

工程装备可靠性设计

安立周 张晓南 马昭烨 雷增宏 编著



冶金工业出版社
www.cnmp.com.cn

工程装备可靠性设计

安立周 张晓南 马昭烨 雷增宏 编著



北 京

冶 金 工 业 出 版 社

2018

内 容 简 介

本书系统地介绍了工程装备可靠性设计的基本概念和基本内容,结合工程装备的特点和可靠性设计工作的具体需求,较详细地论述了工程装备可靠性设计流程、可靠性分析、可靠性分配与预计、可靠性增长、可靠性试验与评估等有关技术和方法。具体内容包括:工程装备可靠性设计的内涵及并行可靠性设计流程的关键技术;可靠性参数指标的参数构成和确定方法及其数据需求;工程装备可靠性建模的基本理论、基本模型;工程装备可靠性分析方法;工程装备可靠性分配方法;工程装备可靠性预计方法;工程装备可靠性增长措施及模型;工程装备可靠性试验与评估方法等。

本书可作为高等院校相关专业的本科和研究生的教学用书或军队院校专业基础课教材,也可供大型繁杂装备的设计和研发人员培训或自学参考阅读。

图书在版编目(CIP)数据

工程装备可靠性设计/安立周等编著. —北京:
冶金工业出版社, 2018. 7

ISBN 978-7-5024-7825-4

I. ①工… II. ①安… III. ①工程设备—可靠性
设计 IV. ①TB114. 35

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2018)第 129353 号

出 版 人 谭学余

地 址 北京市东城区嵩祝院北巷 39 号 邮编 100009 电话 (010)64027926

网 址 www.cnmp. com. cn 电子信箱 yjcs@cnmp. com. cn

责任编辑 程志宏 王梦梦 美术编辑 吕欣童 版式设计 禹蕊

责任校对 李娜 责任印制 李玉山

ISBN 978-7-5024-7825-4

冶金工业出版社出版发行;各地新华书店经销;三河市双峰印刷装订有限公司印刷
2018 年 7 月第 1 版, 2018 年 7 月第 1 次印刷

787mm × 1092mm 1/16; 12. 25 印张; 298 千字; 188 页

45. 00 元

冶金工业出版社 投稿电话 (010)64027932 投稿信箱 tougao@cnmp. com. cn

冶金工业出版社营销中心 电话 (010)64044283 传真 (010)64027893

冶金书店 地址 北京市东四西大街 46 号(100010) 电话 (010)65289081(兼传真)

冶金工业出版社天猫旗舰店 yjgycbs. tmall. com

(本书如有印装质量问题,本社营销中心负责退换)

前 言

20 世纪 50 年代可靠性技术开始形成一门学科,此后经过数十年的研究,可靠性技术才逐渐成熟起来,并继续向着更深、更广的方向发展。我国对可靠性问题研究起步较晚,但近十多年来得到了充分的重视并发展较快,在理论研究方面取得了一定的成果。但在实际应用方面还存在不足,在可靠性设计技术和应用方面尚有许多工作要做。由国防科工委组织我国可靠性专家、学者编著的《可靠性、维修性、保障性丛书》是我国第一部可靠性巨著,它从理论、方法上对可靠性技术作了系统的论述,对促进我国可靠性工程的普及、发展和应用奠定了坚实的基础。为了方便从事工程装备研制、生产和使用的科技工作者学习参考,结合《电工术语 可信性与服务质量》(GB/T 2900.13—2008)、《可靠性试验 第 1 部分:试验条件和统计检验原理》(GB/T 5080.1—2012)和《装备可靠性工作通用要求》(GJB 450A—2004),同时还参考了国内外可靠性文献,我们编写了《工程装备可靠性设计》一书。

工程装备在遂行工程保障及国防工程施工任务中起到重要的作用,其发展水平直接制约着我军工程保障的能力。工程装备的可靠性是装备质量的重要指标,是装备形成战斗力的前提条件,也是提高装备战斗力的倍增器。可靠性与其他战术、技术指标一样,是工程装备的固有性能,主要取决于设备的设计阶段。而现行的可靠性设计理论和方法主要还停留在传统的可靠性研究基础上,缺乏系统性、针对性和实用性,难以对工程装备型号研制起到应有的作用。目前国内还鲜有针对工程装备可靠性设计方面的著作,所以,本书的出版将为工程装备可靠性设计提供系统理论和实用方法,同时也可作为武器装备的可靠性设计提供参考。

本书共分 8 章,第 1 章介绍可靠性的概念、可靠性设计的重要性及国内外装备可靠性设计的发展现状;第 2 章介绍工程装备可靠性设计的内涵、工程装备并行可靠性设计流程的关键技术和可靠性参数指标的参数构成、确定方法及其数据需求;第 3 章介绍工程装备可靠性建模的基本理论、基本模型,并着重介绍了相关性可靠性模型;第 4 章介绍工程装备可靠性分析方法;第 5 章介绍工程装备可靠性分配方法;第 6 章介绍工程装备可靠性预计方法,并用实例验

证；第7章介绍工程装备可靠性增长措施及模型；第8章介绍工程装备可靠性试验与评估方法。全书内容紧密结合工程装备可靠性设计的实际需求，注重可靠性设计的工程性以及各种可靠性设计方法在工程装备研发设计中的应用。全书体例结构合理，语言通俗易懂，便于自学。

参加本书编著的人员包括：安立周（第1章、第2章）；安立周及雷增宏（69006部队装备技术室，第3章、第4章）；马昭烨（第5章、第6章）；张晓南（第7章、第8章）。全书由安立周、张晓南负责统稿。

本书在编写的过程中，参考了相关院校的讲义、教材以及专著和论文等，这些文献对本书的最终成书提供了有益的帮助，作者谨对文献作者表示衷心的感谢，同时对杨小强教授、王海涛教授对本书出版给予的指导和支持以及白攀峰、何山、田奥克等同志在本书编写过程中所做的工作表示感谢，对帮助和支持本书出版的领导和同事以及方方面面的朋友一并表示感谢，对疏漏未提及的单位和个人致以诚挚歉意，感谢大家对工程装备可靠性设计技术应用与发展作出的贡献！

由于编者水平所限，书中内容中的缺点和错误，敬请专家及广大读者批评指正。

编著者

2018年3月

目 录

第1章 绪论	1
1.1 可靠性概述	1
1.1.1 可靠性研究进展概况	1
1.1.2 可靠性的定义与分类	2
1.1.3 可靠性技术的发展	4
1.1.4 可靠性工程与可靠性设计	5
1.2 装备可靠性设计研究现状	7
1.2.1 外军装备可靠性设计现状	7
1.2.2 我军装备可靠性设计现状	8
第2章 工程装备可靠性设计理论	10
2.1 工程装备可靠性设计	10
2.1.1 工程装备可靠性的概念	10
2.1.2 工程装备可靠性设计的特点	11
2.1.3 工程装备可靠性设计的意义	12
2.2 工程装备并行可靠性设计流程	14
2.2.1 串行可靠性设计与并行可靠性设计	14
2.2.2 工程装备并行可靠性设计的关键技术	18
2.2.3 工程装备并行可靠性设计的工程环境分析	20
2.2.4 工程装备并行可靠性设计流程模型	22
2.3 工程装备可靠性参数指标	23
2.3.1 可靠性的基本参数及关系	23
2.3.2 工程装备可靠性参数选择原则	26
2.3.3 工程装备可靠性参数构成	26
2.3.4 工程装备可靠性参数指标确定	29
2.3.5 可靠性参数指标的数据需求	31
第3章 工程装备可靠性模型	33
3.1 工程装备可靠性建模的基本理论及特点	33
3.1.1 工程装备可靠性建模的基本理论	33
3.1.2 工程装备可靠性的特点	34
3.2 工程装备可靠性基本模型	35
3.2.1 串联系统模型	35

3.2.2 并联系统模型	36
3.2.3 混联系统模型	37
3.2.4 表决系统模型	37
3.3 工程装备相关性可靠性模型	38
3.3.1 相关性可靠性模型研究现状	38
3.3.2 变量相关性可靠性模型	44
3.3.3 零件相关性的研究	46
3.3.4 多失效模式相关性的研究	48
第4章 工程装备可靠性分析	52
4.1 传统可靠性分析方法	53
4.1.1 可靠性框图法 (RBD)	53
4.1.2 故障模式与影响分析法 (FMECA)	53
4.1.3 故障树分析方法 (FTA)	54
4.1.4 GO 法	55
4.1.5 疲劳可靠性分析 (FRA)	55
4.2 工程装备组成结构及功能分析	56
4.2.1 功能分析	56
4.2.2 功能建模	58
4.2.3 组成结构分析	60
4.3 工程装备整机系统的可靠性分析	65
4.3.1 可靠性框图的建立	65
4.3.2 基于模糊数学理论的可靠性分析	67
4.4 发动机子系统的可靠性分析	71
4.4.1 Vague 故障树模型	72
4.4.2 实例分析	74
4.5 液压子系统可靠性分析	78
4.5.1 GO 法原理	78
4.5.2 液压操纵系统结构分析	80
4.5.3 可靠性分析	80
4.6 工作装置可靠性分析	83
4.6.1 工作装置的强度可靠性分析	84
4.6.2 基于局部应力应变法的疲劳寿命分析	86
4.6.3 基于响应面法的疲劳可靠度分析	90
第5章 工程装备可靠性分配	94
5.1 可靠性分配概述	94
5.1.1 可靠性分配的内涵	94
5.1.2 工程装备可靠性分配指标	95

5.1.3 可靠性分配方法研究现状	95
5.2 传统可靠性分配方法	96
5.2.1 等分配方法	96
5.2.2 按预计失效率 (或故障率) 的分配方法	96
5.2.3 按预计失效率 (或故障率) 和重要度的分配方法	96
5.2.4 AGREE 分配方法	97
5.3 工程装备可靠性分配的特点及对策	98
5.3.1 工程装备可靠性分配的特点分析	98
5.3.2 工程装备可靠性分配的对策分析	98
5.4 工程装备层次可靠性分配方法	99
5.4.1 结构层次分析	99
5.4.2 一级可靠度分配	101
5.4.3 二级可靠度分配	103
5.4.4 三级可靠度分配	108
5.4.5 四级可靠度分配	111
第 6 章 工程装备可靠性预计	112
6.1 可靠性预计概述	112
6.1.1 可靠性预计的分类与目的	112
6.1.2 可靠性预计的基本过程	113
6.1.3 可靠性分配与可靠性预计的关系	114
6.2 传统可靠性预计方法	114
6.2.1 总体方案论证阶段	115
6.2.2 初步设计阶段	115
6.2.3 详细设计阶段	117
6.3 工程装备可靠性预计的难点与对策分析	118
6.3.1 难点分析	118
6.3.2 对策分析	119
6.4 基于优化 GA-BP 的工程装备可靠性预计模型	120
6.4.1 传统 BP 特点及优化策略	120
6.4.2 BP 网络结构选择	121
6.4.3 BP 网络泛化能力优化方法	122
6.4.4 BP 网络权值和阈值修正推导	122
6.4.5 减小 BP 网络训练波动方法	125
6.4.6 BP 网络训练效率优化方法	126
6.4.7 GA 优化 BP 网络权值方法	126
6.4.8 GA-BP 预测模型基本流程	129

6.5 实例分析	130
6.5.1 基于优化 GA-BP 的电气系统的可靠性预计模型	130
6.5.2 仿真结果分析	131
第7章 工程装备可靠性增长	135
7.1 概述	135
7.1.1 可靠性增长的相关概念	135
7.1.2 可靠性增长的意义与作用	136
7.1.3 可靠性增长的发展现状	137
7.2 工程装备可靠性增长措施研究	138
7.2.1 工程装备故障模式影响及危害性分析 (FMECA)	139
7.2.2 早期故障分析与改进措施	142
7.3 工程装备可靠性增长模型研究	143
7.3.1 AMSAA 经典模型	144
7.3.2 AMSAA 模型的 Bayes 估计	145
7.3.3 Gibbs 抽样	147
7.3.4 实例分析	150
第8章 工程装备可靠性试验与评估	154
8.1 概述	154
8.1.1 可靠性试验内涵、目的及内容	154
8.1.2 可靠性评估的内涵与意义	158
8.2 工程装备可靠性试验与评估的难点与对策分析	159
8.2.1 工程装备可靠性试验与评估的难点	159
8.2.2 工程装备可靠性试验与评估的对策分析	159
8.3 基于 Bayes 理论的工程装备可靠性评估方法	163
8.3.1 单元可靠性评估	163
8.3.2 典型单元可靠性的确定	167
8.3.3 系统可靠性评估	174
附录 军用装载机系统 FMECA 分析表	177
参考文献	188

第 1 章 绪 论

1.1 可靠性概述

1.1.1 可靠性研究进展概况

作为衡量产品质量的一个重要指标,可靠性早已不是一个新的概念。长期以来,一切重视产品信誉的厂家,为了争取顾客都在追求其产品具有好的可靠性。因为只有那些可靠性好的产品,才能长期发挥其使用性能而受到用户的欢迎。不仅如此,有些产品如汽车、轮船和飞机,如果其关键零部件不可靠,不仅会给用户带来不便,而且耽误时间、推迟日程,造成经济损失,甚至还可能直接危及使用者的生命安全。像美国“挑战者”号航天飞机、苏联切尔诺贝利核电站等发生的可靠性事故所引起的严重后果,都足以说明产品的可靠性差会引起一系列严重问题,甚至会危及国家的荣誉和安全。而 1957 年苏联第一颗人造卫星升天,1969 年美国阿波罗 11 号宇宙飞船载人登月等可靠性技术成功的典范,不仅为其国家带来荣耀,而且说明了高科技的发展要以可靠性技术为基础,科学技术的发展又要求高的可靠性。

人们早期对“可靠性”这一概念仅仅从定性方面去理解,而没有数值量度。为了更好地表达可靠性的准确含义,不能仅以定性的方法来评价它,而应有定量的尺度去衡量它。在第二次世界大战后期,德国火箭专家 R. Lusser 首先提出用概率乘积法则,将系统的可靠度看成是其各子系统的可靠度乘积,从而算得 V-II 型火箭诱导装置的可靠度为 75%,首次定量地表达了产品的可靠性。直到 20 世纪 50 年代初期开始,在可靠性的测定中更多地引进了统计方法和概率概念以后,定量的可靠性得到广泛应用,可靠性问题才作为一门新的学科被系统地加以研究。

美国对可靠性的研究始于第二次世界大战。当时雷达系统虽发展很快而电子元件却屡出故障。因此,早期的可靠性研究重点放在故障占大半的电子管方面。不仅重视其电气性能,而且重视其耐震、耐冲击等可靠性方面。

美国对机械可靠性的研究始于 20 世纪 60 年代初期,其发展与航天计划有关。当时在航天方面由于机械故障引起的事故多、损失大,于是美国宇航局(NASA)从 1965 年开始进行机械可靠性研究。例如,用超载负荷进行机械产品的可靠性试验验证;在随机动载荷下研究机械结构和零件的可靠性;将预先给定的可靠度目标值直接落实到应力分布和强度分布都随时间变化的机械零件的设计中去等。

日本 1956 年从美国引进可靠性技术。日本将可靠性技术推广应用到民用工业部门,取得很大成功,大大地提高了其产品的可靠度,使其高可靠性产品(例如汽车、彩电、照相机、收录机、电冰箱等)畅销到全世界,带来巨大的经济效益。日本人曾预见到今后产品竞争的焦点就在于可靠性。

英国于 1962 年出版了《可靠性与微电子学》(Reliability and Microelectronics)杂志。

法国国立通讯研究所也在这一年成立了“可靠性中心”，进行数据的收集与分析，并于1963年出版了《可靠性》杂志。苏联在20世纪50年代就开始了可靠性理论及应用的研究，1964年，当时苏联及东欧各国在匈牙利召开了第一届可靠性学术会议。

国际电子技术委员会（IEC）于1965年设立了可靠性技术委员会，1977年又改名为可靠性与可维修性技术委员会。它对可靠性方面的定义、用语、书写方法、可靠性管理、数据收集等，进行了国际间的协调工作。

20世纪60年代以来，空间科学和宇航技术的发展提高了可靠性研究的水平，扩展了其研究范围。对可靠性的研究，已经由电子、航空、宇航、核能等尖端工业部门扩展到电机与电力系统、机械、动力、土木等一般产业部门，扩展到工业产品的各个领域。目前，提高产品的可靠性已经成为提高产品质量的关键。今后只有那些高可靠性产品及其企业，才能在日益激烈的竞争中幸存下来。不仅如此，国外还把对产品可靠性的研究工作提高到节约资源和能源的高度来认识。这不仅是因为高可靠性产品的使用期长，而且通过可靠性设计可以有效地利用材料，减少加工工时，获得体积小、重量轻的产品。

在我国，最早是由电子工业部门开始开展可靠性工作的，在20世纪60年代初期进行了有关可靠性评估的开拓性工作。至70年代初期，航天部门首先提出了电子元器件必须经过严格筛选的要求。70年代中期，由于中日海底电缆工程的需要，提出高可靠性元器件验证试验的研究，促进了我国可靠性数学的发展。从1984年开始，在国防科工委的统一领导下，结合中国国情并积极汲取国外的先进技术，组织制定了一系列关于可靠性的基础规定和标准。1985年10月国防科工委颁发的《航空技术装备寿命与可靠性工作暂行规定》，是我国航空工业的可靠性工程全面进入工程实践和系统发展阶段的一个标志。1987年5月，国务院、中央军委颁发《军工产品质量管理条例》明确了在产品研制中要运用可靠性技术；1987年12月和1988年3月先后颁布的国家军用标准《装备维修性工作通用要求》（GJB 368B—2009）和《装备可靠性工作通用要求》（GJB 450A—2004）。可以说是目前我国军工产品可靠性技术具有代表性的基础标准。

与此同时，各有关工业部门、军兵种越来越重视可靠性管理，加强可靠性信息数据和学术交流活动。全国军用电子设备可靠性数据交换网已经成立；全国性和专业系统性的各级可靠性学会相继成立，进一步促进了我国可靠性理论与工程研究的深入展开。

1.1.2 可靠性的定义与分类

1.1.2.1 可靠性的定义

最早的可靠性定义是由美国 AGREE 在 1957 年的报告中提出的。1966 年美国的 MIL-STD-721B 又较正规地给出了传统的或经典的可靠性定义，即“产品在规定的条件下和规定的时间内完成规定功能的能力”。它为各国的标准所引证，我国的 GB/T 2900.99—2016 给出的可靠性定义也与此相同。但在实际应用中已经感到了上述定义的局限性，因为它只反映了任务成功的能力。于是美国于 1980 年颁发的 MIL-STD-785B 将可靠性定义分为任务可靠性和基本可靠性两部分。任务可靠性的定义为“产品在规定的任务剖面内完成规定功能的能力”。它反映了产品在执行任务时成功的概率，只统计危及任务成功的致命故障。基本可靠性的定义为“产品在规定条件下，无故障的持续时间或概率”。它包括了全寿命单位的全部故障，能反映产品维修人力和后勤保障等要求。例如

MTBF (平均无故障间隔时间), MCBF (平均故障间隔的使用次数)。把可靠性概念分为两种不同用途是对可靠性工作实践经验的总结和对这一问题认识的深化,这无疑是一个新的重要发展。我国颁布的《可靠性维修保障性术语》(GJB 451A—2005)就引用这两种可靠性定义。

可靠性是指产品在规定条件下和规定时间内完成规定功能的能力。另外一种表述为产品在规定时期内、规定条件下可以执行任务并完成规定任务的可靠性(即概率)。这两种表述本质上是相同的。从定义中可以知道,它包含产品、规定条件、规定时间、规定功能和概率等五项因素。

产品指研究对象,是指作为单独研究和分别试验对象的任何元件、器件、设备或系统,可以表示产品的总体和样品等。根据产品的特性可以分为可修复和不可修复两种情况。由于研究对象的大小和复杂程度不同,不同产品的可靠性不同,研究的方法和内容也可能不同。在具体进行研究时,首先应当明确是哪种产品的可靠性,该产品包括哪些组成部分,还应指出是否包括人的使用和操作等因素在内,若不经特别指出,这些因素就不包括在研究之中。

规定条件包括使用时的环境条件(如温度、湿度、振动、冲击、辐射),使用时的应力条件、维护方法,贮存时的贮存条件以及使用时对操作人员技术等级的要求。在不同的规定条件下产品的可靠性是不同的。

规定时间是根据用户要求或设计目标确定的,表示产品发挥功能的有效时间。一般来说,产品的可靠性总是随着时间的增长而下降的,因此,这一要素对可靠性的衡量必不可少。另外,不同的产品对应的时间指标也不同,如火箭发射装置,可靠性对应的时间以秒计;海底通讯电缆则可以年计,而且这里的时间应看做是广义含义,即对某些产品也可用次数(如继电器的动作次数)、周期等来计算。

规定功能用产品的性能指标描述。在具体分析时,通过给出合理的故障(或失效)判断依据来确定产品是否完成规定功能。故障和失效是针对产品是否可修复而言,两者的许多定义和规律是一样的,一般不严格区分。

概率是对可靠性必需的定量规定或测度。对不可修复产品一般用可靠度来表示,对可修复产品一般用可用度表示。

如上所述,讨论产品的可靠性问题时,必须明确对象、使用条件、使用期限、规定的功能等因素,而用概率来度量产品的可靠性时就是产品的可靠度。可靠性定量表示的另一特点是其随机性。因此,广泛采用概率论和数理统计方法来对产品的可靠性进行定量计算。

1.1.2.2 可靠性的分类

在可靠性的研究过程中,因研究范围和研究内容的不同而有不同的分类。从研究任务上讲,可靠性可以分为基本可靠性和任务可靠性。基本可靠性是指产品在规定条件下无故障的持续时间和概率,它与产品的规定条件有关。任务可靠性是指产品在规定的任务剖面内完成规定功能的能力。

从研究内容上讲,可靠性可以分为固有可靠性和使用可靠性,两者共同组成工作可靠性。固有可靠性是指产品通过设计和制造形成的可靠性,是产品的固有属性。使用可靠性是指产品在广义的使用条件下(运输、保管、环境、操作和使用等),其固有可靠性发挥

的程度既受设计制造质量的影响,也受使用条件和人为因素的影响。工作可靠性是指产品在实际运行或工作中的可靠性,是一种综合性的可靠性指标。如果用 R_o 表示工作可靠度, R_i 表示固有可靠性, R_u 表示使用可靠性,则三者的关系可以近似表示如下:

$$R_o \approx R_i \times R_u$$

从研究范围上讲,可靠性又分为广义可靠性和狭义可靠性。狭义可靠性的定义符合一般可靠性的定义,由结构可靠性和性能可靠性组成。广义可靠性通常包括狭义可靠性和维修性两方面,常称为有效性,其中也包含了环境适应性等要求。狭义可靠性是以故障发生的难易程度作为考虑的出发点,而维修性则表示故障发生后修复的难易程度。狭义可靠性和维修性都是产品的固有属性,两者与有效性之间存在一定的内在联系。随着研究考虑范围的不断扩展,可靠性的分析已不仅包括硬件,人员可靠性、软件可靠性也开始占有越来越重要的地位。

结构可靠性是指在执行任务的过程中,结构上不出故障的可能性。

性能可靠性是指在执行任务的过程中,精度满足要求的可靠性。

维修性是指在规定条件下,使用的产品在规定的时间内按规定的程序和方法进行维修时,保存和恢复到能完成规定功能的能力。

有效性是指可以维修的产品在某时刻具有或维持规定功能的能力,也成为可用性。

人员可靠性是指系统在工作任何阶段,操作者在规定时间内成功完成规定作业的概率。

软件可靠性是指程序在规定条件下执行 n 次,不出故障的概率。

1.1.3 可靠性技术的发展

可靠性技术是20世纪40年代由美国科学家首先提出,50年代逐渐兴起和形成的。二战期间,美国空军由于飞机故障而损失的飞机达21000架,比被击落的多1.5倍;运往远东的作战飞机上的电子设备60%不能使用,在储备期间又有50%失效,这些情况引起了美国军方的重视。朝鲜战争期间,美国国防部成立了“电子设备可靠性咨询委员会(AGREE)”,对电子设备各个方面的可靠性进行全面调查,该委员会于1957年发表了“军用电子设备可靠性报告”,即“AGREE报告”,完整阐述了可靠性的理论基础和研究方法,这一报告被公认为电子产品可靠性理论和方法的奠基性文献。从此,可靠性成为一门独立的学科。

20世纪60年代是可靠性技术的全面发展阶段。60年代初期,由于航天工业的需要和产品不可靠造成的工业废品率高等情况,引起了苏联政府与有关部门的高度重视,从技术和管理上采取措施提高产品的可靠性,促进了可靠性技术的发展。同一时期,美国航空航天工业也迅速发展,美国国家航空航天管理局(NASA)和国防部接受了由AGREE报告发展起来的可靠性技术。

20世纪70年代,各种各样的电子设备或系统广泛应用于各科学技术领域、工业生产部门以及人们的日常生活中。电子设备的可靠性直接影响着生产效率以及系统、设备和人员安全,可靠性研究显得日益重要。同时,人们也开始对非电子设备(如机械设备)进行可靠性研究,重点解决电子设备可靠性设计及试验技术在非电子设备研究中的适用性问

题。在 20 世纪 70 年代, 计算机软件可靠性理论获得很大发展, 一方面提出了数十种软件可靠性模型, 另一方面是对软件容错的研究。

20 世纪 80 年代, 可靠性研究继续朝广度和深度发展, 中心内容是实现可靠性保证。1985 年, 美国军方提出在 2000 年实现“可靠性加倍, 维修时间减半”这一新的目标, 并开始实施。

20 世纪 80 年代初, 我国掀起了电子行业可靠性工程和管理的第一高潮。组织编写可靠性普及教材, 在原电子工业部内普遍开展可靠性教育, 组成了一批研究可靠性的骨干队伍。1984 年组建了全国统一的电子产品可靠性信息交换网, 并颁布了《电子设备可靠性预计手册》(GJB/Z 299C—2006), 有力地推动了我国电子产品可靠性的研究工作。同时还组织制定了一系列有关可靠性的国家标准、军用标准和专业标准, 将可靠性管理工作纳入标准化轨道。

20 世纪 90 年代初, 原机械电子工业部提出“以科技为先导, 以质量为主线”, 沿着“管起来—控制好—上水平”的发展模式开展可靠性工作, 兴起了我国第二次可靠性工作高潮, 取得了较大成绩。

海湾战争“沙漠风暴”行动和科索沃战争表明, 未来战争是高技术的较量。现代化技术装备, 由于采用了大量的高技术, 极大地提高了系统的复杂性, 为了保证战备的完好性、任务的成功性以及减少维修人员和费用, 可靠性技术范围将大大扩展, 需要更多的可靠性理论和方法作保证, 需要更加严密的可靠性管理系统, 可靠性研究需要上一个台阶。

1.1.4 可靠性工程与可靠性设计

1.1.4.1 可靠性工程

可靠性工程是指为了达到产品的可靠性要求而进行的有关设计、试验和生产等一系列工作。可靠性工程的基本任务是:

(1) 确定产品的可靠性。即通过对元器件、部件及系统的可靠性分析、预计、分配、评估及各种试验来确定产品的可靠性。

(2) 提高产品的可靠性。通过研制、生产及使用等各个环节的可靠性管理及可靠性技术工作, 提高产品的可靠性。

(3) 获得最佳的可靠性。即通过权衡对比研究, 在一定的性能、费用的条件下, 获得最高的可靠性; 能在一定的可靠性要求下, 获得最佳的性能和最少的费用。

可靠性工程是一门以概率论、统计学为基础, 与系统工程、环境工程、价值工程、运筹学、工程心理学、物理学、化学、质量控制技术、生产管理技术及计算机技术等学科密切相关的综合性学科。可靠性工程的核心是故障的反馈与控制。可靠性工程的一个突出特点在于管理与技术的高度结合, 即通过管理指导技术的合理应用, 确保可靠性目标的实现。

可靠性工程的中心内容是提高系统的效能、降低产品的寿命周期费用。实践已证明, 可靠性工程与系统整个寿命周期内的全部可靠性活动有关。从方案论证开始到系统报废为止的整个寿命周期内, 都要有计划地开展一系列可靠性工作。也就是说, 可靠性工程是一项系统工程。

实施可靠性工程的意义重大, 表现在保证产品可靠性的必要性和迫切性:

(1) 新产品的复杂化导致可靠性下降。随着工业技术的发展和实际需要,越来越多的产品,特别是军品向高性能、大型化和多功能的方向发展。因此产品日趋复杂,构成产品的元器件、零部件的品种和数量大幅度增加,同时产品各组成单元间的关系也越来越复杂,从而使整机发生故障的可能性增多。

(2) 产品使用环境的日益严酷引起产品可靠性的下降。如我国某工程船在驶往南极的途中,因低温致使焊缝开裂,面临了很危险的处境。其原因就是该船没能按南极的环境要求来设计、建造。

(3) 新技术、新材料和新工艺的仓促应用,易带来产品的可靠性下降。这是因为“三新”有一个逐步成熟的过程。

(4) 社会和对新产品的可靠性要求越来越高。

(5) 新产品维修费用的迅速增长,使用户迫切要求提高可靠性。高额的、难以预见的维修费用是用户的沉重负担。由上述可见,世界上许多国家高度重视可靠性是必然的。

美国军方人士就认为可靠性是武装力量的倍增器;日本人则断言:今后产品竞争的焦点就是可靠性。可靠性工程确实强烈地反映出历史的发展趋势。

1.1.4.2 可靠性设计

可靠性设计是可靠性工程的一个重要分支,因为产品的可靠性在很大程度上取决于设计的正确性。在可靠性设计中要规定可靠性和维修性的指标,并使其达到最优。根据多年来世界各国实施可靠性工程的经验,在产品的整个寿命期内,对可靠性起重大影响的是设计阶段。例如,美国海军电子实验室统计,引起产品出故障的原因中,因设计不当所致占40%;日本人对产品发生故障进行的调查结果表明,一半的故障是由于设计问题引起的;我国某研究所对该所以前研制的惯性导航设备的故障进行了分析,发现由于设计不当造成的故障占总故障的65.5%。其原因是设计决定了系统的固有可靠性。如果在系统的设计阶段未认真考虑可靠性问题,那么即使以后在制造、使用中多么严格、精心,也难以达到可靠性要求。因此可靠性工作必须从头抓起,从设计抓起。在设计过程一开始,就把可靠性要求注入到产品的设计中去,力争把潜在缺陷消灭在设计之中,消灭在萌芽状态,才能达到预防的目的,才能保证一次成功。因此,可靠性设计是可靠性工程的重点内容,是提高产品可靠性的根本途径。

可靠性设计是性能设计的保证。如果产品的可靠性差,那么产品的性能再高也没有多少实际意义,因此可靠性设计应至少具有性能设计的同等地位。另外,在设计阶段采取措施来提高产品的可靠性,会产生降低用户费用的显著作用。据美国诺斯洛普公司估计,在研制阶段为改善产品的可靠性所花费的1美元,将在以后使用和支持费用方面节省30美元。

可靠性设计的目的是实现合同规定的可靠性指标,在产品的性能、可靠性、费用等各方面的要求之间进行综合权衡,从而得到产品的最优设计。目前,我国舰船产品的设计任务书中不仅有明确的性能、费用指标,而且在许多新产品(主要是军品)的设计任务书中已有明确的可靠性指标。要设计出同时满足这些指标的产品难度往往相当大。在一般情况下,设计人员先搞出几个满足性能和费用要求的方案,然后再从可靠性角度予以评价,从中选出最优方案。若都没有满足可靠性要求,则可在允许的情况下,适当降低性能设计水平或多投入一些费用,其结果往往会使可靠性有一定程度的提高,满足指标要求。

1.2 装备可靠性设计研究现状

1.2.1 外军装备可靠性设计现状

20 世纪 40 年代, 由于各种复杂电子设备的相继出现, 电子设备的可靠性问题严重地影响着装备的效能。出于军事装备效能研究的目的, 美国首先在 1943 年成立了电子管研究委员会, 专门研究电子管的可靠性问题, 主要讨论采用新材料及工具、发展质量控制及检验统计技术来提高电子管可靠性的途径问题。20 世纪 50 年代, 为解决军用电子设备和复杂导弹系统的可靠性问题, 美国国防部于 1952 年成立了一个由军方、工业部门和学术界组成的电子设备可靠性咨询组, 开始有计划地从装备的设计、试验、生产和使用等全面地实施了一个可靠性发展计划, 并于 1957 年发表了《军事电子设备可靠性》的研究报告, 从此奠定了可靠性研究发展的基石, 标志着可靠性已成为一门独立的学科。20 世纪 60 年代, 在各种军事装备的设计研制过程中, 可靠性理论不断成熟, 特别是有关电子设备可靠性分析与设计、可靠性分配与设计、故障模式及影响分析、故障树分析、冗余设计、可靠性试验与鉴定、可靠性评估等理论和方法有了全面的发展。英、法、日及苏联等工业发达国家也都相继开展了可靠性的研究工作。20 世纪 70 年代后, 可靠性研究更加系统化, 不仅在可靠性设计与计算方面有进一步发展, 同时在可靠性政策、标准、手册的制定等方面也取得了进展。进入 20 世纪 80 年代以来, 可靠性研究向着更深、更广的方向发展。在技术上, 深入开展了机械可靠性、软件可靠性以及光电器件可靠性和微电子器件可靠性的研究, 全面推广了计算机辅助设计技术在可靠性领域的应用。同时积极采用模块化、综合化、容错设计、光导纤维和超高速集成电路等新技术来全面提高现代武器系统的可靠性。

国外可靠性设计技术研究成果对工程装备的发展产生了巨大的推动作用, 极大地提高了工程装备的战术技术性能和作战效能。美军的可靠性研究起步较早, 在工程装备产品可靠性理论方面, 以亚利桑那大学 D. Kececioglu 教授为首, 主要研究工程装备零部件的可靠性概率设计方法。在可靠性设计技术方面, 美军于 1977 年成立了工程装备可靠性设计小组, 研究工程装备的可靠性设计存在的问题, 发展新方法, 并制定相应的设计程序。在工程装备故障预防和检测方面, 以机械故障预防小组 (MFPG) 为代表, 对设计、诊断、监测、故障等进行研究, 在可靠性数据的收集和分析方面取得了很大的进步, 编制了一些可靠性设计手册和指南、可靠性数据手册。典型装备主要有 M9 装甲战斗工程车、COV 清除障碍车、工兵布雷德利战车、D7 推土机、SEE 小型阵地挖掘机等。

俄军对工程装备可靠性的研究也十分重视, 并有其独到之处。在其 20 年科技规划中, 将提高工程装备的产品可靠性和寿命作为重点任务之一。其可靠性技术应用主要靠国家标准推动, 发布了一系列可靠性国家标准。他们认为可靠性技术的主要内容是预测, 即在产品设计和样机实验阶段, 预测和评估在规定的条件下的使用可靠性, 研究各项指标随时间变化的过程。他们认为可靠性研究方向主要有两个: (1) 可靠数学统计方法和使用信息的统计处理技术, 以及保证复杂系统可靠性的技术; (2) 适于机械制造行业, 包括物理故障学 (疲劳、磨损、腐蚀) 机械零件的耐磨、耐热、耐蚀等设计方法, 以及保证可靠性的工艺方法的研究。典型的装备有 BAT-2 开路机、BTM 系列挖壕机、30 系列挖土机等。

英军于1978年成立了装备可靠性研究小组,汇编出版了《装备可靠性》一书,从失效模式、使用环境、故障性质、筛选效果、实验难度、维修方式和数据积累等7个方面阐明了装备可靠性应用的重点,提出了几种装备系统可靠性的评估方法,并强调重视数据积累。由欧共体委员会支持的欧洲可靠性数据库协会成立于1979年,其可靠性数据库交换、协作网遍布欧洲各国,收集的大量机械零部件的可靠性数据,为进行重大工程规划和设备的研发、风险评估提供了依据。在工程装备可靠性设计方法方面,成功地应用了降额设计和计算机辅助设计,于2008年以“猎狗”战斗工程车取代了CET战斗工程车,在提高作业性能的前提下,零件数减少了1/3。英军工程兵还推出了一种机动能力更强的工兵坦克系统(ETS)。该系统包括“特洛伊”障碍清除车和“泰坦”冲击桥,该系统于2007年装备部队后,大大提高了英军的机动保障能力。

日军的装备可靠性设计强调实用化,主要依靠固有技术,通过可靠性实验及使用信息反馈,不断改进,达到可靠性增长,比较重视可靠性实验、故障诊断和寿命预测技术的研究与应用,以及产品失效分析、现场使用数据的收集和反馈。日军研制装备的一贯做法就是每发展一种新型主战坦克,同时就装备一种与之配套的新型装甲抢救车。比如,90式坦克问世后,日本防卫厅就立即拨款20亿日元研制新型90式坦克抢救车,其最高行驶速度达70km/h。

外军新型装备的研制与开发,一个共同的特点就是将可靠性设计技术始终贯穿,从需求分析、性能分析、作战任务和作战对象分析直到方案设计、系统设计、零部件设计等整个研制过程。大量新的可靠性技术与方法得到充分的应用和贯彻,从而为产品定型后的可靠性、维修性、保障性打下了坚实的技术基础。

1.2.2 我军装备可靠性设计现状

我军兵种装备的可靠性工作,由于多种因素的影响和制约,相对来说起步较晚,发展也比较迟缓,20世纪70年代以前基本上是空白。进入20世纪80年代以后,装备的可靠性问题,作为一个具有明确内涵的新概念,才在我国逐步被认识、接受并普及开来。特别是我国装备研制和使用维修实践中出现的许多重大质量问题,更进一步加深了对可靠性维修性保障性重要作用的认识,促进了可靠性维修性保障性工作的开展。陆续编译出版了一批可靠性维修性保障性文献资料,制定了一批急需的可靠性维修性保障性军用标准、手册,颁布了若干有关可靠性维修性保障性工作的指令性文件,如《装备维修性工作通用要求》(GJB 368B—2009)、《装备可靠性工作通用要求》(GJB 450A—2004)、《装备保障性分析》(GJB 1371—1992)以及国防科工委《关于加强可靠性维修性工作的若干规定》、《关于进一步加强装备可靠性维修性工作的通知》等。在型号研制工作中也正在逐步贯彻落实可靠性维修性保障性要求。但从总的情况来看,兵种装备的可靠性工作还存在不少问题。特别是近年来研制发展的兵种装备的技术性能都有比较明显的提高,但由于有些装备在研制过程中没有明确的可靠性维修性保障性要求;有些装备虽提出了可靠性维修性保障性要求,但在研制过程中没有约束机制和保证措施,可靠性要求并没有在工程研制中真正落实,致使许多装备的可靠性维修性保障性水平不高,甚至有的还有下降的趋势。从兵种装备的质量状况以及对部分兵种装备的试验与统计分析,可以明显看出,我国自行研制的装备与外军同类装备相比,在可靠性、维修性和保障性方面存在较大的差距。可靠性、维