

·学科进展·

# 复杂生命线工程系统的地震反应分析与行为控制

李 杰\*

(同济大学建筑工程系,上海 200092)

**[摘 要]** 生命线工程是维系现代城市功能或区域经济功能的基础性工程设施。对生命线工程中关键科学问题的研究,正在成为促进现代工程设计理论发展的基本推动力量。本文对生命线工程系统的研究对象与目标作出了基本的界定。在此基础上,对复杂生命线工程系统地震反应分析与行为控制研究中的若干问题进行了分析和前瞻。

**[关键词]** 生命线,地震反应,分析,控制

## 前 言

生命线工程的概念是20世纪70年代中期提出来的<sup>[1]</sup>。生命线工程研究的倡导者们认为:在现代城市中,能量、供水、交通与通讯系统一般以网络方式构成且在空间上覆盖一个很大的区域范围。这些系统在灾害袭击下的行为直接决定着—个城市是否可以保持正常功能。因此,上述系统被统称为城市生命线。早期的生命线工程研究工作,大多集中在地震工程领域,因而又称为生命线地震工程。

经过二十余年的发展<sup>[2-4]</sup>,人们对于生命线工程的理解已经建立在更为广阔背景下。可以定义:生命线工程是指维系现代城市功能或区域经济功能的基础性工程设施。这一定义不仅涵盖了早期的城市生命线工程系统,而且在空间上扩展到区域经济所覆盖的范围。这样,区域电力系统、区域交通、通讯系统、输油、供气系统等自然也成为生命线工程的研究对象。从研究对象构成形式的共性出发,完整的生命线工程研究应该在3个层次上展开研究工作:生命线工程结构、生命线工程网络、复合生命线工程系统。生命线工程研究的基本目的,是实现现代工程系统的防灾设计与耐久性控制。

从单体生命线工程结构的研究到复合生命线工程系统的研究,这一跨度本身就意味着复杂性的引入。简而言之,现代生命线工程系统研究中的复杂

性包括3个基本的侧面:结构损伤的随机演化、大型网络的引入、生命线工程系统的相互作用。

## 1 生命线工程结构的非线性行为分析

核电站、大型桥梁、现代金融中心等都是典型的生命线工程核心建筑,由于其地位的特殊性,这些结构的设计应该比普通工程结构的设计更为精细而科学。为了在不同功能水平上全面、准确地把握工程结构的力学性能与结构行为,必须考察非线性行为的随机演化过程。

经典的结构非线性分析是建立在确定性的理念基础上的。有限元方法与数值计算技术的发展,使得人们得以追踪与考察具体结构在确定性荷载下的非线性演化过程。然而,如果我们把视野从抽象的理论境界扩展到现实工程领域,立刻可以发现大量的不确定性的存在。仔细分析可以发现,即使仅仅在具有统计规律性的现象范围内考察,只要结构或外部作用之一具有随机性,就必然导致具有随机演化特征的非线性行为。遗憾的是,关于结构非线性行为的随机演化规律人们还知之甚少,甚至还没有找到有效的途径去分析、研究这些规律<sup>[5-7]</sup>。

现实需求与理论水平之间的巨大反差,使得我们很难等闲视之。本文作者自80年代末开始从随机结构分析与建模的角度探讨与研究上述问题,取得了系列的研究进展<sup>[8]</sup>,基本建立了随机结构分析

\* 1998年度国家杰出青年科学基金获得者。  
本文于1999年3月11日收到。

的正交分解方法和随机结构建模的基本框架,试图在结构层次研究非线性行为的随机演化寻求一条新的路径。在已经展开的国家杰出青年科学基金(项目编号 59825105)研究计划中,生命线工程结构的随机损伤演化与建模理论构成了整体研究中的一个重要组成部分。这一组成部分的研究内容主要包括:(1)材料损伤本构关系研究;(2)非线性随机结构地震反应分析;(3)生命线工程结构的损伤建模与损伤识别。

建立生命线工程结构的随机损伤演化分析与建模理论,其目的不仅在于为全面、准确地把握生命线工程结构的灾害力学行为提供手段,同样具有意义的是,这一理论将为生命线工程网络中的节点性能分析与设计提供基础性的支持。

## 2 大型生命线工程网络地震反应的高效分析方法

虽然生命线工程网络的地震易损性分析在 70 年代末至 80 年代初即已见端倪<sup>[9-11]</sup>,但在过去 20 年中,因为一些关键性问题难以解决而使理论与技术水平长期止步不前。在系统分析范围内,这些问题包括:(1)大范围内地震动场的确定;(2)网络可靠性分析中相关失效问题的处理;(3)大型网络分析中的组合爆炸问题。

由于上述问题,在很长一个时期里,人们对于生命线工程网络的地震反应分析尚停留在中小型网络的数值模拟水平上。

1994 年,国家自然科学基金重大项目“城市与工程减灾基础研究”正式启动,经 4 年努力,在埋地管网的分析方面,尤其是在上述第一个问题的研究中,取得了重要进展<sup>[12]</sup>。但对上述第 2 与第 3 项问题,仍不得不引用简单相关假定与 Monte-carlo 方法作近似处理。可以认为,大型生命线工程网络的

震反应分析已成为制约生命线工程系统研究发展的瓶颈问题之一。

本文作者在近年来的研究工作中发现,从随机结构分析的观点出发,可以顺理成章地解决网络可靠性分析中的相关失效问题。而对于大规模集成网络,则可以应用系统递阶综合思想与计算机并行计算技术,实现不同层次上的高效分析技术。从现实工程背景考察,若可以解决 600—800 个节点的大型失效相关网络的可靠性分析与优化问题,则可以理想地为 200 万人口左右的特大型城市生命线工程网络提供防灾设计的分析工具。

基于上述研究背景,我们今后 3 年在生命线工程网络方面将要开展的研究工作包括:(1)基于随机结构分析理论的地震动随机场研究;(2)大型生命线工程网络地震反应分析方法与行为控制;(3)关于供水网络与供电网络的示范性研究。

上述研究的预期目标是达到 600 个节点左右的大型复杂网络考虑相关失效背景的地震反应高效分析水平。从而在生命线工程网络地震反应分析理论与技术水平上取得实质性的进步。

## 3 复合生命线工程系统地震反应仿真与系统行为优化

以 1985 年墨西哥地震为开端,近十余年来影响到现代城市的强烈地震灾害都表现出一个明显的趋向:生命线工程之间的耦联作用与单一生命线工程系统的功能具有同等重要的作用(表 1)。生命线工程之间的关联性或共同作用,给生命线工程研究提出了新的挑战。

在正式文献报导中,国际上 1996 年才开始注意到生命线工程相互作用的问题<sup>[4]</sup>。在 O'rouke 的研究中,分析总结了强烈地震中城市生命线系统的震害及其相互影响;但对如何分析与反映生命线工

表 1 近年来城市地震生命线工程的破坏及相互影响

城市地震	供水系统	供气系统	供电系统
1995 年阪神大地震 ( $M_w = 6.9$ )	主干供水管网发生 1 610 处破坏; 110 万用户断水,一周后仅修复二分之一,全部修复持续两个半月;缺水严重阻碍了救火	85.7 万户用户被中断供气;中压线路破坏 106 处;主干供气线路破坏 5 190 处;修复工作持续了 3 个月	100 万用户断电;修复工作持续一周; 275 kV 和 77 kV 变电站破坏严重;过早恢复供电加重了地震次生火灾(供气系统破坏)
1994 年洛杉矶大地震 Northridge( $M_w = 6.7$ )	1400 处需修复,其中 100 处在主干供水管网上	在全系统范围内漏气高达 15 万处;供气系统破坏引起火灾	110 万用户断电;破坏集中在 500 kV 和 230 kV 变电站
1989 年旧金山大地震 Loma, Prieta( $M_w = 6.9$ )	供电中断严重影响了旧金山市的供水;供水管网的破坏严重延缓了次生火灾的扑救;	在全系统范围内漏气达 1 000 处;软土地基上的油罐大量破坏	由于输电站破坏,140 万用户断电; 500 kV 和 230 kV 电站破坏最严重

程之间相互作用的问题则未进行进一步深入研究。本文作者自1990年开始进行城市复合生命线工程系统地震反应仿真实理论的研究探索,在国家自然科学基金(1991—1993)和原国家科委高技术基础研究基金(1993—1995)的连续支持下,取得了一系列研究进展<sup>[13—15]</sup>。通过创造性地应用离散事件动态系统理论,成功地实现了时-场域综合建模。结合典型城市的防灾基础研究,进行了具有实用化意义的相关研究。现有研究表明:城市复合生命线工程系统地震反应仿真技术可以理想地为城市生命工程的改造决策、城市灾害应急反应计算机决策支持系统、城市生命线工程规划与设计提供基础性的理论与技术支持。

事实上,城市复合生命线工程系统的地震反应仿真与系统行为优化的研究还向人们展示了一个诱人的前景:在实验室环境内模拟、分析、研究大尺度范围内具有综合性特征的城市及区域地震灾害。由于地震灾害的稀有性、强烈危害性与不可重复性,这种前景就更加具有价值与魄力。为了给这一前景奠定理论基础,有必要深入进行下列研究:(1)多系统综合时-场域模型的规范化建模工具;(2)MRME系统仿真与仿真统计理论;(3)系统行为优化与行为控制;(4)与地理信息系统(GIS)的结合。

从城市与工程防灾的现实需求分析,通过上述研究,若可以初步在整体上实现覆盖100 km<sup>2</sup>区域范围内城市复合生命线工程地震反应的仿真分析能力,就可以初步建成城市地震灾害仿真实验室。目前,在国际上还没有这种性质与规模的实验室。

#### 4 结 语

近20年来关于生命线工程的研究进展表明:防灾工程研究正在循着单体结构、工程系统、复合工程系统的方向逐步向前迈进。人类对于各类自然灾害的研究正在表现出更强的综合能力。通过更为科学地研究与改善自己的生存环境,人类能够促使生命线工程系统在灾害袭击下仍有极大的潜力发挥正常功能,从而保障社会与经济生活的正常运行。复杂生命线工程系统地震反应分析与行为控制的研究,则构成这一历史进程中的一个必要环节。

#### 参 考 文 献

- [1] Duke C, Moran C F. Guidelines for evolutions of lifeline earthquake engineering, Proceeding of U. S. National Conference on Earthquake Engineering. 1975, 367—376.
- [2] Hall W J. Lifeline earthquake engineering at the turn of the century, Proceeding of 3rd U. S. Conference on Lifeline Earthquake Engineering. 1991, 1—16.
- [3] Katayama T. Recent developments in lifeline earthquake engineering, Proceedings of Tenth World Conference on Earthquake Engineering, 1992, 6575—6581.
- [4] O'rouke T D. Lessons learned for lifeline engineering from major urban earthquake, Proceedings of Eleventh World Conference on Earthquake Engineering, 1996, Paper No. 2172.
- [5] Bazant Z P. Damage and plasticity in microplane theory. International Applied Mechanics, 1997, 34(29):3807—3835.
- [6] Carmeliet J, Hens H. Probabilistic nonlocal damage model for continua with random field properties, Journal of Engineering Mechanics, 1994, 120(10): 2013—2027.
- [7] Lin Y K et al. Methods of stochastic structural dynamics, Structural Safety, 1986, (3):167—194.
- [8] 李杰. 随机结构系统—分析与建模. 北京:科学出版社,1996, 297.
- [9] Ioyama R, Katayama T. Practical Performance evaluation of water supply networks during seismic disaster, Lifeline Earthquake Engineering—the Current State of Knowledge 1981, 111—126, American Society of Civil Engineers.
- [10] Shinozuka M, Tan R Y, Koike T. Serviceability of water transmission systems under seismic risk, Lifeline Earthquake Engineering—the Current State of Knowledge. 1981, 97—110, American Society of Civil Engineers.
- [11] Whitman R V, Hein K H. Damage probability for a water distribution system, The Current State of Knowledge of Lifeline Earthquake Engineering, 1977, 410—423, American Society of Civil Engineers.
- [12] 胡聿贤,李小军等. 生命线工程系统地震可靠性. 国家自然科学基金“八五”重大项目“城市与工程减灾基础研究”总结报告集,1998,126—151.
- [13] Li J. A Research on the simulation control model of earthquake disaster field, Proceedings of Tenth World Conference on Earthquake Engineering. 1992, 6019—6023.
- [14] Li J. Earthquake response simulation and simulation-based control of combine engineering system. In: New Developments in Structural Engineering, China Architecture and Building Press. 1996a, 58—63.
- [15] 李杰. 复合工程系统灾害反应分析与系统控制. 自然灾害学报,1997,6(3):1—9.

## BEHAVIOR CONTROL AND EARTHQUAKE RESPONSE ANALYSIS OF COMPLEX LIFELINE SYSTEMS

Li Jie

(Building Engineering Department, Tongji University, Shanghai 200092)

**Abstract** Lifeline systems are infrastructures that maintain modern city's function or economic function of a district. The researches on key science problems in lifeline systems are forming basic motive forces to develop engineering design theory. This paper discusses the research scope and target of lifeline systems. Based on the discussion, a serious of important problem dealt with the research of behavior control and earthquake response analysis of complex lifeline systems are analyzed and suggested.

**Key words** lifeline, earthquake response, behavior control, analysis

·资料·信息·

### “量子信息学基础研究”论坛在京举行

1999年8月9—11日,国家自然科学基金委员会“21世纪核心科学问题论坛”——“量子信息学基础研究”论坛在北京召开。来自国内十多所高等院校和研究所的40余位专家学者参加了论坛研讨。国家自然科学基金委员会副主任周炳琨院士、山西大学校长彭坤墀教授、中国科学技术大学郭光灿教授分别主持了论坛的大会报告和分组讨论。

会议认为,目前量子信息学研究在国际上刚刚起步,我国已开展了这一崭新学科的研究,并且取得了相当好的成果,在某些方面达到国际领先水平,初步形成了一支具有较高水平的理论和实验研究队伍,具有在这一新兴学科领域参与国际竞争的一定实力。因此将量子信息学基础研究作为国家自然科学基金“十五”优先资助领域非常及时和必要。建议今后开展以下三方面的研究工作:

#### 1. 量子信息学的基础理论

主要研究方向为:(1)量子信息学的物理基础;

(2)量子编码;(3)量子算法;(4)量子信息论等

#### 2. 量子通信

关键科学问题为:(1)量子密码及新型量子安全体系的研究;(2)量子隐形传态(Teleportation)的理论和实验研究;(3)量子概率克隆的实验研究。

#### 3. 量子计算机的基础实验研究

通过核磁共振(NMR)量子计算、囚禁离子量子计算、腔量子电动力学量子计算、固体量子逻辑器件的实验研究及其他新的量子计算方案,探索并研究合适的物理体系,在实验上达到以下目标:(1)实现对单个量子比特任意操作和两量子比特受控非操作等基本量子逻辑门;(2)研制可规模化的量子逻辑网络;(3)验证量子算法、量子编码等基本过程;(4)实现对真实量子系统演化的量子模拟,并解决实际问题。

(政策局 供稿)