



## 《Stochastic Dynamics of Structures》评介

方 同

西北工业大学振动研究中心, 西安 710072

现代科学理论、科学试验和计算技术的迅速发展, 极大地提高了人类认识自然、改造自然并与自然和谐相处的能力. 在这一进程中, 人们日益认识到: 必须兼顾系统与环境客观存在的各种随机要素, 才能更准确地反映工程结构的动力响应和性态. 这一客观需求, 促进了结构随机动力学的深入研究与持续发展.

李杰教授长期从事结构工程领域的研究工作, 在随机振动理论与应用方面有深厚的造诣. 早在 1996 年, 国内科学出版社就已出版了他的专著《随机结构系统——分析与建模》, 书中系统地阐述了随机结构分析的基本理论, 特别是作者在独立随机参数的前提下、发展了基于正交多项式逼近的扩阶系统理论, 对随机振动学术界有广泛的影响. 2009 年春, 国际知名出版社 John Wiley & Sons 又出版了李杰教授携手他的学生陈建兵副教授合作的英文专著 *Stochastic Dynamics of Structures*, 书中倡导以物理随机系统为出发点统一阐述结构随机动力学的基本理论和方法, 为结构随机振动理论的发展谱写了新的篇章. 本文旨在推介这一新作.

新书共 400 余页, 包括 9 章、7 个附录、参考文献和主题词索引.

第 1 章绪论, 在回顾随机动力学历史发展进程的基础上, 阐明了随机动力学研究中有两种不同的传统, 即现象学传统与物理学传统, 首次提出了通过物理随机系统来阐述随机动力学的基本思想.

第 2 章简要介绍了随机变量、随机过程与随机场的基本知识, 讨论了随机向量的相关结构分解、随机过程的 Kahunen-Loève 分解和随机函数的正交展开等较为深入的知识, 为全书提供主要的数学基础.

随机动力激励的建模与概率描述是结构随机动力学的基础和重要组成部分. 结合不同的物理机制进行随机动力激励的物理建模, 是体现从物理规律出发研究随机系统这一思想的第一步, 也是本书第 3 章区别于其他论著中随机激励经典模型的重要特色. 这里, 不仅讨论了随机过程的一般表达、包括经典的平稳与非平稳模型以及新近发展的随机 Fourier 谱模型, 分别介绍了地震动、边界层脉动风速和海浪的传统功率谱模型, 也详细

论述了作者及其合作者发展的地震动物理随机模型、边界层脉动风速的随机 Fourier 谱及随机 Fourier 相关谱模型. 这些模型的发展为动力激励的随机建模开创了新路, 提供了范例. 同时, 作者特别论述了随机过程的二重正交分解理论, 并分别给出了地震动和脉动风速随机过程的正交分解表述.

第 4 章和第 5 章分别讨论随机结构分析与经典随机振动理论的主要内容.

在第 4 章中, 首先简要回顾了确定性结构有限元分析的基本思想, 然后分别详细论述了随机结构分析的主导方法: 随机模拟方法、随机摄动方法和正交多项式展开理论, 阐明了它们的基本思想, 讨论了最新进展及主要存在问题. 特别是, 李杰教授独特发展了的基于正交多项式展开的扩阶系统逼近理论, 现已为国内外学者广泛借鉴与应用; 国际上称为谱随机有限元或混沌多项式展开的理论基本上只限于讨论 Hermite 正交多项式逼近理论; 而近期被国际上称为广义混沌多项式展开的新进展的实质是将适用于标准正态随机变量的混沌多项式展开推广到包含不同分布类型基本随机变量的情况, 也可以看成李杰教授发展的扩阶系统理论的一种推广. 其实, 科学真理总是相通的, 古人云: “触类旁通”, 说的就是这个道理. 例如, 工程结构中的随机参数总是有界的, 推人近年来着力于研究有界随机参数系统的随机动力学问题, 用的就是 Gegenbauer 正交多项式逼近方法, 实质上也可以看作扩阶系统方法的一种推广应用. 进一步利用正交多项式的另一个公共特性, 即“积化和差”性质, 就可以将这种多项式逼近方法用到多项式非线性系统上去, 有效地进行有界随机参数非线性系统中的随机分岔与随机混沌的近似分析.

第 5 章以稍稍不同于常见随机振动论著的方式讨论了经典随机振动理论的主要方法, 包括单自由度与多自由度线性体系的时域与频域方法. 书中深入阐明了矩传递关系和功率谱传递关系的物理内涵, 并以逻辑上自然的方式阐述了演变谱分析理论和虚拟激励法. 在这里, 作者以物理随机系统的基本理念, 阐述了确定性系统响应与随机系统响应之间的内在联系. 特别是在频域方法

的论述上, 通过样本 Fourier 谱与功率谱密度函数的关系, 从确定性系统的频域传递关系出发建立线性系统随机振动的频域传递关系, 不仅大大简化了推导, 又重点突出了其物理内涵. 对非线性系统, 以概念上颇为清晰的抽象函数形式阐述了统计线性化方法的基本思想, 以物理上简明而又不失数学严格性的方式讨论了 Itô 随机微分方程的重要概念, 推导了 FPK 方程, 指出了 FPK 方程数值求解的最新进展. 虽然本书没有详细论及非线性随机振动研究的所有重要进展, 但从全书体例与脉络考察, 亦不失为一种可行的剪裁.

广义概率密度演化理论能够统一处理同时含有动力激励随机性、系统参数随机性以及初始条件随机性的结构随机动力学问题, 是作者过去 10 年来的突破性研究成果. 本书第 6 章和第 7 章分别论述了概率密度演化分析的基本理论与数值方法.

第 6 章首先从状态空间描述与随机事件描述的角度剖析了概率守恒原理. 值得指出, 虽然在不少著作中曾经提到概率守恒, 但是从上述两个角度深入阐发其物理意义, 并上升到一般原理的高度, 还是本书第 1 次详细论述. 在此基础上, 从概率守恒原理的状态空间描述角度, 书中重新导出了经典概率密度演化方程: Liouville 方程与 FPK 方程, 结合概率守恒原理的随机事件描述与耦合物理方程, 重新推导了 Dostupov-Pugachev 方程. 对这些经典概率密度演化方程的再认识, 不仅进一步澄清了它们的物理意义, 也很自然地广义概率密度演化方程找到了合适的逻辑起点, 从而将所有类型的概率密度演化方程建立在概率守恒原理的坚实基础之上. 更值得肯定的是: 作者从概率守恒原理的随机事件描述与解耦物理方程结合的角度导出了广义概率密度演化方程, 由此建立了确定性系统与随机系统的内在联系, 指明了概率密度演化的内在物理机制. 可以期待, 经作者系统发展的概率密度演化理论, 将为结构随机动力学的进一步深入发展提供新思路、新工具和新动力.

对复杂的非线性结构系统, 数值求解是必要的. 本书第 7 章详细论述了数值求解算法, 包括广义概率密度演化方程的差分求解算法和多维概率空间中的离散代表点选取. 特别仔细地讨论了广义概率密度演化方程的差分求解格式, 从物理意义的角度讨论了差分格式的性能, 包括精度、稳定性、耗散与色散问题. 在讨论差分格式的稳定性时, 采用了集中初值传播方法, 是作者的新体会. 针对多维空间的选点, 作者深入探讨了多维空间的填充、覆盖和剖分的基本概念和思想, 阐述了赋得概率的概念和意义, 研究了点集选取的理性准则: 一阶和二阶偏差, 提出了两步选点法. 在此基础上, 详细介绍了基本点集选取的切球选点法、格点生成法和数论方法, 包括其策略及具体算法. 然后列举了多自由度体系非线性随

机动力响应分析的两个实例.

随机动力系统分析的主要目的之一是进行结构可靠度分析和实现基于可靠性的设计. 本书第 8 章讨论结构动力可靠度问题, 介绍了结构可靠度与动力可靠度的概念, 讨论了基于跨越过程 (first-passage) 理论的结构动力可靠度经典理论, 提出了基于概率密度演化理论的新方法, 包括吸收边界法和极值分布法. 最后, 深入论述了作者提出的等价极值事件原理以及基于等价极值思想的结构体系可靠度理论, 阐明了等价极值事件与经典可靠度理论中的最弱链假设的本质区别, 给出了分析实例.

经典随机最优控制理论难以处理非平稳、非高斯激励以及非线性系统的随机控制问题, 概率密度演化理论的发展为解决这些问题提供了新的可能. 本书第 9 章论述随机系统最优控制问题. 讨论了经典随机最优控制理论和随机最优控制系统的概率密度演化分析, 阐述了基于概率密度演化理论的非线性系统随机最优控制的基本思想, 并给出了示例. 虽然在总体上考察, 这方面的工作还只是一个起步, 但它的前途无疑是光明的.

附录 A~G 是全书不可缺少的重要补充, 包括 Dirac 函数介绍、正交多项式简介、功率谱与随机 Fourier 谱的关系、标准正态分布空间超球体内的概率及数论方法的整数生成向量表等. 其中, 附录 A 对 Dirac 函数物理意义的阐述富有特点, 附录 C 中功率谱与随机 Fourier 函数的关系是第 5 章对经典线性随机振动理论新处理的理论基础, 附录 E 给出了标准正态分布空间超球体内的概率, 对认识多维概率空间的内在性质有重要的启发性, 尚未在别的著作中见到.

综观全书, 作者在物理随机系统的框架下统一论述结构随机动力学问题, 不仅融会了传统随机结构分析和经典随机振动的精华, 而且发展了新的统一理论——概率密度演化理论, 这是当代结构随机动力学研究的最新进展. 理论密切联系实际也是本书另一大特色, 除了完整的理论叙述, 还佐以丰富多彩的典型工程实例分析, 包括非线性结构随机响应、结构动力可靠度、结构随机最优控制的实例分析. 全书逻辑清晰、体系严谨, 论述中既强调了结构随机动力学的物理内涵, 又不失其数学严谨性, 英文表述规范, 有良好的可读性, 确实是结构随机动力学领域值得力荐的著作. 美国国家工程院院士、国际结构可靠度权威学者 A. H-S. Ang 教授专门为本书作序, 给予了高度评价, 他指出: “本书对于随机结构动力学的持续发展是一个有价值的贡献”; 美国国家工程院院士、随机动力学领域国际权威学者 Pol D. Spanos 教授专门为本书写了评论, 给予热情推荐. 我相信: 本书的出版, 将有力地推动结构随机动力学理论的发展, 并有效地促进这一理论在力学、土木、机械、航空、航天、船舶和海洋工程等领域的应用.