

申请 同 济 大 学 博 士 学 位 论 文

生命线工程网络系统抗震可靠度分析方法研究

(国家杰出青年科学基金项目 编号: 59825105)

Algorithm for Seismic Reliabilities of Lifeline Systems



博士研究生：何 军

指导教师：李杰 教授

专 业：结构工程

同 济 大 学 土木工程学院

建筑工程系

二 〇 〇 二 年 三 月

**A Ph.D. Dissertation
Presented to the Academic Degree Committee
of Tongji University**



Algorithm for Seismic Reliabilities of Lifeline Systems

(Sponsored by National Outstanding Youth Funds No: 59825105)

**In Candidacy for the Doctoral Degree
in Structure Engineering**

by

Jun He

Under the Supervision of

Professor Jie Li

**Department of Building Engineering
Tongji University**

March 2002

摘要

针对生命线工程网络系统的三个主要特点：网络性、复杂性和地震失效相关性，本文致力于解决生命线工程网络系统抗震可靠度分析中的两个关键问题：网络系统可靠度计算的复杂性问题和相关失效网络系统的可靠度计算问题。

对于第一个问题，本文提出以降低空间复杂性为优先的求解原则。提出这一原则的出发点是避开由于网络系统完备最小路集（或完备最小割集）非多项式增长而带来的算法存贮空间非多项式增长问题，即网络理论的 NP 完全问题。遵循这一求解原则，在失效独立假定下，本文提出了网络系统可靠度计算的递推分解算法。递推分解算法是在布尔变量运算和 De.Morgan 定理基础上建立的，它提供了一个直接获得网络系统不交最小路的递推分解格式，从而避开了求网络系统完备最小路集（或完备最小割集）过程中的 NP 难题。在计算中，采用循环存贮方式存贮未累计的不交最小路，使得算法的存贮空间与网络规模是线性关系，能够保证大型复杂网络系统可靠度的可计算性。

由于不交最小路集的 NP 完全性质，对于大型复杂工程网络系统，算法的递推计算过程还存在计算的时间复杂性问题。针对这一问题，本文采用 Bonferroni 不等式控制算法的计算时间。Bonferroni 不等式要求同步获得网络系统的不交最小割，在递推分解算法中，这一工作是通过在每一级递推分解中进行网络连通性判断来实现的。当嵌入 Torrieri 公式后，递推分解算法可以有效地进行大型独立失效边权、点权和一般赋权工程网络系统的可靠度计算。

在递推分解算法基础上，本文研究的第二个问题，转化为组成不交最小路（或不交最小割）的布尔变量串的联合概率的有效计算问题。为此，论文建立了两类隐式计算公式：基于条件可靠性指标的多正态变量积分计算公式和基于 K & G 假定的布尔变量串联合概率计算公式。其中，前者适用于一般工程网络系统，后者适用于元件具有等失效率率和等失效相关性质的工程网络系统。由于考虑了递推分解过程产生的布尔变量间的负相关情况，这两类隐式计算公式可以直接嵌入递推分解算法和 Bonforrieni 不等式的具体计算之中。因此，初步建立了大型生命线工程网络系统抗震可靠度分析的统一算法。

结合上述两个主要研究问题，本文还研究了大型网络系统的存贮问题、网络系统最小路和最小割的有效搜索问题、多源点多终端网络系统可靠度的简化计算问题、相关失效对工程网络系统可靠性的影响问题和地震危险性一致原则下生命线工程系统的可靠度分析问题等。

应用上述理论研究成果，本文较为详细地进行了两类典型城市生命线工程系统：河南省电力系统和上海市浦西区主区域供水主干管网系统的抗震可靠度分析。

关键词：生命线工程；系统；抗震可靠度；计算复杂性；相关失效

Abstract

In the seismic reliabilities analysis of lifeline systems, the computational complexity of the network reliability analysis and the evaluation of the intersection of probabilities of several modes are two major difficulties.

One early algorithmic approach to network reliability analysis was to start by enumerating all shortest pathsets or shortest cutsets, and then to evaluate iteratively an expression for system reliability. It is known that it must lead to the NP-hard problem, i.e., the number of shortest pathsets or shortest cutsets must to be non-polynomial in the size of the network. To avoid enumerating all shortest pathsets or shortest cutsets, this paper presents a new network reliability analysis technique called recursive decomposition algorithm (RDA) by assumption of s-independent. By RDA, disjoint shortest paths or disjoint shortest cuts can be obtained directly one by one, and the reliability or the failure probability of a network can be evaluated through accumulating probabilities of disjoint shortest paths or disjoint shortest cuts respectively. Considering a large lifeline system, there usually be too many disjoint shortest paths or disjoint shortest cuts to be computed within satisfying computer run time, the Boferroni inequality may be used to obtain a narrow reliability bound of the lifeline system.

For lifeline systems with correlation failure, the evaluation of the intersection of probabilities of disjoint shortest paths and disjoint shortest cuts in RDA is needed consideration in seismic reliability analysis. This paper proposed two methods to do it: 1) the integration of multivariate normal distribution based on the conditional reliability indexes, and 2) the evaluation of the intersection of probabilities of several Boolean variables based on K & G assumptions. The first applies for general lifeline systems, and the second can only be used for lifeline systems with equi-failure and equi-correlation components. These two methods can all be embedded into RDA to analyze seismic reliability of large lifeline systems with correlation failure.

Besides above two important studies, the paper analyzes several related problems, and organized in six chapters. In chapter 1 latest study developments of the subject are briefly introduced. Rudimentary knowledge of Boolean simplification and system reliability analysis is in chapter 2. The analysis of computational complexity, the principle of the new algorithm RDA and efficiency of the new method are described in detail in chapter 3. Two methods to evaluate the intersection of probabilities of disjoint shortest paths or disjoint shortest cuts related to RDA, and the correlation failure's influences upon the system reliability are described in detail in chapter 4. Two typical lifeline systems, Henan power electric system and Shanghai supply water pipeline system, are analyzed in chapter 5. The main findings of the study are summarized in chapter 6.

Keywords: lifeline system, seismic reliability, computational complexity, correlation failure

目 录

第一章 绪论	1
1.1 生命线工程的主要特点.....	1
1.2 生命线工程系统抗震可靠性研究的基本内容和关键问题.....	2
1.3 生命线工程系统抗震可靠性研究现状与进展.....	4
1.3.1 解决算法复杂性的研究及进展.....	4
1.3.2 相关失效网络可靠度的研究及进展.....	7
1.4 本课题研究的意义.....	10
1.5 论文的组织.....	10
第二章 系统可靠性分析基础知识	12
2.1 图及图的连通性.....	12
2.1.1 图的定义.....	12
2.1.2 图在计算机里的存贮.....	13
2.1.3 图的连通性.....	14
2.1.4 DFS 和 BFS 搜索法.....	15
2.2 基本布尔代数运算.....	16
2.2.1 变量运算.....	16
2.2.2 布尔代数的基本定律.....	17
2.2.3 布尔代数的主要定理.....	18
2.3 系统可靠度分析基础.....	20
2.3.1 结构函数.....	20
2.3.2 最小路与最小割.....	21
2.3.3 对偶与互补.....	21
2.3.4 串联系统与并联系统.....	21
第三章 失效独立系统的抗震可靠度分析	24
3.1 系统可靠度计算的复杂性.....	24
3.1.1 系统可靠度的经典计算方法.....	24
3.1.2 算法的复杂性及已有算法分析.....	30
3.1.2.1 算法的复杂性.....	30
3.1.2.2 已有算法分析.....	30
3.2 递推分解算法.....	31
3.2.1 边权网络系统.....	31
3.2.2 点权网络系统.....	37
3.2.3 一般赋权网络系统可靠度.....	40
3.3 多源点多汇点系统可靠度计算.....	43
3.4 小结.....	45

第四章 相关失效系统抗震可靠度分析	47
4.1 相关失效系统及系统可靠度.....	47
4.1.1 相关失效概念的解析.....	47
4.1.3 相关失效系统可靠度分析中的关键问题.....	48
4.2 相关失效系统可靠度的分析方法 (I)	
—基于可靠度指标的分析.....	48
4.2.1 已有分析方法简介.....	49
4.2.1.1 串联系统可靠度.....	49
4.2.1.2 并联系统可靠度.....	49
4.2.1.3 一般系统可靠度.....	50
4.2.2 相关失效网络系统可靠度的近似算法.....	50
4.2.2.1 系统的结构函数及概率表示.....	50
4.2.2.2 多正态变量积分的二阶矩近似计算.....	51
4.2.2.3 相关系数的确定.....	56
4.2.2.4 系统可靠度的窄界限.....	59
4.2.2.5 算例.....	59
4.3 相关失效系统可靠度的分析方法 (II)	
—基于失效率的分析.....	61
4.3.1 既有分析方法简介.....	61
4.3.2 Kyung C.Chae & Gordon M.Clark 模型及应用.....	63
4.3.3 基于 Kyung C.Chae & Gordon M.Clark 假定的递推分解算法.....	66
4.3.3.1 元件均为失效状态的不交事件联合概率的计算.....	67
4.3.3.2 元件的状态有安全也有失效的不交事件联合概率的计算.....	67
4.3.3.3 结构可靠性指标 β_i 与 K & G 假定中参数 p_j 的转换.....	69
4.3.4 算例.....	70
4.4 独立失效和相关失效对系统可靠度的影响.....	72
4.4.1 串联系统.....	72
4.4.2 并联系统.....	73
4.4.3 一般系统 (网络系统).....	73
4.5 小结.....	74
第五章 生命线工程系统抗震可靠度分析实例	76
5.1 河南省电力工程系统抗震可靠度分析	
—一点权网络系统可靠度分析.....	76
5.1.1 河南省电力系统的网络模型及存贮.....	76
5.1.2 可靠度计算.....	80
5.1.3 结果分析.....	80
5.2 上海市浦西供水管网系统抗震可靠度分析	
—一边权网络系统可靠度分析.....	81
5.2.1 上海市浦西供水管网系统的网络模型及存贮.....	81
5.2.2 可靠度计算.....	82

5.2.3 结果分析.....	82
5.3 小结.....	92
第六章 结束语.....	93
参考文献.....	95
本课题研究成果.....	102