



不确定性结构系统的重要性 分析理论与求解方法

吕震宙 李璐祎 宋述芳 郝文锐 著



科学出版社

国家科学技术学术著作出版基金资助出版

不确定性结构系统的重要性 分析理论与求解方法

吕震宙 李璐祎 宋述芳 郝文锐 著

科学出版社

北京

内 容 简 介

本书详细介绍了不确定性结构系统的重要性分析的理论方法及工程应用。全书共9章,主要针对相关变量的重要性分析问题,从输出性能的方差和矩独立特征两个方面探讨了重要性分析的近似解析法和诸多高效的数字模拟法,给出了这些求解方法的基本原理、适用范围以及工程应用;并从完善重要性分析理论的角度出发,提出了几种新的重要性测度指标;最后对不确定性结构系统的重要性分析理论工作做了简单的展望。

本书可供从事结构机构不确定性和重要性分析工作的科研人员以及大专院校的教师、研究生和高年级的本科生使用。

图书在版编目(CIP)数据

不确定性结构系统的重要性分析理论与求解方法/吕震宙等著. —北京:科学出版社,2014

ISBN 978-7-03-042017-6

I. ①不… II. ①吕… III. ①航天器-结构-系统可靠性-系统分析
IV. ①V414.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 224245 号

责任编辑:刘宝莉 / 责任校对:张凤琴
责任印制:肖 兴 / 封面设计:陈 敬

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>

中国科学院印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2015年1月第 一 版 开本:720×1000 1/16

2015年1月第一次印刷 印张:19 3/4

字数:400 000

定价:100.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

前 言

在结构系统随机不确定性分析与设计研究领域,为全面衡量输入变量对输出性能的影响,众多学者进行了大量的学术与工程应用研究,建立了以灵敏度来衡量这种影响的理论体系。一般来说,灵敏度分为局部灵敏度和总体灵敏度两种类型,局部灵敏度反映的是名义值处输入变量独立统计参数对输出性能的统计特征的影响,其受制于名义值的选取,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。而全局灵敏度(又称重要性测度)则能够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,并且可以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。目前,基于方差的和矩独立的重要性测度方法应用广泛,但已有的大部分算法是在输入变量独立情况下给出的,将其直接推广应用到工程中常见的变量相关的情况,必将引起概念混乱及计算错误。因此,研究适用于相关变量的重要性测度,并研究同时适用于独立/相关变量的高效的重要性测度算法是发展和完善全局灵敏度理论的必然趋势,同时也是将重要性测度方法应用于工程实际的基础和前提。

本书主要针对重要性测度分析中面临的输入变量相关这一普遍问题,在简要综述已有的基于方差的和矩独立的重要性测度分析方法的同时,着重探讨了相关变量重要性测度指标及其分解的各种高效稳健的算法。这些方法使得工程技术人员能够进一步了解输入变量相关情况下输出性能不确定性的来源情况。另外,本书还将矩独立的重要性分析思想扩展到可靠性分析领域,提出了几种新的重要性测度指标,为结构机构的可靠性设计和优化提供直接的指导信息。本书内容对于完善当前重要性测度理论体系具有重要的意义,所讨论的重要性测度指标及其求解的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。目前国内对于重要性测度分析方面的研究较少,本书的出版将填补国内重要性测度分析理论与应用方面专著空白,对航空航天结构机构产品在不确定性环境下的性能预测及优化设计起到指导作用。

与国内外出版的同类书籍相比,本书的特点包括以下两个方面:

(1)在重要性测度的概念方面,本书除系统地综述了已有的经典重要性测度理论体系外,着重探讨了变量相关情况下重要测度指标的新内涵,并提出了几种新的重要测度指标,给出了典型的工程应用实例。这些输入变量相关情况下重要性测度的新内涵以及新的重要性测度指标在目前已出版的国内外书籍中都是没

有的。

(2)在算法方面,本书针对基于方差和矩独立的重要性测度指标,介绍了它们相应的近似解析法和诸多高效的数字模拟求解方法。目前国内已出版的同类书籍中还未见到相应的相关变量的重要性测度求解方法方面的研究工作介绍,国外已出版的书籍中也只有变量独立情况下几种经典的重要测度指标求解方法,很难满足工程实际需要。本书基于作者多年在可靠性及灵敏度方面的研究工作和国际专业杂志上公开发表的研究成果,给出了多种变量相关情况下重要性测度高效而又满足工程精度要求的求解方法。

本书的读者对象主要为大专院校的教师、研究生以及科研机构的工程技术人员。阅读本书需有概率、统计的基本理论知识。

本书的研究得到国家自然科学基金、博士点基金及其他一些横向课题的资助,作者对此表示衷心的感谢。另外,作者要感谢课题组所有的研究生,本书的很多内容来源于这个集体的智慧和具体工作。

尽管作者慎之又慎,但由于水平有限,书中难免存在不足之处,不当之处敬请读者批评指正。

目 录

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 本书研究的背景和意义	1
1.2 重要性测度分析发展简介	3
1.3 本书研究内容	5
1.4 本章结论	6
参考文献	6
第 2 章 输入变量独立情况下基于方差的重要性测度分析方法	9
2.1 基于方差的重要性测度指标及求解方法	9
2.1.1 方差分析分解	9
2.1.2 方差分解和重要性测度指标	10
2.1.3 基于方差的重要性测度的解析解	12
2.1.4 基于方差重要性测度的 Monte Carlo 数字模拟法	12
2.1.5 基于方差重要性测度的近似模型求解方法	14
2.1.6 基于方差重要性测度求解的态相关参数方法	14
2.2 基于方差重要性测度及方差贡献的参数敏感性分析求解的点估计方法	16
2.2.1 基于方差的重要性测度分析的点估计算法	17
2.2.2 方差贡献的参数敏感性分析及其点估计算法	23
2.3 本章结论	29
参考文献	29
第 3 章 输入变量相关情况下基于方差重要性测度的分析方法	31
3.1 相关变量重要性分析的回归方法	32
3.1.1 线性回归方法	32
3.1.2 非线性回归方法	35
3.1.3 算例分析	39
3.2 神经网络和移动最小二乘法	42
3.2.1 神经网络方法理论介绍	43
3.2.2 移动最小二乘法理论介绍	44
3.2.3 基于 ANN 和 MLS 的重要性测度分解方法	47

3.2.4 基于 ANN 和 MLS 的相关贡献的进一步分解	48
3.2.5 算例分析	49
3.3 态相关参数法	51
3.3.1 相关变量重要性测度分解的态相关参数方法	51
3.3.2 算例分析	53
3.4 点估计法	58
3.4.1 点估计方法回顾	58
3.4.2 相关变量下基于方差的重要性测度的点估计算法	60
3.4.3 算例分析	64
3.5 特殊情况下的重要性测度及其参数敏感性分析的解析算法	67
3.5.1 特殊情况下的重要性测度的解析算法	67
3.5.2 参数敏感性分析的解析算法	72
3.5.3 算例分析	75
3.6 本章结论	78
参考文献	79
第 4 章 基于相关变量独立正交化变换的方差重要性测度分析	82
4.1 相关变量正交独立化变换及相应的方差重要性测度分析理论	82
4.1.1 相关变量正交独立化变换及重要性测度体系	82
4.1.2 多项式混沌展开求解法	83
4.2 移动最小二乘法	85
4.2.1 非独立变量样本正交独立化变换的移动最小二乘法	85
4.2.2 基于方差的重要性测度指标的求解	86
4.2.3 算例分析	88
4.3 态相关参数法	93
4.3.1 相关变量独立正交化转换的 SDP 方法	94
4.3.2 基于方差的重要性测度指标的求解	95
4.3.3 算例分析	96
4.4 点估计方法	100
4.4.1 相关变量独立正交化变换	101
4.4.2 正交独立变量与响应量之间的函数关系	102
4.4.3 基于方差的重要性测度指标的求解	103
4.4.4 算例分析	104
4.5 特殊情况下的重要性测度及其参数敏感性分析的解析算法	105
4.5.1 重要性测度解析解	106
4.5.2 正交变量方差贡献灵敏度分析	109

4.5.3 算例分析	112
4.6 本章结论	120
参考文献	121
第5章 输入变量相关情况下基于方差的重要性测度分析新解释	122
5.1 输入变量相关情况下重要性测度指标的新解释	122
5.2 总相关贡献和总独立贡献内涵的解析说明和分解	123
5.2.1 输出总方差	124
5.2.2 单个变量的总相关贡献	126
5.2.3 单个变量的自身独立贡献	128
5.2.4 附加交叉贡献不存在时重要性测度的进一步分解	130
5.2.5 算例分析	131
5.3 总相关贡献和总独立贡献内涵的普遍性证明和分解	135
5.3.1 总相关贡献和总独立贡献内涵的普遍证明	136
5.3.2 总相关贡献和总独立贡献的进一步分解	140
5.3.3 算例分析	141
5.4 相关变量方差贡献分解的稀疏网格法	143
5.4.1 稀疏网格积分的基本原理	143
5.4.2 总相关贡献和总独立贡献求解的稀疏网格法	144
5.4.3 总相关贡献和总独立贡献分量求解的稀疏网格法	149
5.4.4 算例分析	152
5.5 相关变量方差贡献分解的 SDP 方法	157
5.5.1 相关变量方差贡献求解的 SDP 方法	157
5.5.2 算例分析	159
5.6 两种相关变量方差贡献分解方法的比较和讨论	169
5.7 输入变量相关情况下各种基于方差的重要性测度体系的比较	170
5.8 本章结论	170
参考文献	171
第6章 基于密度函数和分布函数的矩独立重要性测度分析方法	173
6.1 矩独立的重要性测度及其概率密度演化解法	173
6.1.1 矩独立的输入变量重要性测度	173
6.1.2 基于概率密度演化方法的矩独立重要性测度求解	176
6.1.3 算例分析	178
6.2 矩独立的重要性测度的参数灵敏度分析	180
6.2.1 重要性测度的参数灵敏度分析	180
6.2.2 重要性测度参数灵敏度分析的概率密度演化方法	183

6.2.3 算例分析	184
6.3 矩独立的重要性测度的稀疏网格法	187
6.3.1 基于密度函数和分布函数的矩独立重要性测度	187
6.3.2 基于密度函数和分布函数的矩独立重要性测度的求解策略	187
6.3.3 基于稀疏网格的矩独立重要性测度分析方法	190
6.3.4 算例分析	194
6.4 多失效模式下输入变量的重要性测度及其解法	196
6.4.1 多失效模式下基于密度函数的输入变量的重要性测度 δ ——重要性测度 1	196
6.4.2 多失效模式下输入变量对多维响应功能函数局部概率分布的重要性测度	197
6.4.3 多失效模式下输入变量的三种重要性测度比较	201
6.4.4 多失效模式下输入变量重要性测度的标准求解方法	202
6.4.5 算例分析	204
6.5 输入变量相关情况下基于独立正交化变换的矩独立重要性测度分析	206
6.5.1 相关变量情况下 δ_i 的分解	206
6.5.2 对计算策略的讨论	207
6.5.3 算例分析	208
6.6 本章结论	211
参考文献	211
第7章 基于失效概率的矩独立重要性测度分析方法	214
7.1 基于失效概率的矩独立重要性测度指标及相应的方差重要性测度指标之间的关系	214
7.1.1 基于失效概率和基于分布函数的矩独立的输入变量重要性测度	214
7.1.2 基于失效概率的矩独立重要性测度与基于方差及基于分布函数的 重要性测度之间的关系	215
7.1.3 基于失效概率和基于分布函数的矩独立重要性测度求解的态相关 参数法	217
7.1.4 算例分析	218
7.2 基于失效概率的矩独立重要性测度指标的高效抽样求解法	223
7.2.1 Monte Carlo 模拟法	224
7.2.2 重要抽样法	226
7.2.3 截断重要抽样法	229
7.2.4 算例分析	232

7.3 相关输入变量基于失效概率的矩独立重要性测度指标分解	236
7.3.1 相关变量基于失效概率的矩独立重要性测度指标	237
7.3.2 相关输入变量矩独立重要性测度分解的态相关参数法	238
7.3.3 算例分析	238
7.4 本章结论	243
参考文献	243
第8章 几种新的重要性测度指标	245
8.1 输入变量的次序重要性测度及求解方法	245
8.1.1 输入变量的次序重要性测度定义	245
8.1.2 次序重要性测度的求解方法	246
8.1.3 算例分析	250
8.2 结构系统输入变量的概率重要性分析	254
8.2.1 概率重要性测度	254
8.2.2 概率重要性测度求解方法	259
8.2.3 算例分析	261
8.3 随机激励下不确定机构的轨迹重要性测度	268
8.3.1 随机激励下牛头刨床机构的运动描述	268
8.3.2 机构轨迹重要性测度	270
8.3.3 牛头刨床机构轨迹重要性测度的求解方法	273
8.3.4 结果与分析	274
8.4 基于熵的重要性测度	277
8.4.1 随机变量的信息熵	277
8.4.2 基于信息熵的重要性测度	278
8.4.3 计算基于熵的重要性测度	284
8.4.4 算例分析	285
8.5 本章结论	293
参考文献	294
第9章 不确定性环境下重要性测度分析的展望	298
参考文献	299
索引	302

第 1 章 绪 论

1.1 本书研究的背景和意义

结构安全主要关注两个方面的问题:可靠性分析和灵敏度分析。可靠性分析旨在计算结构的失效概率或可靠度,灵敏度分析旨在研究输入变量的分布参数或不确定性对输出性能统计特征的影响。可靠性设计的核心技术之一就是可靠性灵敏度分析,它可以给出影响结构可靠性的各输入变量参数的相对重要程度,从而对结构可靠性分析、预测与优化提供指导^[1,2]。

灵敏度分析分为局部灵敏度分析和全局灵敏度分析。局部灵敏度定义为输入变量分布参数的变化引起输出性能统计特征变化的比率^[1]。这一比率可以用输出性能统计特征对分布参数的偏导数来描述,这也是传统灵敏度的定义,基于此定义已有很多学者研究了随机灵敏度的分析方法。但局部灵敏度仅考虑了输入变量分布参数在名义值处对输出性能统计特征的影响程度,而不能反映输入变量的完整不确定性如何影响输出性能统计特征。全局灵敏度分析可以从输入变量的整个分布范围,即不确定性范围,来衡量输入变量的不确定性对工程设计中所感兴趣的输出性能统计特征(例如模型输出响应的方差或分布)的贡献程度。在很多文献中,全局灵敏度分析(global sensitivity analysis)也被称为重要性测度分析(importance measure analysis)^[3~5]。相对于局部灵敏度,输入变量的重要性测度可定义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^[6]。

系统可靠性领域中的重要度分析即传统的重要度分析,例如 Birnbaum 结构概率重要度、割集重要度(fussell vesely, FV)等,其目的在于识别基本事件的失效对系统或顶事件的失效的重要程度,它们都是在基本事件的失效概率为确定值的假定下进行的。与传统的系统可靠性中基本事件重要度分析不同的是,本书所论述的重要性测度是指不确定输入变量的重要性测度,属于不确定性分析的范畴。更具体地说,不确定性分析为重要性测度分析的前提工作,因为进行重要性测度分析前,模型输入变量的不确定类型以及不确定性的范围需要通过不确定性分析得到,进而才能通过重要性测度分析找到对输出响应量的不确定性贡献较大的输入变量,那么就可以为接下来的减小输出性能的不确定性的工作方向提供依据。复杂结构系统不确定性传播及重要性测度分析的一般模型如图 1.1 所示。

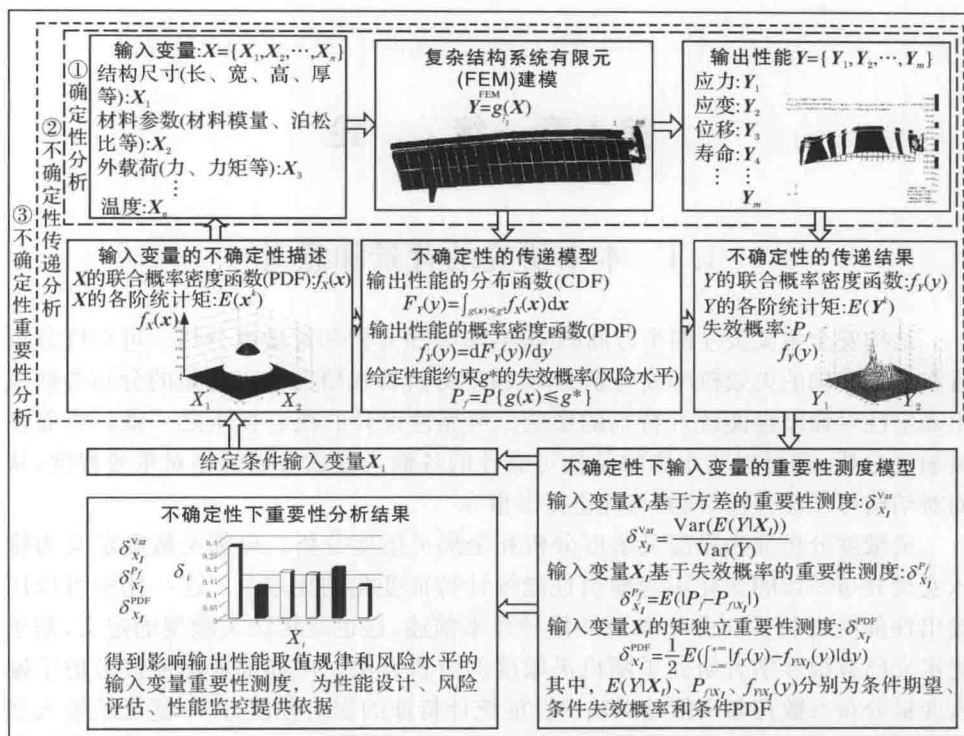


图 1.1 复杂结构系统不确定性传播及重要性测度分析的一般模型

在结构机构可靠性领域,输入变量的重要性测度问题在国内研究得较少,国外则有比较多的工作。输入随机变量的重要性测度反映的是其对输出响应量分布特性的影响程度。分布参数的无量纲可靠性灵敏度虽然能够给出参数的重要度,但一个随机变量往往有多个分布参数,而且这多个参数的重要度是不相同的,此时分布参数的重要度无法反映输入随机变量的重要度。输入随机变量的重要性测度应该满足全局性、可量化性、通用性这三条性质^[3,4],文献[3]还给出了第四条性质就是矩独立性,并且还给出了矩独立的输入随机变量重要性测度指标的一些重要性质。文献[3]给出的重要性测度全面反映了输入随机变量的分布对输出响应量分布特性的平均影响,是一种具有明确物理意义的变量重要性表征量。另外,按照文献[3]给出的输入变量对响应量分布的重要性测度的定义,还可以类似给出输入变量对结构可靠性影响的重要性测度,例如文献[5]给出的输入变量对输出响应失效概率影响的重要性测度指标。

输入变量的重要性测度是可靠性灵敏度的延伸,通常所说的结构机构可靠性灵敏度实质上是局部灵敏度。由于一些不可控的随机因素和在计算概率密度函数时的限制条件,不确定性是普遍存在的^[7,8],因此,认识和处理不确定性的问题

对可靠性分析结果的实际可用性至关重要。对于一个功能响应函数为 $Y = g(\mathbf{X}) = g(X_1, X_2, \dots, X_n)$ 的模型,重要性测度可将输入变量 $\mathbf{X}$ 的不确定性与输出响应量 Y 的不确定性联系起来^[8]。它可以指出各输入变量的不确定性对响应量影响程度的大小,继而可以依次确定它们的实验或研究的优先级别,即确定模型输入变量的重要性次序,甚至还可以帮助更好地定义未知参数,以最终减少响应的不确定范围,直到获得某可接受的响应的不确定范围^[9~11],也就为有针对性地改善结构模型提供了一条可行的新途径,正因为如此,针对不确定变量的重要性测度的研究近年来就成为了可靠性工程研究领域中的一个新的重要方向。

在实际工程问题中,有很多输入变量是相关的,但由于相关性的引入会使得重要性测度的分析变得非常复杂^[12],因此在重要性测度分析的研究中,输入变量相关的情况涉及很少。实际问题相关性是不可忽视的,因为当输入变量相关时,某一变量对输出响应量的不确定性的影响就不仅仅是该变量自身的影响了,还应包含与其相关的变量对输出响应量的影响,这是由变量之间的相关性造成的。简单地说,此时若得到某一对输出响应量的不确定性影响很大的变量,然后针对其进行改善,不一定能取得显著的效果,因为这一变量对输出的影响有可能大部分是源自于它与其他变量的相关性。所以,在具有相关变量的输入-输出模型中,需要进行区分某一输入变量的重要性是来自其本身的独立部分还是由于变量间的相关性^[13~24],这对工程实际问题具有重要的意义,也是本书研究内容的重点之一。

1.2 重要性测度分析发展简介

19 世纪 60 年代以来,国内外大量研究结构响应、特性或指标对输入变量偏导数的变量灵敏度指标。这一类方法是以各个输入变量取名义值时的偏导数作为该变量的灵敏度,在考虑某个变量的灵敏度时不能考虑其他变量的变异性产生的影响,因而实质上是局部灵敏度。相对于局部灵敏度,输入变量的重要性测度可定义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,输入变量的重要性测度又称为全局灵敏度。

全局灵敏度分析的研究起源于 Cukier 等^[25]1973 年提出的几种不确定重要性测度的指标。1990 年,Iman 和 Hora^[26]提出了理想的不确定变量重要性测度 (uncertainty importance measure) 指标应是无条件的、易理解的、易计算和稳定的,并提出了相应的三种指标和计算方法。但同时,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。随后 Sobol^[27]提出的基于方差的重要性测度成为全局灵敏度分析的里程碑,并由 Homma 和 Saltelli^[28]对其进行了补充,他们在 Sobol 主测度指标的基础上提出总测度指标的概念,完善了基于方差的重要性测度体系。但 Helton

和 Davis^[29]等学者也指出随机量被用其任一阶统计矩来替代都不可避免地会带来其分布信息的损失(基于方差的重要性测度体系是用方差即二阶矩来代表其分布信息的),在分析前述输入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。针对输入变量重要性测度指标的“全局性、可量化性、通用性、矩独立性”四个要求,许多学者都提出了各自的度量指标,例如 Borgonovo^[3]提出的矩独立的输入变量重要性测度指标,文献[30]、[31]提出了基于失效概率的矩独立重要性测度。

根据目前输入变量重要性测度研究的发展状况,一般可将重要性测度模型分为三类:①非参数模型(相关系数模型);②基于方差的模型;③矩独立模型。

非参数模型(nonparametric technique)一般以相关系数作为测度指标,用输入变量与输出响应量的相关系数的大小反映其重要性。但由于相关系数反映的是线性相关关系,因此该方法仅适用于线性输入-输出关系,缺乏模型的独立性。

基于方差的重要性分析方法(variance-based method)应用广泛, Saltelli^[6]和 Sobol^[27]提出和完善了基于方差的重要性测度指标和求解方法,它可用以确定各输入变量或各组输入变量对输出响应方差的贡献程度。尽管隐含地假设了方差能够充分描述输出量不确定性,但基于方差的重要性测度体系从 20 世纪 90 年代中期被提出到现在依然是最受欢迎的重要性测度体系,这是由于它具有以下几个优点^[10]:①模型通用性,即对于任何输入-输出模型均适用;②反映输入变量的整个变化范围对输出性能方差的影响;③能通过总测度指标量化输入变量之间的交互影响;④可对输入变量进行分组讨论。此外,基于方差的重要性测度体系目前也已有几种比较成熟的求解方法,例如随机抽样的高维模型替代法(random sampling high dimensional model representation, RS-HDMR)^[11,32~34]、态相关参数法(state-dependent parameter procedure, SDP)^[35,36]、随机稳健设计法(random balance design procedure, RBD)^[37,38]和基于 Monte Carlo 模拟的方法(Monte Carlo simulation based procedure, MCS)^[39~41]等。其中 RS-HDMR、SDP 和 RBD 仅适用于计算主测度指标。MCS 可以同时计算主测度指标和总测度指标。

Borgonovo^[3]和 Chun 等^[42]、Liu 等^[43]各自提出了相应的矩独立重要性测度指标(moment independent importance measure),用以反映输入变量对整个输出分布的影响,其中文献[3]的矩独立重要性测度指标能够比较好地反映各输入变量对输出响应的概率密度函数的重要性差别。该重要性测度分析方法中,关键和难点是目前尚无高效的方法来准确求解输出模型的无条件概率密度函数和条件概率密度函数。文献[44]采用渐进空间积分法能够缓解计算过程中精度与效率的矛盾,但对复杂工程问题的适用性还有待于进一步探讨。在可靠性问题中,小失效概率的计算大多牵涉到功能响应函数分布的尾部,因而输入变量对功能响应函数分布的影响程度并不能完全等同于输入变量对模型失效概率的影响程度。

文献[5]建立了一种矩独立的输入变量对失效概率的重要性测度指标,以衡量各输入变量对失效概率的影响程度,可以直接为可靠性设计提供有用信息。文献[30]则将基于失效概率的矩独立指标进行了改进,发现了矩独立指标与基于方差的指标间的转换关系。总之,目前关于不确定性环境下的重要性测度的研究已有较多的成果,本书将在简要综述他人工作的基础上,着重呈现作者在这一领域的一些工作结果,旨在为不确定性条件下的工程设计提供可行的实现途径,并为重要性分析理论的完善提供参考。

1.3 本书研究内容

本书的研究内容框图如图 1.2 所示,重点在于相关输入变量的重要性测度分析。本书章节安排如下:第 2 章简要综述输入变量独立情况下的基于方差的重要性测度指标及其求解方法;第 3~5 章分别研究了相关输入变量情况下的基于方差的重要性测度分析方法;第 6 章则是基于响应函数分布的矩独立重要性测度分析方法;第 7 章是基于失效概率的矩独立重要性测度分析方法;第 8 章给出了几种新的重要性测度指标和求解方法;第 9 章为重要性测度分析的展望。

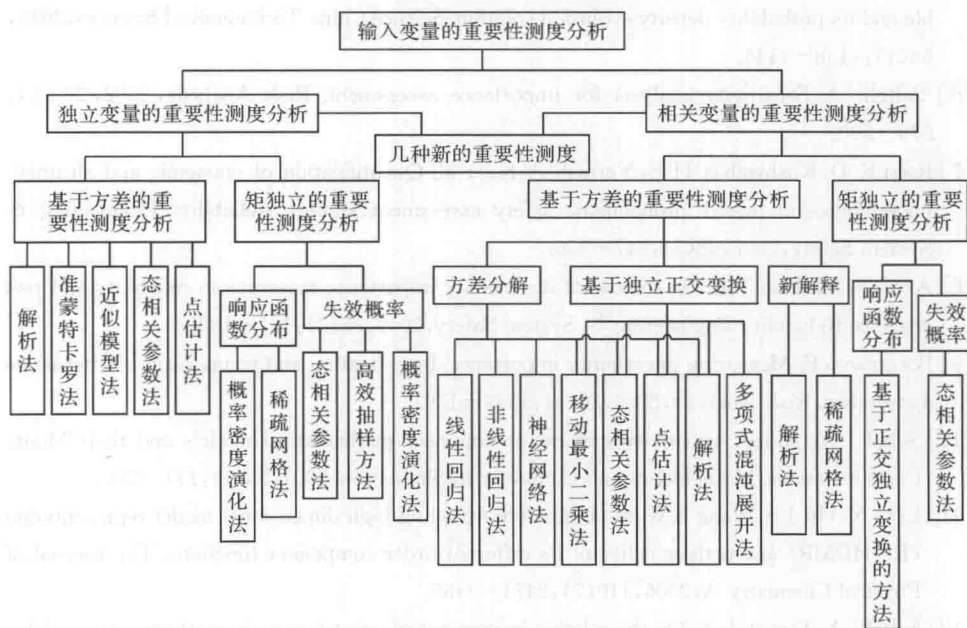


图 1.2 本书内容框图

1.4 本章结论

本章简要介绍了本书所作研究的背景和意义、重要性测度分析的发展,简单列出了本书将要介绍的重要性测度分析方法。以后章节将分别给出输入变量重要性测度分析方法的基本原理、实现过程及适用范围。

参考文献

- [1] 吕震宙,宋述芳,李洪双,等. 结构机构可靠性及可靠性灵敏度分析. 北京:科学出版社,2009.
- [2] 何水清,王善. 结构可靠性分析与设计. 北京:国防工业出版社,1993.
- [3] Borgonovo E. A new uncertainty importance measure. *Reliability Engineering & System Safety*,2007,92(6):771—784.
- [4] Liu Q, Homma T. A new computational method of a moment-independent uncertainty. *Reliability Engineering & System Safety*,2009,94(7):1205—1211.
- [5] Cui L J, Lu Z Z, Zhao X P. Moment-independent importance measure of basic random variable and its probability density evolution solution. *Science China Technological Sciences*,2010,53(4):1138—1145.
- [6] Saltelli A. Sensitivity analysis for importance assessment. *Risk Analysis*,2002,22(3):579—590.
- [7] Rao K D, Kushwahaa H S, Verma A K, et al. Quantification of epistemic and aleatory uncertainties in level-1 probabilistic safety assessment studies. *Reliability Engineering & System Safety*,2007,92(7):947—956.
- [8] Aven T, Nøklestad T E. On the use of uncertainty importance measures in reliability and risk analysis. *Reliability Engineering & System Safety*,2010,95(2):127—133.
- [9] Borgonovo E. Measuring uncertainty importance: Investigation and comparison of alternative approaches. *Risk Analysis*,2006,26(5):1349—1361.
- [10] Sobol I M. Global sensitivity indices for nonlinear mathematical models and their Monte Carlo estimates. *Mathematics and Computer in Simulation*,2001,55(1):271—280.
- [11] Li G Y, Hu J S, Wang S W, et al. Random sampling-high dimensional model representation (RS-HDMR) and orthogonality of its different order component functions. *The Journal of Physical Chemistry A*,2006,110(7):2474—2485.
- [12] Saltelli A, Tarantola S. On the relative importance of input factors in mathematical models: Safety assessment for nuclear waste disposal. *Journal of the American Statistical Association*,2002,97(459):702—709.
- [13] Xu C G, Gertner G Z. Uncertainty and sensitivity analysis for models with correlated param-

- eters, Reliability Engineering & System Safety, 2008, 93(6): 1563—1573.
- [14] Hao W R, Lu Z Z, Wei P F, et al. A new method on ANN for variance based importance measure analysis of correlated input variables. Structural Safety, 2012, 38: 56—63.
- [15] Tian L F, Lu Z Z, Wei P F. Global sensitivity analysis using moving least squares for models with correlated parameters. Journal of Aircraft, 2011, 48(6): 2107—2113.
- [16] Tian L F, Lu Z Z, Hao W R. Investigation of the uncertainty of the in-plane mechanical properties of composite laminates. Journal of Mechanical Engineering Science, 2012, 226(7): 1739—1750.
- [17] Li L Y, Lu Z Z, Zhou C C. Importance analysis for models with correlated input variables by the state dependent parameters method. Computers and Mathematics with Applications, 2011, 62(12): 4547—4556.
- [18] Zhou C C, Lu Z Z, Li L Y, et al. A new algorithm for variance based importance analysis of models with correlated inputs. Applied Mathematical Modelling, 2013, 37(3): 864—875.
- [19] Hao W R, Lu Z Z, Tian L F. Importance measure of correlated normal variables and its sensitivity analysis. Reliability Engineering & System Safety, 2012, 96(2): 151—160.
- [20] Tian L F, Lu Z Z, Hao W R. Moving least squares based sensitivity analysis for models with dependent variables. Applied Mathematical Modelling, 2013, 37(8): 6097—6109.
- [21] Hao W R, Lu Z Z, Wei P F. Uncertainty importance measure for models with correlated normal variables. Reliability Engineering & System Safety, 2013, 112: 48—58.
- [22] Li L Y, Lu Z Z, Hao W R. Importance analysis for models with correlated input variables using state dependent parameters approach. Mechanical Systems and Signal Processing, 2013, 41(1-2): 86—97.
- [23] Hao W R, Lu Z Z, Li L Y. A new interpretation and validation of variance based importance measure analysis for model with correlated inputs. Computer Physics Communications, 2013, 184(5): 1401—1413.
- [24] Li L Y, Lu Z Z. Importance analysis for models with correlated variables and its sparse grid solution. Reliability Engineering & System Safety, 2013, 119: 207—217.
- [25] Cukier R I, Fortuin C M, Schuler K E, Petschek A G, Schaibly J K. Study of the sensitivity of coupled reaction systems to uncertainties in rate coefficients 1: Theory. Journal of Chemical Physics, 1973, 59: 3873—3878.
- [26] Iman R L, Hora S C. A robust measure of uncertainty importance for use in fault tree system analysis. Risk Analysis, 1990, 10(3): 401—406.
- [27] Sobol I M. Sensitivity estimates for nonlinear mathematical models. Mathematical Modeling and Computational Experiment, 1993, 1(4): 407—414.
- [28] Homma T, Saltelli A. Importance measures in global sensitivity analysis on nonlinear models. Reliability Engineering & System Safety, 1996, 52(1): 1—17.
- [29] Helton J C, Davis F J. Latin hypercube sampling and the propagation of uncertainty in analysis of complex systems. Reliability Engineering & System Safety, 2003, 81(1):