

计算机辅助大规模人群疏散平台

湛永松¹, 卢兆明²

(1. 香港城市大学深圳研究院, 深圳 518058; 2. 香港城市大学建筑系, 香港)

摘要: 针对现有疏散策略的不足, 构建一个计算机辅助大规模人群疏散平台, 为政府相关部门在城市建设和防灾规划中提供科学决策支持。该平台集成了疏散仿真模型和基于时变动态流问题的路网优化模型, 引入组件式 GIS 技术, 采用模块化多层体系结构建立了一个准确、实时的疏散引导系统。

关键词: 疏散模型; 时变动态流问题; 模块化; 多层体系结构

Computer Aided Large-scale Crowd Evacuation Platform

ZHAN Yong-song¹, LO Siu-ming²

(1. Shenzhen Research Institute, City University of Hongkong, Shenzhen 518058;

2. Department of Building & Construction, City University of Hongkong, Hongkong)

【Abstract】 Aiming at the shortness of the existing evacuation strategy, this paper proposes a Computer Aided Large-scale crowd Evacuation Platform(CALEP), which can assist government authorities to devise evacuation plans in advance as well as real-time management under disaster. Integrated with component GIS, the platform combines an evacuation simulation model with an road net optimization model based on Time Varying Quickest Flow Problem(TVQFP). By the technology of modularization with multi-layer architecture, an accurate real-time evacuation booting system is established.

【Key words】 evacuation model; Time Varying Quickest Flow Problem(TVQFP); modularization; multi-layer architecture

1 概述

公共危机主要包括突发卫生事件、地震、水灾、火灾、台风、核泄漏、毒气事故等, 目前已经引起世界各国政府的普遍关注与重视。我国是一个地域辽阔、人口众多、灾害频发的国家, 随着国民经济的快速发展, 灾害和各类突发事件造成的损失日益严重。必须建设一套基于科学决策的公共危机应急机制。发生公共危机时, 需要正确、有序地疏散并转移城市人口, 以维持社会稳定。因此, 应通过科学决策分析城市实际情况, 制定合理的应急预案。

早期人员疏散行为的研究重点是人们在非紧急情况下的活动, 包括建筑物内人员逃生的疏散模型。宏观模型主要有 FEGRESS, EXIT, MASSVAC 和 TEVACS 等, 微观模型有 EVASM, EXODUS 和 EGRESS 等。SGEM^[1-2] 是一种基于有限网格的混合模型, 能从宏观上模拟高密度建筑物中人员的疏散, 从微观上模拟人员个体的行为反映。机动车疏散模型的研究对象为室外车辆, 主要分为车辆跟驰模型、元胞自动机模型(Cellular Automation, CA)、连续模型和气动理论模型。NETVAC 模型基于宏观车辆群的疏散流对交通队列构成进行评估, 允许动态线路选择和基于交叉路口的路网控制管理。DYNEV 模型基于宏观的连续流与动态流原理确定交通控制、网络容量和疏散需求的影响并提供网络中各节点的交通流密度和速度估算结果。REMS 模型可确定疏散过程中的交通特性和疏散路线选择。上述模型通常按设计者意图或最短路径确定疏散路线, 计算并分析所需疏散时间和建筑物内人员滞留情况。实际的灾害事件变化极复杂, 疏散路线可能被障碍物阻挡, 导致上述模型的计算结果不能准确反映撤离时间, 而无法有效引导人员疏散。它们还存在不能以可视化方式显

示疏散仿真结果、数据管理能力不强的缺点。

为了辅助政府应急管理部门在城市公共危机事件中制定科学的疏散计划, 本文提出一个计算机辅助大规模人群疏散平台(Computer Aided Large-scale Evacuation Platform, CALEP)。其基本思路如下: 在发生重大公共危机事件时, 根据全局最优化原则, 确定最佳疏散策略, 包括疏散路线选择、时间安排、人群疏散次序及目的地分配等, 它通过 GIS 实现实时、可视化的结果显示。

2 CALEP 整体框架

CALEP 引入 GIS 技术, 采用分层体系结构, 构建模块化的大规模人群疏散科学决策支持平台。此平台能发挥整个交通系统的最大性能, 客观地反映疏散路网随时间变化的状况, 给出整个系统优化的疏散策略并实时输出可视化结果。

2.1 CALEP 体系结构

从技术底层到用户应用顶层, CALEP 自下而上分为 4 层, 即系统平台层、数据服务层、核心服务层和系统应用层, 如图 1 所示, 具体如下:

(1) 系统平台层, 由操作系统、数据库管理系统和网络管理系统组成, 支持分布式、客户机/服务器计算能力, 负责存储并管理地理空间数据、属性数据和各种疏散仿真数学模型。

(2) 数据服务层, 提供统一的数据服务接口, 通过组件式

基金项目: 香港特区政府研究资助局基金资助项目(9040615 [CityU1172/01E], 9040929 [CityU1326/04E])

作者简介: 湛永松(1979 -), 男, 博士后研究人员, 主研方向: GIS 开发应用, 计算机图形学; 卢兆明, 博士

收稿日期: 2008-07-20 **E-mail:** yszhan@cityu.edu.hk

GIS 完成地图分析功能, 向核心服务层提供标准格式的地理空间数据和属性数据, 接收来自核心服务层的用户交互信息, 是整个平台的主控模块。

(3)核心服务层, 提供疏散过程中所需的核心服务, 包括疏散调度仿真及灾情动向分析, 通过 GIS 技术完成数据输入与编辑等交互功能和地图显示。

(4)系统应用层, 根据政府应急管理部的特定需求为其提供相应服务, 如最优疏散路线选择、确定最小疏散时间、疏散次序优化、疏散目的地分配等。

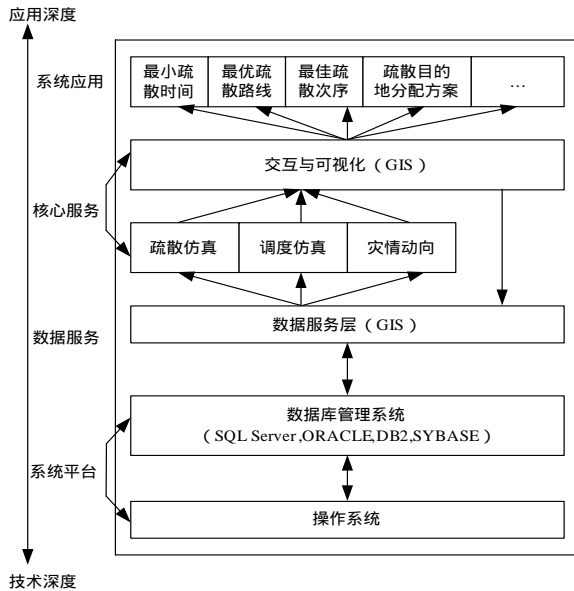


图1 CALEP 体系结构

2.2 CALEP 应用架构

CALEP 应用架构如图 2 所示。

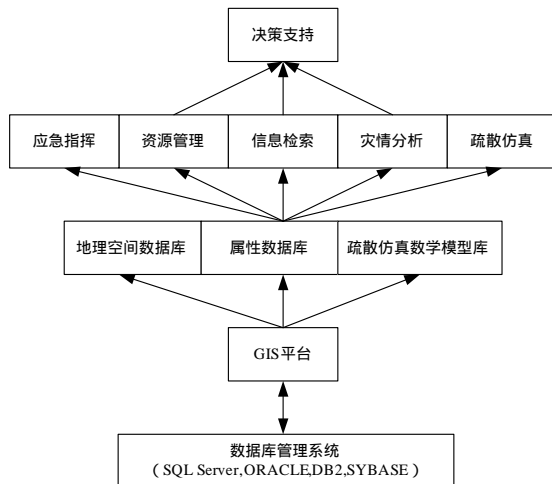


图2 CALEP 应用架构

GIS 平台在后台集成了城市地理空间数据库、属性数据库及疏散仿真、调度的数学模型库, 通过友好的交互界面将灾害动态预测信息、人口应急疏散模拟、信息检索、资源管理与救灾调度融为一体。政府应急管理部门根据灾情监测部门发送过来的灾害动向报告, 通过 CALEP 进行疏散、调度仿真, 实时获得科学的疏散决策并正确进行调度指挥, 安排大规模人群以高效、科学的方式快速撤离受灾点。

3 疏散规划模型

疏散规划模型由路网优化模型和疏散仿真模型组成。路

网优化模型为整体疏散规划制定优化策略。仿真模型可用于预测疏散时间, 模拟人群流动或交通状况, 验证路网优化模型生成的优化策略。

疏散仿真模型可分为宏观模型和微观模型 2 类。宏观模型以被疏散群体为研究对象, 交通流被视为由大量车辆组成的可压缩连续流体介质, 主要研究车辆集体的综合平均行为, 其单个车辆的个性特征并不显式出现。早期的宏观模型重点考虑车流密度与速度的关系, 在此基础上建立了排队网络模型。其思想是将平面图抽象成网络图, 考虑节点容量、弧度通行能力、流量密度和速度等因素, 得到人群或车队的总体疏散时间。宏观模型的理论难度较小, 构造简单, 对计算机运算能力的要求不高, 适合较大规模的疏散模拟。但宏观模型是一种抽象模型, 会丢失部分空间信息, 且无法体现大规模人群疏散中人员的个体特征及相互作用。微观模型针对被疏散个体在相互作用下的个性行为进行描述, 要求计算机有较高计算能力, 因此, 不适用于大规模人群的疏散仿真。综合考虑仿真复杂性、实时性、拟真度、计算机硬件能力等要求, 本文以 GIS-SimQue 模型^[3]作为疏散仿真模型, 提出一个基于时变动态流问题(Time Varying Quickest Flow Problem, TVQFP)的路网优化模型, 对人群疏散次序、时间安排、目的地分配、路线选择进行优化。

在基于 TVQFP 的路网优化模型中, 所有路网参数都是时变的, 此特性使其适用于分析疏散系统。突发性灾害通常会导致道路阻塞或通行能力降低, 使应急疏散网络随时间发生变化。时变动态交通流模型可以充分考虑灾害时路网参数随时间变化的过程并进行优化, 给出最优的疏散路线、疏散次序和疏散目的地, 确定最拥挤路段, 从而实现系统整体最优。

整个路网优化模型采用网络结构表示。源节点代表居民点, 中间节点代表路网交汇点, 目标节点代表安全地点。节点之间通过弧(即道路)相连接, 通常以机动车为运输工具来完成疏散过程。疏散规划的最优化目标是发挥疏散系统的整体最大效率。疏散效率的评价指标有多种表示方法, 如总体疏散时间、疏散距离、灾害发生前到达安全目的地的人数及路网可靠性等。因此, 疏散规划优化是一个数学上的多目标优化问题。基于 TVQFP 的路网优化模型结构如图 3 所示。

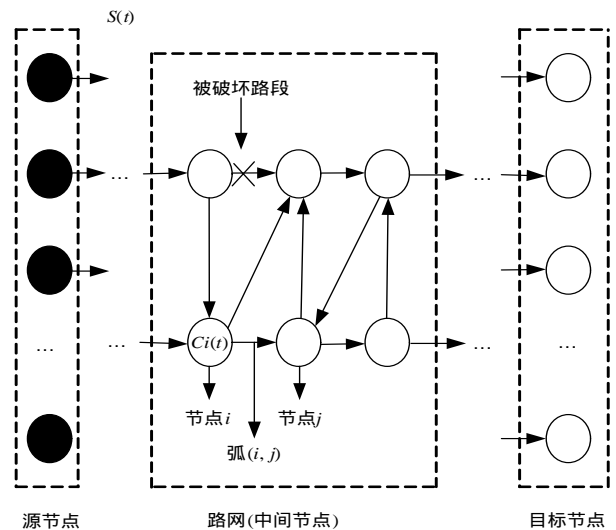


图3 基于 TVQFP 的路网优化模型结构

在图 3 中, 假设 t 为当前时刻; t' 为下一时刻; V 为节

点集； E 为边集； C 为节点容量； i, j 为 2 个相邻节点。定义 $\lambda_{ij}(t)$ 为道路通行时间； $S(t)$ 为源节点流出量； $C_i(t)$ 为节点 i 的容量，即可通过的最大车流量； $u_{ij}(t), x_{ij}(t)$ 分别为道路最大流量和实际流量； $y_i(t)$ 为节点 i 处的候车车流量。可定义优化目标函数为

$$\sum_{(i,j) \in E} \sum_{t=0}^T \lambda_{ij}(t) x_{ij}(t) \quad (1)$$

对式(1)求最小解，相应的约束条件为

$$\begin{cases} \sum_{t=0}^T x_{ij}(t) = \sum_{t=0}^T s(t) \\ \sum x_{ij}(t) - \sum x_{ji}(t) = y_i(t) \\ x_{ij}(t) \leq u_{ij}(t) \\ \sum x_{ij}(t) \leq C_i(t) \end{cases} \quad (2)$$

式(1)属于NP难问题，可采取时变最快流问题的求解方法^[4-5]解决。最快流问题等价于最早到达流问题，即保证每个时间段到达目的节点的流量最大。该算法求动态残留网络上的最短增广路径，残留网络上每条弧的残留容量在每次循环中更新一次。本文基于以上算法采用二分搜索法求解式(1)。

4 CALEP 软件设计

4.1 平台开发与运行环境

CALEP 平台开发的 PC 硬件基础为 1 GB 内存，Intel Pentium 4 CPU 3.0 GHz，Nvidia Geforce4 MX 4000 显卡，WDC 80 GB 硬盘。软件环境为 Windows XP+SP2 操作系统，后台数据库管理系统采用 SQL Server2000，以可视化开发工具 Visual C++6.0 作为开发平台，GIS 组件采用 ESRI 公司的地理信息系统软件 MapObjects2.4 来完成地图操作、图层处理和信息显示等功能。

4.2 平台实现的关键技术

CALEP 开发过程主要涉及组件对象技术、模块集成技术和空间拓扑分析技术。平台的设计思路是通过 GIS 组件完成所需 GIS 功能，例如地图的放大、缩小、漫游、移动、查询等。疏散仿真数学模型使用 Visual C++ 等通用开发环境来实现，以进行高效、无缝的系统集成。模块集成技术有利于发挥代码重用功能，缩短软件开发周期并减少开发成本。通过模块集成技术，能将 GIS 模块、疏散仿真和调度模拟等功能模块、后台数据库管理模块有机结合在一起。用户只要在 CALEP 的系统界面调用各功能模块，就能完成各自的预定功能。空间拓扑分析功能主要包括点与多边形叠加、线与多边形叠加、多边形与多边形叠加，可通过 GIS 组件实现。平台使用的 MapObjects 能完成地图数据的 SQL 查询、几何分析、缓冲区分析、叠加分析、网络分析和三维空间分析等功能。

4.3 疏散处理程序

根据模块化设计原则，CALEP 采取的疏散处理程序包括 3 个功能模块，即参数与原始数据输入模块、疏散规划模块、数据管理与结果输出模块，如图 4 所示。疏散规划模块是整个软件系统的核心，它通过基于 TVQFP 的路网优化模型生成经过优化处理的疏散策略，并传递给疏散仿真模型 GIS-SimQue 以验证优化结果。2 个辅助模块为参数与原始数

据输入模块、数据管理与结果输出模块，其功能通过 GIS 组件实现。

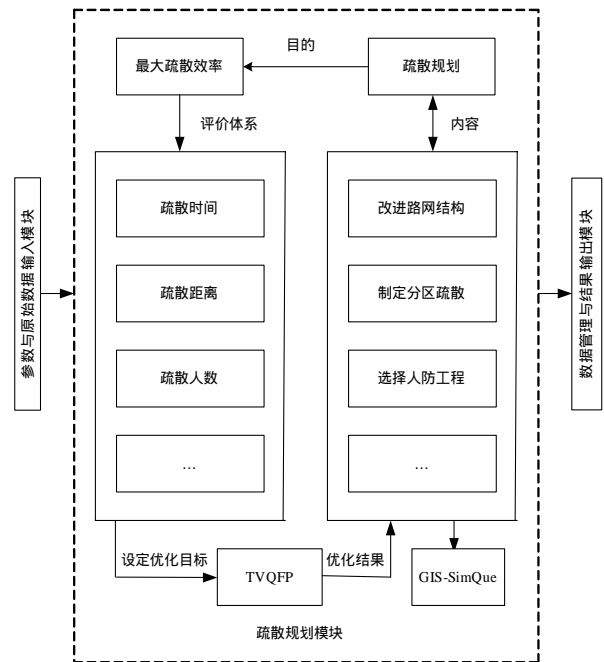


图 4 CALEP 功能模块

本平台采用模块化的结构进行开发，每个模块负责实现一项具体功能。通过研究获得了更好的疏散仿真数学模型时，只须改变相应模块就能完成系统更新和扩展，确保平台具有良好的可持续发展性能。

5 结束语

由于现代城市人口众多、财富集中，因此各种突发性灾害事故发生几率较大。研究如何正确选择疏散路线，设置合理的疏散次序，安排科学的人防工程对于保证人们的生命安全具有重要意义。本文将 GIS 技术引入 CALEP，并集成了疏散仿真模型和基于时变动态流问题的网络优化模型，采用模块化多层次体系结构设计平台的整体框架。此平台可以为城市防灾减灾规划和灾时应急预案的制定提供科学决策依据。

参考文献

- [1] Lo Siuming, Fang Zheng, Lin Peng, et al. An Evacuation Model: The SGEM Package[J]. Fire Safety Journal, 2004, 39(3): 169-190.
- [2] Lo Siuming, Fang Zheng. A Spatial-grid Evacuation Model for Buildings[J]. Journal of Fire Science, 2000, 18(5): 376-394.
- [3] Lin Peng, Lo Siuming, Ng W C, et al. A GIS-queue Model and Its Application to Regional Evacuation[J]. Journal of Basic Science and Engineering, 2004, 12(增刊): 161-166.
- [4] Hamacher H W, Tjandra S. Earliest Arrival Flow with Time Dependent Capacity for Solving Evacuation Problems[M]. Berlin, Germany: Springer, 2002.
- [5] Hooks E M, Patterson S S. On Solving Quickest Time Problems in Time-dependent Dynamic Networks[J]. Journal of Mathematical Modeling and Algorithms, 2004, 3(1): 39-71.