

可靠性维修性保障性
学术专著译丛

丛书主编 康锐

贝叶斯可靠性

Bayesian Reliability

【美】Michael S. Hamada, Alyson G. Wilson,
C. Shane Reese, Harry F. Martz

著

曾志国 主译

陈云霞 主审



国防工业出版社
National Defense Industry Press

014043979

G201
224

可靠性维修性保障性学术专著译丛

贝叶斯可靠性

Bayesian Reliability

[美] Michael S. Hamada, Alyson G. Wilson,
C. Shane Reese, Harry F. Martz 著

曾志国 主译
陈云霞 主审



北航 C1731246

国防工业出版社

·北京·

G201

224

014043879

著作权合同登记 图字:军-2013-196号

国防工业出版社

图书在版编目(CIP)数据

贝叶斯可靠性/(美)滨田(Hamada, M. S.)等著;

曾志国译. —北京:国防工业出版社, 2014. 4

(可靠性维修性保障性学术专著译丛)

书名原文: Bayesian reliability

ISBN 978-7-118-09301-8

I. ①贝... II. ①滨...②曾... III. ①贝叶斯理论-可靠性理论-研究 IV. ①G201②O213.2

中国版本图书馆CIP数据核字(2014)第046795号

Bayesian Reliability by Michael S. Hamada, Alyson G. Wilson, C. Shane Reese and Harry F. Martz

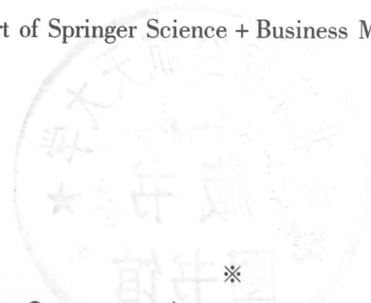
Translation from English language edition:

Bayesian Reliability by Michael S. Hamada, Alyson G. Wilson, C. Shane Reese and Harry F. Martz

Copyright © 2008 Springer New York

Springer New York is a part of Springer Science + Business Media

All Rights Reserved.



※

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)

北京嘉恒彩色印刷有限责任公司

新华书店经售

*

开本 710 × 1000 1/16 印张 21½ 字数 408 千字

2014年4月第1版第1次印刷 印数 1—2500册 定价 78.00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

《可靠性维修性保障性学术专著译丛》

编 审 委 员 会

主任委员

康 锐 教授 北京航空航天大学

副主任委员

屠庆慈 教授 北京航空航天大学

王文彬 教授 北京科技大学

委员(按姓氏笔画排序)

于永利(军械工程学院)

王文彬(北京科技大学)

左明健(电子科技大学)

田玉斌(北京理工大学)

李大庆(北京航空航天大学)

邹 云(南京理工大学)

张卫方(北京航空航天大学)

陈 循(国防科技大学)

陈云霞(北京航空航天大学)

金家善(海军工程大学)

赵 宇(北京航空航天大学)

康 锐(北京航空航天大学)

曾声奎(北京航空航天大学)

王少萍(北京航空航天大学)

王自力(北京航空航天大学)

左洪福(南京航空航天大学)

孙 权(国防科技大学)

何宇廷(空军工程大学)

宋笔锋(西北工业大学)

陆民燕(北京航空航天大学)

陈卫东(哈尔滨工程大学)

苗 强(四川大学)

单志伟(装甲兵工程学院)

郭霖瀚(北京航空航天大学)

屠庆慈(北京航空航天大学)

翟国富(哈尔滨工业大学)

《可靠性维修性保障性学术专著译丛》

总 序

可靠性理论自 20 世纪 50 年代发源以来,得到了世界各地研究者的广泛关注,并在众多行业内得到了成功的应用。然而,随着工程系统复杂程度的不断增加,可靠性理论与方法也受到了日益严峻的挑战。近年来,许多国际知名学者对相关问题进行了深入研究,取得了一系列显著的成果,极大地丰富和充实了可靠性理论与方法。2012 年,国际知名出版社 Springer 出版了一套“可靠性工程丛书”,共计 61 种,总结了近年来可靠性维修性保障性相关领域内取得的绝大部分研究成果,具有很强的系统性、很高的理论与实用价值。

经过国内最近 30 年的普及和发展,可靠性的重要性已经得到业界的普遍认可,即使在民用领域,可靠性的研究与应用也发展迅猛。他山之石,可以攻玉,系统地了解国际上可靠性相关领域近年来的最新研究成果,对于国内的可靠性研究者与实践者们都会大有裨益。为此,国防工业出版社邀请北京航空航天大学可靠性与系统工程学院以 Springer 出版的可靠性工程丛书中的 10 种,外加 Wiley、World Science、Cambridge、CRC、Prentice Hall 出版机构各一种,共 15 种专著,策划组织了《可靠性维修性保障性学术专著译丛》的翻译出版工作。我具体承担了这套丛书的翻译组织工作。我们挑选这 15 种专著的基本原则是原著内容是当前国内学术界缺乏的或工业界急需的,主题涵盖了相关领域的科研前沿、热点问题以及最新研究成果,丛中各专著原作者均为相关领域国际知名的专家、学者。

组织如此规模的学术专著翻译出版工作,我们是没有现成经验的。为了保证翻译质量和进度,在组织翻译这套丛书的过程中,我们做了以下几方面的工作:一是认真遴选主译者。我们邀请了国内高校可靠性工

程专业方向的在校博士生作为主译者,这些既有专业知识又有工作激情的青年学者对翻译工作的投入是保证质量与进度的第一道屏障。二是真诚邀请主审专家。我们邀请的主审专家要么是这些博士生的导师,要么是这些博士生的科研合作者,他们均是国内可靠性领域的知名专家,他们对可靠性专业知识把握的深度和广度是保证质量与进度的第二道屏障。三是建立编审委员会加强过程指导。我们邀请了国内知名专家与主审专家一起共同组成了丛书编审委员会,从丛书选择、翻译指导、主审主译等多个方面开展了细致的工作,同时为了及时沟通信息、交流经验,我们还定期编辑丛书翻译工作简报,在主译者、主审者和编审委员中印发。可以说经过以上工作,我们坚信这批专著的翻译质量是有保证的。

本套丛书适合于从事可靠性维修性保障性相关研究的学者和在校博士、硕士研究生借鉴与学习,也可供工程技术人员在具体的工程实践中参考。我们相信,本套丛书的出版能够对国内可靠性系统工程的发展起到推动作用。

北京航空航天大学可靠性与系统工程学院

康 锐

2013年11月8日

PREFACE

Today's modern systems have become increasingly complex to design and build, while the demand for reliability and cost effective development continues. Thus, reliability has become one of the most important attributes in these systems. Growing international competition has increased the need for all designers, managers, practitioners, scientists and engineers to ensure a level of reliability of their product before release at the lowest cost. This is the reason why interests in reliability have been continually growing in recent years and I believe this trend will continue during the next decade and beyond.

It is these growing interests from both industries and academia that motivate Springer to publish the Springer Series in Reliability Engineering, for which I serve as the series editor. This series consists of books, monographs and edited volumes in important subjects of current theoretical research development in reliability and in areas that attempt to bridge the gap between theory and application in fields of interest to practitioners in industry, laboratories, business and government.

I am very delighted to learn that the National Defense Industry Press from China is planning to translate selected books from the Springer Series as well as some other distinguished monographs from other presses into Chinese. The books in the collections to be translated cover most of the timely and important topics in reliability research areas and are of great values for both theoretical researchers and engineering practitioners.

The translations are organized and managed by Professor Rui Kang from Beihang University, who is a world-wide leading expert in reliability related areas. With his expertise and dedication, the quality of the translations is guaranteed. I'm sure that the translations of these outstanding books will be a great impetus to the research and application of reliability engineering in China.

Personally, I will treat the translation collection as an attempt to exchange ideas of reliability researchers in the international community with their Chinese counterparts. I really hope that these kinds of idea interchanges will be more common and frequently in the future. Specifically, I am really looking forward to hearing more from our Chinese colleagues. Wish the research and application of reliability in China a bright future!

Hoang Pham

Dr. Hoang Pham, IEEE Fellow

Distinguished Professor

Rutgers University

Series Editor, Springer Series in Reliability Engineering

序

不断发展的科技和日趋激烈的市场竞争对产品提出了日趋强烈的可靠性需求,希望能够以尽可能低的成本高效保证产品可靠性。可靠性业已成为现代工程系统最重要的属性之一。面向这种需求, Springer 出版社组织出版了《Springer 可靠性工程丛书》。这套丛书由 61 种专著组成(截止到 2013 年 11 月),涵盖了近年来可靠性相关领域内取得的最新理论成果,介绍了可靠性工程在实际工程上的应用,具有很强的理论和实践价值。

作为《Springer 可靠性工程丛书》的主编,我很高兴中国的国防工业出版社计划将这套丛书中的部分专著以及其他一些近年出版的可靠性优秀英文专著翻译出版,推出《可靠性维修性保障性学术专著译丛》。《可靠性维修性保障性学术专著译丛》中的专著选题覆盖了可靠性领域近期的大部分研究热点和重要成果,具有重要的理论价值和实践指导意义。

这套丛书的翻译工作由北京航空航天大学的康锐教授负责组织。康锐教授是国际知名的可靠性专家,我相信,康锐教授的专业知识和奉献精神,能够有效保证译著的质量。我确信,这些优秀专著的翻译出版将极大地推动中国的可靠性研究和应用工作。

就我个人而言,我更愿意将《可靠性维修性保障性学术专著译丛》看作是可靠性领域内的国际学者与中国同行们进行的一次思想交流。我期待这样的交流在未来更加频繁。特别地,希望中国优秀学者们能够更多地以英文出版学术专著,介绍他们的学术成果,从而向可靠性领域的国际同行们发出来自中国的声音。衷心祝愿中国的可靠性事业更上一个台阶!

Hoang Pham

博士, IEEE 会士

罗格斯大学特聘教授

Springer 可靠性工程丛书主编

译者序

可靠性是指产品在规定的时间内,规定的条件下,完成规定功能的能力。经典的可靠性理论是基于概率论和数理统计学建立的:利用概率作为产品可靠性的度量;通过大数定律,用产品发生故障的频率近似产品发生故障的概率;利用数理统计的相关理论,从产品故障数据中对产品的可靠性度量进行统计推断。目前,国内学术界对可靠性理论的研究和应用主要集中在经典可靠性理论方面,大量的学者进行了许多卓有成效的工作,取得了一系列标志性的成果,例如,中科院曹晋华等人的专著《可靠性数学引论》、华东师范大学茆诗松等人的专著《可靠性统计》等。

虽然经典可靠性理论已经发展的较为完备,但是,我们必须认识到,只有在大量定律成立的条件下,也就是说,在大样本的条件下,用“故障频率”替代“故障概率”作为产品可靠性表征才是合理的。然而,大样本的前提假设,对于绝大多数的工程问题都是难以接受的,因此,利用经典可靠性理论处理很多实际问题时会遇到困难。我们可以通过下面这个小例子来说明这一点。

对于执行载人航天发射任务的“长征”二号 F“遥十”火箭,我们经常可以在各种报道中看到这样的数据:“其飞行可靠度达到 0.9867”^①。可是如果我们利用经典可靠性理论来评估这一指标,则需要按照下式对飞行可靠度这一指标进行无偏估计:

$$\hat{R} = \frac{n_{\text{success}}}{N} = 1 - \frac{n_{\text{failure}}}{N}$$

式中: n_{success} 、 n_{failure} 、 N 分别为发射成功次数、发射失败次数以及发射总次数。发生失败次数的最小值 $n_{\text{failure}} = 1$, 则通过上式可以计算得到最小样本量 $N_{\text{min}} = 75.1$ 。也就是说,如果按照经典可靠性理论得到这一指标,至少需要进行 76 次试验,其中观测到 1 次故障。这样的样本量要求,对于实际问题而言是很难接受的:事实上,“长征”二号 F 火箭迄今为止(2013 年 9 月),也仅仅进行了 11 次发射。

在实际工程中,类似这样的问题并不罕见。基于贝叶斯方法的可靠性理论可以较好地解决经典可靠性理论所遇到的类似这样的难题。然而,目前国内尚未见到详细、全面地介绍贝叶斯可靠性相关理论成果的学术专著。因此,国防工业出版社策划了本书的引进和翻译出版工作,旨在通过本书的出版,向国内学术界系统详细地介绍贝叶斯可靠性理论,从而推动国内相关的理论研究和工程应用的发展。

^① 对中国运载火箭技术研究院党委书记梁小虹的采访: <http://war.163.com/13/0301/15/80T0GQG0000140MD.html>

本书根据 Springer 出版社 2008 年出版的《Bayesian Reliability》一书翻译而成,是一本全面介绍贝叶斯可靠性相关理论和工程应用的学术专著。原书作者均为贝叶斯可靠性领域内世界知名的专家学者。其中,大部分参编人员来自美国 Los Alamos 国家实验室。该实验室是美国核技术研究的中心,也是世界范围内贝叶斯可靠性理论方法研究与应用的顶级研究机构之一。原书的主编由 Los Alamos 国家实验室的统计学专家 Michael S. Hamada 博士担任。Hamada 博士目前担任可靠性领域顶级期刊 Reliability Engineering and Systems Safety 的副主编,他发表了 100 余篇论文,获得两项专利,多次获得美国质量协会、美国统计学会等组织颁发的年度最佳论文奖。由于他在可靠性及其相关领域的杰出工作,他于 2000 年被选为美国统计学会会士(Fellow)。本书凝聚了作者多年从事重大工程项目的可靠性工作中获得的宝贵经验:不仅介绍了贝叶斯可靠性领域的最新理论成果,还汇聚了美国 Los Alamos 国家实验室等科研机构在重大工程项目中积累的众多应用案例。因此,译者认为,本书的翻译出版,对于国内可靠性相关的理论研究和工程应用工作都具有重要的指导意义和参考价值。

全书共分为 10 章,第 1 章对本书中所需的基础知识进行了介绍;第 2 章介绍了贝叶斯理论的初步知识;第 3 章讨论了基于马尔可夫链蒙特卡罗仿真方法的贝叶斯模型求解;第 4 章主要介绍基于贝叶斯理论的零部件级的可靠性数据分析方法;第 5 章进一步介绍了系统级的可靠性分析方法;第 6 章重点讨论了可修系统的贝叶斯可靠性模型;第 7 章介绍了可靠性理论中常用的回归模型的贝叶斯估计方法;第 8 章将贝叶斯方法推广到了退化数据的处理中;第 9 章讨论了可靠性试验的优化设计问题;第 10 章针对常见的寿命分布,给出了可靠性保证试验方案的设计方法。

本书由北京航空航天大学博士研究生曾志国主译,陈云霞教授主审。北京航空航天大学故障学基础理论实验室的研究生协助译者进行了本书初稿的翻译,并完成了全书公式的录入,对他们的辛勤工作,译者谨在此表示衷心的感谢(以参与翻译的章节顺序为序):陈红霞(第 1、第 9 章及附录)、张辉睿(第 2 章及附录)、陈钦锋(第 3 章)、张晓秦(第 4 章)、龚晞(第 5 章)、周溢韬(第 6 章)、曾志国(第 7 章及附录)、刘丙栋(第 8 章)、王文雨(第 10 章及附录)。在本书的翻译、出版过程中,得到北京航空航天大学康锐教授、国防工业出版社白天明编辑与胡翠敏编辑的悉心指导与帮助,在此向他们致以由衷的谢意。

需要特别指出的是原文中,文献的引用是按照 APA 格式进行的(即作者 + 日期的格式)。在翻译时,为了照顾中文行文习惯,我们将“and”,“et al.”等词汇翻译成了相应的中文词汇。

由于时间仓促和译者水平有限,本书的翻译难免有不妥之处,敬请广大读者批评指正。

曾志国

2013 年 9 月

前 言

近些年来,随着数值模拟技术的进步,贝叶斯方法在科学研究与工程实践中都获得了更加广泛的应用。本书主要介绍贝叶斯方法在可靠性数据分析中的应用,重点介绍如何利用数值模拟技术有效地实现基于贝叶斯理论的可靠性分析。

在可靠性分析中,包含解释变量的模型被广泛的使用,例如,故障时间的回归模型、加速模型、退化模型等。这些模型是本书的关注重点之一。除此之外,本书还重点关注了贝叶斯理论在可靠性领域中的其他应用,具体包括拟合优度检验、模型验证、可靠性试验方案设计等。由于对贝叶斯模型的解析求解一般是很困难的,本书还重点介绍了马尔可夫链蒙特卡罗方法:通过数值模拟,为模型的求解提供了一种直观可行的方法。

写作本书的首要目的在于为可靠性研究者和工程技术人员提供一本详尽的贝叶斯可靠性方面的参考书。为了达到这个目的,本书收录了超过 70 个实际应用案例,其中的许多案例是首次公开发表的。这些案例对于可靠性从业人员具有丰富的参考价值。本书也可以用作可靠性专业本科生或者研究生的教材。为了方便教学上的应用,也为了加深读者对本书内容的理解,每章的结尾均设置了丰富的习题。这些习题大部分改编自实际的工程案例。习题的参考解答和一些案例的程序代码可以在丛书的网站上下载:<http://www.bayesianreliability.com>。

阅读本书需要具备的背景知识包括:概率论与数理统计的基础知识,特别地,读者需要熟悉常见的概率分布、参数估计与回归分析方法等知识点。读者还需要具备基本的微积分与矩阵运算方面的知识。本书中需要使用的可靠性基础知识将在第 1 章进行简要的介绍,因此,读者并不需要事先具备可靠性方面的知识储备。

本书涉及的内容涵盖了以下主题:

- (1) 贝叶斯拟合优度检验和模型选择方法的推导和应用;
- (2) 贝叶斯层次模型在可靠性参数估计中的应用;
- (3) 利用贝叶斯方法获得故障树分析中需要的基础数据;
- (4) 贝叶斯网络在可靠性分析中的应用;
- (5) 利用贝叶斯方法进行故障数据的分析;
- (6) 利用解释变量中包含的信息进行可靠性估计;
- (7) 利用贝叶斯方法进行可靠性增长试验的设计与分析;

- (8) 利用贝叶斯方法分析破坏性与非破坏性退化试验获得的数据;
- (9) 利用贝叶斯方法进行可靠性试验的优化设计;
- (10) 利用贝叶斯层次模型进行可靠性验证试验的设计。

当然,上述涵盖的主题并不可能包括可靠性工程中的所有方面。例如,我们并没有涉及非参数方法(包括故障率和比例风险模型等)、软件可靠性、结构可靠性、概率图方法以及维修保障等方面的内容。对于这些没有涉及到的内容,读者可以参阅相关的专著。

本书的组织架构如下:第1章介绍基本的可靠性理论。第2章对贝叶斯方法进行简要的介绍,涵盖了包括先验分布、似然函数、抽样分布、后验分布以及预测分布在内的贝叶斯理论中的基本概念。在第3章中,将通过详实的案例介绍如何使用两种常见的马尔可夫链蒙特卡罗(MCMC)算法:Gibbs 抽样算法以及 Metropolis-Hasings 算法求解上述分布。我们也会介绍贝叶斯层次模型和经验贝叶斯方法的基本概念。

从第4章开始,正式地介绍贝叶斯理论在可靠性工程中的应用。在这一章中,主要介绍零部件级的可靠性数据分析方法。例如,通过层次模型分析从相似产品中获得的数据的方法以及验证模型拟合优度的方法等。

在第4章讨论的零部件级分析方法的基础上,第5章主要解决系统级的可靠性分析问题。在这一章中,将在明确系统故障与零部件故障之间逻辑关系的基础上,建立一些系统级的概率模型。这些模型能够处理零部件之间存在相关性的情况,并且能够处理存在层次性的数据。

第6章讨论可修系统的贝叶斯模型。首先针对经典的可修系统可靠性模型:更新过程模型、齐次 Poisson 过程模型以及非其次 Poisson 过程模型,讨论了它们在贝叶斯理论框架下的形式及应用。除了这些模型之外,还讨论了一些其他的可以用来描述可修系统的模型。本章的最后,通过一个实际例子,展示了如何利用给出的模型对一个超级并行计算机的可靠性进行建模。

第7章首先介绍了可靠性理论中常用的回归模型的贝叶斯估计方法,包括线性回归模型、非线性回归模型、逻辑回归模型以及 Poisson 回归模型等。在这些模型的基础上,介绍了利用贝叶斯方法设计、分析加速寿命试验以及可靠性增长试验的方法。

在第8章中,将贝叶斯方法推广到了退化数据的处理中。考虑了各种类型的退化数据,包括连续测量的数据、离散测量的数据、破坏性测量的数据,针对各种情况,给出了相应的退化模型。并且通过案例,对通过本章中的方法获得的估计与通过常规的寿命数据处理方法获得的结果进行了对比。

第9章讨论了可靠性试验的优化设计问题。优化的目标是在给定的资源约束条件下,尽可能提高通过试验数据获得的可靠性指标估计的质量。

在第9章的基础上,第10章针对一些常见的抽样分布,例如二项分布、Poisson分布、Weibull分布等,进行可靠性保证试验方案的设计。按照设计的方案,能够在给定的置信水平下,验证某一可靠性指标是否能够达到规定值。

由于本书中介绍的方法需要经常使用数值模拟的方法进行计算,我们建议读者掌握一些常见的计算软件。其中之一是 WinBUGS,它是 BUGS (Bayesian inference Using Gibbs Sampling) 的 Windows 版本。利用这个软件包,可以方便地实现基于 MCMC 的计算。WinBUGS 是一个免费软件,读者可以在下面的网址下载到这个软件包:<http://www.mrc-bsu.cam.ac.uk/bugs/>。YADAS (Yet Another Data Analysis System) 是另一款可以实现 MCMC 方法的软件包。与 WinBUGS 不同,这款软件主要是基于 Metropolis-Hastings 算法的。它是使用 Java 语言开发的,并且提供对非标准模型的应用支持。在某些情况下,我们发现它比 WinBUGS 更加方便。YADAS 也可以在下面的网址免费下载获得:<http://yadas.lanl.gov>。另一个常用的软件是 R。R 是一种被广泛应用的解决统计问题的软件包,本书中的许多案例是通过 R 解决的。它也是免费的,可以通过 <http://www.r-project.org> 获取。

本书中使用的略缩词列表汇总于附录 A 中。附录 B 中给出了常见的概率分布以及它们的性质。

最后,我们要向本书写作过程中提供过帮助的人们致以深深的谢意:Val Johnson 在本书创作的全过程中均做出了卓越的贡献;Valerie Riedel 和 Megan Wyman 为本书文字录入和图表制作进行了耐心而细致的工作;Hazel Kutac 为本书的编校做了大量工作;Todd Graves 为书中的许多例子进行了编程并且协助进行了第5章中许多内容的研究;Brian Weaver 为本书附录和习题解答的编写做出了贡献。最后,我们还要感谢 Sallie Keller-McNulty 与 David Higdon 为我们协调工作安排,从而使我们有充分的时间完成这本专著。

NM Michael Hamada

NM Harry Martz

于美国 Los Alamos 国家实验室

Shane Reese

于美国犹他州 Provo 市

Alyson Wilson

于美国 Los Alamos 国家实验室

2008年2月

目 录

第 1 章 基本概念	1
1.1 可靠性的定义.....	1
1.2 基础知识.....	2
1.3 常见的可靠性数据类型.....	7
1.3.1 成败型数据	7
1.3.2 计数型数据	8
1.3.3 寿命数据	8
1.3.4 退化数据	9
1.4 截尾数据	10
1.5 贝叶斯可靠性分析	11
1.6 相关的阅读材料	14
习题.....	14
第 2 章 贝叶斯推断	16
2.1 基本概念	16
2.1.1 极大似然估计.....	18
2.1.2 点估计和区间估计.....	20
2.2 贝叶斯推断基础	21
2.2.1 先验分布.....	22
2.2.2 观测数据对先验分布的更新.....	23
2.3 预测	26
2.4 数据的边沿分布与贝叶斯因子	28
2.5 案例:对数正态分布.....	30
2.6 关于先验分布的进一步讨论	35
2.6.1 无信息先验分布与扩散先验分布.....	35
2.6.2 共轭先验分布.....	36
2.6.3 有信息先验分布.....	36

2.7 相关的阅读材料	37
习题	38
第3章 更为复杂的贝叶斯模型及其求解方法	39
3.1 马尔可夫链蒙特卡罗方法(MCMC)	39
3.1.1 Metropolis - Hastings 算法	40
3.1.2 Gibbs 抽样	46
3.1.3 收敛性分析	49
3.2 贝叶斯层次模型	51
3.2.1 层次模型参数的 MCMC 估计	53
3.2.2 运载火箭的案例分析	54
3.3 经验贝叶斯方法	55
3.4 拟合优度检验	56
3.5 相关的阅读材料	60
习题	61
第4章 零部件可靠性模型	62
4.1 引言	62
4.2 离散故障数据的可靠性模型	62
4.2.1 成败型数据	63
4.2.2 计数型数据	64
4.3 故障时间数据模型	66
4.3.1 指数分布	67
4.3.2 Weibull 分布	70
4.3.3 对数正态分布	73
4.3.4 Gamma 分布	75
4.3.5 逆 Gaussian 分布	76
4.3.6 正态分布	76
4.4 截尾数据	77
4.5 贝叶斯层次模型的应用	80
4.6 模型选择	84
4.6.1 贝叶斯信息准则	85
4.6.2 偏差信息准则	86
4.6.3 Akaike 信息准则	87

4.7 相关的阅读材料	87
习题	88
第5章 系统可靠性模型	91
5.1 系统结构	91
5.1.1 可靠性框图	91
5.1.2 结构函数	92
5.1.3 最小路集和最小割集	94
5.1.4 故障树	95
5.2 系统可靠性分析	99
5.2.1 系统可靠度的计算方法	99
5.2.2 常用的先验分布	101
5.2.3 成败型数据的故障树模型	103
5.2.4 寿命数据的故障树模型	107
5.2.5 贝叶斯网络模型	109
5.2.6 相关性模型	115
5.3 相关的阅读材料	117
习题	117
第6章 可修系统的可靠性模型	119
6.1 引言	119
6.1.1 数据类型	119
6.1.2 系统维修的效果	120
6.2 更新过程	120
6.3 Poisson 过程	122
6.3.1 齐次 Poisson 过程(HPPs)	123
6.4 非齐次 Poisson 过程(NHPPs)	126
6.4.1 幂律过程(PLPs)	126
6.4.2 对数线性过程	130
6.5 其他模型	130
6.5.1 修正幂律过程(MPLPs)	130
6.5.2 分段指数模型(PEXP)	132
6.6 拟合优度与模型选择	132
6.7 当前的可靠度和其他性能指标	134

6.7.1	当前可靠度	134
6.7.2	其他性能指标	134
6.8	多单元系统与层次模型	135
6.9	可用性	145
6.9.1	其他数据类型的可用性	147
6.9.2	复杂系统的可用性	147
6.10	相关的阅读材料	149
	习题	150

第7章 可靠性中的回归模型 153

7.1	引言	153
7.1.1	协变量类型	153
7.1.2	协变量关系	154
7.2	成败型数据的 Logistic 回归模型	155
7.3	计数型数据的 Poisson 回归模型	163
7.4	寿命数据的回归模型	169
7.5	模型选择	173
7.6	残差分析	174
7.7	加速试验	179
7.8	可靠性增长试验	185
7.9	回归模型的其他应用	199
7.10	相关的阅读材料	199
	习题	200

第8章 退化模型 210

8.1	引言	210
8.2	较为复杂的退化模型	216
8.3	退化模型的诊断	220
8.4	协变量模型	222
8.4.1	加速退化试验	222
8.4.2	通过试验设计实现可靠性增长	231
8.5	破坏性退化数据	235
8.6	基于随机过程的退化模型	239
8.7	相关的阅读材料	242