

航空器设计中的 重要性分析理论与方法

崔利杰 任 博 李 泽 著



科学出版社

航空器设计中的重要性 分析理论与方法

崔利杰 任 博 李 泽 著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书详细介绍了航空器设计中的重要性分析的理论方法及工程应用,是作者以近年来重要性测度分析理论研究经验为基础、结合国内外重要性测度分析理论的最新发展、以重要性测度指标构建及其指标求解方法开发为核心进行系统整理并撰写而成的。全书共6章,在理论方法部分,讨论了不确定性分析的前沿研究方向,详细研究了不同重要性测度指标的求解方法,结合主客观不确定性分离的思想提出了混合不确定性重要性分析方法;在工程应用部分,结合典型机械系统实例,说明重要性分析理论方法在航空器设计中的应用及其工程价值。

本书可供从事重要性分析的科研人员、高等院校的教师、研究生及高年级本科生使用,还可供大专院校的教师、研究生以及科研机构的工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

航空器设计中的重要性分析理论与方法/崔利杰,任博,李泽著. —北京:科学出版社,2017.5

ISBN 978-7-03-052730-1

I. ①航… II. ①崔…②任…③李… III. ①航空器-设计-研究
IV. ①V22

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 101367 号

责任编辑:张海娜 纪四稳 / 责任校对:桂伟利

责任印制:张 伟 / 封面设计:蓝正设计

科学出版社出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

北京教图印刷有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2017年5月第 一 版 开本:720×1000 B5

2017年5月第一次印刷 印张:10 1/4

字数:204 000

定价:80.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

前 言

在航空航天工程领域,各类结构、机构或系统由于受到几何尺寸的不准确性、材料参数的分散性、载荷环境的波动性及仪器测量的误差等不确定性因素的影响,其零部件的性能、系统的输出响应也表现出一定的变异特性。因此,在结构系统不确定性分析与设计领域,为全面衡量输入变量不确定性对输出性能的影响,众多学者进行了大量的学术研究,建立了以灵敏度来衡量这种影响的理论体系。传统灵敏度分析的实质是局部灵敏度分析,反映的是名义点处输入变量独立统计参数对输出性能的统计特征的影响,其受制于名义点的选取,不能直接反映单个输入变量及多个输入变量的交互作用对输出性能统计特征的贡献,缺乏全局性与计算的稳定性。本书涉及的全局灵敏度(即重要性测度)则能从平均的角度衡量输入变量在其整个分布区域内变化时对输出性能统计特征的影响,并且可直接反映单个输入变量及多个输入变量的交互作用对输出性能统计特征的贡献。所以,书中所提重要性测度指标及其求解新方法对于高效实现结构系统所需的目标性能及提高设计效率具有重要的工程应用价值,这也是本书研究的初衷。

本书编写的指导思想是:以近年来重要性测度分析理论研究经验为基础,结合国内外重要性测度分析理论的最新发展,以重要性测度指标构建及其指标求解方法开发为核心,进行系统整理并撰写,强调工程实用性,满足航空结构系统设计目标性能的设计要求。

本书共四部分,各部分主要内容如下。

第一部分:第1章,即绪论。介绍结构、机构的不确定性相关概念,综述国内外结构不确定性及可靠性分析的研究现状,讨论不确定性分析的前沿研究方向。

第二部分:第2~4章。详细介绍基本变量的重要性分析及其重要性指标求解方法,主要包含基于方差的重要性指标、矩独立的指标及三种新的重要性指标,详细研究不同重要性测度指标的求解方法。

第三部分:第5章。针对主观不确定性和客观不确定性并存的结构系统,详细分析两种不确定性在结构系统中的传递机理,结合主客观不确定性分离的思想提出混合不确定性重要性分析方法。

第四部分:第6章。结合典型机械系统实例,说明重要性分析理论方法在航空器设计中的应用及其工程价值。

本书的研究虽然是作者研究成果的总结,但如果没有前人大量的研究积淀,也不会有本书的研究理念、研究重点和技术路线的确立,在此对本书写作给予指导的

吕震宙老师及各位同事表示深深的感谢。另外,本书的研究得到国家自然科学基金“不确定条件下航空事故预警及预防对策生成机制研究”(71401174)等课题的资助,在此表示衷心的感谢。

由于作者水平有限,疏漏之处在所难免,敬请广大读者批评指正。

作 者

2016年1月

目 录

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 结构不确定性描述及可靠性分析方法	1
1.2 不确定变量的重要性测度分析方法	2
1.3 主、客观混合不确定性情况下可靠性及变量重要性分析	4
参考文献	4
第 2 章 基于方差的重要性测度分析	11
2.1 基于方差的重要性测度	12
2.1.1 输出响应基于方差的重要性测度	12
2.1.2 失效概率基于方差的重要性测度	13
2.2 基于失效概率的基本变量重要性分析方法	14
2.2.1 直接抽样法	15
2.2.2 重要抽样法	16
2.2.3 改进重要抽样法	19
2.3 算例	22
2.4 本章小结	27
参考文献	27
第 3 章 基本变量的矩独立重要性测度分析	29
3.1 基本变量的矩独立重要性测度及其概率密度演化解法	29
3.1.1 两种矩独立的基本变量重要性测度	29
3.1.2 基于概率密度演化方法的两种矩独立重要性测度求解	32
3.1.3 算例	34
3.2 基本变量的重要性分析及概率密度函数演化解法	38
3.2.1 新的矩独立重要性测度指标体系的提出	38
3.2.2 系统或模型输出响应量的概率密度演化方法	42
3.2.3 算例	42
3.3 多失效模式下基本变量的重要性测度及其解法	46
3.3.1 多失效模式下基本变量的重要性测度 δ ——重要性测度 1	47
3.3.2 多失效模式下基本变量对多维功能响应函数局部概率分布的重要性测度	48
3.3.3 多失效模式下基本变量的三种重要性测度比较	52

3.3.4 多失效模式下基本变量重要性测度的标准求解方法	53
3.3.5 算例	54
3.4 基本变量重要性测度的参数灵敏度分析	57
3.4.1 基本变量重要性测度的灵敏度分析	57
3.4.2 基于 PDEM 的重要性测度参数灵敏度分析	60
3.4.3 算例	61
3.5 本章小结	65
参考文献	66
第 4 章 三种新的重要性测度	68
4.1 基本变量的次序重要性测度	68
4.1.1 基本变量的次序重要性测度定义	69
4.1.2 次序重要性测度的求解方法	70
4.1.3 算例	74
4.1.4 小结	78
4.2 结构系统输入基本变量的概率重要性测度	79
4.2.1 两种概率重要性测度	79
4.2.2 两种概率重要性测度求解方法	84
4.2.3 算例	86
4.2.4 小结	92
4.3 随机激励下不确定机构的轨迹重要性测度	92
4.3.1 随机激励下牛头刨床机构的运动描述	93
4.3.2 机构轨迹重要性测度	95
4.3.3 牛头刨床机构轨迹重要性测度的求解方法	98
4.3.4 结果与分析	100
4.3.5 小结	102
4.4 本章小结	102
参考文献	103
第 5 章 主观不确定性情况下的基本变量重要性分析	106
5.1 主观不确定性情况下的重要性测度	107
5.1.1 主、客观混合不确定性传递	107
5.1.2 主观不确定性情况下失效概率重要性测度定义	108
5.2 主观不确定性情况下失效概率的重要性分析方法	108
5.2.1 主观不确定性情况下重要性分析的直接抽样法	109
5.2.2 主观不确定性情况下重要性分析的改进重要抽样法	110
5.2.3 混合不确定性情况下重要性分析的主客观不确定性分离法	120

5.3 本章小结	131
参考文献	131
第6章 机械系统重要性分析	133
6.1 飞机液压系统可靠性分析	134
6.1.1 液压系统构成及失效数据	134
6.1.2 基于无模型抽样的液压系统可靠性分析	136
6.2 液压系统重要性分析的 SDP 方法	141
6.2.1 系统失效基于方差的重要性测度	141
6.2.2 基于 SDP 方法的液压系统重要性分析	141
6.3 飞机单侧襟翼系统重要性分析	143
6.3.1 某型民机单侧襟翼不对称运动失效描述	144
6.3.2 不确定基本事件次序重要度及求解方法	145
6.3.3 某型民机单侧襟翼不对称运动失效的重要性分析结果	148
6.4 本章小结	152
参考文献	153

第 1 章 绪 论

1.1 结构不确定性描述及可靠性分析方法

在航空航天、船舶、汽车及土木等工程领域,各类结构、机构或系统由于受到几何尺寸的不准确性、材料参数的分散性、载荷环境的波动性及仪器测量的误差等不确定性因素的影响,其零部件的性能、输出响应也表现出一定的变异特性。为保证设计产品在不确定性因素作用下随时间变化的性能满足安全要求,十分有必要研究不确定环境下设计产品的动态分析方法^[1-5]。

根据不确定性的不同来源及人们对其的认知程度,一般情况下可将这些不确定性因素分为主观不确定性和客观不确定性^[1]。客观不确定性又称随机不确定性(随机变量的不确定性),反映了事物内部固有的变异性,除非改变物理属性,否则这种不确定性是不会减少的。而主观不确定性(随机变量分布参数的不确定性)是指由于人们知识匮乏和信息短缺而形成的不确定性,与客观不确定性不同的是,主观不确定性可以通过认识的深入和信息量的增加而减少。

目前对于主观和客观不确定性的描述模型大致可以分为三类:随机不确定性模型、模糊不确定性模型、区间不确定性模型。其中,随机不确定性模型主要是当积累的样本数据足以精确确定变量概率密度函数时,随机不确定性模型可以用随机变量以概率密度函数的形式定义^[2-5]。在概率可靠性分析中,使用服从某种概率分布的随机变量描述具有不确定性的输入量,并通过所建立的模型将输入量的不确定性传递到响应量,进而得到响应量小于某给定阈值的概率(即失效概率)。由于随机不确定性模型以成熟的概率统计数学为基础,能够处理各种复杂环境下的不确定性传递问题,且也积累了较多的试验数据作为物质基础,在工程领域应用得到了广泛的共识,因此随机不确定性模型仍然是目前使用范围最广、发展最为完善的一种不确定性^[6-10]。然而,随机不确定性也存在以下三个缺陷^[11]:首先,为了精确确定概率密度函数需要积累大量的样本数据,但是对于大部分实际工程结构可用的样本数据往往有限。其次,结构的输出响应对输入随机变量的分布参数非常敏感,分布参数极少的误差可能会引起输出响应的巨大变化,甚至是完全误导的结果^[1]。最后,随机不确定性很难处理涉及人的行为以及专家经验的不确定性现象。

针对大部分实际工程结构,可用的样本数据往往有限,信息缺乏且数据不精确,导致概率结果的单值估计非常困难,而且,实际工程中结构系统的“正常”和“失效”的界限也不可能是清晰的,两者分界处的相邻点间并无性能上的本质差异,将

其划属为两个不同的状态是不合理的。因此,人们提出模糊不确定性模型。对于涉及人的行为和专家经验的不确定性现象,文献[12]首次提出了采用模糊变量以隶属函数的形式加以描述。文献[13]~[18]对模糊不确定性下的模糊问题进行了大量研究,而后也有学者对模糊可靠性理论及其工程应用进行了不少研究^[19-23]。文献[24]~[27]在基于区间分析非概率可靠性模型的基础^[28,29]上,提出了一种用失效可能度度量结构安全的模糊可靠性模型,并在理论研究和应用方面进行了深入研究。对于一般系统,Cai等^[13]基于可能性假设和双状态假设,提出了能双可靠性的基本概念和理论体系。Utkin等^[30]根据能双可靠性理论,提出了一般系统的能双可靠性方法。Cheng等^[31]基于概率假设和模糊状态假设,利用置信区间分析,提出了一般模糊系统的可靠性分析方法。在结构和机械工程领域,1994年,Furuta^[32]对模糊逻辑及其在结构可靠性评估中的作用进行过较为详细的介绍和评述。1997年,Cremona等^[19]基于可能性理论提出了一种类似于传统的概率可靠性模型的结构模糊可靠性度量体系及分析方法。Sawyer等^[33]将模糊集合论用于描述模糊机械和结构系统,根据模糊数落入模糊界限内的程度度量,提出了基于强度的结构模糊安全性度量指标,可用于处理离散数据信息。我国学者在模糊可靠性理论方面也进行过大量研究^[34-39],并取得了大量有益的成果。

此外,相比随机不确定性模型中精确的概率密度函数,样本数据的变化范围或界限往往更容易确定。鉴于此,有学者基于区间数学^[40-52]、模糊理论^[12-20]、可能性理论^[24-28]等理论方法,提出了区间不确定描述模型。文献[40]~[42]首次提出了有界不确定性的概念,采用有界变量描述不确定性,常见的有界不确定性变量有区间变量、单椭圆凸集及多椭圆凸集等。区间变量^[28,29,43-45]无法描述有界不确定性变量之间的相互关系;单椭圆凸集^[46-48]可以考虑一组有界不确定性变量之间的相互关系;而多椭圆凸集^[50-52]针对有界不确定性变量的不同来源,对于同一来源的有界不确定性变量采用一个椭圆凸集描述它们之间的关系。

然而工程实践中不确定性现象大量存在,往往来自不同的源头。针对不同的来源,人们所掌握的数据量是不一样的,有些数据量足以确定变量的精确概率密度函数,有些只知道变量的界限,而有些涉及人类行为及专家经验。因此,对于所研究的问题,为了合理描述结构的不确定性,各变量可以采用不同类型的不确定性变量定义,这就产生了混合不确定性情况下结构不确定性分析问题。

1.2 不确定变量的重要性测度分析方法

在工程可靠性分析中可以定义基本变量的重要性测度作为模型中输入变量的不确定性对模型输出响应不确定性的贡献程度^[53-55],相对于局部灵敏度(local sensitivity),重要性测度又称输入变量的全局灵敏度(global sensitivity)。

当前,基本变量的不确定重要性测度可分为以下三类:

(1) 基于非参方法的指标^[56-60];

(2) 基于方差的指标^[61-74];

(3) 矩独立指标^[75-81]。

具体来讲,基于非参方法的不确定性重要性测度是建立在衡量输出响应与输入变量之间相关性的基础上,以两者的相关关系作为衡量基本变量对输出响应的不确定程度。而基于方差的重要性测度则以消除某个基本变量的不确定性前后输出响应的方差变化作为衡量。基于矩独立的基本变量的不确定性重要性测度,从整个概率分布的角度研究输入变量对输出响应量的影响程度。

1990年,Iman和Hora^[61]指出,理想的不确定变量重要性测度指标(uncertainty importance measure, UI)应是无条件的、易理解的、易计算的和稳定的,并提出了相应的三种指标和计算方法,即:① $UI_1(i) = \sqrt{\text{Var}(Y) - E[\text{Var}(Y|X_i)]}$; ② $UI_2(i) = \text{Var}[E(\ln Y|X_i)]/\text{Var}(\ln Y)$; ③ $UI_3(i) = (Y_\alpha^*/Y_\alpha, Y_{1-\alpha}^*/Y_{1-\alpha})$ 。其中, $\text{Var}(Y)$ 、 Y_α 和 $Y_{1-\alpha}$ 是基本变量取所有值时功能响应函数 Y 无条件分布的方差、 α 和 $1-\alpha$ 分位点, $\text{Var}(Y|X_i)$ 、 Y_α^* 和 $Y_{1-\alpha}^*$ 为当基本变量 X_i 取某个实现值时功能响应函数 Y 条件分布的方差、 α 和 $1-\alpha$ 分位点。同时,他们也指出,这三种重要性测度指标都不能单独满足上述要求,因而建议将三者同时使用以分析模型中不确定变量的重要性。2002年, Saltelli^[58]给出了基本变量重要性测度指标的新要求,即“全局性、可量化性和通用性”,并提出了两种基于方差的重要性测度指标,利用方差作为衡量基本变量的重要性测度,即首先假定用方差这一变量的矩就能充分描述模型输出变量的分布特性,显然这一假设并不是处处成立的。正如 Helton 等^[58,73,74]指出的那样,随机量被其任一阶矩来替代都不可避免地会带来其分布信息的损失,在分析前述基本变量重要性测度指标的基础上,他们又提出了一个新的要求,即矩独立性。

针对基本变量重要性测度指标的四个要求,许多学者都提出了各自的度量指标^[75-81],其中,Chun 等^[77]提出的方法需要一定的假设,而 Liu 等^[82]提出的相对熵方法,引入对数运算进行重要性测度计算,虽然能对变量的相对重要性进行排序,但其测度值并没有实际的物理意义且计算误差较大。而 Borgonovo 等^[78,79]提出的矩独立重要性测度能较好地反映各变量的重要性差别,因而成为当前重要性测度研究的一个重要基础,但其提出的重要性测度指标过于单一,没有像基于方差方法一样全面考虑变量的单独影响和变量之间的相互作用影响,且文中利用蒙特卡罗法(Monte Carlo method, MCM)进行指标求解的计算量十分庞大。

1.3 主、客观混合不确定性情况下可靠性及变量重要性分析

目前,对于传统的可靠性分析,一般只考虑客观不确定性,此时需要不确定性的完整统计信息^[83-88],并以概率分布来描述这种不确定性。然而概率分布有时并不能准确表征所有变量的不确定性。如前所述,不确定性信息不仅包含客观不确定性,还存在着主观不确定性。在一些情况下,模糊理论、区间理论等可被用来表示工程中的某些主观不确定性变量。例如,利用模糊理论,这些变量可以用隶属函数来描述^[89-94]。对于大多数工程问题,其中的某些变量不确定性可以用概率分布表示,而另一些变量的不确定性则需用隶属度函数表示,因此建立随机和模糊混合变量下的可靠性模型是当前可靠性研究的一个热点^[95-98]。此外,相比精确的概率密度函数,样本数据的变化范围或界限往往较容易确定,即这类不确定性变量可以采用有界不确定性变量描述,常见的有界不确定性变量有区间变量、单椭圆凸集及多椭圆凸集等。因此,对混合不确定性变量下可靠性灵敏度的研究也是当前研究的一个空白。

另外,对于不确定性的重要性分析,目前大部分的研究仍然集中于随机不确定性输入变量的全局灵敏度分析,很少有针对模糊不确定性^[99,100]及有界不确定性的全局灵敏度分析,这方面的工作仍然需要进一步的探讨研究。同时,对随机、模糊以及有界混合不确定性情况下的全局灵敏度分析也有待完善^[100]。为了克服随机不确定性的不足,有学者提出了主观不确定性的概念,并用主客观混合不确定性来处理这种困境,且已经得到了广泛的应用^[101-106]。目前,针对主观不确定性变量的全局灵敏度分析仍然不多见,仅有的几篇报道也面临计算量巨大的问题^[107-109],因此十分有必要开发出高效准确的求解方法。对于主客观混合不确定性的混合全局灵敏度分析,其计算代价更加巨大,高效求解各项指标也需要进一步完善。

参 考 文 献

- [1] Elishakoff I. Essay on uncertainties in elastic and viscoelastic structures: From A. M. Freudenthal's criticisms to modern convex model[J]. Computers and Structures, 1995, 56 (6): 871-895.
- [2] 秦权,林道锦,梅刚. 结构可靠度随机有限元——理论及工程应用[M]. 北京:清华大学出版社, 2006.
- [3] Schueller G I. On the treatment of uncertainties in structural mechanics and analysis[J]. Computers and Structures, 2007, 85: 235-243.
- [4] Schenk C A, Schueller G I. Uncertainty Assessment of Large Finite Element Systems[M]. Berlin: Springer, 2005.
- [5] Schueller G I. Computational stochastic mechanics recent advances[J]. Computers and Struc-

- tures, 2001, 79: 2225-2234.
- [6] 吕震宙, 冯蕴雯. 结构可靠性问题研究的若干进展[J]. 力学进展, 2000, 30(1): 21-28.
- [7] 郭书祥, 冯元生, 吕震宙. 随机有限元方法与结构可靠性[J]. 力学进展, 2000, 30(3): 343-350.
- [8] Choi S K, Grandhi R V, Canfield R A. Reliability-Based Structural Design[M]. London: Springer, 2006.
- [9] Ditlevsen O, Madsen H O. Structural Reliability Methods[EB/OL]. <http://www.mek.dtu.dk/staff/od/books.htm>[2005-10-11].
- [10] Hurtado J E. Structural Reliability: Statistical Learning Perspectives[M]. Berlin: Springer, 2004.
- [11] Sexsmith R G. Probability-based safety analysis value and drawbacks[J]. Structural Safety, 1999, 21(4): 303-310.
- [12] Zadeh L A. Fuzzy sets[J]. Information and Control, 1965, 8: 338-353.
- [13] Cai K Y, Wen C Y, Zhang M L. Fuzzy variables as a basis for a theory of fuzzy reliability in the possibility context[J]. Fuzzy Sets and Systems, 1991, 42(2): 145-172.
- [14] Cai K Y, Wen C Y, Zhang M L. Possibilist reliability behavior of typical systems with two types of failures[J]. Fuzzy Sets and Systems, 1991, 43: 17-32.
- [15] Cai K Y, Wen C Y, Zhang M L. Fuzzy reliability modelling of gracefully degradable computing systems[J]. Reliability Engineering and System Safety, 1991, 33(1): 141-157.
- [16] Cai K Y, Wen C Y, Zhang M L. Survivability index for CCNs: A measure of fuzzy reliability [J]. Reliability Engineering and System Safety, 1991, 33(1): 71-99.
- [17] Cai K Y, Wen C Y, Zhang M L. Fuzzy states as a basis for a theory of fuzzy reliability[J]. Microelectronics Reliability, 1993, 33: 2253-2263.
- [18] Cai K Y, Wen C Y, Zhang M L. Possibilist reliability behavior of fault tolerant systems[J]. Microelectronics Reliability, 1995, 35: 49-56.
- [19] Cremona C, Gao Y. The possibilistic reliability theory: Theoretical aspects and applications [J]. Structural Safety, 1997, 19(2): 173-201.
- [20] Savoia M. Structural reliability analysis through fuzzy number approach, with application to stability[J]. Computers and Structures, 2002, 80: 1087-1102.
- [21] Dodagoudar G R, Venkatachalam G. Reliability analysis of slopes using fuzzy sets theory [J]. Computers and Geotechnics, 2000, 27: 101-115.
- [22] Li B, Zhu M, Xu K. A practical engineering method for fuzzy reliability analysis of mechanical structures[J]. Reliability Engineering and System Safety, 2000, 67: 311-315.
- [23] Jiang Q M, Chen C H. A numerical algorithm of fuzzy reliability[J]. Reliability Engineering and System Safety, 2003, 80: 299-307.
- [24] Guo S X, Lu Z Z. Procedure for computing the possibility and fuzzy probability of failure of structures[J]. Chinese Journal of Applied Mathematics and Mechanics, 2003, 24(3): 338-343.

- [25] 郭书祥,张陵,吕震宙. 机械结构的能度可靠性分析方法[J]. 西北工业大学学报,2004,22(5):572-575.
- [26] 郭书祥,吕震宙,冯立富. 基于可能性理论的结构模糊可靠性方法[J]. 计算力学学报,2002,19(1):89-93.
- [27] 郭书祥,吕震宙. 模糊结构和机械系统的能度可靠性分析[J]. 机械强度,2003,25(4):430-432.
- [28] 郭书祥,吕震宙,冯元生. 基于区间分析的结构可靠性非概率模型[J]. 计算力学学报,2001,18(1):56-60.
- [29] 郭书祥. 非随机不确定结构的可靠性方法和优化设计研究[D]. 西安:西北工业大学,2002.
- [30] Utkin L V, Gurov S V. A general formal approach for fuzzy reliability analysis in the possibility context[J]. Fuzzy Sets and Systems, 83(2), 1996:203-213.
- [31] Cheng C H, Mon D L. Fuzzy system reliability analysis by interval of confidence[J]. Fuzzy Sets and Systems, 1993, 56(1):29-35.
- [32] Furuta H. Fuzzy Logic and Its Contribution to Reliability Analysis[A]//Rackwitz R, Angusti G, Borri A. Reliability and Optimization of Structural Systems[M]. London: Chapman & Hall, 1995:61-76.
- [33] Sawyer J P, Rao S S. Strength-based reliability and failure assessment of fuzzy mechanical and structural systems[J]. AIAA Journal, 1999, 37(1):84-92.
- [34] 吕震宙,岳珠峰,冯元生. 磨损的随机模糊失效概率计算方法[J]. 机械科学和技术, 1997, 16(6):1018-1023.
- [35] 吕震宙,岳珠峰,冯元生. 基于模糊分布参数的元件和结构系统的可靠性度量指标分析[J]. 机械强度, 1998, 20(3):193-196.
- [36] 吕震宙,岳珠峰. 多模式广义失效概率计算的数值模拟法及其工程应用[J]. 应用数学和力学, 2000, 21(4):382-387.
- [37] 黄洪钟. 对常规可靠性理论的批判性评述[J]. 机械设计, 1994, 11(3):1-5.
- [38] 黄洪钟. 基于模糊失效准则的机械结构广义静强度的模糊可靠性计算理论[J]. 机械强度, 2000, 22(1):36-40.
- [39] 黄洪钟. 机械结构广义强度的模糊可靠性计算理论[J]. 机械工程学报, 2001, 37(6):106-108.
- [40] Ben-Haim Y. A non-probabilistic concept of reliability[J]. Structural Safety, 1994, 14(4):227-245.
- [41] Ben-Haim Y. A non-probabilistic measure of reliability of linear systems based on expansion of convex models[J]. Structural Safety, 1995, 17(2):91-109.
- [42] Elishakoff I. Discussion on: A non-probabilistic concept of reliability[J]. Structural Safety, 1995, 17(3):195-199.
- [43] Wang X, Qiu Z P, Elishakoff I. Non-probabilistic set-theoretic model for structural safety measure[J]. Acta Mechanica, 2008, 198:51-64.
- [44] Sun H L, Yao W X. The basic properties of some typical systems' reliability in interval

- form[J]. *Structural Safety*, 2008, 30: 364-373.
- [45] 江涛. 结构系统非概率可靠性算法研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2006.
- [46] 邱志平. 非概率集合理论凸方法及其应用[M]. 北京: 国防工业出版社, 2005.
- [47] 刘成立. 复杂结构可靠性分析及设计研究[D]. 西安: 西北工业大学, 2006.
- [48] 乔心州. 不确定结构可靠性分析及优化设计研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2009.
- [49] 曹鸿钧. 基于凸集合模型的结构和多学科系统不确定性分析与设计[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2005.
- [50] Moens D, Vandepitte D. Recent advances in nonprobabilistic approaches for non-deterministic dynamic finite element analysis[J]. *Archives of Computational Methods in Engineering*, 2006, 13(2): 389-464.
- [51] Möller B, Beer M. Engineering computation under uncertainty-capabilities of non-traditional models[J]. *Computers and Structures*, 2007, 86: 1024-1041.
- [52] Kang Z, Luo Y J, Li A. On non-probabilistic reliability-based design optimization of structures with uncertain-but-bounded parameters[J]. *Structural Safety*, 2011, 33: 196-205.
- [53] Saltelli A. Sensitivity analysis for importance assessment[J]. *Risk Analysis*, 2002, 22(3): 579-590.
- [54] Saltelli A. Sensitivity analysis: Could better methods be used[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1999, 104(D3): 3789-3793.
- [55] Borgonovo E. Measuring uncertainty importance: Investigation and comparison of alternative approaches[J]. *Risk Analysis*, 2006, 26(5): 579-590.
- [56] McKay M D, Beckman R J, Conover W J. A comparison of three methods for selecting values of input variables in the analysis of output from a computer code[J]. *Technometrics*, 1979, 21(2): 239-245.
- [57] Saltelli A, Marivoet J. Non-parametric statistics in sensitivity analysis for model output: A comparison of selected techniques[J]. *Reliability Engineering and System Safety*, 1990, 28(2): 229-253.
- [58] Helton J C, Davis F J. Latin hypercube sampling and the propagation of uncertainty in analysis of complex systems[J]. *Reliability Engineering and System Safety*, 2003, 81(1): 23-69.
- [59] Helton J C, Johnson J D, Sallaberry C J, et al. Survey of sampling-based methods for uncertainty and sensitivity analysis[J]. *Reliability Engineering and System Safety*, 2006, 91(10-11): 1175-1209.
- [60] Storlie C B, Swiler L P, Helton J C, et al. Implementation and evaluation of nonparametric regression procedures for sensitivity analysis of computationally demanding models[J]. *Reliability Engineering and System Safety*, 2009, 94(11): 1735-1763.
- [61] Iman R L, Hora S C. A robust measure of uncertainty importance for use in fault tree system analysis[J]. *Risk Analysis*, 1990, 10(3): 401-406.
- [62] Sobol I M. Sensitivity estimates for nonlinear mathematical models[J]. *Mathematical Modeling and Computational Experiment*, 1993, 1(4): 407-414.

- [63] Sobol I M. Global sensitivity indices for nonlinear mathematical models and their Monte Carlo estimates[J]. *Mathematics and Computers in Simulation*, 2001, 55(1): 271-280.
- [64] Sobol I M. Theorem and examples on high-dimensional model representation[J]. *Reliability Engineering and System Safety*, 2003, 79(2): 183-193.
- [65] Oakley J, O'Hagan A. Probabilistic sensitivity analysis of complex models: A Bayesian approach[J]. *Journal of the Royal Statistical Society B*, 2004, 66(3): 751-769.
- [66] Saltelli A, Tarantola S, Chan K. A quantitative model-independent method for global sensitivity analysis of model output[J]. *Technometrics*, 1999, 41(1): 39-56.
- [67] Saltelli A, Tarantola S, Campolongo F. Sensitivity analysis as an ingredient of modeling[J]. *Statistical Science*, 2000, 19(4): 377-395.
- [68] Saltelli A, Tarantola S. On the relative importance of input factors in mathematical models: Safety assessment for nuclear waste disposal[J]. *Journal of the American Statistical Association*, 2002, 97(459): 702-709.
- [69] Saltelli A. Making best use of model evaluations to compute sensitivity indices[J]. *Computer Physics Communications*, 2002, 145(2): 280-297.
- [70] Owen A B. The dimension distribution and quadrature test functions[J]. *Statistica Sinica*, 2003, 13(9): 1-17.
- [71] Saisana M, Saltelli A, Tarantola S. Uncertainty and sensitivity analysis techniques as tools for the quality assessment of composite indicators[J]. *Journal of the Royal Statistical Society Series A*, 2005, 168(2): 307-323.
- [72] Saltelli A, Annoni P, Azzini I, et al. Variance based sensitivity analysis of model output: Design and estimator for the total sensitivity index[J]. *Computer Physics Communications*, 2010, 181(2): 259-270.
- [73] Cox L A. Why risk is not variance: An expository note[J]. *Risk Analysis*, 2008, 28(4): 925-928.
- [74] Huber W A. "Why risk is not variance: An expository note" letter to editor[J]. *Risk Analysis*, 2010, 30(3): 327-328.
- [75] Park C K, Ahn K I. A new approach for measuring uncertainty importance and distributional sensitivity in probabilistic safety assessment[J]. *Reliability Engineering and System Safety*, 1994, 46(3): 261-363.
- [76] Liu Q, Homma T. A new computational method of a moment-independent uncertainty importance measure[J]. *Reliability Engineering and System Safety*, 2009, 94(7): 1205-1211.
- [77] Chun M H, Han S J, Tak N I. An uncertainty importance measure using a distance metric for the change in a cumulative distribution function[J]. *Reliability Engineering and System Safety*, 2007, 70(3): 313-321.
- [78] Borgonovo E. A new uncertainty importance measure[J]. *Reliability Engineering and System Safety*, 2007, 92(6): 771-784.
- [79] Borgonovo E, Castaings W, Tarantola S. Moment independent importance measures: New

- result and analytical test cases[J]. Risk Analysis, 2011, 31(3): 404-428.
- [80] Li L Y, Lu Z Z, Song S F. Saddlepoint approximation based line sampling method for uncertainty propagation in fuzzy and random reliability analysis[J]. Science China Technological Sciences, 2010, 53(8): 2252-2260.
- [81] Cui L J, Lu Z Z, Zhao X P. Moment-independent importance measure of basic random variable and its probability density evolution solution[J]. Science China Technological Sciences, 2010, 53(4): 1138-1145.
- [82] Liu H B, Chen W, Sudjianto A. Relative entropy based method for probabilistic sensitivity analysis in engineering design [J]. Journal of Mechanical Design, Transactions of the ASME, 2006, 128(2): 326-336.
- [83] Huang H Z. Reliability analysis method in the presence of fuzziness attached to operating time[J]. Microelectronics and Reliability, 1995, 32(12): 1483-1487.
- [84] Du X, Chen W. Methodology for managing the effect of uncertainty in simulation-based design[J]. AIAA Journal, 2000, 38(8): 1471-1478.
- [85] Du X, Chen W. Towards a better understanding of modeling feasibility robustness in engineering design[J]. Journal of Mechanical, 2000, 122(4): 357-383.
- [86] Penmetsa R C, Grandhi R V. Structural system reliability quantification using multi-point approximations[J]. AIAA Journal, 2002, 40(12): 2526-2531.
- [87] Bucher C G, Bourgund U. A fast efficient response surface approach for structural reliability problems[J]. Structural Safety, 1990, 7(1): 57-66.
- [88] Grandhi R V, Wang L P. Higher-order failure probability calculation using nonlinear approximations[J]. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 1999, 168(1-4): 185-206.
- [89] Zadeh L. Fuzzy sets[J]. Information and Control, 1965, (8): 338-353.
- [90] Buckley J J, Qu Y. Solving systems of linear fuzzy equations[J]. Fuzzy Sets and System, 1991, 43(1): 33-43.
- [91] Briabant V, Oudshoorn A, Boyer C, et al. Nondeterministic probabilistic approaches for structural analysis and optimal design[J]. AIAA Journal, 1999, 37(10): 1298-1303.
- [92] Dong W M, Wong F S. Fuzzy weighted averages and implementation of the extension principle[J]. Fuzzy Set and System, 1987, 21(2): 183-199.
- [93] Smith S A, Krishnamurthy T, Mason B H. Optimized vertex method and hybrid reliability [C]. Proceedings of 43rd AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics and Materials Conference, Denver, 2002: 1465.
- [94] Penmetsa R C, Grandhi R V. Uncertainty propagation using possibility theory and function approximations[J]. Mechanics Based Design of Structures and Machines, 2003, 31(2): 257-279.
- [95] Hoffman F O, Hammonds J S. Propagation of uncertainty in risk assessment: The need to distinguish between uncertainty due to lack of knowledge and uncertainty due to variability