



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

# 系统重要性 测度原理与应用

Importance Measures in Reliability, Risk  
and Optimization: Principles and Applications

【美】Way Kuo, Xiaoyan Zhu 著

苗强 王冬 主译

康锐 主审

WILEY



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

# 系统重要性测度原理与应用

Importance Measures in Reliability, Risk and  
Optimization: Principles and Applications

[美] Way Kuo, Xiaoyan Zhu 著

苗强 王冬 主译

康锐 主审

国防工业出版社

·北京·

1194  
169

## 著作权合同登记 图字:军-2013-122号

### 图书在版编目(CIP)数据

系统重要性测度原理与应用/(美)郭位(Kuo, W.),  
(美)朱晓岩(Zhu, X.)著;苗强,王冬主译.—北京:  
国防工业出版社,2014.11

(可靠性维修性保障性学术专著译丛)

书名原文:Importance measures in reliability,  
risk, and optimization; principles and applications

ISBN 978-7-118-09625-5

I. ①系... II. ①郭... ②朱... ③苗... ④王... III.

①系统可靠性-研究 IV. ①N94

中国版本图书馆CIP数据核字(2014)第284256号

Importance measures in reliability, risk, and optimization:  
principles and applications by Way Kuo, Xiaoyan Zhu.  
ISBN 978-1-119-99344-5 (hardback)

©2012 John Wiley & Sons, Ltd.

All rights reserved. No part of this publication may be reproduced, stored in a retrieval system, or transmitted, in any form or by any means, electronic, mechanical, photocopying, recording or otherwise, except as permitted by the UK Copyright, Designs and Patents Act 1988, without the prior permission of the publisher.



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 25 $\frac{3}{4}$  字数 471 千字

2014年11月第1版第1次印刷 印数1—2000册 定价68.00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,具有很强的系统性和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 Scientific、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。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

随着装备性能不断提升,系统结构复杂程度不断增加,其所面临的寿命与可靠性、风险、可用性以及维修保障等问题日益突出。可靠性作为保障重大装备自主创新能力和核心竞争力的共性关键技术与基础性问题,已经引起了政府和企业的深刻关注。在重大装备的需求牵引下,国内在可靠性与风险评估领域的研究得到了快速发展。一方面,在国家层面的各类科技规划中明确了装备可靠性与风险评估研究的基础性和重要性;另一方面,开展装备可靠性、风险及优化研究的科研单位日益增多。共性与关键技术的基础研究,不仅仅是为了解决目前所面临的某些关键技术领域或产业的技术升级问题,更重要的意义在于,它是国家自主创新发展的基石,是国家科技水平核心竞争力的源头和保障。

重要性测度是近年来可靠性领域发展起来的新兴研究方向。早期的重要性测度是对一个概率系统的灵敏度分析。随着系统复杂程度的增加,人们已经对其他类型的重要性测度开展了研究,并在核电装备、航空航天、通信网络、交通运输等诸多行业进行了探索应用。然而,各种重要性测度之间,以及它们与可靠性、风险及优化的紧密联系,目前仍然是一个缺失的环节。特别是在重大装备和复杂系统的可靠性与风险评估方面,如何建立有效的定性、定量分析方法,仍然是一个值得思考的问题。

本书是根据 John Wiley & Sons 公司于 2012 年出版的 *Importance Measures in Reliability, Risk and Optimization* 一书翻译而成,是可靠性、风险评估和优化系列的最新图书之一。该书不仅详细地阐述了重要性测度在可靠性领域的应用,并将重要性测度的思想进行推广来解决可靠性、风险以及数学规划中的问题。该书的作者是国际可靠性领域权威专家 Way Kuo 院士和田纳西大学 Xiaoyan Zhu 博士。作者 Way Kuo 现任香港城市大学校长以及大学杰出教授。他是中国工程院外籍院士、美国国家工程院院士、国际品质学院院士、美国品质学会会士、美国电气和电子工程师学会会士、运筹与管理学研究协会会士、美国统计学会会士、国际工业工程学会会士。该书凝聚了作者多年在重要性测度领域的研究成果,对于国内正在兴起的重要性测度在可靠性、风险与优化理论和实际应用具有重要的指导意义和参考价值。

作为一名从本科就开始学习可靠性专业的研究者,翻译这本由国际可靠性领

域权威专家撰写的可靠性前沿学术巨著,无论在心理上还是生理上都是一个巨大的挑战。在历时近一年的翻译过程中,曾多次为了某些专业术语的准确表达而反复推敲,也多次因为翻译工作的紧迫而挑灯夜战。在翻译过程中,译者尽量遵照原文进行直译,避免出现对原著内容的误解;但由此也导致本书的个别地方可能出现语言的晦涩难懂。

本书共有 19 章,可分为五个部分。第一部分包括第 1 章和第 2 章,主要介绍重要性测度在不同领域的应用和系统可靠性的基本原理。第二部分包括第 3 章到第 8 章,主要介绍各种不同类型的重要性测度,包括单个元件的重要性测度,元件对、元件组的重要性测度,以及 Con/ $k/n$  系统中的重要性测度。第三部分包括第 9 章到第 13 章,分析研究了重要性测度在冗余分配、系统升级和元件分配等诸多问题的应用。第四部分包括第 14 章和第 15 章,主要研究各种重要性测度的关系,并将它们推广到了其他重要的应用领域。第五部分包括第 16 章到第 19 章,研究了重要性测度在数学规划、风险分析以及其他更多领域的广泛应用。本书从重要性测度的基本原理开始,既包含了对基本概念的定义和基本定理的推导证明,也结合了大量的实例进行应用分析。因此,本书对于国内从事可靠性与风险评估领域的工程技术人员和研究人员具有重要的指导意义和参考价值。

本书由苗强和王冬共同担任主译,康锐担任主审。在本书的翻译过程中,参与译著初稿翻译工作的人包括:刘朝琴、谢磊、周雪、杨帅、杨璐、王婕、刘剑锋、高龙、乔纬韬、张学亮。全书由王冬进行第一轮统稿整理,由苗强进行第二轮统稿整理,并由康锐做最后的审核并校对。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的悉心指导与帮助,在此表示衷心的感谢。

由于译者水平有限,译稿中难免有不当和错误之处,敬请读者批评指正。

苗强

四川大学空天科学与工程学院

2014 年 1 月

# 前 言

早在 20 世纪 40 年代末至 50 年代初,可靠性的定义和应用首先出现在通信及交通运输业;自此,可靠性成为武器装备系统性能测度的重要组成部分。然而,早期的可靠性工作仅限于可靠性分析,而且大量的早期理论是基于各种假设而建立的,未充分考虑实际所面临的问题。

随着可靠性设计的发展,关联系统中元件重要性测度的概念于 20 世纪 60 年代首次提出<sup>[1]</sup>。那时的研究对象仅限于二态系统,即系统只有两种状态:正常或失效。严格来说,早期版本的重要性测度只是针对概率系统的灵敏度分析。系统的复杂性使得对重要性测度的研究趋于多元化,各种类型的重要性测度相继涌现,如用于核电站可靠性和安全性设计的 Fussell - Vesely 重要度<sup>[2,3]</sup>等。到目前为止,不同重要性测度之间的确切关系,以及重要性测度在可靠性、风险、数学规划和其他更广阔领域的应用甚少有人研究。本书将首次针对这些待解决的问题进行全面而详细的分析。

在 20 世纪 80 年代,人们提出了一种复杂系统,即 consecutive -  $k$  - out - of -  $n$  系统(表示为 Con/ $k/n$ )<sup>[4]</sup>。很快,研究人员发现仅用某一类型的重要性测度很难对其实现优化设计,有必要深入研究其他类型的重要性测度。在软件系统可靠性设计中也一样,利用重要性测度可以在有限的资源下提高软件可靠性<sup>[5]</sup>,而系统的优化设计仍然是遥不可及。随着优化设计工具的发展,基于重要性测度的启发式算法等优化设计方法在 20 世纪 90 年代相继提出<sup>[6,7]</sup>,这些方法都有利于可靠性优化设计的实现。

本书对可靠性领域中的重要性测度进行了全面的分析,将重要性测度的思想应用在可靠性设计、风险、数学规划等问题中,附录 A 列出了部分理论的证明过程。本书分为五部分。

第一部分,“引言和背景”包含两章。重要性测度既可以用于确定性系统,也可以用于随机系统,其应用领域十分广泛。通常,在危机管理中最经济有效的方法是快速提高系统性能测度,如可靠度等,而不是寻找一种面面俱到的整体解决方案。第 1 章主要介绍重要性测度在不同领域中的应用实例。第 2 章介绍系统可靠性的基本原理。除了可靠性和可用性的定义外,本章还给出了关联系统、割集和路集、系统特征、各种系统结构、冗余性、可靠性优化及复杂度等名词的经典定义。

第二部分,“重要性测度的原理”包含六章。这一部分主要介绍不同类型重要性测度的数学表达式、物理意义、概率解释、计算方法等。第3章介绍关联系统中元件重要性测度的本质和分类,关联系统在第2章中有介绍。第4章~第6章分别介绍三类主要的重要性测度:可靠性重要度、寿命重要度和结构重要度。其中,结构重要度用于评估系统中各位置的相对重要性,因此它实际上是描述系统中各元件位置的相对重要度。

第4章~第6章讨论的重要性测度是用于衡量单个元件性能的指标,可以评估单个元件对系统性能的重要性。与此相对,第7章讨论元件对或元件组的重要性测度,这种测度可以用来评估元件对或元件组的交互作用对系统性能的影响程度。相对单个元件的重要性测度而言,元件对或元件组重要性测度可以提供更多有用的信息。第8章介绍重要性测度以及它们与  $Con/k/n$  系统(包括 F 系统和 G 系统)的关系。在这些章节中,系统及其元件的基本假设与第2章相同。同时,本部分还介绍了重要性测度在网络可靠性问题及其他关联系统以外的应用。

第三部分,“可靠性设计的重要性测度”包含五章。通过第二部分所介绍的各种重要性测度以及第三部分对这些重要性测度的应用,我们可以解决冗余分配、系统升级和元件分派(CAP)等诸多问题。第9章~第13章分别阐述了重要性测度在这三方面的应用。例如,一个可靠性分析师会提出系统结构并评估系统性能,而一个系统分析师更关注的是系统中的重要元件,后者可以实现用最少的额外资源提高系统性能。第10章介绍了系统升级的重要性测度,并列举了一些特别的例子。

在可靠性优化领域,CAP 问题引起了广泛的关注。重要性测度与 CAP 关系非常密切,应用重要性测度可以找到 CAP 问题的最优或近似解。第11章讨论一般关联系统中的元件分配问题,这类 CAP 问题通过在系统不同位置合理分配元件达到系统可靠度最大化的目的。第12章主要介绍  $Con/k/n$  系统及其衍生系统的 CAP 问题和应用。第13章讨论采用 B-重要度解决 CAP 的启发式方法。对于如今越来越复杂的各种大型系统,启发式算法(有时是元启发式算法)对其优化设计能够起到非常大的作用。

第四部分,“关系和推广”包含两章。第14章研究第二部分和第三部分所介绍的各种重要性测度之间的关系,并从不同角度对它们进行比较,总结和对比的重点是 B-重要度的本质;另外,第14章将探讨重要性测度的计算。在第15章中,将放宽第2章中所做的部分假设,并研究在假设放宽情况下的重要性测度。这一章还特别讨论了关于非关联系统、多态系统、连续系统和可修复系统的重要性测度。

第五部分,“对风险分析及数学规划的广泛影响”包含四章。重要性测度的应用领域非常广泛,包括网络流、 $R$ -终端网络、数学规划、灵敏度和不确定性分析、

扰动分析、软件可靠性、故障诊断以及概率风险分析(PRA)和概率安全评估(PSA)等。第16章~第19章介绍重要性测度在这些不同领域中的应用,表明重要性测度方法可以用于最优化问题中,例如第17章中介绍的用于求解线性规划问题的单纯形法以及求解整数规划问题的分枝定界法等。

## 简序

尽管如今我们可以用最快的计算机设备处理许多现代系统中遇到的问题,但是采用优化方法寻找一般系统的最优设计依然面临巨大挑战,在不能准确估算元件可靠度的情况下甚至更难。本书全面深入地介绍了重要性测度,以及重要性测度与其他设计工具相结合的建模方法。这其中包括一些方法,它们仅需要知道元件可靠度的排序或范围,而不需要知道可靠度准确值。这种特性在一定程度上降低了元件可靠度估计的难题,而元件可靠度估计的问题又恰好是各种可靠性问题中必要而难以解决的。基于此,一些重要性测度是在元件可靠度未知的假设下进行设计;另一些重要性测度则是在元件可靠度具有不同范围的条件下进行设计。尽管本书中的理论都经过了严格的证明,但是仍然存在很多难以解决的问题,需要读者进一步研究解决。本书给出了许多通过我们的研究首次得出的结论。

在撰写本书之前,我们仔细阅读了大量关于重要性测度的文献。在这些文献中我们发现了一些或大或小的错误,有时在证明的过程中我们甚至得到了完全不同的结论。在修正这些错误之后,本书中采用了正确的版本。我们希望尽自己最大的努力为读者提供全面完整的资料,但仍有可能不可避免地出现一些错误。总之,我们非常感谢本书所参考的文献作者为本书做出的贡献,尽管他们得出的部分结论可能存在错误,但他们仍然为本书提供了许多有价值的新观点。

本书是可靠性建模<sup>[8]</sup>和可靠性设计<sup>[9]</sup>中不可分割的部分。在各种可靠性、风险和数学规划等复杂问题中,基于重要性测度的方法是最实用的决策工具之一,因此,有待在更广泛的领域对其进行研究。重要性测度的概念在数学规划领域得到了广泛的认可,但在优化领域的应用还相对较少,有待发展。通过这本书,我们希望读者在各自的研究或工作领域中遇到各种开放式问题时,能够找到行之有效的解决方法。最后,希望广大读者能喜欢这本由我们可靠性从业人员和研究人员筹划多年的书。

## 参考文献

- [1] Birnbaum Z W. 1969. On the importance of different components in a multicomponent system. In *Multivariate Analysis*, Vol. 2 (ed. Krishnaiah PR). Academic Press, New York, pp. 581-592.

- [2] Fussell J B. 1975. How to hand – calculate system reliability and safety characteristics. IEEE Transactions on Reliability R – 24, 169 – 174.
- [3] Vesely W E. 1970. A time dependent methodology for fault tree evaluation. Nuclear Engineering and Design 13, 337 – 360.
- [4] Chiang D T and Niu S C. 1981. Reliability of consecutive –  $k$  – out – of –  $n$ ; F system. IEEE Transactions on Reliability R – 30, 87 – 89.
- [5] Fiondella L and Gokhale S S. 2008. Importance measures for a modular software system. Proceedings of the 8th International Conference on Quality Software, pp. 338 – 343.
- [6] Kuo W and Prasad V. 2000. An annotated overview of system – reliability optimization. IEEE Transactions on Reliability 49, 176 – 187.
- [7] Kuo W and Wan R. 2007. Recent advances in optimal reliability allocation. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Series A 37, 143 – 156.
- [8] Kuo W and Zuo MJ. 2003. Optimal Reliability Modeling: Principles and Applications. John Wiley & Sons, New York.
- [9] Kuo W, Prasad VR, Tillman FA, and Hwang CL. 2006. Optimal Reliability Design: Fundamentals and Applications, 2nd edn. Cambridge University Press, Cambridge, UK.

# 目 录

## 第一部分 引言和背景

|                                                  |    |
|--------------------------------------------------|----|
| 第 1 章 重要性测度简介 .....                              | 2  |
| 参考文献 .....                                       | 8  |
| 第 2 章 系统可靠性的基本原理 .....                           | 10 |
| 2.1 方框图 .....                                    | 10 |
| 2.2 结构函数 .....                                   | 11 |
| 2.3 关联系统 .....                                   | 13 |
| 2.4 关联系统中的模块 .....                               | 14 |
| 2.5 关联系统中的割集和路集 .....                            | 15 |
| 2.6 关联系统中的临界割集和临界路集 .....                        | 18 |
| 2.7 性能测度 .....                                   | 20 |
| 2.7.1 关于任务时间的可靠性 .....                           | 20 |
| 2.7.2 基于时间 $t$ 的可靠性函数 .....                      | 22 |
| 2.7.3 可用性函数 .....                                | 24 |
| 2.8 随机排序 .....                                   | 25 |
| 2.9 关联系统的特征 .....                                | 25 |
| 2.10 多线性函数和泰勒(麦克劳林)展开 .....                      | 28 |
| 2.11 冗余性 .....                                   | 29 |
| 2.12 可靠性优化和复杂度 .....                             | 30 |
| 2.13 Consecutive - $k$ - out - of - $n$ 系统 ..... | 31 |
| 2.14 假设条件 .....                                  | 33 |
| 参考文献 .....                                       | 34 |

## 第二部分 重要性测度的原理

|                                 |    |
|---------------------------------|----|
| 第3章 重要性测度的本质 .....              | 38 |
| 3.1 可靠性中的重要性测度 .....            | 38 |
| 3.2 分类 .....                    | 39 |
| 3.3 $c$ 类和 $p$ 类重要度 .....       | 40 |
| 3.4 最小割集和最小路集的重要性测度 .....       | 40 |
| 3.5 术语 .....                    | 41 |
| 参考文献 .....                      | 41 |
| 第4章 可靠性重要度 .....                | 43 |
| 4.1 B-可靠性重要度 .....              | 43 |
| 4.1.1 对系统正常与系统失效的B-可靠性重要度 ..... | 48 |
| 4.1.2 临界可靠性重要度 .....            | 48 |
| 4.1.3 贝叶斯可靠性重要度 .....           | 49 |
| 4.2 FV可靠性重要度 .....              | 50 |
| 4.2.1 $c$ -FV可靠性重要度 .....       | 50 |
| 4.2.2 $p$ -FV可靠性重要度 .....       | 50 |
| 4.2.3 状态向量分解 .....              | 51 |
| 4.2.4 性质 .....                  | 52 |
| 参考文献 .....                      | 54 |
| 第5章 寿命重要度 .....                 | 56 |
| 5.1 B-TDL重要度 .....              | 56 |
| 5.1.1 临界TDL重要度 .....            | 58 |
| 5.2 FV TDL重要度 .....             | 58 |
| 5.2.1 $c$ -FV TDL重要度 .....      | 58 |
| 5.2.2 $p$ -FV TDL重要度 .....      | 60 |
| 5.2.3 状态向量分解 .....              | 61 |
| 5.3 BP TIL重要度 .....             | 62 |
| 5.4 BP TDL重要度 .....             | 67 |
| 5.5 TDL重要度的数值比较 .....           | 68 |
| 5.6 总结 .....                    | 69 |
| 参考文献 .....                      | 70 |

|                                             |     |
|---------------------------------------------|-----|
| 第 6 章 结构重要度 .....                           | 71  |
| 6.1 B-i.i.d. 重要度和 B-结构重要度 .....             | 71  |
| 6.2 FV 结构重要度 .....                          | 74  |
| 6.3 BP 结构重要度 .....                          | 75  |
| 6.4 基于 B-i.i.d. 重要度的结构重要度 .....             | 78  |
| 6.5 排列重要度和排列等价 .....                        | 78  |
| 6.5.1 与最小割集和最小路集的关系 .....                   | 79  |
| 6.5.2 与系统可靠性的关系 .....                       | 83  |
| 6.6 控制重要度 .....                             | 85  |
| 6.7 割集重要度和路集重要度 .....                       | 86  |
| 6.7.1 与 B-i.i.d. 重要度的关系 .....               | 88  |
| 6.7.2 计算 .....                              | 90  |
| 6.8 绝对重要度 .....                             | 91  |
| 6.9 割集一路集重要度,最小割集重要度和最小路集重要度 .....          | 92  |
| 6.10 首项重要度和稀有事件重要度 .....                    | 93  |
| 6.11 结构重要度的 $c$ 类和 $p$ 类 .....              | 94  |
| 6.12 对偶系统的结构重要度 .....                       | 96  |
| 6.13 重要性测度之间的控制关系 .....                     | 97  |
| 6.13.1 绝对重要度与控制重要度 .....                    | 97  |
| 6.13.2 控制重要度与排列重要度 .....                    | 97  |
| 6.13.3 控制重要度与最小割集、最小路集重要度 .....             | 97  |
| 6.13.4 排列重要度与 FV 重要度 .....                  | 97  |
| 6.13.5 排列重要度与割集一路集重要度、最小割集重要度和最小路集重要度 ..... | 101 |
| 6.13.6 割集一路集重要度与割集重要度和路集重要度 .....           | 103 |
| 6.13.7 割集一路集重要度与 B-i.i.d. 重要度 .....         | 104 |
| 6.13.8 B-i.i.d. 重要度与 BP 重要度 .....           | 104 |
| 6.14 总结 .....                               | 104 |
| 参考文献 .....                                  | 108 |
| 第 7 章 元件对和组的重要性测度 .....                     | 110 |
| 7.1 联合可靠性重要度和联合失效重要度 .....                  | 110 |
| 7.1.1 相关元件的联合可靠性重要度 .....                   | 113 |
| 7.1.2 两个门事件的联合可靠性重要度 .....                  | 113 |
| 7.1.3 $k$ -out-of- $n$ 系统的联合可靠性重要度 .....    | 114 |