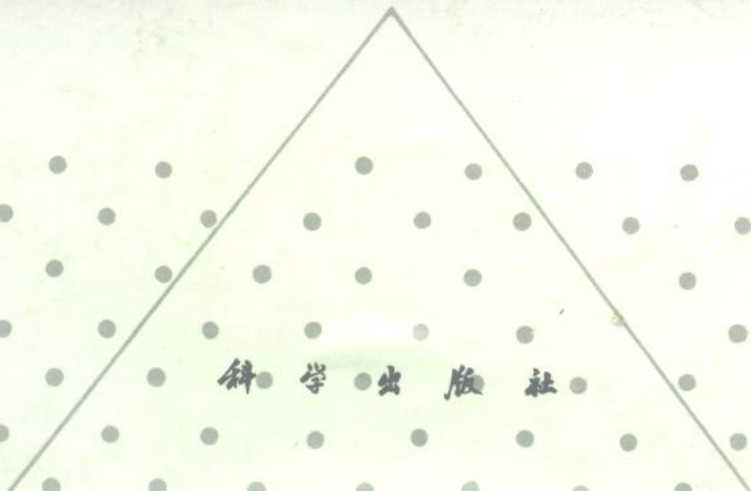


随机结构系统

—分析与建模

李杰 著



科学出版社

随机结构系统 ——分析与建模

李 杰 著

科 学 出 版 社

1996

内 容 简 介

随机结构分析是工程结构分析理论的基本发展方向之一。本书系统地论述了随机结构分析与建模的主要方法与最新研究成果。内容包括随机结构分析的随机模拟方法、摄动分析方法、正交展开理论, 随机结构的均值参数识别与参数二阶矩估计, 非线性随机结构分析, 以及随机结构可靠度分析等。

本书可供从事土木、海洋、航空工程结构分析与设计的科学技术人员以及有关专业的大学生、研究生、教师阅读。

ZN76/07

随机结构系统 ——分析与建模

李 杰 著

责任编辑 林 鹏

科学出版社出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码: 100717

中国科学院印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

*

1996年10月第 一 版 开本: 850×1168 1/32

1996年10月第一次印刷 印张: 9 7/8

印数: 1—1300 字数: 241 000

ISBN7-03-005412-1/O · 863

定价: 20.00 元

哪儿有什么深刻

我是一颗渴望着泥土的坚果

冬阳，也会在秋的那端等我

我等待着春洪

和布谷鸟一路播撒的欢歌

——题 记

目 录

第一章 绪 论	1
1.1 随机结构系统	1
1.2 随机结构研究简史	4
1.3 本书基本内容	9
第二章 数学基础	10
2.1 随机变量	10
2.1.1 基本概念	10
2.1.2 关于随机变量的运算	12
2.1.3 随机向量	17
2.1.4 相关结构分解	23
2.2 随机过程	24
2.2.1 随机过程的概率结构	24
2.2.2 随机过程的数字特征	27
2.2.3 Karhunen-Loeve 分解	35
2.3 随机场	38
2.3.1 基本概念	38
2.3.2 随机场的相关结构	40
2.3.3 随机场的离散化	41
2.3.4 随机场向独立随机变量集合的转换	44
2.4 泛函分析	46
2.4.1 度量空间与线性赋范空间	46
2.4.2 希尔伯特空间与正交分解	48
2.4.3 线性算子及其谱	51
2.5 正交多项式	57
2.5.1 基本概念	57

2.5.2	常用正交多项式	60
2.5.3	随机函数空间中的正交分解	64
第三章	随机结构分析(Ⅰ)——随机模拟方法	67
3.1	蒙特卡罗方法	67
3.1.1	基本思想	67
3.1.2	均匀随机变量的抽样	68
3.1.3	一般随机变量的抽样	70
3.1.4	蒙特卡罗方法的精度	72
3.2	工程结构有限单元分析基础	74
3.2.1	有限单元分析的基本思想	74
3.2.2	单元分析	76
3.2.3	坐标变换与单元定位	79
3.2.4	整体结构分析	82
3.2.5	动力问题	84
3.3	随机模拟方法	87
3.3.1	随机模拟直接算法	87
3.3.2	Neumann 展开算法	90
第四章	随机结构分析(Ⅱ)——摄动理论	93
4.1	摄动理论基础	93
4.1.1	确定性参数摄动	93
4.1.2	随机参数摄动	95
4.2	随机矩阵的表示	98
4.2.1	随机矩阵	98
4.2.2	随机矩阵的线性表示	99
4.2.3	随机矩阵的级数表示与截断	103
4.2.4	多随机因素复合情况	104
4.3	静力分析	107
4.3.1	基本摄动方程	107
4.3.2	相关结构分解算法	110
4.3.3	广义 Neumann 算法	113

4.4	动力特征值	114
4.4.1	确定性结构动力特征值	114
4.4.2	随机结构动力特征值分析	115
4.4.3	随机结构特征值的统计特性	119
4.5	动力反应分析	121
4.5.1	基本摄动方程	121
4.5.2	摄动方程求解	122
4.5.3	久期项问题	124
第五章	随机结构分析(Ⅲ)——正交展开理论	128
5.1	正交分解与次序正交分解	128
5.1.1	正交分解	128
5.1.2	次序正交分解	130
5.2	扩阶系统方法	131
5.2.1	基本思想	131
5.2.2	扩阶系统的证明	135
5.2.3	动力分析	140
5.2.4	阻尼矩阵变异性的处理	145
5.2.5	均值反应与均值参数系统反应	148
5.3	扩阶系统的聚缩	149
5.3.1	静力聚缩	149
5.3.2	递归聚缩算法	150
5.4	复合随机振动分析	154
5.4.1	时域随机性与场域随机性	154
5.4.2	复合概率测度空间中的次序正交分解	154
5.4.3	基于扩阶系统方法的分析	156
5.4.4	反应量的统计特征	164
5.5	基于混沌多项式的随机结构分析	167
5.5.1	混沌多项式	167
5.5.2	静力分析	174
第六章	随机结构建模	177

6.1	系统识别与随机结构建模	177
6.1.1	系统识别的基本概念	177
6.1.2	参数估计的基本原理	179
6.1.3	随机结构建模	185
6.2	确定性结构的系统识别算法	188
6.2.1	动力系统状态方程与参数表示的经典形式	188
6.2.2	最小二乘类系统识别算法	195
6.2.3	推广卡尔曼滤波算法	202
6.2.4	预报误差识别算法	208
6.3	随机结构系统均值参数识别	212
6.3.1	基于有限元列式的动力系统参数表示	212
6.3.2	动力系统的微分算子变换	217
6.3.3	应用卡尔曼滤波算法的系统均值参数识别	221
6.4	随机结构系统参数二阶矩估计	223
6.4.1	随机结构分析的两步法	223
6.4.2	随机建模准则	225
6.4.3	随机结构方差参数的估计	228
第七章	非线性随机结构分析	233
7.1	基本概念	233
7.1.1	非线性随机结构	233
7.1.2	恢复力模型	234
7.1.3	非线性随机结构分析	237
7.2	等效随机系统方法	239
7.2.1	等效线性化方法	239
7.2.2	等效随机系统	241
第八章	随机结构可靠度分析	248
8.1	可靠度分析基础	248
8.1.1	结构可靠度分析	248
8.1.2	计算结构可靠度的一般原理	251
8.1.3	一次二阶矩方法	255

8.2	随机结构静力可靠度分析	264
8.2.1	嵌入式算法	264
8.2.2	分离式算法	268
8.3	随机结构动力可靠度分析	271
8.3.1	动力可靠度分析基础	271
8.3.2	基于跨越分析的方法	275
8.3.3	拟静力分析方法	280
参考文献		286

Contents

Chapter 1. Introduction

- 1.1 Stochastic structural system
- 1.2 Review of the theory
- 1.3 Plan of book

Chapter 2. Some Mathematical Background

- 2.1 Random variables
 - 2.1.1 Basic concepts
 - 2.1.2 Operation of random variables
 - 2.1.3 Random vectors
 - 2.1.4 Spectral decomposition of correlation matrix
- 2.2 Stochastic process
 - 2.2.1 Probabilistic expression of stochastic process
 - 2.2.2 Digital characteristic values of stochastic process
 - 2.2.3 Kahunen-Loeve decomposition
- 2.3 Random fields
 - 2.3.1 Basic concepts
 - 2.3.2 Correlation structures of random fields
 - 2.3.3 Discretization of random field
 - 2.3.4 Transition from random field to independent variables set
- 2.4 Functional analysis
 - 2.4.1 Metric spaces and linear normal spaces
 - 2.4.2 Hilbert spaces and orthogonal decomposition

- 2. 4. 3 Linear operator and its spectrum
- 2. 5 Orthogonal polynomials
 - 2. 5. 1 Basic concepts
 - 2. 5. 2 Common orthogonal polynomials
 - 2. 5. 3 Orthogonal decomposition of
random functional space
- Chapter 3. Stochastic structural analysis (I) :**
Random simulation method
 - 3. 1 Monte-Carlo method
 - 3. 1. 1 Basic idea
 - 3. 1. 2 Sample of random variables with
uniform distribution
 - 3. 1. 3 Sample of common random variables
 - 3. 1. 4 Precision of Monte-Carlo method
 - 3. 2 FEM in deterministic structural analysis
 - 3. 2. 1 The idea of finite element analysis
 - 3. 2. 2 Element analysis
 - 3. 2. 3 Coordinate transition and element
position fixing
 - 3. 2. 4 Structural analysis
 - 3. 2. 5 Dynamic analysis
 - 3. 3 Random simulation method
 - 3. 3. 1 Direct algorithm of random simulation
 - 3. 3. 2 Neumann expansion algorithm
- Chapter 4. Stochastic structural analysis (I) :**
Perturbation approach
 - 4. 1 Perturbation theory background
 - 4. 1. 1 Perturbation about deterministic parameters

- 4. 1. 2 Perturbation for random parameters
 - 4. 2 Expression of random matrix
 - 4. 2. 1 Random matrix
 - 4. 2. 2 Linear expression of random matrix
 - 4. 2. 3 Series expansion and truncation of random matrix
 - 4. 2. 4 Random matrix with multiple random parameters
 - 4. 3 Static analysis
 - 4. 3. 1 Basic perturbation equations
 - 4. 3. 2 Correlation matrix decomposition algorithm
 - 4. 3. 3 General Neumann algorithm
 - 4. 4 Dynamic eigenvalues
 - 4. 4. 1 Dynamic eigenvalues of deterministic structures
 - 4. 4. 2 Dynamic eigenvalues of stochastic structures
 - 4. 4. 3 Statistics of eigenvalues
 - 4. 5 Dynamic response analysis
 - 4. 5. 1 Basic perturbation equations
 - 4. 5. 2 Solution of perturbation equations
 - 4. 5. 3 Secular terms problem
- Chapter 5. Stochastic structural analysis (Ⅲ):**
- Orthogonal expansion approach**
- 5. 1 Orthogonal decomposition and sequence orthogonal decomposition
 - 5. 1. 1 Orthogonal decomposition
 - 5. 1. 2 Sequence decomposition
 - 5. 2 Expanded order system method

- 5. 2. 1 Basic idea
- 5. 2. 2 Certificate of expanded order system
- 5. 2. 3 Dynamic analysis
- 5. 2. 4 Treatment of damping matrix
- 5. 2. 5 Mean response and the response of mean parameters system
- 5. 3 Condensation of expanded order system
 - 5. 3. 1 Static condensation
 - 5. 3. 2 Recursive condensation algorithm
- 5. 4 Combined random vibration analysis
 - 5. 4. 1 Randomness in time domain and field domain
 - 5. 4. 2 Sequence orthogonal decomposition in combined probabilistic measure space
 - 5. 4. 3 Analysis based on expanded order system
 - 5. 4. 4 Statistics of responses
- 5. 5 Stochastic structural analysis based on polynomial chaos
 - 5. 5. 1 Polynomial chaos
 - 5. 5. 2 Static analysis

Chapter 6. Stochastic structural modelling

- 6. 1 System identification and stochastic structural modelling
 - 6. 1. 1 Elementary knowledge of system identification
 - 6. 1. 2 Principle of parameter estimation
 - 6. 1. 3 Stochastic structural modelling
- 6. 2 System identification algorithm for deterministic structures

- 6. 2. 1 State equations of dynamic system and traditional form of parameter representation
- 6. 2. 2 Identification algorithm belongs to leastsquares based method
- 6. 2. 3 Generalized Kalman filter algorithm
- 6. 2. 4 Identification algorithm of prediction error based principle
- 6. 3 Mean parameter identification of stochastic structural system
 - 6. 3. 1 Parameter expressions of dynamic system based on FEM
 - 6. 3. 2 Defferential operator transform of dynamic system
 - 6. 3. 3 Mean parameter identification of Kalman filter based
- 6. 4 Second order moment estimation of stochastic structural system parameters
 - 6. 4. 1 Two steps method of stochastic structural analysis
 - 6. 4. 2 Principle of stochastic structural Modelling
 - 6. 4. 3 Variance parameter estimation of stochastic structures
- Chapter 7. Nonlinear stochastic structural analysis**
 - 7. 1 Elementary knowledge
 - 7. 1. 1 Nonlinear stochastic structures
 - 7. 1. 2 Hysteresis models
 - 7. 1. 3 Nonlinear stochastic structural analysis
 - 7. 2 Equivalent stochastic system method

7. 2. 1 Equivalent linearization method

7. 2. 2 Equivalent stochastic system

Chapter 8. Reliability analysis of stochastic structures

8. 1 Reliability analysis theory background

8. 1. 1 Reliability analysis

8. 1. 2 Principle of structural reliability computation

8. 1. 3 First order and second moment method

8. 2 Static reliability analysis of stochastic structures

8. 2. 1 Algorithm of SFEM based

8. 2. 2 Separated algorithm

8. 3 Dynamic reliability analysis of stochastic structures

8. 3. 1 Some dynamic reliability analysis background

8. 3. 2 Solution of first passage probability based

8. 3. 3 Pseudo-Static analysis method

References

第一章 绪 论

1.1 随机结构系统

在工程结构分析与设计中,人们首先遇到的问题往往是如何设定合理的计算模型。从一般意义上考察这一问题,可以发现两类基本的模型化原则:

1. 把客观系统模型化为具有确定性因果关系的系统;
2. 把客观系统模型化为不具有确定性因果关系的系统。

根据前一原则得到的模型,通常称之为确定性模型。而根据后一原则得到的模型,则依据系统模型输入与输出之间的关系,分别有随机模型、模糊模型甚至模糊随机模型的区别。本书专门研究在将工程结构系统模型化为随机结构系统模型的前提下,如何进行系统响应的计算与系统参数的识别问题。

传统的工程结构分析,通常采用确定性的力学模型进行。在这类模型中,所采用的力学结构计算参数是一些确定的数量。换句话说,在这类计算模型中,不承认或完全忽略了现实结构系统内部的变异性。在具体的分析与计算过程中,本质上是用某种意义上的均值参数系统代替原来的结构系统。现有研究表明,只有在本原系统关于这类模型系统的变异性较小时,上述分析才能给出较为符合实际的结果。否则,上述分析甚至不能在均值反应的意义上去把握本原系统的反应。与之相适应,传统的工程结构系统识别结果也必然是对本原系统的一种有偏差的估计结果。

在观念上,存在两类不同含义的工程结构:现存的工程结构与待(设计)建造的工程结构。对于现存的工程结构,为了进行其模型化以实施可靠性评估,通常需要进行必要的试验与观测。如果这类

观测可以反映结构系统内部的每一个细节,我们称观测是完备的。而对于待建造的工程结构,在进行模型化以实施分析设计时,则要求建造过程能完全体现设计意图。如果建造过程可以准确控制结构系统内部的每一环节,我们称控制是完全的。传统的确定性力学分析模型,事实上隐含了下述重要假定:对于现存工程结构可以实现完备观测,对于待建造工程结构可以实现完全控制。显然,在实际工程中,这是很难真正做到的。对于实际的工程系统,任何一类观测都只能是非完备观测,任何一种控制都只能是非完全控制。这种原理可以称之为非完备观测与非完全控制原理。这一原理,是引入随机结构系统概念的现实基础。

随机性是与确定性相对立的概念之一。一般地说,人们对于客观系统中现象的描述或预测总是在一定的基本条件下进行的。在常规理解中,若在规定的条件下,人们对现象的主观描述或预测可以与客观现象精确地吻合,则称这类现象及对应的系统具有确定性。否则,若客观现象与主观描述或预测的现象之间存在这样或那样的偏离,而所有这些偏离又表现出某种统计规律性,则称这类现象及对应的系统具有随机性。分析可知,在这儿随机性表现为客观系统对于理想系统的一种不可精确预测的偏离,这种偏离的根本原因在于客观系统不能被完备观测或完全控制。如果再进一步深入分析上述概念的产生过程,可以发现:在本质上,随机性产生于主观世界对于客观世界的反映过程之中。这种观点,强调了这样一个基本信念:应该采用辩证唯物主义的反映论观点来认识随机性及种种所谓不确定性。客观本原系统都是确定性系统,只有在对其进行描述、分析、预测时,一句话,只有对其进行反映时,才因为系统或事物的复杂性背景而要求引入不确定性模型的处理方式。随机系统模型,即为这类处理方式之一。依据这种方式,客观系统在主观世界中被描述为一个理想系统和一个可以在概率意义下加以把握的模型架的复合。正是因为有了反映过程,才有了随机