

考虑乘客疏散效率的地铁换乘站应急疏散路径优化与仿真分析

褚画宜

中交（天津）轨道交通运营管理有限公司，天津 300201

DOI:10.61369/ME.2025060023

摘 要： 为提升地铁换乘站应急疏散效率，兼顾疏散时间、设施拥挤度与通行安全，本文围绕应急疏散路径优化与仿真展开研究。构建考虑乘客异质性的疏散优化模型，将换乘站物理空间抽象为无向加权图，建立“总疏散时间最短、平均拥挤度最低、总安全风险最小”的多目标数学模型，采用改进非支配排序遗传算法求解帕累托最优集，经理想点法筛选最优方案。搭建 1:1 仿真平台，设计“基准—单目标—多目标”三类对比场景。通过仿真分析验证优化效果，多目标场景平均疏散时间（222 秒）较基准（305 秒）缩短 27.2%，最大拥挤度（2.8 人 /m²）显著低于基准（5.2 人 /m²），安全事故发生率（0.8 次）降低 89.5%，出口客流分配标准差（4.8）体现均衡性；且多目标策略在鲁棒性与实用性上优于单目标策略。基于结果提出设施优化、标识引导、客流管控及场景化预案四类改进策略，为地铁换乘站应急疏散提供理论与实践支撑。

关 键 词： 地铁换乘站；应急疏散；路径优化；多目标优化

Optimization and Simulation Analysis of Emergency Evacuation Paths in Subway Transfer Stations Considering Passenger Evacuation Efficiency

Chu Huayi

CCCC (Tianjin) Rail Transit Operation and Management Co., Ltd., Tianjin 300201

Abstract： To enhance the emergency evacuation efficiency in subway transfer stations while balancing evacuation time, facility congestion, and passage safety, this paper focuses on the optimization and simulation of emergency evacuation paths. An evacuation optimization model that accounts for passenger heterogeneity is constructed, abstracting the physical space of the transfer station into an undirected weighted graph. A multi-objective mathematical model is established with the goals of minimizing total evacuation time, average congestion, and total safety risks. The Pareto optimal set is solved using an improved non-dominated sorting genetic algorithm, and the optimal solution is selected through the ideal point method. A 1:1 simulation platform is developed, and three types of comparative scenarios—"baseline," "single-objective," and "multi-objective"—are designed. Simulation analysis verifies the optimization effects: the average evacuation time in the multi-objective scenario (222 seconds) is 27.2% shorter than the baseline (305 seconds), the maximum congestion (2.8 persons/m²) is significantly lower than the baseline (5.2 persons/m²), the incidence of safety accidents (0.8 incidents) is reduced by 89.5%, and the standard deviation of exit passenger flow distribution (4.8) reflects improved balance. Additionally, the multi-objective strategy outperforms the single-objective strategy in terms of robustness and practicality. Based on the results, four categories of improvement strategies—facility optimization, signage guidance, passenger flow control, and scenario-based contingency plans—are proposed, providing theoretical and practical support for emergency evacuation in subway transfer stations.

Keywords： subway transfer station; emergency evacuation; path optimization; multi-objective optimization

引言

随着城市化进程加速，地铁已成为大城市公共交通的核心载体，而地铁换乘站作为多线路客流交汇的枢纽，其空间结构复杂、客流高度密集且乘客构成异质，在火灾、设备故障、极端天气等突发事件下，应急疏散的效率与安全性直接关系到乘客生命安全与城市交通

系统的稳定运行。当前地铁换乘站应急疏散研究已取得一定进展,但仍存在三方面关键问题亟待解决。针对这些问题,本文以提升地铁换乘站应急疏散的综合效能为核心目标,围绕“路径优化-仿真验证-策略改进”展开系统性研究。

一、考虑乘客疏散效率的应急疏散路径优化模型

(一) 疏散网络图论模型构建

地铁换乘站的物理空间可抽象为无向加权图构成的疏散网络,节点代表空间单元,边代表连接设施,权重为关键属性。节点分为起点、中转和终点,具有容量与类型属性;边包括通道边与设施边,核心属性为长度、通行速度、最大通行能力及安全风险系数。通行速度依据《地铁设计规范》及实测数据设定,如通道边中青年速度为1.4m/s、老年为0.8m/s,楼梯边下行0.7m/s、上行0.5m/s,闸机边统一为0.4m/s,且速度随客流密度增加而衰减。安全风险系数以实际客流强度与最大通行能力的比值划分, ≤ 0.6 为低风险, $0.6\sim 0.9$ 为中风险, >0.9 为高风险。网络构建流程包括,基于CAD图纸抽象节点与边,结合规范与调研赋值属性,验证连通性,最后通过Visio或Matlab绘制拓扑图,形成可用于疏散优化的网络模型。

(二) 多目标优化数学模型建立

多目标优化模型以提升疏散效率为核心,围绕总疏散时间最短、平均拥挤度最低和总安全风险最小三个目标构建,决策变量包括0-1变量(表示乘客是否选择某条边)和连续变量(描述某类乘客在某条边上的客流强度)。地铁应急疏散中,影响行人疏散效率的因素有很多,可以分为生理因素、心理因素、环境因素,这些因素影响整体的疏散时间、行人在疏散过程表现出的行为特征、路径选择等^[1]。总疏散时间最短目标通过最小化所有乘客路径时间之和实现,路径时间由各边通行时间累加并考虑客流密度影响;平均拥挤度最低目标通过控制所有边的客流强度与最大通行能力比值的平均值,实现设施负荷均衡;总安全风险最小目标则通过累加各边安全风险系数与对应客流强度的乘积,降低高风险区域客流压力^[2]。模型约束包括流量守恒(中转节点进出客流平衡)、设施容量(边客流不超过最大通行能力)、路径完整性(每类乘客仅选一条连续路径)及非负约束(变量取值合理)。

(三) 模型求解算法设计

多目标优化模型采用改进非支配排序遗传算法(NSGA-II)求解帕累托最优集,该算法高效且收敛快,适合换乘站疏散实时需求。针对疏散场景,改进包括混合编码(二进制表示边选择,实数表示客流分配比例)、适应度函数通过层次分析法加权(时间0.4、拥挤度0.3、安全0.3)转化为单目标、变异概率动态调整(初期0.1,后期0.02);算法流程为,初始化100个可行个体,进行非支配排序与拥挤度计算,通过锦标赛选择、单点交叉和变异操作生成子代,精英保留合并种群并筛选前100个体,迭代500次或目标收敛后输出帕累托集^[3]。采用理想点法选取与理论最优解欧氏距离最近的方案,算法验证通过小型网络测试误差 $<5\%$,参数敏感性分析确保稳定性(最优解变化 $<10\%$)。

二、地铁换乘站应急疏散仿真平台搭建与实验设计

(一) 换乘站仿真环境建模

换乘站仿真环境建模以“1:1还原物理空间、精准匹配设施属性”为核心,基于某市十字交叉式换乘站(地下3层、6个出入口)实际数据分三阶段完成^[4]。第一阶段为基础数据采集,通过现场调研、CAD图纸等获取物理尺寸(如1号线站台长120m、宽12m)、设施属性(24台闸机,每台通行能力15人/min)及客流数据(早高峰1号线站台密度4人/m²,乘客类型占比青年65%、老年15%、携带行李者20%),校验后形成标准化表格。第二阶段为几何模型构建,在AnyLogic中按分层建模逻辑建立地下3层至地面层的几何模型,导入CAD图纸校准尺寸,构建楼梯、通道等连接设施的空间关联,添加疏散标识(5m范围触发识别)和应急广播(站厅全域覆盖、通道半径8m),还原应急引导条件^[5]。第三阶段为设施属性赋值与逻辑关联,将图论模型中的边属性转化为仿真参数(如楼梯下行速度0.7m/s,密度 >3 人/m²时衰减至0.8倍;闸机通行时间4s,排队 >5 人时开启备用闸机),并建立“边-设施”映射,确保优化路径与仿真逻辑统一。

(二) 乘客行为模型参数化

乘客行为参数化基于“个体异质-群体互动”双维度,通过“现场观测-文献校准-敏感性验证”量化行为参数^[6]。个体行为参数通过早高峰视频观测统计,青年、老年、携带行李者的基准移动速度分别为1.2-1.5m/s、0.6-0.9m/s、0.8-1.0m/s,速度随密度增加线性衰减;反应时间青年2-3秒、老年5-7秒、携带行李者4-6秒;标识识别率青年90%、老年60%,应急照明下均下降15-20个百分点,老年对标识依赖度更高。群体行为参数量化三类互动,跟随行为(青年概率70%、老年85%,随群体规模增大而提升);避让行为(避让距离0.3-0.5m,速度降低30%,逆行避让概率95%);拥挤应对(密度 >4 人/m²时,青年60%寻找替代路径,老年仅30%,拥挤超10秒恐慌系数上升)^[7]。参数通过历史演练数据校准,仿真与实际误差需 $<8\%$,否则调整敏感参数直至吻合,确保行为模型可靠性。

(三) 仿真实验方案设计

仿真实验以验证优化路径有效性为核心,采用“基准-优化”对比框架设计三类场景,基准场景(就近选择路径)、单目标优化场景(仅时间最优)、多目标优化场景(时间-拥挤-安全均衡)^[8]。初始条件统一为800人(1号线站台384人、2号线336人、站厅80人),突发事件触发于1号线站台中部(10秒后关闭1个出入口),仿真时长10分钟。观测指标包括平均疏散时间(效率)、最大拥挤度(安全)、安全事故发生率(隐患)及出口客流分配均匀度(均衡性),实验通过10次独立仿真(随机微调初始位置)、 3σ 原则剔除异常值、t检验($p < 0.05$ 为显著)验证优化效果,并绘制对比图。补充参数敏感性实验(调整速度 $\pm 10\%$ 、密度 $\pm 15\%$),若指标变化 $<12\%$ 则路径鲁棒性良好,

确保结论普适性。

三、仿真结果分析与策略讨论

（一）仿真结果可视化展示

仿真结果通过四类图表直观呈现三类场景差异，疏散流线图以彩色箭头标识乘客轨迹（青年蓝、老年橙、携带行李者绿），箭头粗细反映客流强度^[9]。基准场景中1号线站台乘客集中涌向两端楼梯，流线密集交织；单目标场景部分客流向扶梯，但仍70%集中于1号楼梯；多目标场景流线均衡分布，各出入口密度差异<20%，老年与携带行李者优先避开高客流区。客流密度热力图以红（>4人/m²）、黄（2-4人/m²）、绿（<2人/m²）呈现密度分布，触发后90秒时，基准场景楼梯口与通道呈深红色（5.2人/m²），单目标场景红色区域缩小，多目标场景仅小范围黄色（2.8人/m²），事故点周边密度下降最快（比基准快45秒）。疏散时间序列图显示，基准场景曲线“先快后慢”，最终完成时间320秒；单目标场景280秒；多目标场景接近线性增长，完成时间仅220秒，各类型乘客疏散时间差显著缩小（老年与青年差25秒，基准40秒）^[10]。出口客流分配饼图表明，多目标场景各出口占比均匀（1号22%、2号19%等），标准差仅4.8，避免单一出口过载，体现优化路径的均衡性。

（二）量化指标对比分析

基于10次重复仿真的均值数据，四类核心指标量化对比显示，平均疏散时间方面，基准场景最长（305秒），因客流集中导致节点拥堵；单目标场景缩短至268秒，但闸机拥堵仍存；多目标场景通过客流分散与优先疏散事故点，时间缩短至222秒，提升27.2%，且各类型乘客时间差异控制在25秒内，体现公平性。最大拥挤度方面，基准场景峰值5.2人/m²（严重拥挤），单目标场景降至4.5人/m²，多目标场景仅2.8人/m²，所有设施客流强度未超最大通行能力80%，通行速度保持0.5m/s以上。安全事故发生率方面，基准场景平均8.6次（集中于楼梯与通道交汇处），单目标场景5.2次，多目标场景仅0.8次（均为轻微停滞），因客流分散与避让优化减少碰撞。出口客流分配均匀度方面，基准场景标准差10.2（1号出口负荷140%，6号仅48%），单目标场景8.5，多目标场景4.8，所有出口负荷控制在80%-110%之间，实现资源均衡利用。多目标优化场景在效率、安全、均衡性上均显著优于其他场景。

（三）优化策略有效性评估

多目标优化路径策略（时间-拥挤-安全均衡）从效率、安全、鲁棒性、实用性四维度评估显著优于单目标策略，效率上，

多目标策略平均疏散时间比基准缩短27.2%，虽比单目标策略多14秒，但疏散增速更稳定（1.2%/秒 vs 单目标0.5%/秒），且异质乘客时间缩短更均衡（老年31.1% vs 单目标18.7%）；安全上，多目标策略事故发生率降低89.5%，通过客流分散与路径引导实现“双重预防”，而单目标策略事故率仍高（为多目标的6.5倍）；鲁棒性上，参数波动（速度±10%、密度±15%）下多目标指标变化<12%，抗干扰能力强；单目标变化达15%-25%；实用性上，多目标策略仅需调整路径引导（成本<设施扩建的15%），可基于现有监测系统实时动态调整，单目标需扩建设施（如新增闸机），成本高、周期长。单目标策略存在安全风险高、资源利用率低、鲁棒性差三大局限，仅适用于小客流场景；多目标策略更适配大客流、高安全需求的换乘站应急疏散。

（四）基于仿真结果的策略改进与讨论

针对地铁换乘站应急疏散的薄弱环节，提出四类改进策略，设施优化聚焦瓶颈节点（如1号线楼梯、站厅闸机），通过增设分流护栏、应急门及拓宽通道提升通行能力，改造周期短且成本低；标识与引导策略适配异质乘客，增设高亮度标识、分层广播及动态电子标识，快速提升老年乘客识别率与路径响应效率；客流管控实现动态均衡，提前提示推荐路径、事故时延迟非事故站台疏散并为老年设优先通道，依托现有系统升级即可实施；应急预案强化场景化，按事故类型、位置及客流规模编制12类预案，结合虚拟演练优化参数并普及乘客路径识别。未来可扩展至灾害耦合场景（如与FDS协同模拟“疏散-烟气”路径）、多突发事件优化及5G个性化导航。实施遵循“因地制宜、成本可控、安全优先”原则，优先低成本措施，逐步推进设施改造，最终实现“效率-安全-成本”均衡优化。

四、结束语

本文围绕地铁换乘站应急疏散的“效率-安全-均衡”协同目标，系统性开展了路径优化模型构建、仿真平台搭建与策略改进研究，有效解决了当前疏散研究中单一目标局限、仿真与优化割裂、乘客异质性考虑不足等关键问题，形成了“模型求解-仿真验证-策略落地”的完整研究链条。地铁换乘站作为城市交通的“生命线枢纽”，其应急疏散能力直接关系到公共安全与城市韧性。本文的研究成果可为地铁运营单位的应急路径规划、仿真演练与设施改造提供理论依据与技术支撑，助力构建“安全优先、效率协同、成本可控”的地铁应急疏散体系，为保障乘客生命安全、提升城市轨道交通系统应急管理水平提供有力保障。

参考文献

- [1] 付红飞. 地铁换乘站应急疏散方案研究——以广济南路为例 [D]. 中国矿业大学, 中国矿业大学 (江苏), 2021.
- [2] 朱高祥. 城市轨道交通换乘站行人疏散时间优化模型 [D]. 陕西: 长安大学, 2018.
- [3] 张晋. 地铁车站火灾对早高峰人员疏散影响及对策研究 [D]. 北京: 北京工业大学, 2020.
- [4] 尹渊. 地铁换乘站火灾模拟与应急疏散研究 [D]. 中国矿业大学, 中国矿业大学 (江苏), 2024.
- [5] 李世海. 重庆市地铁换乘站大客流应急疏散模拟与风险管控 [D]. 重庆: 重庆大学, 2022.
- [6] 孔雪艳. 突发事件下地铁换乘站行人应急疏散模型研究 [D]. 江苏: 南京理工大学, 2022.
- [7] 蔡炜垚. 地铁交叉换乘站火灾烟流调控机理与应急疏散研究 [D]. 中国矿业大学, 中国矿业大学 (江苏), 2022.
- [8] 张瑞. 考虑引导因素的地铁换乘站火灾疏散模型研究 [D]. 辽宁: 沈阳建筑大学, 2022.
- [9] 王子柏. 地铁车站火灾的乘客应急疏散策略研究 [D]. 黑龙江: 哈尔滨工业大学, 2024.
- [10] 王海燕. 李村地铁站人员应急疏散模型构建与仿真优化 [D]. 山东: 山东科技大学, 2020.