

高原城市交通枢纽大客流疏散优化及韧性研究

王静潇 陈万涛 刘 朵 易礼发^{*}
 西藏大学工学院 西藏拉萨 85000

摘 要: 韧性交通不仅强调灾害发生时的抵御能力, 还强调灾害发生后的恢复能力。在突发情况下, 制定高效的紧急疏散策略以疏散乘客非常重要。文章提出了一种大客流应急疏散的优化模型, 其目标是采用 K-means-DBSCAN 混合聚类算法, 结合改进的蚁群算法, 利用网络动态流的时空弹性, 优化网络利用率, 实现行人疏散的灵活动态规划。与传统的统计方法相比, 该模型在大客流疏散中表现出明显的优势。

关键词: 疏散优化; 蚁群算法; K-means 模型

铁路客流交通枢纽内部布局复杂, 人流密集, 一旦突发大客流事件, 如果没有合理的救援和疏散安排, 不仅会造成大量人员伤亡, 而且会造成严重的社会影响。因此在客流密集的情况下, 如何实现快速、高效的应急疏散, 减少事故损失, 是一个亟待研究的问题。然而对于大规模疏散, 盲目控制时间可能会产生相反的效果, 如交通拥堵甚至管理失控。在自由疏散过程中, 疏散人员与周围环境的相互作用在疏散过程中不可忽视, 行人行为的多样性和空间布局的限制性都会影响疏散决策, 此外, 单纯考虑时间对一些距离出口较远的人员不公平, 安全问题更难得到保证。疏散优化的目的是确定最佳疏散方案, 提高疏散效率, 优化研究主要分为路径规划和疏散调度。

本研究以拉萨市火车站候车大厅为例, 为了提高疏散效率, 将疏散模拟与疏散优化相结合, 将行人分为多个疏散组, 忽略行人之间的相互影响, 同时为每个群体提供了计划疏散路线, 简化了各群体间的疏散调度。本文所提出的模型解决了两个亟待解决的问题: 如何对大客流行人进行分组; 如何规划和安排每个组的疏散路径。

Wu^[1] 等引入了鲁棒优化方法, 用于地铁站疏散计划, 以应对不确定性和变化的紧急情况; Sun^[2] 等结合了人群模拟技术, 开发了一种优化模型, 用于改善地铁站的疏散计划, 并考虑了乘客行为和动态情况; Huang 等人^[3] 通过引入小群体的异质理性揭示了群体分组的规律; Haghani 等人^[4] 基于社会动态的行人分组。基于聚类算法的分类被广泛应用, 但传统的聚类算法仍存在局限性。K-means 算法仅适用于凸和大小相似的假设簇, 而 DBSCAN 可以聚类任何形

状的密集数据集群, 基于以上分析提出一种基于多种算法的大客流紧急疏散优化模型 (Emergency evacuation optimization model for large passenger flow, 简称 EEO), 该模型可以在大型紧急疏散场景中灵活地为不同位置的行人发出适当的指令, 并将行人分为两类: 自由疏散行人和有组织疏散行人。针对自由疏散行人, 引入了一种可变引导策略的改进 CA 模型, 考虑了行人与环境的相互作用, 并对疏散过程进行了模拟; 对于有组织疏散的行人, 应用改进的聚类算法将行人划分为适当的组。基于改进的蚁群算法, 结合障碍物标记, 考虑路网容量和变流量需求, 对疏散群体进行多目标路径调度。

一、数学模型

1. 改进的聚类算法

K-means 具有良好的收敛性和数据分割能力, 但对聚类中的离群值更敏感, 而基于密度的 DBSCAN 算法能够将任意形状密度的点聚类为一类, 对不同空间分布的障碍物具有良好的聚类效果, 对以上两种算法进行改进结合, 模拟出一种快速有效的聚类方法。采用 K-means 对疏散人群进行预先划分, 并以节点与簇中心的距离最小为目标函数, 构建网络节点聚类的数学模型, 如式 1 所示:

$$J = \min \sum_{i=1}^K \sum_{u_j \in S(i)} \| u_{ij} - C_i \|^2$$

其中是集群组的数量, 是分组的聚类中心, 最佳聚类数由样本聚类误差的平方和确定。

由于传统 DBSCAN 的聚类半径是固定的, 所以每个聚类的聚类效果并不理想。文章提出一种简单有效的参数自适应

应 DBSCAN 方法, 由于每组样本分布密度不同, 将该组样本之间的最大欧氏距离乘以调整系数作为 聚类半径 Eps_i , 根据公式进行自适应调整, 如式 2:

$$Eps_i = 0.5 \times \max\{d[u_i, u_j]\}$$

式 2 中, 0.5 为聚类半径调整系数, 和为第 K 组中的元素, DBSCAN 聚类的中心定义为聚类的平均值。

2. 改进的蚁群算法

蚁群算法利用启发式信息来找到路径规划的最优解。改进的蚁群算法提出了一种新的转移概率方法, 并设计了自适应信息素因子和自适应启发因子来加强信息素的作用, 同时对波动系数进行了调整来增强算法的全局性。传统蚁群算法如下式 3:

$$p_{ij}^k(t) = \begin{cases} \frac{[\tau_{ij}(t)]^{\alpha_0} [\eta_{ij}(t)]^{\beta_0}}{\sum_{j \in allowed_k} [\tau_{ij}(t)]^{\alpha_0} [\eta_{ij}(t)]^{\beta_0}}, & j \in allowed_k \\ 0, & otherwise \end{cases}$$

式 3 中 α_0 和 β_0 分别是信息素和启发式函数的影响因子。 $\tau_{ij}(t)$ 表示路径 ij 上信息素的浓度。

传统的蚁群算法在启发函数的方向选择上差异较小, 缺乏原有的方向启发信息, 算法收敛速度慢。为提高搜索性能和收敛速度, 利用工作环境的全局信息建立启发式函数, 引导蚁群向最优路径方向移动。改进后的启发式函数如下式 4:

$$\eta_{ij}(t) = \frac{1}{diE}$$

式 4 中, 是节点 i 和目的地 E 之间的欧氏距离。

自适应信息素因子 α 和和自适应启发因子 β 定义如下式 5:

$$\begin{cases} \alpha = [1 + e^{(\tau - N_{\tau \max})}] \cdot \alpha_0 \\ \beta = [1 - \frac{e^{(\tau - N_{\tau \max})}}{2}] \cdot \beta_0 \end{cases}$$

式 5 中, 是最大迭代次数。

二、数值模拟分析

疏散场景为面积为 128×75 米的火车候车大厅。对布局图进行二值化处理得到大厅网格图, 稍作修改, 划分为 3×3 的网格, 疏散规模设定为 5000 人, 行人坐标设置不均匀, 以考虑大场馆内展区的不同属性。

1. 仿真结果分析

将标准化处理后的行人坐标样本分为两个区域, 自由疏散范围 (Ω) 包括以出口为中心的半圆形区域, 其半径为出口宽度, 以及长度为出口所处的边的长度, 宽度为出口长度的二分之一的矩形区域。对有组织疏散的行人心境聚类分析, 在图 1 中, 通过分析不同的聚类数 (K) 获得 SSE- K 的趋势图。当 $K > 8$ 时, 趋势图变平缓, 经济效益逐渐趋于最大。因此, 针对该疏散规模设置了 20 个集群中心并激活。通过改进的参数自适应 DBSCAN 算法将边界聚类调整到合适的组, 并将有组织的疏散行人划分到合适的组中, 如图 1 所示, 稍微调整疏导位置, 调整后的初始位置和每组的初始数量如表 1 所示。

表 1 每个组的属性

组号	g1	g2	g3	g4	g5	g6	g7
坐标	(90, 78)	(96, 18)	(102, 48)	(60, 24)	(15, 39)	(72, 75)	(132, 48)
撤离人数	300	291	275	230	224	191	260
组号	g8	g9	g10	g11	g12	g13	g14
坐标	(156, 48)	(171, 21)	(141, 60)	(147, 18)	(12, 72)	(132, 69)	(48, 45)
撤离人数	115	141	166	306	128	189	148
组号	g15	g16	g17	g18	g19	g20	g21
坐标	(81, 48)	(45, 81)	(159, 81)	(186, 54)	(114, 69)	(120, 24)	/
撤离人数	231	111	250	179	244	268	753

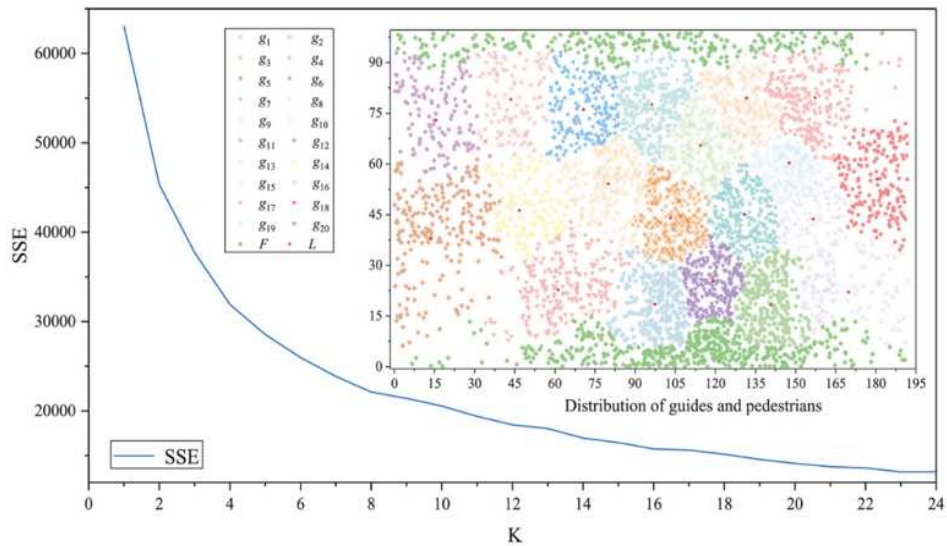


图 1 确定最优聚类数 K 和每组的初始分配

利用时间 - 路径数据库对障碍物判别矩阵进行更新, 并根据疏散过程中网络的拥挤程度动态调整路径。图 2 模拟了不同阶段的组的分布, 可以观察到, 有些群体并不直接选

择最近的道路向出口移动, 而是走远一点, 以避免与其他群体发生冲突。

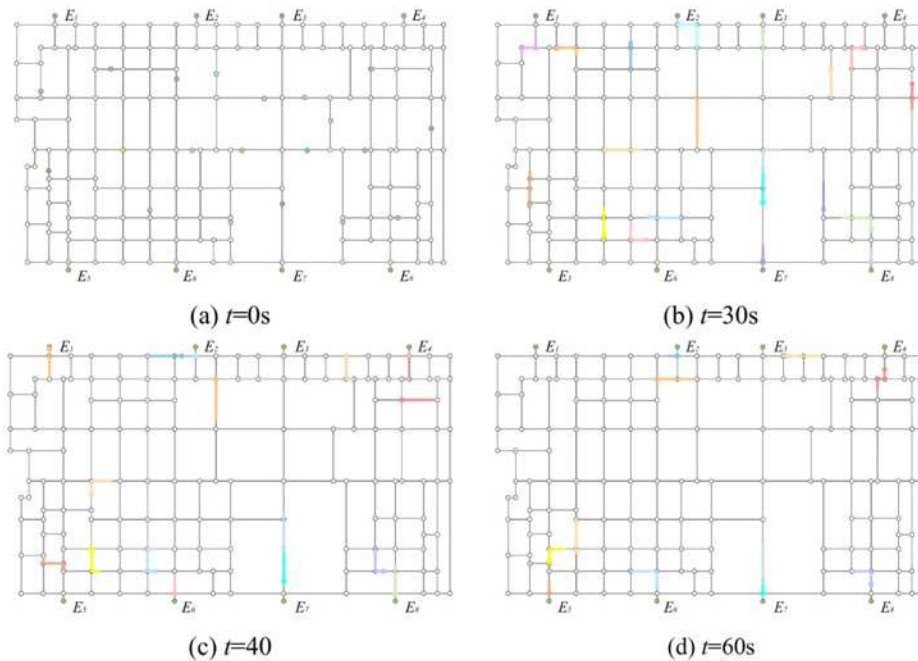


图 2 不同阶段的群体分布

三、结论

在研究中, EEO 模型通过定位设备收集信息并根据聚类算法将疏散人员划分为不同的组, 结合路径优化和多次迭代分析, 得到了候车大厅内不同区域人群的最有疏散模式, 尽管 EEO 模型建议的路径可能要比最短路径算法提供的更

长, 但是它可以利用网络容量和变化的交通需求动态调整引导路径, 帮助行人做出决策, 降低网络拥塞的脆弱性, 提高出口利用的平衡性。该模型还可用于辅助管理人员布局场所, 提高疏散网络的灵活性, 辅助行人高效疏散。

参考文献

- [1] “A Robust Optimization Approach to Evacuation Planning in Subway Stations” by Chun-Yu Wu, Hong-Kun Wang, and Chang-Chun Lee (2019)
- [2] “A Crowd Simulation-Based Optimization Model for Subway Station Evacuation” by Chao Sun, Linting Guan, and Jin Xu (2019)
- [3] K.K. Huang, X.P. Zheng, Y. Cheng, Y.Q. Yang, Behavioral evolution in evacuation crowd based on heterogeneous rationality of small groups, *Appl. Math. Comput.* 266 (2015) 501 - 506.
- [4] M. Haghani, M. Sarvi, Z. Shahhoseini, B. Maik, Dynamics of social groups’ decisionmaking in evacuations, *Transport Res. C-Emer.* 104 (2019) 135 - 157.
- [5] 隋宇凡, 曲娜, 谭丽丽等. 地铁洪涝灾害人员疏散数值模拟及疏散优化研究 [J]. 防灾科技学院学报, 2023, 25(03): 29-38.
- [6] 钟茂华, 陈俊洋, 刘晓庆等. 地铁枢纽车站大客流疏散性能评估及策略优化研究 [J]. 中国安全生产科学技术, 2022, 18(07): 5-11.

基金项目:

西藏大学研究生“高水平人才培养计划”项目(2021-GSP-S144); 国家自然科学基金国际合作与交流项目《西藏居民出行公平与城市道路设计协调理论与方法研究》(5196 8063)

作者简介:

王静潇(1998—), 女, 硕士研究生, 研究方向: 为交通工程。

通信作者*: 易礼发(1998.8—), 男, 汉族, 重庆人, 硕士研究生在读, 研究方向: 道路基础设施。