



装备科技译著出版基金

可靠性维修性保障性
学术专著译丛

丛书主编 康锐

复杂系统与过程 可靠性及安全性

Reliability and Safety of Complex
Technical Systems and Processes

【波兰】Krzysztof Kołowrocki

Joanna Soszyńska-Budny 著

王尧 主译

曾声奎 主审



Springer



国防工业出版社
National Defense Industry Press



装备科技译著出版基金

可靠性维修性保障性学术、技术、工程丛书

复杂系统与过程可靠性 及安全性

Reliability and Safety of Complex Technical
Systems and Processes

[波兰] Krzysztof Kołowrocki, Joanna Soszyńska – Budny 著

王尧 主译

曾声奎 主审

国防工业出版社

· 北京 ·

著作权合同登记 图字:军-2013-110号

图书在版编目(CIP)数据

复杂系统与过程可靠性及安全性/(波)克罗沃克奇,(波)索辛斯卡-伯德尼著;
王尧译. —北京:国防工业出版社, 2014. 2

(可靠性维修性保障性学术专著译丛)

书名原文: Reliability and safety of complex technical systems and process

ISBN 978-7-118-09226-4

I. ①复... II. ①克... ②索... ③王... III. ①系统可靠性-研究
②系统安全性-研究 IV. ①N945.17 ②TP309

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 055890 号

Translation from English language edition:

Reliability and Safety of Complex Technical Systems and Processes by Krzysztof Kołowrocki, etc.

Copyright © 2011 Springer London

Springer London 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 23½ 字数 446 千字
2014 年 5 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—2000 册 定价 80.00 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)

王少萍(北京航空航天大学)

王文彬(北京科技大学)

王自力(北京航空航天大学)

左明健(电子科技大学)

左洪福(南京航空航天大学)

田玉斌(北京理工大学)

孙 权(国防科技大学)

李大庆(北京航空航天大学)

何宇廷(空军工程大学)

邹 云(南京理工大学)

宋笔锋(西北工业大学)

张卫方(北京航空航天大学)

陆民燕(北京航空航天大学)

陈 循(国防科技大学)

陈卫东(哈尔滨工程大学)

陈云霞(北京航空航天大学)

苗 强(四川大学)

金家善(海军工程大学)

单志伟(装甲兵工程学院)

赵 宇(北京航空航天大学)

郭霖瀚(北京航空航天大学)

康 锐(北京航空航天大学)

屠庆慈(北京航空航天大学)

曾声奎(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,丛书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

近年来,随着我国经济水平的稳步提升与科学技术实力的不断增强,以神舟飞船为代表的航天运载器、以支线客机为代表的大型飞机、以高铁为代表的高速轨道交通工具,以及大型船舶、先进数控中心、关键 IC 制造装备等一大批国产高新技术系统雨后春笋般涌现。

这些具有先进功能的复杂系统往往由众多子系统组成,每个子系统具有各自的物理过程和单元技术,并且通过系统集成实现子系统之间的交互作用。由于其功能与结构的复杂性,传统的可靠性设计分析方法难以满足复杂系统的高可靠性要求,因此为我国的可靠性技术研究与应用提出了新的挑战。

传统可靠性理论是以“二态假设”为基础,将系统粗略划分为“正常”和“故障”两种状态。然而,复杂系统及其组成单元在寿命周期内往往具有明显的退化特性,而其故障规律则呈现出多状态的特征,具体表现为在系统正常工作状态与完全失效状态之间的这些中间状态中,系统及其组成单元的故障规律与性能状态不尽相同。显然,“二态假设”难以准确描述这类复杂系统的故障规律。

目前学术界和工业界都已经充分认识到该问题,并且着手研究多状态可靠性理论,取得了一定的研究成果。本书作者 Krzysztof Kołowrocki 教授是国际上可靠性与安全性领域的专家,在多状态可靠性领域发表了很多高水平论文,成果丰厚。本书凝聚了他对多状态可靠性理论的深刻理解和最新研究成果。

本书的原版书籍由国际知名出版社 Springer – Verlag 出版,是 Springer“可靠性工程丛书”中的一种。该丛书旨在为可靠性领域相关人员介绍可靠性领域最新理论成果,并且试图为工业界架起可靠性理论与实践之间的桥梁。丛书作者均为可靠性领域的国际知名专家,在学术界和工业界都具有较强的影响力。

译者曾经拜读了丛书中的两种著作,为他们对可靠性理论知识的深刻理解、在可靠性工程上的丰富经验以及生动有趣的文字表达所折服。因此,译者对能够得到本书的翻译工作感觉到无比荣幸,同时也感到身上的担子很重。将本书译成中文,一方面能够将多状态可靠性理论知识介绍给国内更多的可靠性从业者,达到推广多状态可靠性技术方法的目的,为我国可靠性事业的发展贡献绵薄之力,而另一方面也是对自己理论知识和英语水平的一次检验。

在本书的翻译过程中,能够感觉到原著作者 Krzysztof Kołowrocki 教授深厚的

理论功底和严谨的治学态度。他在专著中介绍了多状态可靠性理论的整体知识网络,给出了对含有退化组件的复杂系统进行多状态可靠性分析、设计和评估的一整套技术方法。这些技术方法主要包括:

- (1) 系统及其组件的多状态可靠性建模方法;
- (2) 系统运行过程建模方法;
- (3) 系统组件多状态可靠性的统计推断方法;
- (4) 系统运行过程的统计推断方法;
- (5) 系统及其组件的多状态可靠性评估方法;
- (6) 系统运行过程规划和费用优化方法等。

他还将多状态理论拓展到安全性、维修性和可用性领域,定义了相应的概念,并推导了求解公式。为了方便读者理解,他在每章结尾都给出了三个案例,对本章中提出的方法进行案例演示和验证。值得一提的是,案例中每个公式的求解过程都非常详细。并且各章中的三个案例的对象都是一致的,分别是典型系统、港口石油管道运输系统以及渡轮系统。前后章节的案例有相互联系,后一章的案例往往要用到前一章得出的模型或者数据。因此,将这三个案例理解并掌握,就能熟练使用书中给出的全部方法。原著作者还在最后一章中,给出了一个实际工程案例——集装箱龙门起重机系统,将书中给出的全部方法再一次进行了详细的演示。不可不谓用心良苦。

对本书的翻译使得译者深刻理解了专著翻译工作的困难。在阅读英文原著的时候,只需要通过快速阅读来理解作者的意思表达,从而弄清原理和方法即可。而翻译工作不同于阅读,它还包含了语言的再组织过程,需要在具备相当专业知识的基础上,弄清原著中每个词汇的具体含义,理解作者每一句的陈述意图,并且将其转变为自己的语言表达出来。在翻译之前,译者查阅了大量国内外关于多状态可靠性理论的文献,以确保专业词汇和对书中内容理解的准确性。在翻译过程中,对于书中一些长难句的处理,也尽量使翻译过来的中文符合日常的语言习惯。

虽然翻译过程非常艰辛,但是通过对本书的翻译,译者自身对多状态可靠性方法的原理和应用有了较为深刻的理解,可靠性专业素养与英语翻译水平也得到了提升,收获确实很大。

读者通过本书的学习,不仅能够掌握一整套复杂系统多状态可靠性方法,还可以了解大量的实际应用案例。因此,本书对于大学高年级学生和研究生深入学习和掌握多状态可靠性的相关理论知识很有帮助,而且对于从事具体工作的工程师有着很大的指导意义。

在本书的翻译过程中,译者得到了很多老师的悉心指导,以及身边同学们慷慨无私的帮助,可以说没有他们,本书不可能与读者顺利见面。在此,译者诚挚感谢

北京航空航天大学曾声奎教授对全书的主审。本书的翻译和录入得到了本科生白宇、沈诗宇、关天宇、范梦飞、陈珪、陈子涵、胡思聪,以及研究生赵健宇、罗敏、纪丁菲、杜绍华、刘昭、丁潇雪和博士生杜学亮、阳纯波的帮助,在此一并感谢。

将这本高水平且涵盖面甚广的多状态可靠性专著翻译成中文,是一项艰巨的工作。限于译者水平,对原著的理解和翻译难免有不妥之处,敬请读者批评、指正。

译者

2013年9月

前 言

本书涉及复杂系统运行过程、可靠性、可用性和安全性的统计推断、评估、预计和优化。关注的重点是由退化组件构成的、在运行过程中其可靠性结构和组件的可靠性、安全性特性随时间变化的多状态系统,本书将这些系统称作复杂系统。可靠性和安全性的统计推断、评估和预计方法,以及分析系统运行过程有效性的方法,对于实际的复杂系统来说具有很高的实用价值。

大多数实际工程系统都非常复杂,因此很难对其可靠性、可用性和安全性进行分析。系统内子系统和组件的庞大数量以及运行过程的复杂性,导致了可靠性、可用性和安全性的统计推断、评估、预计和优化的复杂性。系统具有复杂的运行过程,而且其运行过程对可靠性结构及组件可靠性特性具有重大影响,这在实际工程中是普遍存在的现象。具有这些特性的复杂系统包括电力配送系统,远程通讯系统,线缆运输系统,航海运输系统,水、天然气、石油和各种化学物质的运输管道系统,以及使用皮带传送机和升降机的造船厂和港口运输系统。其中线缆运输系统是复杂系统的典型实例,包括港口的升降机和用于造船厂船舶入坞出坞的船缆运输机。

考虑到这类系统的安全性及其运行过程有效性的重要性,将系统可靠性和安全性分析由二状态方法扩展为多状态方法是合理的。在研究过程中,假设构成系统的多状态组件,其可靠性状态或安全性状态随时间退化。这种假设使得系统可靠性、安全性和运行有效性的分析更加精确。并且这种假设使我们得以确定出系统的临界可靠性或安全性状态。低于临界可靠性或安全性状态意味着系统处在对环境构成危险,抑或不能满足运行有效性允许水平的状态。而系统超出临界可靠性或安全性状态的时间及其分布是一个重要的系统可靠性或安全性特性。该时间的分布函数被称为系统风险函数。它与系统的多状态可靠性、安全性函数非常相关,而这些函数都刻画了多状态系统的基本特性。

对于大型系统而言,准确的系统可靠性函数和系统风险函数意味着非常复杂的函数形式,而这些复杂函数对可靠性从业者的实用价值不大。解决这个难题的一项重要技术是系统可靠性评估的近似方法。该方法在假设系统组件数量趋于无穷后,通过计算系统的极限可靠性,从而以系统可靠性函数的简化形式来代替复杂公式。本书对这方面内容也进行了相应的探讨。

本书提出了一套分析问题的便捷工具,包括使用半马尔可夫模型对系统的运行过程进行建模,以及使用多状态方法进行系统可靠性评估。

本书的目的在于介绍与运行过程相关的复杂不可修/可修的多状态系统的可靠性、可用性和安全性的一般性解析模型。这些模型均由作者提出,并已经实际应用于工程系统和过程。本书提出的复杂系统的综合一般性模型,将可靠性、可用性和安全性模型,与运行过程模型联系起来,同时考虑了可变运行状态对系统可靠性和安全性结构,及其组件可靠性和安全性参数的影响。本书的主要创新为利用多状态系统可靠性和可用性模型,结合系统运行过程的半马尔可夫模型,构造出了与系统运行过程相关的通用可靠性和可用性模型。该联合模型被应用于实际复杂系统可靠性、可用性和安全性的分析中。与此同时,还可以将此联合模型与线性规划相结合,应用于复杂系统可靠性、可用性和安全性优化及运行费用分析中。

本书提出的模型和方法被用于港口和海洋运输系统的可靠性、可用性和安全性分析、统计推断、预计和优化。这些应用案例考虑到了系统时变的运行过程、可靠性和安全性结构及其组件的可靠性和安全性参数。

本书全面而详尽地阐述了可靠性和安全性的统计推断、评估、预计和优化方法的研究现状。书中尽可能广泛地涉及一系列复杂系统的研究分析方法。同时也指出了这些方法的广泛应用潜力。本书包含了一套完整的复杂系统分析方法。需要指出的是,假设构成这些复杂系统的组件具有服从指数分布的多状态可靠性函数,而在解析方法中这个假设是必要的。

第1章介绍了考虑退化的多状态系统可靠性分析的基本概念,定义了系统及其组件的多状态可靠性函数,并且定义了多状态系统在可靠性状态子集中的寿命均值和方差,以及在特定可靠性状态下的寿命均值。本章还介绍了多状态系统风险函数和超过系统临界可靠性状态的时刻,定义了由退化组件构成的多状态系统的串联、并联、“ n 中选 m ”、连续“ n 中选 $m:F$ ”、串-并联、并-串联、串联-“ k 中选 m ”、“ l_i 中取 m_i ”-串联、串联-连续“ k 中取 $m:F$ ”以及连续“ l_i 中取 $m_i:F$ ”-串联等的可靠性结构,并给出了它们的可靠性函数。特别是给出了由具有指数型可靠性函数的组件构成的多状态系统的可靠性函数。此外,定义了多状态系统安全性的基本概念,提出了多状态系统安全性的分析方法,介绍了由具有退化安全性状态的组件所组成的多状态系统的安全性函数和系统风险函数。与此同时,所提出的多状态系统可靠性和安全性模型的应用案例包括典型系统和港口石油管道运输系统的可靠性评估和预计,以及海洋渡轮系统的安全性评估。

第2章研究了复杂系统的运行过程及其运行状态。利用半马尔可夫过程建立了复杂系统运行过程的广义概率模型。为了建立这个模型,定义了系统运行过程处于初始运行状态的概率的向量、系统运行过程在不同运行状态之间转移的概率矩阵,系统运行过程在各运行状态下的条件逗留时间的条件密度函数矩阵和条件

分布函数矩阵。为了描述系统运行过程在特定运行状态下的条件逗留时间,介绍了均匀分布、三角分布、双梯形分布、准梯形分布、指数分布、威布尔分布和烟囱分布。基于该模型的假设条件,得到系统运行过程的主要特性。给出了各类分布下,系统运行过程在特定状态下的条件滞留时间均值。此外,在规定的系统运行时间内,确定了系统运行过程在特定状态下的无条件逗留时间分布函数、系统运行过程在特定状态下的无条件逗留时间均值、系统运行过程在特定状态下的极限瞬态概率以及系统运行过程在特定状态下总逗留时间的近似均值。最后,本章给出了将所提出的模型应用于评估和预计典型系统、港口石油管道运输系统和海洋渡轮系统运行过程的案例。

第3章给出了复杂不可修/可修多状态系统可靠性、可用性和安全性的通用解析模型。这个复杂系统的综合通用模型,将多状态可靠性、可用性和安全性模型,与运行过程模型相结合,同时考虑了不同运行状态下可靠性和安全性结构的变化,以及组件可靠性和安全性参数的变化。本章定义了系统在特定运行状态下的条件可靠性和安全性函数、无条件可靠性和安全性函数以及复杂系统风险函数。对于多状态串联、并联、“ n 中选 m ”、连续“ n 中选 $m:F$ ”、串-并联、并-串联、串联-“ k 中选 m ”、“ l_i 中取 m_i ”-串联、串联-连续“ k 中取 $m:F$ ”以及连续“ l_i 中取 $m_i:F$ ”-串联系统,建立了系统可靠性、可用性、安全性和时变运行过程的联合模型。该联合模型被应用于确定系统的可靠性、可用性、维修性和安全性特性,其中的这些系统具有时变可靠性和安全性结构以及时变的组件可靠性和安全性特性。在所研究系统服从指数分布的假设下,确定了这些系统的无条件可靠性和安全性函数。此外,对于大型系统,简要介绍了来自联合模型的结果与考虑系统极限可靠性函数的结果相结合的可能性。本章所提出的模型和方法被应用于典型系统和港口石油管道运输系统的可靠性和可用性的分析、评估和预计,以及海洋渡轮系统的安全性分析、评估和预计。

第4章给出了复杂系统运行过程的统计推断方法。这些方法和流程用来估计系统运行过程半马尔可夫模型的未知参数,以及对系统运行过程在各运行状态下的条件逗留时间分布函数进行统计推断。本章还给出了系统运行过程处于初始运行状态的概率估计公式、系统运行过程在不同运行状态之间转移的概率估计公式、系统运行过程在各运行状态下条件逗留时间分布参数的估计公式,即利用矩估计法、最大似然估计法等,估计均匀分布、三角分布、双梯形分布、准梯形分布、指数分布、威布尔分布和烟囱分布的参数。本章介绍了将卡方拟合优度检验应用于分布形式选择的假设检验方法;提出了基于Kolmogorov-Smirnov检验的统计数据一致性检验的流程,该流程被应用于不同来源的同一复杂系统运行过程在各运行状态下的条件逗留时间数据集的一致性检验。最后,本章提出的复杂系统运行过程模型未知参数统计推断方法的应用实例,包括典型系统、港口石油管道运输系统和海

洋渡轮系统的运行参数的确定。统计数据集一致性检验流程,被应用于检验来源于两种不同运行条件下的海洋渡轮系统的各运行状态下条件逗留时间的数据集的一致性。

第5章给出了基于复杂系统组件可靠性和安全性状态变化过程的统计数据,来估计组件可靠性和安全性模型中未知参数的流程和公式。将极大似然法应用于估计多状态系统组件可靠性和安全性状态子集的未知迁移强度,且这些组件在不同的系统运行状态下具有不同的指数型可靠性函数。该方法一般适用于处理各种试验的统计数据,这些试验包括小样本试验和结尾试验等。本章还提出了系统特定组件的指数形式多状态可靠性分布函数的假设检验方法。在缺少组件可靠性和安全性状态变化过程的统计数据时,本文给出了一种简单的基于专家经验的估计方法,用于估计可靠性和安全性状态子集的未知迁移强度。此外,本章还介绍了复杂系统组件可靠性和安全性模型中未知参数的统计推断方法的应用案例,包括确定典型系统、港口石油管道运输系统组件的可靠性参数,以及海洋渡轮系统组件安全性参数等案例。

第6章在将系统运行过程的半马尔可夫模型与系统可靠性和安全性的多状态方法以及线性规划法相结合的基础上,提出了针对可变工作条件下的复杂系统运行过程、可靠性、可用性和安全性的优化方法与费用分析方法。本章给出了复杂系统运行过程的优化方法,该方法确定了系统运行状态的最优极限瞬态概率,从而最大化可靠性或安全性状态子集中的系统寿命。此外,本章还介绍了可变工作条件下复杂系统运行费用分析方法,比较了系统运行过程优化前后的运行费用,给出了使可变工作条件下复杂系统可用性最大化和修复费用最少化的修复性维修和预防性维修方案的确定方法。上述方法被应用于可变工作条件下典型系统和港口石油管道运输系统的运行过程、可靠性和可用性优化、运行费用分析,以及海洋渡轮系统的运行过程 and 安全性优化。最后,本章还给出了修复性和预防性维修方案的优化流程,以及该方法在典型系统、港口石油管道运输系统和海洋渡轮系统的应用。

第7章作为本书内容的补充,主要将书中提及的、却未给出具体应用的方法,应用于多种系统的可靠性、可用性和安全性的统计推断、预计和优化。本章将第3章中给出的结论应用于可变工作条件下串联系统和并联系统的可靠性、维修性和可用性的评估和预计;将大型系统可靠性分析的渐近方法应用于可变工作条件下大型并-串联系统的可靠性预计;根据书中给出的连续“ n 中选 m : F ”系统的相关结论应用于钢制盖板的安全性分析。最后,本章通过将系统运行过程、可靠性、维修性和可用性的建模、统计推断、预计和优化的整套方法,综合应用于集装箱龙门起重机系统,直观地说明了复杂系统可靠性和安全性分析方法。

第8章作为本书的总结,包括了对书中提出的理论方法的评价、关于复杂系统可靠性和安全性的开放性问题的综述以及对相关问题研究工作的展望。

目 录

第 1 章 包含退化组件的多状态系统可靠性与安全性建模	1
1.1 引言	1
1.2 多状态系统可靠性分析	1
1.3 多状态系统安全性分析	19
1.4 应用	21
1.4.1 典型系统的可靠性	21
1.4.2 港口石油管道运输系统的可靠性	29
1.4.3 海洋渡轮系统的安全性	35
1.5 本章小结	45
参考文献	45
第 2 章 复杂系统运行过程建模	47
2.1 引言	47
2.2 系统运行过程的半马尔可夫模型	47
2.3 应用	55
2.3.1 典型系统的运行过程	55
2.3.2 港口石油管道运输系统的运行过程	58
2.3.3 海洋渡轮系统的运行过程	62
2.4 本章小结	69
参考文献	70
第 3 章 复杂系统可靠性、可用性和安全性的评估与预计	71
3.1 引言	71
3.2 可变运行条件下多状态系统的可靠性	71
3.3 可变运行条件下大型多状态系统的可靠性渐进方法	79
3.4 可变运行条件下多状态系统的维修性和可用性	82
3.4.1 维修时间可忽略的多状态系统	82

3.4.2	维修时间不可忽略的多状态系统·····	85
3.5	可变运行条件下多状态系统的安全性·····	87
3.6	应用·····	89
3.6.1	可变运行条件下典型系统的可靠性、维修性和可用性·····	89
3.6.2	可变运行条件下港口石油管道运输系统的可靠性、 维修性和可用性·····	103
3.6.3	可变运行条件下海洋渡轮系统的安全性、维修性和 可用性·····	116
3.7	本章小结·····	150
	参考文献·····	151
第4章	复杂系统运行过程的统计推断方法·····	154
4.1	引言·····	154
4.2	复杂系统运行过程的统计推断·····	154
4.2.1	系统运行过程未知参数的定义和数据收集·····	155
4.2.2	系统运行过程基本参数的估计·····	156
4.2.3	系统条件逗留时间分布参数的估计·····	157
4.2.4	系统条件逗留时间分布函数的统计推断·····	161
4.2.5	复杂系统运行过程统计数据的一致性检验·····	163
4.3	应用·····	167
4.3.1	典型系统运行过程的统计推断·····	167
4.3.2	港口石油管道运输系统运行过程的统计推断·····	167
4.3.3	海洋渡轮系统运行过程的统计推断·····	175
4.3.4	海洋渡轮系统运行过程统计数据的一致性检验·····	184
4.4	本章小结·····	189
	参考文献·····	190
第5章	复杂系统组件可靠性和安全性的统计推断方法·····	192
5.1	引言·····	192
5.2	复杂系统组件可靠性和安全性模型的统计推断·····	192
5.2.1	系统组件可靠性和安全性模型未知参数的定义和 数据收集·····	194
5.2.2	系统组件指数型条件多状态可靠性和安全性函数的 参数估计·····	200