



同濟大學

TONGJI UNIVERSITY

博士学位论文

工程随机地震动和地震动场
物理模型研究

(国家自然科学基金委创新研究群体资助项目 编号: 50621062)
(土木工程防灾国家重点实验室自由创新重点项目 编号: SLDRCE08-A-01)

姓 名: 王 鼎

学 号: 0830020006

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

二〇一二年十月



同濟大學
TONGJI UNIVERSITY

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

Random Function Model of Seismic Ground Motion for Engineering Purposes

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

Candidate:	Ding Wang
Student Number:	0830020006
School/Department:	School of Civil Engineering
Discipline:	Civil Engineering
Major:	Structural Engineering
Supervisor:	Prof. Jie Li

October, 2012

摘 要

本文基于地震“震源-传播途径-局部场地”物理机制，致力于建立特定工程场地上的地震动随机过程模型和随机场模型。

对地震动随机过程，通过定性求解一维线性波动方程，进而，将波动解表示为“震源-传播途径-局部场地”的分离形式，分别对震源、传播途径和局部工程场地进行物理建模，获得地震动过程的具体函数表达式。其中，震源采用 Brune 震源模型，传播途径考虑了地震波在地层中传播的阻尼衰减效应和频散效应，局部场地土层等效为单自由度体系模型。在此基础上，考虑震源和局部工程场地的随机性，建立了工程地震动的物理随机函数模型。

收集整理了 4438 条强地震动记录，依据记录台站场地类别，对实际地震动记录分类，进行了不同场地条件下地震动模型基本随机变量的统计分析。采用数论选点方法对基础随机变量概率空间进行剖分，结合波群叠加方法，生成了代表地震动样本集合和对应的反应谱样本集合，通过统计分析，在反应谱二阶统计量层面上验证了所发展模型的正确性和适用性。

对地震动随机场，考虑地震波大尺度传播和局部场地地震动场特性的差异，采用两尺度建模方法，建立了工程地震动场的物理随机函数模型。利用 SMART-1 台站组的地震动记录，对局部场地物理随机变量进行了识别和统计。

基于物理随机系统的观点，利用随机向量概率密度转换公式，提出了推导经典概率密度演化方程和广义概率密度演化方程的新方法。利用地震动物理随机函数模型，采用概率密度演化方法获得了各类场地上地震动反应谱的概率密度曲面，并和实测地震动反应谱分布进行了比较。从而，在反应谱概率密度层面上对随机地震动物理模型进行了验证。

本文建立的一点处随机地震动模型具有四个基本物理随机变量，随机地震动场模型具有六个基本物理随机变量。通过实测地震动的参数识别与统计，建立了基本完整的、可供工程实用的随机地震动模型。应用本文建立的模型，分别针对郑州绿地中央广场北塔和重庆江津几江大桥进行了随机地震响应分析，从多个侧面研究了这些典型工程结构的抗震可靠度。从而，通过具体工程实例证实了本文所发展模型的实用性。

关键词：地震动，随机过程，随机场，反应谱，概率密度演化，工程结构动力可靠度

ABSTRACT

This thesis is committed to establish stochastic models of earthquake ground motion processes and fields on a special local engineering site based on seismic source-path-site physical mechanism.

In the modeling of stochastic ground motion processes, the functional form of ground motions is presented based on the solution of one-dimensional wave equation and the separation assumption of seismic source, path and local site. The Brune source model is used and the damping attenuation and frequency dispersion effect are considered. The soil cover under local engineering site is simplified as an equivalent SDOF system. Considering the randomness of the seismic source and local site, the random function model of seismic ground motions for engineering purpose is established.

According to the site classification, the observed earthquake ground motion records are classified and the distributions of the physical parameters are obtained. Further, using the number-theoretic method to separate the probability space of this stochastic model, the typical sample sets of stochastic ground motions and their response spectrums are presented. The results show that the random function model of seismic ground motions is reasonable and available.

In the modeling of stochastic ground motion fields, the double-scale modeling method is established based on the differences between the ground motion fields on bedrock and local soil cover surfaces. Considering the randomness of the energy variation and wave velocity in the seismic wave propagation in local site, the random function model of seismic ground motion fields is presented. The probability distributions of the random parameters are obtained by the identification of the earthquake ground motion records from SMART-1 array, Taiwan.

Based on the points of physical stochastic system, a new way to derive the classical and generalized probability density evolution equations is presented using the probability density conversion formula of random vectors. Applying the probability density evolution method (PDEM) to the random function model of seismic ground motions, the probability density surfaces of response spectrums on different site classes are presented. The probability density functions of response spectrums calculated by PDEM are in full agreement with the distributions of realistic response

spectrums.

The number of the basic variables of the stochastic ground motion process model is 4 and of the stochastic ground motion field model is 6. This models makes it reality to calculate the the dynamic reliability of structures subjecting to earthquake load. Ground motion process and field simulations focusing on the Zhengzhou Greenland Center North Tower and Jijiang Bridge are carried out as the application of these models. The stochastic seismic dynamic response analysis of these two structures and the dynamic reliability are fulfilled with the PDEM.

Key words: ground motion, random process, random fields, response spectrum, probability density evolution, structural dynamic reliability

目 录

第 1 章 引言	错误!未定义书签。
1.1 概述	错误!未定义书签。
1.2 相关研究现状综述	错误!未定义书签。
1.2.1 一点处地震动的建模与模拟研究现状	错误!未定义书签。
1.2.1.1 基于 Fourier 幅值谱的建模与模拟	错误!未定义书签。
1.2.1.2 基于 Green 函数方法的人工地震动模拟	错误!未定义书签。
1.2.1.3 功率谱模型与谱表现方法	错误!未定义书签。
1.2.2 随机地震动场建模与模拟的研究现状	错误!未定义书签。
1.2.2.1 相干函数和互谱模型	错误!未定义书签。
1.2.2.2 非条件模拟与条件模拟	错误!未定义书签。
1.2.3 地震动的物理随机函数模型	错误!未定义书签。
1.3 本文的工作	错误!未定义书签。
1.3.1 论文工作的目的与意义	错误!未定义书签。
1.3.2 论文的行文脉络	错误!未定义书签。
第 2 章 工程地震动的物理建模	错误!未定义书签。
2.1 引言	错误!未定义书签。
2.2 地震动的 Fourier 传递谱	错误!未定义书签。
2.2.1 地震波一维传播的数学模型	错误!未定义书签。
2.2.1.1 一维波动方程	错误!未定义书签。
2.2.1.2 波动方程的求解	错误!未定义书签。
2.2.2 地震波一维传播的谱传递形式	错误!未定义书签。
2.3 地震动的物理建模	错误!未定义书签。
2.3.1 地震震源谱模型	错误!未定义书签。
2.3.2 地震传播途径物理建模	错误!未定义书签。
2.3.2.1 传播途径幅值谱传递函数	错误!未定义书签。
2.3.2.2 传播途径相位谱传递函数	错误!未定义书签。
2.3.3 地震局部场地物理建模	错误!未定义书签。
2.3.4 地震动的物理模型	错误!未定义书签。
2.4 地震动的窄带波群叠加模拟	错误!未定义书签。
2.4.1 波群的基本概念	错误!未定义书签。
2.4.2 合成地震动的窄带波群叠加方法	错误!未定义书签。
2.4.3 波群半带宽取值研究	错误!未定义书签。
2.4.4 地震动时程模拟	错误!未定义书签。

2.5 本章小结.....	错误!未定义书签。
第 3 章 工程地震动的物理随机函数模型参数识别	错误!未定义书签。
3.1 引言.....	错误!未定义书签。
3.2 地震动物理随机函数模型.....	错误!未定义书签。
3.3 地震动随机参数的统计建模.....	错误!未定义书签。
3.3.1 实测强震地震动数据库	错误!未定义书签。
3.3.2 随机参数统计建模	错误!未定义书签。
3.3.3 均值参数地震动	错误!未定义书签。
3.4 地震动随机建模检验.....	错误!未定义书签。
3.5 本章小结.....	错误!未定义书签。
第 4 章 工程地震动随机场的物理模型与统计建模	错误!未定义书签。
4.1 引言.....	错误!未定义书签。
4.2 工程地震动场的物理建模.....	错误!未定义书签。
4.2.1 两尺度建模思想	错误!未定义书签。
4.2.2 大尺度地震波场的物理建模	错误!未定义书签。
4.2.3 工程尺度地震波场的物理建模	错误!未定义书签。
4.2.4 工程场地地震动场的物理模型	错误!未定义书签。
4.2.5 地震动场模拟	错误!未定义书签。
4.3 地震动场物理随机函数模型.....	错误!未定义书签。
4.3.1 模型形式	错误!未定义书签。
4.3.2 地震动场随机参量统计建模	错误!未定义书签。
4.4 本章小结.....	错误!未定义书签。
第 5 章 广义概率密度演化方法及其在随机地震动分析中的应用.....	错误!未定义书签。
	签。
5.1 引言.....	错误!未定义书签。
5.2 物理随机系统和概率密度演化方程.....	错误!未定义书签。
5.2.1 介绍	错误!未定义书签。
5.2.2 随机向量的概率密度变换公式	错误!未定义书签。
5.2.2.1 基本定理.....	错误!未定义书签。
5.2.2.2 单参数变换群下的概率密度变换公式	错误!未定义书签。
5.2.3 随机初值动力系统的概率密度演化方程.....	错误!未定义书签。
5.2.3.1 自治随机动力系统的情形	错误!未定义书签。
5.2.3.2 非自治随机动力系统的情形——Liouville 方程.....	错误!未定义书签。
5.2.4 一般随机动力系统的概率密度演化方程.....	错误!未定义书签。
5.2.4.1 基本观点.....	错误!未定义书签。
5.2.4.2 Dostupov-Pugachev 方程.....	错误!未定义书签。
5.2.4.3 广义概率密度演化方程.....	错误!未定义书签。

5.3 概率密度演化分析方法	错误!未定义书签。
5.3.1 基本理论	错误!未定义书签。
5.3.2 数值算法	错误!未定义书签。
5.4 概率密度演化方法在随机地震动反应谱中的应用	错误!未定义书签。
5.5 本章小结	错误!未定义书签。
第 6 章 工程应用	错误!未定义书签。
6.1 引言	错误!未定义书签。
6.2 工程地震动物理模型的应用	错误!未定义书签。
6.2.1 工程背景与有限元模型	错误!未定义书签。
6.2.2 随机地震动模拟	错误!未定义书签。
6.2.3 随机地震动响应与可靠度评价	错误!未定义书签。
6.2.3.1 均值参数地震动响应分析	错误!未定义书签。
6.2.3.2 结构随机响应分析	错误!未定义书签。
6.2.3.3 结构抗震可靠度评价	错误!未定义书签。
6.3 地震动随机场物理模型的应用	错误!未定义书签。
6.3.1 工程背景和有限元模型	错误!未定义书签。
6.3.2 地震动场模拟	错误!未定义书签。
6.3.3 随机动力响应分析及可靠度评价	错误!未定义书签。
6.3.3.1 一致与非一致地震激励下结构响应比较	错误!未定义书签。
6.3.3.2 随机地震动力响应分析	错误!未定义书签。
6.3.3.3 结构抗震性能可靠度评价	错误!未定义书签。
6.4 本章小结	错误!未定义书签。
第 7 章 结论与展望	错误!未定义书签。
参考文献	错误!未定义书签。
附录 A 强震记录背景资料	错误!未定义书签。
附录 B 随机地震动物理模型基本随机变量选点	错误!未定义书签。
附录 C 随机地震动场物理模型基本随机变量选点	错误!未定义书签。
致 谢	错误!未定义书签。
个人简历 在读期间发表学术论文与研究成果	错误!未定义书签。

