



同濟大學

TONGJI UNIVERSITY

博士学位论文

## 随机地震动作用下的结构振动控制研究

(土木工程防灾国家重点实验室自由创新重点项目 编号: SLDRCE10-B-02)

(国家自然科学基金资助项目 编号: 10872148, 51108344)

(国家自然科学基金委创新研究群体资助项目 编号: 50621062)

姓 名: 梅 真

学 号: 0810020099

所在院系: 建筑工程系

学科门类: 土木工程

学科专业: 结构工程

指导教师: 李杰 教授

二〇一二年五月



同濟大學  
TONGJI UNIVERSITY

A dissertation submitted to

Tongji University in conformity with the requirements for  
the degree of Doctor of Philosophy

## **Study on Structural Vibration Control Subjected to Random Earthquake Ground Motions**

(Sponsored by the Exploratory Program of State Key Laboratory of Disaster Reduction in Civil Engineering at Tongji University, Grant No.SLDRCE10-B-02; by the National Natural Science Foundation of China, Grant No.10872148, 51108344; and by the National Natural Science Foundation of China for Innovative Research Groups, Grant No.50621062)

Candidate: Zhen Mei  
Student Number: 0810020099  
School/Department: Building Engineering  
Discipline: Civil Engineering  
Major: Structural Engineering  
Supervisor: Prof. Jie Li

May, 2012

## 摘要

本文在国内外首次实施了随机地震动输入下、采用磁流变阻尼器 (Magnetorheological Damper, MRD 或 MR 阻尼器) 作为减振装置的结构控制振动台试验, 并基于试验结果研究了随机动力系统分析中的概率密度演化方法的正确性。

基于动力性能测试试验结果, 本文对两个最大出力均为 10kN 的 MR 阻尼器分别进行了参数化与非参数化动力学建模。研究表明, 本文建立的 MR 阻尼器双曲正切滞回模型能够较好地描述 MR 阻尼器的动力特性, 且形式简单, 概念明确, 易于程序化; BP 神经网络正向和逆向动力学模型能够分别准确地刻画 MR 阻尼器的正向和逆向动力特性。

开展了随机地震动输入下、采用 MR 阻尼器作为减振装置的结构控制振动台试验。其中, 试验地震动样本由随机地震动模型生成。随机控制振动台试验结果表明, 采用 MR 阻尼器作为减振装置, 能够明显减小试验模型峰值响应和均方根响应的均值与标准差, 与此同时, 受控结构典型动力响应的分布范围较无控时明显减小, 即响应变异性明显降低。不同地震动样本作用时, 结构控制效果显著不同, 因此, 有必要在结构控制设计中合理考虑地震作用的随机性。

基于无控振动台试验实测数据, 验证了概率密度演化方法在随机动力系统分析中的精确性与可靠性。研究表明, 概率密度演化分析结果, 无论从均值与标准差过程还是典型时刻的概率分布上, 均分别与样本统计结果吻合很好。同时, 数值算例表明: 所选取代表样本的数目对密度演化分析结果的精度有一定影响。此外, 采用概率密度演化方法, 分别对有控及无控试验模型的随机地震响应进行了分析。结果表明, 设置了减振装置后, 结构位移响应明显减小、变异性显著降低, 与此同时, 加速度响应也具有一定的减振效果。

在确定性最优控制分析方法的基础上, 研究了结构随机最优控制问题。在已有随机最优控制概率准则的基础上, 进一步发展了基于受控结构均方根响应等价极值向量的随机最优控制准则。研究表明, 在物理随机最优控制理论框架内, 在被控结构目标性态达到最优的同时, 还能够实现对结构性态的精细化控制。基于本文提出的改进的遗传算法, 能够较好地解决随机控制系统的一体化优化设计问题, 即同时实现控制器的参数优化以及作动器的优化配置。

最后, 对全文的研究内容进行总结, 并指出需要进一步研究的方向。

**关键词:** 随机控制振动台试验, 磁流变阻尼器, 随机地震动模型, 概率密度演化方法, 物理随机最优控制

## ABSTRACT

In this thesis, a series of shaking table tests of structures with and without magnetorheological dampers (MRDs or MR dampers) subjected to stochastic seismic excitation was firstly conducted at home and abroad. Based on the experimental results, the correctness of the probability density evolution method used for stochastic response analysis is proved.

Based on the results of mechanical property tests of two MR dampers whose nominated maximum damping forces are 10 kN, both parametric and non-parametric models of the dampers are developed, respectively. Research results show that hyperbolic tangent hysteresis models formulated here could describe the dynamic behaviors of the MR dampers well, which bear the advantage of simple form, clear concept, and being easily programmed. Besides, forward and reverse BP neural network models of the MR dampers developed could accurately portray the forward and reverse dynamic characteristics of the dampers, respectively.

A series of shaking table tests of structures with and without MR dampers subjected to stochastic seismic excitation was carried out. In the experiments, the representative time histories of ground accelerations, as the base excitation, are generated employing a stochastic ground motion model. Results of the stochastic seismic control experiments indicate that the MR dampers, as control devices, can significantly reduce both peak responses and root mean square (RMS) responses of the test model in the sense of mean and standard deviation. At the same time, the distribution width of typical responses of the controlled structure is obviously reduced compared with that in the uncontrolled cases. It is also seen that control effectiveness of the test structure is significantly different in case of different ground motions. Thus, more attentions should be paid to the randomness involved in seismic excitation in the design of structural control systems.

Based on the experimental results in the uncontrolled cases, the accuracy and reliability of the probability density evolution method used for stochastic response analysis is verified. Studies have shown that the analytical results of the probability density evolution method are in very good agreement with sample statistics in terms of the mean and standard deviation as well as the probability distribution at several typical instants of time, respectively. At the same time, numerical simulation shows that the number of selected representative samples has a certain influence on the

accuracy of analytical results of the probability density evolution method. Additionally, stochastic response analyses of the experimental structures with and without MR dampers are conducted based on the probability density evolution method, respectively. Analytical results demonstrate that displacements of the test model are significantly reduced in the controlled cases, and the variability is considerably cut down at the same time. Besides, accelerations are also mitigated to some extent.

After introducing deterministic optimal control methods, stochastic optimal control problems are investigated. To develop the existing probabilistic criteria of structural stochastic optimal controls, a family of probabilistic criteria is proposed based on the equivalent extreme value vectors of RMS responses of controlled structures. Research reveals that within the framework of physical stochastic optimal control, not only an optimal target performance of controlled structures could be achieved, but also accurate controls of structural behaviors could be realized. In addition, based on an improved genetic algorithm proposed herein, the problem of integrated optimization design of stochastic control systems, including the optimization of both the controller parameters and the allocation of actuators, could be solved.

In the finality, some concluding remarks are drawn and the problems requiring further studies are discussed.

**Key Words:** stochastic seismic control experiment, magnetorheological dampers, stochastic ground motion model, probability density evolution method, physical stochastic optimal control

# 目 录

<b>第 1 章 引言</b> .....	错误!未定义书签。
1.1 概述.....	错误!未定义书签。
1.2 确定性结构控制研究现状.....	错误!未定义书签。
1.2.1 被动控制.....	错误!未定义书签。
1.2.2 主动控制.....	错误!未定义书签。
1.2.3 半主动控制.....	错误!未定义书签。
1.2.4 混合控制.....	错误!未定义书签。
1.2.5 智能控制.....	错误!未定义书签。
1.3 结构随机控制研究现状.....	错误!未定义书签。
1.3.1 经典随机最优控制.....	错误!未定义书签。
1.3.2 物理随机最优控制.....	错误!未定义书签。
1.4 物理随机最优控制理论基础.....	错误!未定义书签。
1.4.1 随机动力激励的物理模型.....	错误!未定义书签。
1.4.2 概率密度演化理论.....	错误!未定义书签。
1.4.3 等价极值事件原理.....	错误!未定义书签。
1.5 本文研究意义及主要工作.....	错误!未定义书签。
<b>第 2 章 磁流变阻尼器动力学建模</b> .....	错误!未定义书签。
2.1 引言.....	错误!未定义书签。
2.2 磁流变阻尼器动力学建模研究进展.....	错误!未定义书签。
2.2.1 参数化建模研究进展.....	错误!未定义书签。
2.2.2 非参数化建模研究进展.....	错误!未定义书签。
2.3 磁流变阻尼器动力性能测试.....	错误!未定义书签。
2.3.1 试验装置及测试工况.....	错误!未定义书签。
2.3.2 试验结果.....	错误!未定义书签。
2.4 磁流变阻尼器参数化动力学建模.....	错误!未定义书签。
2.4.1 双曲正切滞回模型.....	错误!未定义书签。
2.4.2 模型参数识别.....	错误!未定义书签。

2.4.3 模型验证.....	错误!未定义书签。
2.5 磁流变阻尼器非参数化动力学建模.....	错误!未定义书签。
2.5.1 BP 神经网络正向力学模型.....	错误!未定义书签。
2.5.2 BP 神经网络逆向力学模型.....	错误!未定义书签。
2.6 本章小结.....	错误!未定义书签。

### 第 3 章 随机地震动作用下结构控制振动台试验 ..错误!未定义书签。

3.1 引言.....	错误!未定义书签。
3.2 试验地震动样本的生成.....	错误!未定义书签。
3.2.1 物理随机地震动模型.....	错误!未定义书签。
3.2.2 试验地震动样本生成.....	错误!未定义书签。
3.3 结构随机控制振动台试验设计.....	错误!未定义书签。
3.3.1 试验模型.....	错误!未定义书签。
3.3.2 试验装置.....	错误!未定义书签。
3.3.3 测点布置.....	错误!未定义书签。
3.3.4 试验工况.....	错误!未定义书签。
3.4 试验模型参数识别.....	错误!未定义书签。
3.4.1 参数识别方法.....	错误!未定义书签。
3.4.2 参数识别结果验证.....	错误!未定义书签。
3.5 振动台试验结果及分析.....	错误!未定义书签。
3.5.1 峰值响应.....	错误!未定义书签。
3.5.2 均方根响应.....	错误!未定义书签。
3.5.3 典型动力响应时程.....	错误!未定义书签。
3.5.4 典型动力响应概率分布估计.....	错误!未定义书签。
3.6 本章小结.....	错误!未定义书签。

### 第 4 章 概率密度演化理论的验证及应用 .....错误!未定义书签。

4.1 引言.....	错误!未定义书签。
4.2 概率密度演化理论概述.....	错误!未定义书签。
4.2.1 广义概率密度演化方程.....	错误!未定义书签。
4.2.2 概率密度演化方法 (PDEM).....	错误!未定义书签。
4.2.3 数值解法.....	错误!未定义书签。
4.3 基于无控振动台试验结果的 PDEM 验证.....	错误!未定义书签。

4.3.1	典型动力响应均值及标准差时程对比.....	错误!未定义书签。
4.3.2	典型动力响应概率分布对比.....	错误!未定义书签。
4.3.3	典型动力响应概率密度演化.....	错误!未定义书签。
4.4	三组不同数目地震动样本作用下结构随机动力响应分析.....	错误!未定义书签。
4.4.1	输入地震动特性对比.....	错误!未定义书签。
4.4.2	峰值响应及均方根响应对比.....	错误!未定义书签。
4.4.3	典型动力响应均值及标准差时程对比.....	错误!未定义书签。
4.4.4	典型动力响应概率密度函数对比.....	错误!未定义书签。
4.4.5	典型动力响应概率密度演化对比.....	错误!未定义书签。
4.5	试验模型随机动力响应分析.....	错误!未定义书签。
4.5.1	典型动力响应均值及标准差时程对比.....	错误!未定义书签。
4.5.2	典型动力响应概率密度函数对比.....	错误!未定义书签。
4.5.3	典型动力响应概率密度演化对比.....	错误!未定义书签。
4.6	本章小结.....	错误!未定义书签。

## 第5章 结构随机最优控制理论研究.....错误!未定义书签。

5.1	引言.....	错误!未定义书签。
5.2	结构确定性最优控制.....	错误!未定义书签。
5.2.1	主动最优控制.....	错误!未定义书签。
5.2.2	半主动最优控制.....	错误!未定义书签。
5.2.3	LQR 最优控制中权矩阵的影响.....	错误!未定义书签。
5.3	结构随机最优控制.....	错误!未定义书签。
5.3.1	随机最优控制系统的性态演化.....	错误!未定义书签。
5.3.2	随机最优控制的概率准则.....	错误!未定义书签。
5.3.3	随机最优控制准则的应用.....	错误!未定义书签。
5.4	结构广义随机最优控制.....	错误!未定义书签。
5.4.1	结构振动控制系统的优化分析方法.....	错误!未定义书签。
5.4.2	基于改进遗传算法的结构广义随机最优控制.....	错误!未定义书签。
5.4.3	结构广义随机最优控制数值算例.....	错误!未定义书签。
5.5	本章小结.....	错误!未定义书签。

## 第6章 结论与展望.....错误!未定义书签。



6.1 结论..... 错误!未定义书签。

6.2 进一步工作的方向..... 错误!未定义书签。

**参考文献** ..... 错误!未定义书签。

**附录**..... 错误!未定义书签。

附录 改进遗传算法的初始种群..... 错误!未定义书签。

**个人简历、在读期间发表的学术论文与研究成果**错误!未定义书签。

**致谢**..... 错误!未定义书签。