

可靠性·维修性·保障性技术丛书 ③

丛书主编 王自力

RMS

可靠性 设计与分析

Reliability Design and Analysis

主编 曾声奎

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

可靠性设计与分析

Reliability Design and Analysis

主 编 曾声奎
副 主 编 冯 强
编写组成员 马纪明 任 羿
(按姓氏笔画排序) 孙 博 郭健彬

国防工业出版社

· 北京 ·

内 容 简 介

全书内容共分8章。首先介绍了可靠性设计分析基础,包括基本概念及设计分析流程等;然后介绍了可靠性要求以及可靠性分配、建模与预计技术,之后重点介绍了可靠性设计与分析方法;最后结合可靠性设计分析技术最新发展,介绍了故障物理方法、可靠性与性能一体化设计分析方法以及数字化设计环境下的可靠性设计分析技术。

本书可供从事型号研制的工程技术及管理人员阅读参考,亦可作为大专院校本科生和研究生的教学参考书。

图书在版编目(CIP)数据

可靠性设计与分析/曾声奎主编. —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 978-7-118-07284-6

I. ①可... II. ①曾... III. ①可靠性工程 IV. ①TB114.3

中国版本图书馆CIP数据核字(2011)第053612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26 字数462千字

2011年4月第1版第1次印刷 印数1—4000册 定价65.00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 铤	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	

Preface 序

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

Preface 前言

可靠性工程是与产品故障作斗争的一门科学技术,它包括了为确定和达到产品可靠性要求所进行的一系列技术与管理活动。其实质是研究产品全寿命周期中故障的发生、发展规律和预防、控制方法,达到预防故障发生,消减故障后果、提高产品可靠性的目的。

可靠性工程技术于 20 世纪 50 年代率先在美国产生,我国从 20 世纪 60 年代起在电子工业部门进行了可靠性工程技术的开拓性工作。进入 20 世纪 80 年代后,我国可靠性事业得到迅猛发展,颁布了一系列的可靠性工程技术标准和管理规定,可靠性共性技术领域的众多关键技术不断得到突破,形成了较为完善配套的技术体系,并开始在现代武器装备等大型工程型号的研制中全面推行,我国工程型号的可靠性工作逐渐走上了规范化的发展轨道。

但同时应看到,在我国工程型号研制可靠性工作中,重试验、轻设计的现象依然存在,可靠性设计分析工作还不够深入和系统。可靠性设计分析的技术成果与成功经验还需要总结和推广,国内外涌现的新技术和新方法,也还没有被型号设计人员熟知并使用。本书编写的目的是通过总结工程经验、补充有效新方法,为型号研制的技术和管理人员提供一本较为完整、适用性强的可靠性设计与分析技术工具书,以期提升型号研制人员的可靠性设计与分析能力。

本书共分 8 章。第 1 章结合现代设计思想的转变,论述了可靠性技术的发展现状、趋势与需求,并介绍了可靠性基本概念、设计分析流程及主要内容。第 2 章介绍了可靠性的三类要求(定性要求、定量要求以及工作项目要求)以及可靠性定量要求的分配方法。第 3 章重点介绍了可靠性建模与预计方法。第 4 章与第 5 章是本书的重点,较为全面地介绍了成熟的可靠性设计与分析方法,阐述了这些方法的内涵、步骤与注意事项等。第 6 章至第 8 章介绍了较为前沿的可靠性设计分析技术,其中,第 6 章对故障物理方法的基本思想,主要故障机理、模

型以及应用进行了论述。第7章重点阐述了系统可靠性与性能一体化设计的概念、基本流程与方法,并结合典型案例进行了说明。第8章结合产品数字化设计发展,对数字化环境下的可靠性设计分析技术进行了论述。

参与本书编写工作的有冯强(第1章,4.1节,4.2节,4.8节,5.1节,5.4节,第8章)、任羿(第3章,5.2节,5.3节)、孙博(第2章,4.7节,4.9节,5.6节,5.7节,第6章)、郭健彬(4.6节,5.5节,7.1节,7.2节)、马纪明(4.3节,4.4节,4.5节,7.3节),全书由曾声奎主编,冯强副主编,屠庆慈和曾曼成主审。

本书以硬件产品可靠性为主,软件可靠性工作可以参见《可靠性·维修性·保障性丛书》的第六册《软件可靠性工程》。本书可供型号各类产品的设计人员,可靠性工程专业技术人员等学习和参考。与型号可靠性工作有关的各级管理人员,如型号质量师系统和可靠性工作系统的有关人员可参考使用,大专院校的本科生和研究生也可参考使用。

由于水平有限,错误之处在所难免,望读者指正。

编者

2010年10月

Contents 目录

第 1 章 可靠性设计分析基础	1
1.1 引言	1
1.1.1 现代设计思想转变	2
1.1.2 可靠性与性能综合设计	5
1.2 可靠性的基本概念	6
1.2.1 产品与环境	6
1.2.2 可靠性与故障	7
1.2.3 寿命剖面与任务剖面	9
1.2.4 任务可靠性与基本可靠性	12
1.2.5 固有可靠性与使用可靠性	12
1.2.6 耐久性与寿命分布	12
1.3 可靠性的参数及指标	14
1.3.1 可靠性及其度量	14
1.3.2 故障率与浴盆曲线	16
1.3.3 平均故障前时间与平均故障间隔时间	18
1.3.4 可靠性参数分类	20
1.3.5 常用可靠性参数	21
1.3.6 可靠性参数间的相关性	21
1.3.7 可靠性参数指标的特点	22
1.4 可靠性的设计分析流程	23
1.4.1 系统工程过程概述	23
1.4.2 可靠性设计分析流程	26
1.4.3 可靠性设计分析的主要内容	30
第 2 章 可靠性要求与分配	33
2.1 可靠性要求	33
2.1.1 可靠性定性要求	33
2.1.2 可靠性定量要求	34

2.1.3	可靠性工作项目要求	35
2.2	可靠性分配	37
2.2.1	可靠性分配的目的	37
2.2.2	可靠性分配的原理和准则	38
2.2.3	无约束条件的产品可靠性分配方法	38
2.2.4	有约束条件的产品任务可靠性分配方法	54
2.2.5	可靠性分配方法的选择	56
2.2.6	应用示例	57
2.2.7	进行可靠性分配时的注意事项	62
第3章	可靠性建模与预计	64
3.1	可靠性建模	64
3.1.1	可靠性建模的目的	64
3.1.2	可靠性模型分类	64
3.1.3	典型可靠性模型	66
3.1.4	系统可靠性模型的建立与方法选择原则	89
3.1.5	示例	94
3.2	可靠性预计	96
3.2.1	可靠性预计的目的及其与分配、建模的关系	96
3.2.2	单元可靠性预计	98
3.2.3	系统可靠性预计	102
3.2.4	研制阶段不同时期可靠性预计方法的选取	108
3.2.5	示例	109
3.2.6	进行可靠性预计时的注意事项	111
第4章	可靠性设计方法	113
4.1	概述	113
4.2	制定和贯彻可靠性设计准则	114
4.2.1	概述	114
4.2.2	可靠性设计准则制定	115
4.2.3	可靠性准则贯彻程序及符合性检查报告	120
4.3	简化设计	122
4.3.1	概述	122
4.3.2	简化设计的基本原则与主要技术	122
4.3.3	简化设计的形式和基本步骤	123
4.3.4	示例	123
4.4	余度设计	124

4.4.1	概述	124
4.4.2	余度设计的基本原则与主要技术	129
4.4.3	余度设计的基本步骤	134
4.4.4	示例	136
4.4.5	注意事项	139
4.5	容错设计	139
4.5.1	概述	139
4.5.2	容错技术包含的内容与主要实现方法	140
4.5.3	容错设计的基本步骤	151
4.5.4	典型容错系统	152
4.5.5	示例	155
4.5.6	注意事项	157
4.6	降额设计与裕度设计	157
4.6.1	概述	157
4.6.2	降额设计	158
4.6.3	裕度设计	163
4.6.4	注意事项	165
4.7	热设计与热分析	165
4.7.1	概述	165
4.7.2	热设计	166
4.7.3	热分析	175
4.7.4	注意事项	178
4.8	环境保护设计	179
4.8.1	概述	179
4.8.2	环境保护设计的基本原则	183
4.8.3	环境保护设计的基本步骤	193
4.9	元器件、零部件和原材料的选择与控制	193
4.9.1	概述	193
4.9.2	电子元器件的选择与控制	194
4.9.3	零部件和原材料的选择与控制	200
4.9.4	注意事项	202
第5章	可靠性分析方法	203
5.1	故障模式影响及危害性分析	203
5.1.1	概述	203
5.1.2	故障模式及影响分析	205

5.1.3	危害性分析	212
5.1.4	FMECA 结果	218
5.1.5	FMECA 示例	218
5.1.6	FMECA 中的注意事项	221
5.2	故障树分析	225
5.2.1	概述	225
5.2.2	故障树建立	226
5.2.3	静态故障树的定性分析	230
5.2.4	静态故障树的定量计算	234
5.2.5	动态故障树的分析方法	242
5.2.6	示例	244
5.3	GO 法	246
5.3.1	概述	246
5.3.2	GO 法基本概念和建模过程	248
5.3.3	GO 法分析	250
5.3.4	GO 法分析示例	261
5.3.5	GO 法分析的注意事项	265
5.4	潜在通路分析	267
5.4.1	概述	267
5.4.2	潜在通路的产生原因及主要表现形式	267
5.4.3	潜在通路分析方法	268
5.4.4	潜在通路分析程序	271
5.4.5	示例	276
5.4.6	潜在通路分析的注意事项	278
5.5	电路容差分析	279
5.5.1	概述	279
5.5.2	容差分析方法	279
5.5.3	容差分析的流程	289
5.5.4	容差分析的注意事项	290
5.6	耐久性分析	291
5.6.1	概述	291
5.6.2	耐久性分析的基本步骤	292
5.6.3	常用的耐久性分析模型和方法	293
5.6.4	航空设备和主要部件的定、延寿分析	295
5.6.5	示例	297

5.6.6	持久性分析的注意事项	298
5.7	有限元方法及其在可靠性分析中的应用	298
5.7.1	有限元方法的基本概念	299
5.7.2	有限元分析的基本过程	301
5.7.3	有限元方法的应用	303
5.7.4	有限元分析的应用示例	307
5.7.5	有限元分析的软件工具	311
5.7.6	有限元分析的注意事项	311
第6章	可靠性的故障物理方法	313
6.1	故障物理方法的基本思想和概念	313
6.1.1	概述	313
6.1.2	故障机理及分类	314
6.1.3	环境载荷及应力分析	316
6.1.4	故障机理模型	318
6.2	故障物理方法的应用	330
6.2.1	基于故障机理模型的可靠性预计与寿命评估	330
6.2.2	其他方面的应用	337
6.3	故障预测与健康管理(PHM)	341
6.3.1	PHM的基本概念和方法	341
6.3.2	基于故障机理模型的电子产品故障预测	347
第7章	系统可靠性与性能一体化设计	355
7.1	一体化设计简介	355
7.1.1	问题与解决思路	355
7.1.2	技术内涵	356
7.2	一体化设计基本方法和流程	357
7.2.1	基本原理与方法	357
7.2.2	实施流程	361
7.2.3	技术特点	362
7.3	典型产品可靠性与性能一体化设计	363
7.3.1	舵机系统介绍	363
7.3.2	舵机一体化设计方案	365
7.3.3	舵机一体化设计流程实现	366
7.3.4	注意事项	376
第8章	数字化环境中的可靠性设计分析	377
8.1	计算机辅助可靠性设计与分析的发展	377

8.1.1	产品数字化开发环境	377
8.1.2	计算机辅助可靠性设计与分析	379
8.2	基于 PLM 的可靠性设计与分析集成平台	381
8.2.1	集成平台的体系结构	381
8.2.2	集成平台的物理视图	383
8.2.3	集成平台的功能视图	384
8.2.4	集成平台的运行剖面	386
8.2.5	集成平台的实施过程	387
8.3	典型数字化环境中的可靠性设计与分析示例	394
8.3.1	典型应用场景	394
8.3.2	典型数字化环境中的可靠性设计分析过程	395
参考文献		399

第 1 章 可靠性设计分析基础

1.1 引 言

可靠性是指产品在规定条件下和规定的时间内,完成规定功能的能力。产品的可靠性与产品整个寿命周期内的全部可靠性活动有关,是为了达到产品的可靠性要求而进行的有关可靠性设计分析、试验和生产使用等一系列工作的综合作用结果。从论证、方案阶段开始直到系统退役等整个寿命周期内,均需要开展一系列的可靠性工作。

产品的可靠性是设计出来的、生产出来的、管理出来的。国内外开展可靠性工作的经验表明,可靠性设计对产品可靠性具有重要影响,要提高产品的可靠性,关键在于做好产品的可靠性设计和分析工作。把可靠性工程的重点放在设计阶段的原因,主要包括以下几方面。

(1) 设计保证了产品的固有可靠性。产品的固有可靠性是产品固有特性之一。产品一旦完成设计,并按设计要求被制造出来,其固有可靠性就已经完全被确定了。对产品可靠性起决定作用的是设计过程,制造过程主要是实现设计过程所形成的固有可靠性,使用和维护过程是保持获得的固有可靠性。如果在设计阶段没有认真考虑其可靠性问题,如产品设计的鲁棒性、设计裕度和余度考虑不足,以及元器件原材料选用不当等,那么无论怎样精心制造、严格管理、合理使用,也难以实现高的可靠性要求。

(2) 现代科学技术迅速发展,同类产品之间竞争激烈。产品被淘汰的速度日益加快,因而要求新产品研制周期要短,质量要好,设计时如果不认真考虑可靠性要求,等到试制、试用后发现严重问题,再来改进设计,必然推迟产品投入市场的周期,提高产品的价格,降低竞争力。

(3) 在设计阶段采取措施提高产品可靠性的耗资最少,效果显著。据美国诺斯罗普公司估计,在研制阶段为改善可靠性与维修性所花费的每 1 美元,将可在以后的使用和保障费用方面节省 30 美元。

可靠性设计与分析是可靠性工程的重点与核心工作,其目的是挖掘与确定产品潜在的隐患和薄弱环节,并通过设计预防与改进,有效地消除隐患和薄弱环节,从而提高产品可靠性水平,满足产品可靠性要求。可靠性设计分析工作必须

遵循预防为主,早期投入的方针。必须从产品方案阶段就开展可靠性设计与分析工作,尽可能把不可靠的因素消除在设计过程早期。在设计过程中,要努力认识故障发生规律,防止故障发生及其影响的扩展,同时也要把发现和纠正可靠性设计方面的缺陷作为工作重点。通过采用成熟设计和行之有效的可靠性设计分析技术,保证和提高产品的固有可靠性。

本书主要涉及可靠性设计分析技术,可靠性管理可参见《可靠性·维修性·保障性技术丛书》第一册,可靠性试验技术可参见《可靠性·维修性·保障性技术丛书》第四册。

1.1.1 现代设计思想转变

现代质量观念认为,质量包含了产品的专用特性、通用特性、经济性、时间性、适应性等方面,它是产品满足使用要求的特性总称(图 1-1)。产品的专用特性,可以用性能参数与指标来描述,如发动机的输出功率,因不同的装备而有所差异。产品的通用特性,描述了产品保持规定的功能和性能指标要求的能力,它包括产品的可靠性、维修性、保障性、安全性、测试性等,如发动机能连续工作若干小时并保证在此期间输出功率不低于规定的值。通用特性对各类产品来说基本是通用的。经济性即产品的寿命周期费用,指在产品的整个寿命期内,为获取并维持产品的运营所花费的总费用。时间性指的是产品能否按期研制交付,它也影响产品的寿命周期费用(费用的时间性)。适应性反映了产品满足用户需求、符合市场需要的能力。

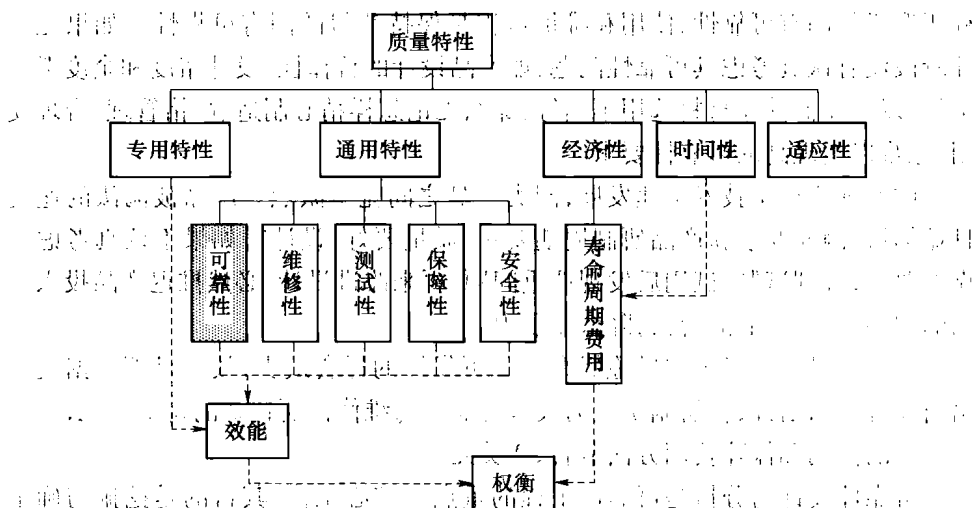


图 1-1 专用特性、通用特性及其优化权衡

随着现代工程产品的复杂化,产品的通用特性显得更加重要。例如:①工程产品日益庞大和复杂,带来了产品可靠性和安全性的下降,投资增大,研发周期加长,风险增加。②工程产品的应用环境更加复杂和恶劣。从陆地、海洋到天空、太空,工程产品的使用环境不断地扩展和更加严酷。严酷的环境对产品高可靠性、高安全性等综合特性的实现提出了挑战。③产品要求的持续无故障任务时间加长。如太空探测器的长时间无故障飞行要求、通信网络的关键任务不停机要求等,迫使工程产品必须具有良好的可靠性、维修性等通用特性。④产品的通用特性与使用者的生命安全直接相关。如核能产品、飞机、载人航天器、高速列车等的可靠与安全是生命安全的基本保证,受到了强烈的关注。⑤市场竞争的影响。“性能优良、功能齐全”并不是用户选择产品时考虑的唯一因素,产品是否可靠、是否好修、使用维护保养费用多少、寿命多长都对用户的选择产生重要影响。对于产品的研究开发者来说,总是希望投资少、周期短、研发一次成功,这也与产品的通用特性密切相关。

从主要追求产品的专用特性,到兼顾、重视产品的通用特性,以及在有限的资源(费用、时间等)的约束下,实现产品的专用特性与通用特性的优化平衡,体现了现代产品设计思想的转变,它带来了观念的更新,对产品设计实现的影响是巨大的。

产品的专用特性、通用特性及其优化权衡关系如图 1-1 所示。从图中可以看出,产品优化权衡的核心是效能、寿命周期费用两个要求之间的权衡。下面先简要介绍这两个概念。

(1) 系统效能是一个系统在规定的条件下和规定的时间内,满足一组特定任务要求的程度。它与可用性、任务成功性和固有能力强有关,一般可表示为:

$$E = A \cdot D \cdot C \quad (1-1)$$

式中: E 为效能(Effectiveness); A 为可用性(Availability); D 为任务成功性(Dependability); C 为固有能力强(Capability)。

可用性(A)表示战备完好,是产品在任一时刻需要和开始执行任务时,处于可工作或可使用状态的程度。可用性的概率度量称可用度,亦即系统“开则能动”的能力。它是系统可靠性(R)和维修性(M ,含保障性、测试性等)的函数,即 $A = f(R, M)$ 。

任务成功性(D)是装备在任务开始时处于可用状态的情况下,在规定的任务剖面①中的任一(随机)时刻,能够使用且能完成规定功能的能力,即系统“动

① 任务剖面:产品在完成规定任务这段时间内所经历的事件和环境的时序描述。