

面向时空感知数据的人群应急疏散规划模型

徐馨润^{1,2)} 姜山^{1,2)} 丁治明¹⁾ 吴玉荣^{1,2)} 严瑾^{1,2)} 崔庆龙³⁾

¹⁾(中国科学院软件研究所 北京 100086)

²⁾(中国科学院大学 北京 100049)

³⁾(北京控制工程研究所 北京 100190)

摘要 随着信息技术、智能物联网技术以及机器学习理论的飞速发展,时空感知数据为应急灾害救援提供了新的视角,综合利用时空感知数据进行灾区态势信息感知与提取,可以为应急救援形成新的着力点.由于时空感知数据拥有丰富的语义信息和较高的实用价值,并且对灾害救援具有积极引导作用,因此,研究和利用时空感知数据进行应急疏散,是一项具有现实意义的工作.本文重点聚焦面向时空感知数据下的资源受限的人群应急疏散规划问题,研究了基于时空感知数据的人群应急疏散规划模型与方法,以期为应急救援提供积极的思路和技术保证.首先,分析了时空感知数据对人群应急疏散的作用;其次,提出了基于时空感知数据的应急疏散框架,并设计了一种基于行人流量预测的应急疏散场所推荐算法,还构建了一种考虑疏散偏好的应急疏散人群分配整数规划模型;然后,提出了一种全局最优疏散路径规划算法,接着将应急疏散路径规划问题转化为多组疏散路径规划查询问题,并通过使用网络扩展策略和剪枝策略,进一步设计了一种面向全局最优疏散路径规划查询的求解算法,来解决多组疏散路径规划查询问题.此外,为了提高应急疏散路径搜索结果的质量,还设计了一种改进算法,对全局最优疏散路径规划查询算法生成的路径组合,进行改进和优化.最后,通过大量实验分析与评估,充分验证了所提方法与模型的有效性.

关键词 时空数据;时空感知数据;物联网;应急管理;应急疏散;路径规划

中图法分类号 TP311 DOI号 10.11897/SP.J.1016.2023.01427

A Spatio-Temporal Awareness Data-Oriented Model for Emergency Crowd Evacuation Route Planning

XU Xin-Run^{1,2)} JIANG Shan^{1,2)} DING Zhi-Ming¹⁾ WU Yu-Rong^{1,2)} YAN Jin^{1,2)} CUI Qing-Long³⁾

¹⁾(Institute of Software, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100086)

²⁾(University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049)

³⁾(Beijing Institute of Control Engineering, Beijing 100190)

Abstract Spatio-temporal awareness data, which is characterized by its spatial attributes, temporal attributes, and perception characteristics, has become increasingly important with the advancement of information technology, intelligent Internet of Things (IoT) technology, and machine learning theory. Spatio-temporal awareness data offers a new perspective for emergency disaster rescue, as it provides insights into the location, timing, and sensory information of various events and occurrences. By leveraging Spatio-temporal awareness data, emergency responders can better understand the nature and extent of a disaster, and make more informed decisions about how to respond to it. The integration of Spatio-temporal awareness data into emergency disaster

收稿日期:2022-04-05;在线发布日期:2023-01-09. 本课题得到国家重点研发计划(2022YFF0503900)、山东省重点研发计划(2021CXGC-010104)资助. 徐馨润,博士研究生,主要研究方向为时空数据库、时空感知大数据分析. E-mail: xuxinrun20@mails.ucas.ac.cn. 姜山,博士研究生,主要研究方向为时空感知大数据分析、深度学习算法. 丁治明(通信作者),博士,研究员,博士生导师,中国计算机学会(CCF)会员,主要研究领域为数据库与知识库系统、时空数据库与数据挖掘、物联网与云计算. E-mail: zhiming@iscas.ac.cn. 吴玉荣,硕士研究生,主要研究方向为时空数据库、数据分析. 严瑾,博士研究生,主要研究方向为应急管理、数据分析、时空数据分析. 崔庆龙,硕士,主要研究方向为自动武器站稳瞄系统设计和深空探测大数据分析研究.

rescue efforts has the potential to significantly improve the efficiency and effectiveness of these operations. The comprehensive use of Spatio-temporal awareness data for situational information sensing and extraction in disaster areas can form a new focus point for emergency rescue. In the emergency rescue problem, the scientific emergency evacuation of the affected population is the key to the rescue problem. As Spatio-temporal awareness data has rich semantic information and high practical value, and has a positive guiding effect on disaster rescue, it is a practical task to study and use Spatio-temporal awareness data for emergency evacuation. This paper focuses on the problem of resource-constrained crowd emergency evacuation planning under Spatio-temporal awareness data, and investigates the model and method of evacuation site confirmation and crowd emergency evacuation planning based on Spatio-temporal awareness data, with a new view to providing positive ideas and technical assurance for emergency rescue. Firstly, the role of Spatio-temporal awareness data in emergency crowd evacuation is analyzed, which can assist emergency decision-making. Secondly, an emergency evacuation framework using a rolling time-domain planning strategy based on Spatio-temporal awareness data is proposed, and an emergency evacuation place recommendation algorithm based on pedestrian flow prediction is designed. An integer programming model of emergency evacuation population allocation considering evacuation preference is also constructed to meet the satisfaction of different evacuation populations with evacuation places during emergency evacuation. Then, a global optimal evacuation path planning algorithm is proposed, and the emergency evacuation path planning problem is transformed into a multi-group evacuation path planning query problem, and a solution algorithm for the global optimal evacuation path planning query is further designed to solve the multi-group evacuation path planning query problem by using a network expansion strategy and a pruning strategy. In addition, in order to improve the quality of the emergency evacuation path search results, an improved algorithm based on refinement operation is also designed to improve and optimize the path combinations generated by the global optimal evacuation path planning query algorithm. Finally, through extensive experimental analysis and evaluation, the effectiveness and practicability of the proposed method and model are fully verified, which can significantly shorten the global travel time. In conclusion, this paper mainly studies the overall technical streamline of the emergency evacuation process, including proposing the evacuation site confirmation method and model, designing the crowd distribution model and emergency evacuation path planning method, in order to provide necessary technical support for emergency evacuation management.

Keywords spatio-temporal data; spatio-temporal awareness data; Internet of Things (IoT); emergency management; emergency evacuation; path planning

1 引 言

近年来,灾害发生后的应急救援问题受到了各界的广泛关注^[1-4]. 在应急救援问题中,对受灾人群的科学应急疏散是救援问题的关键. 应急疏散问题传统求解方法包括基于救援与疏散模型的求解办法、基于救援历史经验的求解办法、基于知识库推理的求解办法以及灾前制定的应急响应预案等,这些传统的办法虽然能够指导灾后应急救援,但是缺

乏一定的灵活性,在应急救援过程中往往表现出“一刀切”的局面.

现如今,随着信息技术的飞速发展^[5-6],特别是近年来人工智能技术^[7] (Artificial Intelligence Technology, AIT)、智能物联网感知技术^[8] (Artificial-Intelligent Internet of Things, AIoT)和智慧城市^[9] (Smart City)等的快速落地,以及城市累积的时空感知数据(Spatio-Temporal Awareness Data, STAD),使得对应急救援问题的求解有了新的思路^[10-11]. 相比于时空数据,时空感知数据具有空间属性、时间属

性以及感知特性等新特点,时空感知数据势必将对灾后应急救援问题产生新的求解思路。例如,在各个救援安置区域布设的边缘智能感知设备^[12],为救援安置提供实时态势信息等。基于 STAD 数据,理应可以提取出时空态势信息(Spatio-Temporal Situation Information, STSI)。本文将利用多源时空感知数据以及智能规划方法对突发灾害进行科学应急疏散管理,即基于时空感知数据分析技术为应急救援问题提供新的解决方案。

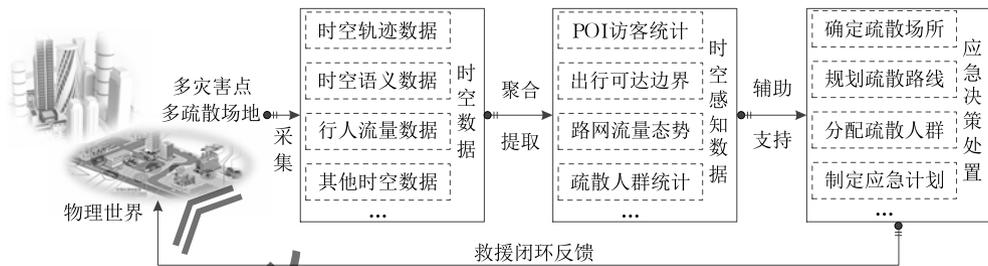


图1 时空感知数据对应急疏散的作用示意图

本文第2节综述灾害应急疏散管理方面的相关工作;第3节介绍本文构建的面向时空感知数据的应急疏散框架,其中特别设计基于行人流量的应急疏散场所推荐算法以及构建考虑人群疏散偏好的应急疏散人群分配模型;第4节则对面向时空感知数据的疏散路径规划问题进行研究;第5节对本文提出的模型与算法进行实验评估,充分验证提出方法的有效性;第6节对本文工作进行总结。

2 相关工作

疏散路径规划作为灾害应急救援的重要组成部分之一,最主要目的是根据交通路网制定疏散路线,将受灾区域内的一定数量人群转移到特定容量的避难所(或疏散场地)^[13-15]。

应急疏散^[16]的研究最早可以追溯到20世纪60年代,Harry等人^[17]对不同飓风情景下不同城市的居民进行了问卷调查,研究受访者在飓风环境下的行为及其影响因素,为后续的应急疏散研究提供了有意义的参考方向。并于1973年为美国联邦高速公路管理局研发网络流模型NETSIM(Traffic Simulation System in Network Simulation Model)。Southworth^[18]提出了区域疏散模型的五阶段模型,该研究参照传统城市交通的四阶段规划模型,提出了由交通生成、出行时间选择、目的地选择、出行路径选择以及交通规划和分析组成的五阶段建模机制。20世纪90年代,应急疏散研究进入迅速发展期,主要研究方向多

通过对时空轨迹数据、时空语义数据、行人流量数据、应急疏散场地数据等时空数据的有效聚合与提取(这个过程可以看作是时空数据感知提取),形成不同场景下的时空感知数据,比如重点场所POI行人流量数据、时空出行可达边界、交通路网流量态势估计、疏散人群等。图1展示了时空感知数据对应急疏散的作用示意图,其中,根据时空感知数据决策者可以确定用于安置人群的疏散场地、规划或制定疏散路线、分配疏散人群和制定应急计划等。

为建筑物应急疏散^[19]以及小规模城市路网疏散^[20]。

进入21世纪以来,得益于Agent^[21]、元胞自动机^[22]、交通流感知^[23]等技术的发展和进步,应用于应急疏散的建模和仿真方法得到了广泛的关注和长足的发展,其应用也逐渐细化。建模疏散问题中按人员意识可划分为两种方法,第一种建模方法被称之为物理建模,人员被假设为无主观意识的移动单位。第二种建模方法被称之为社会学建模或心理学建模,人员被设定为是有主观意识的,并且按照自身反应规则行事^[24-26]。疏散问题模型求解的方法也可以分为两类:一类是优化方法^[26];另一类是仿真方法。基于优化的方法采用人员的物理建模方法,将疏散队伍视为由车流或人流形成的一个整体,忽略掉个体的主观行为特征,将注意力集中在制定优化的规划策略上,这类方法往往将通行条件建模为图,将疏散问题转化为网络流问题来求解优化的疏散规划模型^[27],在区域内的疏散应用较多。基于仿真的方法通过对单个人或交通工具的行为规则进行建模仿真来反映整个疏散的状态过程,从而预测和决定疏散时间和路径,其特点是体现个体的主观行为特性,体现个体与周围环境之间的相互作用^[28-29]。在疏散应急规划过程中,疏散路径是一个重要环节,其决定着疏散方案的时间效果,常见的做法是将疏散路径规划问题看作是静态的路径选择问题,将其转化为经典的带时间过程的网络流问题模型,来求解优化的路径选择策略。求解带时间过程的离散网络流问题的一种可行方法是利用时间扩充图^[30-33]将动态

网络转化为静态网络,然后利用一些经典的多项式时间算法来求解。

针对人群的疏散研究,一些学者开发了新的用于模拟人群疏散的模型。例如,Wei 等人^[34]提出了一种网格模拟基础设施,通过弥合松散耦合计算平台和紧耦合计算平台之间的差距来实现大型模拟。Song 等人^[35]提出了一种利用虚拟地理环境和病原体扩散理论模拟人群疏散的方法。Xiong 等人^[36]提出了考虑人群运动趋势和个体多样性的人群疏散模拟模型。Fu 等人^[37]提出了一个多速度场元胞自动机模型,可用于模拟疏散和任何其他具有微小变化速度的行人运动,并且耗时很少。Xu 等人^[38]提出了一种融合互信息和社会力量模型的技术,采用交互代理的互信息来确定疏散期间人群内的秩序水平。通过这种方式,可以通过调整相互作用的代理之间在微观层面上涉及的力来改进社会力模型。Cao 等人^[39]提出了一种个性化易感染模型来模拟人群疏散过程中的情绪传染,将情感引入到原始的社会力模型中,并修改了个体的期望速度以描述他们在不同情感下的运动,模拟了情绪可能在人群中传播的真实场景。Li 等人^[40]提出了一种基于网格密度和关系的分组算法,通过计算机模拟来说明改进的社会力模型的特点。Lu 等人^[41]提出了一个将行人群体行为纳入人群疏散的模型。Liu 等人^[42]提出了一种基于导航知识和双层控制机制的人群疏散模拟方法,通过利用行人群体行为中明显的领导者-跟随者行为规则来制定的。Liu 等人^[43]提出了一种紧急疏散模拟路径规划方法,以增强视觉真实感,提高人群疏散效率。Liu 等人^[44]模拟了 2015 年上海踩踏事件中的人群疏散行为,得出人群疏散时间根据生理特征、运动轨迹和目的地不同而不同。He 等人^[45]提出了一些基于个体心理的人群疏散模型和模拟系统。Shiwakoti 和 Sarvi^[46]系统性回顾了紧急情况下模拟复杂人类行为的动物实验的相关文献。Ibrahim 等人^[47]回顾了智能疏散管理方面的文献,包括人群监测、人群事故预警、人群行为建模和疏散路线优化。Vermuyten 等人^[48]评估了现有模型和算法以优化疏散路线规划。Gayathri 等人^[49]系统性回顾了有关群众性宗教集会人群动态的文献,并提出了改进人群疏散安全管理的建议。Vanumu 等人^[50]系统性回顾了观察行人流和移动速度的文献,总结了行人流的基本学科。Drury^[51]系统性回顾了关于个体压力行为和个体社会认同对突发事件中群体自组织的

影响。此外,通过利用心理人群中的关系转变的概念,还展示了新兴的共享社会身份如何产生一系列进一步的行为和认知后果,这些后果有助于紧急情况下的集体自组织,包括预期的支持、行为的协调,和集体效力。

综上所述,现有的应急疏散方法分为基于优化的方法和基于仿真模型的方法等,这些方法和模型虽然能够进行应急疏散问题求解,但是往往针对的疏散场景较为单一,场景数据来源单一,模型和方法缺乏一定的灵活性。然而,在应急疏散实践中,还需要考虑时间、实时态势、气象等外部特征,应急灾害中的应急疏散往往涉及多个目的地,疏散情况较为复杂。需要构建一种通用的基于时空感知数据的应急疏散框架,在通用框架内对疏散问题建模和优化求解,并综合利用时空感知数据或数据进行应急疏散。近年来无人机技术^[52-54]、深度学习技术^[4,55-56]、智慧城市^[57]、物联网^[58-60]以及大数据分析技术^[60-63]等广泛应用,使得对灾区的态势信息获取更加便捷和及时。特别地,随着新兴的信息和大数据与人工智能技术的出现,为对灾害场景下的多源态势的感知提供了有效的可行途径,在进行应急疏散规划时充分考虑传输路网态势、灾害环境态势等多源态势信息,为应急管理能够做出快速与最佳决策,提供实时有效的参考态势。

随着车辆导航系统、智能手机和在线地图服务的不断发展,为应急疏散规划提供了新的可能,决策者可以基于现有的系统来辅助决策。基于此,针对多组出行需求下的最优疏散路径规划任务,将疏散路径规划任务转化为一种新的全局最优路径问题(Global Optimal Route,简称 GOR),即给定一个交通感知的道路网络 G 和一组出行查询 Q ,为每个查询生成一条疏散路径,使所有查询的出行时间总和最小化。其中,每条边的行程时间取决于边的最小行程时间和车流量(车流量可以用研究成果^[64]来预测或估计),查询找到一个使全局行程时间最小的路线组合(一组规划路径)。

因此,本文重点探究时空感知数据下的多目标应急资源调度与疏散规划问题,旨在为灾害应急管理过程中灾害响应阶段的相关核心问题提供解决方法和求解模型,并综合考虑基于时空感知数据特征为驱动的应急资源调度与疏散规划问题建模与求解方法,这将更加适合于当前社会环境下的应急救援需求。

3 面向时空感知数据的应急疏散框架

3.1 相关定义

定义 1. 时空数据 (Spatio-Temporal Data). 时空数据是指根据时间元素变化的空间数据, 是同时具有时间维度属性和空间维度属性的数据, 例如轨迹数据是时空数据的一种具体表现. 轨迹数据的形式化定义如下:

$$trj := \begin{Bmatrix} lon_1 & lat_1 & t_1 \\ lon_2 & lat_2 & t_2 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ lon_k & lat_k & t_k \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ lon_n & lat_n & t_n \end{Bmatrix} \quad (1)$$

其中, trj 代表一条时空轨迹, t_k 为时间戳, lon_k 和 lat_k 分别表示对象在 t_k 时刻的地理精度位置和纬度位置, 记时空点 $p_k = (lon_k, lat_k, t_k)$, 则轨迹数据也可以表示为: $trj := \{p_1, p_2, \dots, p_n\}$, 代表有 n 个有序的时空点 p 组成.

定义 2. 时空感知数据 (Spatio-Temporal Awareness Data). 时空感知数据是指物联网、智慧城市、遥感遥测等应用系统中, 通过提取技术 (例如, 识别方法、聚类方法、分类方法等) 进行感知获取的能够反映人一机一物三元世界状态及其变化的、且同时具有时间和空间属性的那部分数据. 时空感知数据是一种特殊的时空数据, 区别于一般的时空数据, 时空感知数据可以拥有特定语义信息. 以语义轨迹数据

为例, 其可形式化定义如下:

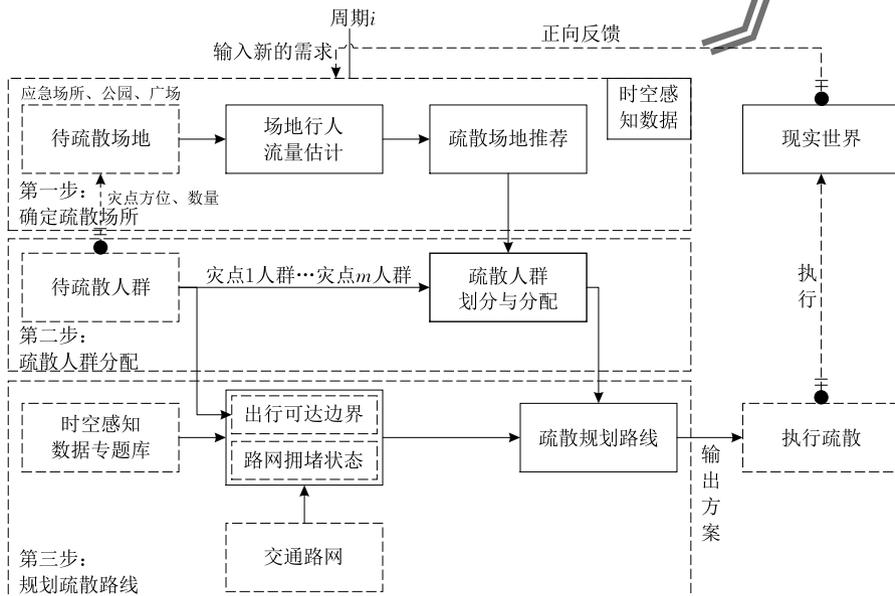
$$trj_s := \begin{Bmatrix} lon_1 & lat_1 & sem_1 & t_1 \\ lon_2 & lat_2 & sem_2 & t_2 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ lon_k & lat_k & sem_k & t_k \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ lon_m & lat_m & sem_m & t_m \end{Bmatrix} \quad (2)$$

其中, sem_k 为语义信息, 表示第 k 个时间戳下的实际语义, 可以是标量或向量, 也可以是字符串.

相比于一般时空数据, 时空感知数据具有空间属性、时间属性以及感知特性 (或语义) 等新特点. 因此, 时空感知数据势必将对灾后应急救援问题产生新的求解思路.

3.2 应急疏散总体框架描述

面向时空感知数据的应急疏散整体架构, 如图 2 所示. 所提应急疏散整体框架采用了“分层递阶式”的滚动时域规划策略, 在每一个规划时域内, 每辆疏散车只有在完成了前一个规划周期内的所有请求后, 才会分配新的请求. 如果一辆车已经完成了所有分配的请求, 那么它会在最后一个疏散场所等待, 直到分配新的请求. 很显然, 人群应急疏散过程的整个时间可以被细分为一系列阶段 (或规划时域). 每个规划时域由若干个规划周期组成. 在第一个规划周期, 设计一个初始计划, 通常设计或预测的初始计划是固定且可靠的, 并且只在这第一个周期执行. 随着新信息和可靠预测的出现, 接下来的规划计划将在即将到来的周期内实现.



第 j 规划周期下的面向时空感知数据的应急疏散框架

图 2 面向时空感知数据的应急疏散整体架构图

(2) 人群分配模型目标函数

目标函数 1(不满意度损失最小化):

$$Z_1 = \min \sum_n \sum_m \sum_k x_{mk}^n \cdot \beta_{mk}^n \quad (3)$$

目标函数 2(距离损失最小化):

$$Z_2 = \min \sum_n \sum_m \sum_k x_{mk}^n \cdot d_{mn} \quad (4)$$

(3) 人群分配模型约束条件

模型约束条件 1(待疏散人群全部被分配至应急疏散场地):

$$\sum_{m=1}^M \sum_{k=1}^K f(m, k) = \sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^M \sum_{k=1}^K x_{mk}^n \cdot f(m, k) \quad (5)$$

模型约束条件 2(每个应急疏散场地被分配的人群数不超过其自身的容量限制):

$$\sum_{m=1}^M \sum_{k=1}^K x_{mk}^n \cdot f(m, k) \leq Q_n, \forall n=1, 2, \dots, N \quad (6)$$

模型约束条件 3(必须开展人群分配):

$$1 \leq \sum_{n=1}^N \sum_{k=1}^K x_{mk}^n, \forall m=1, 2, \dots, M \quad (7)$$

模型约束条件 4(每类人群只能分配到一个应急疏散场地):

$$x_{mk}^i \neq x_{mk}^j, \forall m=1, 2, \dots, M, k=1, 2, \dots, K, i \neq j, \\ i=1, 2, \dots, N, j=1, 2, \dots, N \quad (8)$$

模型约束条件 5(每个受灾点每类待疏散人群数不超过任何一个疏散场地的容量限制):

$$f(m, k) \leq Q_n, \forall m=1, 2, \dots, M, \\ n=1, 2, \dots, N, k=1, 2, \dots, K \quad (9)$$

模型约束条件 6(总的待分配人群总数不超过所有疏散场地的总容量限制):

$$\sum_{m=1}^M \sum_{k=1}^K f(m, k) \leq \sum_{n=1}^N Q_n \quad (10)$$

(4) 人群分配模型单优化目标转换

目标函数 Z_2 (距离归一化处理):

$$d'_{mn} = (d_{\max} - d_{mn}) / (d_{\max} - d_{\min}) \quad (11)$$

$$Z_2 = \min \sum_n \sum_m \sum_k x_{mk}^n \cdot d'_{mn} \quad (12)$$

最终, 人群分配规划模型的目标函数为

$$Z = Z_1 + Z_2 \\ = \min \left(\sum_n \sum_m \sum_k x_{mk}^n \cdot \beta_{mk}^n + \sum_n \sum_m \sum_k x_{mk}^n \cdot d'_{mn} \right) \\ = \min \sum_n \sum_m \sum_k x_{mk}^n \cdot (\beta_{mk}^n + d'_{mn}) \quad (13)$$

其中, Z 满足人群分配模型全部约束条件, d'_{mn} 为归一化后的从第 m 个受灾点到第 n 个疏散场所的距离. 考虑疏散偏好的应急疏散人群分配规划模型属于 0-1 整数规划模型. 下面, 将基于一个实例来讲述本文构建的疏散偏好的应急疏散人群分配规划模型.

考虑一个具有三个待疏散区域和两个疏散场地的应急疏散人群分配示例, 如图 4 所示. 其中, 待疏散区域 A 至疏散场地 2 的距离为 7 km, 待疏散区域 B 至疏散场地 2 的距离为 5 km, 待疏散区域 C 至疏散场地 2 的距离为 7 km; 待疏散区域 A 至疏散场地 1 的距离为 3.5 km, 待疏散区域 B 至疏散场地 1 的距离为 5.5 km, 待疏散区域 C 至疏散场地 1 的距离为 8.5 km. 疏散场地 1 和疏散场地 2 的可承载容量, 可以通过对场地使用行人流量预测模型进行预测估计得出.



图 4 应急疏散人群分配示意图

假定疏散场地 1 和疏散场地 2 的可承载容量分别为 240 人和 230 人. 假定待疏散区域 A、待疏散区域 B 和待疏散区域 C 都包含 3 类人群, 即 $K=3$, 具体人数如表 1 所示. 此外, 假定每类人群对不同疏散场地的偏好程度由表 2 给出, 特别地, 同一类人群对不同疏散场地偏好程度之和不一定等于 1. 假定待疏散区域至不同疏散场地的距离及疏散场地可承载容量由表 3 给出. 表 4 给出了基于疏散偏好的应急疏散人群分配仿真结果, 其中表 4 展示的分配结果对应的目标函数值为 5.85, 其中 Z_1 值为 3.05, Z_2 值为 2.8. 与表 2 中每类人群对不同疏散场地的偏好程度比对, 发现待疏散区域 A 中第 P1 类人群偏好疏散场地 1, 对应偏好程度为 0.8, 但是在表 4 中, 最终将区域 A 中第 P1 类人群分配至疏散场地 2, 这表明 Z_2 起主导性作用. 表 5 给出了不同权重比例下的基于疏散偏好的应急疏散人群分配结果, 即 $Z =$

表 1 待疏散区域内不同人群的疏散人数

人数/人	待疏散区域 A			待疏散区域 B			待疏散区域 C		
	P1	P2	P3	P1	P2	P3	P1	P2	P3
	50	60	40	30	40	60	50	40	30

表 2 每类人群对不同疏散场地的偏好程度

偏好程度 α	待疏散区域 A 人群			待疏散区域 B 人群			待疏散区域 C 人群		
	P1	P2	P3	P1	P2	P3	P1	P2	P3
疏散场地 1	0.8	0.1	0.5	0.85	0.75	0.35	0.95	0.5	0.75
疏散场地 2	0.4	0.5	0.5	0.30	0.10	0.75	0.25	0.5	0.45

表 3 待疏散区域至不同疏散场地的距离及疏散场地可承载容量

距离 d	待疏散区域			不同疏散场地可承载容量上限 Q
	区域 A	区域 B	区域 C	
疏散场地 1	3.5 km	5.5 km	8.5 km	240 人
疏散场地 2	7.0 km	5.0 km	7.0 km	230 人

表 4 基于疏散偏好的应急疏散人群分配结果

分配矩阵 X	待疏散区域 A			待疏散区域 B			待疏散区域 C			分配总人数/人	目标函数值
	P_1	P_2	P_3	P_1	P_2	P_3	P_1	P_2	P_3		
疏散场地 1	0	0	0	1	1	0	1	1	1	190	$Z_1=3.05$
疏散场地 2	1	1	1	0	0	1	0	0	0	210	$Z_2=2.8$

表 5 基于疏散偏好的应急疏散人群分配结果($0.75 \times Z_1, 0.25 \times Z_2$)

分配矩阵 X	待疏散区域 A			待疏散区域 B			待疏散区域 C			分配总人数/人	目标函数值
	P_1	P_2	P_3	P_1	P_2	P_3	P_1	P_2	P_3		
疏散场地 1	1	0	0	1	1	0	1	1	1	240	$Z_1=2.65$
疏散场地 2	0	1	1	0	0	1	0	0	0	160	$Z_2=3.5$

为了更形象化展示不同权重下的分配结果,对其进行了可视化展现,疏散偏好的应急疏散人群分配模型目标 $Z=Z_1+Z_2$ 对应的分配结果,如图 5 所示,疏散偏好的应急疏散人群分配模型目标 $Z=0.75 \times Z_1+0.25 \times Z_2$,如图 6 所示.接下来,将讨论应急疏散人群分配完成后的疏散路径规划问题.

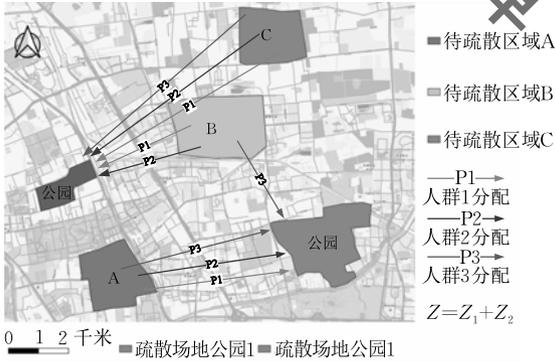


图 5 基于疏散偏好的应急疏散人群分配($Z=Z_1+Z_2$)

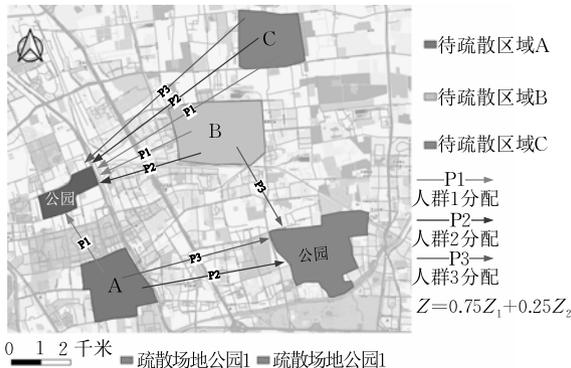


图 6 基于疏散偏好的应急疏散人群分配($Z=0.75 \times Z_1+0.25 \times Z_2$)

4 面向时空感知数据的疏散路径规划模型

在基于时空感知数据的应急疏散框架中,应急

疏散路径规划是最后的一个步骤,也是最重要的步骤.疏散场所确定完毕和疏散人群分配完成后,应急管理需要知道灾害中心至疏散场所的可行进路线,以便顺利完成应急疏散.

4.1 疏散偏好的应急疏散人群分配

定义 3. 应急疏散道路网(Emergency Evacuation Road Network). 在本文中,用有向图 $G=(V, E)$ 来表示路网,其中 $v \in V$ 表示图 G 中顶点(路网中的交叉路口或道路段的端点),边 $e \in E, e=(v_s, v_e, length, lanes, speed, weight, capacity)$, v_s 表示边 e 的起始点, v_e 为边 e 的终止点, $length$ 表示边 e 的长度, $lanes$ 表示边 e 拥有的车道数量, $speed$ 表示边 e 的速度限制, $weight$ 表示边 e 的权重, $capacity$ 表示边 e 的容量(一般与车道数量和道路长度有关系).

图 7(a)为实际路口连接模型图,图中包含 5 个交叉路口,图 7(b)为应急疏散道路网有向矢量图.在应急疏散道路网 G 中,边的权重 $weight$ 一般表示路段的行驶代价,单位一般为秒,关于 $weight$ 的计算公式如下:

$$e \cdot weight = 3.6 * \frac{e \cdot length}{e \cdot speed} \quad (14)$$

由于道路的通行能力还受道路上的现有车流量的影响,因此权重 $weight$ 计算过程可修改如下:

$$e \cdot weight = 3.6 * f_{vol}(t) * \frac{e \cdot length}{e \cdot speed} \quad (15)$$

其中, $f_{vol}(t)$ 表示在 t 时间下的道路车流量,车流量越大表示道路行驶的车越多,此时 $f_{vol}(t)$ 值越大.有关路网的车流量态势预测或计算方法,我们使用面向时空图建模的图小波卷积神经网络模型(GWNN-STGM).在 GWNN-STGM 中设计了一个图小波卷积神经网络层,并在该网络层中设计并引入了自适应邻接矩阵进行节点嵌入学习,使得模型能够在不

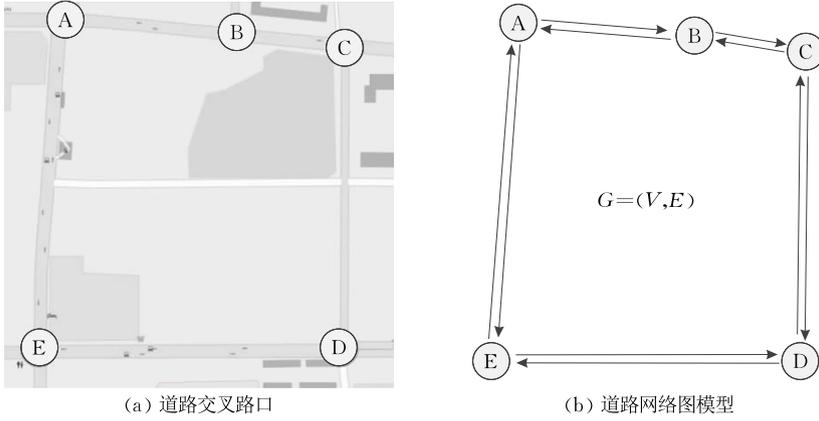


图7 应急疏散道路网图模型(其中包含5个顶点,10条有向边)

需要结构先验知识的情况下,从数据集中自动发现隐藏的结构信息.此外,GWNN-STGM 还包含了一个堆叠的扩张因果卷积网络层,使模型的感受野能够随着卷积网络层数的增加呈指数增长,从而能够处理长时序,具体见研究成果^[64].

定义4. 应急疏散路径规划问题(Emergency Evacuation Route Planning). 疏散规划路径求解目标为:找出从起始点(灾害点) $v_{disaster} \in V$ 至目的地点(应急疏散场地) $v_{poi} \in V$ 的路径 P_e ,并且使总的路径代价最小(例如路程、时间、费用等),即:

$$EvcT = \min \sum P_e \cdot cost \quad (16)$$

其中, $cost$ 为每条路段的成本(包括距离成本、时间成本等).

由于在救援疏散过程中,通常会存在多灾点到多疏散场所或单个受灾点到多疏散场所情况.因此,疏散路径规划的输入往往是多组查询需求 Q ,从而疏散路径规划是为每条出行找到一条路径,使 Q 中所有查询的全局出行时间成本最小化.接下来,将讨论多组出行需求下的最优疏散路径规划.

4.2 多组疏散路径规划问题转化

为了方便描述GOR问题,基于定义1,重新定义交通感知道路网络.

定义5. 交通感知道路网络(Traffic-aware Road Networks). 在本文中,还是将交通感知道路网络定义为一个有向图 $G=(V, E, t_w)$,其中 V 和 E 分别表示顶点集合和边集合, t_w 为一个映射函数 $t_w: E \rightarrow R$,即 $t_w(e)$ 为一个实数,表示路段 e 的最短行程时间, t_w 与 $e \cdot weight$ 较为相似.

定义6. 交通流量(Traffic Flow). 在本文中,将交通流量定义为特定时刻 t ,边 e 的车辆数量,记为 $f_e(t) = f'_e(t) + f''_e(t)$,其中 $f'_e(t)$ 表示在时间 t ,边 e 的没有查询需求的车辆数量,而 $f''_e(t)$ 表示在时间 t ,边 e 的有查询需求的车辆数量. $f'_e(t)$ 可以通过

研究成果^[64]来预测或估计得出.

定义7. 路径与行程时间(Route and Travel Time). 在本文后续研究中,路径用 π 来表示, π 是由有限的顶点序列 $\langle v_1, v_2, \dots, v_k \rangle$ 组成,即 $\pi := \langle v_1, v_2, \dots, v_k \rangle$,则路径 π 的实际行程时间由以下公式计算:

$$T(\pi) = \sum_{i=1}^{k-1} t(e(v_i, v_{i+1})) \quad (17)$$

其中, $e(v_i, v_{i+1})$ 表示顶点 v_i 到 v_{i+1} 有向边 e , $t(e) = t_w(e) \cdot (1 + \alpha \cdot f_e)$, α 为道路参数.

定义8. 全局最优路径问题(Global Optimal Route Problem). 在本文中,给定交通感知道路网络 $G=(V, E, t_w)$ 和一组路径查询需求 $Q = \{q_1, q_2, \dots, q_n\}$,其中 $q_i = (v_{source}^i, v_{destination}^i, \tau_i)$, v_{source}^i 表示出发点, $v_{destination}^i$ 为目的地点, τ_i 为出发时间.则全局最优路径问题表示为每组路径规划查询 $q_i \in Q$ 找到从 v_{source}^i 到 $v_{destination}^i$ 的最佳路径 π_i ,使得整个路径规划查询 Q 的全局行程时间最小,形式化表示如下:

$$T_{gor} = \sum_{i=1}^n T(\pi_i) \quad (18)$$

至此,已经将多组疏散路径规划问题转化全局最优路径问题-GOR,GOR问题通过以批处理方式处理短时间内发出的所有出行查询.接下来,将介绍全局最优路径问题求解过程.

4.3 全局最优疏散路径规划算法

前文已经成功将疏散路径规划问题转化为多组路径规划查询任务下的全局最优路径问题-GOR.因此,当给定一个疏散路径规划查询需求组 Q ,最简单的方法是评估所有可能的路线组合,并选择具有最小全局行程时间(或称全局旅行时间)的组合.具体来说,对于每个疏散路径规划查询 $q_i \in Q$,在路网 $G=(V, E, t_w)$ 上运行深度优先搜索^[66](Depth-First Search,DFS),以找到从节点 v_{source}^i 到节点 $v_{destination}^i$ 的所有可能路线.为了提高效率,本文采用文献^[67]所提的剪枝技术来提前终止DFS过程.接下来,对于

每个路线组合,计算其确切的全局行程时间,并返回以全局行程时间最小的路线组合,作为最终疏散路径规划结果.

上述过程要评估每个路径组合.假设一个路径规划查询的可能路线数量为 k , 每条路线的顶点数为 $|\pi|$. 路线组合的总数为 $k^{|\pi|}$, 需要访问 $|\pi| \cdot Q$ 或 $n \cdot |\pi|$ 顶点来计算每个路线组合的全局行程时间. 然而, 对于每个顶点必须遍历每个疏散路径规划查询 $q_i \in Q$ 来计算边 e 上的当前交通流量. 因此, 上述过程的时间复杂度为 $O(k^n \cdot |\pi| \cdot n^2)$. 因此, 当 $|Q|$ 或 n 较大时, 很难得到疏散路径规划全局查询结果. 为此, 本文设计一种面向全局最优疏散路径规划查询的求解算法, 来有效地解决 GOR 问题, 主要思想是通过使用网络扩展策略, 同时为每个疏散路径规划查询 $q_i \in Q$ 生成全局最优路线. 具体算法过程, 如算法 2 所示, 使用了网络扩展策略, 在给定路径标签 $l(q_i) = \langle v_a, \tau_a, \pi_a \rangle$ 的条件下, 对网络进行扩展以选择最优的后续顶点. 当选择 v_a 的一个邻近顶点 v_j , 它具有最小的估计全局行程时间. 其中, 路线标签 $l(q_i)$ 的估计全局行程时间为 $EGT(l(q_i))$, 计算过程如下:

$$EGT(l(q_i)) = T(\pi_a) + t(e(v_a, v_j)) + t_w(e(v_j, q_i \cdot v_{i_{destination}}^j)) \quad (19)$$

其中, 路径标号 $l(q_i)$ 由 $\langle v_a, \tau_a, \pi_a \rangle$ 组成, v_a 表示当前到达的顶点, τ_a 表示到达的顶点 v_a 的时间, π_a 表示从 $q_i \cdot v_{i_{source}}^j$ 到 v_a 的最新路线.

算法 2. 面向全局最优疏散路径规划查询的求解算法.

输入: 交通感知网络 $G = (V, E, t_w)$, 疏散路径规划查询集合 $Q = \{q_1, q_2, \dots, q_n\}$

输出: 路径组集合 Π

```

1.  $H \leftarrow \emptyset$ ; // 优先队列初始化为空集
2.  $\Pi \leftarrow \emptyset$ ; // 路径组集合初始化为空集
3. FOR  $q_i$  IN  $Q$  DO
4.   Initialize( $l(q_i)$ ); // 初始化路径标签
5.    $H.append(l(q_i))$ ; // 初始化优先队列
6. END FOR
7. WHILE  $H \neq \emptyset$  DO
8.    $l(q) \leftarrow H.pop()$ ;
9.   FOR adjacent vertex  $v$  IN  $l(q).v_a$  DO
10.     $l'(q) \leftarrow \langle v, l(q).\tau_a, l(q).\pi_a.add(v) \rangle$ ;
11.    IF  $v \notin l(q).\pi_a$  AND  $t_{min}(v, d) < t_{min}(l(q).v_a, d)$  THEN
12.      Compute the traffic flow on edge  $e(l(q).v_a, v)$ ;
13.      Compute  $EGT(l'(q))$ ;
14.      IF  $EGT(l'(q))$  is Minimum THEN
15.         $l'(q).\tau_a \leftarrow l(q).\tau_a + t(e(l(q).v_a, v))$ ;
16.         $l''(q) \leftarrow l'(q)$ ;
17.      END IF

```

```

18.    END IF
19.  END FOR
20.   $l(q) \leftarrow l''(q)$ ;
21.  IF  $l(q).v_a = d$  is Minimum THEN
22.     $\Pi.add(l(q).\pi_a)$ ;
23.  ELSE
24.     $H.append(l(q))$ 
25.  END IF
26. END WHILE
27. RETURN ( $\Pi$ )

```

在算法 2 中, 最开始初始化路径组集合 Π 和优先队列 H , 优先队列 H 根据 $l(q) \cdot \tau_a$ 对行程查询进行升序排序, 然后插入从 Q 到 H 的所有疏散路径查询的初始路径标签 (line 1~6). 在搜索和更新过程中, 每次迭代中从 H 选择一个路径标签 $l(q)$, 并将其路径扩展到下一个顶点, 直到 H 为空, 即所有的旅行查询都被处理到目的地 (line 7~27). 算法 2 可被概括为以下四步: 交通路网路径查询、计算边的交通流量、路径出行时间估计、输出全局最优路径.

进一步地, 为了提高应急疏散路径搜索结果的质量, 本文提出了一种改进算法, 对全局最优疏散路径规划查询算法生成的路径组合进行改进和优化. 其主要思想是, 在生成结果路径组合 Π 后, 在每条路线上执行一个特定的细化操作, 包括添加操作 (Add Operation)、删除操作 (Drop Operation) 和交换操作 (Swap Operation).

Add(v): 如果 v 是顶点 v_{i-1} 和顶点 v_{i+1} 间的仅存在一个中间顶点, 则增加一个顶点 $v \in (V \setminus \pi)$ 到 π .

Drop(v_i): 如果 $|\pi| > 3$, 并且 v_{i-1} 和 v_{i+1} 间不存在边, 则删除顶点 $v_i \in \pi$.

Swap(v_i, v): 如果 v 是顶点 v_{i-1} 和顶点 v_{i+1} 间存在多个中间顶点, 则交换顶点 $v_i \in \pi$ 与顶点 $v \in (V \setminus \pi)$.

为了提高细化操作的效率, 同样可以通过采用剪枝策略, 来计算相应的行程时间缩减上限. 为了方便表示, 执行 Add、Drop 和 Swap 操作后行程时间减少上界分别表示为 ub_{add} 、 ub_{drop} 和 ub_{swap} , 即 $\Delta T_{gor}^{add} = T_{gor} - T_{gor}^{add} \leq ub_{add}$, $\Delta T_{gor}^{drop} = T_{gor} - T_{gor}^{drop} \leq ub_{drop}$ 和 $\Delta T_{gor}^{swap} = T_{gor} - T_{gor}^{swap} \leq ub_{swap}$. 如果执行细化操作 op 后, $T_{gor} / (T_{gor} - ub_{op}) \leq 1 + \epsilon$ 不满足, 则表示 op 操作无效; 若执行细化操作 op (Add、Drop 和 Swap 操作) 后, $T_{gor} / (T_{gor} - ub_{op}) \leq 1 + \epsilon$ 满足, 则进一步计算准确的全局行程时间下降 $\Delta T_{gor}^{op} = T_{gor} - T_{gor}^{op}$.

基于细化操作的面向全局最优疏散路径规划查询结果改进算法, 如算法 3 所示. 算法输入为路网 $G = (V, E, t_w)$ 和面向全局最优疏散路径规划查询的算法输出结果, 并将细化因子 ϵ 作为算法的可调参数, 算法最终输出为优化后的路径集合. 很显然算法 3

的最坏时间复杂度为 $O(n^3)$ 或 $O(|Q|^3)$. 在算法 3 中, 最开始需要设置一个动态优先队列 H (heap), 用于选择具有最小 $l(q) \cdot \tau_a$ 的路径标签 $l(q)$ (line 1). 然后, 将每一个疏散路径规划查询 $q_i \in Q$ 初始路线标签插入到优先队列 H 中 (line 2~5). 在优化过程中, 采用全局行程时间减小最大的有效操作 op 来更新全局行程时间和相应的路径标签. 直到没有新的有效操作产生更好的结果时, 过程终止, 即所有路线的调整过程完成 (line 6~19). 每次调整结束时, 如果 $l(q)$ 被调整到目的地, 则无需再进行细化, 否则将最新的 $l(q)$ 再次插入优先队列 H 中, 进行下一次调整过程. 最后, 返回经过细化改进的结果路径组合 Π' . 算法 3 可被简要概括为以下四步: 交通路网路径组合、执行操作算子运算、全局出行时间判别、输出细化最优路径.

算法 3. 面向全局最优疏散路径规划查询结果改进算法.

输入: 交通感知网络 $G=(V, E, \tau_a)$, 路径组集合 $\Pi = \{\pi_1, \pi_2, \dots, \pi_{|Q|}\}$, 细化因子 ϵ

输出: 细化后的路径组集合 Π'

1. $H \leftarrow \emptyset$; // 优先队列初始化为空集
2. FOR q_i IN Q DO
3. Initialize($l(q_i)$); // 初始化路径标签
4. $H.append(l(q_i))$;
5. END FOR
6. WHILE $H \neq \emptyset$ DO
7. $q \leftarrow H.pop()$;
8. Compute ΔT_{gor} of each valid operation; // 执行 Add, Drop 和 Swap 操作
9. Select the operation with *Maximum* ΔT_{gor} ;
10. IF $\frac{T_{gor}}{T_{gor} - \Delta T_{gor}} > 1 + \epsilon$ DO
11. $T_{gor} \leftarrow T_{gor} - \Delta T_{gor}$;
12. Update the route label $l(q)$
13. Update q 's route in Π ;
14. END IF
15. IF $l(q)$ is not adjusted to destination DO
16. $H.append(l(q))$;
17. END IF
18. END WHILE
19. RETURN (Π').

5 实验分析与评估

本节对疏散路径规划算法或模型进行实验评估, 模型与算法均在 JetBrains PyCharm IDE 上使用 Python 3.6 编程实现. 实验平台为 Intel(R) Core i7-7700 CPU @ 3.60 GHz, 8GB 内存, 512G SSD 和 1TB 硬盘的台式机器, 软件操作系统为

Windows 10. 关于时空数据和空间数据的管理与存储, 本文采用 PostgreSQL 14 数据库 + PostGIS 3.2 空间数据处理插件组合方案来实现.

5.1 实验数据描述

本文使用了 3 个道路网络数据集, 分别为 San Joaquin County 道路网络^①(简称 TG)、New York 道路网络^②(简称 NYN)和 Bei Jing 六环道路以内区域的路网数据^③(简称 BJ6). 其中, TG 网络和 NYN 网络, 分别包含 18263 个顶点和 23874 条边, 以及 95581 个顶点和 260855 条边. BJ6 道路网络数据集, 本文利用 OpenStreetMap(OSM) 开源地图服务, 采集北京市六环道路以内区域的路网数据(仅考虑机动车可行驶的道路路段). 在 BJ6 路网数据集中, 道路路段总数约为 27.8 万个, 路段总长度约为 2.39 万公里, 道路网络节点约为 16 万个. 本文对路网数据进行连接处打断处理操作, 其中每个具体路段是一个空间几何-Geometry 对象, 采用 LINestring 格式.

本文还使用了北京市应急疏散场地 POI 数据集(简称 ESPOI-BJ^④), 在 ESPOI-BJ 中一共有 164 个应急疏散场地, 其中仅公园类型的 POI 就有 78 个、大型广场类型的 POI 有 18 个、绿地类型的 POI 有 9 个、学校类型的 POI 有 37 个、其他类型 POI 为 22 个.

5.2 实验相关参数设置

本文使用 TG 网络数据集、NYN 网络数据集和 BJ6 路网数据集, 来全面评估疏散路径规划算法性能. 使用 BJ6 路网数据集和 ESPOI-BJ 应急疏散场地数据, 来仿真疏散路径规划实际效果. 为了评估面向全局最优疏散路径规划查询算法与疏散路径规划查询结果细化操作改进算法的性能, 本文实现了一种基于个体的搜索算法. 具体地, 给定一组出行查询 Q , 对于每个查询 $q_i \in Q$, 查询出一个具有最小出行时间 $T_w(\pi)$ 的路径 π . 为了方便描述, 在后文中, 面向全局最优疏散路径规划查询算法(Global Optimal Sparse Route Planning Query Method)用 Gosrpqm 表示, 疏散路径规划查询结果细化操作改进算法(Improved Global Optimal Sparse Route Planning Query Method)用 IGosrpqm 表示, 基于个体的搜索算法(Individual-based Search Method)用 Ibsm 来表示.

此外, 道路网络数据是由基于内存的邻接表数据结构来维护. 本文使用 pgRouting 3.2.2 工具^⑤(一种基于 PostGIS 3.2 插件^⑥的路由扩展)提供的

① <https://www.cs.utah.edu/~lifeifei/SpatialDataset.htm>

② <https://publish.illinois.edu/dbwork/open-data/>

③ <https://www.openstreetmap.org/>

④ <http://yjglj.beijing.gov.cn/>

⑤ <https://pgrouting.org/>

⑥ <http://www.refractions.net/products/postgis/>

Dijkstra 路径规划引擎,来提前计算出疏散路径规划查询需求 Q 对应的最小行程时间 $T_w(\Pi)$, Π 为最小行程时间下对应的规划完毕的路径集合. 为了全面评估路径规划算法的性能,源点(灾害点)和目标点(疏散场所)采用随机选择策略,并且每次出行的出发时间是在特定时间范围内随机生成的. 本文采用的主要度量指标是 CPU 时间和全局行程时间 T_{gor} .

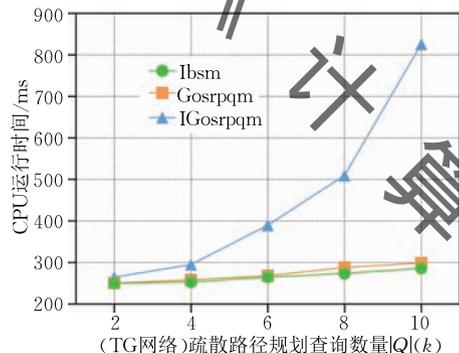
默认情况下,本文对于 TG、NYN、BJ 网络数据集,设置 $|Q| = 10\,000$, 细化因子 $\epsilon = 0.02$, 道路参数 $\alpha = 0.02$. 对于使用 BJ6 路网数据集和 ESPOI-BJ 应急疏散场地数据来仿真疏散路径规划实际效果的实验过程中,本文只关注北京市六环道路以内的应急疏散场地,且只关注公园(56 处)和广场(5 处)两种类型的 POI,并将其作为疏散路径规划仿真实

验数据.

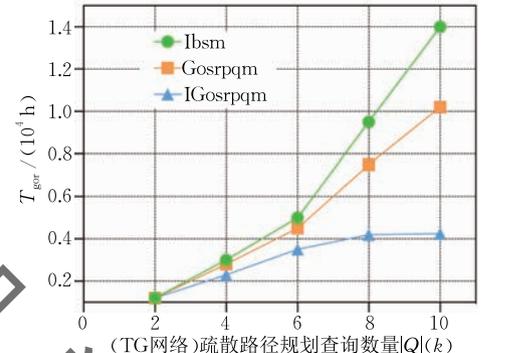
5.3 疏散路径规划实验与仿真

首先,分析不同疏散路径规划查询需求数量(即 $|Q|$),对算法的性能影响. 直观上,查询需求数量越大,会有更多的网络顶点参与运算. 因此,对于所有算法,疏散路径规划查询需求数量 $|Q|$ 越大,计算量越大,最终导致 CPU 时间开销也越大. 另外,随着疏散路径规划查询需求数量 $|Q|$ 的增大,最终会导致在边上车流量的增加,从而也增加了行程时间. 对于这样的情况,本文提出的面向全局最优疏散路径规划查询算法 Gosrpqm 和疏散路径规划查询结果细化操作改进算法 IGosrpqm 可以显著缩短全局行程时间.

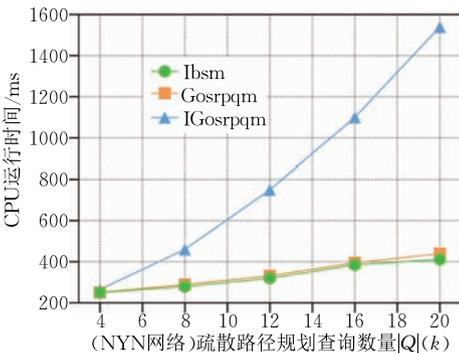
图 8 分别展示了三种算法在 TG 网络数据集、NYN 网络数据集和 BJ6 网络数据集中,不同疏散



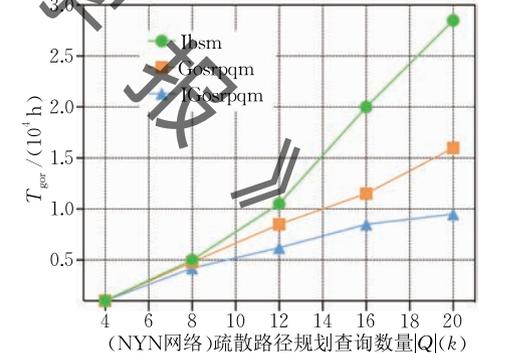
(a) (TG)疏散路径规划查询数量 $|Q|(k)$ 与CPU时间



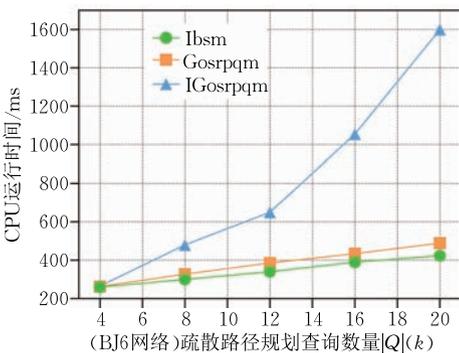
(b) (TG)疏散路径规划查询数量 $|Q|(k)$ 与全局行程时间 T_{gor}



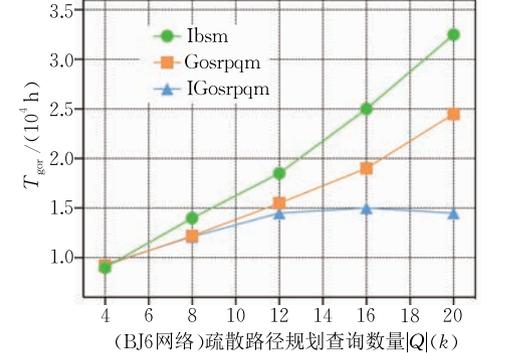
(c) (NYN)疏散路径规划查询数量 $|Q|(k)$ 与CPU时间



(d) (NYN)疏散路径规划查询数量 $|Q|(k)$ 与全局行程时间 T_{gor}



(e) (BJ6)疏散路径规划查询数量 $|Q|(k)$ 与CPU时间



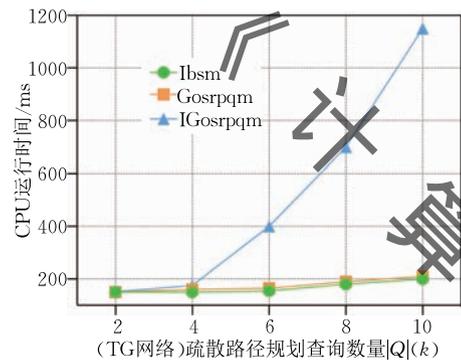
(f) (BJ6)疏散路径规划查询数量 $|Q|(k)$ 与全局行程时间 T_{gor}

图 8 疏散规划查询数量 $|Q|$ 下的 CPU 时间开销与全局行程时间 T_{gor} 曲线

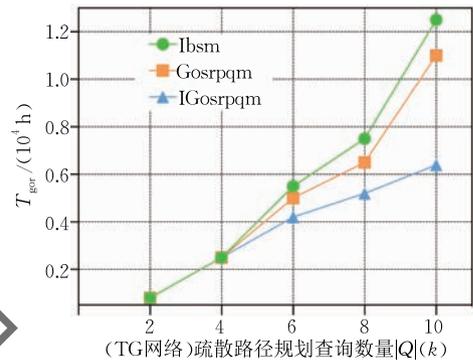
路径规划查询需求数量 $|Q|$ 下的 CPU 时间和全局行程时间 T_{gor} 曲线. 如预期所想, 当 $|Q|$ 变大时, 所有算法的 CPU 时间开销都会增加. 与 Ibsm 算法相比, Gosrpm 的性能稍慢. 此外, 由于 IGosrpm 算法在每次迭代更新时都有细化操作参与运算, 因此需要比其他两种算法更多的 CPU 时间开销. 显然, 与 Ibsm 相比, Gosrpm 生成的路线组合显示出更少的全局行程时间. 与 Ibsm 相比, IGosrpm 则大大缩短了全局行程时间. 值得注意的是, 当疏散路径规划查询需求数量 $|Q|$ 较小时 (例如, $|Q| = 2k$ 时), 各边上的车流量较小, 此时 Gosrpm 算法和 IGosrpm 算法的差距可以忽略不计.

此外, 本文统计了在 20 次独立实验中最坏的实

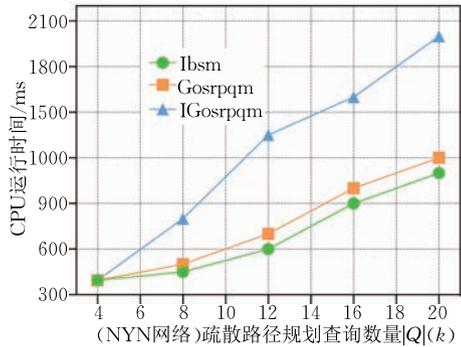
验平均结果, 如图 9 所示. 从图中发现 Gosrpm 算法和 IGosrpm 算法都能够在较短的时间内计算出疏散路径规划查询路径. 具体地, 采用默认参数设置, 在 TG 网络数据集中, CPU 时间开销最多约为 1200 ms, 在 NYN 网络数据集中, CPU 时间开销最多约为 2000 ms, 在 BJ6 网络数据集中, CPU 时间开销最多约为 1700 ms. 此外, 当在 TG 网络数据集中设置 $|Q| = 10k$ 、在 NYN 网络数据集中设置 $|Q| = 20k$ 时和在 BJ6 网络数据集中设置 $|Q| = 20k$ 时, Gosrpm 算法最终分别能减少至少 12%、20% 和 16% 的全局出行时间, IGosrpm 算法最终分别能减少至少 54%、56% 和 42% 的全局出行时间, 这表明 Gosrpm 算法和 IGosrpm 算法均具备良好的性能.



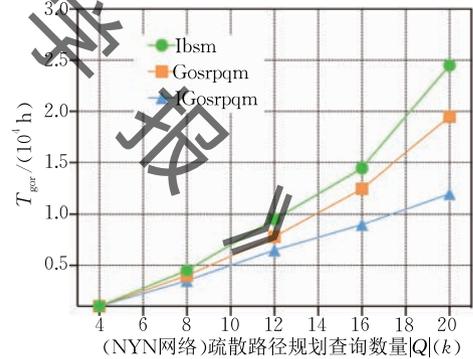
(a) (TG) 疏散路径规划查询数量 $|Q|(k)$ 与 CPU 时间



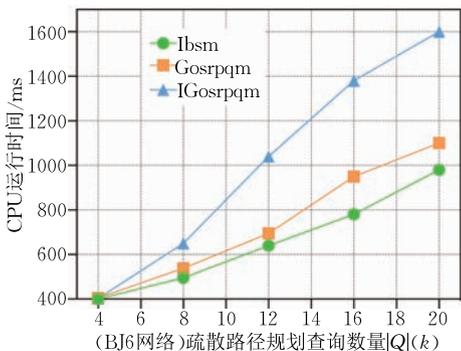
(b) (TG) 疏散路径规划查询数量 $|Q|(k)$ 与全局行程时间 T_{gor}



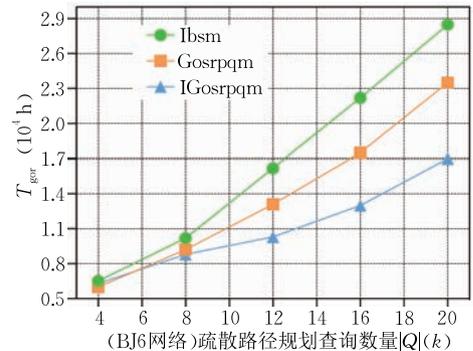
(c) (NYN) 疏散路径规划查询数量 $|Q|(k)$ 与 CPU 时间



(d) (NYN) 疏散路径规划查询数量 $|Q|(k)$ 与全局行程时间 T_{gor}



(e) (BJ6) 疏散路径规划查询数量 $|Q|(k)$ 与 CPU 时间



(f) (BJ6) 疏散路径规划查询数量 $|Q|(k)$ 与全局行程时间 T_{gor}

图 9 20 次独立重复实验下最差 CPU 时间开销与全局行程时间 T_{gor} 曲线

接下来,利用实际的应急疏散场地数据开展应急疏散路径规划仿真实验,本文使用北京市六环道路以内的应急疏散场地信息,其中公园 56 处和广场 5 处,六环道路以内应急疏散场地分布如图 3 所示. 在本实验中,假定存在 2 个待疏散区域(区域 A 和区域 B),并且需要将待疏散区域 A 和待疏散区域 B 的人群分别疏散至离其路网距离最近的若干个应急疏散场地,待疏散区域 A 和待疏散区域 B 地理空间分布如图 10 所示. 值得一提的是,本文基于 BJ6 路网数据集来构建有向图网络,基于 ESPOI-BJ 应急疏散场地数据,通过使用模糊匹配规则过滤筛选出公园类型的和广场类型的 POI 疏散场地,图 10 展示了北京市待疏散区域 A 和待疏散区域 B 地理空间分布情况.

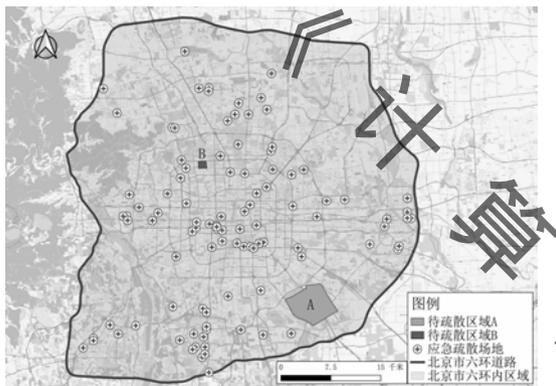


图 10 北京市待疏散区域 A 和待疏散区域 B 地理空间分布

图 11 展示了待疏散区域 A 和待疏散区域 B 疏散路径规划结果,从图中可以明显看出,待疏散区域 A 路网距离最近的疏散场地有南苑公园、玉蜓公园、龙潭西湖公园、龙潭公园、旧宫镇兴旺湖公园、西大

望路社区公园和翠城公园,待疏散区域 B 路网距离最近的疏散场地有玫瑰公园、海淀公园、白云公园、朝阳奥森公园和安贞涌溪公园. 图 11 展示的是路网中路径距离最短的若干个应急疏散场地,距离待疏散区域 A 最近的公园有 7 个,距离待疏散区域 A 最近的公园有 5 个.

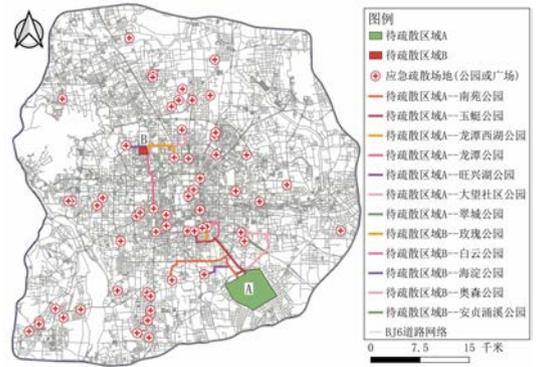


图 11 待疏散区域 A 和待疏散区域 B 疏散路径规划结果

此外,本文分别统计了疏散区域至应急疏散场地的路径规划结果信息,如表 6 和表 7 所示,可以明显看出应急疏散场地与待疏散区域 A 间的疏散路径距离不超过 17 km,单个应急规划路径的旅行时间不超过 2600 s. 应急疏散场地与待疏散区域 B 间的疏散路径距离不超过 10 km,单个应急规划路径的旅行时间不超过 2200 s. 尽管只是选取了距离待疏散区域最近的若干个疏散场地作为路径规划的目的,但从实验结果来看,全部满足距离最短和时间最短性能要求. 因此,通过仿真实验发现,本文提出的全局最优疏散路径规划算法具有较强的实用性.

表 6 待疏散区域 A 至应急疏散场地的路径规划结果信息

待疏散区域	应急疏散场地	驾车疏散路径距离/m	行程时间/s
待疏散区域 A	北京市朝阳区翠城公园应急避难场所	12 561	2293
待疏散区域 A	北京市朝阳区西大望路社区公园	15 691	2677
待疏散区域 A	北京市大兴区旧宫镇兴旺湖公园	9 329	2031
待疏散区域 A	北京市东城区龙潭公园	15 809	2526
待疏散区域 A	北京市东城区龙潭西湖公园	15 277	2422
待疏散区域 A	北京市东城区玉蜓公园	16 572	2300
待疏散区域 A	北京市丰台区南苑公园	16 523	2570

表 7 待疏散区域 B 至应急疏散场地的路径规划结果信息

待疏散区域	应急疏散场地	驾车疏散路径距离/m	行程时间/s
待疏散区域 B	北京市朝阳区安贞涌溪公园	9 014	1 975
待疏散区域 B	北京市朝阳区奥林匹克森林公园	8 997	1 780
待疏散区域 B	北京市海淀区海淀公园	4 897	1 250
待疏散区域 B	北京市西城区白云公园	9 569	2 144
待疏散区域 B	北京市西城区玫瑰公园	7 478	1 328

图 12 展示了待疏散区域 A 和待疏散区域 B 到北京市六环内区域,所有公园或广场类型的应急疏散场地的路径规划结果.图 12 中展示的是,全局行程时间最短的路径结果.由于只考虑了 61 处(其中公园 56 处,广场 5 处)疏散场地,因此,总体规划了 122 条全局行程时间最短的疏散路径.



图 12 区域 A 和区域 B 到全部疏散场地(公园或广场)的路径规划结果

6 总结与展望

本文研究了基于时空感知数据的人群应急疏散规划问题,首先,分析了时空感知数据于应急疏散的作用,其次,提出了基于时空感知的应急疏散框架,在框架中本文提出了一种基于行人流量预测的应急疏散场所推荐算法和成功设计并构建了一种考虑疏散偏好的应急疏散人群分配 0-1 整数规划模型,通过验证发现应急疏散人群分配模型能够很好的建模疏散偏好的影响关系.最后,提出了一种全局最优疏散路径规划算法,首先将应急疏散路径规划问题转化为多组疏散路径规划查询问题,最后通过使用网络扩展策略和剪枝策略,设计一种面向全局最优疏散路径规划查询的求解算法来解决多组疏散路径规划查询问题.更进一步地,为了提高应急疏散路径搜索结果的质量,本文提出了一种改进算法,对全局最优疏散路径规划查询算法生成的路径组合进行改进和优化.最后通过仿真实验,充分验证了本文算法的有效性.本文主要研究了应急疏散过程的整体技术流线,包括提出疏散场地确认方法与模型、设计了人群分配模型和应急疏散路径规划方法,以期对应急疏散管理提供必要的技术支持.

针对资源受限的人群应急疏散问题,尽管本文深入研究了基于时空感知数据的人群应急疏散规划模型、框架及方法,提出了基于时空感知数据的应急疏散框架.在框架之下,本文还设计了一种全局最优

人群疏散路径规划算法.但是依旧采取的是“分层递阶式”的问题求解办法,需要考虑将复杂系统相关理论模型与方法或者强化主动学习方法纳入到人群应急疏散规划问题当中去,进一步增强和丰富人群应急疏散问题的求解方法.

参 考 文 献

- [1] Phengsuwan J, Shah T, Thekkummal N B, et al. Use of social media data in disaster management: A survey. *Future Internet*, 2021, 13(2): 46
- [2] Aringhieri R, Bigharaz S, Duma D, et al. Fairness in ambulance routing for post disaster management *Central European Journal of Operations Research*, 2022, 30(1): 189-211
- [3] Correia H R, da Costa Rubim I, da Silva Dias A F, et al. Emergency response supported by drones and experts perceptions // Murayama Y, Velez D, Zlateva P, eds. *Information Technology in Disaster Risk Reduction*. Cham: Springer International Publishing, 2021: 287-297
- [4] Munawar H S, Mojtahedi M, Hammad A W A, et al. Disruptive technologies as a solution for disaster risk management: A review. *Science of The Total Environment*, 2022, 806: 151351
- [5] Imran M, Ofli F, Caragea D, et al. Using AI and social media multimodal content for disaster response and management: Opportunities, challenges, and future directions. *Information Processing & Management*, 2020, 57(5): 102261
- [6] Talley J W. Disaster management in the digital age. *IBM Journal of Research and Development*, 2020, 64(1/2): 1:1-1:5
- [7] Kamal Paul S, Bhaumik P. Disaster management through integrative AI // *Proceedings of the 23rd International Conference on Distributed Computing and Networking*. Delhi, India, 2022: 290-293
- [8] Xu X, Zhang L, Sotiriadis S, et al. Clotho: A large-scale internet of things-based crowd evacuation planning system for disaster management. *IEEE Internet of Things Journal*, 2018, 5(5): 3559-3568
- [9] Tei A I, Doukha Z, Zafoune Y. 3DMAT: Data dissemination for disaster management using available technology in a smart city. *Annals of Telecommunications*, 2021, 76(9-10): 633-645
- [10] Neelam S, Sood S K. A scientometric review of global research on smart disaster management. *IEEE Transactions on Engineering Management*, 2021, 68(1): 317-329
- [11] Li Z, Huang Q, Emrich C T. Introduction to social sensing and big data computing for disaster management. *International Journal of Digital Earth*, 2019, 12(11): 1198-1204
- [12] Xu J, Ota K, Dong M. Big data on the fly: UAV-mounted mobile edge computing for disaster management. *IEEE Transactions on Network Science and Engineering*, 2020, 7(4): 2620-2630

- [13] Xu X, Zhang L, Trovati M, et al. Perms: An efficient rescue route planning system in disasters. *Applied Soft Computing*, 2021, 111: 107667
- [14] Herschelman R, Qutbuddin A, Yang K. Conflict-free evacuation route planning. *GeoInformatica*, 2021, 25(4): 655-678
- [15] Li K, Rao X, Pang X, et al. Route search and planning: A survey. *Big Data Research*, 2021, 26: 100246
- [16] Liu J, Chen Y, Chen Y. Emergency and disaster management-crowd evacuation research. *Journal of Industrial Information Integration*, 2021, 21: 100191
- [17] Harry E M, Frederick L B, Marvin V L, et al. Before the wind: A study of the response to hurricane Carla. *Social Forces*, 1964, 43(1): 133-134
- [18] Southworth F. Regional evacuation modeling: A state of the art reviewing. ORNL Oak Ridge National Laboratory (US), USA: ORNL/TM-11740, 1991: 511-521
- [19] Mephail C. *The Myth of the Madding Crowd*. New York, USA: Routledge, 1991
- [20] Sherali H D, Carter T B, Hobeika A G. A location-allocation model and algorithm for evacuation planning under hurricane/flood conditions. *Transportation Research Part B: Methodological*, 1991, 25(6): 439-452
- [21] Nakanishi H, Wise S, Suenaga Y, et al. Simulating emergencies with transport outcomes sim (SETOSim): Application of an agent-based decision support tool to community evacuation planning. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 2020, 49: 101657
- [22] Li Y, Chen M, Dou Z, et al. A review of cellular automata models for crowd evacuation. *Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications*, 2019, 526: 120752
- [23] Li L, Jiang R, He Z, et al. Trajectory data-based traffic flow studies: A revisit. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 2020, 114: 225-240
- [24] Church R L, Cova T J. Mapping evacuation risk on transportation networks using a spatial optimization model. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 2000, 8(1): 321-336
- [25] Rasid H, Haider W, Hunt L. Post-flood assessment of emergency evacuation policies in the red river basin, southern Manitoba. *Canadian Geographer*, 2000, 44(2): 369-386
- [26] Alsnihi R, Stopher P. Review of procedures associated with devising emergency evacuation plans. *Transportation Research Record*, 2004, 1865: 89-97
- [27] Hoogendoorn S P, Bovy P H L. State-of-the-art of vehicular traffic flow modelling. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part I: Journal of Systems and Control Engineering*, 2001, 215(4): 283-303
- [28] Jha M, Moore K, Pashaie B. Emergency evacuation planning with microscopic traffic simulation. *Transportation Research Record*, 2004, 1886(1): 40-48
- [29] Bo Y, Cheng W, Hua H, et al. A multi-agent and PSO based simulation for human behavior in emergency evacuation // *Proceedings of the 2007 International Conference on Computational Intelligence and Security*. USA: IEEE Computer Society, 2007: 296-300
- [30] Kim S, Shekhar S. Contraflow network reconfiguration for evacuation planning: A summary of results // *Proceedings of the 13th Annual ACM International Workshop on Geographic Information Systems*. New York, USA: Association for Computing Machinery, 2005: 250-259
- [31] Min M, Neupane B C. An evacuation planner algorithm in flat time graphs // *Proceedings of the 5th International Conference on Ubiquitous Information Management and Communication*. New York, USA: Association for Computing Machinery, 2011: 1-8
- [32] Kim S, George B, Shekhar S. Evacuation route planning: Scalable heuristics // *Proceedings of the 15th Annual ACM International Symposium on Advances in Geographic Information Systems*. New York, USA: Association for Computing Machinery, 2007: 1-8
- [33] Hamacher H W. Mathematical modelling of evacuation problems: A state of the art. *Pedestrian & Evacuation Dynamics*, 2002, 1(3): 227-266
- [34] Wei X, Xiong M, Zhang X, et al. A hybrid simulation of large crowd evacuation // *Proceedings of the 2011 IEEE 17th International Conference on Parallel and Distributed Systems*. Tainan, China, 2011: 971-975
- [35] Song Y, Gong J, Li Y, et al. Crowd evacuation simulation for bioterrorism in micro-spatial environments based on virtual geographic environments. *Safety Science*, 2013, 53: 105-113
- [36] Xiong M, Tang S, Zhao D. A hybrid model for simulating crowd evacuation. *New Generation Computing*, 2013, 31(3): 211-235
- [37] Fu Z, Zhou Y, Zhu K, et al. A floor field cellular automaton for crowd evacuation considering different walking abilities. *Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications*, 2015, 420: 294-303
- [38] Xu M, Wu Y, Lv P, et al. MiSFM: On combination of mutual information and social force model towards simulating crowd evacuation. *Neurocomputing*, 2015, 168: 529-537
- [39] Cao M, Zhang G, Wang M, et al. A method of emotion contagion for crowd evacuation. *Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications*, 2017, 483: 250-258
- [40] Li Y, Liu H, Liu G, et al. A grouping method based on grid density and relationship for crowd evacuation simulation. *Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications*, 2017, 473: 319-336
- [41] Lu L, Chan C-Y, Wang J, et al. A study of pedestrian group behaviors in crowd evacuation based on an extended floor field cellular automaton model. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 2017, 81: 317-329
- [42] Liu H, Liu B, Zhang H, et al. Crowd evacuation simulation approach based on navigation knowledge and two-layer control mechanism. *Information Sciences*, 2018, 436: 247-267
- [43] Liu H, Xu B, Lu D, et al. A path planning approach for crowd evacuation in buildings based on improved artificial bee

- colony algorithm. *Applied Soft Computing*, 2018, 68: 360-376
- [44] Liu S S, Liu J, Wei W. Simulation of crowd evacuation behaviour in outdoor public places — A model based on Shanghai stampede. *International Journal of Simulation Modelling*, 2019, 18(1): 86-99
- [45] He G, Yang Y, Chen Z, et al. A review of behavior mechanisms and crowd evacuation animation in emergency exercises. *Journal of Zhejiang University-Science C (Computers & Electronics)*, 2013, 14(7): 477-485
- [46] Shiwakoti N, Sarvi M. Understanding pedestrian crowd panic: A review on model organisms approach. *Journal of Transport Geography*, 2013, 26: 12-17
- [47] Ibrahim A M, Venkat I, Subramanian K G, et al. Intelligent evacuation management systems: A review. *ACM Transactions on Intelligent Systems and Technology*, 2016, 7(3): 1-27
- [48] Vermuyten H, Beliën J, de Boeck L, et al. A review of optimisation models for pedestrian evacuation and design problems. *Safety Science*, 2016, 87: 167-178
- [49] Gayathri H, Aparna P M, Verma A. A review of studies on understanding crowd dynamics in the context of crowd safety in mass religious gatherings. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 2017, 25: 82-91
- [50] Vanumu L D, Ramachandra Rao K, Tiwari G. Fundamental diagrams of pedestrian flow characteristics: A review. *European Transport Research Review*, 2017, 9(4): 49
- [51] Drury J. The role of social identity processes in mass emergency behaviour: An integrative review. *European Review of Social Psychology*, 2018, 29(1): 38-81
- [52] Wu K-S, He Y, Chen Q, et al. Analysis on the damage and recovery of typhoon disaster based on UAV orthograph. *Microelectronics Reliability*, 2020, 107: 113337
- [53] Ejaz W, Ahmed A, Mushtaq A, et al. Energy-efficient task scheduling and physiological assessment in disaster management using UAV-assisted networks. *Computer Communications*, 2020, 155: 150-157
- [54] de Oliveira Silva L, de Mello Bandeira R A, Campos V B G. Proposal to planning facility location using UAV and geographic information systems in a post-disaster scenario. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 2019, 36: 101080
- [55] Liu Y, Wu L. Geological disaster recognition on optical remote sensing images using deep learning. *Procedia Computer Science*, 2016, 91: 566-575
- [56] Liu Y, Wu L. High performance geological disaster recognition using deep learning. *Procedia Computer Science*, 2018, 139: 529-536
- [57] Soyata T, Habibzadeh H, Ekenna C, et al. Smart city in crisis: Technology and policy concerns. *Sustainable Cities and Society*, 2019, 50: 101566
- [58] Sukmaningsih D W, Suparta W, Trisetjarso A, et al. Proposing smart disaster management in urban area//Huk M, Maleszka M, Szczerbicki E, eds. *Intelligent Information and Database Systems: Recent Developments*. Cham: Springer International Publishing, 2020: 3-16
- [59] Pillai A S, Chandraprasad G S, Khwaja A S, et al. A service oriented IoT architecture for disaster preparedness and forecasting system. *Internet of Things*, 2021, 14: 100076
- [60] Anbarasan M, Muthu B, Sivaparthipan C B, et al. Detection of flood disaster system based on IoT, big data and convolutional deep neural network. *Computer Communications*, 2020, 150: 150-157
- [61] Chamola V, Hassija V, Gupta S, et al. Disaster and pandemic management using machine learning: A survey. *IEEE Internet of Things Journal*, 2021, 8(21): 16047-16071
- [62] Lin A, Wu H, Liang G, et al. A big data-driven dynamic estimation model of relief supplies demand in urban flood disaster. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 2020, 49: 101682
- [63] Martínez-Álvarez F, Morales-Esteban A. Big data and natural disasters: New approaches for spatial and temporal massive data analysis. *Computers & Geosciences*, 2019, 129: 38-39
- [64] Jiang Shan, Ding Zhi-Ming, Zhu Mei-Ling, et al. Graph wavelet convolutional neural network for spatio-temporal graph modeling. *Journal of Software*, 2021, 32(3): 726-741 (in Chinese)
(姜山, 丁治明, 朱美玲等. 面向时空图建模的图小波卷积神经网络模型. *软件学报*, 2021, 32(3): 726-741)
- [65] Liu M, Li L, Li Q, et al. Pedestrian flow prediction in open public places using graph convolutional network. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 2021, 10(7): 455
- [66] Allender E, Chauhan A, Datta S. Depth-first search in directed planar graphs, revisited. *ACTA Informatica*, 2021, 22: 1-31
- [67] Shang S, Liu J, Zheng K, et al. Planning unobstructed paths in traffic-aware spatial networks. *GeoInformatica*, 2015, 19(4): 723-746



XU Xin-Run, Ph. D. candidate. Her main research interests include Spatio-temporal databases and Spatio-temporal awareness big data analysis.

JIANG Shan, Ph. D. candidate. His research interests include Spatio-temporal awareness big data analysis and deep learning algorithms.

DING Zhi-Ming, Ph. D. , professor, Ph. D. supervisor. His research interests include database and knowledge base systems, Spatio-temporal databases and data mining, Internet of Things (IoT) and cloud computing.

WU Yu-Rong, M. S. candidate. His research interests include Spatio-temporal databases and data analytics.

YAN Jin, Ph. D. candidate. Her research interests include emergency management, data analysis, and spatio-temporal data analysis.

Background

In recent years, the issue of emergency relief after a disaster has received a lot of attention from all walks of life. The scientific emergency evacuation of the affected population is the key to the emergency rescue problem. With the rapid development of information technology, intelligent Internet of Things (IoT) technology, machine learning theory, and new Spatio-temporal data, represented by Spatio-temporal awareness data, has provided a new perspective for emergency disaster rescue, and the comprehensive use of Spatio-temporal awareness data for situational information sensing and extraction in disaster areas can form a new focus point for emergency rescue. This paper focuses on the problem of resource-constrained crowd emergency evacuation planning under Spatio-temporal perception information, and investigates the model and method of crowd emergency evacuation planning based on Spatio-temporal perception information, with a view to providing

CUI Qing-Long, M. S. His main research interests include the design of stable aiming system for automatic weapon stations and the research on deep space exploration big data analysis.

positive ideas and technical assurance for emergency rescue.

The main contributions of this paper include: (1) A framework for emergency evacuation based on Spatio-temporal awareness information is proposed, and an emergency evacuation place recommendation algorithm based on pedestrian flow prediction is designed; (2) an integer planning model for emergency evacuation crowd allocation considering evacuation preferences is constructed; (3) the effectiveness of the proposed method and model is fully verified through extensive experimental analysis and evaluation.

The authors of this paper already have done some studies relevant to emergency management in a broader aspect.

This work is supported by the National Key R&D Program of China (No. 2022YFF0503900), the Key R&D Program of Shandong Provincial (No. 2021CXGC010104).