



高新科技译丛

Reliability-based Structural Design

结构可靠性设计

【韩】 Seung-Kyum Choi 【美】 Ramana V. Grandhi 【美】 Robert A. Canfield 著
芮 强 王红岩 译



国防工业出版社
National Defense Industry Press



装备科技译著出版基金

结构可靠性设计

Reliability – based Structural Design

[韩] Seung – Kyum Choi

[美] Ramana V. Grandhi 著

[美] Robert A. Canfield

芮强 王红岩 译

国防工业出版社

· 北京 ·

著作权合同登记 图字:军-2014-005 号

图书在版编目(CIP)数据

结构可靠性设计 / (韩)崔胜谦, (美)拉马纳
(Grandhi, R. V.), (美)罗伯特(Canfield, R. A.) 著;
芮强, 王红岩译. —北京:国防工业出版社, 2014. 6
书名原文: Reliability - based structural design
ISBN 978 - 7 - 118 - 09461 - 9

I. ①结... II. ①崔... ②拉... ③罗... ④芮... ⑤王
... III. ①结构可靠性 - 设计 IV. ①TB114. 3

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 135522 号

Translation from English language edition:

Reliability - based Structural Design

by Seung - Kyum Choi, Ramana Grandhi and Robert A. Canfield

Copyright © 2007 Springer London

Springer London is a part of Springer Science + Business Media

All Rights Reserved.



※

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 15 1/2 字数 299 千字

2014 年 6 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—2000 册 定价 79.00 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

译者序

现在奉献给读者的《结构可靠性设计》一书是根据《Reliability – based Structural Design》(2010 年版)翻译的。原书作者是美国佐治亚理工大学乔治·W. 伍德拉夫机械工程学院副教授崔胜谦等人,这是他们增删多次后最新的一部力作。

这是一本关于结构系统可靠性分析及优化设计方法的专业书籍。本书系统、深入地论述了结构可靠性设计与优化方法,并提出了针对复杂系统可靠性设计问题的高效计算方法。全书特别注重理论与实际的紧密结合,书中介绍了多样化的工程计算实例,并给出了详细的计算过程,便于读者更加深刻地理解理论方法。因此,本书非常适合本科生和研究生学习结构可靠性分析与设计、可靠性优化等理论知识。同样,本书对于工程师、研究人员以及技术管理人员学习可靠性分析与优化理论基础、计算实现以及应用概率分析和设计解决工程实际问题,也具有重要的参考价值。

译者在从事车辆系统结构强度及疲劳寿命可靠性分析、结构优化设计等方面的研究工作中发现,一种准确高效的可靠性分析方法对于解决复杂系统的可靠性问题具有非常重要的意义。本书提出了基于随机扩展技术的可靠性分析及优化设计方法,并通过计算实例验证了这些方法的准确程度及计算效率,从而能够有效解决复杂系统的可靠性计算问题。希望本书的出版能够给予从事相关研究的人员以启迪。

本书的完成首先要感谢装备科技译著出版基金的资助,如果没有基金的资助,作者无法开展著作的翻译工作。本书翻译过程中,得到了北京理工大学苑士华教授和清华大学李克强教授的鼓励与指导,译者深表感谢。

装甲兵工程学院机械工程系洪煌杰、李建阳、王钦龙、韩立军、栗浩展、李同飞等研究生参与了本书的翻译工作。装甲兵工程学院王红岩教授、高连华教授认真审阅了全文译稿,提出了不少改进意见。装甲兵工程学院王良曦教授对本书译稿提出了许多宝贵的修改意见和建议,他们对本书倾注的热情和支持

令人感动。同时,译者对装甲兵工程学院郝娜老师以及国防工业出版社冯晨编辑在装备科技译著出版基金申请及本书出版过程中给予的支持与帮助表示由衷的感谢。

译者对原著印刷方面的错误,一经发现便予以纠正而不加说明。译文不妥之处在所难免,诚请读者指正。

译 者

2014 年 3 月

前 言

随着现代结构对关键和复杂设计需求的增加,越来越需要一种能够对广泛存在于结构系统载荷、几何、材料性能、加工过程以及使用环境中的不确定性进行精确评估的计算方法。结构可靠性评估技术不仅可以为稳健设计提供初始设计指南,而且还可以用来辨识不确定性对结构系统的哪些性能有重要影响,或者可以为增加结构系统安全性和系统效能提出有效的研究、测试及质量控制方法。本书系统直观地为工程设计人员提供了关于概率理论、统计方法、可靠性分析方法等方面的知识,主要包括:蒙特卡罗采样技术,拉丁超立方采样技术,一阶、二阶可靠性法,随机有限元法以及随机优化法等。此外,书中还论述了如何采用多项式混沌扩展(PCE)及 Karhunen - Loeve(K - L)扩展等随机扩展方法进行工程实际问题的可靠性分析及优化设计。本书以桁架结构、梁结构以及板壳结构等大量简单工程算例详细演示了理论公式的可行性,书中还介绍了无人组合翼飞机以及超空泡鱼雷等复杂工程实际应用案例,从而演示了这些方法在大规模物理系统可靠性分析中的有效性。

作者非常感谢那些匿名评审人员,他们对本书初稿的评审意见对该专著质量的提高起到了非常重要的作用。在后续版本的修改过程中,许多同事对各个章节的内容进行了仔细的阅读与评论,他们包括:应用研究委员会 Mark Cesaer 博士,布朗大学 George Karniadakis 教授,托莱多大学 Efstratios Nikolaidis 教授,美国海军学院 Chris Pettit 教授,埃克森美孚公司 Jon Wallace 博士,以及莱特州立大学的 Richard Bethke 和 Ravi Penmetsa 教授。此外,美国空军已退役的 V. B. Venkayya 博士在发展高性能计算、大规模有限元分析以及多物理场等问题的不确定性量化技术等方面提出了非常有用并具有挑战性的观点,对此表示非常感激。

许多在读和已毕业的研究生以及科学研究人员为发展新的可靠性分析方法及其工程验证提供了很大的帮助。他们包括:通用电气公司 Wang Liping 博士,CFD-CR 公司 Ed Alyanak 博士,卡特彼勒公司 Ha - rok Bae 博士,美国空军研究实验室 Brian Beachkofski、Jeff Brown 以及 Mark Haney 博士。另外,莱特州立大学计算设计优化中心(CDOC) Hemanth Amarchint、Todd Benanzer、Arif Malik、Justin Maurer、

Sang - ki Park、Jalaja Repalle、Gulshan Singh 以及 Randy Tobe 等学生为本书的出版做出了一定的贡献。同时还要感谢来自美国空军理工学院的研究生,包括:Ronald Roberts 上尉、Ben Smallwood 上尉以及实习生 Jeremiah Allen。本书的详细编辑工作主要由 Brandy Foster、Chris Massey、Alysoun Taylor 等人完成。

过去十五年里,书中涵盖的研究工作部分受到了 NASA 格伦研究中心、俄亥俄州克利夫兰空军科学研究办公室、美国海军研究办公室、美国国家标准协会、赖特帕特森空军基地、代顿区研究生研究所(DAGSI)等机构的资助。

Seung - Kyum Choi

Ramana V. Grandhi

Robert A. Canfield

崔胜谦

拉马纳·格兰迪

罗伯特·坎菲尔德

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 引言	1
1.2 不确定性及其分析方法	2
1.3 可靠性分析及其重要性	4
1.4 章节安排	5
1.5 参考文献	6
第 2 章 预备知识	7
2.1 基本概率描述	7
2.1.1 概率分布的数字特征	7
2.1.2 常用的概率分布	15
2.2 随机场	27
2.2.1 随机场及其离散化	28
2.2.2 协方差函数	31
2.3 拟合回归模型	33
2.3.1 线性回归过程	34
2.3.2 多项式拟合线性回归模型	35
2.3.3 方差分析和其他统计检验方法	36
2.4 参考文献	39
第 3 章 概率分析相关知识	40
3.1 结构可靠性分析方法	40
3.1.1 结构可靠性评估	40
3.1.2 概率分析的发展历史	43
3.2 采样方法	47

3.2.1	蒙特卡罗仿真法(MCS)	48
3.2.2	重要性采样	53
3.2.3	拉丁超立方采样(LHS)	55
3.3	随机有限元方法(SFEM)	57
3.3.1	理论背景	58
3.3.2	摄动法	58
3.3.3	纽曼扩展法	59
3.3.4	加权积分法	60
3.3.5	谱随机有限元方法	62
3.4	参考文献	62
第4章	结构可靠性分析方法	65
4.1	一阶可靠性法(FORM)	65
4.1.1	一阶二次矩法(FOSM)	65
4.1.2	Hasofer-Lind(HL)可靠度指数法	68
4.1.3	Hasofer-Lind(HL)迭代法	70
4.1.4	灵敏度因子	77
4.1.5	HL-RF方法	79
4.1.6	自适应近似一阶可靠性法	88
4.2	二阶可靠度方法(SORM)	100
4.2.1	极限状态函数的一阶及二阶近似	100
4.2.2	Breitung公式	104
4.2.3	Tvedt方法	107
4.2.4	自适应近似二阶可靠度法	109
4.3	工程应用案例	111
4.3.1	十杆桁架结构	111
4.3.2	疲劳裂纹扩展	114
4.3.3	转盘破裂转速储备系数	116
4.3.4	两杆框架结构	117
4.4	参考文献	120
第5章	结构可靠性优化设计	122
5.1	多学科优化	122

5.2	优化数学问题及算法	123
5.3	数学优化过程	125
5.3.1	可行方向法	125
5.3.2	罚函数法	127
5.4	灵敏度分析方法	142
5.4.1	均值灵敏度	144
5.4.2	标准差灵敏度	145
5.4.3	失效概率灵敏度分析	146
5.5	结构优化设计的实践层面	156
5.5.1	设计变量关联	156
5.5.2	约束数量缩减	157
5.5.3	近似概念	157
5.5.4	移动限	157
5.6	局部收敛问题	158
5.7	可靠性优化设计	159
5.8	参考文献	160
第6章	概率分析的随机扩展法	162
6.1	多项式混沌扩展(PCE)	162
6.1.1	多项式混沌扩展法(PCE)的理论基础	162
6.1.2	随机近似	166
6.1.3	非高斯随机变量产生	168
6.1.4	厄米特(Hermite)多项式及 Gram-Charlier 级数	169
6.2	Karhunen-Loeve(KL)变换	174
6.2.1	KL 变换的发展历史	174
6.2.2	随机场 KL 变换	175
6.2.3	基于 KL 扩展的特征值求解问题	180
6.3	谱随机有限元法(SSFEM)	183
6.3.1	KL 扩展法在谱随机有限元法(SSFEM)中的作用	183
6.3.2	多项式混沌扩展法(PCE)在谱随机有限元法(SSFEM)中的作用	184
6.4	参考文献	185

第 7 章 基于随机扩展法的可靠性分析实例..... 188

7.1 高斯及非高斯分布..... 188

7.1.1 随机分析程序..... 188

7.1.2 高斯分布算例..... 189

7.1.3 非高斯分布算例..... 196

7.2 随机场问题..... 199

7.2.1 随机场仿真程序..... 199

7.2.2 悬臂板算例..... 200

7.2.3 超空泡水雷算例..... 202

7.3 随机优化..... 206

7.3.1 随机优化问题综述..... 206

7.3.2 随机优化算法实现..... 207

7.3.3 三杆桁架结构..... 209

7.3.4 联结翼飞机结构..... 211

7.4 参考文献..... 213

第 8 章 总结..... 215

附录 A 函数逼近工具..... 217

附录 B 近似多重正态积分..... 230

附录 C 累积标准正态分布表..... 232

附录 D F 分布表..... 234

第1章 绪 论

1.1 引 言

随着现代结构对关键和复杂设计需求的增加,越来越需要一种能够对广泛存在于计算模型、载荷、几何、材料性能、加工过程以及使用环境中的不确定性进行精确评估的计算方法。在进行系统分析和设计时,当所求问题的随机特性相对较小时,往往采用确定性分析方法而不是随机分析方法;而当所求问题的不确定程度较高时,就必须采用随机分析方法。

尽管已经发展了许多用于量化系统不确定性的概率分析方法,但是绝大部分复杂系统的设计仍然采用如图 1.1 所示的安全因子设计等简化的规则和策略。然而,这些传统的设计过程无法直接考虑大部分输入参数的随机特性。安全因子主要用来保证结构设计在一定程度上的安全性。安全因子通常理解为系统的期望强度响应与期望载荷的比。在实际中,无论是结构强度还是结构所承受的载荷均为随机变量,它们的值分布在各自的均值周围。当考虑随机变量的分布特性时,安全因子可能小于单位值,从而使得传统的安全因子设计失效。更有可能的是,由于所采用的安全因子过于保守,导致出现过度设计。

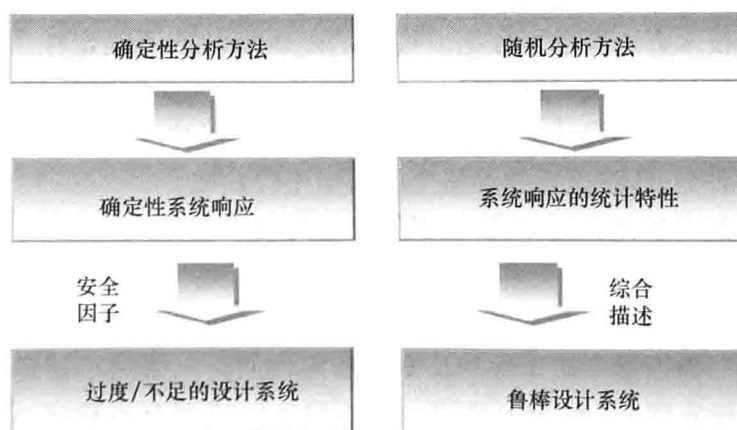


图 1.1 不确定性分析设计过程

根据 Elishakoff^[1]的观点:所采用的安全因子必须始终能够保证结构在工作过程中是可靠的或接近可靠的。也许有人会说:“如果安全因子能够满足这个条件,

则所提出的设计方案就能够被采用”。尽管美国的谚语也说道:“如果结构没有破坏,就没必要对它进行修理”,但问题是:这种设计方法能否得到改进呢?我们是否能够做得更好呢?

在当今充满竞争的世界中,工程界的口号应该是:“如果方案可行,那么尽量把它做得更好”。与基于安全因子设计的确定性方法相比,随机分析方法主要用于提高结构设计的可靠性。对于工程设计人员来说,随机分析方法具有以下几个方面的优势。随机分析中的各种统计结果,如均值、方差以及置信区间等,可以帮助工程设计人员更加全面、完整地理解整个结构系统,并在设计过程中考虑更多的因素及不确定性。随机分析方法可用于进行系统的灵敏度分析,有助于工程设计人员找到影响不确定性模型的主要因素。此外,随机分析方法还有助于发展安全设计初始指南,以及用于辨识从哪些方面进行检查和研究能够进一步提高结构的安全性和效能。

1.2 不确定性及其分析方法

17 世纪,两名法国数学家布莱兹·帕斯卡(Blaise Pascal)和皮埃尔·德·费马(Pierre de Fermat),将博弈游戏作为数学问题进行研究^[3],并首先提出了概率论的基本原理。概率论主要用于研究给定事件发生的可能性以及量化随机事件的不确定程度,概率论的出现及其在设计过程中的应用已经在工程设计领域发挥了重要的作用。尽管已经提出了可靠性的概念,但仍然很难显式定义大型复杂结构系统的不确定性并精确计算其可靠度。随着高性能计算机的出现,使得采用数值方法求解包含系统特性不确定性的大规模、复杂实际问题成为可能,并进而引起了研究人员结合采用传统分析方法与不确定性量化措施来求解复杂系统问题的强烈兴趣。这种新的技术方法考虑了数据或模型的随机特性或不确定性,我们称之为不确定分析或随机分析方法,这些方法有助于工程设计人员实现满足某种不确定程度结构设计要求的鲁棒设计。现代随机分析方法正在被逐步引入到物理学、气象学、医学、人类研究、计算机科学等整个科学与工程领域。

不确定性具有多种表述方式,如事件发生的概率、置信水平、知识匮乏、不精确度以及变异性等,这些不同表述方式可能导致对特定系统的不同解释,因而,如何精确表述特定系统的不确定性至关重要。根据不确定表述方式的优点和局限性,可将不确定性分为偶然不确定性和认知不确定性两类。偶然不确定性(随机不确定性或客观不确定性)又称为无法缩减的不确定性或固有不确定性,认知不确定性(主观不确定性)又称为可以缩减的不确定性,主要是由于缺乏知识和数据造成的。在最基础的概率论书中经常提到的生日问题非常形象地说明了主观与客观不确定性之间的差异。所提出问题的表述为:“某人生日在 7 月 4 日的概率是多少?”对于一个客观主体而言,他给出的答案会是 $1/365$,而对于另一个主体来说,

由于所选择的某人是他的好友,并且知道好友的生日在7月份或者8月份,所以他给出的答案会是1/62。与第一个人相比,第二个人的答案具有更高的概率,因而,答案的精确度依赖于主体的认知程度。由于主观不确定性可以看作是随着过去的经验或者专家的判断收集到信息的增多,其不确定程度逐渐缩减的一种不确定性,因而需要更多的关注和谨慎的判断。

如图1.2所示,通常采用概率密度或频率、区间信息等两种类型的不确定性特征来表示偶然不确定性和认知不确定性。概率密度函数(PDF)表示随机变量某种实现的相对频率,概率密度函数的中心表示为最大概率点,概率密度函数的尾部区域表示为小概率事件。如果无法获得概率密度函数的相关信息,可以采用随机变量上、下边界之间的区间来表示这种类型的不确定性。此时,区间信息能够更好地反映非完整数据和信息的特性。

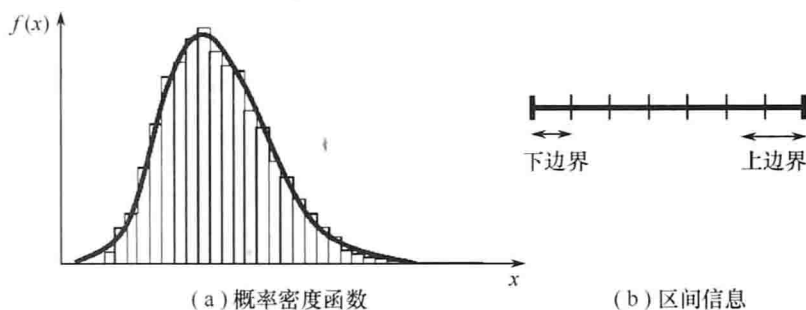


图 1.2 不确定性表示方法

概率方法的理论基础是概率密度函数信息,主要采用随机变量、随机过程和随机场来描述系统的不确定性。非概率方法主要用于处理关于参数真值的非精确知识。根据不确定性的表述方式区分的各种不确定性方法如图1.3所示。在后续章节中将会对每一类方法进行详细的描述,更多关于这方面的知识请参阅文献[2]、[4]和[5]。

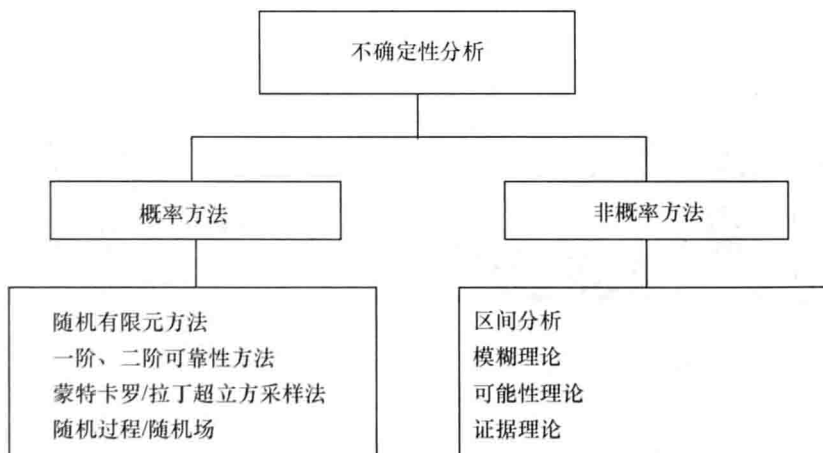
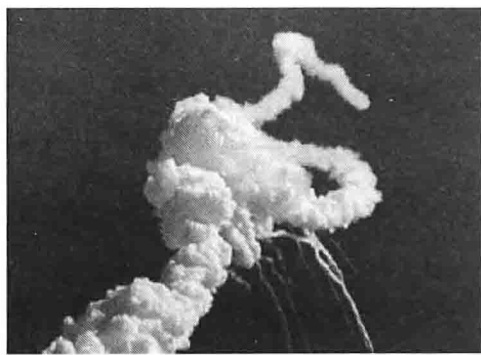
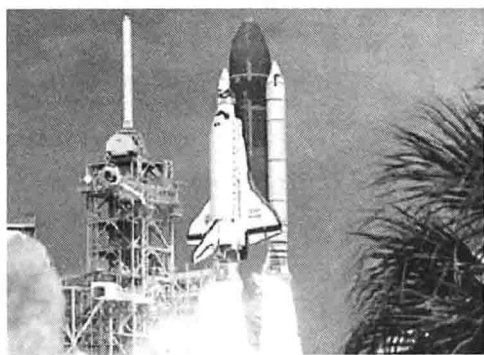


图 1.3 不确定性分析方法分类

1.3 可靠性分析及其重要性

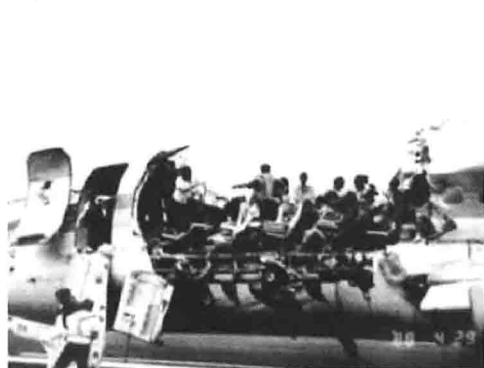
可靠性是指在特定的时间周期及使用条件下,系统能够实现其功能的概率。19 世纪,航运公司和人寿保险公司通过计算收益率向顾客收取费用时首先提出了可靠性理论,其主要目的是用于预测特定群体或个体的死亡率。飞机、汽车、船舶、桥梁等结构系统的失效问题,在许多方面类似于有机生物的生与死。尽管关于结构失效的定义和分类方法多种多样,结构失效事实上都将会导致生命和财产的极大损失^[1]。

1986 年和 2003 年两次航天飞机的灾难事故主要是由于技术缺陷和对待风险管理态度的不统一所引起的。而 1988 年阿罗哈航空公司 243 航班致命损坏主要是由于结构老化引起的,结构老化问题是所有结构系统都无法避免的。这些灾难性事故如图 1.4 所示。



(a) 航天飞机灾难事故

(1986年和2003年,由于不可预知的系统条件变化引起的两起航天飞机灾难事故,美国的挑战者号(Challenger)和哥伦比亚号(Columbia))



(b) 飞机的老龄化风险

(1988年,夏威夷,阿罗哈航空公司243航班,飞机机龄19年,由于未检测到的疲劳问题引起的致命损伤)

图 1.4 结构失效案例

尽管这些设计方案均满足结构设计要求,但存在的不足是没有直接考虑每个系统的不确定因素。工程结构的系统响应取决于载荷、边界条件、刚度及质量特性等多个不确定因素。只有在可接受的可靠性程度范围内满足结构性能的设计需求时,才认为结构危险部位的应力、共振频率等系统响应是满足要求的。因而,可以将每一项设计需求作为一个极限状态或约束条件来考虑。

结构可靠性分析主要用于研究在结构全寿命周期范围内,计算和预测极限状态函数违反约束条件的概率。事件的发生概率,如极限状态函数违反约束条件的概率,是事件发生概率的数值测度。一旦确定了事件发生的概率,下一个目标是选择能够提高结构可靠性,减小失效概率的最佳设计方案。

出于对工程系统性能的严格要求,安全及可靠性余量的进一步缩小,以及严酷的市场竞争等因素,可靠性分析方法迅速在多学科设计领域得到应用。在包含不确定性的结构设计中,采用确定性方法可能要比考虑不确定性的概率方法导致出现更大的失效概率。这主要是由于在确定性方法中要求精确满足设计需求,但是参数的任意扰动均可能引起系统响应违反约束。

在进行非传统结构的设计时,往往缺乏相关数据和足够的先验知识,而对不确定性的正确认知对于安全、高效的决策至关重要。概率方法在描述和模拟无法用现有科学知识水平处理的复杂物理现象时非常方便。概率设计之所以能够提高工程系统的产品质量主要出于以下几个方面的原因:①概率设计方法能够将现有统计数据显式地融合到设计算法中,而传统确定性设计方法则不考虑这些数据;②在没有考虑其他因素的前提下,工程设计人员往往会选择具有最低失效概率的设计方案;③机械性能的概率信息还可以用来合理定价、制定产品保证书、确定部件寿命以及备件需求等。在后续章节中将对几种概率设计方法的关键方面进行论述。

1.4 章节安排

不确定性分析的框架结构以及全文的章节布局如图 1.5 所示,可从图中看出各章节之间的相互联系。本书的前 3 章奠定了理论基础,后续 4~7 章主要是理论的发展与完善。第 1 章总结了本书的研究目标,概述了本书的内容,并且讨论了不确定性分析的重要性。第 2 章描述了概率统计描述的基础,如一阶、二阶统计,随机场,回归过程等。第 3 章和第 4 章回顾了概率分析、采样方法、可靠性分析以及随机有限元方法等内容。本书的最重要部分是第 4~7 章,其中包括了最先进的随机扩展方法及计算实例。第 6 章论述了随机扩展方法的理论基础及实用性以及它的发展趋势。第 7 章通过几个数值算例及大规模结构系统问题演示了所提出方法的计算能力。

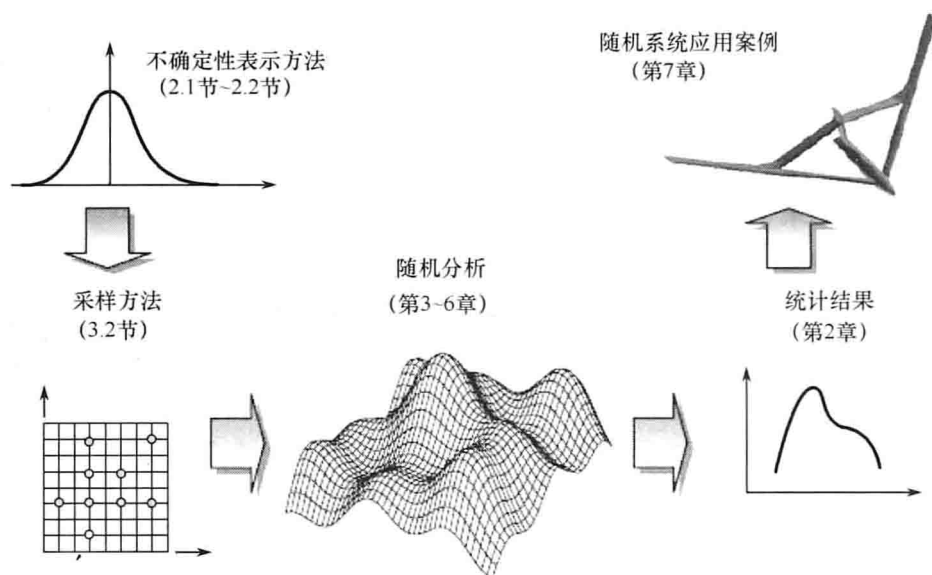


图 1.5 内容布局

1.5 参考文献

- [1] Elishakoff I. , *Safety Factors and Reliability: Friends or Foes?*, Kluwer Academic Publishers, Boston, 2004.
- [2] Ghanem, R. , and Spanos, P. D. , *Stochastic Finite Elements: A Spectral Approach*, Springer - Verlag, NY, 1991.
- [3] Renyi, A. , *Letters on Probability*, Wayne State University Press, Detroit, 1973.
- [4] Schuëller G. I. (Ed.) , "A State - of - the - Art Report on Computational Stochastic Mechanics," *Journal of Probabilistic Engineering Mechanics*, Vol. 12, (4) , 1997, pp. 197 - 313.
- [5] Tatang, M. A. , *Direct Incorporation of Uncertainty in Chemical and Environmental Engineering Systems*, Ph. D. Dissertation, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, MA, 1995.