

文章编号: 0253-3782(2001)04-0420-07

基于 GIS 的城市地震次生火灾危险性分析系统^{*}

李 杰 江建华 李明浩

(中国上海 200092 同济大学建筑工程系)

摘要 以地理信息系统(GIS)为开发平台, 研究了城市地震次生火灾危险性分析系统的基本构成与功能和系统的数据分层与组织, 给出了地震次生火灾危险性分析模型及方法。以上海市中心城区为背景, 开发了基于 GIS 的地震次生火灾危险性分析与火灾扑救辅助决策系统。

关键词 地理信息系统(GIS) 地震次生火灾 危险性分析

中图分类号: P315.9 **文献标识码:** A

引言

地震次生火灾是指因地震直接或间接引起的火灾。在地震产生的次生灾害中, 次生火灾往往是最危险的。历史地震经验表明, 地震次生火灾有可能造成比地震本身更大的破坏, 给社会带来了巨大的危害。为提高地震次生火灾防救工作的针对性, 尽可能减小火灾带来的经济损失, 有必要建立城市各消防区的火灾信息系统, 并建立相应的次生火灾危险性分析预估模型、扑救路径实时搜索模型及灾后损失评估模型等。

对于地震次生火灾的研究, 可以划分为两个类别: 第一类是用回归统计方法研究地震出火次数(难波义郎等, 1990; 青木义次, 1990), 通过回归分析, 给出地震火灾发生率与房屋倒塌率的关系式; 第二类则采用非确定性概率模型的方法, 给出在一定超越概率条件下的地震次生火灾发生次数预测值(Li, Song, 1995; 李杰, 李国强, 1992a)。从逻辑上分析, 采用概率性分析方法研究不确定性很强的地震次生火灾发生与否是更为合理的。

地理信息系统(Geographic Information System, 简称 GIS)是一门介于信息科学、空间科学与地球科学之间的交叉学科和新技术学科。它将地学空间数据处理与计算机技术相结合, 通过系统的建立、操作和模型分析, 产生对资源环境、区域规划、管理决策、灾害防治等方面的有效信息。近年来, GIS 已被广泛应用于自然资源管理、环境保护、自然灾害的模拟与预测以及灾害应急反应系统等工程防灾领域中。

本文探讨了地震次生火灾危险性分析系统的基本构成与功能。总结笔者此前的研究工作(Li, Song, 1995; 李杰, 李国强, 1992a,b; 李杰, 江建华, 2000), 给出了地震次生火灾危

* 国家杰出青年科学基金资助项目(59825105)。

2000-10-19 收到初稿, 2001-04-09 收到修改稿, 2001-05-28 决定采用。

险性分析与预估模型，并提出次生火灾危险性分析的一般方法。以上海市中心城区为背景，在 GIS 通用软件 ArcView^① 的环境下，建立了城市地震次生火灾危险性分析与火灾扑救辅助决策系统。

1 城市地震次生火灾危险性分析系统的基本构成与数据分层

地震次生火灾危险性分析系统的基本构成主要包括数据输入、数据的存储与管理、图形编辑、信息检索与查询、模型分析和结果输出等，其构成框架如图 1 所示。

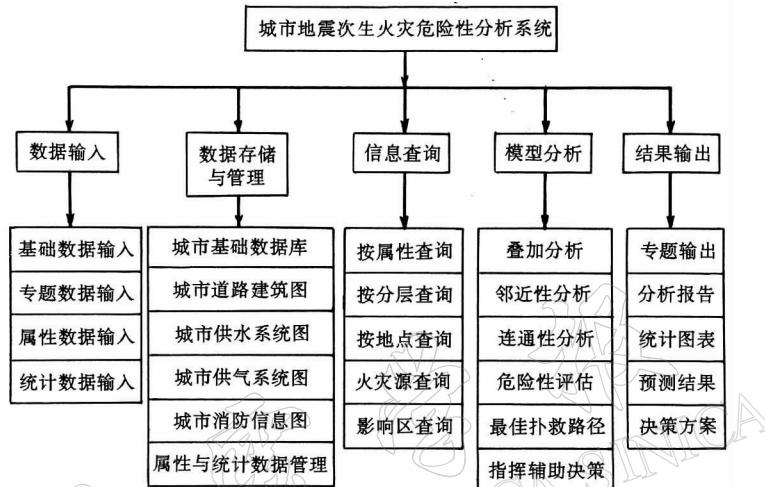


图 1 系统构成

GIS 信息系统的数据组织、采集和入库是最基本也是最费人力物力的工作，数据的丰富性、正确性及现实性直接关系到系统的应用效果。基于 GIS 的城市地震次生火灾危险性分析系统，主要应包括以下数据层：

- 1) 行政区域图层。图形数据包括行政区域边界、街区划分、各消防中队管辖区域等，属性数据包括行政区域名称、区域面积、建筑面积和人口等。
- 2) 城市路网图层。图形数据有主干道、次干道及支路路网、路网节点等，属性数据包括名称、宽度、长度和等级等。
- 3) 城市道路桥梁图层。包括各路桥分布等，属性数据包括桥名、总长度、宽度、跨长、跨数、结构类型、支座形式和场地条件等。
- 4) 供水管网图层。包括供水管网和加压站等，属性数据包括管径、管长、接口形式、流量、压力、加压能力和影响范围等。
- 5) 水系分布图层。包括城市供水厂(或水源)、内河、湖泊、水库分布图等，属性数据包括水源名称和水量等。
- 6) 建筑物图层。包括整体建筑分布、周边道路、环境情况等，属性数据包括建筑物类型、用途和面积等。

^① Environmental System Research Institute. 1991. Introducing ArcView3.0a. Introducing Avenue. U S A, ESRI, Inc.

7) 重点消防单位图层. 包括建筑物楼层分布、重要或危险品分布及消防设施位置等, 属性数据包括建筑结构体系、薄弱环节位置、重要或危险品的名称、特性与扑救方式、消防器械的数量与属性等.

8) 消防力量分布图层. 包括消防指挥中心和消防中队的位置等. 属性数据有消防中队名称、消防力量、消防器械名称及数量特点和电话等.

9) 消防栓分布图层. 一般以点状分布, 属性数据包括编号、型号、出水量和压力等.

10) 煤气管网图层. 包括城市煤气主干管网分布图等, 属性数据包括管网的管径、流量和工作压力等.

11) 电力系统图层. 包括城市供电主干网分布图、变电站位置及控制范围等, 属性数据包括网上电压、变电站结构类型、场地条件和主要电气设备数量及属性等.

12) 通信系统图层. 包括通信枢纽楼、电视和电台分布图等, 属性数据包括位置、场地条件、结构形式及各类主要通信设备和相应属性等.

2 地震次生火灾危险性分析与预估模型

2.1 地震次生火灾发生率与发生概率模型

通过对历史地震次生火灾案例的统计分析, 并结合地震灾场的一般特点, 可以认为, 地震次生火灾的发生率的决定因素是建筑面积, 且与建筑物的破坏程度有显著关系. 根据以往的研究(李杰, 江建华, 2000), 认为城市民事火灾修正的震时小区火灾发生率为

$$\lambda_f = \frac{\rho}{\rho_c} \cdot \mu_m A_m + \rho \cdot A \quad (1)$$

式中, ρ_c 为某一城市民事火灾的平均发生率, ρ 为该城市某一预测小区的民事火灾的平均发生率. A_m 为小区地震时中等以上破坏面积, A 为小区建筑面积, μ_m 为 A_m 条件下的火灾密度(即地震次生火灾次数 n 与 A_m 的比值). 根据李杰和江建华(2000)的研究, 可取 $\mu_m = 0.051$ 次/万平方米.

式(1)综合反映了小区建筑类型、实际火灾危险源分布特征、建筑结构强度、地震烈度背景以及地震次生火灾宏观统计规律等一系列因素的综合影响. 一般说来, 次生火灾震后的时间统计尺度可取为震后 3~5 天, 本文取 $T=3$ 天.

地震次生火灾的发生可视为离散事件的集合. 描述离散事件发生概率的模型, 最常用的是泊松模型. 一个随机事件, 当具有平稳(均匀)性、独立性和不重复性 3 个基本性质时, 就称为泊松事件. 研究表明(李杰, 李国强, 1992a): 城市地震次生火灾发生过程满足泊松事件的 3 个性质, 因而可以用泊松过程(场)描述地震次生火灾的发生.

将城市划分为一系列小区, 假定在同一时间点上, 小区内最多只发生一次火灾, 则根据泊松随机场模型, 小区在地震后 T 天内发生 K 次火灾的概率为

$$P(K) = (\lambda_f)^K \cdot \frac{e^{-\lambda_f}}{K!} \quad (2)$$

2.2 地震次生火灾危险性分析

基于上述分析, 可进行次生火灾的危险性分析, 其基本过程为:

1) 将所研究的城市或某一区域合理划分为若干小区, 分别统计各小区民事火灾发生率及城市总体的火灾发生率.

2) 依据小区建筑物的地震震害预测结果, 按式(1)计算小区地震次生火灾平均发生率, 并按下式计算小区在震后发生火灾次数大于 M 次的概率:

$$P_M = 1 - \sum_{K=0}^M P(K) \quad (3)$$

其中, $P(k)$ 按式(2)计算. 据此可作出地震次生火灾危险性超越概率曲线.

3) 依据次生火灾危险性超越概率曲线, 可得到超越概率为 10% 条件下的次生火灾发生次数先验估计值 K_{10} .

4) 按照小区划分结果, 给出对应上述超越概率的火灾危险性区划图.

仔细分析可以发现, 上述方法给出的地震次生火灾预测值, 反映了在发生地震之前决策者对所研究区域次生火灾发生次数的一种先验判断. 而地震发生后城市处于一高度紊乱的状态之中, 次生火灾的发生也伴随着交通、电力、给水等生命线工程系统和各类建筑物的灾害程度的不同及救灾进程而呈现为动态变化的过程. 显然, 先验地震次生火灾预测结果可能与实际的次生火灾发生情况存在较大的差异. 为解决这一问题, 需要研究地震次生火灾动态危险性分析的方法.

地震次生火灾动态危险性分析的主要目的, 是实时地给出地震次生火灾在各预测小区内的发生概率和在一定保证率下的发生次数. 分析表明, 前节所述地震次生火灾发生概率模型可以作为地震次生火灾的一种初始估计. 为了使这种估计符合震后实际情况, 可以进一步利用震后现场反馈信息. 从地震后实际灾场状况分析, 最有可能也最为方便及时地获得的信息是震后一定时段内, 各预测小区的次生火灾发生次数. 根据时、场域分离的思想, 可以构造如下震后地震次生火灾动态危险性分析模型.

由上节可知, 某一小区内发生 K 次火灾的概率 $P(K)$, 可由式(3)计算. 此式事实上给出了震前关于次生火灾预估的先验概率. 另一方面, 若震后次生火灾发生是一个时域泊松过程, 则对于给定的次生火灾发生次数 K , 其时域发生率为

$$\lambda_t = \frac{K}{T} \quad (4)$$

式中, T 为震后火灾预测时段, 取小时为基本的实时计算单位, 则 $T=72$ 小时.

设某小区在时刻 t 观测到的火灾次数为 m , 则利用上述时域泊松过程, 可计算在此观测结果下的似然率, 即在时域发生率为 λ_t 的条件下, 在 $(0, t)$ 时间内发生 m 次火灾的条件概率

$$P\left(\frac{m}{\lambda_t}\right) = \frac{(\lambda_t t)^m}{m!} \cdot e^{-\lambda_t t} \quad (5)$$

将式(4)代入式(5)得

$$P\left(\frac{m}{K}\right) = \frac{\left(\frac{K}{T} t\right)^m}{m!} \cdot e^{-\frac{K}{T} t} \quad (6)$$

于是, 根据贝叶斯公式, 可给出震后预测期新的次生火灾发生概率为

$$P(N = K') = \frac{P(m/K') \cdot P(K')}{\sum_{l=0}^M P(m/l) P(l)} \quad (7)$$

其中, 先验概率与条件概率分别按式(2)和式(6)计算, 且 M 为一给定整数, 表示在预测期

内小区可能观察到的地震次生火灾最大发生次数，可取超越概率为某一给定值 P 条件下对应的 K' 值。 P 可取 $0.05 \sim 0.001$ ，本文取 $P=0.001$ ，以保证考虑尽可能多的观测数据。

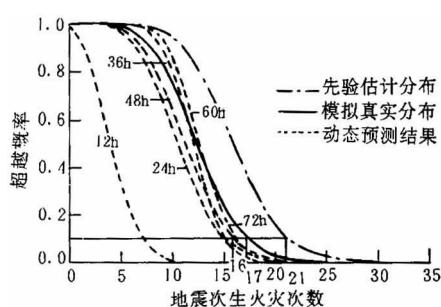


图 2 分析实例($\lambda=16.6$)

这样，依据小区建筑物的地震震害预测结果，按式(1)计算小区地震次生火灾平均发生率 λ_f ，由此形成小区地震次生火灾的先验估计模型；再根据震后一定时段内观测到的次生火灾次数，按式(7)计算震后预测期内新的次生火灾发生概率；然后按式(3)计算小区在震后预测期内发生火灾次数大于 n 次的概率，其中， $P(K)$ 按式(7)计算。据此可作出小区在震后预测期内的次生火灾动态危险性超越概率曲线，并得到

超越概率为 10% 条件下的次生火灾发生次数 K'_{10} 。

地震次生火灾动态危险性分析实例示于图 2。由图 2 可见，随着观察时间的推移，动态危险性分析结果迅速接近并收敛于真实值。

3 上海市地震次生火灾危险性分析系统

以上海市内环中心城区为背景，我们开发了基于 GIS 的城市地震次生火灾危险性分析与火灾扑救辅助决策系统。该系统是在 Windows 98 环境下采用 ArcView 软件进行二次开发的地理信息系统，以面向对象的 Avenue 语言和可视化语言 Visual Basic 为基础，将城市生命线系统数据库与分析模型相结合，集成为以提高震后消防扑救的应急反应能力及最大限度地降低次生火灾造成的经济损失为目的的计算机分析与辅助决策系统。

本系统的核心与基础是图形和属性数据库。根据本文前面对该系统的基本构成与数据分层分析框架，本系统的功能模块主要有以下 5 个：

1) 数据的采集、输入与编辑模块。具有各数据图层图形要素和数据(包括基础和专题数据)的输入与编辑功能。

2) 数据管理模块。具有数据维护功能，包括各种图形和属性数据文件的维护、数据库备份和更新功能。

3) 信息查询统计和显示模块。具有从图形信息到属性信息、从属性信息到图形信息及其它各种信息查询的功能。例如，查询距离火灾发生地区最近的水源点，查询各烈度地震后还可连通可靠的给水、道路等管网和节点，以及查询扑救的最佳路径等。

4) 模型分析模块。模型分析在系统中具有重要的地位。利用 GIS 的扩展功能(例如 network analysis, spatial analysis 等)，可以动态模拟震后给水、道路、煤气等生命线工程系统的破坏状况，进行给水、道路等与火灾扑救紧密相关管网的连通性分析(江建华等，2001a,b；宋建学，李杰，1996)和火灾潜在发生源的危险性评估，进而可动态模拟次生火灾的发生、进行次生火灾危险性分析、选择最佳扑救路径和快速扑救指挥辅助决策等。模型分析旨在建立快速图文显示系统，及时准确地提供相关数据、资料以及各种评估、预测、应急手段，使决策科学化、管理现代化。

5) 数据输出模块, 具有按用户要求输出数据文件、标准图版和专题图表等功能。

系统应用 GIS 强大的管理和分析空间数据的功能, 对各研究区域进行地震次生火灾先验估计(静态)的危险性分析和动态危险性分析, 得到相应的次生火灾危险性超越概率曲线, 其应用界面见图 3 所示; 同时, 系统还可实时地模拟观测期内地震次生火灾的发生过程, 并利用震后实际受灾破坏状况的交通路网、给水管网实际的震害结果和 GIS 的网络分析功能, 快速生成由各消防中队通往次生火灾发生点的最佳路径和指挥扑救辅助决策, 达到快速消防、积极消防的目的。应用界面如图 4 所示。

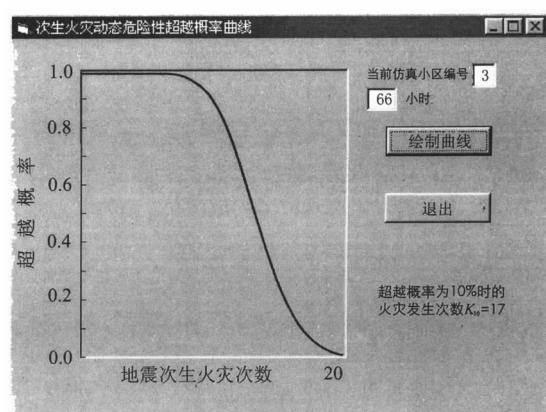


图 3 上海市中心城区地震次生火灾危险性分析

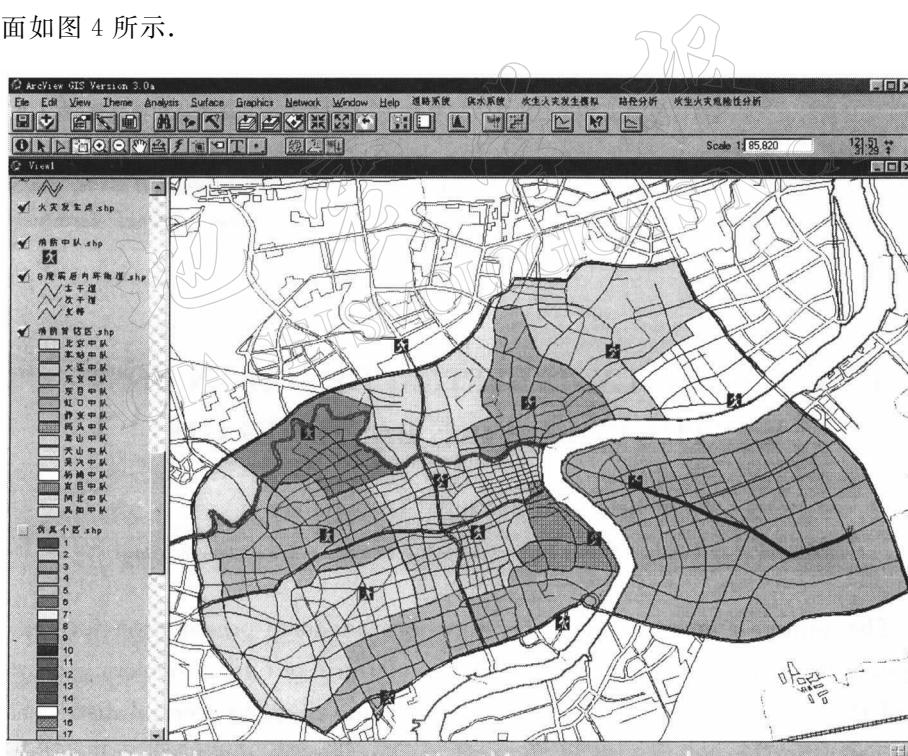


图 4 上海市中心城区地震次生火灾模拟及最佳扑救路径分析(图中右下角粗线为最佳路径)

4 结语

本研究根据地震次生火灾发生具有离散性和随机性的特点, 采用泊松过程模型作为地震次生火灾发生的初始估计模型, 按照时、场域分离的原则和贝叶斯估计原理, 提出了地震次生火灾动态危险性分析与预估模型。通过 GIS 的应用, 实现了灾害数据与城市基础性

数据的计算机存储与管理，将基础数据与分析模型相结合，初步建立了城市地震次生火灾的仿真分析应用系统。该系统可以综合利用各种分析模型进行城市次生火灾的快速分析、评价与模拟，并将分析与评价结果通过 GIS 以专题图或报告报表展示出来，从而有助于分析、管理与决策。应该指出，由于地震火灾的复杂性，本研究所建立的系统自然存在诸多不足，需要进一步的深入研究、补充与完善。例如，对重要单体建筑的地震火灾预测问题，对于道路系统地震灾时状态的仿真，以及基于复合生命线工程系统的系统仿真与优化等，都值得进一步进行专题分析与研究。

参 考 文 献

- 江建华, 李素贞, 李杰. 2001a. 基于 GIS 的城市生命线工程地震反应仿真研究[J]. 灾害学, 16(1): 23~28
 江建华, 黄勤勇, 李杰. 2001b. 上海市交通系统抗震可靠度分析[J]. 工程抗震, 21(2): 42~47
 李杰, 李国强. 1992a. 地震次生火灾预测模型研究[J]. 中国地震, 8(1): 76~81
 李杰, 李国强. 1992b. 地震工程学导论[M]. 北京: 地震出版社, 281~335
 李杰, 江建华. 2000. 城市地震次生火灾危险性分析[J]. 自然灾害学报, 9(2): 87~92
 宋建学, 李杰. 1996. 震后城市交通系统连通性模拟[J]. 自然灾害学报, 5(1): 38~43
 难波义郎, 保野健治郎, 大森丰裕. 1990. 出火件数の预测式に关する—考察[A]. 见: 日本建筑学会编. 日本建筑学会学术讲演梗概集(中国)[C]. 东京: 日本建筑学会, 943~946
 青木义次. 1990. 地震时出火の確率构造[A]. 见: 日本建筑学会编. 日本建筑学会计画系论文报告集(第 412 号)[C]. 东京: 日本建筑学会, 53~60
 Li Jie, Song Jianxue. 1995. Study on the simulation of post-earthquake fire[A]. In: Wang Yayong et al eds. *Proceedings of Sino-U S Symposium Workshop on Post-earthquake Rehabilitation and Reconstruction*. Beijing: Earthquake Press, 100~107

HAZARD ANALYSIS SYSTEM OF URBAN POST-EARTHQUAKE FIRE BASED ON GIS

Li Jie Jiang Jianhua Li Minghao

(Department of Building Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: The authors study the structure, functions and data organization for the hazard analysis system of urban post-earthquake fire on the platform of GIS. A general hazard analysis model of the post-earthquake fire is presented. Taking Shanghai central district as background, a system for hazard analysis of the post-earthquake fire and auxiliary decisionagainst fire is developed.

Key words: geographic information system; post-earthquake fire; hazard analysis