

# 城市震害预测虚拟仿真系统研究\*

王东明

(中国地震灾害防御中心, 北京 100029)

**摘要:** 研究并提出了利用虚拟仿真技术实现城市震害预测结果展示的技术方法和思路, 描述了城市震害预测虚拟仿真系统需求、功能设计及结构框架。为震害预测更好服务于城市减灾、服务于民众防灾避险意识的提升等提供有效的技术支撑, 具有较好的应用前景。

**关键词:** 地震灾害; 震害预测; 虚拟仿真系统; 地理信息系统

**中图分类号:** P315.9

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000-0666(2013)01-0098-05

## 0 前言

从2008年起, 全球陆续发生了汶川8.0级地震、海地7.3级地震、智利8.8级地震、玉树7.1级地震、日本9.0级特大地震等重大地震事件, 给灾区民众造成了巨大的灾难。因此, 人类必须面对这种突发性极强、危害性极大、波及面积极广的自然灾害, 并且积极通过研究地震灾害的成因和时空分布规律来寻求减轻地震灾害损失的途径。我国是世界上遭受地震灾害最为严重的国家之一。建国60多年来, 随着经济建设的飞速发展, 城市化进程不断加速。有效地评定城市的地震危险性、人工建筑物的抗震能力、防震减灾薄弱环节、地震应急处置能力、紧急救援能力、民众的防震避险意识、自救群救能力等(王东明, 2009; 孙柏涛等, 2003, 2007, 2009)是制定针对性强的地区地震对策的基础, 能促进“最大程度减轻地震灾害损失”这一防震减灾根本目标的实现。

震害预测工作就是在烈度区划图、地震危险性分析和地震小区划的基础上, 对预测区域内的工程结构在未来地震中的震害状态和震害分布以及由此导致的人员伤亡和经济损失进行分析和模拟。鉴于震害预测工作的重要性, 我国防震减灾的重要法律法规及文件中均给出了明确要求, 汶川地震后新修订的2009年5月1日起施行的《中

华人民共和国防震减灾法》第十三条中规定“编制防震减灾规划, 应当遵循统筹安排、突出重点、合理布局、全面预防的原则, 以震情和震害预测结果为依据”。2010年下发的《国务院关于加强防震减灾工作的意见》(国发〔2010〕18号)中明确提出“进一步做好全国地震区划工作, 尽快完成地震重点监视防御区县级以上城市的地震小区划和震害预测”。

目前震害预测结果都是采用文字、图形、表格等方式进行表达, 难以充分反映预测区域的建筑物震害的实体特征, 宏观震撼力表现不足, 造成预测结果难以被行政管理者及民众所接受, 影响震害预测的有效应用。笔者研究和探讨了如何利用虚拟仿真技术, 研制基于虚拟仿真技术的城市震害预测系统, 为城市减灾及规划、民众防灾避险宣教等提供有效的技术支撑, 是未来震害预测工作的发展方向。

所谓虚拟现实(Virtual Reality, 简称VR), 并非真实的世界, 而是一种可交互的环境, 从本质上讲, 虚拟现实是人与世界交互的计算机接口。仿真(simulation)技术, 或者称模拟技术, 在人们不断深化认识自然界客观规律的历程中一直扮演非常重要的角色。虚拟仿真是现代仿真技术的典型代表(肖田元等, 2000), 在航天、航空、军事、建筑、交通、医疗、教育、娱乐、艺术、体育、模拟训练、综合防灾等领域得到广泛的成功

\* 收稿日期: 2012-10-17.

基金项目: 地震科技星火计划(XH1034)、地震行业科研专项项目(201208019)和国家自然科学基金(51208479)共同资助。

应用 (Pomara *et al*, 2011; Buchali *et al*, 2001; Bellet *et al*, 2012; Boukerche *et al*, 2005)。地理信息系统 (GIS) 是目前运用最广泛的空间处理技术, 将仿真系统构架在 GIS 平台之上将能更加形象地再现灾害的全过程。

城市震害预测虚拟仿真系统正是架构在虚拟仿真技术和 GIS 技术的基础之上, 本文将重点介绍该虚拟仿真系统的基本构架与技术实现。

1 系统框架

城市震害预测虚拟仿真系统应该满足如下总体功能需求: 建立为震害预测研究服务的地理信息数据库 (包括空间数据库和属性数据库), 具有城市的基本地理信息, 并能够对其进行编辑和修改; 对城市所在地区进行地震危险性分析, 确定未来发生的地震对这一地区的影响程度, 得到地震的影响场; 分别对城市的各类建筑物进行易损性分析, 为地震损失评估提供基础资料; 具有对建筑物震害的经济损失和人员伤亡进行预测的功能; 具备对信息的查询、统计、打印等功能, 为震害应急决策、城市规划、建设和综合管理提供服务。

城市震害预测虚拟仿真系统架构宏观上可分为 4 层 (图 1):

(1) 数据层。该层提供了底层数据的存储管理功能, 包括收集和整理各种与城市震害预测密切相关的空间和非空间数据, 存储和虚拟仿真相关的三维震害模型数据、典型震害特征数据等, 通过对数据的有效组织和管理, 进而为仿真中心模块提供必要的数据源。

(2) 支持层。该层提供对底层数据的读写访问接口以及设备访问接口功能。

(3) 功能层。该层为系统提供各种功能, 包括仿真、场景数据管理、虚拟现实 (数据调用、渲染与优化展示) 等功能模块。其中处在仿真中心的仿真模块是整个虚拟仿真的核心模块, 将完成被预测城市的建筑物、生命线等工程结构的易损性分析及其在空间上的分布模拟 (调用 GIS 的相关分析功能); 虚拟现实模块则将仿真模块给出的仿真结果进行虚拟环境构建。

(4) 应用层。一切仿真过程都是为结果服务

的, 该层主要实现了系统功能层的各种模块功能, 仿真中心在完成每一次仿真之后都会输出相应的结果, 这些结果包括被预测城市在设定地震下建筑及生命线等工程结构的震害状态及分布、损失情况、应急救援辅助决策等, 同时, 系统允许根据实际需要自动构建的虚拟环境进行二次编辑。

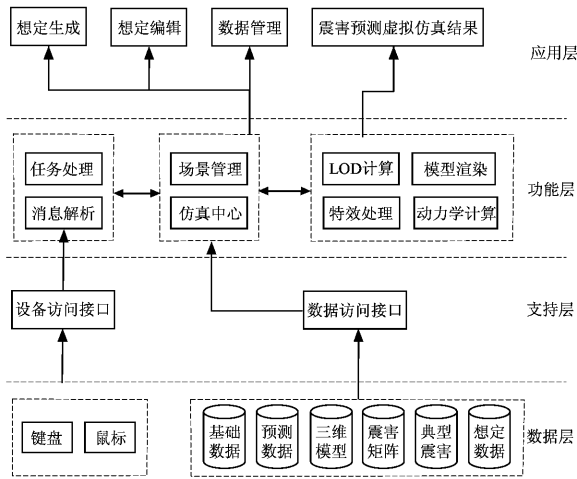


图 1 城市震害预测虚拟仿真系统总体结构

Fig. 1 General structure of urban earthquake damage prediction virtual simulation system

2 仿真数据库

数据是一切系统运行的基础, 没有数据就构不成一个完备的系统。城市震害预测虚拟仿真系统的数据量多面广, 如图 1 数据层所示, 包括:

(1) 基础数据。地理信息空间数据 (基础地理图、地形图、专题地图有关的属性数据)、建 (构) 筑物调查 (含普查和详查数据)、生命线工程调查、地震次生灾害源调查、社会环境及经济统计资料、地震目录、地震地质灾害资料等。(2) 预测数据。主要是通过震害预测及相关研究得到的结果数据, 由地震危险性分析、建 (构) 筑物震害预测、生命线工程震害预测、地震次生灾害源影响评估、人口与经济损失估计和防震减灾对策等结果数据构成。(3) 三维模型数据。通过对采集到的城市总平面图、街区、绿地等实景三维数据、建 (构) 筑物实景三维数据、地形与地貌数据、建 (构) 筑物实景二维图像等, 进行三维实体仿真建模得到的数据。(4) 震害矩阵。某类结构的震害矩阵反映该类结构的抗震能力, 本系统所用震害矩阵

包括：① 尹之潜（1996）给出的以地震烈度为输入参数的适用全国的各类建筑的标准震害矩阵（考虑4类易损性建筑的18个震害矩阵）② 1990~2000年中国大陆地震灾害损失评估报告中获取61个震例（国家地震局，国家统计局，1996），用数学方法完善了61个震例中的钢筋混凝土结构、砖混结构、砖木结构和土坯房共计156个震害矩阵<sup>①</sup>；③ 从“七五”以来20多个城市震害预测的报告中获取的预测所得震害矩阵62个（分不同结构类型）。系统对获取的震害矩阵库进行建库管理。（5）典型震害数据。收集国内外历次地震震害调查中获得到的各类结构物震害数据，进行分类整理，提取出各类结构物的典型震害数据（震害图片、视频、震害特征图形处理数据）。（6）想定编辑数据。根据使用需求，可以添加气象数据（阴、雾、雨、雪等）、突发事件（余震、毒气泄漏、爆炸、火灾等）及灾民安置问题（包括场地选取、帐篷搭建、临时给排水、垃圾处理等），对虚拟环境中的三维震害模型进行编辑、替换、删除等，并可对系统虚拟仿真结果进行重新订制。

### 3 仿真概念模型

模型是指将原型客体（系统）予以简化、类比和抽象，并选用适当的物理、数学或其他逻辑思维关系将其主要的特征描述出来，用于研究和揭示原型的形态、特征和本质的模仿品。以相似原理、模型理论、系统技术、信息技术、结构抗震分析理论、震害预测理论为基础，以计算机系统为工具，通过有效选取结构仿真参数，构建出能较为客观地反映城市现状及不同地震危险性下的结构震害状态的仿真系统模型。

建筑结构在强烈地震作用下引起破坏是一个极其复杂的系统，是地震作用的动力特性、结构固有的特性、外界环境等众多因素综合作用的结果，而这些影响因素往往带有很强的随机性、模糊性和不确定性，表明该仿真系统必然是一个“灰色”系统。另一方面，从引起震害反应的角度来看，仿真系统与真实系统之间只要结构类型相似、地震背景相似、场地条件相似（李杰，宋建学，1996），其震害现象也应该相似，历史的震害

经验是可以证明这一点的。

建模的目标决定了模型的精度。我们的目标是选取尽量少的关键参数作为桥梁，完成联系真实系统和仿真系统的对应关系的任务。从系统学的角度，一个系统可以被定义成为集合结构，针对本文研究的仿真系统的参数集大致可划分为输入集、特征集、状态集、输出集，由此可将原型系统抽象为

$$F(X,Q,R,Y)=0.$$

(1)

式中， $X$ 为输入集，代表强震作用、场地条件； $Q$ 为特征参数集，代表房屋固有特性； $R$ 为内部状态集，代表结构抗震能力； $Y$ 为输出集，代表震害的结果或基本特征。

图2依据式（1）描述了建筑结构震害虚拟仿真系统与原型系统的关系模型。以影响结构破坏的各种主导因素与结构实际震害之间的关系为背景进行模型参数选取，其中地震作用选用地震烈度为输入参数，场地条件选择场地类别为输入参数；结构特征参数选取依据震害预测理论中给出的不同结构类型不同易损性分析所需要的参数；内部状态即为结构抗力概念，代表结构抗震能力的广义物理量（结构内力、变形或延伸率等）；破坏状态（或震害状态）分为基本完好、轻微破坏、中等破坏、严重破坏、毁坏5种，和震害宏观调查保持一致。

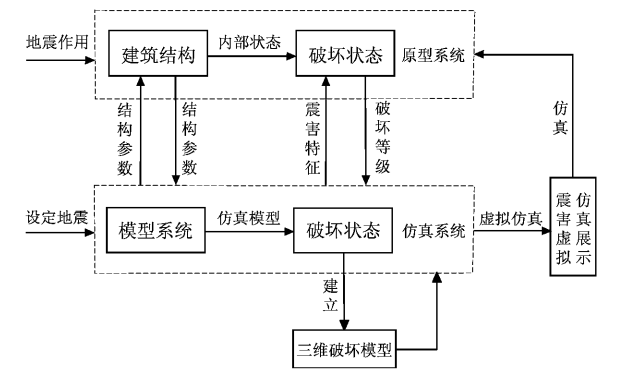


图2 建筑结构震害虚拟仿真系统与原型系统的关系  
Fig.2 The relationship between earthquake damage prediction virtual simulation system and original system

① 王东明. 2012. 我国强震受灾环境综合区划.

仿真模型通过对地震烈度、场地类别、结构特征等参数输入,通过抗力计算划定破坏状态,并要求虚拟仿真模块调取对应的结构三维破坏模型(事先制作模型库),在虚拟仿真环境的支持下完成建筑结构在强震作用下引起破坏的仿真模拟。

## 4 系统实现与应用

城市震害预测虚拟仿真系统使用 Visual Studio 2008 版作为软件的开发工具,在虚拟现实技术的相关标准包括 OpenGL、DirectX、VRML、Java3D 等,以及仿真中间件技术包括 DIS、Living Worlds、Open Community (简称 OC)、High Level Architecture (简称 HLA)、Java Shared Data Toolkit (简称 JSDT) 等基础上开发完成的。城市震害预测虚拟仿真场景(图3)包括:地形、地物、工程结构物地震破坏(图4 单体结构震害状态模拟)、植被等,开发中首先在城市的数字高程模型(Digital Elevation Model, 简称 DEM)上,叠加地面纹理、地物模型、水系模型、烟雾雨雪特效模型等。DEM 数据显示城区地形地貌,地物模型反映各个



图3 城市震害预测虚拟仿真系统展示的局部街区震害场景

Fig. 3 Earthquake disaster scenes in local street displayed by earthquake damage prediction virtual simulation system



图4 城市震害预测虚拟仿真系统建筑震害模拟  
Fig. 4 Earthquake damage simulated by earthquake damage prediction virtual simulation system

建筑单体的方位和结构(根据震害预测进行相应破坏模型的更替),水系模型表现城区水系分布情况,特效模型根据需要进行雨雪烟雾火等特效加载增加气氛。工程结构、道路、树木等复杂物体的建模需要借助于三维建模软件 3DSMAX 完成,再导入到系统生成的场景中,在建模过程中充分利用纹理映射、凹凸纹理、LOD (Levels of Detail)、公告牌 (Billboard)、透明贴图等技术,通过动态内存数据管理实现数据调度,提高系统运行性能。应用 Billboard 技术与透明贴图技术结合,逼真地反应了树木、行人、电线杆等模型,实现了用贴图来表现模型细节的目标。

## 5 结论

城市震害预测虚拟仿真系统可以完整模拟城市工程结构在遭受不同震级地震作用下产生震害过程的综合系统,它具有完备的数据库结构、可靠的仿真模型和丰富逼真的三维震害数据输出,可以更好地帮助用户理解房屋的破坏程度和震害特征,也有助于不同部门间的信息传递和相互交流。该系统可用于今后的震害预测工作中,为城市防震减灾工作提供更多有用、可靠、直观的信息,推动城市防灾规划、应急预案编制、抗震加固改造、民众防灾教育等工作的开展,最大程度地去防止和抵御未来地震灾害可能带来的巨大破坏。不可否认,对城市震害预测结果进行整体虚拟仿真需要大量经费投入,如何降低“城市震害预测虚拟仿真系统”建造成本是本系统今后能否广泛应用的关键问题。

### 参考文献:

- 国家地震局,国家统计局. 1996. 中国大陆地震灾害损失评估汇编(1990-1995)[M]. 北京:地震出版社.
- 李杰,宋建学. 1996. 地震灾场的模拟控制问题研究. (I) 地震灾场模拟[J]. 地震工程与工程振动, 16(2).
- 孙柏涛,胡少卿,王东明. 2007. 云南省乡镇农村地震灾害直接经济损失研究[J]. 地震工程与工程振动, 27(1): 153-158.
- 孙柏涛,王东明. 2003. 地震现场建筑物安全性鉴定智能辅助系统研究[J]. 地震工程与工程振动, 23(5): 209-213.
- 孙柏涛,王旭,柴相花,等. 2009. 地震现场建筑物安全性鉴定量化方法[J]. 哈尔滨工业大学学报, 41(2): 129-132.
- 王东明. 2009. 地震灾场模拟及救援虚拟仿真训练系统研究[D]. 中国地震局工程力学研究所.

- 肖田元,张燕云,陈加栋. 2000. 系统仿真导论[M]. 北京:清华大学出版社.
- 尹之潜. 1996. 结构易推性分类和未来地震灾害估计[J]. 中国地震, 12(1):49-55.
- Bellet T, Mayenobe P, Bornard J, *et al.* 2012. A computational model of the car driver interfaced with a simulation platform for future Virtual Human Centred Design applications: COSMO-SIVIC[J]. Engineering Applications of Artificial Intelligence, 25(7):1 488-1 504.
- Boukerche A, Araujo R B, Laffranchi M. 2005. Multiuser 3D virtual simulation environments support in the Gnutella peer-to-peer network [J]. Journal of Parallel and Distributed Computing, 65(11):1 462-1 469.
- Buchali A, Geismar D, Hinkelbein M, *et al.* 2001. Virtual simulation in patients with breast cancer Volker [J]. Budach Radiotherapy and Oncology, 59(3):267-272.
- Pomara J, López V, Pomar C. 2011. Agent-based simulation framework for virtual prototyping of advanced livestock precision feeding systems[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 78(1):88-97.
- Boukerche A, Araujo R B, Laffranchi M. 2005. Multiuser 3D virtual simulation environments support in the Gnutella peer-to-peer network

## Research on Urban Earthquake Damage Prediction Virtual Simulation System

WANG Dong-ming

(China Earthquake Disaster Prevention Center, Beijing 100029, China)

### Abstract

We proposed and studied the technical methods and ideas of using virtual simulation technology to obtain the urban earthquake damage prediction results, and described the system requirements, functional design and structural framework of urban earthquake damage prediction virtual simulation system. The urban earthquake damage prediction virtual simulation system will provide effective technical support for the damage prediction to serve the urban disaster reduction, improvement of people's awareness of disaster prevention and refuge etc., and has good application prospects.

**Key words:** earthquake damage; damage prediction; virtual simulation system; GIS