



同濟大學

TONGJI UNIVERSITY

博士学位论文

结构随机动力稳定性分析理论 与稳定性控制研究

(国家自然科学基金重大项目 编号: 91315301)
(国家自然科学基金国际重大合作项目 编号: 51261120374)
(国家留学基金委资助 学号: 201206260011)

姓 名: 徐 军

学 号: 1010020005

所在院系: 土木工程学院

学科门类: 工 学

学科专业: 结构工程

指导教师: 李 杰

联合指导教师: Pol D. Spanos

二〇一四年十二月



同濟大學
TONGJI UNIVERSITY

A dissertation submitted to
Tongji University in conformity with the requirements for
the degree of Doctor of Philosophy

STOCHASTIC DYNAMIC STABILITY ANALYSIS OF STRUCTURES AND INVESTIGATION OF STABILITY CONTROL

(Funded by the National Natural Science Foundation of China Grant Nos.
91315301; by the National Natural Science Foundation of China Major
International Joint Research Program Grant No. 51261120374 and by the China
Scholarship Council Student No. 201206260011)

Candidate: Jun Xu

Student Number: 1010020005

School/Department: Civil Engineering

Discipline: Engineering

Major: Structural Engineering

Supervisor: Prof. Jie Li

Co-Supervisor: Prof. Pol D. Spanos

December, 2014

学位论文版权使用授权书

本人完全了解同济大学关于收集、保存、使用学位论文的规定，同意如下各项内容：按照学校要求提交学位论文的印刷本和电子版本；学校有权保留学位论文的印刷本和电子版，并采用影印、缩印、扫描、数字化或其它手段保存论文；学校有权提供目录检索以及提供本学位论文全文或者部分的阅览服务；学校有权按有关规定向国家有关部门或者机构送交论文的复印件和电子版；在不以赢利为目的的前提下，学校可以适当复制论文的部分或全部内容用于学术活动。

学位论文作者签名：

年 月 日

同济大学学位论文原创性声明

本人郑重声明：所呈交的学位论文，是本人在导师指导下，进行研究工作所取得的成果。除文中已经注明引用的内容外，本学位论文的研究成果不包含任何他人创作的、已公开发表或者没有公开发表的作品的内容。对本论文所涉及的研究工作做出贡献的其他个人和集体，均已在文中以明确方式标明。本学位论文原创性声明的法律责任由本人承担。

学位论文作者签名：

年 月 日

摘要

本文较为系统地发展了工程结构随机动力稳定性的分析理论与稳定性控制方法。

发展了概率密度演化方法在高维概率空间中的数值积分选点方法。通过积分秩的概念阐明了普通高维数值积分与概率密度演化方法中数值积分的相似点与不同之处,提出了普通数值积分应用于概率密度演化方法中的必要条件与强条件。系统测试了一些在数值积分领域中广泛应用的方法,指出了各种方法在概率密度演化方法中的适用条件。

提出了一种新的判定结构动力稳定状态的能量准则。回顾了既有的工程动力稳定判定准则及存在的问题,指出:研究结构系统动力稳定问题,须同时考虑结构内部参数与外部动力激励特征。动力失稳的过程必然伴随着结构能量的巨大变化,其本质在于:由于系统运动状态的变化,系统内部的特征能量超过了输入到结构中的总能量,因此,结构不能维持“动平衡”状态。据此,提出了一类新的结构动力系统稳定性判定准则,并通过系列的数值结果验证了该准则的有效性。

推导了概率耗散系统的概率密度演化方程,引入动力失稳物理准则,发展了结构动力稳定可靠度的定量计算方法。在利用随机事件描述概率守恒原理的基础上,利用三种不同方式分别推导了概率耗散系统的概率密度演化过程控制偏微分方程—概率耗散系统的概率密度演化方程。为获得结构随机动力稳定状态的概率评价指标,将结构发生动力失稳作为概率耗散的驱动物理机制(即认为结构动力失稳将引起概率耗散、概率耗散所剩余的概率信息为结构保持动力稳定的概率),建立了理性地计算结构随机动力稳定可靠度的基本方法。分析表明,该方法能够准确地计算结构的动力稳定可靠度。同时,研究发现:概率耗散会对结构响应的概率密度演化过程产生很大影响。

发展了考虑多种失效模式的结构失效概率计算方法。将结构动力失稳与强度失效的物理机制引入到概率耗散系统中,构造了由不同结构失效物理机制所引起概率耗散的耗散概率表达式,获得了相应的概率密度演化方程。求解该方程并计算所耗散掉的概率,即得到结构在不同破坏模式下的失效概率。建立了结构在多种失效模式竞争条件下的系统时变概率密度求解算法。系统数值计算结果表明:这一考虑多种失效模式的动力系统失效概率计算方法是行之有效的。

应用所发展的结构系统随机动力稳定性分析理论,分析了两类单层网壳工程结构在竖向随机地震动激励下的随机动力稳定问题。

发展了分数阶状态反馈控制下的结构动力稳定性控制理论。将精细积分方法

摘要

扩展到数值求解含分数阶导数的运动微分方程中,获得结构的动力响应过程及与稳定有关的能量响应。利用本文发展的结构随机动力稳定定量分析理论,可得到分数阶状态反馈受控结构的失稳概率。通过调整控制器参数,可使受控结构发生动力失稳的概率降低。具体案例研究表明:受控后的结构随机动力稳定性能得到明显提升。

最后,对进一步工作的方向进行了简要的讨论。

关键词: 结构系统概率密度演化, 随机动力稳定, 动力稳定函数, 概率耗散系统, 稳定可靠性, 失效概率, 分数阶导数, 稳定性控制

ABSTRACT

This paper is devoted to systematically developing the methodology for stochastic dynamic stability analysis and stability control of structures.

The selection of points in high-dimensional random variate space via ordinary numerical cubature is investigated. The apparent similarity and subtle distinction between the ordinary cubature and probability density evolution method (PDEM) are explored with the aid of the concept of the rank of an integral. Meanwhile, a necessary condition and a strong condition are then put forward to distinguish the cubature formulae by their applicability to higher-rank integrals and the adaptability to PDEM. Several kinds of cubature formulae, which are widely adopted in ordinary numerical integration, are discussed and systematically tested for the adaptability to PDEM based on these conditions.

A novel energetic criterion for identifying dynamic stability of structures is proposed. The existing criteria and their limitations in practical engineering are briefly revisited. It is demonstrated that the dynamic stability of structures not only hinges on the structural parameters, but also relates to the characteristics of dynamic external excitations. Great change in the structural energy must occur when the structure is out of dynamic stability. The essence of dynamic instability of the structure lies in the intrinsic energy of the structure is larger than the input energy to the structure due to the variation in the motion state of the system, where the structure cannot maintain its dynamic equilibrium states any more. A novel criterion is then put forward accordingly. A series of numerical results validate the effectiveness of the proposed criterion for identifying dynamic stability of structures.

The probability density evolution equation for the probability dissipated (PDEE-PD) system is derived. Then, the physical criterion for dynamic stability of structures is introduced into the probability dissipated system to quantitatively evaluate the reliability of dynamic stability. There different ways are applied, respectively, to derive the partial differential equation that governs the probability density evolution process of the probability dissipated system based on the random event description of the principle of preservation of

probability. To obtain the stable reliability, which is the probabilistic index to evaluate the stochastic dynamic stability state, the dynamic instability of structures is treated as the physical triggering mechanism of probability dissipation (the probability dissipation is regarded to be driven by the dynamic instability and the remaining probabilities of probability dissipation is the probabilistic information when the structure always keeps stable). Therefore, a rational method is formulated to compute the reliability of stochastic dynamic stability of structures. The numerical results indicate that using the advocated method, the reliability of dynamic stability can be evaluated efficiently and accurately. Meanwhile, the great influence of probability dissipation to the probability evolution process is also pointed out.

Failure probability evaluation of structures with consideration of multiple physical failure mechanisms is developed on the basis of the probability dissipated system. The physical mechanisms of dynamic instability and strength failure are introduced into the probability dissipated system, whereby different expressions of the dissipated probability can be formulated with respect to different triggering mechanism of probability dissipation and the corresponding PDEE-PDs can be derived accordingly. Solving the PDEE-PDs gives the dissipated probabilities, which are the failure probabilities of different failure mechanisms. Consequently, the numerical algorithm for evaluating the instantaneous time-variant PDFs with consideration of multiple competitive physical failure mechanisms, could be developed. Numerical examples elucidate the validity and applicability of the developed algorithm for failure probability assessment of structural dynamic system.

The developed methodology is applied to stochastic dynamic stability analysis of two kinds of single-layer dome structures under vertical stochastic ground motions.

The stability control of structures, where the fractional order state feedback control is specifically considered, is investigated in the context of probability dissipated system. The precise integration method is extended to numerically integrate the motion of equation with fractional derivatives, where the dynamic responses together with the energy information are acquired simultaneously. The probability of instability, which is of great concern in stability control, is evaluated via the developed qualitative methodology for stochastic dynamic

stability analysis of structures. The probability of instability in controlled structures can be significantly reduced by adjusting the parameters of controllers. The specific numerical investigation shows that the performance related to stochastic dynamic stability of controlled structures can be greatly enhanced by implementation of the stability robustness control.

In the finality, the problems requiring further studies are discussed briefly.

Key Words: Probability density evolution of structural dynamic system, Stochastic dynamic stability, Stability function, Probability dissipated system, Stable reliability, Failure probability, Fractional derivatives, Stability control

目录

摘要	I
ABSTRACT	III
目录	VII
第 1 章 绪论	1
1.1 引言	1
1.2 结构随机动力稳定性理论研究现状	2
1.2.1 结构稳定的概念	2
1.2.2 结构确定性动力稳定分析	5
1.2.3 随机动力稳定性	8
1.3 随机动力学与概率密度演化理论	10
1.3.1 物理随机系统	10
1.3.2 概率密度演化理论	11
1.4 本文研究意义与主要工作	13
1.4.1 论文的工作目的与意义	13
1.4.2 论文的主要工作	14
第 2 章 概率密度演化理论与高维概率空间选点	17
2.1 引言	17
2.2 广义概率密度演化方程及其数值求解	17
2.2.1 广义概率密度演化方程	17
2.2.2 数值求解	19
2.3 数值积分与积分的秩	21
2.3.1 数值积分	21
2.3.2 积分的秩	22
2.3.3 概率密度演化方法中积分的秩	24
2.4 数值积分中的选点方法	25
2.4.1 张量积方法	25
2.4.2 稀疏网格法	25
2.4.3 完全对称点法	27
2.4.4 与完全对称点法相关的其他方法	28

2.4.5 拟对称点法.....	29
2.5 分析实例.....	32
2.5.1 线性结构.....	32
2.5.2 非线性结构.....	37
2.5.3 与数论方法(NTM)的对比.....	43
2.6 本章小结.....	45
第 3 章 结构动力稳定性判别的一种新准则	47
3.1 引言.....	47
3.2 动力稳定性判别准则研究现状.....	47
3.3 结构工程中的动力稳定性.....	48
3.3.1 Lyapunov 意义上的动力稳定性.....	48
3.3.2 结构动力稳定性的特点.....	49
3.4 动力稳定性判别的能量准则.....	53
3.4.1 既有研究成果.....	53
3.4.2 本文建议的能量准则.....	55
3.5 动力稳定性准则的实例验证.....	58
3.5.1 受压柱.....	58
3.5.2 两杆桁架.....	60
3.5.3 共振失稳.....	66
3.5.4 隔震结构.....	70
3.5.5 穹顶网壳.....	74
3.5.6 滞回系统.....	77
3.6 本章小结.....	82
第 4 章 结构随机动力稳定性分析与可靠度计算	83
4.1 引言.....	83
4.2 经典随机动力稳定性的定义.....	84
4.3 概率耗散系统的概率密度演化方程.....	86
4.3.1 概率耗散系统.....	86
4.3.2 从 Taylor 展开角度推导概率密度演化方程.....	88
4.3.3 从概率耗散过程推导概率密度演化方程.....	92
4.3.4 从物质导数角度推导概率密度演化方程.....	93
4.4 结构随机动力稳定性分析与动力稳定可靠性.....	95
4.4.1 结构随机动力稳定性问题的提法.....	95

4.4.2 结构动力稳定可靠性的算法	96
4.5 分析实例	98
4.5.1 参数动力失稳	98
4.5.2 跳跃型失稳(Snap-through Instability)	101
4.6 本章小结	108
第 5 章 考虑多种失效模式的结构失效概率分析	109
5.1 概述	109
5.2 考虑动力失稳后性态的概率密度演化方程	110
5.2.1 动力失稳	111
5.2.2 稳定域内强度失效	112
5.2.3 不稳定域内强度失效	114
5.3 考虑多种失效模式的结构整体可靠度分析	115
5.3.1 结构强度失效整体可靠度分析	115
5.3.2 考虑多种失效模式的整体失效概率计算	116
5.4 算例研究	120
5.4.1 两杆桁架模型	120
5.4.2 受控框架结构	127
5.5 本章小结	135
第 6 章 工程应用：单层网壳结构随机动力稳定性分析	137
6.1 概述	137
6.2 单层球面网壳结构随机动力稳定性分析	137
6.2.1 自振频率及模态分析	138
6.2.2 特征值屈曲分析	139
6.2.3 非线性静力分析	139
6.2.4 确定性动力稳定分析	140
6.2.5 随机动力稳定分析	143
6.3 单层浅层网壳结构随机动力稳定性分析	146
6.3.1 样本反应	148
6.3.2 概率密度演化过程	149
6.3.3 动力失稳概率	150
6.3.4 稳定域内强度失效概率	151
6.3.5 不稳定域内强度失效概率	152
6.4 本章小结	154

第 7 章 结构随机动力稳定性控制	155
7.1 概述	155
7.2 受控线性结构随机动力稳定性控制	156
7.2.1 受控线性结构动力稳定性	156
7.2.2 实例分析：单层受控剪切框架结构的动力稳定性分析	158
7.3 分数阶反馈控制非线性结构的动力稳定性	161
7.3.1 分数阶导数的定义	162
7.3.2 分数阶状态反馈控制结构的随机动力稳定性	163
7.3.3 分数阶状态反馈控制结构动力微分方程的数值求解	165
7.4 随机动力稳定性控制案例分析	176
7.4.1 弹塑性两杆桁架动力稳定性控制	176
7.4.2 覆冰导线舞动下输电塔结构的随机动力稳定性控制	180
7.5 本章小结	186
第 8 章 结论与展望	189
8.1 结论	189
8.2 进一步工作方向	190
致谢	191
附录 A 随机地震动过程的双重正交分解 ^[277]	193
附录 B 转移矩阵	195
附录 C 含分数阶导数的动力方程的中心差分法	197
参考文献	199
个人简历、在读期间发表的学术论文与研究成果	211