



可靠性评估： 概念和模型及案例研究

Reliability Assessments:
Concepts, Models, and Case Studies

[美] Franklin R. Nash 著

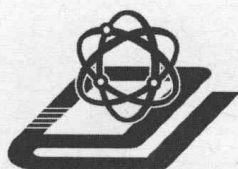
刘勇 冯付勇 刘树林 等译



CRC Press
Taylor & Francis Group



国防工业出版社
National Defense Industry Press



装备科技译著出版基金

可靠性评估： 概念和模型及案例研究

Reliability Assessments: Concepts, Models, and Case Studies

[美] Franklin R. Nash 著

刘勇 冯付勇 刘树林



国防工业出版社

著作权合同登记 图字:军-2017-022 号

图书在版编目(CIP)数据

可靠性评估:概念和模型及案例研究/(美)富兰克林·纳什(Franklin R. Nash)著;刘勇等译. —北京:国防工业出版社,2018.6

书名原文: Reliability Assessments: Concepts, Models and Case Studies

ISBN 978-7-118-11369-3

I. ①可… II. ①富… ②刘… III. ①系统可靠性-评估-研究 IV. ①N945.17

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2018)第 085672 号

Reliability Assessments: Concepts, Models, and Case Studies/by Franklin R. Nash/ISBN: 978-1-4987-1917-9

Copyright © 2016 by CRC Press.

Authorized translation from English language edition published by CRC Press, part of Taylor & Francis Group LLC; All rights reserved; 本书原版由 Taylor & Francis 出版集团旗下, CRC 出版公司出版, 并经其授权翻译出版. 版权所有, 侵权必究。

National Defense Industry Press is authorized to publish and distribute exclusively the **Chinese (Simplified Characters)** language edition. This edition is authorized for sale throughout **Mainland of China**. No part of the publication may be reproduced or distributed by any means, or stored in a database or retrieval system, without the prior written permission of the publisher. 本书中文简体翻译版授权由国防工业出版社独家出版并限在中国大陆地区销售。未经出版者书面许可, 不得以任何方式复制或发行本书的任何部分。

Copies of this book sold without a Taylor & Francis sticker on the cover are unauthorized and illegal. 本书封面贴有 Taylor & Francis 公司防伪标签, 无标签者不得销售。

※

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)

天津嘉恒印务有限公司印刷

新华书店经售

*

开本 787×1092 1/16 印张 51 字数 985 千字

2018 年 9 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—3000 册 定价 198.00 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

序

现代战争是基于信息系统的一体化联合作战,是体系对体系的对抗,作战强度高,对装备可靠性要求更高,对保障的依赖性更大。与此同时,武器系统复杂程度、信息化水平不断提高,更进一步加大了实现装备可靠性要求的难度,增加了部队的保障难度和负担。国内外的大量实践证明,装备可靠性是提高武器装备作战能力和保障能力的倍增器,是降低寿命周期费用和保障负担的重要因素。

然而,由于对可靠性工作重视不够,造成武器系统交付部队后,故障多发、频发,部队保障困难等情况比较普遍。同时,随着我国武器系统研制水平的不断提高,战术技术性能水平与国外同类装备相比差距在不断缩小,但有些装备的可靠性水平差距在扩大,亟待总体提升武器装备的可靠性水平。

装备可靠性是武器系统的一项重要性能指标,是一种设计特性,也是一种使用特性,是战术技术指标的重要组成部分,需要在设计上予以实现,同时与生产制造、使用保障因素直接相关,需要在使用保障上采取相应保证措施。达到可靠性要求,发挥可靠性水平,不仅是设计工程师的责任,同时也是生产制造和使用保障人员的共同责任。

实践表明,装备可靠性与装备的结构组成、受载荷应力、所处使用环境因素有关。因此,可靠性工作涉及系统可靠性问题和产品可靠性问题。系统可靠性主要解决系统各组成单元的协调、匹配、优化等方面的问题,通过开展系统可靠性分析、分配、评估等工作,优选各组成单元,确保满足系统可靠性要求;而产品可靠性主要解决满足系统总体分配下达的可靠性指标要求,这部分产品通常是外协配套产品,可靠性水平普遍偏低。

实现部队用户提出的可靠性指标要求,需要装备研制总体和配套单位共同努力。目前,整个型号队伍需要一本切合实际的实用性强的指导书。

本书得到装备科技译著出版基金资助,不仅提供了可靠性评估所用的方法和技术,而且还给出了大量的故障数据分析建模的案例。本书作者有35年从事可靠性分析评估工作的经验,清楚知道读者需要的知识和方法。

希望本书的引进、翻译和出版能对提高我国武器系统可靠性水平起到积极的促进作用,也希望广大的设计开发人员、试验人员、保障人员加强最佳实践的积累、研究和应用,加强交流,不断总结出我国武器系统可靠性工程的实践成果。

中国兵器工业集团公司中国北方车辆研究所积极吸收借鉴国外先进可靠性理论

与实践,翻译团队能够正确理解原书英文核心要义,翻译专业水平高、翻译质量高。希望相关部门加强可靠性技术应用,为我国设计开发出高可靠性、易维修、好保障的武器系统,为实现强军目标作出更大贡献。



2018年3月

译者的话

随着装备复杂程度提高,为了减少试验经费,缩短研制周期,充分利用各种试验信息对产品的可靠性进行评估,成为可靠性工作中不可或缺的一环。可靠性评估是利用产品各类故障数据用概率统计的方法给出产品在某一特定条件下的可靠性特征参数的估计值,对于不同的产品需要根据产品特点建立数据统计模型,模型的优劣直接影响评估结果的精度。目前国内外对于评估模型的建立开展了大量的研究工作,以学校、科研院所为主对机械类产品、电子类产品、光学产品等不同类型产品的建模评估方法进行研究,发表了大量的论文、专利,但是在可靠性评估方面的书籍以《可靠性维修性保障性技术丛书》为主,对于如何将可靠性评估的理论方法运用在工程中的案例多以论文形式发表,针对工程中各类故障数据的评估过程和方法的书籍相对较为缺乏。

本书对于可靠性评估的多种模型进行了基础理论的介绍,并将基础理论与工程实际案例相结合,为产品可靠性设计分析人员提供了大量的分析实例。本书的翻译出版将填补国内的空白,对广大工程设计人员具有很强的指导作用。

本书共 80 章,第 1、2 章、第 61 至第 68 章由刘勇翻译,第 3 至第 5 章、第 69 至第 75 章由冯付勇翻译,第 6、7 章、第 76 章至第 80 章由刘树林翻译,第 8 至第 10 章由柳月翻译,第 11 至第 20 章由伊泉剑翻译,第 21 至第 30 章由焦娜翻译,第 31 至第 40 章由周妍翻译,第 41 至 50 章由赵品旺翻译,第 51 至第 60 章由鲍珂翻译。全书由刘勇、伊泉剑审校。刘勇、刘树林、周妍负责全书的翻译策划、统稿工作。

本书在版权引进和出版过程中,得到了装备科技译著出版基金的资助,在此表示衷心的感谢。

由于译者和审校者水平所限,有些翻译语句可能不够顺畅,错误和不当之处在所难免,敬请读者批评指正。

译者

2018 年 3 月

原 书 前 言

关于通过故障数据的统计建模进行可靠性评估的书籍有很多。有些用到数学方面的知识,针对特殊的读者;有些是入门性的,涉及的内容面面俱到。这些书都提供了有用的指导和见解。本书参考了这两类中的知名书目,因此在内容上不想再包罗万象,除非有必要,也不想涉足别人已经充分论述的内容。

对于从事可靠性评估时间比较短的科学家和工程师,就像本书作者在 20 世纪 80 年代初期那样,需要一本详细论述每个可靠性工程师都应该了解的几个基本问题的书。当时,本书作者在 AT&T 贝尔实验室开始研究用于第一个海底光纤电缆系统的器件的可靠性,该系统要保证 25~30 年的使用寿命。作者就希望有一本这样的书。

本书第一部分内容集中于一些基础知识。作者认为,这些方面需要更加细致、全面的对待,并在表述方式上让人乐于接受。在对可靠性的评估和保证进行全面的概述后,这些方面包括随机性的概念及其与无序的关系、二项式和泊松分布的用途和局限性、卡方曲线和泊松曲线的关系,以及指数模型、Weibull 模型和对数正态模型的派生和应用。由于人的死亡率浴盆曲线是技术器件浴盆曲线的模型,因此,通过数据和模型对两者都进行了详细讨论。

本书第二部分首先介绍故障数据的案例建模。首先对 5 组理想的 Weibull、对数正态和正态故障数据进行了分析,然后分析了 83 组真实(实际)的故障数据,其结果在第 8 章中进行了概括。这些案例研究是基于十几本著名的可靠性书籍中找到的故障数据,目的是通过统计寿命模型(主要是 Weibull 分布、对数正态分布和正态分布)来寻找对故障数据的最佳描述,用于在实验室或外场试验中表征发生故障的时间、循环、里程的故障概率分布。通过选择使用目视检查和三次统计拟合优度测试的组合,在故障概率图中给出最佳直线拟合的双参数模型,凭经验确定提供优选表征的统计模型。模型选择的总结如下所示。

83 组故障数据的模型选择的汇总

数据 \ 模型	LN	N	W	Mix	Ex	G	3pW	总计
数量	44	14	10	10	2	2	1	83
百分比/%	53.01	16.87	12.05	12.05	2.41	2.41	1.20	100

具有代表性的模型有:对数正态模型(LN),正态模型(N),Weibull 模型(W),混合 Weibull 模型(Mix),指数分布(Ex),Gamma 分布(G),三参数 Weibull 分布

(3pW)。

从这些分析中获得的一个意外发现是, Weibull 模型似乎不足以作为选择的模型, 特别是对于绝缘的击穿、碳纤维断裂和金属的疲劳失效, 而原来一般都选它来进行适当的描述。虽然对数正态模型经常受到轻视, 认为不适合于描述故障数据, 但在超过一半的案例中被认为是首选的, 并且与 Weibull 模型相比, 被选中的可能性似乎要高 4 倍。

对于 84% 的数据集, 双参数 Weibull 模型、对数正态模型、正态模型或 Gamma 模型给出了充分的特征描述; Weibull 混合模型占其余的 12%。相对而言, Weibull 模型和正态模型是首选。单参数指数模型描述了两组。只有一种情况下, 三参数 Weibull 模型的描述优于双参数对数正态模型描述。

对数正态模型在 83 组实际故障数据分析中的成功表明, Weibull 模型作为首选模型的传统偏好似乎缺乏有说服力的经验论证, 而且也缺乏理论基础, 正如所公认的那样, “无论如何, 期望理论依据是随机变量的分布函数, 如材料的强度属性……”。在分析故障数据时, “唯一可行的方法是选择一个简单的函数, 经验性地进行测试, 只要没有更好的发现, 就坚持下去”。这是在第二部分的分析中遵循的建议。没有发现适合描述所有故障数据的双参数模型。

参考文献

- [1] Samuel Johnson, An allegory of criticism, Essays of Samuel Johnson, The Rambler, 8-12, March 27, 1750, Kessinger Publishing.
- [2] W. Weibull, A statistical distribution function of wide applicability, J. Appl. Mech., 18, 293-297, September 1951.

原 书 致 谢

在我从事可靠性问题研究的几十年里,通过与同事的对话交流常常都会产生有价值的见解。虽然这些见解被记住了,但是提出相关问题或者提供独到观察的人已被遗忘。

可靠性评估贯穿了我的两次职业经历。第一次是在 AT&T 贝尔实验室,那是在 20 世纪 80 年代初期,我和同事们——其中很多人刚接触这个领域——的任务是评估计划用于第一个跨大西洋的海底光纤电缆系统的器件的可靠性,该系统的规定寿命为几十年。

对于在接下来的 20 年期间获得的教育,我非常感谢贝尔实验室的同事们,他们是:格雷格·布鲁尔(Greg Bubel),乔治·朱(George Chu),芭芭拉·迪恩(Barbara Dean),格斯·迪凯斯(Gus Derkits),迪克·狄克逊(Dick Dixon),鲍勃·伊斯顿(Bob Easton),汤姆·艾丁罕(Tom Eltringham),吉恩·戈登(Gene Gordon),巴兹尔·哈基(Basil Hakki),鲍勃·哈特曼(Bob Hartman),比尔·乔伊斯(Bob Joyce),鲍勃·库(Bob Ku),迈克·卢瓦利(Mike LuValle),莱斯利·马丘特(Leslie Marchut),乔恩·派利克(Jon Pawlik),斯科特·派萨克(Scott Pesarcik),约翰·罗文(John Rowan),鲍勃·索尔(Bob Saul),沃尔特·斯拉萨克(Walt Slusark),汤姆·斯塔克伦(Tom Stakelon),比尔·桑伯格(Bill Sundberg),伯克·斯文(Burke Swan),查理·惠特曼(Charlie Whitman),丹·威尔特(Dan Wilt)。不过,历史并没有遗忘这个时期我的导师比尔·乔伊斯(Bill Joyce)的真知灼见。

我的第二次职业经历是在朗讯、阿尔卡特和 LGS 公司,在前后十几年的时间里,从事的领域从海底到太空,但涉足的都是非常相似的可靠性问题。我要感谢我的同事和其他帮助我加深对可靠性理解的人:乔·阿巴特(Joe Abate),弗兰·奥瑞秋(Fran Auricchio),林·巴奥(Ling Bao),琳达·布劳恩(Linda Braun),凯文·布鲁斯(Kevin Bruce),内莎·凯里(Nessa Carey),格斯·迪凯斯(Gus Derkits),迪克·杜思特伯格(Dick Duesterberg),尼罗伊·杜塔(Niloy Dutta),乔恩·艾塞尔伯特(Jon Engelberth),罗恩·恩斯特(Ron Ernst),道格·霍尔科姆(Doug Holcomb),弗洛伊德·赫维斯(Floyd Hovis),保罗·雅各布森(Paul Jakobson),吉姆·杰奎斯(Jim Jaques),凯文·拉斯卡拉(Kevin Lascola),迈克·卢瓦尔(Mike Luvalle),阿肖克·马利阿卡(Ashok Maliakal),萨姆·梅娜莎(Sam Menasha),米尔特·奥林(Milt Ohring),梅勒妮·奥特(Melanie Ott),阿尔·皮西里利(Al Piccirilli),雷迪·拉朱(Reddy Raju),莱斯利·莱特(Leslie Reith),亚历克斯·罗斯威茨(Alex Rosiewicz),维克托·罗森

(Victor Rossin), 尼克·萨鲁克(Nick Sawruk), 布拉德·斯科特(Brad Scott), 杰伊·斯基德莫尔(Jay Skidmore), 沃尔特·思拉萨克(Walt Slusark), 马克·斯蒂芬(Mark Stephen), 查理·惠特曼(Charlie Whitman)和汤姆·伍德(Tom Wood)。

我要特别感谢汤姆·埃尔林格汉姆(Tom Eltringham), 他的鼓励和坚定的支持以及在图表、绘图、排版格式方面的帮助才使本书得以完成。他仔细阅读了第1章并提出意见, 以此进行了一些重要的澄清和更正。

感谢鲍勃·阿伦斯(Bob Ahrens), 史蒂夫·卡伯特(Steve Cabot), 罗恩·卡马达(Ron Camarda), 汤姆·埃尔林格汉姆(Tom Eltringham), 托尼·菲尔茨(Tony Fields), 阿尔·皮西里利(Al Piccirilli), 迈克·桑托(Mike Santo)和蒂姆·索霍尔(Tim Sochor), 他们帮助我学会用计算机进行文字处理和解决一些计算机方面的问题。在使用 Reliasoft™ 软件方面, 戴夫·戈贝尔(Dave Groebel)和萨姆·艾森伯格(Sam Eisenberg)给予的帮助及时而且专业。

感谢巴伦·布朗(Baron Brown)和瑞恩·布莱萨德(Ryan Bleezarde)在信息技术方面长期善意和无与伦比的支持。乔·萨瑞利(Joe Zarrelli)完成了从 Windows 2003 到 Windows 2007 的转换, 且无懈可击。

感谢 LGS 创新公司副总裁琳达·布劳恩(Linda Braun)在本书编写过程中给予的持续支持。

感谢 LGS 创新公司的所有同事, 包括上面没有提到的。感谢本书出版的协调人苏珊·霍夫曼(Susan Hoffman)。感谢迈克尔·贾森(Michael Garson)提出的宝贵意见。

在借用书籍和检索发表的杂志文章方面, 约瑟夫·厄利(Joseph Earley)和多萝茜·梅森(Dorothy Mason)提供了不可或缺的帮助。版权处理中心也提供了相应的帮助。

特别感谢六位评议员向 CRC 出版社推荐我的书并提出有益的意见, 感谢辛迪·卡雷利(Cindy Carelli), 劳里·鄂霍次克(Laurie Oknowsky)以及朱迪斯·西蒙(Judith Simon)在出版过程中提供的指导性建议。

作者简介

Franklin R. Nash 目前任职于 LGS 创新公司,他获得理工大学及哥伦比亚大学学士学位(物理)和博士学位(物理),先后在 AT&T 贝尔实验室、朗讯科技公司贝尔实验室、杰尔系统、朗讯科技/ LGS、阿尔卡特-朗讯/ LGS 和 LGS 创新公司工作了 52 年。曾从事海底光纤电缆系统用的半导体激光器和探测器的可靠性评估 20 年,后又从事高功率半导体多模激光器、激光模块和用于航天的无源光学元器件的可靠性评估 15 年。Nash 是《估计器件的可靠性:可信度的评估》(Estimating Device Reliability: Assessment of Credibility)一书的作者,该书由 Kluwer 学术出版社于 1993 年出版。他曾 9 次在每年召开的光纤通信大会上举办有关可靠性的讲座,每次历时 3 小时。他还撰写并发表了 45 篇期刊文章。

目 录

第一部分 概念和模型

第 1 章 可靠性评估概述	1
1.1 质量与可靠性	1
1.1.1 质量	1
1.1.2 可靠性(长寿命和鲁棒性)	1
1.1.3 寿命	2
1.1.4 鲁棒性	3
1.1.5 关于鲁棒性试验的注意事项	3
1.1.6 可靠性是长寿命和鲁棒性	4
1.2 故障的描述	4
1.2.1 故障模式和故障机理	4
1.2.2 突发故障(与事件有关)	5
1.2.3 突发故障(与时间有关)	5
1.2.4 渐变退化故障(与时间有关)	5
1.2.5 潜在缺陷故障	5
1.3 故障物理学	5
1.3.1 第一阶段:故障模式分析	6
1.3.2 第二阶段:消除或减轻故障的根本原因	6
1.3.3 第三阶段:故障概率的定量估计	8
1.3.4 PoF 实例:灯泡	9
1.4 确定性的可靠性建模	11
1.5 经验可靠性模型	12
1.5.1 单应力加速模型:Arrhenius 模型	12
1.5.2 单应力加速模型:Coffin-Manson 模型	13
1.5.3 双应力加速模型:热应力和非热应力	15
1.5.4 双应力加速模型:热应力和非热应力相关	16
1.6 评估可靠性的方法	16
1.6.1 外场使用	16
1.6.2 使用条件下的实验室老化	19

1.6.3 加速老化实验室试验	20
1.7 可靠性估计值的可信度	22
1.7.1 可信度:基于现场返修故障的估计	22
1.7.2 可信度:实验室样本、老化和建模	23
1.7.3 两个例子	24
1.7.4 关于可靠性评估的补充述评	26
1.8 降额和冗余	27
1.8.1 例子:降额和冗余同时使用的仿真算例	28
1.9 故障分类	29
1.9.1 浴盆曲线	29
1.9.2 正常故障(耗损)	30
1.9.3 非正常故障(早期缺陷和故障)	31
1.10 可靠性保证工作中的各阶段	33
1.10.1 预先合格鉴定	33
1.10.2 验证(通过筛选的可靠性)	39
1.10.3 合格鉴定	42
1.10.4 监察	43
1.10.5 再次合格鉴定	43
附录 1A:例——光检测元件老炼	44
参考文献	45
第2章 随机性的概念	50
2.1 随机、确定性和不规则(CHAOS)	50
2.1.1 随机	50
2.1.2 随机性与确定性:混合的情况	51
2.1.3 确定论	52
2.1.4 不规则(chaos)	52
2.2 可靠性中的随机概念	62
2.2.1 例 2-1:灯泡失效	62
2.2.2 例 2-2:原子核和原子的自发放射	63
2.2.3 例 2-3:掷硬币(“最后一个站着的人”)	63
2.2.4 例 2-4:假定的电阻失效	65
2.2.5 例 2-5:假定的电容失效	66
2.3 随机的和有代表性的样本	68
参考文献	68

第3章 概率与抽样	71
3.1 概率定律简介	71
3.2 概率定律	71
3.3 二项式分布	72
3.3.1 示例:购买5个轮胎	73
3.3.2 上限和置信水平	74
3.4 泊松分布	81
3.4.1 示例:购买5个轮胎	82
3.4.2 上限和置信水平	82
3.5 使用泊松近似法的局限	84
3.6 示例:比特错误率的范围	88
3.7 示例:卡方法	90
附录3A:由 N 个单元组成的系统的失效概率的范围	91
参考文献	92
第4章 可靠性函数	93
4.1 引言	93
4.2 可靠性函数	93
4.2.1 生存函数	93
4.2.2 故障函数(CDF)	94
4.2.3 概率密度函数	94
4.2.4 故障率	95
4.3 平均故障率	96
4.4 故障率单位	97
4.5 竞争风险模型	98
4.6 混合分布模型	100
4.7 竞争风险混合模型	101
4.8 可靠性函数关系总结	102
4.8.1 给定 $f(t)$	102
4.8.2 给定 $F(t)$	102
4.8.3 给定 $S(t)$	102
4.8.4 给定 $\lambda(t)$	103
参考文献	103
第5章 可靠性模型:指数模型	105
5.1 引言	105

5.2 指数模型	105
5.3 指数模型应用:不可修产品	107
5.3.1 案例 5-1:汽车轮胎故障	107
5.3.2 案例 5-2:记录错误	108
5.3.3 案例 5-3:放射性衰变和自发辐射	109
5.3.4 案例 5-4:冲击故障	109
5.4 指数模型应用:可修产品	111
5.4.1 案例 5-5:巴士发动机故障	112
5.4.2 案例 5-6:灯泡故障仿真	112
5.4.3 案例 5-7:轮胎故障仿真	112
5.5 指数模型推导	114
5.5.1 放射性衰变观测	114
5.5.2 机会法则	115
5.5.3 齐次泊松过程	115
5.5.4 量子化学	117
5.5.5 系统故障观测	118
5.6 案例:零故障老化试验置信上限估计	118
5.6.1 指数模型在零故障加速老化试验中的应用	118
5.6.2 Weibull 模型在零故障加速老化试验中的应用	122
5.6.3 指数模型和使用环境下的零故障老化试验	124
5.6.4 指数模型和现场环境下的零故障老化	124
5.7 案例:部分故障老化试验置信上限估计	125
5.7.1 零故障($n=0$)	125
5.7.2 一个样本故障($n=1$)	126
5.7.3 多个样本故障($n>0$)	127
5.8 零故障($n=0$)点估计	128
5.8.1 方法一	128
5.8.2 方法二	129
5.9 无记忆性	129
5.10 指数模型在耗损型故障产品中的近似应用	130
附录 5A:边界热激活能	130
参考文献	131
第 6 章 可靠性模型:Weibull 模型和对数正态模型	134
6.1 引言	134
6.2 Weibull 模型	134

6.2.1 Weibull 模型的一些应用	136
6.2.2 Weibull 模型的数学性质	137
6.3 对数正态模型	139
6.3.1 对数正态模型的一些应用	140
6.3.2 对数正态模型的数学根据	140
6.3.3 对数正态型耗损:平均寿命延长	145
参考文献	146
第7章 人类和组件的浴盆曲线	150
7.1 人类死亡浴盆曲线	150
7.2 人类死亡统计学	150
7.3 人类死亡浴盆曲线举例	151
7.4 人类死亡寿命的对比解释	154
7.5 人类和其他生物的统计寿命模型	155
7.6 人类死亡的 Gompertz 模型:估计实例	155
7.7 人类死亡率的回归模型:估计实例	158
7.8 人类死亡的 Weibull 模型:估计实例	162
7.9 蠕虫死亡率回归模型(1):估计实例	162
7.10 蠕虫死亡率 Weibull 模型(2):估计实例	164
7.11 Gompertz 模型和高龄非老化(Late-Life Nonaging):解释实例	165
7.12 Logistic 模型和高龄非老化:解释实例	166
7.13 寿命不一致性以及高龄非老化	167
7.13.1 表观遗传:寿命不一致的潜在原因	167
7.13.2 表观遗传:寿命不一致性试验	168
7.14 组件浴盆曲线	169
7.15 组件浴盆曲线建模	171
7.16 经验浴盆曲线案例	175
7.16.1 案例 7-1:机械系统	175
7.16.2 案例 7-2:真空管	176
7.16.3 案例 7-3:CMOS 集成电路阵列	177
7.16.4 案例 7-4:非霍奇金淋巴瘤	178
7.16.5 结论:经验浴盆曲线	179
7.17 传统浴盆曲线的三大区域	179
7.17.1 寿命初期的故障(早期故障和畸形故障)	179
7.17.2 工作或使用寿命阶段:恒定故障率模型	189
7.17.3 耗损阶段	192

7.18 人类和组件的故障率..... 200

参考文献..... 200

第二部分 案例研究

第8章 故障数据建模介绍..... 206

8.1 概述 206

8.2 统计学建模的动机 206

8.2.1 早期故障消除 206

8.2.2 安全寿命或故障树间隔估计 207

8.2.3 质量控制 208

8.3 统计学寿命模型 208

8.4 双参数模型选择 209

8.4.1 不受早期故障影响的数据 210

8.4.2 受早期故障影响的数据 210

8.4.3 结果对剔除的敏感性 212

8.5 三参数模型选择 218

8.5.1 示例 1:具有阈值的理想 Weibull 分布 219

8.5.2 示例 2:具有阈值的仿真 Weibull 分布 220

8.5.3 示例 3:镍金属丝疲劳 222

8.5.4 示例 4:焊接疲劳 223

8.5.5 示例 5:电迁移故障..... 224

8.5.6 示例 6:拒绝利用三参数 Weibull 模型的原因 225

8.6 Weibull 混合模型 226

8.7 相似模型描述 227

8.7.1 Weibull 模型和正态模型 227

8.7.2 对数正态模型和正态模型 230

8.8 故障阈值或安全寿命的估计 231

8.9 模型参数的估计 231

8.10 统计学拟合优度检验..... 232

8.11 样本大小的限制..... 233

8.11.1 仿真 1 233

8.11.2 仿真 2 237

8.11.3 仿真 3 243

8.11.4 仿真研究结论概述 244

8.12 解释的限制..... 244