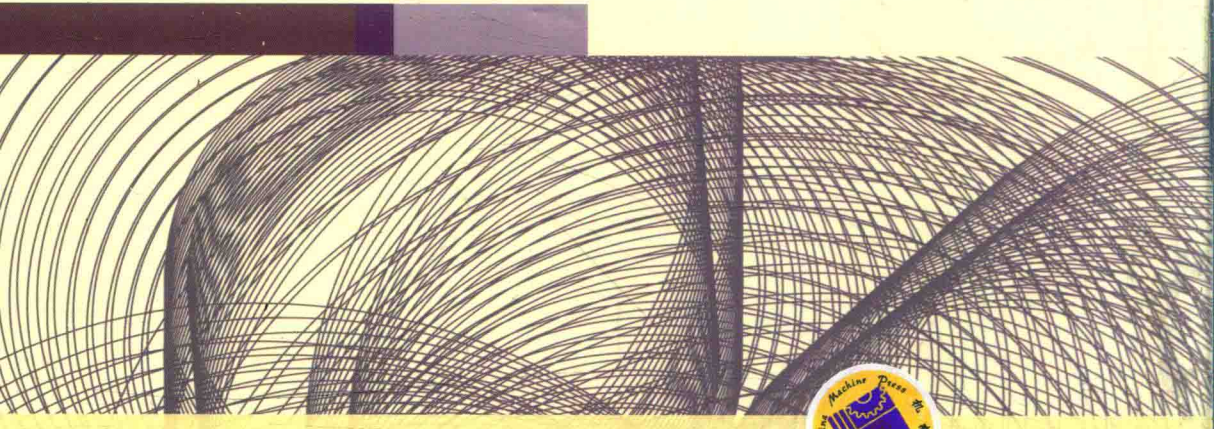
参数不确定性评估与可靠性设计方法

Evaluation with uncertainty parameters and approaches to reliability design

张瑞军 邱继伟 张路路 著



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

参数不确定性评估与可靠性设计方法

张瑞军　邱继伟　张路路　著

机械工业出版社

现代机械结构组成复杂，工作环境严酷，精度要求高，寿命要求长，而设计分析和服役过程中存在设计参数和外部干扰等诸多不确定性因素，进而导致可靠性问题突出，如何充分利用多重不确定性信息开展机械系统高可靠性设计分析是目前面临的核心问题。本书是作者在国家自然基金和山东建筑大学博士基金的资助下，整合多年来在可靠性理论和不确定性分析理论方面的研究成果及工程应用成果完成的。书中详细阐述了参数不确定性设计方法的理论基础和优势，深化了灰色系统理论与信息公理理论、模糊理论与信息公理理论及模糊理论与可靠性理论相结合的参数不确定性评估技术；拓展了灵敏度设计理论、独立公理理论、灰色系统理论、多目标优化理论、稳健设计理论与可靠性理论相结合的参数不确定性设计方法。作者对提出的每种不确定性方法，均结合工程应用阐述了基本原理、实现过程，并与其他方法进行了对比分析研究。

本书可供高等院校、科研机构等从事机械设计理论和方法、机电产品评估研发工作的研究人员及相关领域的工程技术人员参考使用。

图书在版编目(CIP)数据

参数不确定性评估与可靠性设计方法/张瑞军，邱继伟，张路路著. —北京：机械工业出版社，2016.5

ISBN 978-7-111-53767-0

Ⅰ.①参… Ⅱ.①张…②邱…③张… Ⅲ.①机械设计—结构设计—研究 Ⅳ.①TH122

中国版本图书馆 CIP 数据核字（2016）第 103816 号

机械工业出版社(北京市百万庄大街 22 号　邮政编码 100037)
策划编辑：李万宇　责任编辑：李万宇
责任校对：樊钟英　封面设计：马精明
责任印制：常天培
北京圣夫亚美印刷有限公司印刷
2016 年 6 月第 1 版第 1 次印刷
169mm×239mm ·9.75 印张·2 插页·182 千字
0001—2000 册
标准书号：ISBN 978-7-111-53767-0
定价：49.00 元

凡购本书，如有缺页、倒页、脱页，由本社发行部调换

电话服务　　网络服务
服务咨询热线：010-88361066　机 工 官 网：www.cmpbook.com
读者购书热线：010-68326294　机 工 官 博：weibo.com/cmp1952
010-88379203　金　书　网：www.golden-book.com
封面无防伪标均为盗版　　教育服务网：www.cmpedu.com

前 言

随着现代科学技术的飞速发展，机械装备正向着大型化、复杂化发展，保证其安全、可靠地工作对于国民经济发展以及国家安全具有重要意义。然而，机械装备运行状况复杂、工作环境恶劣，使得其正常工作的可靠性与稳定性受到了严峻挑战，因而，适用于机械装备的安全评估技术与可靠性技术已成为相关领域研究的热点与重点。由于机械装备自身结构复杂、受外界干扰较多，使得在对其进行研究过程中不得不考虑诸多不确定性因素，这些不确定性因素既包含外部干扰的不确定性，又包含系统内参数的不确定性。同时，对机械装备方案进行安全评估中所考虑的不确定性因素与对系统、结构进行可靠性设计时所考虑的不确定性因素各不相同，所以在机械装备的设计中，需要综合考虑其中存在的多重不确定性因素。机械装备的安全评估与可靠性设计是一个极其复杂的问题，是一个包括数学、力学、物理学、材料学和机械工程等多学科交叉的研究领域。鉴于此，本书着重解决了不确定性参数下机械装备的安全评估技术与可靠性设计理论方法的关键问题。本书的研究工作得到了国家自然科学基金“抑制起重机载荷摆振最优时滞滤波理论研究”和山东建筑大学博士基金“随机参数高速曳引电梯提升系统振动耦合机理研究”资助。

本书采用理论分析、过程推导、实例验证相结合的方法，对机械装备中方案安全评估问题、系统可靠性问题以及结构可靠性稳健优化设计问题进行了研究，主要内容包括以下四个方面：

1）针对现有信息公理评价方法在如何获得更符合实际的信息量和信息公理应用范围扩展等方面存在的局限性，提出了一种基于模糊理论和信息公理的模糊信息公理方案优选方法，并利用灰色聚类把定性指标进行了白化处理，克服了公理设计不能评价定性指标的缺点，采用信息公理进行方案评价避免了一般评价法中权重对评价结果的影响。

2）建立了模糊多态贝叶斯网络模型，着重解决了系统可靠性分析过程中信息的模糊性、多态性和动态性问题，针对不同机械装备系统各自特点，提出了三种系统可靠性分析方法，并通过与当前较为成熟的其他方法相比较，验证了

书中所提方法的有效性。

3）根据机械系统振动稳定性准则，考虑系统自身参数和激振载荷的不确定性及激振频率的变化，构建系统共振失效极限状态函数。基于摄动理论及灵敏度理论研究激振频率变化过程中机械装备系统的共振可靠性参数灵敏度，找出影响系统共振可靠性敏感性比较大的结构参数。

4）通过对目标函数和约束条件进行灵敏度分析，生成目标函数和约束函数的灵敏度附加项，提出了两种基于灵敏度附加目标函数的可靠性稳健优化设计模型。基于独立公理，使用正交试验和方差分析技术确定设计变量对各个设计目标的影响程度，将设计参数按无耦合或准耦合设计形式分组，把多目标优化问题单目标化，避免多个设计目标之间的反复权衡。同时，针对不同评价者对目标获取信息的局限性，基于灰色系统理论把评价者对目标的评估分配在一定范围内，给出了计算各目标函数权重系数的专家评估方法。

研究内容是在查询、总结现有相关领域研究成果的基础上进行的，对当前相关领域研究中所存在的问题进行了探索与尝试，然而，由于所研究的内容涉及多学科交叉，且当前物理实验数据较少，因此，相关理论成果还有待于进一步实验验证。作者希望能够通过本书为研究机械装备安全评估技术与可靠性分析技术的相关学者，提供一种可以借鉴的思维方式。本书从工程实用角度出发，系统地阐述了不确定性参数下机械装备的安全评估技术与可靠性设计理论及相关作者最新的研究成果，是主要作者张瑞军教授近10年来在机械产品可靠性设计分析领域中科研成果的总结，同时也包含了张教授指导的硕士研究生邱继伟、张路路、司鑫鑫等所做的相关研究工作。

全书共分为8章，其中第1、2、4、7章由张瑞军撰写，第3、8章由邱继伟撰写，第5、6章由张路路撰写，全书由张瑞军统稿，北京航空航天大学博士邱继伟为本书提供了部分素材，并对部分内容做了校核，研究生王琛为本书做了大量的图形绘制、整理工作。此外，感谢山东建筑大学机电工程学院相关领导、同事的支持与鼓励。本书在撰写过程中借鉴了大量国内外参考文献，参考了相关领域学者的研究内容，在此对各位作者、学者表示感谢。

尽管作者慎之又慎，但限于作者能力与水平，书中难免存在不当之处，恳请读者批评指正。

作　者

2016年2月

此为试读，需要完整PDF请访问：www.ertongbook.com

目 录

前言

第1章 绪论 …… 1

1.1 参数不确定性理论综述 …… 1

1.2 公理设计评估技术 …… 2

1.3 贝叶斯网络可靠性评价技术 …… 5

1.4 可靠性稳健设计 …… 7

1.4.1 动力可靠性研究现状 …… 7

1.4.2 结构可靠性稳健设计进展 …… 7

1.5 本书的主要内容 …… 8

1.6 本章结论 …… 10

参考文献 …… 10

第2章 基于灰色聚类和信息公理的设计方案评价方法 …… 16

2.1 引言 …… 16

2.2 灰色理论及信息公理概述 …… 16

2.2.1 灰色理论概述 …… 17

2.2.2 信息公理概述 …… 18

2.3 基于灰色聚类和信息公理的方案评价模型 …… 20

2.3.1 构建评价指标体系 …… 21

2.3.2 确定评价指标类型及范围 …… 21

2.3.3 信息量计算及最优方案确定 …… 22

2.4 工程案例及应用 …… 23

2.4.1 基于灰色聚类和信息公理的新型立体车库设计方案评价 …… 23

2.4.2 配套汽车搬运器设计方案优选 …… 28

2.5 本章小结 …… 31

参考文献 …… 32

第3章 模糊参数信息公理设计方案评价方法 …… 33

3.1 引言 …… 33

3.2 信息公理 …… 34

3.3 模糊数学 …… 35
3.4 评价指标体系的建立 …… 37
3.5 评价指标隶属函数的确定 …… 37
3.6 模糊信息量的计算 …… 38
3.7 基于信息公理方案的模糊评价方法 …… 41
3.8 工程案例及应用 …… 42
3.8.1 夹持轮胎汽车搬运器的改进模糊评价方法 …… 42
3.8.2 高速曳引电梯提升系统设计方案优选 …… 48
3.9 本章小结 …… 55
参考文献 …… 55
第4章 模糊支撑半径变量贝叶斯网络多态系统可靠性分析 …… 57
4.1 引言 …… 57
4.2 模糊支撑半径变量隶属函数的构造 …… 58
4.3 变量隶属函数多态 BN 故障分析 …… 60
4.3.1 多态故障 BN …… 60
4.3.2 叶节点故障概率 …… 61
4.4 工程案例及应用 …… 61
4.4.1 大型自动式液压载重车液压悬架系统故障模糊可能性分析 …… 61
4.4.2 数控机床主轴系统可靠性分析与仿真实验 …… 62
4.5 本章小结 …… 66
参考文献 …… 66
第5章 融合故障动态性和模糊性的贝叶斯网络可靠性分析 …… 68
5.1 引言 …… 68
5.2 融合动态函数与模糊集合理论的 BN 根节点构建 …… 70
5.3 基于模糊动态根节点的多态系统叶节点故障可能性分析 …… 72
5.4 基于模糊动态根节点的多态系统重要度分析 …… 72
5.5 工程案例及应用 …… 73
5.5.1 载重车行走系统可靠性分析 …… 73
5.5.2 高速电梯柔性提升系统轿厢溜梯事故分析 …… 78
5.6 本章小结 …… 84
参考文献 …… 85
第6章 区间三角模糊贝叶斯网络可靠性分析 …… 87
6.1 引言 …… 87
6.2 区间三角模糊多态 BN 的构建 …… 88
6.2.1 三角模糊 BN 节点的构建 …… 88
6.2.2 区间三角模糊 BN 节点的构建 …… 89
6.3 区间模糊多态 BN 的 DAG …… 89

6.4　区间模糊多态 BN 的 CPT …… 90
6.5　基于区间三角模糊 BN 的可靠性评估 …… 91
6.5.1　叶节点故障状态模糊可能性 …… 91
6.5.2　去模糊根节点后验概率 …… 92
6.5.3　根节点区间三角模糊重要度 …… 93
6.6　工程案例及应用 …… 95
6.6.1　塔机倾覆事故可靠性分析 …… 95
6.6.2　全数字化保护系统可靠性分析 …… 98
6.7　本章小结 …… 102
参考文献 …… 103
第 7 章　随机参数动态系统共振可靠性灵敏度分析 …… 104
7.1　概述 …… 104
7.1.1　随机参数振动理论概述 …… 105
7.1.2　动力可靠性理论与可靠性灵敏度设计概述 …… 105
7.2　系统频率响应分析 …… 107
7.2.1　系统振动方程建立 …… 107
7.2.2　基于摄动法的系统振动的固有频率 …… 108
7.3　可靠性计算方法 …… 109
7.3.1　一次二阶矩法 …… 109
7.3.2　随机摄动技术 …… 111
7.4　随机参数共振可靠性灵敏度分析 …… 112
7.4.1　共振问题功能函数建立 …… 112
7.4.2　共振问题的可靠性灵敏度分析 …… 113
7.5　工程案例及应用 …… 115
7.5.1　同步带传送横向振动的共振可靠度分析 …… 115
7.5.2　随机参数高速电梯轿厢系统共振可靠性灵敏度分析 …… 122
7.6　本章结论 …… 125
参考文献 …… 125
第 8 章　基于多目标非耦合优化策略的可靠性稳健优化设计 …… 129
8.1　引言 …… 129
8.2　基于随机摄动法的优化设计思想 …… 130
8.3　基于灵敏度附加项的可靠性稳健优化设计模型 …… 131
8.3.1　基于灵敏度附加项的可靠性稳健设计思想 …… 131
8.3.2　目标函数灵敏度附加项的产生 …… 131
8.3.3　约束函数灵敏度附加项的产生 …… 132
8.3.4　建立可靠性稳健优化设计模型 …… 132
8.4　基于独立公理的可靠性稳健优化设计模型实现方法 …… 133

8.4.1 独立公理 …… 133
8.4.2 基于独立公理的非耦合设计方法 …… 134
8.4.3 增广乘子求解法 …… 135
8.4.4 工程案例及应用 …… 136
8.5 基于灰色系统理论的可靠性稳健设计模型实现方法 …… 143
8.5.1 基于灰色系统理论的权系数评估法 …… 143
8.5.2 内燃机气门弹簧可靠性稳健优化设计 …… 144
8.6 本章结论 …… 146
参考文献 …… 146

第1章

绪　论

本章基于参数不确定性评估与可靠性设计方法课题的研究背景和意义，通过对参数不确定性理论公理设计评估技术、贝叶斯网络可靠性评价技术及可靠性稳健设计等相关研究的文献综述，概括描述了机械装备安全评估和可靠性设计的研究现状与进展。针对由于机械装备自身结构以及运行环境的复杂而产生的参数不确定性问题提出了本书的研究内容，阐明了各个章节之间的关系。

1.1　参数不确定性理论综述

当前，按照参数不确定性因素产生机理的不同，可以将不确定性分为随机性、模糊性和未确知性。“随机性”的产生在于对因果关系认知的不充分，表现为因果规律的不完整性所造成产生的结果不可预知。事物在发展过程中会受到外界多种偶然因素的干扰，因此，事物的发展结果或多或少具有随机性。解决多次重复随机不确定性事件的数学方法有概率论、数理统计和随机过程理论等；而对于一次或少数几次随机事件，决策理论是解决这类不确定性问题的重要数学方法。“模糊性”是指事件的属性难以用非此即彼的状态来确定，常常呈现出亦此亦彼的特点，造成该特性的原因在于人们认识的缺陷使得事物边界不清晰。当前人们所考虑事物的模糊性主要指无法给事物一个明确的定义，或者难以用精确值来描述事物所处的状态，因此，人们往往使用模糊性语言或区间集合值来对事物进行表示。解决事物中所存在的模糊因素的数学工具主要有模糊集合理论、区间理论、灰色理论和模糊随机过程理论。“未确知性”是指决策者在对某项事物进行决策时，所研究和处理的部分信息、因素既没有表现出随机性，又没有表现出模糊性，但决策者就当前所掌握的信息难以确定事物的真实状态和数量关系。这种在决策过程中需要利用的纯主观不确定性信息称之为未确知信息。未确知数学可用来处理未确知事件。

对于机械装备而言，其设计和运行过程中的参数不确定性主要有随机性和

模糊性两种形式。由于机械装备承受载荷运行，造成各种响应和固有特性中的不确定性部分取决于与控制其强度有关的材料性能和几何尺寸的实际值，因此，必须关注物理量（外部载荷、材料性能、几何尺寸）中所存在的不确定性，这些参数不确定性往往表现为随机性的特点。对于需要大量统计数据作支撑的信息，由于受到历史数据缺失和统计本身误差因素的限制，使得所量化的数据信息不能对对象特征完整描述，从而具有不确定性（如部件的失效概率、指标评价、权重值），这些参数不确定性往往表现出模糊性的特点。

从严格意义上来说，参数不确定性是参数某种程度上的误差或偏差，想要获取这些参数响应的准确界限，必须将这些参数化作不确定量来处理。一般情况下，对机械装备进行设计和分析时，需要采用适当的方法量化这些不确定参数。参数的不确定性问题，最终都是通过数学模型的方式来表示与求解的，当前所研究的不确定性问题数学模型主要有随机模型、概率模型、模糊模型、未确知模型、凸集模型和区间模型。

1.2 公理设计评估技术

1. 公理设计概述

公理设计[1,2]（Axiomatic Design，AD）理论是通过对大量成功的设计实例进行分析归纳，将设计过程的本质加以抽象而形成的一种设计理论，广泛应用于产品、过程、系统、软件、组织、材料和商业计划等各种类型的设计，由麻省理工学院的 Suh 于 1990 年正式提出，其主要设计理论包括域、层次结构、映射和两条设计公理，以及若干条定理和推论。通过在各种类型的设计中应用此设计理论，使设计过程的并行度得到了有效的提高，增加了设计过程的创新性。当前，公理设计理论已广泛应用于设计领域，并已成为现代产品设计的重要方法之一。

公理设计是一个自顶向下的映射、分解过程，即从设计高层次的抽象概念到详细细节逐级分解，并在各个域中进行“之字形”映射，从而完成设计过程。通过构建不同域间的“之字形”映射过程，从而减少方案搜索的随机性，并减小设计过程中的迭代次数[3]。

Suh 研究了各种不同类型的设计方案，对产品设计的特征与属性进行了分析，得到两条评价设计优劣的基本设计公理，并将其应用于设计实践，对设计过程进行指导。

- 公理一：独立公理——保持功能要求独立。即在功能域中每一层分解得

此为试读，需要完整PDF请访问：www.ertongbook.com

到的功能要求集合中的元素应相互独立。

- 公理二：信息公理——最优的设计使得设计的信息量为最小。

独立公理主要说明功能要求和设计参数之间的关系，其焦点是功能要求和设计参数之间的变换关系，它要求通过选择恰当的设计参数保持功能间的独立。独立公理要求的是设计中的诸功能相互独立，而不是物理部件相互独立。信息公理表明在所有满足独立公理的设计中，包含信息量最少的设计是最优设计。信息公理为设计者提供了一个可量化的设计质量评估准则。因为信息量是由概率决定的，所以信息公理同时也说明了具有最高成功率的设计是最佳设计。因此，公理设计为稳健设计提供了理论基础，而稳健设计是信息公理的逻辑结果[4]。

2. 信息公理现状

信息公理是公理设计中的重要设计理论之一，主要是通过计算信息量对各种类型的设计进行评价，信息量越小，满足功能需求的成功率越大。其研究现状可分为以下两种：在信息量计算方法研究与应用方面，李明等[5]针对信息量无穷大以致无法进行排序的问题，提出差异信息量的概念，得出差异信息量越小，需要调整的功能越少，越能满足需求的结论。程贤福[6]将信息公理引入灰色关联分析中，提出了基于灰色关联分析和信息公理的优选方法，以信息量为测度评价各备选方案与理想方案的关联程度，优选最佳方案，为实现多属性优选，修正了信息量计算公式，以链条输送机为例验证了该方法的有效性与可行性。张丽新等[7]将灰色聚类理论与信息公理相结合，建立了基于灰色信息公理的施工方案评价模型，并将其应用于施工方案评价，采用正态模糊分布曲线描述各自隶属度，提出了相应的指标信息量计算方法，用机械式停车设备的方案评价验证了该方法的有效性。程贤福[8]针对多指标评价中属性值为不确定性区间数的问题，将可能度和信息公理相结合，提出了基于可能度和信息公理的方案优选方法，此方法中决策者无需对指标进行规范化过程，为实现多属性决策，修正了信息量计算公式。

在信息公理评价方法研究与应用方面，刘曦泽等[9]在深入分析产品平台定义及特点的基础上，结合复杂网络理论和公理设计中的信息公理，提出了一种基于结构的产品平台设计方法，通过计算节点与关键节点的关联度，确定平台内的重要节点，并采用信息公理评价备选平台的性能，实现循环的设计过程。程贤福等[10]针对属性值包含实数、区间数和模糊数的混合型多属性产品方案评价问题，提出了一种基于信息公理的评价模型，并以信息量作为统一测度比较方案间的优劣程度，实现方案的优劣排序，减弱了各评价指标权重对评价结果的影响，从而为解决混合型多属性评价优选问题提供了一条新的途径。胡旭洁

等[11]为融合先进技术，快速有效地进行创新设计，提出了基于信息公理的模糊方案评价方法，应用模糊理论量化定性的评价指标，为产品设计提供科学的决策依据。尤后兴等[12]为解决群体决策过程中难以精准确定指标权重和决策信息的问题，提出了基于集值统计和信息公理相结合的群决策方法，采用区间数表示决策个体对各指标的决策信息，用集值统计模型计算决策群体对各指标决策信息的综合评价值，并引入观点分歧度概念，以判定综合评价值的有效性；以有效的综合评价值作为决策群体期望的指标设计范围，根据信息公理计算各方案的信息含量来判断方案的优劣，避免了确定权重的复杂计算过程，降低了决策的复杂度。何平等[13]在分析产品能量特性评价的基础上，建立融合经济性和环境性并充分考虑使用过程能耗因素不确定性的产品能量优化性能评估模型，分析在产品使用阶段中影响能量优化的不确定性因素并进行建模分析，得到产品能量优化性能评价值，采用模糊信息公理法对产品设计方案进行评价，获得最优设计方案。程贤福[14]针对传统方法在方案决策时需要给出各评价指标权重的局限性，将物理规划方法和信息公理引入到产品性能评价决策中，提出基于物理规划与信息公理的评价方法，利用各指标满意区间边界值形成的偏好函数，确定指标的设计范围和系统范围，并计算各指标的信息量，从而避免指标权重对评价结果的影响。王体春等[15]利用公理设计理论中的信息公理将模糊数学理论与香农信息论相结合，综合考虑设计方案优选过程中各评价指标的区间权重以及相区间设计信息，提出了区间信息公理的区间信息量计算方法，建立了基于区间信息量的多属性优选模型，利用大型水轮机选型方案验证了该模型的有效性。Rafik 等[16]针对信息公理在产品决策中存在的缺点，提出了一种基于模糊信息公理的产品决策系统，从而使决策过程更加简便。Tijen 等[17]根据顾客选择不同的产品系统所面临的问题，提出了一种基于信息公理的产品系统参数选择方法，从而在多种资源下正确选择新的产品制造系统。Selcuk 等[18]针对现有轿车指示系统存在的缺点，利用模糊信息公理对轿车指示盘进行了再设计，获得了最优的轿车指示系统，从而为轿车指示系统的设计提供了科学依据。Osman 等[19]对公理设计原理的应用进行了文献综述，并对多属性模糊信息公理的决策方法存在的问题进行了分析。Diyar 等[20]针对普通模糊信息公理存在的确定，提出了一种基于区间 2 型模糊信息公理评价方法，扩展了信息公理的应用范围，使评价结果更接近于实际。Kulak[21]和 Helander[22]等运用信息公理对产品的工艺设备进行了优选，最后选择出满足用户需求的工艺设备。

综上所述，对于信息公理及信息量的计算方法国内外学者都有所研究，但是对于如何获得更符合实际的信息量和信息公理应用范围的扩展还有待学者做

进一步研究。

1.3 贝叶斯网络可靠性评价技术

贝叶斯理论最早出现于18世纪，Thomas Bayes所写的一篇论文“关于几率性问题求解的评论”对该理论的产生起到了奠基性的作用。由于当时的贝叶斯理论在实际应用中还存在着诸多不完善的地方，所以在当时和之后很长一段时间内并没有被人们理解与重视。20世纪80年代以后，贝叶斯理论得到了很快的发展。人工智能的快速发展，尤其是机器人技术和数据挖掘的快速兴起，为贝叶斯理论的发展与在现实中的应用提供了更为广阔的空间。1986年著名学者Pearl首次在专家系统中引进了贝叶斯网络（Bayesian Network，BN），将贝叶斯方法与图形理论有机结合起来，建立了可用于概率推理的BN模型，是贝叶斯网络成熟的重要标志。

作为研究不确定性问题的重要方法，贝叶斯网络在系统可靠性分析、故障智能诊断以及经济领域得到了广泛应用。BN由条件概率表和有向无环图组成，能够清晰、直观地表达系统与部件以及部件间的不确定关系，无论在推理能力、表达方式还是在决策机制上，与可靠性框图[23,24]、二元决策图[25,26]、故障树[27,28]和T-S模糊故障树[29,30]等模型比较都具有明显的优势，同时大大简化了计算，降低了计算的复杂程度。此外，当系统中某时刻的部件故障状态已知，可以利用BN求解出各部件当前故障状态对系统故障状态影响的大小，通过改善部件的故障状态可以提高系统的可靠度。

近年来，BN在很多领域都得到了相当广泛的应用，大量应用贝叶斯网络解决现实系统问题的文献相继出现。赵金宝等[31]基于专家知识和数据综合方法建立了城市平面交叉口交通事故分析的贝叶斯网络模型，推算出交通事故的起因及所占的比例。周建等[32]采用多概率区间来描述盾构法施工过程中的风险，基于贝叶斯网络建立了分析风险事故的多态系统，利用该系统对某地铁隧道工程进行风险评估。陈亮等[33]通过贝叶斯网络与决策树的结合建立了基于决策树的贝叶斯网络模型，形成了适用于保险欺诈的挖掘方法，应用于公司保险业欺诈业务的挖掘。吴欣等[34]针对电力系统诊断故障中存在的信息不完备和信息的不确定性问题，分别建立了完备和不完备信息下的分布式贝叶斯网络模型，对系统进行故障诊断。郭春香等[35]基于树增强朴素贝叶斯网络模型建立贝叶斯网络个人信用评估模型，与神经网络模型进行比较，证明贝叶斯网络模型具有较高的分类精度。Thang V. Pham等[36]利用集成的贝叶斯网络分类器对人脸进行识别，得到了广泛的应用。刘海燕等[37]对已知的清晰连续变量进行模糊化和去模

糊化处理，使其变成离散变量，利用贝叶斯网络建立多种证据进行融合计算的模型。

与前面提到贝叶斯网络的应用相比，机械系统中部件间的故障逻辑关系非常复杂，并不是简单的“与”、“或”、“非”，具有模糊性。很多学者致力于将BN应用于机械系统，并取得了一定的进展。张路路等[38]将变量引入到模糊支撑半径的构建中，提出了一种基于模糊支撑半径变量的贝叶斯网络多态系统故障概率计算方法，并用其对数控机床主轴系统故障进行分析，克服多态系统故障状态隶属函数选择中的主观性问题。陈东宁等[39]假设系统中只有两种故障状态，利用桶排除法对建立的液压系统进行可靠性分析，并得到各部件的后验概率，为提高系统的可靠性提供依据。武侠等[40]将采集到的雷达系统实验数据及专家知识等可靠性信息进行模糊化处理，最后利用贝叶斯网络进行可靠性分析，进而验证模糊贝叶斯网络可靠性分析方法的有效性。S. Mahadevan 等[41]研究了由二态故障树向贝叶斯网络转化的方法。在机械系统中部件及系统的故障状态往往不止两态，而会呈现为多态，只把系统的故障状态假设为两态进行可靠性分析出的结果与现实结果会有很大误差，张瑞军等[42]应用贝叶斯网络建立了区间三角模糊多态系统可靠性模型，并将其与模糊BN方法进行比较，验证了方法的有效性。

重要度分析是系统可靠性分析方法中的重要组成部分，它描述了系统中一个或多个部件故障对系统故障的贡献大小，为系统进行优化设计及重新设计提供重要的理论参考。传统重要度[43-45]与多态重要度[46,47]是重要度分析方法中的重要组成部分，这些重要度分析方法只能对故障率为定值的系统进行重要度分析，而现实系统中所获得的部件故障信息往往是模糊的，无法用这些方法对其进行分析，模糊重要度分析方法应运而生。模糊重要度分析方法主要有两种，重心法[48]和中值法[49]。重心法，部件完全故障和正常时顶事件失效的模糊概率之差的数学期望；中值法，部件完全故障和正常时顶事件模糊数的中位数之差。针对模糊贝叶斯网络，研究模糊BN重要度分析方法，弥补传统重要度分析方法的不足，完善贝叶斯网络在可靠性分析中的应用，全面发挥贝叶斯网络的使用价值。

机械装备中系统组成繁杂，各系统之间特性各不相同，使得故障形式多样，故障逻辑关系难以确定，且系统各部件之间的耦合关系复杂，此外，由于对机械装备性能要求越来越高，使得各部件所受载荷变化更大，运动规律性不强，系统故障呈现出多态性的特点。针对机械装备所具有的特点，对其系统进行可靠性分析，为后续稳健优化设计提供理论基础。

1.4 可靠性稳健设计

1.4.1 动力可靠性研究现状

目前国内学者在系统或结构动力可靠性分析方面进行了大量的研究。王洪礼等[50]将影响汽车悬架的外界因素视为随机因素，建立了二自由度汽车半主动悬架的随机动力模型，结合可靠性理论，分析了悬架的振动稳定性和可靠度；张萌等[51]针对航空发动机叶片固有频率具有模糊性的问题，采用梯形和平顶正态型隶属函数对固有频率的模糊性进行描述，建立了叶片抗共振的模糊可靠性模型；焦春旺等[52]考虑由于加工、安装等误差造成的反共振振动机各参数的随机性，对反共振振动机的振幅响应进行了可靠性分析，对反共振振动机振幅的稳定性条件进行量化，为反共振振动机参数选择的合理性提供了一种有效方法；魏永祥等[53]将弹性连杆机构的设计参数和作用载荷视为随机变量，研究了弹性连杆机构位移的动力响应及其首次超越的动力可靠性问题；秦大同等[54]将风载荷视为随机性，应用应力-强度干涉理论建立了风力发电机齿轮系统的可靠性模型，进而计算了随机风载荷作用下的齿轮系统可靠度。

机械振动严重影响机械装备结构或系统的服役寿命，将系统或结构的动态特性分析与可靠性相结合，考虑设计参数和作用载荷的不确定性，研究某系统或结构的振动响应可靠性或分析不确定性因素对系统或结构振动的影响已成为一种趋势。

1.4.2 结构可靠性稳健设计进展

稳健可靠性理论[55-62]是 Ben-Haim 教授于 20 世纪 90 年代在非概率可靠性模型基础上提出来的。可靠性稳健设计往往是多目标优化问题，解决各目标之间权重问题的方法很多，如专家打分法、老手法、理想点法等，但是这些方法往往伴随评价者过多的主观因素。如何定量权衡各目标的权重一直是研究的热点和难点。多目标问题早在 1896 年由法国经济学家 V. Pareto 从政治经济学角度提出，直到 1951 年库恩-塔克才提出了多目标优化设计问题。20 世纪 70 年代以后，多目标优化理论、算法和应用研究有了迅猛发展，也逐渐应用于航空航天、精密仪器等实际工程[63-70]。为满足超精密工件台结构极高的静动性能要求，董立立等[71]提出了一种基于目标分层的多目标结构拓扑优化方法，并将其应用于超精密工件台关键件的结构优化设计中。为了满足液压机高刚度、轻量化的性

能要求，李艳聪等[72]提出刚度和质量驱动的液压机多目标优化设计方法。在汽车车身结构 NVH 和侧面碰撞安全性研究中，杨丽丽等[73]将协同优化方法与全局多目标优化算法相结合，改进了协同优化算法存在的一些缺陷，提出了协同优化方法与全局多目标优化算法组合优化算法。这些方法只是从均值层面进行了优化设计，并未考虑结构系统中设计参数的不确定性和设计结果的可靠性问题，虽然在一定程度上取得了较优的设计结果，但是优化设计结果的稳健性和可靠度需要进一步验证。目前部分学者在优化设计分析过程中逐渐融合了可靠性设计理论和稳健设计理论，但大多数算法[74,75]只考虑了目标函数对设计变量均值的影响，未考虑方差，而实质上均值和方差之间紧密联系，将二者独立并不符合实际。文献［76］中，提出了一种基于设计变量敏感度的高位多目标稳健设计方法，尽管同时考虑了设计变量均值和方差的影响，但并未考虑约束条件不确定性和设计结果的可靠度。

综上所述，当前这些可靠性稳健优化设计方法都是从可靠度对各设计参数灵敏度的角度去分析，通过控制可靠度对均值和方差的灵敏度实现机械零部件的可靠性稳健优化设计，单纯从目标函数和约束函数去实现可靠性稳健设计的方法并不多见，罗佑新[76]基于目标函数和约束函数对设计变量的灵敏度提出了一种稳健设计方法，但是没有考虑到约束函数自身的不确定性，同时将可靠度作为目标函数引入到优化设计中也不尽合理。因此，在保证不消除、不减少不确定性因素的情况下，研究一种仅从目标函数和约束函数去实现可靠性稳健设计的方法是十分有意义的。

1.5 本书的主要内容

由上述研究内容可知，机械装备设计的特殊性和使用环境的复杂性，使得在对机械装备进行安全评估与可靠性设计过程中不得不考虑诸多参数的不确定性问题，尽管一些学者针对各个领域中不确定性问题进行了一定的研究，但是基于机械装备的特点，综合考虑各种不确定性因素对其进行设计却还是一个相对新的课题。本书的主要研究内容包含以下几个方面：

1）基于信息公理的设计方案模糊评价方法。阐述了产品理想化设计方案评价方法，针对现有信息公理评价方法在如何获得更符合实际的信息量和信息公理应用范围的扩展等方面的局限性，提出了一种基于模糊理论和信息公理的模糊信息公理方案优选方法。

2）基于灰色聚类和信息公理的方案评价方法。利用灰色聚类把定性指标进行白化处理，从而解决了公理设计不能评价定性指标的缺点，并利用信息

此为试读，需要完整PDF请访问：www.ertongbook.com