

可靠性·维修性·保障性技术丛书 ⑦

丛书主编 王自力

RAMS

维修性设计 分析与验证

Design, Analysis and Verification of Maintainability

主编 吕 川

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

维修性设计分析与验证

**Design, Analysis and Verification of
Maintainability**

主 编 吕 川
副 主 编 周 栋
编写组成员 马 麟 王美慧
(按姓氏笔画排序) 融志奇 霍 琳

国防工业出版社

· 北京 ·

内 容 简 介

维修性是产品维修方便、快捷和经济的重要质量特性,在研制中越来越受到重视。本书系统地介绍了维修性设计分析与验证的技术与方法。全书共分八章,主要包括:维修性的概念和设计、验证基本过程与原则,维修性要求及其确定,维修性模型,维修性设计准则、方法,维修性分析技术,维修性试验与评价技术,维修性虚拟试验与分析评价等。

本书是《可靠性·维修性·保障性技术丛书》之一,可供科技工业,尤其是武器装备研究、研制、试验、生产、订购、维修部门和单位的工程技术人员与管理人阅读,也可作为高等工程技术院校有关专业本科生、研究生的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

维修性设计分析与验证/吕川主编. —北京:国防工业出版社,2012. 1

(可靠性·维修性·保障性技术丛书)

ISBN 978-7-118-07847-3

I. ①维... II. ①吕... III. ①维修性设计 IV. ①TB21

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2011)第 251282 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 $\frac{1}{4}$ 字数 392 千字

2012 年 1 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)88540777

发行传真:(010)88540755

发行邮购:(010)88540776

发行业务:(010)88540717

《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。本套丛书中阐述的可靠

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



维修性是反映装备维修方便、快捷和经济的重要质量特性,关系到维修所需的时间、工时以及其他物质资源消耗与费用。对于军事装备,和平时期维修性直接影响到装备的战备完好性,战争时期则影响到装备的战斗力;对于民用产品,维修性直接影响到产品的经济效益和市场竞争能力。随着现代装备的复杂化、综合化的发展,维修性问题更为突出,已经与传统性能处于同等重要的地位,受到军队和工业部门的重视。具备良好维修性的关键在于产品设计,其核心是进行维修性的设计分析与验证。近些年来,随着装备研制及维修性技术应用的深入,维修性设计分析与验证技术方面取得了一些新的发展。本书的编写旨在总结近些年国内外维修性工程领域的技术发展成果,系统介绍维修性设计、分析、验证技术与方法,为从事装备研究的工程技术和管理人员提供实用书籍。

本书共分8章,内容上注意体现工程应用需要,吸收总结了我国近年来维修性设计分析与验证技术方法上多方面的研究和实践成果,并提供必要的实例说明。第1章,分析了维修性的重要意义与作用,概括论述了维修性工程过程、原则及发展;第2章,介绍了维修性设计要求与工作要求及其确定;第3章,分析了维修性模型的类型,总结了维修性设计与验证中的适用模型;第4章,论述了维修性设计准则及制定要求,介绍了部分常用产品的维修性设计经验与措施;第5章,介绍了常规维修性分配、预计方法,以及维修测试的综合权衡,并吸收部分新近研究成果,阐述了LRU(现场可更换单元)规划设计方法和基于时间特性维修性分配方法等新内容;第6章,介绍了FMEA、综合分析等在维修性分析中的应用技术,并论述了区域安全分析与维修性分析综合的研究成果——区域维修性分析方法;第7章,论述了维修性试验与评价的内容与要求,重点介绍了维修性统计试验和演示试验评价方法;第8章,根据新技术发展的趋势与实际应用需要,集中论述了采用虚拟现实技术开展维修性虚拟试验及其分析评价技术,从虚拟仿真建模、虚拟仿真试验及基于虚拟仿真试验的维修性分析评价等方面进行

了系统介绍。

本书是《可靠性·维修性·保障性技术丛书》之一。在编写中,有关维修性管理和维修保障方面的分析、规划等内容在其他分册专述,本书集中介绍维修性设计分析与验证特有的技术内容,以减少与其他分册的重复。

本书内容经由编写组集体讨论,各章执笔人如下:第1章由吕川编写,第2章由周栋、马麟编写,第3章由王美慧、吕川编写,第4章由周栋编写,第5章由霍琳、吕川编写,第6章由周栋编写,第7章由马麟、周栋编写,第8章由郭志奇、周栋编写。全书由吕川主编,章国栋、罗汉生主审,王美慧修订校正。本书还得到了屠庆慈、曾天翔、陈新、于永利、朱小东等多位专家学者的指导,对本书的编写提出了许多宝贵意见。本书编写过程中,丁妍、康乐、马新茆、许贝、赵亚军、耿杰、杨坚、曹智胜、李磊等同志参加了相关资料收集、文字编撰和校对等工作。本书编写中还引用和参考诸多文献资料。在此谨向给予我们帮助和指导的同志表示感谢!

本书尽可能从工程实际出发,选用有参考意义的内容,供装备研制管理机构、论证部门、研制生产部门的相关工程技术与管理人員参考阅读,也可作为高等院校教学参考书。

由于作者的知识 and 经验的局限性,本书的错误和不妥之处在所难免,诚望广大读者批评指正。

编写组

2011年11月

符 号

A_i	固有可用度	$m(t)$	维修密度函数
A_o	使用可用度	μ	正态分布均值
A_a	可达可用度	σ	正态分布标准离差
T_{BF}	平均故障间隔时间	$\lambda(t)$	故障率
Θ_0	平均故障间隔时间上限	T_M	系统平均维修时间
Θ_1	平均故障间隔时间下限	M_1	维修工时率
T_{CT}	平均修复时间	T_{MD}	维修停机时间率
T_{PT}	平均预防性维修时间	T_{MTU}	修复性维修停机时间率
T_{MAXCT}	最大修复时间	M_h	维修事件的维修工时
T_{TA}	再次出动准备时间	$\bar{M}_{hs}$	系统维修事件的平均维修工时
r_{FD}	故障检测率	$T_{\uparrow}$	个体维修时间
r_{FI}	故障隔离率	E	效能
r_U	资源利用率	A	可用度
$R(t)$	可靠度	D	可信度
$F(t)$	不可靠度	C	固有能能力
$f(t)$	故障密度函数	H	无污染度

缩 略 语

- MTBF** (Mean Time Between Failure) 平均故障间隔时间
- MTBF_U** (Mean Time Between Failure Upper) 平均故障间隔时间上限
- MTBF_L** (Mean Time Between Failure Lower) 平均故障间隔时间下限
- MTBM** (Mean Time Between Maintenance) 平均维修间隔时间
- MTTR** (Mean Time To Repair) 平均修复时间
- MTTR_U** (Mean Time To Repair Upper) 平均故障修复时间上限
- MTTR_L** (Mean Time To Repair Lower) 平均故障修复时间下限
- MPMT** (Mean Preventive Maintenance Time) 平均预防性维修时间
- MCRT** (Major Component Replacement Time) 重要部件平均更换时间
- MTTRS** (Mean Time To Restore System) 系统平均恢复时间
- DMMH/OH** (Direct Maintenance Man - hours per Operate Hour) 每工作小时直接维修工时
- DMC/OH** (Direct Maintenance Cost per Operate Hour) 每工作小时直接维修费用
- MMC/OH** (Maintenance Material Cost per Operate Hour) 每工作小时维修器材费用
- MTRF** (Mission Time To Restore Function) 平均恢复功能用的任务时间
- RT** (Reconfiguration Time) 重构时间
- FMEA** (Failure Mode Effects Analysis) 故障模式影响分析
- LSA** (Logistic Support Analysis) 保障性分析
- LRU** (Line Replaceable Unit) 现场可更换单元
- SRU** (Shop Replaceable Unit) 车间可更换单元
- BIT** (Built - In Test) 机内测试
- MFD** (Maintenance Flow Diagram) 维修流程图
- MTN** (Maintenance Task Net) 维修工作网
- CER** (Cost Evaluation Relationship) 费用估算关系式



符号	XV
缩略语	XVI
第1章 绪论	1
1.1 产品维修	1
1.1.1 维修的概念与分类	1
1.1.2 维修的重要性	2
1.1.3 影响维修质量与效率的因素	5
1.2 维修性概念	6
1.2.1 维修性的提出与定义	6
1.2.2 维修性与装备质量特性	8
1.2.3 维修性问题	10
1.3 维修性工程	12
1.3.1 维修工程与维修性工程	12
1.3.2 规范的维修性工作	13
1.3.3 维修性设计分析与验证基本过程与原则	17
1.4 维修性设计分析与验证发展	19
参考文献	22
第2章 维修性要求	23
2.1 概述	23
2.2 维修性要求的作用	23
2.3 维修性设计要求	24
2.3.1 维修性定量要求	24
2.3.2 维修性定性要求	27
2.3.3 维修性要求确定	29
2.4 维修性工作要求	33
2.4.1 维修性工作项目要求	33

2.4.2	维修性管理要求	34
2.4.3	维修性设计与分析要求	34
2.4.4	维修性试验与评价要求	35
2.4.5	使用期间维修性评价与改进要求	35
第3章	维修性模型	36
3.1	概述	36
3.1.1	维修性模型的作用	36
3.1.2	维修性模型的分类	36
3.1.3	维修性建模的原则、方法与要求	37
3.1.4	系统维修性模型的建立	41
3.2	维修性物理关系模型	44
3.2.1	维修职能流程图	44
3.2.2	系统功能层次图	49
3.3	维修性数学关系模型	51
3.3.1	维修性量化模型	51
3.3.2	维修性统计模型	60
3.3.3	维修性数字仿真模型	65
3.4	虚拟维修模型	70
3.5	注意事项	71
	参考文献	72
第4章	维修性设计准则	73
4.1	维修性设计准则及实施	73
4.1.1	概述	73
4.1.2	维修性设计准则的制定与控制	74
4.1.3	维修性设计准则的主要内容	76
4.2	维修性设计准则一般内容	77
4.2.1	简化设计	77
4.2.2	可达性和可操作性设计	78
4.2.3	模块化、标准化和互换性设计	82
4.2.4	防差错和标示设计	84
4.2.5	维修安全性设计	85
4.2.6	维修性人素工程设计	85
4.2.7	测试诊断设计	86
4.3	其他的维修性设计内容	87

4.3.1	战场抢修设计	87
4.3.2	非工作状态维修性设计	89
4.3.3	维修作业环境设计	89
4.3.4	贵重件的可修复	92
4.3.5	环境防护与除锈防锈	93
4.4	产品的维修性设计	95
4.4.1	总体设计中维修性考虑	95
4.4.2	紧固件	96
4.4.3	轴承	98
4.4.4	密封件	99
4.4.5	电子与电气部件	100
4.4.6	机械装置	102
4.4.7	液压装置	103
4.4.8	光学器件	104
4.4.9	润滑装置	105
4.4.10	接插件	106
4.5	软件维护性设计	107
4.5.1	概述	107
4.5.2	设计内容	107
4.6	维修性设计准则示例	118
4.6.1	机电管理系统	119
4.6.2	救生系统	119
4.6.3	航电系统	120
4.6.4	货运系统	121
4.6.5	动力系统	122
4.6.6	液压系统	124
4.6.7	水/废水系统	126
4.6.8	防火系统	126
4.7	注意事项	128
	参考文献	128
第5章	维修性设计方法	129
5.1	概述	129
5.2	现场可更换单元的规划设计方法	130
5.2.1	概述	130

5.2.2	LRU 规划设计的 RMS 因素体系	134
5.2.3	LRU 规划设计工程化	141
5.2.4	LRU 规划设计权衡方法	150
5.2.5	LRU 规划设计方法示例	153
5.2.6	注意事项	160
5.3	维修性分配方法	160
5.3.1	概述	160
5.3.2	维修性分配的工作程序	165
5.3.3	按故障率分配法	166
5.3.4	按故障率和设计特性的加权因子分配法	168
5.3.5	相似产品分配法	170
5.3.6	按固有可用度和单元复杂度的加权因子分配法	172
5.3.7	基于时间特性的维修性分配	173
5.3.8	其他分配方法	182
5.3.9	注意事项	183
5.4	维修性预计方法	184
5.4.1	概述	184
5.4.2	维修性预计的工作程序	187
5.4.3	推断法	188
5.4.4	单元对比预计法	191
5.4.5	时间累计预计法	195
5.4.6	注意事项	209
5.5	维修测试的综合权衡	210
5.5.1	测试设备的类型	211
5.5.2	各类测试设备的选择	211
5.5.3	自动测试设备与人控测试设备的对比权衡	212
5.5.4	综合权衡的主要范围	213
5.5.5	机内测试设备与便携式测试设备的比较	214
5.5.6	测试设备选择示例	215
	参考文献	217
第 6 章	维修性分析技术	219
6.1	概述	219
6.1.1	维修性分析的目的与意义	219
6.1.2	维修性分析的主要内容	220

6.2	故障模式、影响分析	221
6.2.1	概述	221
6.2.2	FMEA 在维修性分析中的应用	223
6.2.3	应用案例	227
6.3	维修性综合分析	227
6.3.1	以可用度为约束的综合分析	228
6.3.2	半定量综合分析技术	230
6.3.3	综合评分技术	232
6.4	区域维修性分析方法	233
6.4.1	概述	233
6.4.2	基于区域的维修性分析流程	233
6.4.3	分析因素细化	239
6.4.4	逻辑决断研究	240
6.5	维修性综合权衡示例——地地导弹再入器设计方案的分析 权衡	249
6.5.1	目的	249
6.5.2	原则与假设	249
6.5.3	备选方案	249
6.5.4	研究途径	249
6.5.5	结果	250
6.5.6	建议	251
6.6	注意事项	252
	参考文献	253
第7章	维修性试验与评价	254
7.1	概述	254
7.1.1	维修性试验与评价的目的	254
7.1.2	维修性试验与评价的时机与方式	254
7.1.3	维修性试验与评价的内容	255
7.2	维修性试验与评价的工作要求	256
7.2.1	工作程序	256
7.2.2	计划制订	260
7.2.3	管理要求	262
7.3	维修性统计试验与评价方法	263
7.3.1	方法概述	263

7.3.2	实施过程	263
7.3.3	应用示例	277
7.4	维修性演示试验与评价方法	283
7.4.1	方法概述	283
7.4.2	实施过程	283
7.5	注意事项	285
	参考文献	286
第8章	维修性虚拟试验与分析评价	287
8.1	概述	287
8.2	维修性虚拟试验与分析评价工作内容	289
8.2.1	概述	289
8.2.2	主要工作内容	289
8.2.3	实施步骤	291
8.3	维修性虚拟仿真建模	291
8.3.1	虚拟维修样机建模	291
8.3.2	虚拟维修场景建模	298
8.3.3	面向虚拟试验的维修过程建模	300
8.4	维修性虚拟仿真试验	302
8.4.1	概述	302
8.4.2	维修性静态虚拟仿真试验方法	303
8.4.3	维修性动态虚拟仿真试验方法	304
8.5	基于虚拟仿真试验的维修性分析评价	310
8.5.1	概述	310
8.5.2	虚拟维修分析评价方法	311
8.5.3	基于虚拟仿真试验的维修性核查	317
8.5.4	基于虚拟仿真试验的维修性综合分析评价	322
8.6	注意事项	338
	参考文献	339

第1章 绪 论

科学技术的高速发展以及装备使用要求的不断提高,装备复杂化与费用昂贵的局面越来越突出。面对各型功能繁多、组成复杂、技术先进的装备研制需求,更加需要应用系统工程的理念,以全系统、全过程和全特性观念进行快速有效的设计。

维修性是装备(系统)的基本属性之一,是与装备的维修密切相关的设计特性,反映了装备是否具备维修方便、快捷、经济的能力。当今,不论是精良的武器装备还是民用产品,维修问题处理不好,不仅可能导致经济的损失,而且还可能因为不能及时修复导致整个装备或产品使用效用的降低,甚至付出生命代价。良好的维修性设计是提高维修效率和质量的重要手段。

1.1 产 品 维 修

1.1.1 维修的概念与分类

不论人们愿意还是不愿意,要求装备达到100%可靠是不现实的。当装备出现故障或异常问题时,维修成为解决问题的基本办法与手段,是用户保持装备持续使用中无法回避的基本需求与工作内容。

维修是一种工程活动,即:产品或系统在使用过程中,维修人员为保持或恢复装备的可使用状态所进行的活动,如技术保养、修理、改进、翻修等。按照维修开展的时机和目的、方式,维修主要分为修复性维修、预防性维修、战场抢修/应急性维修和专门批准下的改进性维修。

1) 修复性维修

修复性维修指对发生了故障的产品进行修理,使其恢复到所规定的使用状态。人们日常生活中所谈论的维修通常就指的是修复性维修。修复性维修一般包括准备、故障定位与隔离、分解、更换、结合、调准及检测等活动内容。

2) 预防性维修

预防性维修指通过对产品的系统检查、检测和发现故障征兆以防止故障发生,使其保持在规定状态所进行的全部活动。通常是未出现故障下的处理工作,包括按工作时间或日历时间有计划地进行维修,以及产品工作前后的检测工作