

地理信息系统在城市应急管理中的动态调度应用研究

刘先龙¹ 郭富涛¹ 胡 洋¹
LIU Xianlong GUO Futao HU Yang

摘 要

针对城市复杂环境下应急资源调度低效与路径规划滞后的问题,文章研究构建了基于地理信息系统的动态调度技术体系。从需求分析入手,设计了多源异构数据融合与管理方法,提出面向应急场景的时变路网模型与TDA*动态路径规划算法,并建立了基于改进遗传算法的多目标资源协同调度模型,结合实时可视化实现应急态势直观展现。通过危险化学品泄漏场景模拟,验证该系统在响应时间缩短、资源匹配优化及路径调整能力方面的有效性,为城市应急管理提供了智能化支撑路径。

关键词

地理信息系统; 动态调度; 路径规划; 应急资源管理

doi: 10.3969/j.issn.1672-9528.2026.06.012

0 引言

随着城市化进程加快,突发事件类型明显增加,传统依赖静态信息和就近原则的应急调度模式难以满足高时效性与精准性的需求。地理信息系统凭借空间数据集成、实时态势感知和可视化分析优势,成为提升应急管理水平的工具。本文在梳理应急动态调度系统需求的基础上,聚焦多源数据融合、动态路径规划与资源优化配置等关键问题,提出面向复杂场景的技术方案,并通过构建仿真环境开展系统验证。研究范围涵盖功能架构设计、算法实现与应用评估,旨在探索智能化调度机制对提升城市应急处置效率的作用。

1 基于 GIS 的应急动态调度系统需求分析

应急动态调度系统的构建需围绕功能、性能与数据三个维度展开。功能需求是系统的核心,要求具备事件精确定位与空间分析能力,能够通过多源信息自动或手动标定事件发生点,并即时生成影响范围评估^[1]。系统需提供应急资源的可视化查询与管理功能,实现对人员、车辆、物资、避难场所等资源的空间分布、实时状态与属性信息的动态检索。路径规划是关键功能,不仅要支持最优路径计算,还必须能够响应动态交通状况、道路管制与危险区域规避等约束,为调度单元提供动态导航。性能需求方面,高实时性是首要目标,系统响应延迟应控制在秒级,以保障决策与调度的时效性。数据处理与服务需支持高并发访问,满足指挥中心、现场人

1. 智成时空(西安)创新科技有限公司 陕西西安 710000

[5] 肖春蕾. 基于直方图均衡插值的盆底超声图像细节增强方法[J]. 自动化与仪器仪表, 2022(6): 261-264.
[6] 徐涛, 李冠章. 基于小波变换的彩色图像自适应细节增强算法[J]. 计算机应用与软件, 2011, 28(3): 240-242.
[7] 张博龙, 刘星, 水晨. 基于引导滤波图像分层的红外烟尘图像增强[J]. 国外电子测量技术, 2023, 42(4): 49-55.
[8] 路陆, 姜鑫, 杨锦程, 等. 基于自适应引导滤波的红外图像细节增强[J]. 液晶与显示, 2022, 37(9): 1182-1189.
[9] 杨家红, 向锦, 李翠红, 等. 一种新的红外图像细节增强算法[J]. 激光与红外, 2012, 42(5): 579-583.
[10] 刘斌, 金伟其, 王岭雪, 等. 基于空域和频域处理的红外图像细节增强算法[J]. 红外技术, 2011, 33(8): 477-482.
[11] 魏亮, 王炎, 胡文浩, 等. 基于双域分解的夜间车辆红外

图像研究[J]. 激光与红外, 2021, 51(11): 1538-1544.
[12] 汪伟, 许德海, 任明艺. 一种改进的红外图像自适应增强方法[J]. 红外与激光工程, 2021, 50(11): 419-427.
[13] 余峰. 基于双边滤波的红外图像对比度增强算法研究[J]. 信息记录材料, 2021, 22(4): 57-59.
[14] 王坤. 红外视频图像细节保持增强算法研究[J]. 电子制作, 2016(18): 33-34.

【作者简介】

薛俊(1979—), 男, 江苏扬中人, 本科, 中学一级教师, 研究方向: 计算机应用、高中信息技术。

(收稿日期: 2025-11-24 修回日期: 2026-06-10)

员及各联动部门同时在线操作的需求。系统应具备高可靠性,确保在极端条件下 7×24 h 稳定运行。数据层面,系统需整合并管理多源异构数据,包括基础地理信息数据,如道路网络、建筑物轮廓、水系;应急资源专题数据,涵盖消防站、医院、物资仓库等;以及实时动态数据,如全球定位系统(geographic information system, GPS)回传的车辆位置、交通监控设备提供的路况信息、物联网(internet of things, IoT)传感器监测数据。

2 关键技术研究实现

2.1 多源异构应急数据融合与管理技术

多源异构应急数据的有效融合与管理是动态调度的前提,核心在于整合空间与业务数据、同步静态与动态数据。对于矢量路网、栅格地形等基础地理数据,采用空间数据库统一存储并建立索引;对人员装备等业务数据,则通过统一地理编码赋予空间坐标,实现与位置的关联。此过程需建立统一的应急对象模型,定义其空间、业务和时间属性。为实时处理来自 GPS、IoT 等设备的海量流式数据,采用 Kafka 消息队列进行缓冲,后端利用流处理引擎进行实时过滤、转换与空间匹配,如将车辆 GPS 点匹配到路网上^[2]。通过建立时空立方体模型管理动态数据,支持历史回溯与趋势分析,并引入卡尔曼滤波等算法清洗数据,确保定位精度与数据质量^[3]。

2.2 面向应急响应的动态路径规划算法

传统的静态路径规划算法在多变的应急场景中适用性有限。因此,研究采用一种面向应急响应的动态路径规划算法,构建一个能够反映实时路况的时变路网模型。路网被抽象为一个带权有向图 $G_t = (V, E, W(t))$,其中 V 是节点集(交叉口), E 是边集(路段), $W(t)$ 是边的权重函数,表示在时间 t 时通过所研究路段的成本(如通行时间)。通行时间 $w_{ij}(t)$ 的计算融合多种引入,用公式表示为:

$$w_{ij}(t) = \frac{L_{ij}}{v_{\text{free}}} \cdot (1 + \alpha (\frac{f_{ij}(t)}{C_{ij}})^\beta) + P_{ij}(t) \quad (1)$$

式中: L_{ij} 是路段长度, v_{free} 是自由流速度, $f_{ij}(t)$ 是时间 t 的实时交通流量, C_{ij} 是路段通行能力, α 和 β 是延时模型的标定参数, $P_{ij}(t)$ 是一个惩罚项,用于表示临时交通管制或危险区域等不可通行情况,其值可以设为一个极大值。

在此模型基础上,采用时间依赖的 A* (time-dependent A*, TDA*) 算法进行路径搜索, A* 算法的评估函数用公式表示为:

$$f(n) = g(n, t_{\text{arrival}}) + h(n) \quad (2)$$

式中: $g(n, t_{\text{arrival}})$ 是从起点到达节点 n 在到达时间 t_{arrival} 时的实际通行成本,这一成本是通过累加前序路段的时变权重 $w_{ij}(t)$

计算得到的, $h(n)$ 是从节点 n 到终点的预估成本,即启发函数^[4]。为保证最优解,启发函数 $h(n)$ 必须满足一致性且小于或等于实际成本,通常采用节点 n 到终点的欧氏距离除以区域最大允许速度来计算。 $h(n)$ 用公式表示为:

$$h(n) \leq w^*(n, \text{goal}) \quad (3)$$

式中: $w^*(n, \text{goal})$ 代表从节点 n 到目标节点 goal 的实际最小成本。

2.3 多目标应急资源协同调度模型

应急资源调度是一个复杂的多目标优化问题,需要在多个相互冲突的目标之间寻找平衡。调度模型需要同时优化总响应时间、资源负载均衡度以及任务覆盖完整性。为此,构建了一个基于改进遗传算法(genetic algorithm, GA)的多目标应急资源协同调度模型。此模型的目标函数 $F(x)$ 定义为三个子目标的加权和,用公式表示为:

$$\min F(x) = \omega_1 \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n T_{ij} x_{ij} + \omega_2 \sum_{j=1}^n (\frac{L_j}{L_{\text{avg}}} - 1)^2 + \omega_3 \sum_{i=1}^m (1 - C_i) \quad (4)$$

式中: x_{ij} 是一个决策变量,如果任务 i 分配给资源 j 则为 1,否则为 0; T_{ij} 是资源 j 到达任务 i 现场的预计时间,由动态路径规划算法提供; L_j 是分配给资源 j 的总任务量; L_{avg} 是平均任务量,第二项用于衡量负载均衡; C_i 是任务 i 的需求被满足的程度,第三项旨在最大化任务完成度; ω_1 、 ω_2 、 ω_3 是权重系数,由决策者根据应急事件的优先级和性质设定^[5]。

遗传算法的实现中,每个染色体代表一个完整的调度方案。采用整数编码方式,染色体的每个基因位代表一个应急任务,基因值则对应被指派的应急资源编号。染色体结构可表示为:

$$\text{LOD}_{\text{level}} = f(D_{\text{view}}, A_{\text{proj}}) \quad (5)$$

算法的执行过程包括初始化种群、适应度评估(基于目标函数 $F(x)$)、选择、交叉和变异操作。为提高算法收敛速度和避免陷入局部最优,引入了精英保留策略和自适应交叉变异概率。模型的约束条件包括资源唯一性约束(一个资源同一时间只能执行一个任务)和能力匹配约束(执行任务的资源必须具备相应的专业能力和设备)^[6]。为实现精确的能力匹配,系统首先需要对各类应急资源进行结构化定义与量化评估,其分类与核心能力属性示例如表 1 所示。

2.4 应急态势实时可视化技术

应急态势实时可视化是实现高效指挥决策的关键环节,其目标是构建一个信息融合、动态直观的通用作战图,将抽象的多维应急信息以地理空间为载体进行二三维一体化呈现。前端采用基于 WebGL 的开源引擎,如 Cesium.js,以支持在浏览器中流畅加载和渲染大规模三维城市模型、地形数据以及实时动态要素。为保证在不同硬件设备上的渲染性能,

表 1 应急资源分类与能力属性定义示例

资源类型	资源编码	核心能力描述	关键装备	专业能力评级
重型危化处置队	HAZMAT-1	危险化学品泄漏封堵、洗消	A 级防护服、堵漏工具	5
环境监测队	HAZMAT-2	有毒有害气体监测、采样分析	便携式气相色谱仪	3
医疗救护组	MED-01	现场伤员急救、分类后送	除颤仪、急救箱	2
交通管制分队	POL-01	道路封锁、外围警戒、疏散引导	路障、警戒带	1

三维模型数据采用层次细节模型（level of detail, LOD）技术进行组织。LOD 的切换策略基于视点距离与模型屏幕投影面积，其选择函数可简化为：

$$LOD_{level} = f(D_{view}, A_{proj})$$

(6)

式中： D_{view} 是视点到对象的距离， A_{proj} 是对象在屏幕上的投影面积。

动态要素的可视化是技术实现的重点。应急车辆、人员等移动资源的位置通过 WebSocket 协议从服务端实时推送到客户端，前端以平滑插值动画更新其在地图上的图标位置，并可拖拽出运动轨迹线。事件影响范围，如危险气体扩散、洪水淹没区等，可根据后端模型计算结果动态生成并渲染为半透明面状图层。各类应急资源和事件点的符号采用可配置的样式库，其颜色、大小或闪烁状态可与对象的实时属性（如消防车的水量、任务的紧急程度）进行数据绑定，实现状态的直观感知。交互性方面，系统支持地图的基本操作，并提供属性查询、空间量测、缓冲区分析等工具，指挥人员可通过简单的点击或框选操作，快速获取任一要素的详细信息或执行空间分析，从而辅助决策判断^[7]。

3 案例分析与验证

3.1 实际案例场景

为验证系统框架及关键技术的有效性，设定一个城市中心区的危险化学品泄漏应急响应场景。场景位于某市工业与居民混合区，一家化工厂的液氯储罐发生泄漏。事件信息为：14:05，位于 A 点（东经 116.32°，北纬 39.98°）的储罐出现裂缝，导致氯气持续泄漏。该区域人口密集，周边有学校、居民区和主要交通干道。应急响应的目标是：快速派遣专业处置队伍到达现场进行堵漏，同时疏散受影响区域内的民众，并对周边交通进行管制。系统需要根据实时风向风速数据（西南风，3.5 m/s），动态模拟毒气扩散范围，规划出规避危险区域的安全疏散路径和救援队伍的逆风突进路线。应急资源包括两支危险化学品应急救援队（HAZMAT-1, HAZMAT-2），分别位于 B 点和 C 点，以及周边的交警、医疗和消防力量。

3.2 实验数据准备

实验数据基于真实地理环境构建，基础地理数据采用

OpenStreetMap 提供的该区域详细路网数据，包含道路等级、限速、转向限制等信息，并将其导入 PostGIS 数据库。建筑物轮廓数据通过公开的地图服务获取，用于三维场景构建与影响分析。应急资源数据为自行构建，HAZMAT-1 位于 B 点（东经 116.35°，北纬 40.01°），距事发点约 5.2 km，装备有重型防护服和堵漏设备。HAZMAT-2 位于 C 点（东经 116.29°，北纬 39.99°），距事发点约 3.8 km，装备轻型防护服和环境监测设备。实时动态数据通过模拟生成。交通路况数据模拟了下午时段的交通拥堵状况，将几条关键路段的通行时间权重设置为静态值的 1.5~2.5 倍。毒气扩散模型采用高斯烟羽模型，根据设定的气象参数和泄漏速率，每分钟生成一个新的影响范围多边形（Polygon），作为动态障碍物。所有数据均按照系统数据层的规范进行预处理和入库，以备模拟验证调用。

3.3 模拟与验证过程

模拟验证过程分为两个阶段，分别对应动态路径规划和多目标资源调度。

第一阶段，验证动态路径规划算法的有效性。事件发生后，系统同时为 HAZMAT-1 规划前往 A 点的路线。分别使用传统的基于路网最短距离的 Dijkstra 算法和所提出的 TDA* 算法进行计算。Dijkstra 算法规划出的路径在几何距离上最短，总长 6.1 km，但途经一条模拟的严重拥堵路段。TDA* 算法接收到实时路况数据后，识别到该拥堵，自动绕行，规划出一条总长 7.3 km 但预计通行时间更短的路径。同时，两种算法均需考虑动态更新的毒气扩散区。在模拟的第 5 min，毒气扩散区覆盖了 TDA* 算法规划路径的一部分，系统立即触发路径重规划，为 HAZMAT-1 生成了一条新的、完全避开危险区域的路线。

第二阶段，验证多目标资源协同调度模型的性能。在初始阶段，系统需要决策派遣哪支队伍。根据多目标调度模型，输入参数包括两个任务：核心区的堵漏作业（高优先级，需要重型防护）和外围的环境监测（中优先级，需要环境监测设备）。模型以最小化响应时间为主要目标（权重 0.6），兼顾能力匹配。计算结果显示，虽然 HAZMAT-2 距离更近，但其装备不满足堵漏作业要求。模型依据能力匹配约束，将堵漏任务分配给 HAZMAT-1，将环境监测任务分配

给 HAZMAT-2。这避免了因资源错配导致的二次调度延迟。调度方案生成后，系统将任务指令和 TDA* 算法规划的导航路径分别下发至两支队伍的移动终端，并在指挥大屏上实时追踪其行进轨迹与任务状态。

3.4 结果分析

模拟过程的数据清晰地反映了所提系统在应急响应效率与决策质量方面的表现。通过对比传统应急模式与基于 GIS 的动态调度模式，可以发现后者在信息感知、智能分析和动态适应性上具备明显优势。传统模式下依赖静态信息和简单规则（如就近原则）进行的决策，在复杂场景中容易导致资源错配和响应延迟。而动态调度模式通过整合实时数据与优化模型，能够穿透表象，做出全局最优的决策。为进一步量化评估系统各模块的性能表现，将模拟过程中的关键指标进行汇总，具体数据如表 2 所示。

传统“就近”调度模式因忽略能力匹配，导致超 25 min 的无效响应。而多目标调度模型能精确匹配资源与需求，即便地理位置较远，也将有效响应时间缩短至 14.2 min。在路径规划上，TDA* 算法凭借对实时路况的感知，虽路径更长，但通行时间反而缩短 23.7%。该动态调度系统通过融合多维信息与智能算法，实现决策转变，构建更高效可靠的应急响应机制。

4 结语

基于 GIS 的动态调度系统能够有效整合异构数据，支持路径实时重构与多目标资源调度，在危险化学品泄漏场景模拟中能够有效响应时间，提升能力匹配的合理性。系统实现由“最近”向“最优”的决策转变，为应急指挥提供全局性与动态化支持。未来的研究可进一步拓展算法适应性，加强与物联网和人工智能技术的深度融合，以实现更高层次的智能调度与跨部门协同，推动城市应急管理体系的持续优化。

参考文献：

[1] 刘亚南. 三维地理信息系统在消防应急救援中的应用研究[J]. 消防界(电子版),2025,11(6):109-111.
[2] 李宇刚. 地理信息系统在城市测绘中的应用研究[J]. 中国新通信,2025,27(6):68-70.
[3] 杨赞光,余群凤. 地理测绘中地理信息系统的应用研究[J]. 科技资讯,2025,23(5):54-56.
[4] 王成. 地理信息系统在智慧城市建设中的应用[J]. 智能建筑与智慧城市,2025(1):43-45.
[5] 韩兆国. 地理信息系统在城市消防通信指挥系统中的应用[J]. 中国新通信,2023,25(22):4-6.
[6] 张袁萍,袁川升. 地理信息系统在智慧城市建设中的应用探究[J]. 信息系统工程,2023(11):93-96.
[7] 秦绍鑫,李莹. 地理信息系统在政府应急管理中的创新应用研究:以 Z 市 D 区应急指挥中心为例[J]. 中国应急管理科学,2023(1):59-69.

【作者简介】

刘先龙(1983—)，男，陕西西安人，硕士研究生，工程师，研究方向：数字孪生水利信息化、三维地理信息与数字孪生等。

郭富涛(1994—)，男，陕西商洛人，硕士研究生，研究方向：三维地理信息与数字孪生、大地测量与卫星导航定位(GNSS)等。

胡洋(1991—)，男，陕西西安人，硕士研究生，研究方向：多源空间数据处理与服务化技术、空间数据轻量化与高效传输技术等。

(收稿日期：2025-10-13 修回日期：2026-05-28)

表 2 传统应急模式与 GIS 动态调度模式模拟结果对比

评估维度	关键指标	传统应急模式 (基于静态信息与就近原则)	GIS 动态调度模式 (基于实时数据与优化模型)
资源调度	首选处置单元	HAZMAT-2 (距离 3.8 km)	HAZMAT-1 (距离 5.2 km)
	能力匹配度	不匹配 (缺少重型堵漏设备)	完全匹配
	最终有效响应时间	>25.0 min (含二次调度时间)	14.2 min
路径规划 (以 HAZMAT-1 为例)	采用算法	Dijkstra	TDA*
	规划路径长度	6.1 km	7.9 km (最终)
	考虑因素	仅静态距离	实时路况、动态危险区
	实际通行时间	18.6 min	14.2 min
系统响应	路径重规划耗时	N/A	3.1 s