



同濟大學

TONGJI UNIVERSITY

博士学位论文

地下供水管网地震反应分析与抗震功能
可靠度研究

姓 名： 繆惠全

学 号： 1410009

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 教授

副指导教师： 刘威 副教授

二〇一八年六月



同濟大學
TONGJI UNIVERSITY

A dissertation submitted to

Tongji University in conformity with the requirements for

the degree of Doctor of Philosophy

**The Seismic Response and Functional
Reliability Analysis of Underground Water
Supply Networks**

Candidate: Huiquan MIAO

Student Number: 1410009

School/Department: Civil Engineering

Discipline: Engineering

Major: Civil Engineering

Supervisor: Prof. Jie LI

Assistant Supervisor: A/Prof. Wei LIU

June, 2018

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；学校有权保存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

地下供水管网的抗震防灾是一场人与自然的战争，其重要性不言而喻。地下供水管网和地震动场，构成了这一矛盾的“内因”和“外因”。因此，准确评估内因与外因，以最小的代价赢得战争的胜利，是战略和战术的现实要求。《孙子兵法》云：知己知彼，百战不殆。本课题的研究，就是建立在“知己”“知彼”两个方面的。

第一章回顾并评述了有关地下管网地震反应分析和供水管网抗震功能可靠度研究两方面的研究进展，对不同的研究方法做了详细的分类，分析了其基本原理、发展脉络和优缺点；通过对供水管网抗震功能物理机制的分析指出，地下管网地震反应分析和供水管网抗震功能可靠度评价是管网抗震研究的两大支撑，从而重点以这两个方面展开随后的系列研究工作。

第二章侧重研究管网地震反应分析的外因，即地震动场的分析和建模。首先修改了本梯队建立的工程地震动物理随机函数模型。以此为基础，提出了基于物理机制的工程场地地震动相干函数模型，验证了模型的正确性，并分析了四类不同场地相干函数变化特点。其次，修正了场模型中的幅值谱和相位谱，建立了基于物理机制的随机地震动场模型，使得修改后的模型不仅能反映场地地震波传播的行波效应，还能反映地震波的频散现象。

第三章首先在理论上推导了横向土弹簧的解析解，分析了不同的影响因素，利用已有的试验成果对解析解进行了修正。其次，利用地下管网爆炸模拟地震动试验的成果，验证了地下管网系统建模有限元模型的合理性，并进而利用该模型分析了管网中异形管对管线地震响应的影响。

第四章基于概率密度演化方法，实现了地下管网的随机地震反应分析。同时，利用典型类型管线的随机地震反应结果，对中国地下管线抗震设计规范的相关条文提出了修订建议。

第五章以正常供水管网为基础，实现了对日常供水管网的稳态流和瞬变流分析，进而通过将渗漏模型引入日常管网稳态流和瞬变流分析中，实现了渗漏管网的稳态流和瞬变流分析，并验证了程序的正确性。

第六章首先分析了地下供水管网抗震功能可靠度的评价指标，明确了供水管网抗震功能的物理机制。基于这一物理机制，结合概率密度演化方法，建立了基于瞬变流理论的供水管网抗震功能可靠度评价方法，给出了具体的分析步骤，算例证实了所建议方法的可行性。

第七章以绵竹市区的供水管网为例验证了本文所提出的基于物理机制的供

水管网动态抗震功能可靠度评价方法。建立了有限元模型，利用概率密度演化方法，实现了供水管网的随机地震反应分析，以此为基础，实现了基于瞬变流理论的供水管网抗震可靠度评价，说明了本文所建议理论的工程实用价值。

第八章对本文的主要研究内容作了总结，并对进一步深入研究方向进行了初步的探讨。

本文的创新点特别在于如下三点：（1）以地下管网爆炸模拟地震动试验的成果为基础，验证了地下管网地震反应分析系统建模方法的合理性；（2）实现了地震作用下渗漏管网的瞬变流分析；（3）建立了基于物理机制的供水管网抗震功能可靠度研究方法。

关键词：供水管网，地震动场，随机地震反应，概率密度演化方法，管土相互作用，瞬变流，有限单元法

ABSTRACT

The earthquake resistance and disaster prevention of the water supply networks (WSNs) is a war between human beings and nature. The importance is self-evident. It can be said that WSNs and earthquake fields are the two sides of the war. WSNs are the internal cause of the contradiction while earthquake fields are the external cause. Therefore, to correctly assess the internal and the external causes and win the war with the minimum expenditure is the actual requirement of strategies and tactics. *The Art of War* ever points out that “Know yourself and know your enemy, you will win every war.” All in all, this study focuses on two sides, namely to know oneself (WSNs) and to know the enemy (earthquake fields).

The first chapter firstly reviews the study on the seismic response analysis of buried pipe networks and the seismic reliability research of WSNs. Different methods are classified and their fundamental principles, development sequence, merit, and demerit are summarized. By analyzing the physical mechanism of WSNs to resist earthquakes, it is verified that the seismic response analysis of buried pipe networks and the seismic reliability research of WSNs are two backbones of the seismic resistance study of WSNs. Therefore, the study of this project also focuses on these two sides.

The second chapter concentrates on the external cause, namely the earthquake field. It firstly modifies the physical random function model of ground motions suggested by our research team. Based on that, a new coherence function model of ground motion in engineering sites based on physical mechanism is suggested. Also, the rationality is verified. Then the coherence function in four kinds of sites is analyzed. Then the amplitude spectrum and phase spectrum are modified to establish a new earthquake field model, which cannot only reflect the wave passage effect but also show up the dispersion effects of seismic waves in local sites.

The third chapter firstly analyzed the lateral pipe-soil spring stiffness by wave theory. Different influence factors are discussed. Then the finite element model of buried pipe networks to obtain the seismic response is validated by an artificial earthquake test. The influence of deformed pipes in the network is also discussed by the numerical model.

The fourth chapter realizes the stochastic response analysis of buried pipe networks based on the Probability Density Evolution Method (PDEM). Meanwhile, the Chinese codes are modified according to the numerical results of seismic response of typical pipelines based on the PDEM.

The fifth chapter obtains the steady and transient flow in leaking WSNs after combining with the leakage model with the steady and transient flow analysis method of normal WSNs. Also, the numerical program is verified.

The sixth chapter firstly analyzes the reliability index and the physical mechanism of WSNs to resistant earthquakes. Based on the physical mechanism, a new approach to evaluate the aseismic functional reliability of WSNs is suggested based on the transient flow theory by use of PDEM. Then a small WSN is studied as an example to demonstrate the feasibility of the new method.

The seventh chapter uses the WSN in Mianzhu City as an example to prove the engineering meaning of suggested method. The finite element model is built and the stochastic seismic response of buried pipe network is obtained based on PDEM. Then the seismic functional reliability of the WSN is got based on the transient flow theory, which verifies the engineering value of the new method.

The eighth chapter summarizes the main conclusions of this paper and the problems requiring further studies are discussed.

The innovation of this thesis lies in the following three points: (1) Based on the results of artificial earthquake test, the modeling method of underground pipe network is validated; (2) The transient flow analysis of leaking pipe network under earthquakes is realized; (3) A framework for seismic reliability assessment of water supply networks based on physical mechanism is established.

Key Words: water supply network, earthquake field, stochastic seismic response, reliability, probability density evolution method, pipe-soil interaction, steady flow, transient flow, finite element method

目录

第 1 章 绪论.....	错误!未定义书签。
1.1 引言	错误!未定义书签。
1.2 地下供水管网的震害调查与分析	错误!未定义书签。
1.2.1 地下管网震害的典型模式.....	错误!未定义书签。
1.2.2 地下管网震害的影响因素.....	错误!未定义书签。
1.3 地下供水管网地震反应研究现状	错误!未定义书签。
1.3.1 经验统计法.....	错误!未定义书签。
1.3.2 理论研究方法.....	错误!未定义书签。
1.3.2.1 地下直管线的地震反应分析	错误!未定义书签。
1.3.2.2 地下复杂管线的地震反应分析	错误!未定义书签。
1.3.2.3 地下管网系统的地震反应分析	错误!未定义书签。
1.3.3 试验研究方法.....	错误!未定义书签。
1.3.3.1 静力加载管土相互作用试验	错误!未定义书签。
1.3.3.2 静力加载接口性能试验	错误!未定义书签。
1.3.3.3 动力加载地震现场试验	错误!未定义书签。
1.3.3.4 动力加载现场激振试验	错误!未定义书签。
1.3.3.5 动力加载振动台试验	错误!未定义书签。
1.3.3.6 动力加载离心机试验	错误!未定义书签。
1.4 地下供水管网的抗震功能可靠度研究	错误!未定义书签。
1.4.1 分区评定法.....	错误!未定义书签。
1.4.2 矩方法.....	错误!未定义书签。
1.4.3 MC 数值模拟法	错误!未定义书签。
1.4.4 图论分析法.....	错误!未定义书签。
1.4.5 模糊数学评判法.....	错误!未定义书签。
1.5 本文主要内容	错误!未定义书签。
第 2 章 基于物理机制的随机地震动场模型.....	错误!未定义书签。
2.1 引言	错误!未定义书签。
2.2 场地一点处地震动模型及其改进	错误!未定义书签。
2.2.1 工程地震动的物理随机函数模型.....	错误!未定义书签。
2.2.2 幅值谱参数.....	错误!未定义书签。
2.2.3 相位谱参数.....	错误!未定义书签。
2.3 工程场地地震动随机场的物理模型	错误!未定义书签。
2.3.1 模型介绍.....	错误!未定义书签。
2.3.2 基于物理机制的工程场地地震动相干函数模型.....	错误!未定义书签。

2.3.2.1 工程场地地震动相干函数	错误!未定义书签。
2.3.2.2 相干函数的求解与验证	错误!未定义书签。
2.3.2.3 不同类型场地相干函数	错误!未定义书签。
2.3.2.4 总结	错误!未定义书签。
2.4 场模型存在的问题及其改进	错误!未定义书签。
2.4.1 模型存在的问题	错误!未定义书签。
2.4.2 幅值谱	错误!未定义书签。
2.4.3 相位谱	错误!未定义书签。
2.4.4 修正模型	错误!未定义书签。
2.5 本章小结	错误!未定义书签。
第 3 章 地下管网地震反应分析模型与试验验证	错误!未定义书签。
3.1 引言	错误!未定义书签。
3.2 管土相互作用的进一步研究	错误!未定义书签。
3.2.1 轴向管土相互作用的理论分析	错误!未定义书签。
3.2.2 横向管土相互作用的理论分析	错误!未定义书签。
3.2.2.1 理论推导	错误!未定义书签。
3.2.2.2 影响因素分析	错误!未定义书签。
3.2.2.3 试验修正	错误!未定义书签。
3.3 地下管网地震反应分析模型	错误!未定义书签。
3.4 地下管网计算模型的试验验证	错误!未定义书签。
3.4.1 爆炸模拟地震动试验简介	错误!未定义书签。
3.4.1.1 管网布置	错误!未定义书签。
3.4.1.2 地震动模拟	错误!未定义书签。
3.4.1.3 测试内容	错误!未定义书签。
3.4.2 测试管网的有限元建模	错误!未定义书签。
3.4.2.1 球墨铸铁管建模	错误!未定义书签。
3.4.2.2 球墨铸铁管管线接头建模	错误!未定义书签。
3.4.2.3 弯管建模	错误!未定义书签。
3.4.2.4 三通和四通建模	错误!未定义书签。
3.4.2.5 钢管建模	错误!未定义书签。
3.4.2.6 场地位移输入	错误!未定义书签。
3.4.3 计算结果与测试结果的对比	错误!未定义书签。
3.4.3.1 球墨铸铁管接头变形对比	错误!未定义书签。
3.4.3.2 钢管轴向应变对比	错误!未定义书签。
3.5 异形管的影响分析	错误!未定义书签。
3.5.1 三通对球墨铸铁管接头变形的影响	错误!未定义书签。
3.5.2 四通对球墨铸铁管接头变形的影响	错误!未定义书签。
3.5.3 弯管对钢管变形的影响	错误!未定义书签。

3.5.4 三通对钢管变形的影响.....	错误!未定义书签。
3.6 本章小结	错误!未定义书签。
第 4 章 地下供水管网随机地震反应分析.....	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	错误!未定义书签。
4.2.1 结构随机响应分析的基本物理方程.....	错误!未定义书签。
4.2.2 广义概率密度演化方程.....	错误!未定义书签。
4.2.3 广义概率密度演化方程的求解步骤.....	错误!未定义书签。
4.3 地下供水管网随机地震反应分析	错误!未定义书签。
4.3.1 管网系统物理运动方程.....	错误!未定义书签。
4.3.2 管网随机地震反应分析.....	错误!未定义书签。
4.3.2.1 基本方程	错误!未定义书签。
4.3.2.2 实例分析	错误!未定义书签。
4.3.3 随机地震动作用下管线变形极大值的研究.....	错误!未定义书签。
4.3.3.1 球墨铸铁管线	错误!未定义书签。
4.3.3.2 钢管线	错误!未定义书签。
4.3.4 考虑地震动场随机性的中国规范修正系数.....	错误!未定义书签。
4.3.4.1 中国规范地下管线计算方法	错误!未定义书签。
4.3.4.2 球墨铸铁管线	错误!未定义书签。
4.3.4.3 钢管线	错误!未定义书签。
4.4 本章小结	错误!未定义书签。
第 5 章 基于稳态流和瞬变流理论的供水管网功能分析.....	错误!未定义书签。
5.1 引言	错误!未定义书签。
5.2 供水管网的稳态流分析	错误!未定义书签。
5.2.1 水力计算基本方程.....	错误!未定义书签。
5.2.2 环状管网环方程组水力分析和计算.....	错误!未定义书签。
5.2.2.1 管网环能量方程组	错误!未定义书签。
5.2.2.2 管网环能量方程组的牛顿-拉夫森算法.....	错误!未定义书签。
5.2.2.3 多定压节点的复杂管网求解	错误!未定义书签。
5.2.2.4 求解环能量方程组的哈代-克罗斯算法.....	错误!未定义书签。
5.2.2.5 实例分析	错误!未定义书签。
5.2.3 环状管网节点方程组水力分析和计算.....	错误!未定义书签。
5.2.3.1 给水管网节点压力方程组	错误!未定义书签。
5.2.3.2 给水管网节点压力方程组的牛顿-辛普森算法...	错误!未定义书签。
5.2.3.3 给水管网节点压力方程组的哈代-克罗斯算法..	错误!未定义书签。
5.3 渗漏管网的稳态流分析	错误!未定义书签。
5.3.1 渗漏管网功能分析的基本方法.....	错误!未定义书签。
5.3.2 渗漏供水管网渗漏点简化定位研究.....	错误!未定义书签。

5.4 供水管网的瞬变流分析	错误!未定义书签。
5.4.1 单管中的瞬变流求解.....	错误!未定义书签。
5.4.1.1 单管中的瞬变流.....	错误!未定义书签。
5.4.1.2 特征线解法.....	错误!未定义书签。
5.4.1.3 有限差分方程组.....	错误!未定义书签。
5.4.1.4 实例分析.....	错误!未定义书签。
5.4.2 复杂管网中的瞬变流求解.....	错误!未定义书签。
5.4.2.1 实际管网中的瞬变流.....	错误!未定义书签。
5.4.2.2 复杂管网中管线的分段问题.....	错误!未定义书签。
5.4.2.3 连续管线的接头连接条件.....	错误!未定义书签。
5.4.2.4 三通处的连接条件.....	错误!未定义书签。
5.4.2.5 管网中的四通连接.....	错误!未定义书签。
5.4.2.6 实例分析.....	错误!未定义书签。
5.5 渗漏管网的瞬变流求解	错误!未定义书签。
5.5.1 渗漏点的边界条件.....	错误!未定义书签。
5.5.2 存在渗漏的三通连接模型.....	错误!未定义书签。
5.5.3 存在渗漏的四通连接模型.....	错误!未定义书签。
5.5.4 实例分析.....	错误!未定义书签。
5.6 稳态流和瞬变流的对比	错误!未定义书签。
5.7 本章小结	错误!未定义书签。
第 6 章 供水管网抗震功能可靠度分析.....	错误!未定义书签。
6.1 引言	错误!未定义书签。
6.2 地下供水管网抗震功能可靠度评价指标	错误!未定义书签。
6.3 供水管网抗震功能的物理机制分析	错误!未定义书签。
6.4 基于瞬变流理论的供水管网抗震功能可靠度分析	错误!未定义书签。
6.4.1 随机因素的分析.....	错误!未定义书签。
6.4.2 供水管网动态水压求解.....	错误!未定义书签。
6.4.3 供水管网的抗震功能可靠度.....	错误!未定义书签。
6.4.4 系统整体抗震功能可靠度.....	错误!未定义书签。
6.4.5 分析步骤.....	错误!未定义书签。
6.4.6 案例分析.....	错误!未定义书签。
6.4.6.1 案例概括.....	错误!未定义书签。
6.4.6.2 管网随机地震反应.....	错误!未定义书签。
6.4.6.3 节点抗震功能可靠度.....	错误!未定义书签。
6.4.6.4 系统整体抗震功能可靠度.....	错误!未定义书签。
6.5 本章小结	错误!未定义书签。
第 7 章 工程案例.....	错误!未定义书签。
7.1 引言	错误!未定义书签。

7.2 案例介绍	错误!未定义书签。
7.2.1 自然地理概况.....	错误!未定义书签。
7.2.2 供水管网概况.....	错误!未定义书签。
7.3 供水管网建模与随机地震反应分析	错误!未定义书签。
7.3.1 供水管网系统建模.....	错误!未定义书签。
7.3.2 随机地震动场生成.....	错误!未定义书签。
7.3.3 管网随机地震反应分析.....	错误!未定义书签。
7.4 基于瞬变流理论的供水管网抗震功能可靠度分析	错误!未定义书签。
7.4.1 节点动态水压求解.....	错误!未定义书签。
7.4.1.1 瞬变流理论的节点稳态水压求解	错误!未定义书签。
7.4.1.2 小渗漏情况下节点动态水压求解	错误!未定义书签。
7.4.1.3 大渗漏情况下节点动态水压求解	错误!未定义书签。
7.4.1.4 管网节点海拔高度的再讨论	错误!未定义书签。
7.4.2 系统抗震功能可靠度.....	错误!未定义书签。
7.4.2.1 节点水压概率密度	错误!未定义书签。
7.4.2.2 典型节点动态抗震功能可靠度	错误!未定义书签。
7.4.2.3 系统节点抗震功能可靠度	错误!未定义书签。
7.4.2.4 系统整体抗震功能可靠度	错误!未定义书签。
7.5 本章小结	错误!未定义书签。
第 8 章 结论与展望.....	错误!未定义书签。
8.1 结论	错误!未定义书签。
8.2 展望	错误!未定义书签。
参考文献.....	错误!未定义书签。
附录 A 地下管线动力反应评估.....	错误!未定义书签。
附录 B 中日美三国地下管线抗震设计规范对比.....	错误!未定义书签。
附录 C 绵竹市供水管网建模数据与计算结果.....	错误!未定义书签。
附录 D 系统可靠性分析的中国哲学探究.....	错误!未定义书签。
致谢.....	错误!未定义书签。
个人简历、在读期间发表的学术论文与研究成果.....	错误!未定义书签。