

兵器科学与技术丛书

普通高等教育“十二五”规划教材

# 弹药可靠性工程

主 编 焦志刚 岳明凯

副主编 郭文凤 杨 丽

DANYAO KEKAOXING GONGCHENG



国防工业出版社

National Defense Industry Press

TJ41  
6

兵器科学与技术丛书  
普通高等教育“十二五”规划教材

# 弹药可靠性工程

主 编 焦志刚 岳明凯  
副主编 郭文凤 杨 丽

国防工业出版社

·北京·

## 内 容 简 介

全书共分10章,第1章介绍了可靠性学科和弹药可靠性研究的意义;第2章介绍了可靠性的数学基础——概率论和数理统计的基础知识;第3章讨论了可靠度、失效概率及寿命等可靠性的特征量的概念及其关系;第4章介绍了弹药及引信系统的可靠性模型结构及分类,给出了不同类型系统的可靠度计算模型;第5章讲述了可靠性的分配原则及几种常用的可靠度分配方法;第6章重点介绍了FMEA和FTA两种方法;第7章介绍了可修复系统的可靠性特征量及有效度的计算方法;第8章介绍了应力—强度干涉模型及系统可靠度的分析计算方法;第9章介绍了弹药产品的相关可靠性试验及试验数据的分析处理方法;第10章介绍了弹药产品的可靠性设计、监控、评价及数据管理的相关知识。

本书可作为高等院校兵器相关专业的本科生、研究生的教材,也可供从事可靠性工程技术研究的人员参考。

### 图书在版编目(CIP)数据

弹药可靠性工程/焦志刚,岳明凯主编. —北京:国防工业出版社,2013.5

ISBN 978-7-118-08722-2

I. ①弹… II. ①焦… ②岳… III. ①弹药—可靠性理论—高等学校—教材 IV. ①TJ410.1

中国版本图书馆CIP数据核字(2013)第102265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)

北京奥鑫印刷厂印刷

新华书店经售

\*

开本787×1092 1/16 印张14 $\frac{3}{4}$  字数340千字

2013年5月第1版第1次印刷 印数1~3000册 定价31.00元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店:(010) 88540777

发行邮购:(010) 88540776

发行传真:(010) 88540755

发行业务:(010) 88540717

# 前 言

现代战争中，武器装备的功能强大，性能日臻完善，但其系统却更加庞大，结构日益复杂，如雷达、各式导弹及新型智能弹药等。历次战争已经证明，世界各国为武器系统的可靠性问题付出了沉重的代价，引起了各国对武器系统可靠性研究的广泛重视。

在战争需求牵引和科学技术发展的推动下，弹药系统正朝着高精度、远射程、大威力、多功能和智能化的方向发展，出现了一系列新型弹药产品。由于弹药产品性能的不断提高，结构日益复杂，可靠性要求已成为武器弹药产品型号研制的重要指标，弹药工作者应给予高度的重视。这就要求必须对弹药系统的可靠性进行深入的研究。

总之，可靠性是武器系统的首要质量指标。同时，可靠性工程已成为多种学科的边缘学科，已从航空、宇航、兵器工业等行业普及到民用工业。

进入 20 世纪 80 年代以后，我国颁布了一系列的可靠性工程技术标准和管理规定，各行业的可靠性技术应用得到了大力推广和迅速发展。近年来，国内出版了多种可靠性工程技术方面的论著，但作为大学教材特别是适合兵器类专业大学生的教材却不多见。为了给兵器类相关专业的高等院校学生及从事弹药专业的工程技术人员提供教材和参考书，编者结合近年的教学实践和可靠性工程的相关理论，编写了《弹药可靠性工程》一书。书中以成熟的可靠性设计与分析技术，针对弹药、引信等的系统结构，建立可靠性模型，进行可靠性计算、失效分析等，对机械设计中的可靠性问题也进行了探讨。书中的多数选自对弹药、引信系统的模型分析，每章后面附有一定量的习题，以巩固所学知识。全书共分 10 章，前 3 章主要介绍研究可靠性的意义、数学基础及可靠性特征量；第 4、5 章讨论了系统可靠性模型，可靠度的计算及系统可靠度的分配；第 6、7 章介绍了弹药系统的失效分析及可修复系统的可靠性；第 8 章介绍了概率设计的原理和方法；第 9、10 章分别介绍了弹药可靠性试验、数据处理和弹药可靠性管理。

本书可作为高等院校兵器相关专业的本科生、研究生的教材，也可供从事可靠性工程技术研究的人员参考。

参加本书编写工作的有焦志刚、岳明凯、郭文凤、杨丽等，焦志刚编写了第 2 章、第 5 章和第 8 章；岳明凯编写了第 3 章和第 6 章；郭文凤编写了第 4 章和第 7 章；杨丽编写了第 1 章、第 9 章和第 10 章。本书在编写中引用和参考了诸多文献资料，在此谨向参考文献作者表示感谢。同时，对本书编写过程中做了大量编辑、排版及校对工作的刘会杰、汪建业、王昭明、赵保全、郑鑫、李博阳及有关人员表示衷心的感谢。

由于编者水平有限，书中难免出现疏漏和不妥之处，敬请读者批评指正。

编 者

# 目 录

第 1 章 绪论 .....	1
1.1 研究可靠性的意义 .....	1
1.1.1 可靠性是战争发展的需要 .....	1
1.1.2 可靠性是企业的命脉 .....	1
1.2 可靠性工程的发展 .....	2
1.2.1 国外可靠性工程的发展 .....	2
1.2.2 国内可靠性工程的发展 .....	5
1.3 武器系统可靠性设计过程 .....	6
1.3.1 可行性论证阶段 .....	6
1.3.2 方案设计阶段 .....	6
1.3.3 工程研制阶段 .....	7
1.3.4 设计定型阶段 .....	7
1.3.5 生产定型阶段 .....	7
第 2 章 可靠性数学基础 .....	8
2.1 随机变量 .....	8
2.2 概率分布函数与概率密度函数 .....	8
2.3 概率的基本运算 .....	11
2.3.1 概率互补定理 .....	11
2.3.2 概率加法定理 .....	11
2.3.3 概率乘法定理和条件概率 .....	11
2.3.4 全概率公式与贝叶斯公式 .....	12
2.4 常用的随机变量概率分布 .....	13
2.4.1 离散型随机变量的分布 .....	13
2.4.2 连续型随机变量的分布 .....	17
2.4.3 对数正态分布 .....	18
2.4.4 威布尔分布 .....	19
2.4.5 指数分布 .....	20
2.5 数理统计基础 .....	21
2.5.1 母体与样本 .....	21
2.5.2 集中(中心)趋势的尺度 .....	21
2.5.3 分散度尺度 .....	22
2.5.4 置信水平的概念 .....	23

2.6	秩评定 .....	24
2.6.1	中位秩 .....	24
2.6.2	其它秩 .....	25
2.6.3	其它情况秩的决定 .....	25
2.7	正态随机变量的运算 .....	27
2.7.1	正态变量的代数和 .....	27
2.7.2	正态变量的代数差 .....	28
2.7.3	正态变量的乘积 .....	28
2.7.4	正态随机变量的商 .....	29
2.7.5	随机变量函数的数学期望与方差的近似计算 .....	30
	习题 .....	32
<b>第3章</b>	<b>可靠性的特征量</b> .....	<b>33</b>
3.1	以概率表示的可靠性特征量 .....	33
3.1.1	可靠度 .....	33
3.1.2	累积失效概率 .....	34
3.1.3	失效密度函数 .....	35
3.1.4	失效率与失效率函数 .....	36
3.1.5	失效率曲线 .....	37
3.2	以寿命表示的可靠性特征量 .....	39
3.2.1	平均寿命及其表达式 .....	39
3.2.2	寿命方差和寿命标准差 .....	40
3.2.3	可靠寿命、中位寿命和特征寿命 .....	41
3.3	主要分布可靠性特征量表达式 .....	41
3.3.1	指数分布 .....	41
3.3.2	正态分布 .....	42
3.3.3	对数正态分布 .....	44
3.3.4	威布尔分布 .....	46
	习题 .....	49
<b>第4章</b>	<b>系统可靠性模型和可靠度的计算</b> .....	<b>50</b>
4.1	系统与系统模型分类 .....	50
4.1.1	系统分类 .....	50
4.1.2	系统模型分类 .....	50
4.1.3	系统的结构框图与可靠性框图 .....	51
4.2	串联系统的可靠度计算 .....	52
4.3	并联系统的可靠度计算 .....	54
4.3.1	工作贮备系统 .....	54
4.3.2	非工作贮备系统(旁联系统) .....	56
4.4	串联、纯并联及表决系统的讨论 .....	58
4.5	桥式系统可靠度的计算 .....	60

4.6	弹药系统可靠性模型	64
4.6.1	弹药的定义	64
4.6.2	弹药的一般组成	64
4.6.3	弹药系统可靠性模型	64
4.7	引信及其机构的可靠性模型	66
4.7.1	引信系统可靠性模型及可靠度表达式	66
4.7.2	双延期管机构的可靠性模型及可靠度表达式	70
	习题	72
<b>第5章</b>	<b>弹药系统可靠性分配</b>	<b>74</b>
5.1	系统可靠性分配原则	74
5.2	可靠性的分配方法	75
5.2.1	等同分配法	75
5.2.2	按相对失效率(或失效概率)比的分配法	76
5.2.3	AGREE分配法	78
5.2.4	花费最小的分配法	81
5.2.5	动态规划分配法	83
5.2.6	拉格朗日乘值法	88
	习题	90
<b>第6章</b>	<b>系统的失效分析</b>	<b>92</b>
6.1	失效模式影响分析(FMEA)与故障树分析(FTA)	92
6.2	弹药系统的故障模式、影响及危害性分析	93
6.2.1	FMECA常用术语	93
6.2.2	FMECA的任务	94
6.2.3	FMECA的原则	94
6.2.4	FMECA的基本步骤	95
6.2.5	某大口径榴弹失效模式、影响及危害性分析	98
6.2.6	MT-57引信失效模式、影响及危害性分析	100
6.3	弹药系统故障树分析	102
6.3.1	故障树分析	102
6.3.2	建立故障树的方法	105
6.3.3	故障树的数学描述	109
6.3.4	故障树的定性分析	112
6.3.5	故障树的定量分析	116
6.4	引信系统作用失效故障树分析	121
	习题	125
<b>第7章</b>	<b>可修复系统的可靠性</b>	<b>126</b>
7.1	可修复系统的维修性	126
7.1.1	维修性的重要意义	126
7.1.2	维修性的内涵	127

7.2	维修性的基本要求 .....	127
7.2.1	维修性定性要求 .....	127
7.2.2	维修性的定量要求 .....	128
7.3	有效性与有效度 .....	133
7.3.1	有效性 .....	133
7.3.2	有效性的特征量——有效度 .....	133
7.4	马尔柯夫过程 .....	135
7.4.1	转移概率与转移矩阵(概率矩阵) .....	136
7.4.2	极限概率及各态历经性 .....	137
7.4.3	过渡状态的概率 .....	139
7.4.4	吸收状态时的平均转移次数(或平均时间) .....	141
7.4.5	连续型马尔柯夫过程 .....	142
7.5	系统有效度计算 .....	144
7.5.1	单部件可修复系统 .....	144
7.5.2	串联可修复系统 .....	145
7.5.3	并联可修复系统 .....	146
7.5.4	表决可修复系统 .....	148
7.5.5	旁联可修复系统 .....	149
	习题 .....	153
<b>第8章</b>	<b>概率设计 .....</b>	<b>154</b>
8.1	概述 .....	154
8.2	应力-强度干涉模型和可靠度计算 .....	155
8.2.1	应力-强度干涉模型 .....	155
8.2.2	应力-强度干涉模型可靠度的一般表达式 .....	156
8.3	典型应力和强度分布的可靠度计算 .....	157
8.3.1	应力和强度均为指数分布时可靠度计算 .....	157
8.3.2	应力和强度均服从正态分布时可靠度计算 .....	157
8.3.3	应力和强度均为对数正态分布的可靠度计算 .....	159
8.3.4	其它几种应力-强度干涉模型的可靠度计算 .....	161
8.4	可靠度的图解法及蒙特卡洛模拟法 .....	162
8.4.1	图解法求可靠度 .....	162
8.4.2	蒙特卡洛法求可靠度 .....	166
	习题 .....	169
<b>第9章</b>	<b>弹药可靠性试验及数据处理 .....</b>	<b>170</b>
9.1	概述 .....	170
9.1.1	可靠性试验的目的 .....	170
9.1.2	可靠性试验的分类 .....	170
9.2	弹药产品环境应力筛选试验 .....	171
9.2.1	振动加速度筛选 .....	171



9.2.2	冲击加速度筛选 .....	172
9.2.3	离心加速度筛选 .....	172
9.2.4	温度循环和热冲击筛选 .....	172
9.2.5	环境应力筛选试验方案的设计依据 .....	172
9.2.6	筛选试验方案优劣的评价方法 .....	173
9.3	弹药产品的可靠性增长试验 .....	173
9.3.1	可靠性增长试验的目的 .....	173
9.3.2	可靠性增长试验大纲的内容 .....	173
9.3.3	可靠性增长模型 .....	174
9.3.4	可靠性增长计划 .....	174
9.4	弹药产品的可靠性鉴定试验与可靠性验收试验 .....	175
9.4.1	可靠性鉴定试验 .....	175
9.4.2	可靠性验收试验 .....	176
9.5	弹药产品加速贮存寿命试验 .....	177
9.5.1	弹药加速贮存寿命试验内容 .....	177
9.5.2	弹药加速贮存寿命试验过程 .....	190
9.6	试验结果有效性分析 .....	192
<b>第 10 章</b>	<b>弹药可靠性管理</b> .....	<b>193</b>
10.1	弹药产品可靠性大纲 .....	193
10.1.1	产品可靠性大纲的一般要求 .....	193
10.1.2	产品可靠性大纲的制定 .....	195
10.2	可靠性设计评审 .....	198
10.2.1	设计评审的目的和作用 .....	199
10.2.2	设计评审种类 .....	199
10.2.3	设计评审的主要内容 .....	200
10.3	可靠性监控 .....	200
10.3.1	可靠性监控的目的 .....	200
10.3.2	承制单位的可靠性监控 .....	200
10.3.3	订购方军代表的可靠性监控 .....	203
10.4	弹药可靠性数据管理 .....	207
10.4.1	数据收集与反馈 .....	208
10.4.2	故障报告及分析 .....	210
<b>附表 1</b>	<b>标准正态分布密度函数表</b> .....	<b>215</b>
<b>附表 2</b>	<b>标准正态分布积分表</b> .....	<b>217</b>
<b>附表 3</b>	<b>泊松 (Poisson) 分布表</b> .....	<b>219</b>
<b>附表 4</b>	<b>中位秩 <math>F(x_i)</math> 值</b> .....	<b>222</b>
<b>附表 5</b>	<b>10% 秩表</b> .....	<b>223</b>
<b>附表 6</b>	<b>90% 秩表</b> .....	<b>224</b>
<b>附表 7</b>	<b><math>\Gamma</math> 函数表</b> .....	<b>225</b>
<b>参考文献</b>	.....	<b>227</b>

# 第 1 章 绪 论

## 1.1 研究可靠性的意义

可靠性问题存在于人们的日常生活中,人们在选购商品时,除了对商品的外观及性能提出各种要求外,在很大程度上要考虑商品的经久耐用问题,这个“经久耐用”即为产品的可靠性问题。早在北宋时期,《武经总要》就记载了弓箭多次使用弓力不减弱,天气冷热弓力保持不变的问题,这就是早期的武器可靠性。尽管当时人们并没有明确认识到可靠性问题,但可靠性问题存在于任何产品中。

### 1.1.1 可靠性是战争发展的需要

如果武器装备不可靠,将导致军事任务不能完成,在平时,可使任务和训练不能按期完成,甚至带来巨大损失;在战时,会造成侦察不准、指挥失控、瞄不准、打不上,贻误战机,不能有效地打击敌人,保存自己,导致战场失利,造成不应有的伤亡和损失,甚至危及部队的生存;危害国家和人民安全;武器装备不可靠将导致维修工作量繁重,维修队伍庞大,要求维修技术高超,增加训练负担,使军队臃肿,同时造成维修费用巨大,备件生产、运输、贮存和供应负担加重。

在现代装备的设计中,可靠性、维修性已成为与产品性能同等重要的设计要求,并对装备的作战能力、生存力、部署机动性、维修人力和使用保障费用产生了重要影响。

(1) 提高作战能力:提高装备各部件及装备的可靠性,减少发生故障的次数,提高装备的战备完好性或增加出动率。能保证装备连续出动的能力,同时还提高装备持续作战和完成任务的能力,从而提高装备的作战能力;改进维修性,减少装备在地面维修和修理的停机时间以及装备再次出动的时间,能够提高装备的出动率,同时还减少装备战场修理时间,提高装备再次投入作战的能力。

(2) 增强生存力:采用先进的可靠性、维修性设计技术和减少对那些在战争中易受摧毁的地面固定设施的依赖是增强装备生存力的重要途径。

(3) 提高部署机动性:提高可靠性,改进维修和测试性,采用先进的 BIT,可以减少或取消对维修车间的依赖,有助于减少装备部署的运输要求,提高装备部署机动性。

(4) 减少维修人力:装备部件及设备可靠性的提高,可以减少故障发生次数,因而减少维修次数。维修性的改进将提高维修工作效率,减少维修时间。

(5) 降低使用保障费用:可靠性、维修性的改进将减少人力、备件供应以及保障设备和器材,降低维修人员的技术等级要求和培训要求,进而降低设备的使用保障费用。

### 1.1.2 可靠性是企业的命脉

企业的兴旺,决定于产品的竞争力,企业丧失竞争力,就难以生存,而决定产品竞争力

的重要因素是产品的可靠性。对于军用产品都要求达到一定的可靠性指标,否则产品将被拒收,成为废品,或者返修找到故障所在。造成设计、生产和试验费用的增加,有可能将失去用户,导致企业破产。民用企业同样有类似问题。日本人把可靠性当做国家兴旺的大事,其产品可靠性相当高,博得世界用户的称赞,赢得了市场,成为经济强国。目前,国内对产品可靠性已有了相当的重视,产品可靠性提高很快,如卫星的发射技术可靠性相当高,已到了国际领先的水平。

总之,在科学技术迅速发展的今天,产品的可靠性显得尤其突出,国家已把可靠性列为评价产品质量的主要指标,可靠性将直接关系到产品研制的成败。产品可靠性与产品性能、成本以及研制周期等基本价值目标有着密切关系。

## 1.2 可靠性工程的发展

尽管作为产品基本属性的可靠性随着产品的存在而存在,但可靠性作为一门独立的工程学科只有六七十年的历史,它从概率论、系统工程、质量控制和生产管理等学科中脱颖而出,而成为一门新兴的工程学科。

### 1.2.1 国外可靠性工程的发展

#### 1. 美国的可靠性工程发展

可靠性工程诞生于美国。60多年来,美国的可靠性技术发展十分迅速,特别是在军事装备和航天领域获得广泛应用,取得很大的成功。因此,了解可靠性工程的发展就必须首先了解美国的可靠性工程发展。

20世纪40~50年代——可靠性工程形成:第二次世界大战期间,当时德国V-II火箭的诱导装置和美国军用雷达与以往的电子设备相比,均达到了很高的精密程度,但在运输、贮存和使用中却出现大量因故障而丧失战斗力,从而导致人员的伤亡,甚至导致战役的失败。如美国对日作战的电子设备中有50%到达战场不能工作;海军电子设备在规定时间内,仅有30%的时间能有效工作。于是,德国火箭研制者之一——R. Lusser首先利用概率乘法法则,认为 $N$ 个部件组成的串联系统,其可靠度等于 $N$ 个部件的可靠度的乘积,这就是现在常用的串联系统可靠性乘积定律,并以此算出V-II诱导装置可靠度为0.75,第一次定量表示产品的可靠性。美国则从电子管开始可靠性研究。1952年,美国国防部成立了电子设备可靠性咨询小组,对电子产品的设计、制造、贮存、运输、使用等各方面问题进行深入调查研究,经过5年时间的努力,于1957年6月发表了《军用电子设备可靠性报告》,从此确定了美国可靠性工程发展的方向,成为美国可靠性工程发展基础性文件。随后制定了许多可靠性标准、规范等,如《电子设备可靠性》、《电子设备可靠性保证大纲》等。1954年美国正式召开第一届可靠性与质量管理学术交流会。

20世纪60年代——可靠性工程全面发展:美国由于推行阿波罗计划,投入了大量的资金,对航天装置提出了极高的可靠性要求,大大推进可靠性工程的全面发展。例如,作为飞船的运载火箭,“火星”号共有760万个零件和元件,要求其可靠性相当于2万台电视机同时工作而不允许有一台发生故障。这样高的可靠性要求,除了大力提高元器件的可靠性之外,更重要的是进行充分的可靠性设计。到了60年代中期,对可靠性的一些误

解,如“可靠性是电子领域的事情”。“搞可靠性要有高深的概率与数理统计基础”,“可靠性工程深奥,一般企业搞不了”等被排除了,使可靠性技术进入普及和全面发展时期。美国在这一时期主要发展的是:

(1) 改善可靠性管理,建立可靠性研究机构。1965年,美国国防部颁布 MIL-STD-785《系统与设备的可靠性大纲》,把可靠性与设计,试验及生产的工程活动结合起来,以保证在产品研制初期即能预测并排除潜在的不可靠问题,从而获得良好的经济效益。经过4年的实践,1969年修改为 MIL-STD-785A。此外在空军罗姆航空发展中心组建可靠性分析中心。

(2) 制定可靠性试验标准,发展新的试验方法。1963年颁布 MIL-STD-781《可靠性试验(指数分布)》,1965年修改为 MIL-STD-781A,1967年进一步修改为 MIL-STD-781B,并改名为《可靠性鉴定试验及产品验收试验(指数分布)》。5年之内对标准修改两次,可见美国对可靠性研究的重视程度和研究的不断深入。这一标准在国际上得到广泛应用。为了缩短试验时间,又发展了两种新的试验方法,即加速寿命试验和快速筛选试验。

(3) 发展新的可靠性预计技术。1962年颁布 MIL-HDBK-217《电子设备可靠性预计》,1965年修改为 MIL-HDBK-217A,1979年修改为 MIL-HDBK-217C。这本设计手册提供了大量的电子元器件可靠性数据和预计方法,被人们誉为电子设备可靠性的“圣经”,在世界各国得到广泛应用。1961年颁布 MIL-STD-756《可靠性模型的建立与可靠预计》,1963年修改为 MIL-STD-756A。60年代初,美国还颁布了 MIL-STD-721《可靠性和维修术语的定义》。

(4) 开展失效物理研究,发展新的失效模式分析技术。1962年召开了第一届电子设备失效物理年会,1967年改名为可靠性物理年会,深入研究设备失效的机理,制定了 MIL-STD-1629《故障模式、影响及危害度分析程序》。此外,对安全性也进行了深入研究并制定了 MIL-STD-822《系统及有关分系统、设备的安全性大纲》。

(5) 重视维修性研究。1963年颁布 MIL-STD-470《维修性大纲要求》,1966年颁布 MIL-STD-471《维修性鉴定、验收及评价》和维修性手册 MIL-HDBK-472《维修性预计》,从而出现了以可靠性为中心的维修性理论。

(6) 创建可靠性教育。美国十分重视可靠性知识的普及和教育,到60年代后期,美国40%的大学都设置了可靠性课程,培养了大批的包括硕士和博士在内的各种可靠性工程技术专家。

20世纪70年代——可靠性工程进入成熟期,得到深入发展:

(1) 建立统一的可靠性管理机构。1978年2月成立了直属三军联合后勤司令部领导的可靠性工作组,制定可靠性工作的政策和指导性文件。

(2) 成立全国统一的可靠性数据交换网。1970年正式成立政府—工业部门数据交换网,到1980年已有220个政府机构和404个工业组织参加该交换网。

(3) 重视机械可靠性研究。

(4) 改善可靠性设计及试验方法。例如,计算机可靠性辅助设计,研究设备可靠性预计的软件包,研究非电子设备的可靠性设计与试验方法。1977年和1978年先后成立机械设备可靠性设计及可靠性试验研究组织,负责研究机械设备的可靠性。制定相应的我设计程序和试验程序。在可靠性试验中采用综合环境应力试验,加强环境应力筛选试验,

发展可靠性增长试验,1978年颁布 MIL-STD-1635《可靠性增长试验》。

(5) 广泛运用以可靠性为中心的维修思想以及自测试设备,提高维修水平。

(6) 开展软件可靠性研究。70年代由于微机的出现,使计算机的应用出现高潮,软件研究及应用更加迅速,使一些计算机的软件费用已经超过硬件。而软件同样存在可靠性问题。于是1978年成立三军软件可靠性技术协调组来负责国防部范围内的可靠性研究与协调工作。

(7) 制定产品责任法。产品责任(PL)问题是指产品不可靠使消费者蒙受损失,从而发展到法庭上起诉、为赔偿损害而争执的问题,为此制定产品责任法,使企业更感到可靠性的重要性。

20世纪80年代以后——可靠性工程更受重视且更加成熟:美国从实践中认识到过去的军事装备过分追求先进的性能而对可靠性和维修性重视不够,致使装备完好率下降和后勤保障费用大幅度猛增。这一教训使美国国防部政策发生了变化,即从过分追求先进性能转变为强调可靠性和维修性。于是国防部制定第一个可靠性及维修性条令,即1980年正式颁布的5000.40条令——《可靠性及维修性》。该条令规定发展各种武器的可靠性及维修性政策,规定国防部各部门对可靠性和维修性的职责,规定所有武器装备从一开始就要考虑可靠性和维修性,条令还规定武器装备可靠性应包括可用性、任务可靠性、维修人力和后勤支援四个方面的指标。此外,还修订和颁发了一批可靠性标准和手册。

## 2. 苏联的可靠性工程发展

苏联早在1958年就曾统计过因产品的质量和可靠性问题而损失1500亿~2000亿卢布的事实,从而认识到了可靠性工程的重要性。苏联可靠性工作的特点:一是重视对工程师普及可靠性知识,建立在总工程师领导下的可靠性工作机构,并把可靠性工作机构设在质量管理部门;二是重视可靠性理论研究,苏联不仅培养了一批如莫戈洛夫、斯米尔诺夫和马尔可夫那样著名的统计学家和可靠性理论专家,而且不少成果为世界公认,如马尔可夫过程就是可靠性维修性研究中常用的工具;三是注意研究实用的可靠性方法,如设计中采用降额与冗余以弥补苏联自己生产的电子元器件可靠性较差的不足;四是积极吸收和引用美国的经验和标准;五是苏联对机械可靠性理论和方法都做了较深入的研究,不少研究著作作为各国转载;六是重视可靠性信息工作,各工业部门都设有可靠性信息系统,使用户和工业主管部门有机联系起来,及时分析产品的可靠性变化趋势,评定可靠性对策的有效性。

## 3. 日本的可靠性工程发展

日本可靠性工作有四个特点。一是把重点放在民用工业产品,不拘泥于理论研究,采取实用化应用可靠性的观点,这一点可以从我国翻译的日本可靠性书籍中明显看出。二是日本在成功的质量管理基础上引入可靠性工程,两者紧密结合,效果十分显著,欧美等国都赞叹不如。三是日本可靠性工作主要是各大企业自成系统互相保证,企业有内控的可靠性指标的试验及评定的规范标准。对提高可靠性的程度,企业都有明确的目标。比如对电子产品就着重于消除早期故障,对半导体和集成电路都制订了专门的可靠性保证计划,对机械产品则解决寿命耐久性问题,重点放在关键零部件的设计与试验的可靠性保证上。四是日本非常重视可靠性技术的启蒙和培训工作,他们认为只有职工具有优秀的

素质,产品才能达到高可靠性的水平。除了高校开设可靠性工程课外,全国不少学术组织也设立可靠性研究会,对可靠性技术普及起到了重要作用。

#### 4. 欧洲各国对可靠性也给予很大的关注

英国在标准局成立电子设备可靠性委员会,并从1968年起开始出版可靠性序列标准,如颁发BS5760《设备、系统、元件可靠性标准》,阐明可靠性管理程序和试验方法,并列举了26个工程应用实例,召开了三届全英可靠性学术会议。其可靠性活动基本上也和质量管理活动联系起来。法国在国立通信研究所成立“可靠性中心”,进行数据收集分析研究工作,1963年法国开始出版《可靠性》杂志。

### 1.2.2 国内可靠性工程的发展

我国可靠性工作虽在20世纪50年代就已起步,例如钱学森同志提出用两个不太可靠的元件组成一个可靠的系统后,电子工业领域开始建立可靠性与环境试验研究机构。但由于种种原因,我国的可靠性工作真正从宣传、探索、逐步进入实践阶段还是从70年代开始。从为提高航天火箭和人造卫星可靠性的需要,发展“七专”电子产品到80年代我国可靠性工作的发展已十分迅速了,电子工业以提高“三机”(电视机、录音机、收音机)可靠性为中心,大大促进了电子产品可靠性的提高,黑白电视机的MTBF从250h提高到5000h,彩电提高到10000h以上;航空工业以飞机的定寿延寿为中心,推动了航空领域可靠性发展;机械工业刚采用定期发布产品可靠性指标,限期考核通过的办法,推动机电产品可靠性工作的发展。90年代我国可靠性技术得到进一步提高,航空、航天、船舶、兵器、电子等均建立了可靠性研究中心,颁布了大量的可靠性标准,产品的可靠性有了明显提高,大量产品已进入国际市场,为国家赢得了荣誉。

我国可靠性工作迅速发展具体表现有:

(1) 相继建立可靠性研究机构。例如机电部第五研究所、北京航空航天大学可靠性研究所、机械院可靠性中心、船舶总公司可靠性中心、兵器工业总公司质量与可靠性中心、能源部可靠性研究中心等。此外,在许多研究所、工厂和院校都成立了可靠性研究组织。

(2) 建立可靠性数据交换网和数据库。1980年成立的全国电子产品可靠性数据交换网,已有142个单位申请参加交换网。1988年底在北京航空航天大学成立国防科工委航空装备质量与可靠性信息交换网。中国船舶总公司和兵器工业总公司也成立了质量与可靠性信息中心。

(3) 加紧制定可靠性标准。国家技术监督局几年来十分重视可靠性标准的制定和贯彻,已颁布一批可靠性标准,如GB3187《可靠性基本名词术语及定义》、GB1772《电子元器件失效率试验方法》、GB2689.1《恒定应力寿命试验和加速寿命试验方法总则》、GB2689.2《寿命试验和加速寿命试验图估计法》、GJB373A《引信安全性设计准则》、GJBZ20119《炮兵引信战术技术指标通用要求》、GJB450《装备研制与生产的可靠性大纲》、GJB3813《可靠性模型的建立与可靠性预计》、GJB/Z299B《电子设备可靠性预计手册》等。

(4) 可靠性学术活动十分活跃,可靠性专业学术组织相继成立。例如中国机械工程学会可靠性专业委员会、中国航空学会可靠性专业委员会、中国电子学会可靠性与质量管理专业委员会、中国宇航学会可靠性与质量管理专业委员会、中国兵工学会可靠性工程专

业委员会、中国数学学会可靠性专业委员会、中国航空学会维修工程委员会、中国军械维修工程学会、全国军事技术装备可靠性标准化技术委员会、国防科工委质量与可靠性研究中心,等等。这些学会有的每年召开一次、有的两年召开一次学术交流会。

(5) 可靠性工程教育蓬勃发展。许多高等院校开设了可靠性工程选修课,培养可靠性方面的硕士和博士研究生。各地区和各部门的短期可靠性培训班更是难以计数。

## 1.3 武器系统可靠性设计过程

武器系统的研制分为以下几个阶段:可行性论证阶段、方案设计阶段、工程研制阶段、设计定型阶段、生产定型阶段。可靠性设计的工作贯穿于整个武器系统全寿命周期。

### 1.3.1 可行性论证阶段

在该阶段主要完成武器系统战术技术指标的论证,可靠性指标作为武器系统战术技术指标的重要组成部分应由使用部门会同研制部门,从保证装备作战效能和降低寿命周期费用出发,对其必要性和可行性进行充分论证。

(1) 收集、分析国内外现役相似装备的各种信息,根据使用需要和实际可能,综合权衡,选择适当的可靠性参数,提供相应的目标值和门限值。

(2) 初步确定寿命剖面和任务剖面。

(3) 初步建立可靠性模型,并对可靠性指标进行粗略分配和预计。

(4) 分析可靠性对装备使用、维修保障的影响,为装备使用、维修保养提供依据。

(5) 分析可靠性对装备作战效能及寿命周期费用的影响。

(6) 提出验证装备可靠性的方案设想。

### 1.3.2 方案设计阶段

本阶段主要是研制单位完成可靠性工作方面的基本任务,是根据已批准的“战术技术指标”论证满足可靠性指标要求的可行的总体方案,提出可靠性设计要求。

(1) 分析装备作战使命、使用和维修保障要求、寿命剖面、任务剖面、环境剖面,以及有关的约束条件。

(2) 建立可靠性模型并进行可靠性指标分配。

(3) 制订元器件大纲,提出对元器件、原材料的选用要求和控制方案。

(4) 对总体方案进行可靠性定量或定性分析和预计,估计可达到的可靠性值。

(5) 进行故障模式和影响分析或故障模式、影响及危害度分析。

(6) 确定可靠性关键项目,提出相应的技术措施。

(7) 初步确定产品研制阶段可靠性试验及贮存试验大纲。

(8) 对外协单位和外购件供应单位应进行质量和可靠性及其保证能力的调研。

(9) 估算可靠性费用。

(10) 提出可靠性设计与实验要求。

(11) 进行可靠性对装备使用、维修保障影响的分析,并初步确定其要求。

### 1.3.3 工程研制阶段

这个阶段可靠性工作的目标是研制单位全面展开可靠性设计,分析试验工作的基本出发点,研制出的产品应满足研制任务书规定的可靠性指标。

(1) 全面执行元器件大纲。

(2) 有计划地进行环境应力筛选和可靠性增长试验工作,运用故障树法,分析与纠正措施系统,积极、有效地解决可靠性问题,增长产品的可靠性。

(3) 不断深入、权衡、完善可靠性模型与可靠性分配和预计工作,此项工作多次进行。

(4) 对配套的外协、外购件进行可靠性鉴定与验收工作。

(5) 组织可靠性试验,对试验结果进行评估,以验证产品的设计是否满足“任务书”规定的可靠性要求。

(6) 完善可靠性分析,根据需要及时修改 FMECA 表。

(7) 根据研制计划,组织对产品可靠性进行多次评审。

### 1.3.4 设计定型阶段

设计定型是国家对武器装备性能包括可靠性进行全面考核的主要形式,以确认其达到“研制任务书”和有关合同的要求,研制单位在申请设计定型时应完成以下内容的可靠性报告。

(1) 可靠性模型、可靠性分配和预计结果。

(2) 装备的可靠性验证与试验结果评估。

(3) 可靠性鉴定试验或可靠性增长试验。

(4) 研制与设计定型期间最大故障及其纠正措施。

(5) 关键部件的故障模式及影响分析。

(6) 外协、外购件质量认证及其可靠性鉴定或验收报告。

(7) 可靠性对使用、维修保障的要求。

(8) 研制期间可靠性大纲实施情况及相应的生产、试验控制技术文件要求。

(9) 设计定型试验中重大技术遗留问题的限期处理方法。

### 1.3.5 生产定型阶段

本阶段是国家对武器装备批量生产条件、产品质量与可靠性是否稳定等进行全面考核的主要形式,以确认装备性能与可靠性是否符合批准的设计定型要求。

(1) 产品可靠性符合评估及质量稳定性。

(2) 设计定型时遗留的技术问题的纠正措施。

(3) 外协、外购件的质量与可靠性控制。

(4) 生产质量和可靠性保证大纲的实施及控制措施的有效性。

(5) 试生产期间出现的产品重大故障及其纠正措施。

(6) 数据分析和结果评估。

在弹药系统中,弹药产品可靠性历来为设计、研制和使用部门所重视,因为在战场上,弹药的不可靠将直接影响到战争双方的力量对比,在关键时刻有几发炮弹不响,将会影响整个战斗,由于弹药不可靠而造成的膛炸或早炸问题,将直接危及战士的生命。因此,弹药的生产部门和使用部门都把可靠性问题放在头等重要的地位。



## 第 2 章 可靠性数学基础

### 2.1 随机变量

随机变量,就是“表示随机试验结果的一个变量”。随机变量取什么值是不能在试验前知道的,它取决于试验结果。

例如,某设备在规定的工作条件和失效标准下,处于正常运行状态时,则称它处于“1”状态;处于非正常运行状态时,则称它处于“0”状态。这样,讨论该设备目前处于何种状态时,就可简单说成结果是“1”或“0”。但它到底处于什么状态,由于影响设备正常运行或出现故障的因素很多,故事先不能判断,即“0”或“1”是随机的,只有当实际运行后才能知道。因此,如果引进一变量  $X$ ,将  $X$  规定为“1”与“0”,那么

$$X = \begin{cases} 0 & \text{当失效发生时} \\ 1 & \text{当设备正常运行时} \end{cases}$$

故称  $X$  为随机变量。因为  $X$  只有  $\{0,1\}$  两种可能性,又称  $X$  是  $\{0,1\}$  二项离散随机变量。

又如,对某一机械零件的失效时间(寿命)来讲,由于影响零件寿命的因素非常复杂,故零件的失效时间  $T$  是一个随机变量。也就是说,对于同种零件,在相同的环境条件下运行,其寿命是不会相同的。例如在 1000 个轴承中随机地抽出 60 个轴承进行寿命试验,每 10 个轴承为一组,其试验结果如表 2.1 所示。

表 2.1 说明,虽然是同种轴承,试验条件也相同,但结果相差很大。

如果引进一随机变量  $T$ ,其取值为  $t(t \geq 0)$ ,显然,随机变量  $T$  可以在  $0 \sim \infty$  区间中任一点上发生。因为  $T$  可以在零至无穷大之间连续地在任何值出现,故称  $T$  为连续随机变量。

既然零件的寿命是一个随机变量,其取值由试验结果而定,那么有没有一定的规律可以遵循呢?从大量的统计角度和从事件发生的可能性(概率)来看,是有一定的必然规律可以遵循的,这种规律称为概率分布函数。

表 2.1 轴承寿命分组试验记录

组序	试验数	平均寿命 $\times 10^6 / \text{次}$
1	10	2.9
2	10	8.1
3	10	0.7
4	10	0.9
5	10	10.0
6	10	4.5

### 2.2 概率分布函数与概率密度函数

如果表 2.1 所列的轴承寿命分成一定寿命区间,并记录在每个寿命区间中的失效数,