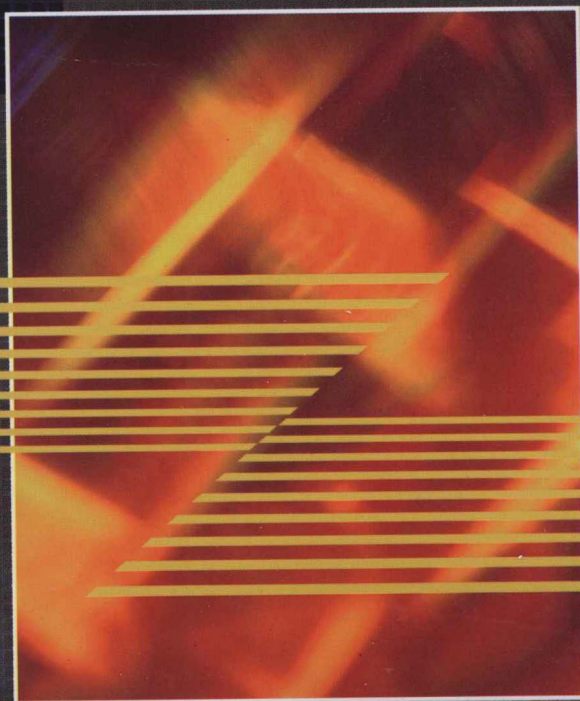


国防科学技术大学研究生教材出版基金资助项目

机电系统可靠性工程

陈 循 陶俊勇 等 编著
张春华 蒋 瑜



科学出版社
www.sciencep.com

国防科学技术大学研究生教材出版基金资助项目

机电系统可靠性工程

陈 循 陶俊勇 等 编著
张春华 蒋 瑜

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书是在国防科学技术大学开设“机电系统可靠性设计与分析”、“机电系统可靠性与寿命试验”课程的基础上,总结历年教学经验和成果编写而成的。本书从理论与应用结合的角度,对机电系统可靠性的基本理论、主要技术和应用方法进行系统阐述,涵盖电子产品可靠性设计与分析、机械产品可靠性设计与分析、机电系统可靠性与寿命试验等内容。在本书编写过程中,力争做到理论联系实际,既注重对可靠性基本理论的剖析,又注重对技术方法及工程应用的诠释。

本书可作为机械工程及相关专业研究生和高年级本科生教材,也可供从事可靠性工程研究的广大科研工作者参考。

图书在版编目(CIP)数据

机电系统可靠性工程 / 陈循等编著. —北京: 科学出版社, 2010
ISBN 978-7-03-029284-1

I. ①机… II. ①陈… III. ①机电系统-可靠性工程 IV. ①TH-39

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2010) 第 203749 号

责任编辑: 匡敏 潘斯斯 潘继敏/责任校对: 钟洋
责任印制: 张克忠/封面设计: 耕者设计工作室

科学出版社出版

北京黄城根北街16号
邮政编码: 100717

<http://www.sciencep.com>

源海印刷有限责任公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

2010年11月第一版 开本: B5-(720×1000)

2010年11月第一次印刷 印张: 17 1/4

印数: 1—3 000 字数: 340 000

定价: 35.00元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

前 言

可靠性工程是一门新兴的综合性边缘学科，近年来在武器装备、航空航天等重要领域的应用日益广泛，可靠性工程技术已成为相关领域的重要研究方向。可靠性设计、分析与试验是可靠性技术的核心，对于保障装备可靠性具有重要作用。

从机械工程学科人才培养需求考虑，我校从 2004 年开始开设了“机电系统可靠性设计与分析”和“机电系统可靠性与寿命试验”两门课程。在 2008 版的研究生培养方案制订中，我们在原有教学内容的基础上进行了重大调整，开设新课“可靠性设计与试验”，将原来的两门课程合并，保留精华内容，并考虑到机械工程学科研究生的培养要求，增加了机械可靠性设计的内容。

在近年来的教学中，配套教材一直是困扰我们的最大难题。国内目前相关的书籍主要包括理论类和应用类两类，这些书籍在理论与应用方面各有侧重，与我们开设课程的教学内容存在较大差距。2009 年，在国防科学技术大学研究生教材出版基金的资助下，我们组织编写了本书。

本书是在近年来我校开设“机电系统可靠性设计与分析”、“机电系统可靠性与寿命试验”课程的基础上，总结历年教学经验和成果编写而成的。从理论与应用相结合的角度，系统阐述了机电系统可靠性的基本理论、主要技术和应用方法，内容涵盖电子产品可靠性设计与分析、机械产品可靠性设计与分析、机电系统可靠性与寿命试验。理论性与实践性并重，结构完整。全书按照篇章结构组织，分为三篇，共 12 章。

第 1 章为绪论。主要介绍可靠性工程的研究背景与意义，以及可靠性的基本概念和常用分布。

第 2~5 章为第一篇电子产品可靠性设计分析。主要介绍电子产品可靠性的基本理论与方法，包括可靠性建模、可靠性分配与预计、故障树分析、故障模式影响及危害性分析、事件树分析以及电子产品的可靠性设计方法。

第 6~8 章为第二篇机械产品可靠性设计与分析。主要介绍机械产品可靠性的基本理论与方法，包括结构可靠性、机构可靠性以及有限元法分析在可靠性工程中的应用。

第 9~12 章为第三篇可靠性试验。首先介绍寿命试验的基本理论与方法，在此基础上分章介绍常用的 3 类可靠性试验：可靠性验证试验、可靠性增长试验、环境应力筛选。第三篇所介绍的可靠性试验理论与方法对于机械产品和电子产品

具有同样重要的应用价值。

本书理论联系实际，既注重对可靠性基本理论进行剖析，又注重对其方法及工程应用进行诠释，可作为机械工程及相关专业研究生和高年级本科生教材，也可为从事可靠性工程研究与应用的广大科研工作者提供参考。

本书由陈循教授负责整体策划、审定。第1~5章由陶俊勇副教授、蒋瑜博士编写，陶俊勇副教授统稿；第6章由张君一博士编写，陶俊勇副教授审定；第7章由张君一博士编写，张春华副教授审定；第8章由易晓山副教授编写，汪亚顺博士审定；第9章由汪亚顺博士编写；第10、12章由张春华副教授编写；第11章由研究生易帆帆编写，张春华副教授负责第三篇统稿。

本书的出版得到了国防科学技术大学研究生教材出版基金资助，同时也得到了科学出版社的大力支持，在此特别表示感谢。

限于水平，书中难免有疏漏之处，恳请读者指正。

作 者

2010年9月

于国防科学技术大学机电工程与自动化学院

目 录

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 可靠性工程概述	1
1.1.1 可靠性工程的定义和内涵	1
1.1.2 可靠性工程的发展历史	1
1.1.3 可靠性工程的军事意义	3
1.2 可靠性基本概念	5
1.2.1 可靠性与故障	5
1.2.2 寿命剖面与任务剖面	6
1.2.3 可靠性特征量	7
1.3 可靠性常用数学分布.....	11
习题一	12
参考文献	13

第一篇 电子产品可靠性设计与分析

第 2 章 可靠性建模	17
2.1 概述.....	17
2.1.1 可靠性模型分类	17
2.1.2 系统任务可靠性建模流程.....	18
2.2 典型可靠性模型.....	20
2.2.1 串联模型.....	21
2.2.2 并联模型.....	22
2.2.3 表决模型 (n 中取 r 模型)	23
2.2.4 旁联模型 (非工作模型)	24
2.2.5 桥联模型.....	27
2.3 不可修系统可靠性模型.....	28
2.3.1 虚单元	28
2.3.2 复杂不可修系统的任务可靠性模型求解	29
习题二	35
参考文献	35

第3章 可靠性分配与预计	36
3.1 概述	36
3.2 可靠性分配	36
3.2.1 可靠性分配的定义和目的	36
3.2.2 可靠性分配的一般准则	37
3.2.3 无约束条件的系统可靠性分配方法	38
3.2.4 有约束条件的系统可靠性分配方法	48
3.3 可靠性预计	50
3.3.1 可靠性预计的定义、目的与分类	50
3.3.2 单元可靠性预计方法	51
3.3.3 系统可靠性预计方法	52
习题三	62
参考文献	62
第4章 可靠性分析	63
4.1 故障模式影响与危害性分析	63
4.1.1 概述	63
4.1.2 故障模式影响分析	65
4.1.3 危害性分析	67
4.2 故障树分析	69
4.2.1 概述	69
4.2.2 故障树名词术语和符号	70
4.2.3 故障树分析的流程与注意事项	72
4.2.4 故障树的简化	72
4.2.5 故障树定性分析	74
4.2.6 故障树定量分析	78
4.3 事件树分析	85
4.3.1 概述	85
4.3.2 事件树建造	86
4.3.3 事件树的定量分析	88
4.3.4 事件树与故障树的综合分析	90
习题四	90
参考文献	91
第5章 电子产品可靠性设计分析	92
5.1 元器件的质量和可靠性	92
5.1.1 电子元器件的质量等级	92

5.1.2 电子元器件的选择与应用	95
5.2 降额设计	96
5.2.1 降额设计的程序与方法	96
5.2.2 降额等级与准则	97
5.2.3 降额设计注意事项	98
5.3 容差设计	99
5.3.1 容差分析的概念	99
5.3.2 最坏情况分析法	99
5.4 潜在通路分析	102
5.4.1 潜在通路分析的基本概念	102
5.4.2 潜在通路的表现形式	103
5.4.3 潜在通路分析的步骤	103
习题五	105
参考文献	105

第二篇 机械产品可靠性设计与分析

第6章 结构可靠性分析	109
6.1 结构元件可靠性分析的基本方法	109
6.1.1 应力-强度干涉模型	109
6.1.2 干涉模型的数值解法	114
6.1.3 干涉模型的近似解法	115
6.2 零件疲劳强度计算与寿命设计	119
6.2.1 疲劳破坏与疲劳分析方法	119
6.2.2 疲劳曲线	120
6.2.3 疲劳寿命及其可靠性	122
6.3 机械零件磨损的基本规律与耐磨可靠度设计	125
6.3.1 磨损的基本规律和磨损寿命曲线	125
6.3.2 磨损寿命和可靠度	127
习题六	131
参考文献	131
第7章 机构可靠性分析	132
7.1 机构可靠性	132
7.1.1 基本概念	132
7.1.2 机构运动可靠性指标	133
7.2 机构运动可靠性模型	133

7.2.1 机构运动学模型	134
7.2.2 机构运动精度概率模型	134
7.3 曲柄滑块机构运动可靠性分析	138
7.3.1 曲柄滑块机构理想状态运动学模型	138
7.3.2 曲柄滑块机构运动精度概率模型	139
习题七	142
参考文献	142
第8章 有限元法及在可靠性工程中的应用	143
8.1 概述	143
8.1.1 有限元基本概念和原理	143
8.1.2 Monte Carlo 法	144
8.1.3 概率有限元方法	145
8.2 概率有限元法	145
8.3 概率有限元控制方程的建立	147
8.3.1 摄动概率有限元法	147
8.3.2 Taylor 展开概率有限元法	148
8.3.3 Neumann 展开 Monte Carlo 概率有限元法 (NSFEM)	149
8.4 概率有限元法的计算	150
8.4.1 Taylor 和摄动展开概率有限元法	150
8.4.2 基于确定性有限元程序的概率有限元法的实现	152
8.5 齿轮轮齿弯曲强度的可靠度计算	152
8.5.1 基本公式推导	152
8.5.2 位移的一阶和二阶统计量	153
8.5.3 摄动概率有限元法求解	154
8.6 齿轮弯曲强度可靠性概率有限元计算	154
习题八	157
参考文献	157

第三篇 可靠性试验

第9章 寿命试验基础	161
9.1 寿命试验概述	161
9.1.1 寿命试验的定义	161
9.1.2 寿命试验的类型	162
9.1.3 截尾寿命试验	162
9.2 指数分布场合寿命试验	163

9.2.1 定数截尾场合	164
9.2.2 定时截尾场合	167
9.2.3 指数分布场合方案的对比	168
9.2.4 指数分布的假设检验	169
9.3 Weibull 分布场合寿命试验	172
9.3.1 Weibull 分布场合寿命试验的图分析方法	172
9.3.2 Weibull 分布场合寿命试验的极大似然估计方法	176
9.3.3 Weibull 分布场合寿命试验的最佳线性无偏估计方法	178
9.3.4 Weibull 分布场合寿命试验的简单线性无偏估计方法	182
习题九	185
参考文献	185
第 10 章 可靠性验证试验	187
10.1 基本概念	187
10.1.1 可靠性验证试验	187
10.1.2 抽样	188
10.1.3 风险	188
10.1.4 故障分类	189
10.1.5 可靠性试验剖面	190
10.2 指数分布型寿命试验验证方案	193
10.2.1 定时截尾寿命试验方案	193
10.2.2 定数截尾寿命试验方案	195
10.3 指数分布型定时试验标准方案	197
10.3.1 指数寿命型定时试验标准方案	198
10.3.2 指数寿命型标准定时试验的 LQ 方案	201
10.4 指数分布型序贯试验方案	202
10.4.1 概率比序贯试验方案	203
10.4.2 标准型序贯试验方案	207
10.5 成败型一次抽样试验方案	209
10.6 成败型序贯抽样试验方案	212
习题十	216
参考文献	216
第 11 章 可靠性增长试验	217
11.1 基本概念	217
11.1.1 可靠性增长	217
11.1.2 可靠性增长试验	217

11.1.3	故障分类	218
11.1.4	可靠性增长模型	219
11.2	Duane 模型	219
11.2.1	Duane 模型数学描述	220
11.2.2	Duane 模型的特点	222
11.2.3	Duane 模型的最小二乘分析方法	222
11.3	基于 Duane 模型的可靠性增长计划	225
11.3.1	可靠性增长计划问题	225
11.3.2	计划参数的确定	226
11.3.3	制订计划曲线的有关公式	229
11.3.4	制订计划曲线举例	230
11.3.5	可靠性增长试验计划的相关工作	230
11.4	基于 Duane 模型的可靠性增长跟踪	231
11.4.1	故障处置方式	231
11.4.2	跟踪与跟踪曲线	233
11.4.3	控制与决策	234
11.5	AMSAA 模型	234
11.5.1	AMSAA 模型的数学描述	235
11.5.2	AMSAA 模型的特点	236
11.6	基于 AMSAA 模型的可靠性增长评估	236
11.6.1	定时截尾可靠性增长试验评估	236
11.6.2	定数截尾可靠性增长试验评估	241
	习题十一	245
	参考文献	246
第 12 章	环境应力筛选	247
12.1	基本概念	247
12.1.1	环境应力筛选	247
12.1.2	环境应力筛选与可靠性增长试验、可靠性验证试验的关系	248
12.2	常用的筛选应力	249
12.2.1	恒定高温	249
12.2.2	温度循环	250
12.2.3	温度冲击	251
12.2.4	扫频正弦振动	251
12.2.5	随机振动	251
12.2.6	各种应力的筛选效果比较	252

12.3 常规环境应力筛选	254
12.3.1 环境应力筛选的基本特性	254
12.3.2 基线方案	254
12.3.3 常规筛选实施过程	256
12.4 定量筛选模型	258
12.4.1 定量筛选的变量及其控制	258
12.4.2 定量筛选方法梗概	259
习题十二	261
参考文献	261

第 1 章 绪 论

可靠性是衡量产品质量的一个重要指标。高科技的发展要以可靠性技术为基础,科学技术的发展又推动了产品可靠性水平的不断提高。可靠性理论重点关注产品的故障及其统计分析,并以产品的寿命特征为研究对象,它与基础科学、系统工程、环境工程、价值工程、工程心理学、质量控制技术、维修技术、生产管理 and 使用管理技术以及计算机技术等密切相关。因此,可靠性理论是一门新兴的综合性和边缘性学科,特别是近年来由于军工、航天、航空、航海等重要工业领域的应用需求推动,可靠性技术已成为相关领域的重要研究内容。

1.1 可靠性工程概述

1.1.1 可靠性工程的定义和内涵

可靠性工程是指为了达到产品的可靠性要求而进行的一系列技术与管理活动。可靠性工程研究的是产品故障的发生、发展及其预防的规律,通过设计、分析、试验等手段,防止和控制故障的发生与发展,提高产品的固有可靠性水平,达到“优生”的目的。可靠性工程是装备全系统全寿命周期管理工作的一个重要组成部分,它包括可靠性要求的确定、可靠性设计与分析、可靠性试验与评价、可靠性管理等工作,涉及装备的论证阶段、方案阶段、工程研制阶段、生产与部署阶段、使用阶段,适用于装备全系统、子系统、设备、组部件与元器件等各个产品层次,以及电子、机电、光电、机械、结构和软件等不同类型的产品。

1.1.2 可靠性工程的发展历史

近 30 年来可靠性工程逐步发展为成熟的工程技术学科。在可靠性工程发展过程中,军用装备、军用系统的研制是主要的动力。20 世纪四五十年代可靠性工程开始萌芽与兴起。在第二次世界大战期间,美国对日作战中使用的电子设备经过运输、储存后,在战场上约有 60% 不能正常工作。美国海军统计表明,当时电子设备在规定使用期内,仅有 30% 的时间能有效工作。为此,1943 年美国成立了电子管研究委员会,专门研究电子管的可靠性问题。为了推动可靠性研究及学术交流,1949 年美国无线电工程师学会成立了可靠性技术组,成为世界上第一个可靠性专业学术组织。50 年代初,美国在朝鲜战争中发现不可靠的电子设备不仅影响战争的进行,而且耗费大量的维修费用。1952 年美国成立了一个由军方、工业界

及学术界组成的“电子设备可靠性顾问团”(AGREE)。该机构对电子产品的设计研制、生产、试验、储存、运输、使用中的可靠性问题,进行了全面的调查研究,1957年发表了第一份研究报告《军用电子设备可靠性》。该报告比较完整地阐明了可靠性理论基础与研究方法,成为可靠性工程领域奠基性的文献,以此为标志可靠性技术也开始成为一个独立的学科。

20世纪60年代以来,随着大型计算机、洲际导弹、卫星、航天等先进工业技术的发展,美国可靠性研究工作从理论到工程实践,从设计、生产、试验、使用、维修到管理,全面系统地得以发展与完善,形成了系统完整的工程理论技术体系,并且制定了各种可靠性标准和规范,成立了全国统一的数据交换网,建立了完整的可靠性领导与管理机构。此外,当时世界上一些先进发达国家也先后开展了可靠性技术的研究。例如,苏联的可靠性研究工作起步比美国晚几年,1958年苏联召开了第一次全苏无线电电子设备可靠性讨论会,提出提高电子设备可靠性的7年规划;日本和英国、法国、意大利等西欧国家于60年代初从美国引入可靠性技术,其中1960年日本成立了可靠性及质量控制专门委员会,1961年英国成立全国可靠性及质量委员会,1963年法国成立了可靠性中心。这些国家对可靠性技术的研究起到了积极的推动作用。基于以上各国可靠性学术组织的研究工作,1965年国际电子技术委员会(IEC)设立了可靠性技术委员会(1977年改为可靠性与维修性技术委员会),负责协调各国间的可靠性概念、术语、定义以及可靠性管理、数据的收集与交换等。

1969年7月登月成功的Apollo宇宙飞船,共有120所大学、15000个单位的42万人参加研制,使用了720万个零部件。如果一个零件发生故障,就有可能导致整个系统的故障,甚至造成灾难性后果,因此可靠性问题就成了Apollo宇宙飞船能否登月成功的关键问题。为了预测Apollo宇宙飞船的可靠性,美国通用电子技术公司研制了“用仿真方法预测Apollo宇宙飞船完成任务概率”的计算机程序。在Apollo宇宙飞船成功登月后,美国国家航空和宇宙航行局(NASA)的报告认为:可靠性工程技术在其中起到了至关重要的作用,并将可靠性工程技术列为60年代三大技术成就之一。

20世纪70年代可靠性工程进入发展成熟期,逐步建立了完善的可靠性管理机构,制定了一整套管理方法及程序,各国相继成立了全国性的可靠性数据交换网,进行信息交流,采用严格的降额设计、热设计等可靠性设计准则保证产品的可靠性;强调产品研制过程中的环境应力筛选,开展可靠性增长试验及综合环境应力的可靠性试验,并开始重视机械可靠性和软件可靠性的研究工作。

20世纪80年代可靠性工程开始向更深更广方向发展。这期间增加了维修性工作内容、CAD技术在可靠性领域中应用,开展了光电器件和微电子器件可靠性的研究等。最有代表性的工作是美国空军于1985年推行的“可靠性与维修性2000年行动计划”(R&M2000),该计划的目标是到2000年实现装备可靠性的增

倍,该计划的推行在1991年海湾战争中见到了成效。

20世纪90年代以来可靠性工程开始步入理念更新新时期,出现了一些新的可靠性理念,改变了一些传统的可靠性工作方法,如随着产品可靠性的持续提高,出现了大量高可靠、长寿命的产品与装备,致使传统的可靠性方法已无法应用于工程实践。因此,可靠性强化试验(reliability enhancement test, RET)、加速寿命试验(accelerated life test, ALT)、产品健壮性设计技术、动态可靠性分析与评估技术等一批新概念、新方法、新技术逐步发展起来,为高可靠、长寿命产品与装备的可靠性增长、可靠性试验与可靠性评估提供了新的有效的解决途径。

在我国,产品的可靠性工作研究最早也是由电子工业部门开展的,并且在20世纪60年代初进行了有关可靠性评估的开拓性工作。70年代初,航天部门首先提出了电子元器件必须经过严格的环境应力筛选试验,才能投入使用以避免出现早期缺陷;70年代中期,由于中日海底电缆工程的需要提出了高可靠元器件验证试验的研究需求,促进了我国可靠性数学的发展。此后经过各有关部门的持续努力,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吸取国外的先进技术,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、中央军委颁发了《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。此后,1987年12月和1988年3月先后颁发的国家军用标准GJB368—87《装备维修性通用规范》和GJB450—88《装备研制与生产的可靠性通用大纲》,是目前最具代表性的我国可靠性工程技术的基础标准。与此同时,各有关工业部门、军兵种也越来越重视可靠性管理工作,加强了可靠性信息数据网的建设和可靠性技术的学术交流,全国军用电子设备可靠性数据交换网已经建成。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开展。目前我国的电子学会、宇航学会、航空学会、机械工程学会、仪器仪表学会、现场统计学会、兵工学会等一级学会均设立了相应的可靠性工程分会。

、可靠性工程的逐步成熟还远不是它发展进程的结束,其还在继续向更高水平、更广阔和更深入的内涵发展。例如,以寿命周期费用为约束的可靠性权衡优化设计、具有更高可靠性的系统研制、软件可靠性的研究、先进可靠性试验方法的研究、先进机内自测试技术的开发以及统一的管理机构与可靠性专用数据库的建立等,有关的研究成果和新进展又适时地反映到相应的新标准、新规范的制定和原有标准、规范的修订中去。

1.1.3 可靠性工程的军事意义

在现代高技术局部战争中,为了赢得战争的胜利,必须发展高新技术武器。这

些武器不仅必须具有精确打击能力和威慑能力,还必须具有良好的战备完好性和任务成功率,以及良好的机动性和快速反复出动能力。20世纪90年代以来的高技术局部战争表明,可靠性是提高武器装备战备完好性和出动强度的基础,也是改善武器装备快速出动能力和机动性的有力保证。装备的高技术必须与高可靠的工艺系统相匹配,与高可靠的监控系统相匹配,与高可靠的管理系统相匹配,这样才能使高技术装备发挥应有的效能。可靠性是装备“战斗力的乘数”,装备“今天的可靠性,就是明天的战斗力”。由于可靠性对现代武器装备发展起着至关重要的影响作用,并在很大程度上制约着现代战争的胜负转换概率,因此装备可靠性工程的研究受到了世界各国的普遍重视。在现代装备研制过程中,可靠性已经成为与性能同等重要的研制目标,对武器装备的作战能力、生存力、部署机动能力、维修人力和使用保障费用等都有着重要的影响。

现代装备中火箭导弹属于尖端武器,称为“现代战争之神”。火箭导弹的出现,改变了以往的攻防概念,改变了前、后方概念。火箭导弹除了射程、精度、威力等性能指标外,描述其专门特性的重要指标就是可靠性。从诞生起,火箭导弹便与可靠性结下了不解之缘。火箭导弹一般结构复杂,技术参数多,其可靠性受到多方面因素制约,很难达到每次发射“万无一失”的理想目标,尤其对于战略导弹和运载火箭,一旦发生事故往往同时引发重大的经济与军事损失,并造成严重的政治影响。美国国防部对其航天事故进行大量调查得出的结论认为:系列火箭发射失败的主要原因与制造企业在工程技术和制造工艺方面存在缺陷有关,归根到底是存在可靠性问题。虽然我国在可靠性工程领域的研究与应用起步较晚,但是在武器装备可靠性工程领域,特别是尖端装备可靠性工程领域,已经取得了重大进展。

在海湾战争中,美军动用包括 F-117、F-111、F-15、F-16、F-18、B-52 等在内的上千架具有先进作战性能的飞机,对伊军实施了猛烈轰炸,取得了绝对的空中优势。美国共出动飞机近 10 万架次,损失的仅有 30 架,几乎创下了现代高技术战争“零伤亡”、“零风险”的记录。之所以能达到这样的作战效能,是与其装备具有高可靠性水平分不开的。以 F-15 战机为例,1980 年 5 月,首批 F-15 飞机在美国空军基地进行作战演习时,平均再次出动机务准备时间为 13.8s,平均出动架次率为 2.7,平均故障飞行间隔为 1.2h。而后 F-15A/B 经过改进发展为 F-15C/D,在可靠性方面得到了重大提升。1982 年再次进行战时模拟演习时,该机的平均出动架次率达到 3.4~4.8,平均故障飞行间隔为 3.31h,相比 1980 年的出动架次率提高了近 1 倍。由此可见,其可靠性提高了 2.76 倍后,就换取了提高 1 倍的飞机出动架次率,相当于 1 架飞机顶 2 架使用,从而大大提高了武器装备的战斗能力。

为了应对日益突出的可靠性问题,美国国防部和各军种采取了积极的措施。20 世纪 90 年代以后,美国军方仍然将可靠性作为武器装备研制的关键系统特性。美国空军目前正在努力将 JSF 发动机的翻修期提高到 800~1000h,大大高于目前

军用发动机的 250~300h;美国空军要求其第四代战斗机 F-22“猛禽”在多方面提高性能的同时,其可靠性也力求达到比以往军用飞机更高的标准;陆军也要求其 RAH-66“科曼奇”直升机在可靠性方面要大大优于现役直升机,如 AH-64“阿帕奇”。

随着现代武器装备向信息化、一体化和多功能化方向发展,21 世纪武器装备的性能和复杂性将会迅速提高,特别是信息技术、微电子技术和微机电技术的飞速发展,对可靠性工程的发展将产生深刻影响。可靠性工程将面临新的挑战,同时也面对新的机遇,可靠性工程技术将成为提高武器装备战斗力的一种更加经济有效的工具,为更快、更好和更省地研制、生产、使用和保障新军事需求的新一代武器装备提供强有力的技术支持。

1.2 可靠性基本概念

1.2.1 可靠性与故障

1. 可靠性定义

可靠性是指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。此定义中包含了产品、规定的条件、规定的时间以及规定的功能这四个要素,并指明可靠性是描述产品的一种能力,是产品专门特性的描述,而不是一种性能指标的描述。下面分别对各要素给予解释和说明。

(1)“产品”它可以是一个系统,也可以是组成这个系统的分系统、装置、组件,甚至是一个电子元器件或机械零部件。

(2)“规定的条件”通常是指使用条件、维护条件、环境条件、操作条件等,这些条件都会对整个系统的可靠性产生直接的影响。同一系统在不同的条件下,会有不同的可靠性要求。例如,实验室条件和现场条件就相差很大,所以离开了规定的条件来研究产品的可靠性没有实际意义。

(3)“规定的时间”这是可靠性定义中的核心。因为不谈时间就无可靠性可言,而规定时间的长短又随产品对象的不同和使用目的不同而异。产品可靠性只有在规定的时间内才有具体的度量意义。规定的时间是指产品使用(储存)中的某一给定时间或与时间相当的动作次数、发射次数、实航次数、行驶里程等。

(4)“规定的功能”常用系统的各种性能指标来反映。通过测试、试验或检验等技术手段判定系统的功能状态。系统若达到规定的性能指标,则称该系统能完成规定的功能,否则称该系统丧失规定的功能。一般把系统丧失规定功能的状态称为系统发生“故障”或“失效”,相应的各项性能指标就称为“故障判据”或“失效判据”。在具体研究一个系统的可靠性时,应合理、明确地给出“失效判据”,避免因