

WILEY

可靠性工程

(第2版)

RELIABILITY ENGINEERING (SECOND EDITION)

【美】ELSAIED A. ELSAYED 著
杨舟 译
康锐 审校



电子工业出版社
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY
<http://www.phei.com.cn>

可靠性工程

(第2版)

RELIABILITY ENGINEERING
SECOND EDITION

[美] ELSAYED A. ELSAYED 著

杨舟 译

康锐 审校

电子工业出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京·BEIJING

内 容 简 介

本书是美国 Rutgers 大学 ELSAYED A. ELSAYED 教授编著的一本系统性阐述可靠性工程的专著, 本书为第 2 版。书中系统地介绍了从设计、评估到使用实际工程中各个环节的可靠性问题, 作者在第 1 版的基础上加入了大量最新的研究成果, 并将自己对可靠性领域的理解融入其中, 对理论和工程问题进行了梳理, 使之形成了一套完整的体系。书中按照如何对一个产品或一种服务开展可靠性工程进行叙述, 其内容依次为: 第一部分介绍了时间相关和时间无系统可靠性模型, 包括模型的定义、分析、计算等内容; 第二部分介绍了获取部件可靠度的方法, 涵盖了参数模型和非参数模型的可靠度计算, 并引入了加速试验理论; 第三部分主要介绍产品在使用阶段的可靠性问题, 如计算失效数的不同方法、保修期问题及优化维修和检测策略; 最后给出了 10 个实际工程案例作为参考。

Reliability Engineering, 978-1-118-13719-2, ELSAYED A. ELSAYED

Copyright © 2012 by John Wiley & Sons, Inc.

All rights reserved. This translation published under license.

No part of this book may be reproduced in any form without the written permission of John Wiley & Sons, Inc.

本书中文简体中文字版专有翻译出版权由美国 John Wiley & Sons, Inc. 公司授予电子工业出版社。未经许可, 不得以任何手段和形式复制或抄袭本书内容。

版权贸易合同登记号 图字: 01-2013-0763

未经许可, 不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。
版权所有, 侵权必究。

图书在版编目 (CIP) 数据

可靠性工程: 第 2 版 / (美) 赛义德 (Elsayed, E. A.) 编著; 杨舟译. —北京: 电子工业出版社, 2013.8

书名原文: Reliability Engineering, Second Edition

ISBN 978-7-121-21021-1

I. ①可… II. ①赛… ②杨… III. ①可靠性工程 IV. ①TB114.3

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2013) 第 162465 号

策划编辑: 陈韦凯

责任编辑: 张 京

印 刷: 三河市鑫金马印装有限公司

装 订: 三河市鑫金马印装有限公司

出版发行: 电子工业出版社

北京市海淀区万寿路 173 信箱 邮编 100036

开 本: 787×1 092 1/16 印张: 33.75 字数: 864 千字

印 次: 2013 年 8 月第 1 次印刷

印 数: 3 000 册 定价: 78.00 元

凡所购买电子工业出版社图书有缺损问题, 请向购买书店调换。若书店售缺, 请与本社发行部联系, 联系及邮购电话: (010) 88254888。

质量投诉请发邮件至 zltz@phei.com.cn, 盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

服务热线: (010) 88258888。

译者序

产品可靠性是衡量一个国家工业化发展程度的重要度量。小到生活用品，大到航空航天产品，都与其息息相关。美国在 20 世纪 60 年代由军方发布的 AGREE 报告，第一次把可靠性作为一个工程专业，至今已经发展出许多重要的理论和技术成果，一步步取得了许多举世瞩目的成就。但可靠性工程还属于较为“年轻”的领域，在理论基础和技术手段上还有很大的发展空间，因此近年来呈现蓬勃发展的势头。

美国罗格斯大学 (Rutgers, New Jersey State University) 工业工程系 (Department of Industrial and Systems Engineering) 在可靠性领域有着非常坚实的基础，其中以 E. A. Elsayed 教授为代表，在系统建模、加速试验、维修优化等方面做出了杰出的贡献。本书是其有代表性的专著之一，有着知识覆盖面广、兼顾工程应用和学术研究、可读性强的特点。这也使得本书第一版获得了 1990 年美国工业工程师学会 (Institute of Industrial Engineers) 的年度最佳书籍奖。

E. A. Elsayed 教授与北京航空航天大学可靠性与系统工程学院有着深厚的友谊和长期的合作，并于 2012 年春季承担学院研究生专业必修课程《可靠性工程基础》的教学任务。在授课期间，本书初稿作为教学材料在课堂上使用，收到了良好的效果。本着与国际接轨、将一流可靠性专著引入国内的理念，康锐教授与 Elsayed 教授商议将本书由我进行翻译，这是本书中文版的由来。

在此特别感谢康锐教授对本书翻译工作的指导和支持，他的最终审定使得本书的译著质量得到保证；感谢李晓阳副教授对本书第 6 章的翻译和校对；感谢研究生陈红霞（第 7 章、第 10 章）、李梓（第 1 章、第 10 章）、廖寻（第 8 章）、王文雨（第 9 章）、井海龙（第 5 章）、郑屹（第 2 章）、崔梦曦（第 3 章）同学对本书翻译工作的参与和贡献，极大地减轻了我的翻译和校对工作量。我在罗格斯大学作为联合培养博士生学习期间，对本书的译稿又做了一次全面的订正，至此本书的翻译工作最终完成。再此，特别感谢 Elsayed 教授对我的各种帮助。

杨舟

中文版序

过去的 15~20 年间,中国经济显著发展,特别是在工业制造领域,许多外国公司将生产制造部门转移到了中国。这些新技术的涌入,以及对劳动力的训练,形成了生产可靠性问题。中国工业制造业已认识到提高产品质量和可靠性的重要性,一些相关的学术会议、研讨会及学术课程相应地蓬勃发展。我有幸对中国的一些高校进行了短期的访问和教学。2011 年我在北京航空航天大学教授研究生课程《可靠性工程基础》并与许多学生和教师进行了交流,建立了讨论和合作的学术环境。可靠性与系统工程学院的康锐教授、张书农博士及杨舟博士对本书的中文版翻译做出了努力。我深知翻译是一件非常辛苦的事情,我也相信他们非常出色地完成了翻译工作。我在此感谢他们的提议及努力,特别感谢中国学生对本书提出了挑战性的问题并对书的原稿给出了反馈。

E. A. Elsayed
Piscataway, New Jersey

前 言

可靠性是组件、产品及复杂系统最重要的质量属性之一。可靠性在日常生活中承担着重要的角色，几乎无时无刻不在我们身边：当我们发动汽车时，打电话时，使用打印机、计算机和传真机时。所有这些情况，我们都希望所使用的产品能随时提供所需要的功能。当然你肯定会碰上产品无法提供功能的情况。

工程师们在产品设计和制造阶段花费大量的时间和资源来确保产品及系统能提供所希望的功能。为此，工程师开展了一系列工作，如产品设计、组件选择、功能测试、可靠性测试。产品设计需要进行反复的修改以达到设计目标，在设计修改之后还要重新对其进行上述一系列工作直到满足需求。

产品设计需要在其中加入组件（或子系统）冗余，引入新研发的组件，或者对产品设计进行改变。这些都会对产品的可靠性产生较大的冲击。

本书是一部关于工程可靠性的书籍。其谋篇布局根据的是设计一个产品或提供一种服务的逻辑流程。第一部分着重讨论了时间相关及时间无关系统可靠度的估计。其中第1章介绍了可靠度的基本定义、度量及其计算方法，并将其扩展到了不同的失效函数。第2章详细描述了一系列不同系统的可靠度计算方法，其中包括串联、并联、串-并联、并-串联、连续 k/n 及复杂网络系统。本章也强调了存在多状态部件的系统，同时总结了冗余系统的可靠度评估及冗余分配问题。在产品下一步设计时，必须研究系统可靠度随时间影响的变化。因此，第3章细致讨论了时间及失效相关的可靠度，以及不同系统的平均失效时间（MTTF）的计算方法，同时引入了可用度作为可修系统可靠性的一种度量。

一旦设计固化，工程师便可将组件按照系统配置进行组装以满足系统可靠度目标。这需要对组件进行可靠性试验或对相似产品收集外场数据。所以，本书第二部分，从第4章开始提出了构建似然函数的概念，这将用于预计失效时间分布的参数。第5章综述了参数及非参数的失效数据的可靠度模型，提供的扩展案例和方法可以帮助工程师合理地对试验数据进行建模。另外，还对模型参数的置信区间进行了讨论。更重要的是，本书利用第6章对加速寿命试验进行了详细介绍，主要目标是将加速情况下得到的失效数据与正常产品工作情况联系起来，为此提供了不同的统计模型、物理-统计模型、物理-试验模型。Reliability Analysis Software 作为一个有力的可靠性软件可以提供可靠度预计、失效时间分布，以及本书第5、6章所提到的一系列加速寿命模型。

最后，当产品生产并销售出去的时候，制造商必须提供预防性或计划性维修和保修政策以保证产品可靠性。本书第三部分关注于这些题目。从第7章开始介绍不同的方法（精确的及近似的）来估计在一定时间内的产品预计失效数。第8章将这些预计失效数用于制定产品不同的保修策略，这包括保修期长度及保证金。第9章讨论了优化预防性维修计划及优化检测策略，这需要预计库存水平的方法及确保预先制定的可靠度目标。

第10章对本书进行了总结。本章提供了实际的案例，这些案例将本书介绍的思想及方法运用于解决实际问题中。这些方法特别强调了产品及系统设计阶段可靠度的作用。

本书的理论推导都附带了一个对其进行应用的工程案例；并且，每章最后都增设了许多

习题，本书的这两个特点增加了可用性。另外，本书可以作为工业系统、机械、电子工程专业本科生或研究生的一个或两个学期的课程资料，也可以用于统计专业学生寿命数据分析的相关课程。

本书需要读者有概率统计及微积分的知识作为背景。

致 谢

对这本书有贡献的不仅限于作者，还包括书中所引用文献的作者。我尽力希望对所有影响这本书的作者给予恰当的感谢。特别感谢电气和电子工程师协会（IEEE）、CRC 出版社、数学统计协会（IMS）、美国机械工程师协会（ASME）、Simens 公司、Electronic Products 杂志及 Elsevier Applied Science 出版社，对本书提供了插图及附录中的表格。

在此，感谢韩国国立庆尚大学（Gyeongsang National University）的 Jai-Hyun Byun 教授对本书初稿不知疲倦的多次阅读。同时，也感谢以下教授对本书的反馈及贡献：罗格斯大学（Rutgers, New Jersey State University）的 Hoang Phan；AT&T bell 实验室的 Mike Tortorella；巴西南大河州联邦大学（Federal do Rio Grande do Sul）的 Jose L. Ribeiro 对本书第 5、6 章的内容开发了软件 Reliability Analysis Software；堪萨斯医学中心（Kansas Medical Center）的 Khatab Hassanein 推导了 Rayleigh 分布参数估计的方法，并提供了附录 B 和附录 C 中的计算结果；麦克马斯特大学（McMaster University）的 N. Balakrishnan 为对数 logistic 分布提供了输入素材；罗格斯大学的 William Mayo 对案例 3 提供了帮助；4 位匿名的评阅者；西密歇根大学（Western Michigan University）的 L. Lamberson；我的同伴，华盛顿大学（Washington University）的 K. Kapur 对本书给予了许多中肯的评价，从而最终使本书得以成型。

我想感谢 Rutgers 大学工业工程系的学生，他们在过去十年中使用了本书的早期简短的版本，并为此书提供了非常有价值的素材。感谢我的妻子 Linda 辛勤花费了许多的时间小心翼翼地 将本书的草稿输入计算机，感谢 Cindy Ielmini 和 Doris Clark 对本书的修改稿进行输入。感谢 Joe Lippencott 和 Aladdin Elsayed 编写了程序及绘制了表格。

将特别的谢意留给我的妻子 Linda，她细致地对本书的草稿进行编辑；也感谢我的孩子们的耐心和理解。

E. A. Elsayed
Piscataway, New Jersey

序 言

“执事的杰作，神奇的单马马车”是一个完美描述产品可靠性设计概念的故事。故事一开始就定义了所需要提供的产品和服务的目标。接着给出了系统可靠性结构及对组件、子系统的选择，并对所构建出来的产品原型进行了测试，再对组件的失效数据进行收集和分析。最后对产品进行再设计和再测试，直到可靠性目标得以满足。以下优美的叙述描述了这些环环相扣的步骤。

“执事的杰作，神奇的单马马车”^① 一个可靠性设计逻辑的故事

I. 系统目标及结构

你可曾听说过一辆神奇的马车，
它以如此的逻辑建造，
在那个百年一遇的雨天，
突然间，雨却停了，
我将毫不犹豫地告诉你发生了什么，
这吓得牧师失了方寸，
这惊得人们丢了魂魄，
我说啊，你们可曾听过这样的传说？

当一千七百又五十五年，
当乔治·塞孔都斯^②还在世，
这个讨厌的流浪汉从嘈杂的德国而来，
当里斯本城从废墟中开始重建，
当布拉德克^③的军队一败涂地，
当头上的王冠被胜利者带走，
就在那一天发生了可怕的地震，
就在那一天执事^④做成了一辆马车。

① Oliver Wendell Holmes, “The Deacons Masterpiece”, 出自 *The Complete Poetical Works of Oliver Wendell Holms*, 第四版, 1908 年由 Houghton Mifflin 公司出版。

② George Secundus (1683—1760) 又称乔治二世, 在 1727—1760 年任英格兰国王。其统治时期在美国殖民地与法国人作战, 他来自德国汉诺威公国, 被认为偏爱德国而不是不列颠及其殖民地。殖民者在独立战争期间赢得了与其继承人乔治三世的战争。

③ Gen. Edward Braddock (1695—1755), 1755 年 9 月他带领的军队在迪尤肯城堡附近被印第安和法国联军袭击, 过半军队损失, 本人被杀, 头颅被切, 作为印第安人的战利品。

④ 教堂的神职人员, 是牧师的助手。

II. 系统目标及结构

Homes 在这首诗的前言中写到：无论什么时候观察到的机理都会发生。对于一架马车而言，其薄弱点是车轴与轮轴中心的结合部分。如果一架马车损坏，十有八九，我认为都是这个部分出现了问题。工人应该永远关注这个容易失效的部分，再接着寻找下一个薄弱部分，如此这般，直到有条理地完美完成所交代的工作。

建造一架马车，我要告诉你，
总有那么一个地方叫做薄弱环节，
在轮轴、轮胎、轮圈，在弹簧或车把，
在车板、横木，在地板或窗板，
在螺钉、螺栓、皮带，它们静静地潜伏，
你必须把它们找出来，
从上到下、从里到外，
这就是为什么，毫无疑问，
一架马车会出故障，而不会耗尽。

但是执事发誓（他总是笨拙地说“我花四”），
他会建造一架无可比拟的单马马车，
无论在全城还是全国，
这辆马车永远不会出故障！

“皮毛”执事说，
要非常平，薄弱的部分一定要使劲儿拉紧；
维护的方式，就是保养，
这是唯一让这个地方跟其他部位一样结实的办法。

III. 系统再设计

接着执事向村民询问，
哪里能找到最坚硬的橡木，
既不会劈叉，也不会弯曲，还不会断裂，
拿它做车轴、地板和窗台；
他找来了箭杆木做车辕；
找来了最直的树木做出了灰色的门把，
找来切得像奶酪一样的白木做车面板，
但是像钢一样不朽的材料就是这样的；
找来了移民们的榆木做轮毂，
他们永远猜不出木头能坚持多久，
没有一个斧头能让木头有缺口，
楔子从两端飞出，
弯曲的底部如同卷起的芹菜尖；
垫脚和铁柱、螺栓和螺钉，

弹簧、轮胎、轮轴和车栓，
用最精细的铁做出，又亮又蓝；
水牛皮做的皮带，又厚又宽；
车厢、车顶、挡泥板，由坚硬的老兽皮做出，
这是在死去的老制革工人那里找到的。

在他推车出来的路上，
“那儿！”执事说，“现在做好了。”
我告诉你，我愿意猜测，
这马车是个奇迹，毫无疑问！

小雄马长成大马，胡子退成了灰色，
执事和他的夫人去世了，
儿子和孙子们，他们在哪儿？
但是单马马车依然在那儿，
新得就像里斯本地震那天一样！

IV. 系统运行阶段的检测

1800年马车依然还在，
执事的杰作结实远名扬。
1800过了十年，
人们叫它“漂亮马车”。
1800过了二十年，
它跑得就像平时一样好，
三十，四十年到了，
然后到了五十，五十五年。

即使我们很少重视它，
不知不觉迎来了它的第一百年的早晨，
它看起来或感觉上都一如平常。

没有什么东西能永葆青春，
据我所知，除了树木和事实。
(这是一个在任何地方都成立的真理；欢迎你拿走这句话，没有代价。)
九月的第一天——地震的那一天——
留下了单马马车岁月的痕迹——
一种平常的味道温柔地流逝，
但是没有什么依旧，就像某个人说的。
这不会依旧是执事的杰作，
所有的零件不会像他曾经建造的一样，

没有一个零件会才开始工作。
因为轮子只会像车轱一样结实，
因为地板只会和窗台一样结实，
因为挡泥板只会和地板一样结实，
因为车横木不会多也不会少，
因为后车把就像前车把一样结实，
因为弹簧、车轴和轮轴，也毫无疑问是一个整体，
在下一个时间，这就会损坏！

V. 系统达到期望寿命

第五十五年九月的第一天，
这个早晨牧师驾着马车，
突然，一群小男孩，在马路上跑！
来了这架神奇的单马马车，
被一匹红色脖子的马托在身后，
“吁！”牧师停住了马，让孩子们通过。
牧师正准备着礼拜日的布道，
念到了第五遍，被疑惑地停住了，
书中就要看到摩西的故事了。
刹那间，马停住了，
山上的教堂关上了门
——首先是颤动，然后是震动，
接着就像什么东西要涌出来——
牧师坐在一块石头上，
屋子里，钟上的时间是九点半——
这正是地震的时间！

——你猜牧师发现了什么，
他爬起来环视一周？
可怜的老马车已经成了一堆碎片，
就像在磨坊里被压过一遍！
如果你不是傻子，会发现
车在一瞬间变成了碎片——
同一时间，没有先后——
就像泡泡一样一起破裂。

这就是神奇马车的结局。
逻辑就是逻辑。这就是所想说的。

目 录

第一部分 可靠性与系统设计	1
第 1 章 可靠度和失效率函数	1
1.1 引言	1
1.2 可靠度和失效率	3
1.3 失效率函数	10
1.3.1 恒定失效率	11
1.3.2 线性增长失效率	13
1.3.3 线性下降失效率	14
1.3.4 威布尔分布模型	14
1.3.5 混合威布尔模型	18
1.3.6 指数模型(极值分布)	19
1.3.7 正态分布模型	19
1.3.8 对数正态分布模型	22
1.3.9 伽马分布模型	24
1.3.10 Log-logistic 分布	27
1.3.11 贝塔分布模型	28
1.3.12 逆高斯分布模型	29
1.3.13 Frechet 分布模型	31
1.3.14 Birnbaum-Saunders 分布	34
1.3.15 其他形式	38
1.4 多元失效率	39
1.5 竞争风险模型和混合失效率模型	41
1.5.1 竞争风险模型	42
1.5.2 混合失效率模型	43
1.6 离散概率分布	45
1.6.1 基本概念	45
1.6.2 几何分布	45
1.6.3 二项式分布	46
1.6.4 泊松分布	46
1.6.5 超几何分布	47
1.7 平均故障前时间	47
1.8 平均剩余寿命	49
1.9 首发故障时间	50
1.10 小结	51
习题	52

第 2 章 系统可靠度评估	62
2.1 引言	62
2.2 可靠性框图	62
2.3 串联模型	64
2.4 并联模型	66
2.5 并-串联系统、串-并联系统及混合并联系统	67
2.5.1 并-串联系统	67
2.5.2 串-并联系统	68
2.5.3 混合并联系统	68
2.5.4 系统可靠度方差估计	69
2.5.5 单元分配优化	71
2.6 连续 $k/n:F$ 系统	74
2.6.1 连续 $2/n:F$ 系统	75
2.6.2 广义连续 $k/n:F$ 系统	75
2.6.3 连续 $k/n:F$ 系统可靠度评估	77
2.6.4 连续 $k/n:F$ 系统优化分配	78
2.7 k/n 系统可靠度	80
2.8 k/n 平衡系统可靠度	81
2.9 复杂系统可靠度	82
2.9.1 分解法	82
2.9.2 路集法和割集法	84
2.9.3 事件空间法	85
2.9.4 布尔真值表法	87
2.9.5 还原法	88
2.9.6 路集-轨迹法	89
2.9.7 因子分解法	89
2.10 特殊网络	91
2.11 多态模型	92
2.11.1 串联系统	92
2.11.2 并联系统	93
2.11.3 并-串联系统与串-并联系统	94
2.12 冗余	96
2.13 部件重要度	98
2.13.1 Birnbaum 重要度	99
2.13.2 关键重要度	101
2.13.3 FUSSELL-VESELY 重要度	102
2.13.4 Barlow-Proschan 重要度	104
2.13.5 Lambert 重要度	104
习题	106

第 3 章 时间和失效相关可靠度	117
3.1 引言	117
3.2 不可修系统	117
3.2.1 串连系统	117
3.2.2 并联系统	119
3.2.3 k/n 系统	121
3.3 平均失效前时间	122
3.3.1 串连系统 MTTF	123
3.3.2 并联系统 MTTF	124
3.3.3 k/n 系统 MTTF	126
3.3.4 其他系统	127
3.4 可修系统	129
3.4.1 交替更新过程	129
3.4.2 马尔可夫模型	134
3.5 可用度	137
3.5.1 瞬时可用度	137
3.5.2 平均开工时间可用度	138
3.5.3 稳态可用度	139
3.5.4 固有可用度	140
3.5.5 可达可用度	140
3.5.6 使用可用度	140
3.5.7 任务可用度	140
3.6 相关失效	142
3.6.1 相关失效马尔可夫模型	143
3.6.2 联合密度函数法	144
3.6.3 复合事件法	147
3.7 冗余和备份	147
3.7.1 不可修简单备份系统	148
3.7.2 不可修多备份系统	148
3.7.3 可修备份系统	150
习题	154
第二部分 参数估计及可靠性试验	161
第 4 章 失效时间分布参数估计方法	161
4.1 引言	161
4.2 矩量法	162
4.3 似然函数	165
4.3.1 极大似然法	169
4.3.2 指数分布	170
4.3.3 瑞利分布	171
4.3.4 正态分布	172

4.3.5	信息矩阵和方差-协方差矩阵	174
4.4	最小二乘法	176
4.5	贝叶斯法	179
4.6	失效时间数据生成	182
4.6.1	指数分布	182
4.6.2	威布尔分布	183
4.6.3	瑞利分布	183
4.6.4	Brinbaum-Saunders 分布	183
	习题	183
第 5 章	参数可靠性模型	187
5.1	引言	187
5.2	方法 1: 历史数据	187
5.3	方法 2: 使用寿命试验	188
5.4	方法 3: 老化试验	188
5.5	方法 4: 加速寿命试验	188
5.6	截尾类型	189
5.6.1	I 型截尾	189
5.6.2	II 型截尾	190
5.6.3	随机截尾	190
5.6.4	截尾下失效率的计算	190
5.7	指数分布	191
5.7.1	测试异常短失效时间	193
5.7.2	测试异常长失效时间	195
5.7.3	I 型截尾数据	198
5.7.4	II 型截尾数据	200
5.8	瑞利分布	201
5.8.1	对于非截尾试验数据的瑞利分布参数估计	201
5.8.2	对于截尾试验数据的瑞利分布参数估计	202
5.8.3	带有截尾和非截尾数据的瑞利分布参数的最佳线性无偏估计	203
5.9	威布尔分布	206
5.9.1	非截尾试验失效数据	206
5.9.2	截尾试验失效数据	209
5.9.3	方程极大似然估计	210
5.9.4	$\hat{\gamma}$ 的无偏估计	210
5.9.5	$\hat{\gamma}$ 的置信区间	212
5.9.6	$\hat{\theta}$ 估计	213
5.10	对数正态分布	214
5.10.1	非截尾试验失效数据	215
5.10.2	截尾试验失效数据	217
5.11	伽马分布	219

5.11.1	非截尾试验失效数据	219
5.11.2	截尾试验失效数据	220
5.11.3	$\hat{\gamma}$ 和 $\hat{\theta}$ 方差	222
5.11.4	γ 的置信区间	223
5.12	极值分布	224
5.13	半 logistic 分布	225
5.14	Frechet 分布	231
5.14.1	非截尾试验失效数据	231
5.14.2	截尾试验失效数据	232
5.15	Birnbaum-Saunders 分布	233
5.15.1	非截尾试验失效数据	233
5.15.2	截尾试验失效数据	234
5.16	线性模型	235
5.17	多截尾数据	236
5.17.1	产品极限估计 (PLE) 或 Kaplan and Meier (KM) 估计	237
5.17.2	累计失效估计	237
	习题	240
第 6 章	加速寿命试验模型	249
6.1	引言	249
6.2	可靠性试验的类型	249
6.2.1	高加速寿命试验	250
6.2.2	可靠性增长试验	250
6.2.3	高加速应力筛选	250
6.2.4	可靠性验证试验	251
6.2.5	可靠性验收试验	251
6.2.6	老化试验	251
6.2.7	加速寿命试验 (ALT) 和加速退化试验 (ADT)	252
6.3	加速寿命试验的应力施加方式和应力类型	252
6.3.1	应力施加方式	253
6.3.2	应力类型	254
6.4	典型加速寿命试验模型	254
6.4.1	加速失效时间模型	255
6.4.2	统计模型: 参数模型	256
6.5	统计模型: 非参数模型	263
6.5.1	线性模型	264
6.5.2	比例危险模型	265
6.5.3	比例优势模型	270
6.5.4	其他加速寿命试验模型	273
6.6	物理-统计模型	275
6.6.1	阿伦尼斯 (Arrhenius) 模型	276

6.6.2	艾林模型	277
6.6.3	逆幂律模型	279
6.6.4	组合模型	281
6.7	物理实验模型	282
6.7.1	电迁移模型	282
6.7.2	与湿度相关的失效	283
6.7.3	疲劳失效	283
6.8	退化模型	284
6.8.1	电阻器退化模型	284
6.8.2	激光器退化模型	286
6.8.3	热载流子退化模型	286
6.9	统计退化模型	287
6.9.1	布朗运动退化轨迹	287
6.9.2	退化模型	287
6.10	加速寿命试验方案	288
6.10.1	ALT 方案设计	289
6.10.2	试验方案的制订	290
	习题	291
第三部分 可靠性的提高: 保修期及预防维修		300
第 7 章 更新过程和预计失效数		300
7.1	引言	300
7.2	参数更新函数估计	300
7.2.1	连续时间	301
7.2.2	离散时间	308
7.3	非参数更新函数估计	309
7.3.1	连续时间	310
7.3.2	离散时间	313
7.4	交替更新过程	317
7.4.1	交替更新过程的预计失效数	317
7.4.2	时刻 t 部件 j 正常运行的概率	318
7.5	$M(t)$ 的近似解	319
7.6	其他类型更新过程	321
7.7	更新数的方差	321
7.8	更新函数置信区间	326
7.9	t 时刻的剩余寿命	328
7.10	泊松过程	329
7.10.1	齐次泊松过程	329
7.10.2	非齐次泊松过程	330
7.11	拉普拉斯变换及随机变量	331
7.11.1	拉普拉斯变换和期望值	331