclic Redundancy Check) 循环冗余校验法
- CRT** (Cathode Ray Tube) 使用阴极射线管的显示器
- CUT** (Circuit Under Test) 被测电路
- CWS** (Central Warning System) 中央告警系统
- DAU** (Data Acquisition Unit) 数据采集装置
- DCM** (Dynamic Context Model) 动态上下文模型
- DCP** (Decision Coordinating Paper) 决策调整报告
- DFT** (Design For Testability) 测试性设计
- DIM** (Diagnostic Inference Model) 诊断推理模型

- DSRD** (Depot Support Requirements Document) 基地保障要求文件
- ECA** (Electronic Components Association) 电子组件
- EDIM** (Enhanced Diagnostic Inference Model) 增强诊断推理模型
- EFIS** (Electronic Figure Indication System) 电子仪表显示系统
- EHM** (Engine Health Management) 发动机健康管理
- EICAS** (Engine Indication and Crewman Alarm System) 发动机指示与机组报警系统
- EIU** (External Interface Unit) 接口装置
- EPROM** (Electrically Programmable Read-Only Memory) 电可编程只读存储器
- ETE** (External Test Equipment) 外部测试设备
- FAR** (False Alarm Rate) 虚警率
- FCA** (Functional Configuration Audit) 功能配置审核
- FCR** (Fault Coverage Rate) 故障覆盖率
- FD** (Fault Detection) 故障检测
- FDR** (Fault Detection Rate) 故障检测率
- FFP** (Fraction of False Pull) 误拆率
- FFT** (Fast Fourier Transform) 快速傅里叶变换
- FI** (Fault Isolation) 故障隔离
- FIR** (Fault Isolation Rate) 故障隔离率
- FLCC** (Flight Control Computer) 飞控计算机
- FM** (Failure Mode) 故障模式
- FMEA** (Failure Mode and Effects Analysis) 故障模式影响分析
- FMECA** (Failure Modes, Effect and Criticality Analysis) 故障模式、影响及危害性分析
- FTM** (Fault Tree Model) 诊断树模型
- HMI** (Human Interface) 人机接口
- HMM** (Hidden Markov Model) 隐马尔科夫模型
- HRC** (Health Report Codes) 健康报告码
- HUMS** (Health and Usage Monitoring System) 健康与使用监控系统
- iBITSM** (Intelligent Bit And Stress Measurement) 智能 BIT 和应力测量
- IBIT** (Initiated BIT) 启动 BIT
- IC** (Integrated Circuit) 集成电路
- ICA** (Independent Component Analysis) 独立成分分析
- ICP** (Integrated Control Panel) 综合控制面板
- IDS** (Integrated Display System) 综合显示系统
- ISHM** (Integrated System Health Management) 综合系统健康管理
- IVHM** (Integrated Vehicle Health Management) 航天器综合健康管理
- JAST** (Joint Advanced Strike Technology) 联合先进攻击技术
- KB** (Knowledge Base) 知识库
- LCN** (Logistics Control Number) 后勤保障控制数
- LDA** (Linear Discriminant Analysis) 线性判别分析
- LRM** (Line Replaceable Module) 外场可更换模块
- LRT** (Likelihood Ratio Test) 似然比检验
- LRU** (Line Replaceable Unit) 外场可更换单元
- LSI** (Large Scale Integrated Circuit) 大规模集成电路
- MAP** (Maximum a Posteriori) 最大后验概率
- MAT** (Maintenance Access Terminal) 维修

存取终端
MBIT(Maintenance BIT) 维修 BIT
MBRT(Mean BIT Running Time) 平均 BIT 运行时间
MC(Mission Computer) 任务计算机
MCDU(Multiple Control and Display Unit) 多功能控制与显示装置
MFDT(Mean Fault Detection Time) 平均故障检测时间
MFIT(Mean Fault Isolation Time) 平均故障隔离时间
MLE(Maximum Likelihood Estimate) 最大似然估计
MMSE(Minimum Mean Square Error) 最小均方差估计
MTBF(Mean Time Between Failure) 平均故障间隔时间
MTBFA(Mean Time Between False Alarm) 平均虚警间隔时间
MTTR(Mean Time To Repair) 平均故障修复时间
NBC(Naive Bayes classifier) 朴素贝叶斯分类器
ND(Navigation Display) 导航显示器
NN(Neural network) 神经网络
OCAM(Onboard Check and Monitoring) 飞机检查和监控
OMS(On-board Maintenance System) 机载维修系统
OSAIDD(Open Systems Approach Integrated Diagnostics Demonstration) 综合诊断开放系统方法演示验证
OSI(Open System Interconnect) 开放式系统互连
PBIT(Periodic BIT) 周期 BIT
PCA(Physical Configuration Audit) 物理配置审核

XX

PCA(Principal Component Analysis) 主成分分析
PCB(Printed Circuit Board) 印刷电路板
PDR(Preliminary Design Review) 初步设计评审
PF(Particle filter) 粒子滤波
PFD(Primary Flight Display) 主飞行显示器
PHM(Prognostics and Health Management) 预测和健康管理
PMA(Portable Maintenance Aids) 便携式维修辅助设备
PMD(Project Management Directive) 项目管理指令
PMP(Project Management Plan) 项目管理计划
PoF(Physics of Failure) 失效物理
PTMS(Power Thermal Management System) 能量热量管理系统
PUBIT(Power on BIT) 加电 BIT
RAM(Random Access Memory) 随机存储器
RCM(Requirements Correlation Matrix) 要求关联矩阵
RF(Radio Frequency) 射频
RFP(Request For Proposal) 建议征询
RMS(Root-Mean-Square) 均方根
ROM(Read-Only Memory) 只读存储器
RTOK(Retest Okay) 重测合格
RTOKR(Retest Okay Rate) 重测合格率
SCHM(Space Shuttle Health Management) 太空梭健康管理
SCP(System Concept Paper) 系统方案报告
SDR(System Design Review) 系统设计评审
SGR(Sortie Generation Rate) 增加出动架

次率		试验和评价总体规划
SHM (System Health Management)	系统健康管理	TP (Test Point) 测试点
SON (Statement of Operational Need)	使用需求说明	TPS (Test Program Set) 测试程序集
SORD (System Operational Requirements Document)	系统使用要求文件	TRD (Test Requirements Document) 测试要求文件
SRR (System Requirements Review)	系统要求评审	TSMD (Time Stress Measurement Devices) 时间应力测量装置
SRU (Shop Replaceable Unit)	车间可更换单元	UUT (Unit Under Test) 被测单元
SRM (Shop Replaceable Module)	车间可更换模块	VHM (Vehicle Health Monitoring) 飞行器健康监测
SVM (Support Vector Machine)	支持向量机	VLSIC (Very Large Scale Integration Circuit) 超大规模集成电路
TEMP (Test and Evaluation Master Plan)		WDT (Watch-Dog Timer) 看门狗定时器
		WRA (Weapon Replaceable Assembly) 武器可更换组件

符号

缩略语

第1章 绪论	1
1.1 测试性基本概念	1
1.1.1 测试性定义	1
1.1.2 测试性技术框架	2
1.2 测试性的发展过程	8
1.2.1 测试性学科的形成	8
1.2.2 外部测试技术的发展过程	9
1.2.3 机内测试技术的发展过程	10
1.2.4 测试性技术的新趋势	13
1.3 测试性的重要性及对系统特性的影响	15
1.3.1 测试性的重要性	15
1.3.2 对基本可靠性的影响	16
1.3.3 对任务可靠性安全性、成功性的影响	16
1.3.4 对维修性的影响	17
1.3.5 对综合保障的影响	17
1.3.6 对战备完好性的影响	18
1.3.7 对系统性能的影响	19
1.3.8 对系统寿命周期费用的影响	19
1.4 测试性参数	20
1.4.1 故障检测率	20
1.4.2 关键故障检测率	20
1.4.3 故障覆盖率	21
1.4.4 故障隔离率	21

1.4.5	虚警率	22
1.4.6	平均虚警间隔时间	22
1.4.7	平均故障检测时间	22
1.4.8	平均故障隔离时间	22
1.4.9	平均诊断时间	23
1.4.10	平均 BIT 运行时间	23
1.4.11	误拆率	23
1.4.12	不能复现率	23
1.4.13	台检可工作率	23
1.4.14	重测合格率	23
1.4.15	剩余寿命	24
1.5	测试性术语	24
第 2 章	诊断方案与测试性要求	28
2.1	概述	28
2.1.1	诊断方案与测试性要求的关系	28
2.1.2	诊断方案与测试性要求发展	28
2.2	诊断方案的组成要素与制定程序	30
2.2.1	诊断方案的基本组成要素	30
2.2.2	典型诊断方案	32
2.2.3	诊断方案的制定程序	39
2.3	测试性要求的确定过程	41
2.3.1	测试性要求确定的具体过程	41
2.3.2	测试性要求确定过程示例	42
2.4	测试性要求分类	47
2.4.1	按定性、定量分类与示例	47
2.4.2	按测试手段分类与示例	50
2.4.3	按维修级别分类与示例	51
第 3 章	测试性分配	54
3.1	概述	54
3.1.1	目的和时机	54
3.1.2	分配的内容和任务	54
3.1.3	测试性分配原则	54
3.2	检测与隔离要求的分配方法	55

3.2.1	等值分配法	56
3.2.2	按故障率分配法	56
3.2.3	考虑故障率和费用分配法	60
3.2.4	综合加权分配法	61
3.2.5	有部分老产品时的分配方法	67
3.2.6	测试性分配方法比较	68
3.3	虚警定量要求的分配	70
3.3.1	虚警定量要求的特点	70
3.3.2	FAR 指标的分配	71
3.3.3	MTBFA 指标的分配	71
3.4	测试性分配注意事项	73
第 4 章	故障模式与测试分析	75
4.1	故障模式与测试方法分析	75
4.1.1	概述	75
4.1.2	分析内容与实施流程	76
4.1.3	分析表格	77
4.1.4	注意事项	79
4.2	故障模式与测试扩展分析	79
4.2.1	扩展分析概述	79
4.2.2	扩展分析输入输出和内容	81
4.2.3	扩展分析的分析流程与实施表格	85
4.2.4	扩展分析注意事项	89
第 5 章	基于相关性模型的测试性设计分析	90
5.1	概述	90
5.2	相关性模型概念	91
5.2.1	基本假设与定义	91
5.2.2	相关性图示模型	92
5.2.3	相关性数学模型	92
5.2.4	诊断树和故障字典	93
5.2.5	IEEE1232 模型	96
5.3	相关性建模分析方法	99
5.3.1	相关性建模分析流程	99
5.3.2	建立相关性图示模型	99

5.3.3	建立 D 矩阵模型	100
5.3.4	优选测试点	102
5.3.5	建立诊断树和故障字典	108
5.3.6	诊断能力计算	110
5.4	应用举例	112
5.4.1	不考虑可靠性和费用影响	112
5.4.2	考虑可靠性影响	115
5.4.3	同时考虑可靠性和费用影响	117
5.4.4	只考虑费用影响	118
5.4.5	比较分析	118
5.5	注意事项	119
第 6 章	机内测试设计	121
6.1	概述	121
6.1.1	BIT 的实现途径	121
6.1.2	BIT 设计要求	121
6.1.3	BIT 设计内容	122
6.1.4	BIT 设计流程	122
6.2	机内测试系统总体设计	123
6.2.1	系统功能设计	123
6.2.2	系统工作模式设计	124
6.2.3	系统结构布局设计	125
6.2.4	系统信息处理设计	127
6.3	单元机内测试设计	129
6.3.1	测试对象分析	129
6.3.2	测试功能设计	129
6.3.3	工作模式设计	130
6.3.4	测试流程设计	130
6.3.5	诊断策略设计	132
6.3.6	软/硬件设计	133
6.3.7	信息处理设计	145
6.4	测试管理器设计	145
6.4.1	测试管理器功能设计	145
6.4.2	测试管理器工作模式设计	146