

舰船装备保障工程丛书

李大伟 刘海涛 张志华 庄锦程 著

装备性能可靠性建模及 维修策略优化技术



科学出版社

舰船装备保障工程丛书

装备性能可靠性建模及 维修策略优化技术

李大伟 刘海涛 张志华 庄锦程 著

科学出版社

北京

内 容 简 介

本书从研究装备故障机理入手,系统论述装备性能可靠性建模理论及维修策略优化方法。主要内容包括装备故障机理、规律及可靠性建模、基于冲击的可维修产品的可靠性分析,基于冲击的定期维修与修复性维修组合策略优化、基于冲击的定期维修与视情维修组合策略优化、基于冲击的其他维修策略优化、基于 (p, q) 法则的维修策略优化、基于提升因子的维修策略优化和基于虚拟寿命的维修策略优化。本书注重理论与工程应用相结合,系统阐述装备性能可靠性建模理论,以及各类维修组合策略的边界条件、建模思想、方法与适用范围,有助于读者理解理论方法并投入工程应用。

本书可供装备可靠性和维修性设计分析与管理人员的参考,也可作为从事可靠性建模技术或维修决策技术研究人员的学习资料。

图书在版编目(CIP)数据

装备性能可靠性建模及维修策略优化技术/李大伟等著. —北京:科学出版社, 2019. 10

(舰船装备保障工程丛书)

ISBN 978-7-03-062535-9

I. ①装… II. ①李… III. ①军用船-可靠性-系统建模②军用船-维修
IV. ①E925. 6

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2019)第 230564 号

责任编辑:张艳芬 乔丽维 / 责任校对:樊雅琼

责任印制:吴兆东 / 封面设计:蓝 正

科学出版社出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

北京中石油彩色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

*

2019年10月第 一 版 开本:720×1000 1/16

2019年10月第一次印刷 印张:15 1/4

字数:289 000

定价:98.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

《舰船装备保障工程丛书》编委会

名誉主编:徐滨士

主 编:朱石坚

副主编:李庆民 黎 放

秘 书:阮旻智

编 委:(按姓氏汉语拼音排序)

曹小平(火箭军装备部)

陈大圣(中国船舶工业综合技术研究院)

辜家莉(中国船舶重工集团 719 研究所)

胡 涛(海军工程大学)

贾成斌(海军研究院)

金家善(海军工程大学)

刘宝平(海军工程大学)

楼京俊(海军工程大学)

陆洪武(海军装备部)

马绍力(海军研究院)

钱 骅(中国人民解放军 91181 部队)

钱彦岭(国防科技大学)

单志伟(陆军装甲兵学院)

王明为(中国人民解放军 91181 部队)

杨拥民(国防科技大学)

叶晓慧(海军工程大学)

张 磊(中国船舶工业集团 708 研究所)

张 平(中国船舶重工集团 701 研究所)

张怀强(海军工程大学)

张静远(海军工程大学)

张志华(海军工程大学)

朱 胜(陆军装甲兵学院)

朱晓军(海军工程大学)

《舰船装备保障工程丛书》序

舰船装备是现代海军装备的重要组成部分,是海军战斗力建设的重要物质基础。随着科学技术的飞速发展及其在舰船装备中的广泛应用,舰船装备呈现出结构复杂、技术密集、系统功能集成的发展趋势。为使舰船装备能够尽快形成并长久保持战斗力,必须为其配套建设快速、高效和低耗的保障系统,形成全系统、全寿命保障能力。

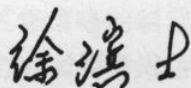
20世纪80年代,随着各国对海军战略的调整以适应海军装备发展需求,舰船装备保障技术得到迅速发展。它涉及管理学、运筹学、系统工程方法论、决策优化等诸多学科专业,现已成为世界军事强国在海军装备建设发展中关注的重点,该技术领域研究具有前瞻性、战略性、实践性和推动性。

舰船装备保障的研究内容主要包括:研制阶段的“六性”设计,使研制出的舰船装备具备“高可靠、好保障、有条件保障”的良好特性;保障顶层规划、保障系统建设,并在实践中科学运用保障资源开展保障工作,确保装备列装后尽快形成保障能力并保持良好的技术状态;研究突破舰船装备维修与再制造保障技术瓶颈,促进装备战斗力再生。舰船装备保障能力不仅依赖于装备管理水平的提升,而且取决于维修工程关键技术的突破。

当前,在舰船装备保障管理方面,正逐步从以定性、经验为主的传统管理向综合运用现代管理学理论及系统工程方法的精细化、全寿命周期管理转变;在舰船装备保障系统设计上,由过去的“序贯设计”向“综合同步设计”的模式转变;在舰船装备故障处理方式上,由过去的“故障后修理”向基于维修保障信息挖掘与融合技术的“状态修理”转变;在保障资源规划方面,由过去的“过度采购、事先储备”向“精确化保障”转变;在维修保障技术方面,由过去的“换件修理”向“装备应急抢修和备件现场快速再制造”转变。

因此,迫切需要一套全面反映海军舰船装备保障工程技术领域进展的丛书,系统开展舰船装备保障顶层设计、保障工程管理、保障性分析,以及维修保障决策与优化等方面的理论与技术研究。本套丛书凝聚了撰写人员在长期从事舰船装备保障理论研究与实践中积累的成果,代表了我国舰船装备保障领域的先进水平。

中国工程院院士
波兰科学院外籍院士



2016年5月31日

前 言

维修工程作为装备维修保障的系统工程,以装备维修保障系统的建立及其运行规律为研究核心,通过系统研究装备维修保障系统的功能、组成要素与相互关系,确保维修保障系统的及时建立并通过运行不断完善,为装备维修活动提供条件;通过开展装备可靠性与维修性等特性设计,使装备具有良好的可靠性与维修性,并与维修保障系统之间达到最佳匹配与协调;通过开展装备维修的科学决策与管理,对装备进行及时、有效、经济的维修。显然,可靠性与维修管理之间具有密切关联,掌握装备可靠性规律是科学制定装备维修策略的基础,而合理安排装备维修活动,可以使装备的可靠性(完好性)水平得以保持并有效降低寿命周期费用。

维修工程起源于 20 世纪 30 年代,伴随着工业生产的机械化、电气化、自动化迅速发展。尤其当今信息化时代的迅速发展给维修工程带来了新的发展机遇,人们对待维修的思维方式和行为方式发生了深刻变化,新的维修思想不断涌现,先进的维修技术层出不穷,维修工程已成为装备管理工程中十分活跃的学科方向。

维修策略优化技术作为维修工程的重要组成部分,长期受到专家学者、工程管理人员和装备操作人员的重视,尤其是近十几年取得了丰硕的研究成果,并呈现出以下特点。

(1) 随着现代测试技术、信息融合技术与人工智能技术的飞速发展,能够获取的装备使用与维修信息越来越丰富,从早期的主要以装备故障信息为主,到目前可以全面收集装备的各种技术状态信息,装备使用与维修信息的极大丰富使得人们能够运用更多方法深入研究装备故障机理,能够更加细致地描述装备可靠性演变过程。同时,更多的先进维修手段可以用于装备维修,这些都为维修决策奠定了坚实的信息基础。

(2) 随着装备使用与维修信息的不断丰富,维修工程的研究方法发生了较大变化,由早期主要关注研究装备的总体可靠性规律并制定适合于某类装备的维修策略,逐渐转变为依据每个装备的实际使用与维修信息去研究其(在线)可靠性规律,制定针对该装备的使用与维修策略。这种量身定做的装备使用与维修策略可以更好地发挥每个装备的使用效能,有效降低寿命周期费用。

(3) 随着人们对装备的使用与维修要求越来越高,装备维修策略的制定与优化需要兼顾不同维度的需求,维修策略优化技术日趋复杂。例如,需要考虑运用各种主动维修方式(如状态监测、定期维修和视情维修等)及其维修组合策略,有效降

低故障概率;又如,需要兼顾装备使用要求、维修特点及相关规定,结合装备健康状态评估等信息适时调整维修计划,以便在恰当的时间、恰当的地点对装备实施恰当的维修活动。因此,维修策略决策与优化需要综合装备使用运行与维修保障等相关信息,客观掌握装备健康状态与(在线)可靠性,从而对装备维修进行决策与管理。

本书重点围绕装备性能可靠性与维修工程等问题开展研究,系统总结性能可靠性建模与维修建模方法,较全面地阐述维修决策的研究思想、方法与运用。为使读者更为全面地掌握维修策略优化技术,本书在内容安排上注重以下方面。

(1) 注重介绍研究思想。维修策略优化涉及装备使用与维修等活动,维修活动使得装备的技术状态发生改变,导致存在维修建模条件(要求)多、建模过程复杂和模型不容易理解等问题。因此,本书突出维修建模思路的介绍,有助于读者更为全面地理解各种维修模型。

(2) 注重反映研究前沿,展现当前各种维修工程理论。正是由于维修建模的复杂性,人们在实际装备的维修策略决策过程中常常进行各种假设或简化,从而形成各种各样的维修建模技术。本书重点介绍以冲击理论为基础的可靠性建模与维修建模技术,包括冲击理论的发展现状,以及在可靠性建模与维修建模等方面的应用情况,并详细介绍基于冲击理论的典型可靠性建模技术与维修策略模型。与此同时,本书还介绍其他针对可维修产品的可靠性建模技术与维修建模技术,如典型的 (p, q) 法则、提升因子和虚拟寿命等。

(3) 注重阐述应用实例。本书以装备常见的典型维修策略为重点,详细论述装备维修建模过程与维修策略的优化流程,系统分析各种维修活动对装备可靠性的影响,并通过对比分析来反映维修效果,给出各种维修策略的适用范围,为读者在实际工程中应用各种维修策略优化技术提供借鉴。

本书在撰写过程中,得到了中国人民解放军 91550 部队 41 分队、海军工程大学基础部、舰船与海洋学院领导和同事的大力支持,中国船舶重工集团公司第 701 研究所范敏高级工程师对本书提出了众多宝贵意见,在此深表感谢。特别感谢科学出版社为本书出版所做的大量工作。本书参考了相关领域出版的著作和发表的论文,在此一并向各位作者表示感谢。

在撰写本书过程中,作者查阅了大量的文献和著作,竭尽所能,先后 4 次对全书结构进行调整,力求内容准确、翔实、易懂。限于作者水平,书中难免存在不足之处,敬请专家与广大读者斧正。作者的联系方式为 ldw1198@126.com。

目 录

《舰船装备保障工程丛书》序

前言

第 1 章 产品可靠性及维修工程	1
1.1 引言	1
1.2 产品可靠性基础	1
1.2.1 可靠性定义	1
1.2.2 故障及表现形式	3
1.2.3 寿命分布函数	4
1.3 产品故障模型及指标	5
1.3.1 可靠性指标	5
1.3.2 维修性指标	8
1.3.3 保障性指标	9
1.4 维修活动及维修效果	11
1.4.1 维修相关定义	11
1.4.2 常见维修活动	11
1.4.3 维修效果	12
1.5 维修策略与维修组合	14
1.5.1 常见维修策略	14
1.5.2 故障后果与维修活动	15
1.5.3 维修策略的选择原则与程序	17
1.6 维修工程与可靠性	17
1.6.1 维修工程及发展历程	18
1.6.2 性能可靠性与维修工程	21
1.7 主要内容及结构安排	23
参考文献	25
第 2 章 故障机理、规律及可靠性建模	26
2.1 引言	26
2.2 产品故障与随机冲击	26
2.2.1 故障机理分析	26

2.2.2	随机冲击影响分析	28
2.2.3	故障统计规律	29
2.3	基于 Poisson 冲击流的累积损伤模型	32
2.3.1	基本假设	32
2.3.2	指数分布与 Poisson 冲击流	33
2.3.3	Gamma 分布与 Poisson 冲击流	34
2.3.4	Weibull 分布与冲击流	35
2.4	基于 Poisson 冲击流的性能可靠性模型	36
2.4.1	基本假设	36
2.4.2	性能退化模型	37
2.4.3	性能可靠性模型	37
2.4.4	寿命分布特征分析	38
2.4.5	实例分析	41
2.5	基于 Brown 冲击流的性能可靠性模型	43
2.5.1	Brown 运动	43
2.5.2	基本假设	43
2.5.3	性能可靠性模型	44
2.5.4	寿命分布特征分析	45
2.5.5	实例分析	49
	参考文献	50
第3章	基于冲击的可维修产品可靠性分析	52
3.1	引言	52
3.2	可维修产品性能退化特征及分析	53
3.2.1	性能退化过程描述	53
3.2.2	性能退化定性分析	54
3.3	可维修产品的性能可靠性模型	54
3.3.1	基本假设	55
3.3.2	性能可靠性模型	55
3.3.3	数值分析	57
3.4	维修效果分析方法	59
3.4.1	性能退化强度分析	60
3.4.2	故障率恢复因子分析	62
3.4.3	数值分析	64
3.5	寿命分布特征分析	64

3.5.1	在线寿命分布特征	65
3.5.2	总体寿命分布特征	69
3.6	实例分析	72
3.6.1	水泵转子	72
3.6.2	平台式惯性导航系统	74
	参考文献	76
第4章	基于冲击的定期维修与修复性维修组合策略优化	77
4.1	引言	77
4.2	定期维修与修复性维修组合策略描述	77
4.2.1	维修活动及类型	77
4.2.2	维修组合策略要求	79
4.3	定期维修与修复性维修组合的维修概率模型	80
4.3.1	定期维修与完全修复性维修组合的维修概率模型	80
4.3.2	定期维修与不完全修复性维修组合的维修概率模型	80
4.4	定期维修与完全修复性维修组合策略优化	83
4.4.1	维修组合策略特征量	83
4.4.2	维修组合策略优化模型	84
4.4.3	数值分析	85
4.5	定期维修与不完全修复性维修组合策略优化	87
4.5.1	维修组合策略特征量	87
4.5.2	维修组合策略优化模型	87
4.5.3	数值分析	88
	参考文献	91
第5章	基于冲击的定期维修与视情维修组合策略优化	92
5.1	引言	92
5.2	定期维修与视情维修组合策略描述	93
5.2.1	维修活动及类型	93
5.2.2	维修组合策略要求	95
5.3	定期维修与视情维修组合的维修概率模型	95
5.3.1	定期维修与完全视情维修组合的维修概率模型	95
5.3.2	定期维修与不完全视情维修组合的维修概率模型	96
5.4	故障造成经济性后果的产品的维修组合策略优化	101
5.4.1	维修组合策略特征量	101
5.4.2	定期维修与完全视情维修组合策略优化模型	102

5.4.3	定期维修与不完全视情维修组合策略优化模型	105
5.5	故障造成安全性后果的产品的维修组合策略优化	108
5.5.1	维修组合策略特征量	109
5.5.2	定期维修与完全视情维修组合策略优化模型	112
5.5.3	定期维修与不完全视情维修组合策略优化模型	116
	参考文献	118
第6章	基于冲击的其他维修策略优化	120
6.1	引言	120
6.2	故障需检测的视情维修策略优化	120
6.2.1	维修活动及维修策略要求	120
6.2.2	维修概率模型	122
6.2.3	维修策略优化模型	125
6.2.4	数值分析	127
6.3	修复性维修策略优化	131
6.3.1	维修活动及维修策略要求	131
6.3.2	维修概率模型	132
6.3.3	维修策略优化模型	134
6.3.4	数值分析	136
	参考文献	138
第7章	基于(p, q)法则的维修策略优化	140
7.1	引言	140
7.2	基于 (p, q) 法则的可维修产品可靠性分析	141
7.2.1	基本假设	141
7.2.2	可靠性模型	141
7.2.3	数值分析	144
7.3	基于时间的定期维修策略优化	147
7.3.1	维修活动及维修策略要求	147
7.3.2	维修概率模型	148
7.3.3	维修策略优化模型	149
7.3.4	数值分析	150
7.4	基于状态的视情维修策略优化	153
7.4.1	维修活动及维修策略要求	153
7.4.2	维修概率模型	154
7.4.3	维修策略优化模型	157

7.4.4 数值分析	158
参考文献	159
第8章 基于提升因子的维修策略优化	160
8.1 引言	160
8.2 基于提升因子的可维修产品可靠性分析	160
8.2.1 基本假设	160
8.2.2 可靠性模型	164
8.2.3 数值分析	166
8.3 基于极小修复性维修的定期维修策略优化	173
8.3.1 维修活动及维修策略要求	173
8.3.2 维修概率模型	174
8.3.3 维修策略优化模型	175
8.3.4 数值分析	175
8.4 基于完全修复性维修的定期维修策略优化	177
8.4.1 维修活动及维修策略要求	177
8.4.2 维修概率模型	178
8.4.3 维修策略优化模型	179
8.4.4 数值分析	180
8.5 基于完全修复性维修的视情维修策略优化	181
8.5.1 维修活动及维修策略要求	181
8.5.2 维修概率模型	182
8.5.3 维修策略优化模型	183
8.5.4 数值分析	184
参考文献	186
第9章 基于虚拟寿命的维修策略优化	187
9.1 引言	187
9.2 基于虚拟寿命的可维修产品可靠性分析	187
9.2.1 基本假设	187
9.2.2 可靠性模型	189
9.2.3 数值分析	190
9.3 基于故障风险的视情维修策略优化	194
9.3.1 维修活动及维修策略要求	194
9.3.2 维修概率模型	195
9.3.3 维修策略优化模型	196

321	9.3.4 数值分析	196
921	9.4 基于分阶段的定期维修策略优化	197
981	9.4.1 维修活动及维修策略要求	197
1081	9.4.2 维修概率模型	198
1181	9.4.3 维修策略优化模型	199
1301	9.4.4 数值分析	199
1421	9.5 有限寿命周期的定期维修策略优化	204
1501	9.5.1 维修活动及维修策略要求	204
1621	9.5.2 维修概率模型	205
1721	9.5.3 维修策略优化模型	208
1821	9.5.4 数值分析	208
201	参考文献	210
211	附录	212
271	.....	.....
271	.....	.....
281	.....	.....
291	.....	.....
301	.....	.....
311	.....	.....
321	.....	.....
331	.....	.....
341	.....	.....
351	.....	.....
361	.....	.....
371	.....	.....
381	.....	.....
391	.....	.....
401	.....	.....
411	.....	.....
421	.....	.....
431	.....	.....
441	.....	.....
451	.....	.....
461	.....	.....
471	.....	.....
481	.....	.....
491	.....	.....
501	.....	.....
511	.....	.....
521	.....	.....
531	.....	.....
541	.....	.....
551	.....	.....
561	.....	.....
571	.....	.....
581	.....	.....
591	.....	.....
601	.....	.....
611	.....	.....
621	.....	.....
631	.....	.....
641	.....	.....
651	.....	.....
661	.....	.....
671	.....	.....
681	.....	.....
691	.....	.....
701	.....	.....
711	.....	.....
721	.....	.....
731	.....	.....
741	.....	.....
751	.....	.....
761	.....	.....
771	.....	.....
781	.....	.....
791	.....	.....
801	.....	.....
811	.....	.....
821	.....	.....
831	.....	.....
841	.....	.....
851	.....	.....
861	.....	.....
871	.....	.....
881	.....	.....
891	.....	.....
901	.....	.....
911	.....	.....
921	.....	.....
931	.....	.....
941	.....	.....
951	.....	.....
961	.....	.....
971	.....	.....
981	.....	.....
991	.....	.....

第 1 章 产品可靠性及维修工程

1.1 引 言

可靠性是产品质量的重要属性之一,反映产品保持正常工作的能力。一般来讲,产品可靠性与其性能处于同等重要的位置,两者密不可分。没有可靠性作为保证,产品性能再好也无法充分发挥;离开产品自身性能,可靠性也就无从谈起。例如,对于舰船雷达系统,即使搜索、跟踪、识别等性能再好,如果系统自身可靠性较低,那么也会因为难以保持其技术状态,无法充分发挥作战效能。不仅如此,产品可靠性还与其使用方式、维修保障方式密切相关。可靠性是制定产品使用与维修策略的基础,决定了产品如何使用、选用何种方式进行维修等。同时,通过科学合理地制定产品的使用与维修保障策略可以有效延长产品使用寿命,充分发挥使用效能,有效降低产品全寿命周期费用。

本章作为研究性能可靠性与维修策略的基础,介绍产品可靠性与维修保障的基本概念,分析维修活动、维修策略对产品可靠性的影响,总结维修工程发展历程与研究思路。1.2 节介绍产品可靠性的基本定义,给出产品可靠性规律常见的描述方法;1.3 节介绍产品故障模型,给出常用的可靠性、维修性和保障性指标;1.4 节介绍产品维修的基本概念与常见的维修活动,分析维修活动对产品可靠性的影响;1.5 节介绍常见的维修策略,以及维修策略的选择原则与程序;1.6 节通过总结维修工程发展历程,分析产品维修策略研究思想与方法的演变;1.7 节提出本书研究的主要思路及框架结构,方便读者更好地了解本书结构。

1.2 产品可靠性基础

1.2.1 可靠性定义

众所周知,质量是产品的生命。为了全面刻画产品质量,人们从不同侧面提出众多质量指标,这些质量指标形成了产品质量指标体系。按照产品质量指标的属性对其进行分类,这些质量指标可分为性能指标、可靠性指标、安全性指标、适应性指标和经济性指标等。产品可靠性指标反映产品保持其性能指标的能力,它与产

品性能指标的差别主要体现在时间上,性能指标一般不涉及时间因素,而可靠性指标则与时间因素密切相关。由此可见,产品可靠性与其性能同等重要,密不可分。

根据国军标《可靠性维修性保障性术语》(GJB 451A—2005),产品可靠性定义为产品在规定条件下和规定时间内,完成规定功能的能力。为了准确理解和掌握可靠性的内涵,需要对其定义进一步分析,对规定条件、规定时间、规定功能和能力进行描述。

规定条件包括产品使用时的环境条件和工作条件^[1]。环境条件主要指温度、湿度和振动等。工作条件主要指使用要求和维修活动等。上述条件均会对产品的可靠性产生直接影响,造成不同环境和工作条件下,同一产品的可靠性规律不一致。对于可以维修的产品,维修活动的参与造成产品自身的工作条件发生变化,影响可靠性规律,因此产品会表现出与无维修条件下不同的规律特征。例如,舰船甲板按照规定要求定期进行补漆,以满足其日常使用性能,有效地延长甲板的使用寿命。相反,如果不进行补漆,那么甲板会因为海洋环境的作用被迅速腐蚀,性能很快便无法满足日常使用要求,使用寿命会极大缩短。

规定时间主要指产品规定的任务时间,是定义的核心。一方面规定时间与产品具体性能有关,需要保证产品基本性能得以实现,例如,导弹发射装置要求在发射过程的几分钟内可靠工作,雷达要求在开机后几小时内可靠工作;另一方面规定时间又与产品使用任务有关,需要保证产品满足实际使用需要,例如,导弹发射装置要求保证可靠发射上万次等。显然,定义里所指的时间是广义的,部分产品时间可以是工作次数、里程等。对于可以维修的产品,使用者往往会安排维修活动,以希望其具备更长的工作时间,即尽可能满足规定时间要求,以更好地满足使用需求。

规定功能主要指产品规定的必须达到的功能或性能指标。例如,雷达需要具备捕捉和发现目标等功能。如果产品丧失规定功能,那么直观上表现为不能工作,一般称为故障。根据《可靠性维修性保障性术语》(GJB 451A—2005),故障定义为产品不能执行规定功能的状态。该定义通常针对可维修产品。对于不可维修产品,通常将其称为失效,失效定义为产品丧失完成规定功能的能力的事件。在实际工程中,故障与失效很难区分,特别是硬件产品,故一般统称为故障。对于可维修产品而言,维修既可以在产品丧失功能后,对其进行恢复,完成规定功能,也可以在产品丧失功能前,通过保持产品状态,更好地实现规定功能,如导航系统,定期对其初始对准,可以进一步减小误差,确保更高的精度。

能力在定义中为一个定性描述,在可靠性中通常利用概率与统计对其进行量化。鉴于产品类型多样和使用目的各不相同,能力可以从多个角度进行量化,从而产生了可靠度、平均工作时间等可靠性指标。

由此可见,可靠性就是在上述三个规定下研究产品发生故障的统计规律。一般情况下,可靠性定义中的三个“规定”可以利用产品的寿命剖面和任务剖面进行描述。

产品的寿命剖面是指产品从制造到寿命终结或退出使用这段时间内所经历的全部事件和环境的时序描述。寿命剖面说明了产品在整个寿命周期经历的事件(如装卸、运输、储存、检测、维修、部署、执行任务等),以及每个事件的顺序、持续时间、环境和工作方式。

产品的任务剖面是指产品在完成规定任务时间内所经历的事件和环境的时序描述。对于完成多种任务的产品应制定多种任务剖面。产品的任务剖面一般包括产品的工作状态、使用情况及维修方案,所处环境(外加的与诱发的)的时间与顺序,以及任务成功与故障定义等。显然,产品的寿命剖面包含一个或多个任务剖面。寿命剖面和任务剖面是进行可靠性论证、设计与分析等工作的基础。

1.2.2 故障及表现形式

产品可靠性主要是研究产品故障发生、发展及预防的规律。产品发生故障是随机的,因此可靠性规律往往利用随机变量进行描述。工程中,常用寿命这一随机变量来描述产品的可靠性规律。产品的寿命是产品从开始工作到发生故障前的时间,可记为 T 。

根据表现形式,可将故障分为突发型故障和退化型故障两种类型,与之相对应的寿命(可靠性规律)也有两种表现形式。

1. 突发型故障

产品在使用或储存过程中,如果一直保持着规定功能,但是在某一时刻功能突然完全丧失,那么此时故障表现为突发型故障,如电路短路等。该类故障的特点是往往没有预兆,故障过程不可观测。传统可靠性理论主要是对该类故障进行研究,通过对产品的故障数据进行统计分析,选取合适的分布函数来描述产品的可靠性规律。

2. 退化型故障

产品在使用或储存过程中,如果性能状态随着时间的延长逐渐变化(提升或下降),直至达到某一阈值或范围,规定功能会完全丧失,那么此时故障表现为退化型故障,如机械件磨损等。该类故障过程往往可以观测。近年来,随着物理、化学等基础学科的发展,人们掌握了越来越多产品的故障过程与性能演变之间的关联关系,同时利用现代化监测手段,能够清晰地观察产品性能退化直至故障的变化

过程。

对于退化型故障的产品,可以利用性能参数来描述产品的寿命。记产品在时刻 t 的性能参数为 $X(t)$,故障阈值为 L_s 。以性能参数逐渐增加为例,若产品性能参数超过故障阈值,则产品发生故障。此时,产品寿命可以表示为

$$T = \min(t : X(t) \geq L_s)$$

1.2.3 寿命分布函数

由于产品故障发生时刻具有随机性,因此产品寿命 T 是一个非负随机变量。利用产品寿命 T 的分布函数可以描述产品的可靠性规律。

设产品寿命 T 的分布函数 $F(t)$ 为

$$F(t) = P(T \leq t), \quad t \geq 0 \quad (1.1)$$

它描述了产品在时刻 t 前发生故障的概率。在可靠性研究中,确定产品寿命分布是一项非常重要的基础工作。由概率论知识可知,产品寿命分布满足如下性质。

- (1) $F(0) = 0$;
- (2) $\lim_{t \rightarrow \infty} F(t) = 1$;
- (3) $F(t)$ 是时间 t 的非减函数。

由上述性质可以掌握产品寿命分布的工程意义,即

- (1) 产品在未开始工作前(即 $t=0$),其发生故障的概率为零;
- (2) 当工作时间趋于无穷时,产品必然发生故障;
- (3) 随着工作时间的延长,其发生故障的概率不会减小,即若 $t_1 \leq t_2$,则产品寿命分布函数满足 $F(t_1) \leq F(t_2)$ 。

1. 连续型寿命分布

如果产品寿命 T 为连续随机变量,那么产品的寿命分布可以利用故障概率密度函数(简称故障密度) $f(t)$ 来表示,即

$$F(t) = \int_0^t f(u) du$$

通常情况下,故障密度 $f(t)$ 满足如下性质。

- (1) $f(t) \geq 0$;
- (2) $\int_0^{\infty} f(t) dt = 1$ 。

2. 离散型寿命分布

如果产品寿命 T 为离散随机变量,如使用次数等,那么其寿命分布可以利用