

Jiyu Ju Fangfa De Xiangguan Shixiao Moshi
Jixie Jiegou Xitong Kekaoxing Wenjian Sheji

基于矩方法的相关失效模式 机械结构系统可靠性稳健设计

卢 昊 著

中国矿业大学出版社

China University of Mining and Technology Press

基于矩方法的相关失效模式 机械结构系统可靠性稳健设计

卢 昊 著

中国矿业大学出版社

内 容 提 要

本书提供了基于矩方法的多失效模式机械结构系统的可靠性、可靠性灵敏度及稳健优化的建模方法,给出了一套多元联合建模、可靠性灵敏度评估及稳健优化方法,并结合所提方法给出了应用案例。

本书可供从事结构可靠性与安全性研究的科研人员作为参考资料。

图书在版编目(CIP)数据

基于矩方法的相关失效模式机械结构系统可靠性稳健设计 / 卢昊著. —徐州: 中国矿业大学出版社, 2014. 9

ISBN 978 - 7 - 5646 - 2505 - 4

I. ①基… II. ①卢… III. ①机械设计—结构设计—系统可靠性—研究 IV. ①TH122

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 230419 号

书 名 基于矩方法的相关失效模式机械结构系统可靠性稳健设计

著 者 卢 昊

责任编辑 褚建萍

出版发行 中国矿业大学出版社有限责任公司

(江苏省徐州市解放南路 邮编 221008)

营销热线 (0516)83885307 83884995

出版服务 (0516)83885767 83884920

网 址 <http://www.cumtp.com> E-mail: cumtpvip@cumtp.com

印 刷 徐州中矿大印发科技有限公司

开 本 787×960 1/16 印张 9 字数 172 千字

版次印次 2014 年 9 月第 1 版 2014 年 9 月第 1 次印刷

定 价 36.00 元

(图书出现印装质量问题,本社负责调换)

前 言

在机械设计的过程中,不确定问题是无法避免的,处理这些不确定问题通常使用可靠性方法。同时,不确定因素对机械结构系统的影响程度也各不相同,在设计阶段需要尽量消除不确定因素带来的负面影响。作为保证产品安全可靠的有效工具,不确定性分析和可靠性稳健优化设计能够帮助设计人员获得最佳的性能指标。本书在现代数学、力学以及可靠性理论研究的基础上,对机械结构系统中的不确定性、概率相关性等进行合理建模,建立了随机因素对机械系统性能影响的定量分析模型,并将主要的随机因素融入到机械结构系统的可靠性优化模型中,寻找最优的、最可靠、最稳健的产品设计方案。本书的主要研究内容如下:

(1) 详细、系统地阐述了随机参数机械结构系统的不确定性分析与可靠性稳健设计的理论体系和基本框架,描述了不确定性建模、概率相关性建模、可靠性分析、可靠性灵敏度分析以及可靠性稳健设计的基本任务和主要内容,并对相关理论的国内外研究现状进行了总结和评述。

(2) 提出了一种基于分项系数的风险评估方法。针对传统安全因子在设计上的不足,在相关可靠性理论研究的基础上,结合一次二阶矩法,分别给出了线性和非线性极限状态方程情况下的分项系数计算方法。讨论了裂纹扩展导致的强度退化结构,将基于可靠性的分项系数与裂纹扩展引起的可靠性变化相关联,提出了一种使用分项系数的含裂纹结构的风险评估方法。

(3) 研究了多失效模式下机械零件的可靠性稳健设计问题。分别讨论了失效模式独立与相关时机机械零件的可靠性问题。首先根据机械零件失效模式较少的特点对其进行独立假设,使用随机摄动技术、四阶矩以及高阶矩标准化技术,提出了计算机械零件可靠性及可靠性灵敏度的有效方法,并结合可靠性优化模型,建立了基于可靠性灵敏度的稳健优化模型。当考虑失效模式相关时,使用 Copula 函数描述失效模式间的相关性,结合概率论与阿基米德 Copula 函数的性质,讨论了失效模式相关时机机械零件的可靠性和可靠性灵敏度的计算方法,并在此基础上进行了可靠性稳健优化设计。

(4) 研究了结构系统的可靠性稳健设计问题。结合随机摄动法、Edgeworth 级数展开及相应的经验修正公式,提出了任意分布参数下结构系统的可靠性计算方法。根据概率网络估算方法,使用 Pearsonian 相关系数描述失效模式间的

相关性,在可靠性分析的基础上,讨论了失效模式相关时任意分布参数结构系统的可靠性灵敏度问题。把可靠性灵敏度作为子目标函数融入优化设计模型中,建立了一种实用的任意分布参数结构系统的可靠性稳健优化设计模型。

(5) 讨论了相关失效模式复杂机械结构的可靠性与可靠性灵敏度计算问题。针对机械结构的复杂性导致的可靠性分析的隐式极限状态方程问题,结合 Pro/E, Hypermesh, MSC. Patran, MSC. Nastran, iSIGHT 和 Matlab 等软件,提出了解决该问题的分析框架。使用试验设计方法与有限元确定性分析获得结构的响应,再利用代理模型建模技术建立响应与随机变量间的显式函数关系。使用书中所述的分析方法对相关失效模式复杂机械结构的可靠性、可靠性灵敏度及稳健优化设计问题进行了讨论。

著 者
2014.7

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 本书的研究背景和意义	1
1.2 机械结构系统的不确定性分析及可靠性稳健设计	2
1.3 国内外发展及研究现状	3
1.4 本书的主要研究内容和结构	9
1.5 本章小结	11
第 2 章 数学基础与可靠性基本理论	12
2.1 数学基础	12
2.2 机械结构系统的可靠性分析方法	19
2.3 可靠性优化设计	26
2.4 本章小结	27
第 3 章 基于可靠性的含裂纹结构的风险评估方法	28
3.1 安全域与安全系数	29
3.2 含裂纹结构的剩余强度	32
3.3 数值算例	33
3.4 本章小结	36
第 4 章 多失效模式机械零件的可靠性稳健设计	38
4.1 独立失效模式机械零件的可靠性灵敏度分析	39
4.2 相关失效模式机械零件的可靠性灵敏度分析	42
4.3 基于可靠性灵敏度的稳健优化设计	49
4.4 数值算例	53
4.5 本章小结	66
第 5 章 多失效模式结构系统的可靠性稳健设计	68
5.1 考虑多失效模式的结构系统可靠性	69
5.2 结构系统的可靠性灵敏度分析	74

5.3	基于可靠性灵敏度的结构系统稳健设计·····	75
5.4	数值算例·····	76
5.5	本章小结·····	87
第 6 章	相关失效模式复杂机械结构的可靠性稳健设计 ·····	88
6.1	试验设计方法·····	88
6.2	代理模型的建模方法·····	89
6.3	复杂机械结构的可靠性灵敏度分析框架·····	93
6.4	数值算例·····	95
6.5	本章小结 ·····	114
第 7 章	结论与展望 ·····	115
附录 ·····		117
参考文献 ·····		119

第1章 绪 论

1.1 本书的研究背景和意义

一个典型的机械设计过程主要包含两个阶段:① 定义一个设计空间及建立相应的数学模型,如极限状态方程、优化分析的目标函数和约束函数等;② 选择适合的优化算法。对于确定性优化问题,往往通过控制失效的范围以达到优化目标函数的目的。然而,由于普遍存在的不确定性,机械结构系统也同样存在着不同形式的不确定因素。由于确定性分析无法解决在设计制造过程中由各种公差引起的问题,之后的研究者们将安全因子引入到设计中,从而提高了设计产品的安全域。可是安全因子的确定很大程度上取决于设计者的经验,这会导致设计产品有时过于安全,导致了材料的浪费。因此,充分考虑机械结构和系统中潜在的不确定因素对合理的产品设计有着显著的意义。

在机械设计的过程中,不确定问题是无法避免的。在工程中,处理这些不确定问题通常使用可靠性方法。所谓机械可靠性,是指机械产品在规定的使用条件下、规定的时间内完成规定功能的能力。结构设计中的各种不确定性主要包括工程材料特性的离散性、加工制造过程中产生的加工误差等。由于无法准确预测结构未来可能受到的载荷情况,以及设计使用者无法精确地确定所使用的结构材料的属性等,也就不可能保证设计结构的万无一失。尽管如此,设计者通过科学的分析计算,可以将这种风险控制在一个可以接受的程度上。结构风险和可靠性分析是工程技术人员非常重要的研究领域,并在最近的几十年里获得了快速且显著的进展。使用概率方法分析结构中的不确定性,已经在土木、核设施、航空以及机械领域得到了广泛的应用。

现有的可靠性分析方法对单个极限状态方程(或功能函数)的分析已经有了比较大的发展,各种经典的方法如一阶可靠性方法(FORM)、二阶可靠性方法(SORM)及抽样方法等,不仅可以有效地进行可靠性评估,还能够分析关键参数的灵敏度等相关问题。然而,在大多数情况下,一个结构的失效往往由多个极限状态方程来描述,也就是说,机械结构的失效实际上是多个失效模式综合作用的结果。此时,上面提到的针对单个失效模式的可靠性计算方法就无法有效地应用到系统级的可靠性分析中。各个失效模式与应力或强度之间的

关系以及失效模式彼此间的关系,都是分析问题时必须要考虑到的。机械结构系统的多失效模式问题,也可称为系统可靠性问题,尽管已有许多方法得到了较好的应用,该问题仍然有许多值得探讨的空间,如相关性的度量、评价系统级可靠性时各参数对系统整体的灵敏度问题、多失效模式下的稳健优化问题等。另外,当今产品的结构越来越复杂,给产品的分析、设计和优化带来了新的挑战,这也使得基本的可靠性分析法无法直接应用到具体的问题中。针对复杂结构的可靠性、可靠性灵敏度以及可靠性稳健设计的研究也成为一个新的探索领域。

1.2 机械结构系统的不确定性分析及可靠性稳健设计

不确定性包括模型的不确定性和数据的不确定性。模型的不确定性是指在对某一物理现象进行数学建模时产生的不确定性,涉及的是模型结构本身。例如当对某一非线性响应使用线性模型逼近时,或者当求解某一问题有若干备选方法,而这些方法给出的结果却不完全相同时,这些都会导致模型的不确定性。数据的不确定性涉及的是模型中输入数据的随机变化,例如结构材料属性、结构的尺寸、承受载荷以及环境条件等的不确定情况。严格来说,模型和数据的不确定性总是存在的,并且存在的形式也是多种多样的,因此,在分析不确定问题时,完全考虑这些不确定性是不可能也是不现实的。在实际的工程设计中,研究者往往更加关注那些对响应有较大影响的不确定量。

不确定性分析的目的是分析系统功能表现在不确定因素影响下的变化形式。总的来说,不确定性分析是通过对各种不确定因素进行建模,给出其具体的数学表达式,然后分析其对结构系统的影响。不确定性分析主要可以分为四大类:不确定性建模、灵敏度分析、可靠性分析以及稳健性分析。不确定性建模的目的就是获得能够表示输出统计分布的统计属性,比如变量的概率密度函数或者累计分布函数;灵敏度分析是对各个随机参数对结构的影响进行排序,获得各个参数的重要度;可靠性分析是解决不确定性问题的有效手段,能够计算不确定因素影响下结构的失效概率;稳健性分析是降低随机参数对结构的影响,使得结构的可靠度对随机参数的微小变化不敏感。由此,可靠性稳健设计就是使用概率分析方法对不确定性因素影响下的结构或系统进行可靠性分析,并获得随机参数对结构的灵敏度,使用优化方法,在保证结构达到一定可靠度的前提下,得到优化目标的最佳状态和参数值。

1.3 国内外发展及研究现状

1.3.1 可靠性分析

现有的结构可靠性分析方法大体上可以分为两类:统计方法和非统计方法。在统计方法中,仿真技术是最为常用且有效的方法,如 Monte Carlo 仿真方法。虽然仿真计算能够得到近乎精确的分析结果,但由于这种方法需要大量的抽样计算,耗费大量的计算机仿真时间,对于失效概率特别是小概率事件的失效概率的计算效率较低。在众多的非统计方法中,线性逼近是结构可靠性计算方法中最常用的方法,这些方法通常是由一次二阶矩(First Order Second Moment, FOSM)方法发展而来的。一次二阶矩方法通过将结构功能函数在均值点处泰勒展开到一阶并保留线性项,计算相应的可靠性指标,从而得到结构的失效概率。一阶和二阶可靠性方法^[1]中包含了在标准正态空间中寻找最大可能点的过程,相对一次二阶矩方法来说更加准确些。当极限状态方程在标准正态空间中呈一次或二次时,这些方法是能够得到较为准确的结果的,然而,由于条件的限制,在实际的计算过程中,其结果往往不是很理想。对于非线性极限状态方程,有改进均值法(AMV)、两点非线性逼近法(TANA)等,但这些方法在处理复杂的多模态极限状态方程时仍无法保证其计算精度^[2]。一次二阶矩方法和二次二阶矩方法都需要求解功能函数的梯度,并且改进均值法还需要求解极限状态函数的设计点,这些导致了基于泰勒展开的矩方法的应用困难。近几年发展起来一些近似积分方法,能在一定程度上避免上述方法中存在的缺陷。文献[3-6]提出了可靠度计算的点估计方法(Point Estimation Method, PEM)。点估计方法不需要求解功能函数的导数和寻找设计点,它直接利用功能函数在一些特征点处的函数值来近似计算功能函数的低阶矩。文献[7-11]提出了降维积分法(Dimension Reduction Method, DRM)。降维积分法的主要思想是将 N 维积分近似转化为一维或二维积分和的形式,替代高维积分来求解统计矩。文献[12]对 DRM 法、全阶乘数值积分法以及多项式混沌展开法进行了详细的比较分析;针对功能函数的非正态问题,文献[13-18]提出了计算可靠度的一次三阶矩方法(First Order Third Moment Method, FOTM)、二次三阶矩方法(Second Order Third Moment, SOTM)、四阶矩方法(Fourth Moment Method, FMM)以及高阶矩方法(Higher Moment Method, HMM),由于利用了随机变量的高阶矩信息,高阶矩方法可明显地提高可靠度的计算精度。对比 Monte Carlo 仿真来说,这类方法在计算结构可靠性时十分快速有效,并且所得到的结果也较为合理,因

此,这类方法在实际的工程中得到了广泛的应用。

在进行可靠性评估和结构优化的过程中,通常会遇到计算精度与计算效率间的权衡,比如需要使用有限元方法分析大型结构时。随着计算机性能的增强,随机分析已经应用到各种不同工程问题的可靠性评估中^[19,20]。虽然如此,计算模型也同时越来越庞大,且包含了大量的非线性计算过程,这些都大大影响了计算的效率。此时,一般是使用响应面或代理模型来代替实际的结构响应函数,从而提高计算的效率^[21-25]。基于响应面的不确定分析方法可以减少仿真的次数,从而节省了分析的时间^[26-28]。响应面法能够使用一个基本函数来逼近响应与输入样本间的函数关系,这些基本函数包括: polynomial^[29], radial basis function^[30], Kriging^[31]等。建立响应面所需的样本通常由抽样方法获得,比如使用试验设计方法(DOE)^[32-34]、计算机试验的设计与分析法(DACE)^[35]。在传统的 DOE 方法中^[32],样本是通过逼近响应属性的初始假设来选择的,例如二阶多项式。近几年,空间填充设计和自适应设计在计算机仿真试验中得到了广泛的应用^[33,36,37]。当选定样本后,便可以通过训练在选定样本处的响应值来建立响应面。文献[38,39]使用神经网络近似代替结构响应与随机变量之间的映射关系,进行可靠性分析与计算,提出了基于神经网络模拟的响应面法;文献[39,40]使用支持向量基回归,对结构及系统失效和可靠度估计进行了研究;文献[41]应用 Kriging 代理模型和子集模拟法,对基于可靠性的优化问题作了详细的讨论;文献[42]使用高维模型表示技术(HDMR),结合 Score 函数,分析了结构的随机灵敏度。因此,基于响应面的分析方法大大提高了计算的效率,通过建立代理模型,可以用来代替原始模型以及有限元分析过程,对比 MCS 方法,它能够使用更少的仿真次数来预测响应的统计属性^[43]。

对于单一极限状态方程的分析方法已经得到了很大的发展,当可靠性问题归结为某一个关键响应时,可选用合适的分析方法进行求解。然而,由多个单一部件组成的结构同样存在失效的问题,结构中的每一个部件的失效都有可能导导致结构整体的失效,这就产生了由多个极限状态方程组成的系统可靠性问题。对于系统可靠性,要同时考虑多个极限状态方程对结构整体的影响,且不同极限状态方程间还存在相关性。如之前对单一极限状态方程的分析,每一个存在的失效模式都可能需要进行大量的仿真、逼近分析才能获得预期的结果,这就导致在分析系统中所有的失效模式时巨大的计算量。从数学的角度讲,系统的失效概率就是联合概率密度函数在联合失效域的多重积分。对此可以通过 Monte Carlo 仿真来计算,但是比较耗费计算资源。为了解决实际问题,就需要有其他替代方法来代替 Monte Carlo 仿真进行系统可靠性的评估。

一般可以将结构系统分为两种最基本的类型:串联和并联^[44]。串联系统也

称为最薄弱环节系统,即当系统中任一元件失效时,系统就会失效。并联系统也称为冗余系统,即当系统中所有元件都失效时,系统才发生失效。若假设系统中各个元件是相互独立,那么系统的失效概率可以非常简单方便地求解。然而实际上,由于不同类型的失效模式可能含有相同的随机变量,导致不同失效模式间存在或大或小的相关性。早期的学者提出了分析系统可靠性的界限方法。Cornell 提出的针对系统多失效模式的可靠性界限理论得到了广泛的应用^[45]。Bennett 和 Ang 提出了关于并联系统的界限理论^[46]。Ditlevsen 提出了窄界限理论,该理论考虑了失效模式间的相关性^[47]。上述界限理论可以给出系统可靠度的上下界,但是对非线性状态函数来说,其结果可能是不准确的。之后,Feng 通过计算三阶联合概率提高了窄界限方法的精度^[48],该方法明显改善了计算精度,但可能会由于三阶概率的误差较大而影响最终的精度。Song 提出了一种数值积分方法,该方法减少了仿真的次数,且在失效模式较少时,能够给出比较精确的结果。但该方法无法直接用于失效模式较多时的可靠度求解^[49]。其他界限方法可参考文献[50-52]。

界限理论只能够给出失效概率的上下限,无法得出一个确切的失效概率值。为了改善这个问题,文献[53-55]提出了一些计算单一系统可靠度的方法。文献[56]提出了交补集法,该方法将系统可靠性描述成一组交补集合的概率,这些概率可以使用任何一种可靠性计算方法,如 FORM/SORM 等。文献[56]中使用的是特征向量降维法(EDR)。文献[57]提出了一种最大可靠性系统仿真(MPPSS)方法,该方法同时可以计算随机变量的灵敏度。文献[58,59]使用矩阵方法,将系统可靠性的计算归结为简单的矩阵运算,且在不完全信息条件下,仍可给出可靠性估计的最佳界限值,同时,该方法可以求解系统可靠度对随机变量的灵敏度。文献[60-62]使用贝叶斯方法,通过建立贝叶斯网络来表示结构系统,结合图论知识求解系统的可靠度。

随机有限元是将随机分析理论与有限元方法相结合,在确定性有限元法的基础上发展起来的一种随机分析方法。随机有限元方法(SFEM)主要是被用来解决包含空间随机变化的材料属性的随机边界值问题^[63-67]。该方法是基于输入随机域的离散和力学响应的多项式混沌展开。响应展开的系数通常使用 Galerkin 方法获得,也可以通过回归方法获得^[68-70]。基于多项式混沌展开的随机分析也广泛应用于工程上的结构分析中^[69,71,72]。随机有限元方法主要可以分为两类:① 基于一阶或二阶泰勒展开的摄动方法^[73];② 谱随机有限元法(Spectral Stochastic Finite Element Method, SSFEM)^[74]。随机有限元分析主要分为三步^[75]:将含有不确定因素的随机域离散化、建立单元及系统的随机矩阵以及分析响应的统计特性。

1.3.2 可靠性灵敏度分析

传统的机械系统灵敏度计算方法主要可分为四类^[76]:① 有限差分法;② 连续微分法;③ 离散微分法;④ 自动微分法。其中有限差分法具有简单、灵活以及通用性强等特点,容易在计算机上实现,是灵敏度计算最为简单的方法,但差分格式的不稳定可能会影响求解的精度。连续微分法和离散微分法都属于直接微分法,直接微分法就是对系统方程进行直接微分,分别求得每个设计变量的一阶(或高阶)灵敏度信息。自动微分法以 A. Robinson 的非标准分析理论为基础,无需进行繁琐的偏微分推导过程,而且没有数值微分方法中存在的截断和舍入误差,通常是通过计算机程序,在分析系统响应的同时,运用链规则估计功能函数关于随机参数的偏导数,进而获得机械系统的灵敏度^[77,78]。

可靠性灵敏度定义为基本随机变量分布参数的变化引起失效概率变化的比率^[79,80],在数学上可靠性灵敏度是失效概率对随机变量分布参数(均值、方差等)的偏导数^[81]。可靠性灵敏度对结构设计有着积极的指导作用,同时也是进行可靠性设计、可靠性优化设计以及可靠性稳健设计的重要基础和关键步骤。通过对设计变量进行可靠性灵敏度分析,就可以获得各个设计变量对结构可靠度影响程度的排序。可靠性灵敏度越大,表示结构的可靠度对这个参数的依赖性就越大,因此,在设计过程中,需要严格控制这类参数,使得结构的可靠度对这类参数的变化不敏感,从而保证结构具有稳健性。在这些设计变量中,可以是结构参数、材料属性、承受的外部载荷以及可能引起结构不稳定的随机因素,可靠性灵敏度分析就是从中寻找最薄弱的环节,进而可通过优化设计来削弱它引起的负面影响。

随着可靠性技术的发展,可靠性灵敏度技术也逐渐形成了独特的理论体系。从已有的文献来看,可靠性灵敏度技术主要分为两类:① 近似解析法;② 数值模拟法。随着可靠性灵敏度的概念被提出之后^[82],许多分析可靠性灵敏度的方法也相继被提出。文献[83]在一阶可靠性方法的基础上分析了随机参数的灵敏度;文献[84]在分析一阶和二阶可靠性的基础上,对分布参数的可靠性灵敏度作出了相应的分析;文献[85]在随机变量概率信息不完全时,使用 Edgeworth 级数逼近响应的概率分布函数,并分析了汽车零部件的可靠性灵敏度;文献[86]讨论了单自由度非线性随机参数振动系统的可靠性灵敏度问题;文献[87]对碰磨转子系统的可靠性灵敏度进行了分析;文献[88]中使用点估计方法以及高阶矩标准化技术,分析了失效概率对随机分布参数的灵敏度。对比传统的数值模拟法,使用四阶矩技术、级数展开以及高阶矩标准化技术的分析方法十分的高效,且能够分析随机变量为非正态分布的情况,比一阶和二阶可靠性分析方法精

度更高,也更适合工程实际结构的分析。由于 Monte Carlo 方法的效率较低,大量文献都致力于提高数值法的效率上,文献[89]提出计算结构可靠性和可靠性灵敏度的自适应重要抽样法,该方法使用与随机变量联合概率密度成正比的抽样密度,提高了抽样的效率。文献[80]和[90,91]相继提出了子集抽样和线抽样的可靠性灵敏度分析方法。

针对不确定因素的描述方式,文献[92]分析了混合类型变量,即随机变量和区间变量下的结构参数灵敏度问题;文献[57,58]发展了一种基于矩阵的方法,将系统可靠性的求解转化为矩阵的运算,并在此基础上分析了系统可靠性下各个分布参数的灵敏度;文献[93]建立了一种应力和位移的可靠性优化设计模型,并得出了可靠性指标对随机变量参数的灵敏度公式;文献[94]对非线性随机系统在独立失效模式下的可靠性及可靠性灵敏度进行了探讨;文献[95]针对非线性极限状态方程,发展了两种非正态随机变量情况下的可靠性灵敏度分析方法,并应用于非线性蠕变疲劳失效模式的分析中;文献[96]对随机激励下的线性系统开展了深入的分析,提出了分析线性系统可靠性及可靠性灵敏度的新方法;文献[97]中基于解耦方法和序列逼近法,同时结合线搜索和加权逼近方法,提出了一种有效计算可靠性灵敏度的方法。经证明,该方法对动态载荷下的非线性结构的分析十分有效。文献[98]在模糊理论的基础上,使用矩方法发展了模糊可靠性灵敏度计算方法。

1.3.3 可靠性优化设计和可靠性稳健优化设计

可靠性优化设计(RBDO)就是在最小化目标函数(如质量、成本等)的同时,使其满足一定的可靠度约束^[99]。可靠性稳健优化设计(RBRDO)就是在可靠性优化设计的基础上,控制不确定因素对结构和系统的影响,使得结构和系统对不确定因素的变化不敏感。由于可靠性优化设计和可靠性稳健优化设计能够大大降低生产制造的成本,带来非常明显的经济效益,在最近一段时期,关于这方面的理论研究也获得了非常显著的发展^[100-106]。可靠性优化主要包含两个方面:① 可靠性分析;② 优化设计。可靠性分析就是按照一定要求计算概率约束的可靠度,优化设计就是寻找满足约束条件的最优解。从优化的结构上进行分类,可以将可靠性优化分为嵌套双回路、解耦双回路以及单回路方法。

在可靠性优化设计中,复杂结构的分析会耗费大量的计算资源,且此时的目标函数和约束函数都有可能无法显式表达。通过建立代理模型的方法,逼近得到所需的函数,可以大大提高优化的效率。文献[107]中结合响应面方法和混合均值法(AMV),提出了一种改善优化成本、提高计算效率的方法;文献[108]使用神经网络代替 MCS 仿真,分别对大型结构系统进行了可靠性优化和稳健优

化设计;文献[109]在可靠设计空间概念的基础上,将可靠性优化问题转化为受可靠设计空间约束的确定的优化设计问题;文献[110]提出了一种线抽样方法,称为约束边界抽样(Constraint Boundary Sampling),该方法能够建立准确且满足约束的代理模型,该模型可以进一步进行可靠性优化设计,大大提高了计算效率;文献[111]中使用移动最小二乘法建立了约束函数的代理模型,对处于颠簸和制动载荷下的汽车转向节部件进行了可靠性优化;文献[112]对比了支持向量机、神经网络、移动最小二乘法、RBF 函数以及 Kriging 五种代理模型建模方法,对大型汽车车体结构的优化开展了深入的探讨;文献[113]通过增强序列优化能力,采用凸线性化方法,提出了一种有效的可靠性优化方法;文献[114]对可靠性优化软件 ProFES 的功能作了说明,该软件可以进行概率分析、优化设计、损失容限分析等;文献[115]提出了两个用于分析弹塑性机械结构的可靠性优化模型,针对概率约束在一些问题上出现的不收敛现象,提出了新的解决方法;文献[116-118]对土木和航空领域的寿命周期可靠性优化设计方法做了详细的综述;文献[119]针对离散随机变量和非平稳功能函数,使用子集模拟法计算失效概率,使用粒子群算法解决离散和非平稳的问题,提出了 AB-PSO 方法;文献[120]中考虑了实际工程中的不完全概率信息,将贝叶斯方法加入到可靠性优化设计中,并使用降维方法(Dimension Reduction Method, DRM)改善可靠性估计的效率。Jeong-Soo Park^[121]使用高斯过程来对复杂仿真过程进行建模,可以有效地用于计算机试验设计中,并与传统回归方法和投影寻踪回归模型(Projection Pursuit Regression Model)进行比较,给出了高斯过程模型相对较好的结论。Jack 等学者对 Kriging 代理模型建模技术作了系统的阐述^[22]。在对基本 Kriging 建模技术进行说明的基础上,进一步讨论了该方法在随机域的应用,并提出了使用 Bootstrapping 方法精确求解 Kriging 算子的方差。

在可靠性优化的基础上考虑随机变量对结构系统的影响,通过将灵敏度信息加入到可靠性优化模型中,就能够使得结构系统对各种不确定因素不敏感,整体具有稳健性。文献[122]中同时考虑可靠性和稳健性,使用名义值加权后的约束功能函数的变异系数来表示稳健性;文献[123]提出了一种基于降维方法的可靠性稳健设计方法,并与功能矩积分(Performance Moment Integration, PMI)和百分位差分法(Percentile Difference Method, PDM)相比较。当随机变量数量较少时,使用 DRM 法非常有效,而当变量较多时,推荐采用 PMI 方法;文献[124]中建议使用特征多项式降维法(Eigenvector Dimension Reduction, EDR)来进行可靠性稳健优化设计,书中使用特征值样本建立了响应面模型,使得灵敏度的求解更加容易,同时由于 EDR 方法不用迭代,使得优化过程成为一个单回路结构;文献[125]中首先提出了改进的降维积分法,在此基础上,使用逐步移动

最小二乘法逼近结构响应,并结合两个方法发展了一种随机响应面方法,借由新提出的上述方法完成了可靠性稳健设计。文献[126]对可靠性稳健优化方法做了详细的比较研究,并在书中使用一种进化多目标遗传算法对基于混合质量损失模型的可靠性稳健设计模型进行了优化。

可靠性优化设计和可靠性稳健优化设计在工业、土木、建筑以及航空等领域都有着非常大的应用潜力,作为结构设计的最初阶段,基于可靠性的优化设计是保证后续生产制造以及产品质量的重要保证,因此,对该理论的基础研究也是至关重要的。

1.4 本书的主要研究内容和结构

传统的确定性分析方法没有考虑各种不确定因素对结构失效的影响,导致设计的产品无法达到其最佳的设计状态,造成各种资源的浪费,因此需要使用可靠性分析方法来克服这一缺陷。对机械结构系统进行不确定性分析和可靠性稳健设计,可以通过有效的定量方式对各种不确定量进行建模,使用适当的概率分析方法对不确定性引起的各类响应进行概率分析,获得机械结构系统的可靠性评价。可靠性灵敏度分析可以对不确定量对结构可靠度的影响程度进行排序,其分析结果是可靠性稳健优化设计的基础和重要指标。鉴于目前对机械结构系统的不确定性与可靠性稳健设计方面尚有一些问题值得探讨,本书在该范畴内对不确定性描述、概率分析以及优化设计等问题进行了讨论,并结合作者和课题组所承担的中央高校基本科研业务费项目“高速转向架构架的动态可靠性灵敏度分析”(项目编号:N100603008),“十一五”国家科技支撑计划“中国高速列车关键技术研究及装备研制项目”(项目编号:2009BAG12A02),高档数控机床与基础制造装备科技重大专项“全功能双伺服数控动力刀架”(项目编号:2009ZX04011-025),长江学者和创新团队发展计划创新团队“重大机械装备的动力学与可靠性及综合设计理论与技术”,国家自然科学基金“非线性转子系统的动态可靠性灵敏度分析”(项目编号:50875039)等项目,对随机参数机械结构系统的不确定性与可靠性稳健设计问题进行了系统的探讨。本书的主要研究内容如下:

第1章:绪论。首先指出了传统设计方法在机械结构系统不确定性分析和可靠性稳健设计过程中的局限,介绍了本书的研究背景和意义,阐述了机械结构系统的不确定性分析与可靠性稳健设计理论体系的基本框架,描述了概率相关性建模、可靠性分析、可靠性灵敏度分析以及可靠性稳健设计的基本任务和主要内容,对相关理论的国内外研究现状进行了总结和评述,给出了本书研究的主要

内容和结构框架。

第2章:数学基础与可靠性基本理论。简单介绍了本书所用到的广义随机摄动理论、Copula 函数以及概率论与数理统计等现代数学基本理论,总结归纳了国内外应用较为广泛的可靠性计算方法和可靠性优化设计模型。

第3章:基于可靠性的含裂纹结构的风险评估方法。分析了传统安全因子在设计上的不足,在相关可靠性理论研究的基础上,通过结合一次二阶矩方法,提出了一种基于分项系数的风险评估方法,并分别给出了线性和非线性极限状态方程情况下的分项系数计算方法。讨论了裂纹扩展导致的强度退化结构,将基于可靠性的分项系数与裂纹扩展引起的可靠性变化相关联,提出了一种使用分项系数的含裂纹结构的风险评估方法。以含裂纹的拉杆为例进行可靠性设计,获得了相应的可靠性校验方程,并对各分项系数的灵敏度作了简单的分析。

第4章:多失效模式机械零件的可靠性稳健设计。首先讨论了失效模式独立时的可靠性问题。对机械零件的失效模式进行独立假设,使用随机摄动技术、四阶矩以及高阶矩标准化技术,提出了计算可靠性及可靠性灵敏度的有效方法,并结合可靠性优化模型,建立了基于可靠性灵敏度的稳健优化模型。考虑失效模式相关时,使用 Copula 函数对失效模式间的相关性进行建模,结合概率论与阿基米德 Copula 函数的性质,推导了失效模式相关时的可靠性和可靠性灵敏度的计算公式,进而进行可靠性稳健优化设计。

第5章:多失效模式结构系统的可靠性稳健设计。对存在大量潜在失效模式的结构系统的可靠性问题进行了探讨。首先结合随机摄动法、Edgeworth 级数展开及相应的经验修正公式提出了一种计算单一失效模式可靠性和可靠性灵敏度的计算方法。使用 Pearsonian 相关系数来描述失效模式间的相关性,在可靠性分析的基础上,结合概率网络估算方法推导了失效模式相关时任意分布参数结构系统的可靠性灵敏度计算公式。把可靠性灵敏度作为子目标函数融入优化设计模型中,建立了一种实用的任意分布参数结构系统的可靠性稳健优化设计模型。

第6章:相关失效模式复杂机械结构的可靠性稳健设计。对复杂机械结构中的隐式极限状态方程问题进行了分析,提出了解决该问题的分析框架,并搭建了软件分析平台。首先使用试验设计方法计算机械结构响应的确定性结果,再利用代理模型建模技术建立响应与随机变量间的显式函数关系。使用书中所提出的基于矩方法的相关失效模式分析方法,在显式功能函数的基础上进一步分析结构的可靠性、可靠性灵敏度并进行稳健优化设计。

第7章:结论与展望。对全书进行总结,并对未来的研究进行了展望。

在以上研究内容中,第3、4、5、6章内容为本书的主要创新之处。