

# 城市重大事故应急辅助决策支持系统研究

廖光焯<sup>1</sup>, 翁 韬<sup>1</sup>, 朱霖平<sup>1</sup>, 刘铁民<sup>2</sup>, 刘功智<sup>2</sup>

(1. 中国科学技术大学火灾科学国家重点实验室, 合肥 230026;

2. 国家经贸委安全科学技术研究中心, 北京 100029)

**[摘要]** 针对严重影响我国经济发展和稳定的城市重大事故, 研究了典型城市重大事故动态模拟的模型和方法, 并开发了反应及时、决策科学和资源高效利用的事故应急决策支持系统, 主要包括以下功能: 城市不同功能区典型重大事故的动态模拟; 城市不同功能区典型重大事故应急决策; 城市不同功能区、不同事故类型的应急预案库; 城市重大事故应急决策与指挥调度决策。该系统充分运用了先进的信息管理手段和工程技术, 可及时发现事故隐患、控制事故扩展和蔓延并及时采取救援措施, 使财产损失和人员伤亡减少到最低程度。

**[关键词]** 城市重大事故; 动态模拟; 应急决策支持系统

**[中图分类号]** P928; TP392 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1009-1742(2005)07-0007-07

## 1 引言

随着经济和社会的进步, 城市化发展速度空前提高, 城市规模日益扩大, 特别在大城市, 人口不断增多, 功能日趋复杂, 安全隐患和风险不断加大。由于城市人口集中、建筑物密集以及疏散困难等原因, 一旦发生事故, 势必造成人员的群死群伤和巨大的财产损失, 严重影响城市经济的发展和社会的稳定。发达国家在城市突发性、灾难性事故的应急处置上运用了先进的管理手段和工程技术, 从而使财产损失和人员伤亡大大减少<sup>[1]</sup>。我国与这些国家相比已明显落后, 尤其是在重大事故应急预案、应急决策和应急救援体系等国家必备的基础建设方面尚存在着较大的差距, 缺乏综合性和系统性研究。因此, 必须高度重视我国城市公共安全体系存在的问题, 加强安全科技研究, 解决城市公共安全中的关键科学与技术问题, 从而确保安全状况的全面好转, 保持经济的平稳发展和社会的稳定。

城市公共安全科技是跨学科的综合科技, 必须集中各方面的力量, 共同协作解决城市公共安全

中综合性、全局性的重大关键科学与技术问题, 力争在城市公共安全风险评估、城市公共安全规划、城市重大事故与化学灾害事故的防范与控制、城市埋地燃气管道与工业特殊设备的安全保障、城市工业灾害预测预防等方面取得突破性进展, 从而使我国城市公共安全管理步入科学化、规范化的轨道, 并与国际接轨。通过项目成果的实施可以全面提高我国城市公共安全的科学技术水平, 有效减少事故隐患, 预防和控制重大事故发生, 遏制群死群伤和减少经济损失, 改善我国城市公共安全的严峻局面, 对加强国家安全科技基础建设和保障国家经济与社会的可持续发展具有重要战略性意义<sup>[2,3]</sup>。

## 2 城市重大事故应急决策系统的设计方法

建立城市重大事故应急决策系统必须融合现代众多学科领域的理论和技术手段, 运用系统工程的理论方法, 把专家经验、现代技术、计算模拟融为一体, 使系统的研制建立在先进性、科学性的基础上, 为高层管理决策提供有效的方案。该系统设计

**[收稿日期]** 2004-07-28; 修回日期: 2004-09-20

**[基金项目]** 国家“十五”科技攻关计划资助项目(2001BA803B01-02-01)

**[作者简介]** 廖光焯(1948-), 男, 江西南康市人, 中国科学技术大学教授, 博士生导师

的总体原则为面向实际，应用于实际，解决实际问题<sup>[4~6]</sup>。系统总体结构示意图如图 1 所示。

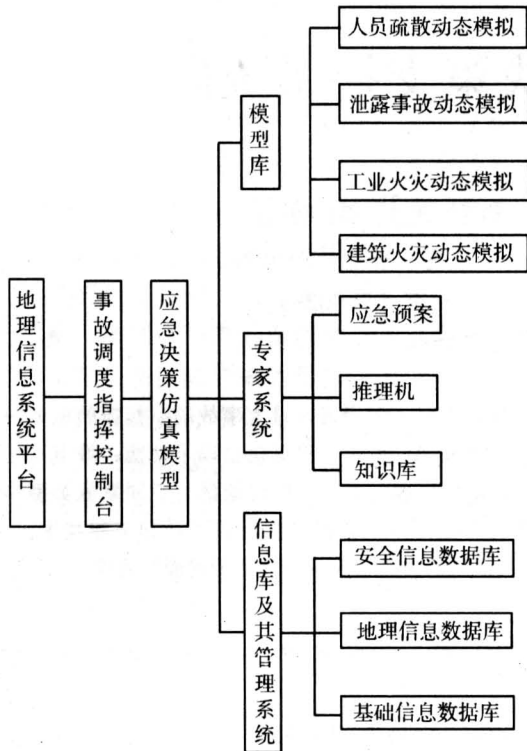


图 1 系统总体结构框架示意图

Fig.1 System framework

系统平台的搭建利用 COM (+) 技术，采用组件式 GIS 开发软件 SuperMap 提供的控件，在 Visual C++ 6.0 环境下开发，数据库采用 ODBC 引擎连接管理。图 2 是开发系统的主界面。组件式 GIS 控件的使用，不仅使该系统具有对空间数据强大的管理与分析能力，而且具有友好的人机接口。

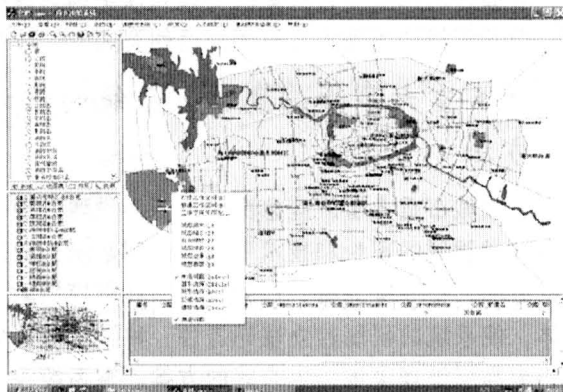


图 2 城市重大事故应急决策支持系统主界面

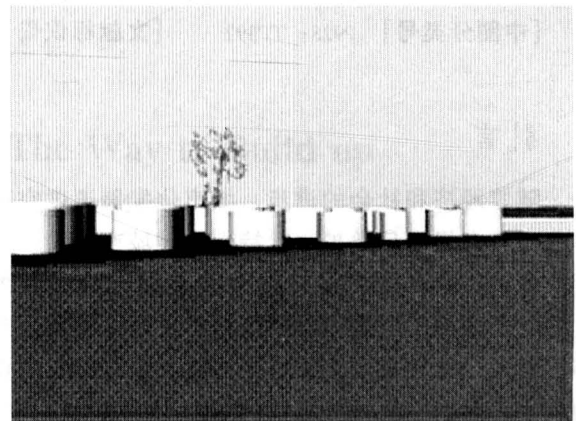
Fig.2 Main interface of decision support system for urban fatal accident

### 3 城市不同功能区典型重大事故的动态模拟

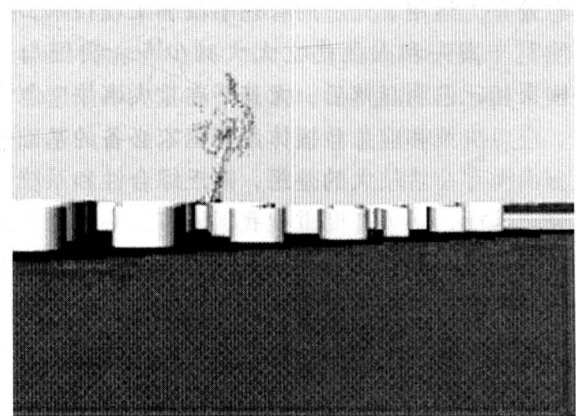
完全实现灾害的实时动态模拟是非常困难的，因为模拟过程需要巨大的计算量，而目前的 PC 还不具备这样能力。一种可行的途径是事先计算出不同条件下灾害的动态过程，根据计算结果建立灾害动态三维模型库<sup>[7]</sup>。作者利用火灾 CFD 软件的计算结果文件，如：Particle（粒子）文件、Plot3D（切面）文件、Slice（动态切面）文件、Boundary（边界曲面）文件、Isosurface（动态等值面）文件，在 VR 平台上实现在虚拟环境中再现灾害的动态发展过程<sup>[8,9]</sup>。

#### 3.1 典型工业油罐区动态模拟

图 3 模拟了典型工业油罐区发生火灾时的火焰及烟气运动过程。用户可以在虚拟油罐区漫游以及查询各个油罐的属性参数，比如高度、直径、油品



(a)



(b)

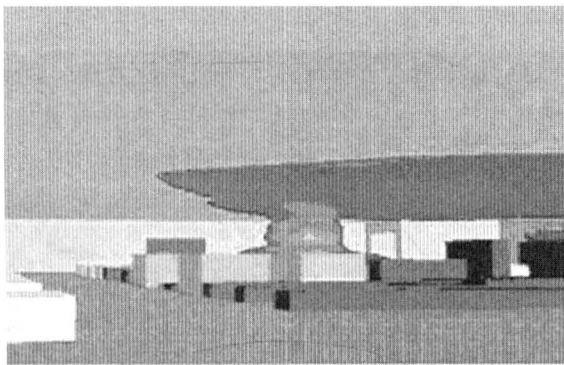
图 3 典型工业油罐区发生火灾时的火焰及烟气运动

Fig.3 The movement of flame and smoke during typical oilcan fire

种类等等。利用存储在三维动态灾害过程模型库中的数据文件，系统可以在虚拟环境中再现灾害过程，并实现了虚拟环境漫游、对象属性参数查询等交互功能。

### 3.2 商业区典型火灾过程的动态模拟

图 4 给出了典型商业区建筑发生火灾后，火灾与烟气运动的计算机模拟结果<sup>[10]</sup>。该建筑共 6 层（地上 4 层、地下 2 层），负二层为家具城，顶层为舞厅，中间数层为商场。家具城着火，火灾烟气由两边楼梯迅速运动到顶层（图 a），并很快充满整个舞厅（图 b）。



(a) 烟气从两边楼梯向上蔓延



(b) 顶层俯视图（烟气充满）

图 4 多层建筑火灾和烟气运动模拟

Fig.4 Simulation for multistory building fire and smoke movement

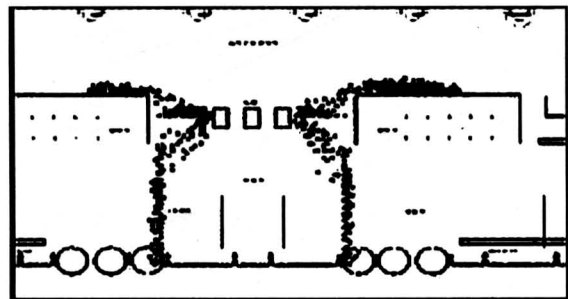
### 3.3 大型人群密集场所中人员疏散过程的动态模拟

针对事故环境中人群密集场所的人员疏散模拟研究，主要目标是尽可能准确地估计人员安全疏散时间，分析总结能有效缩短疏散时间的疏导策略，从而实现人员的安全疏散<sup>[11~14]</sup>。

针对具体建筑的建筑特点和人流量数据，计算

在最不利情况下，各区域人员疏散所需时间和现有疏散通道宽度和距离情况下建筑物所能提供的疏散时间，对人员疏散进行动态仿真，可为最佳人员疏散方案提供设计参考依据。动态仿真结果见图 5。

从动态仿真的结果看，在不同出口位置都出现了明显的扎堆和阻塞现象。图 5 (a) 中，60 s 时刻还有部分人群由中间的通道疏散，图 (b) 中则没有人由中间通过，拥塞在两边的通道，反映出灾害环境中人的从众心理。图 6 中，刚开始疏散时，人群有较大的期望疏散速度，随着人群的密集，导致“欲速不达”现象的发生，平均通过速率下降，出现严重的阻塞。



(a) 60 s



(b) 160 s

图 5 一层门厅人员疏散动态模拟结果

Fig.5 Dynamic simulated result for personnel evacuation of the hall of first floor

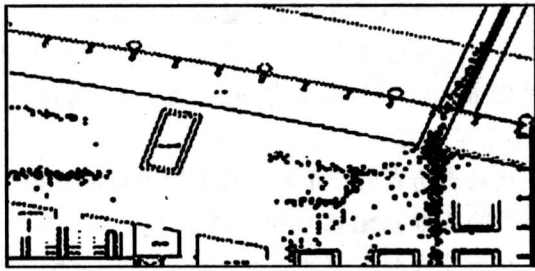
## 4 城市重大事故应急决策的实现

### 4.1 应急决策过程

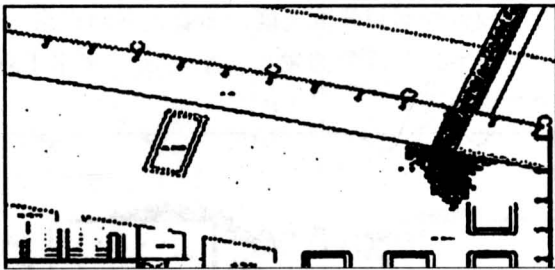
4.1.1 事故接警与应急响应 应急中心一旦接到事故报警，接警员向报警人员询问与事故相关的重要情况，记录下事故发生时间、地点、类型、环境情况等信息。报警数据库中新增事故报警记录。

根据报警人提供的情况，应急向导将对事故作初步分析，判断事故等级，并根据事故等级启用不

同的通报程序。



(a) 60 s



(b) 180 s

图 6 二层天桥出口人员疏散动态模拟结果

Fig.6 Dynamic simulated result for evacuation of overbridge of second floor

4.1.2 消防力量调度 系统根据 Petri 网<sup>[15,16]</sup>的决策模型,设计建立了事故扑救调度指挥过程有色非自主 Petri 网模型,根据事故报警情况,首先对需要的作战力量进行需求分析。由于临近的每个消防中队都不能完全满足作战需求,所以系统智能判断需要多个中队联合作战,并对每个中队所需要出动的消防力量进行分析,同时根据道路网的情况,对每个中队的调度路线进行分析(图 7),并在地图上给出最佳调度路径(图 8)。

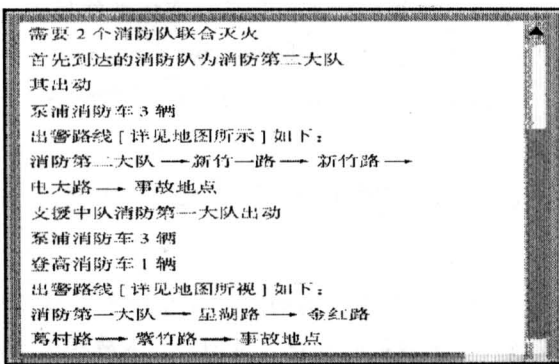


图 7 消防力量调度决策方案

Fig.7 Decision project of attemping of fire fighting force

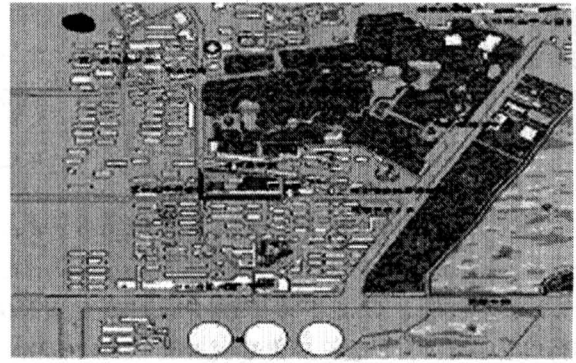


图 8 消防力量调度决策最佳路径

Fig.8 Optimal path for attemping of fire

4.1.3 其他应急力量调度 类似消防力量的调度,我们在 GIS 上给出了交通、公安、急救力量的调度路线(见图 9)。



图 9 医疗急救力量调度决策最佳路径

Fig.9 Optimal path for attemping of medical force

4.1.4 事故记录查询与分析 火灾事故与报警为一对多的关系,同一火灾事故不同阶段的报警信息、处置信息以及战斗结束的信息具有同样的事故 ID 和不同的报警 ID。根据任何一条事故报警(信息反馈)记录,都可关联查询整个事故完整的处置过程,如图 10 所示。

### 4.2 易燃易爆有毒气体泄漏事故危险区域分析

图 11 和图 12 是对一起城市天然气管网破裂引发的天然气泄漏事故的模拟结果,分别用 Gaussian 烟羽模型和射流模型估算。由图可以看出, Gaussian 烟羽模型估算的扩散范围类似椭圆,而射流模型的结果有明显的射流张角,范围呈扇形分布<sup>[17,18]</sup>。

由于这两个模型都是近似模型,其估算的扩散范围与真实情况都存在一定偏差,无法断言优劣。

事故记录查询							
打印		事故情况					
决策		建筑类型	商场				
关闭		环境类型	居民区				
		灾情种类	火灾				
报警表							
编号	楼	日期	时间	地点	灾情种类	备注	
6	6	2003-07-17	08: 57	曙光高层	火灾	发现二楼	
7	7	2003-07-17	09: 02	曙光高层	火灾	蔓延到三楼	
12	12	2003-07-17	09: 20	曙光高层	爆炸	火情恶化	
14	14	2003-07-17	09: 35	曙光高层	火灾	火情得到控制	
15	15	2003-07-17	10: 00	曙光高层	火灾	火被扑灭	

图 10 事故记录查询

Fig.10 Recording and querying of accident

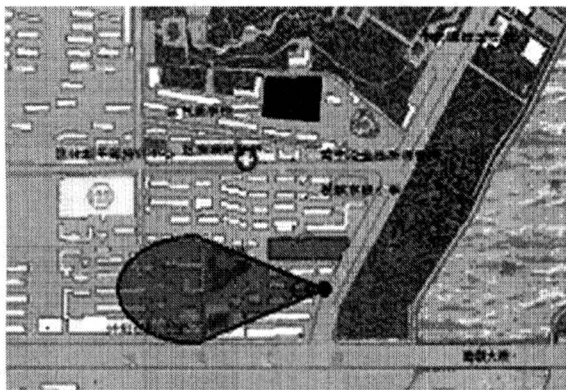


图 11 Gaussian 烟羽模型

Fig.11 Gaussian smoke-plume model



图 12 射流模型

Fig.12 Model of jet flow

决策者可以综合多种估算结果辅助决策。

以图 11 所示的 Gaussian 烟羽模型估算的泄漏扩散范围为例，根据该范围与人口分布基础信息图层的 GIS 叠加运算，可以估算出事故现场需要疏散的总人数。根据系统决策分析结果，需要疏散的

人数约为 1 900 人。

图 13 给出的是人员疏散路径。从图中可以看出，其中一条路径穿越了泄漏扩散区域，这显然是不合理的。作者在最佳路径分析时，考虑了事故本身可能对交通状况带来的影响，修正的结果如图 14 所示，决策结果更为合理。

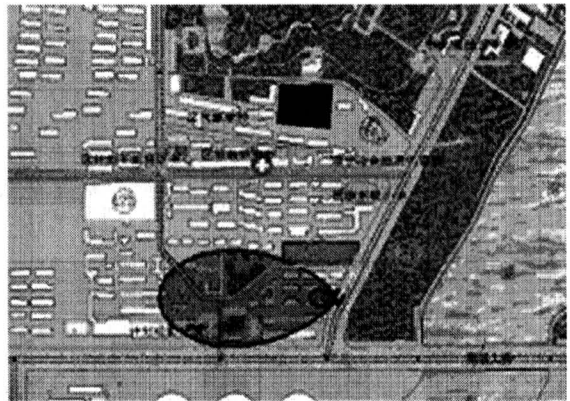


图 13 未考虑泄漏扩散区域的影响

Fig.13 Not take the effects of leakage diffusion area into account

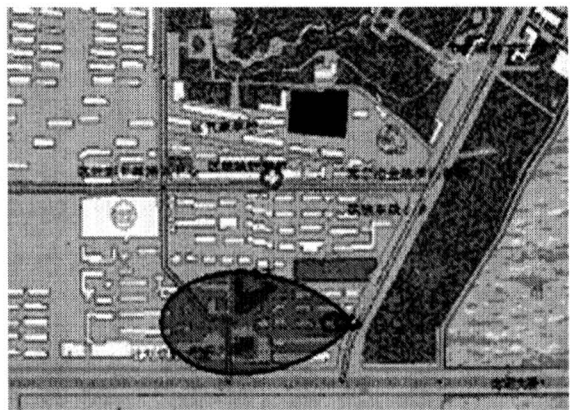


图 14 考虑泄漏扩散区域的影响

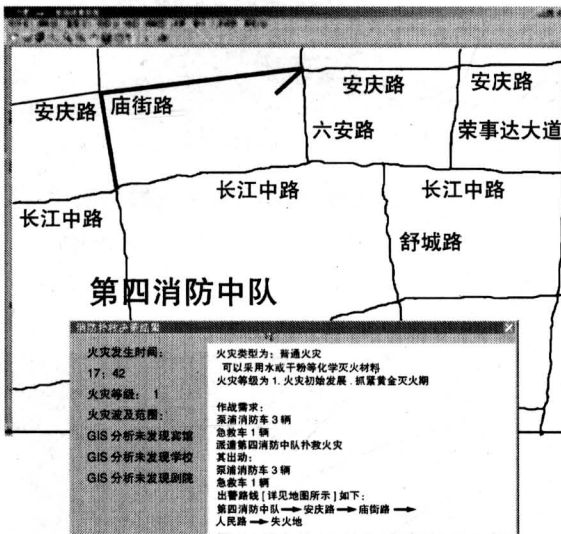
Fig.14 Consider the effects

### 4.3 最佳路径分析

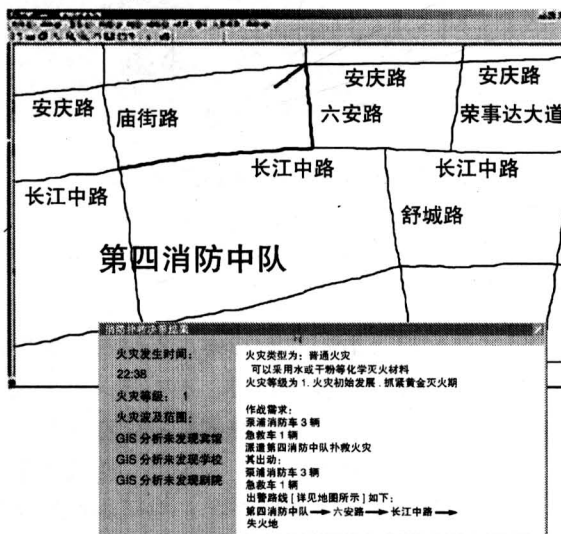
调度过程中，消防中队赶到火灾现场需要的时间是一重要的参数。这一时间，主要受城市道路交通状况的影响。消防车的行驶虽然不受红绿灯、左转向、单行道等因素的影响，但如果某路段由于交通流量过大造成交通阻塞或不畅，消防车同样不能顺利通过。因此，各路段的车道数、不同时间段的交通流量是决定消防车通行速度的关键因素。作者的模型中修正了最佳调度路径算法，由某路段不同时间段的交通流量及其车道数确定该路段的交通阻

力参数，然后以该参数为权值对道路距离进行修正，最后调用 GIS 的最佳路径分析功能求解当前时段的最佳调度路径。不同时间段的交通流量数据根据统计数据获取。工程应用中，交通流量数据可望由交通部门实时提供<sup>[19-22]</sup>。

图 15 是对两起火灾发生地点十分接近的案例的仿真决策结果。图 15 (a) 火灾发生时间为下午 17:42，图 15 (b) 为夜间 22:38。图中显示由于火灾发生时间不同而给出了不同出警路线的决策结果。这是因为长江中路是合肥市的中心商业街道之一，下午 17:42 时车流量很大，不宜为出警路线，夜间则无此限制。



(a) 火灾发生时间 17:42



(b) 火灾发生时间 22:38

图 15 不同时间段的最佳路径分析结果对比

Fig.15 Contrast of result of optimal path analysis for different time

### 5 专项应急预案库

专项预案有可能只需要对一二个要素进行补充，也可能涉及多个要素；专项预案既可以是针对某一类具体的事故，如氨气泄漏，也可能是针对某一具体位置的重大危险源，因此，城市的专项预案会有若干个。这些专项预案都应保持与基本计划和应急功能的一致性，避免出现相互矛盾。

系统针对火灾、泄漏、爆炸等各类事故、针对各种不同危险品的主要组成与理化性质、健康危害、急救措施、燃爆特性、储运注意事项、泄漏应急处理、防护措施等，建立了专项应急预案库，并实现了各专项预案的相互关联查询。

### 6 结语

通过上述分析与讨论，作者初步完成了城市突发重大事故应急决策支持系统，并成功实现了下列功能：

1) 针对城市公用建筑、作业场所、城市生命线、人员密集场所等典型功能区，分别研究了多层建筑火灾和烟气、大空间建筑火灾和烟气、易燃易爆有毒气体泄漏等灾害事故过程以及事故环境中人员疏散过程的动态模拟方法，结合建立通用安全事故虚拟现实仿真平台，实现了上述过程的动态模拟仿真。

2) 设计并建立了事故扑救调度指挥过程有色非自主 Petri 网模型，结合 GIS 空间分析功能解决难以描述和模拟且数据结构较差的空间决策问题，实现了事故过程动态离散事件的推理决策，可综合现场信息、周边环境、救援力量分布、救援力量配置、交通流等信息，进行救援力量调度的一次、二次决策。

3) 在城市重大事故应急决策的基础上，通过引入综合权值对道路等级、路面状况、车道数、不同时间段的车流量等影响交通流的因素进行修正，建立了资源调度最佳路径模型，实现了重大事故应急救援资源优化调度。

4) 对火灾、泄漏、爆炸等各类事故，建立了专项应急预案库，并实现了各专项预案的相互关联查询，事故一发生即可立即获取该类事故的相关资料。

## 参考文献

- [1] 王海晖,朱霁平,范维澄. 中国的消防工作现状分析[J]. 火灾科学, 1996, 5(2): 44~57
- [2] GPS/GIS applications for emergency response [J]. Public Works, 1994, 125(10): 96~101
- [3] Ren Aizhu, Jiang Jianjing, Hua Bin. Analysis of disaster reduction for urban area on GIS [J]. Computing in Civil and Building Engineering, 2000, 1(1): 225~232
- [4] 刘本玉, 苏经宇. 基于 GIS 的防震减灾决策支持系统的设计[J]. 建筑科学, 2001, 12(1): 22~27
- [5] 田伟涛. 集成化城市重大事故防治信息系统研究[D]. 北京: 清华大学, 1997
- [6] 李峻. GIS 决策支持可视化的研究[D]. 武汉: 武汉大学, 2001
- [7] Markators N C, Periclons K A. An investigation of three dimensional fires in enclosures [A]. Fire Dynamics and Heat Transfer[C], 1983, HTD - Vol. 25, NY: ASME. 115~124
- [8] Qi Yixin, Xia Zhengyi, Wang Jian, Fan Weicheng. Application of virtual reality in safety engineering [J]. China Safety Science Journal, 1999, 9(6): 49~53
- [9] 张茂军. 虚拟现实系统[M]. 北京: 科学出版社, 2001
- [10] Fan Weicheng, Yan Zhenghua. Towards new models for compartment fire[A]. Proceeding of International Conference on Fire Safety Science[C]. Japan, 1993
- [11] Pauls J. Effective Width Model for Crowd Evacuation. Karlsruhe: Sixth International Fire Protection Seminar, FRG, 1982[A]. In: Templer J, Ed. The Staircase[C], Cambridge MA: Massachusetts Institute of Technology, 1992
- [12] Muramatsu M, Irie T, Nagatani T. Jamming transition in pedestrian counter flow[J]. Physica A, 1999, 267(1): 487~498,
- [13] Shields T J, Boyce K E. A study of evacuation from large retail stores[J]. Fire Safety Journal, 2000, 35(1): 25~49
- [14] 郑大钟, 赵千川. 离散事件动态系统[M]. 北京: 清华大学出版社, 2001
- [15] Peterson J L. Petri Nets Theory and Modeling of Systems [M]. Englewood Cliffs NJ: Prentice Hall, 1981
- [16] 韩新, 李杰, 沈祖炎. 城市火灾扑救调度指挥过程的 Petri 网模型研究[J]. 自然灾害学报, 1998, 7(3): 25~31
- [17] Hanna S R, Drivas P J. Guidelines for use of vapor cloud dispersion models[M]. Second Edition. New York: Center for Chemical Process Safety, AIChE, 1996
- [18] 化工部化工劳动保护研究所. 重要有毒物质泄漏扩散模型研究[J]. 化工劳动保护, 1996, 1(3): 1~19
- [19] Harter G. L. An integrated GIS solution for estimating transportation infrastructure needs [J]. Transportation Research Record, 1998, 16(17): 50~55
- [20] Sasaki T, Iida Y, Yang H. An analysis of the reliability of an origin-destination trip matrix estimated from traffic counts [J]. Transportation Research, 1992, 25B(5): 1~8
- [21] Sherali H D. Variational problems for determining optimal paths of a moving facility[J]. Transportation Science, 1992, 26(4): 330~345
- [22] 朱霁平, 荀永华, 廖光焯. 城市重大事故扑救调度最佳路径分析[J]. 火灾科学, 2002, 11(4): 201~205

## A Study on Assistant Decision Support System for Urban Emergency Response

Liao Guangxuan<sup>1</sup>, Weng Tao<sup>1</sup>, Zhu Jiping<sup>1</sup>, Liu Tiemin<sup>2</sup>, Liu Gongzhi<sup>2</sup>

(1. State Key Laboratory of Fire Science, USTC, Hefei 230026, China;

2. Safe Scientific and Technical Research Center of the State Economic  
and Trade Commission, Beijing 100029, China)

**[Abstract]** Aiming at urban accidents that affect the development of urban economy and social stability, this paper discussed the dynamic simulation models and techniques of typical urban fatal accidents, and developed the assistant decision support system for urban emergency response. The function of this system included: Dynamic simulation of the typical accident of different functional district of city; Decision for the response to grave accident of different functional district of city; Emergency preparedness plan database for different functional district in the city and different type of accidents; Decision for response to grave accident of city and decision for commanding and dispatching. This system used advanced information management and engineering, could find the hidden accident, control the accident and rescue in time, thus reduced the property loss and casualty to minimum extent.

**[Key words]** urban unexpected accidents; dynamic simulation; decision support system for emergency response